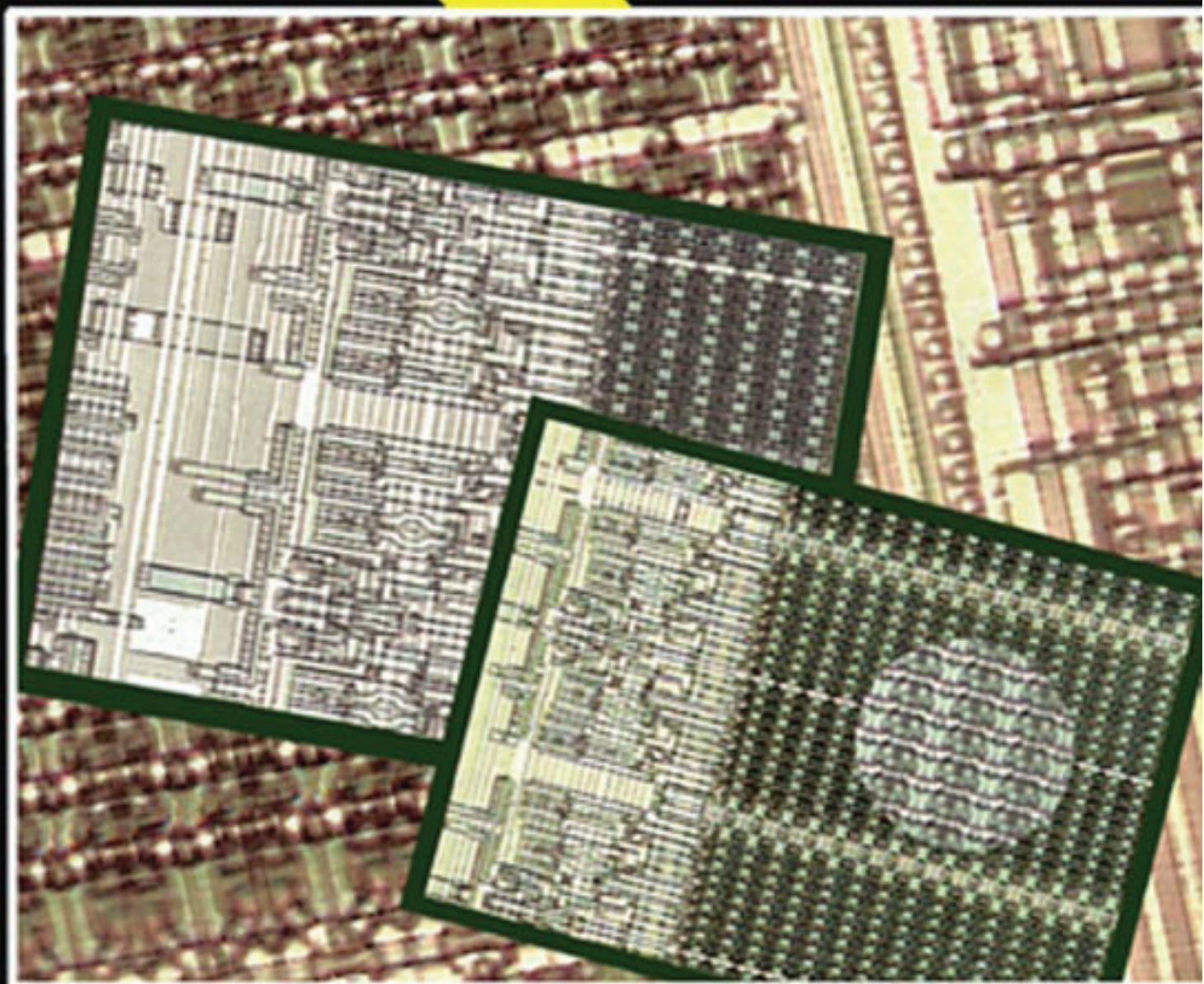


ТРА

ТЕХНОЛОГИЯ И
КОНСТРУИРОВАНИЕ В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ



3 2002

МАЙ — ИЮНЬ

ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Учредитель АО "Нептун"

(Министерство промышленной политики Украины)

2002

Год издания 26-й

Год регистрации 1992

№ 3

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д. т. н. А. Л. Вайнер
К. т. н. П. П. Воробийченко
Д. т. н. Ю. А. Долгов
Д. ф.-м. н. В. А. Дроздов
К. т. н. И. Н. Еримичой, зам. гл. редактора
К. т. н. А. А. Ефименко, зам. гл. редактора
Д. ф.-м. н. А. Н. Золотко
К. т. н. В. В. Зубарев
Д. ф.-м. н. Ф. Д. Касимов
Л. М. Лейдерман, отв. секретарь редакции
Д. т. н. С. В. Ленков, гл. редактор
Д. т. н. С. Ю. Лузин
К. т. н. В. Г. Лукомский
Д. т. н. В. П. Малахов
В. А. Мингалев
К. т. н. В. Ф. Моисеев
К. т. н. Ю. Е. Николаенко
Д. ф.-м. н. В. В. Новиков
К. э. н. Е. А. Пархоменко
К. т. н. В. И. Попов
К. т. н. В. В. Рюхтин
Д. т. н. Д. А. Сеченов
К. т. н. В. В. Сибиряков
Д. т. н. В. А. Сокол
К. т. н. В. Б. Ткаченко, шеф-редактор
Д. ф.-м. н. О. И. Шпотьук

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ ОФОРМЛЯЕТСЯ
В ОТДЕЛЕНИЯХ СВЯЗИ
(ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 71141)
И ЧЕРЕЗ РЕДАКЦИЮ

АДРЕС РЕДАКЦИИ
Украина, 65005, Одесса-5,
ул. Прохоровская, 45
Тел. (+38-048) 733-72-83
Тел./факс (+38-048) 733-67-91
E-mail: tkea@odessa.net
Web-сайт: tkea.wallst.ru

Регистрационный номер
КВ 2092 от 07.06.96 г.
Регистрация в ВАК:
Бюллетень ВАК Украины,
1999, № 4

Номер подготовлен
по заказу
Министерства
промышленной
политики
Украины

Ответственные за выпуск
К. т. н. Николаенко Ю. Е.
К. т. н. Вербицкий В. Г.

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы для микроэлектроники

Исследование контакта «металл—полупроводник на основе HgMnTe». *Л. А. Косяченко, А. В. Марков, С. Э. Остапов, И. М. Раренко*

3

Ультрадисперсные субфазы в молекулярной электронике. *В. В. Ковальчук*

6

Функциональная микроэлектроника

Микрочиповые лазеры. *А. О. Матковский, И. М. Сыворотка, С. Б. Убизский, С. С. Мельник, Н. М. Вакив, И. И. Ижнин*

15

Контурные тепловые трубы с алюминиевым испарителем для комбинированных систем охлаждения РЭА. *Ю. Е. Николаенко, Б. М. Рассамкин, С. М. Хайрнасов*

22

Энергетическая микроэлектроника

Получение тандемных гетероструктур GaAs—InGaAs—AlGaAs для фотопреобразователей солнечной энергии. *Ю. Е. Николаенко, С. И. Круковский, И. Р. Завербный, О. В. Рыбак, И. А. Мрыхин*

27

Сенсоелектроника

Методика проектирования элементов прецизионного датчика давления с пневмомеханическим резонатором. *Н. Г. Черняк, А. Н. Бондаренко, С. И. Петровский*

30

Датчики Холла на основе структур GaAs, полученных низкотемпературной ЖФЭ из расплавов Bi. *Н. М. Вакив, С. И. Круковский, И. Р. Завербный, И. А. Мрыхин*

34

Новое технологическое оборудование для микроэлектроники

Диодные реакторные системы микротравления. *В. И. Фареник*
Оборудование для зондовой диагностики и контроля плазменных технологических процессов. *С. В. Дудин, А. П. Яцков, В. И. Фареник*

43

Интегральные схемы и полупроводниковые приборы

Однокристалльная микро-ЭВМ для систем с высокоразвитыми локальными сетями. *В. Г. Вербицкий, Г. П. Липовецкий, Л. В. Проценко, П. В. Сивобород*

51

Энергонезависимая память на элементах FLOTOX для БИС электронных карт. *В. П. Сидоренко, В. Н. Сидорчук, О. Н. Забродина, Ю. Е. Николаенко*

57

Оптимизация уровня безотказности в сложных устройствах микроэлектроники. *Б. П. Креденцер, С. В. Ленков, Р. А. Салимов, Д. А. Перегудов, С. А. Шомин*

62

Выставки. Конференции. Симпозиумы

14, 29, 50, 56, 64

СПЕЦІАЛЬНИЙ НОМЕР

за результатами виконання робіт у межах міжгалузевої науково-технічної Програми розвитку найбільш конкурентоспроможних напрямків мікроелектроніки в Україні

СПЕЦИАЛЬНЫЙ НОМЕР

по результатам выполнения работ в рамках межотраслевой научно-технической Программы развития наиболее конкурентоспособных направлений микроэлектроники в Украине

ЗМІСТ

Матеріали для мікроелектроніки

Дослідження контакту «метал—напівпровідник на основі HgMnTe». Л. А. Косяченко, А. В. Марков, С. Е. Остапов, І. М. Раренко (3)

Ультрадисперсні субфази в молекулярній електроніці. В. В. Ковальчук (6)

Функціональна мікроелектроніка

Мікрочіпові лазери. А. О. Матковський, І. М. Сиворотка, С. Б. Убізький, С. С. Мельник, М. М. Ваків, І. І. Іжнін (15)

Контурні теплові труби з алюмінієвим випаровувачем для комбінованих систем охолодження РЕА. Ю. С. Ніколаєнко, Б. М. Расамакін, С. М. Хайрмасов (22)

Енергетична мікроелектроніка

Отримання тандемних гетероструктур GaAs—InGaAs—AlGaAs для фотоперетворювачів сонячної енергії. Ю. С. Ніколаєнко, С. І. Круковський, І. М. Завербний, О. В. Рибак, І. О. Мрихін (27)

Сенсоелектроніка

Методика проектування елементів прецизійного датчика тиску з пневмомеханічним резонатором. М. Г. Черняк, О. М. Бондаренко, С. І. Петровський (30)

Датчики Холла на основі структур GaAs, отриманих низькотемпературною РФЕ з розплавів Ві. М. М. Ваків, С. І. Круковський, І. Р. Завербний, І. О. Мрихін (34)

Нове технологічне обладнання для мікроелектроніки

Діодні реакторні системи мікротравлення. В. І. Фареник (38)

Устаткування для зондової діагностики та контролю плазових технологічних процесів. С. В. Дудін, А. П. Яцков, В. І. Фареник (43)

Інтегральні схеми і напівпровідникові прилади

Однокристальна мікроЕОМ для систем з високорозвинутими локальними мережами. В. Г. Вербицький, Г. П. Липовецький, Л. В. Проценко, П. В. Сивобород (51)

Енергонезалежна пам'ять на елементах FLOTOX для ВІС електронних карт. В. П. Сидоренко, В. М. Сидорчук, О. М. Забродіна, Ю. С. Ніколаєнко (57)

Оптимізація рівня безвідмовності в складних пристроях мікроелектроніки. Б. П. Креденцер, С. В. Ленков, Р. А. Салімов, Д. О. Перегудов, С. А. Шомін (62)

CONTENT

The materials for microelectronics

The investigations of contact of metall—semiconductor on the base on HgMnTe. Kosyachenko L. A., Markov A. V., Ostapov S. E., Rarenko I. M. (3)

Ultra disperse subphases in molecular electronics. Kovalchuk V. V. (6)

The functional microelectronics

Microchip lasers. Matkovskii A. O., Syvorotka I. M., Ubizskii S. B., Melnyk S. S., Vakiv N. M., Izhnin I. I. (15)

The loop heat pipes containing aluminium evaporators used in combined cooling systems of the radio electronic equipment. Nikolajenko Yu. E., Rassamakhin B. M., Hayrnasov S. M. (22)

The power microelectronics

Reception tandem heterostructures for photoconverters of a solar energy. Nikolajenko Yu. E., Krukovsky S. I., Zaverbny I. R., Rybak O. V., Mrykhin I. A. (27)

The sensoelectronics

The project technique of precision pressure sensor with pneumomechanical resonator. Chernyack N. G., Bondarenko A. N., Petrovsky S. I. (30)

Gauges of a hall on the basis of structures GaAs received low temperatures LPE from Bi-melts. Vakiv N. M., Krukovsky S. I., Zaverbny I. R., Mryhin I. A. (34)

The new technological equipment for microelectronics

Diode-reactor systems of a microetching. Farenik V. I. (38)

Equipment for probe diagnostics and control of plasma technology processes. Dudin S. V., Jatskov A. P., Farenik V. I. (43)

The integrated circuits and semiconductor devices

A single-chip microcomputer for advanced local nets. Verbitsky V. G., Lipovetsky G. P., Protsenko L. V., Sivoborod P. V. (51)

The FLOTOX cell nonvolatile memory is base of smart cards LSI. Sidorenko V. P., Sidorchuk V. N., Zabrodina O. N., Nikolajenko Yu. E. (57)

Level's optimization of non-failure operation in complex devices of microelectronics. Kredentser B. P., Lenkov S. V., Salimov R. A., Peregudov D. A., Shomin S. A. (62)

Д. ф.-м. н. Л. А. КОСЯЧЕНКО, А. В. МАРКОВ,
к. ф.-м. н. С. Э. ОСТАПОВ, д. ф.-м. н. И. М. РАПЕНКО

Украина, Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича
E-mail: ostap@chv.ukrpack.net

Дата поступления в редакцию
15.11 2001 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Е. М. СЕМАШКО
("Сатурн-Микро", г. Киев)

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТА «МЕТАЛЛ — ПОЛУПРОВОДНИК НА ОСНОВЕ HgMnTe»

Проведено последовательное моделирование структуры металла с узкозонным полупроводником с учетом особенностей, присущих данному классу материалов.

Приборы, основанные на использовании явлений на контакте "металл—полупроводник", широко применяются для детектирования ИК-излучения в оптическом диапазоне электромагнитного излучения, выделения и преобразования высокочастотных колебаний, создания высокочастотных модуляторов и т. д. Такое широкое применение можно объяснить существенными отличиями диодов Шоттки от p — n -переходов. В частности, ток в диоде Шоттки переносится основными носителями, вследствие чего практически отсутствует эффект накопления неосновных носителей, который может сказываться только при очень высоких частотах. Немаловажным является и то, что диодные структуры на контакте "металл—полупроводник" гораздо технологичнее.

Теория контакта "металл—полупроводник" применительно к структурам на основе узкозонных полупроводников типа $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (КРТ) разработана явно недостаточно. Кроме того, поверхностные свойства КРТ недостаточно стабильны для внедрения приборов с контактами Шоттки на этом материале в производство. Более стабильными поверхностными и кристаллическими свойствами обладают многокомпонентные твердые растворы, в которых ионы Cd заменяются, частично или полностью, ионами других элементов. Наиболее успешно себя зарекомендовали марганецсодержащие тройные и четверные твердые растворы $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ (МРТ) и $\text{Hg}_{1-x-y}\text{Cd}_x\text{Mn}_y\text{Te}$. Введение марганца в кристалл, вследствие большей близости ионных радиусов Mn и Hg, позволило сделать более стабильной и совершенной структуру кристалла и, что особенно важно в данном случае, улучшить его поверхностные свойства. Использование HgCdMnTe и HgMnTe в качестве материала для быстродействующих детекторов ИК-излучения, которыми и являются диоды Шоттки, может стимулировать дальнейшие разработки в этом направлении.

В данной работе сделана попытка последовательного моделирования структуры металла с узкозонным полупроводником с учетом особенностей, присущих данному классу материалов.

Распределение объемного заряда и напряженности электрического поля в контакте "металл—узкозонный полупроводник"

Рассмотрим контакт узкозонного полупроводника n -типа с концентрацией доноров N_d при $x > 0$ и металла при $x < 0$ (см. рис. 1). Будем считать промежуточный диэлектрический слой, который образуется на поверхности полупроводника после обработки, достаточно тонким, чтобы его можно было рассматривать туннельно прозрачным.

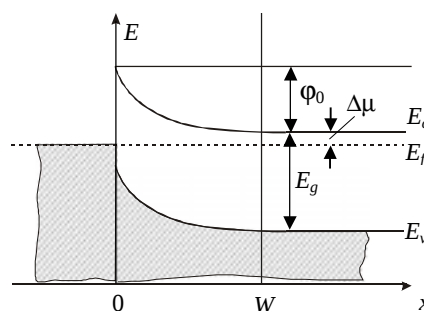


Рис. 1. Модель контакта "металл—полупроводник n -типа", используемая в расчетах

В случае широкозонного полупроводника концентрация свободных носителей резко уменьшается при $x = W$. Поэтому считаем плотность объемного заряда постоянной, равной $-eN_d$ для полупроводника n -типа и eN_a — для полупроводника p -типа. В случае узкозонного полупроводника (как и для p — n -перехода в узкозонном полупроводнике) это не справедливо [1]. Поэтому для расчета действительного распределения объемного заряда, потенциала и напряженности электрического поля необходимо решить уравнение Пуассона, аналогично тому, как это было сделано в [2] для p — n -перехода:

— для полупроводника n -типа

$$\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} = \frac{e^2[N_d - n(x) + p(x)]}{\epsilon\epsilon_0}, \quad (1)$$

— для полупроводника p -типа

$$\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} = -\frac{e^2[N_a - p(x) + n(x)]}{\epsilon\epsilon_0}, \quad (2)$$

где $\varphi(x)$, $n(x)$ и $p(x)$ — локальные значения потенциальной энергии, концентрации электронов и дырок, соот-

ветственно; N_d и N_a — концентрации доноров и акцепторов. Остальные обозначения традиционны.

Для барьера Шоттки уравнения (1) или (2) для напряженности электрического поля $F(x)$ и потенциала $\phi(x)$ решались методом Рунге—Кутты как система дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\frac{1}{e} \frac{d\phi}{dx} = F(x, \phi); \quad (3)$$

$$\frac{dF}{dx} = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} Q(x, \phi). \quad (4)$$

Считалось, что высота барьера определяется не работой выхода из металла, а поверхностными состояниями. Положение уровня Ферми в глубине полупроводника вычислялось из уравнения электронейтральности для заданного значения N_d или N_a . Все расчеты выполнялись для 77 К, поскольку детекторы ИК-излучения на основе данных материалов работают именно при температуре жидкого азота.

Результаты расчетов плотности объемного заряда в барьере Шоттки на основе МРТ показаны на **рис. 2**. Видно, что "классические" черты распределения заряда не соблюдаются: практически нет участка постоянства заряда, а переходная область с переменным зарядом занимает почти всю область обеднения.

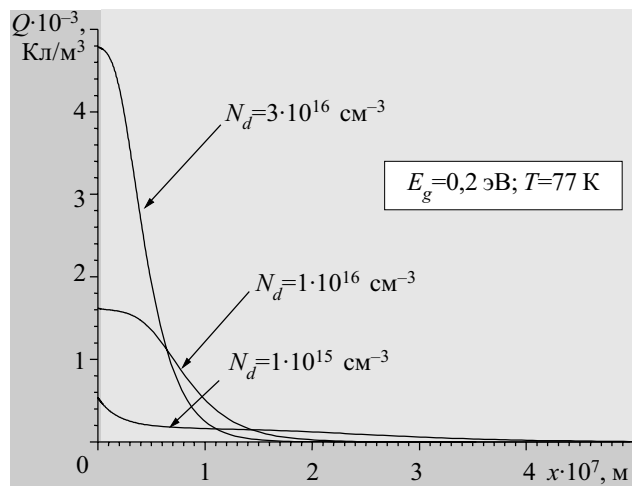


Рис. 2. Распределение плотности заряда в контакте Шоттки на основе МРТ

Так же нестандартно ведет себя и напряженность электрического поля (**рис. 3**). Если при малой концентрации носителей еще можно приближенно допустить линейность $E(x)$, то уже при $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ кривая далека от линейной зависимости. Необходимо отметить, что используемые при расчетах концентрации свободных носителей являются обычными для узкозонных полупроводников типа КРТ или МРТ, поэтому ситуация близка к реальной.

При изменении высоты барьера на контакте узкозонного полупроводника с металлом распределение заряда демонстрирует иные особенности. На **рис. 4** показано распределение плотности заряда для разной высоты потенциального барьера. Видно, что при высоте барьера $\phi_0 = 0,08 \text{ эВ}$ наблюдается резкий «всплеск» плотности заряда в приконтактной облас-

ти, что свидетельствует об образовании там инверсного слоя. Следует подчеркнуть, что столь высокий барьер может образовываться в реальных диодах Шоттки на основе МРТ.

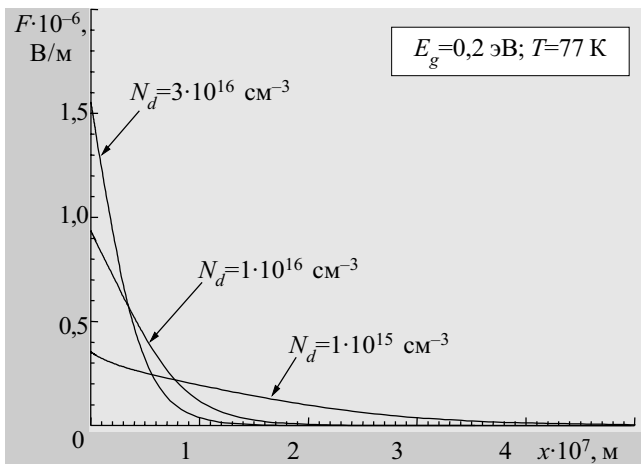


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля в контакте Шоттки для МРТ

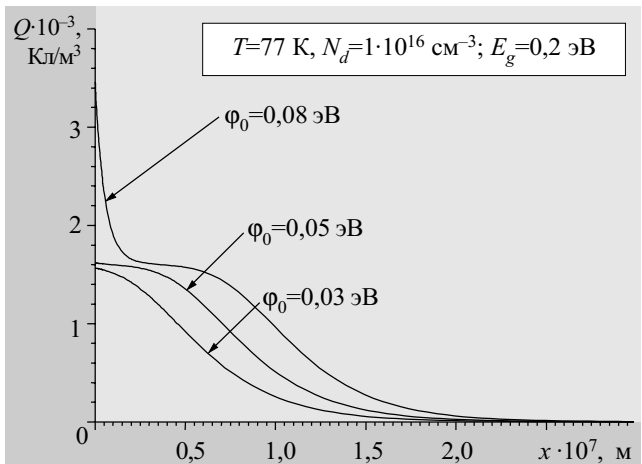


Рис. 4. Распределение плотности заряда в МРТ для разной высоты барьера

Представленные результаты расчета на примере барьера Шоттки в МРТ свидетельствуют о том, что механическое перенесение модели барьера для широкозонного полупроводника на узкозонный не всегда корректно. Особенно это касается процессов, которые зависят от распределения плотности заряда, напряженности электрического поля и потенциала в обедненной области, т. е. процессов туннелирования, токопереноса, емкости и др.

Моделирование токопереноса в барьере Шоттки на основе HgMnTe

Используя рассчитанные распределения плотности заряда, потенциала и напряженности электрического поля, обратимся к механизмам прохождения тока в контакте "металл—узкозонный полупроводник". Как и для p — n -перехода [2], моделирование проводилось для генерационно-рекомбинационного, диффузионного и туннельного токов. Для расчетов генерационно-рекомбинационного тока применялась модель

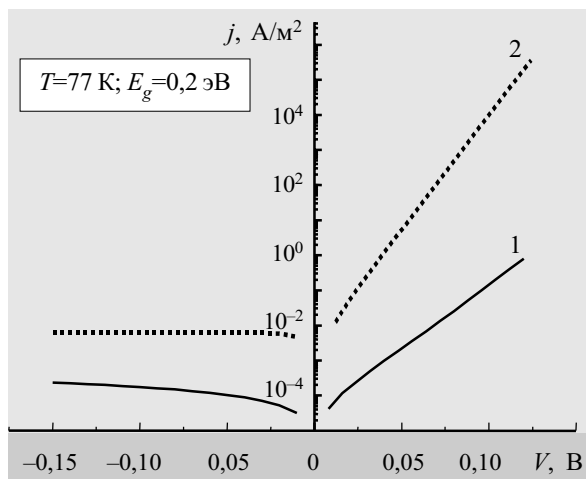


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики для генерационно-рекомбинационного тока (1) в сравнении с диффузионным (2) для контакта Шоттки на основе МРТ

Саа—Нойса—Шокли, диффузионный ток рассчитывался с использованием модели Кроуэлла—Зи, а туннельный — в приближении Вентцеля—Крамера—Бриллюэна [3, 4].

Результаты вычислений диффузионного тока в сравнении с генерационно-рекомбинационным показаны на **рис. 5**. Как видно из рисунка, генерационно-рекомбинационный ток существенно меньше диффузионного, т. е. токи в контакте Шоттки данного типа материалов не могут определяться явлениями генерации и рекомбинации.

Что касается обратной ветви, то в эксперименте наблюдаются значения, большие даже диффузионного тока. Это позволяет предположить, что при обратных смещениях основную роль играет туннелирование зарядов через барьер и лавинное умножение. Поскольку лавинное умножение играет основную роль при относительно больших обратных смещениях, туннельный ток будем учитывать в области $0—0,2$ В.

Результаты расчетов обратной ветви ВАХ для туннелирования в сравнении с экспериментом показаны на **рис. 6**. Видно, что вблизи $V=0$ теоретические расчеты хорошо совпадают с экспериментом. При смещениях, больших $-0,2$ В, теоретическая кривая также приближается к экспериментальным данным. Однако в диапазоне смещений $V=0,02—0,2$ В согласование теории с экспериментом трудно назвать хорошим. Поэтому в дальнейших расчетах был учтен эффект сил зеркального изображения, возникающих в таких условиях в контакте "металл—полупроводник". Из рисунка видно, что с учетом влияния сил изображения теоретические расчеты хорошо совпадают с экспериментальными данными во всем диапазоне напряжений обратного смещения.

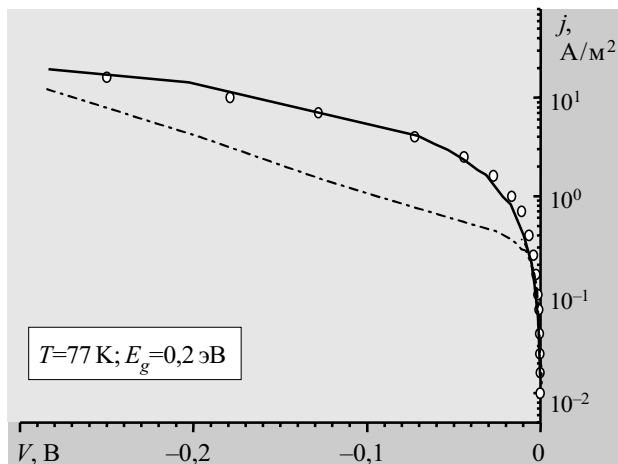


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика диода Шоттки при обратном смещении (○ — эксперимент, штрихпунктирная линия — без учета сил изображения, сплошная — с учетом влияния сил изображения)

Выводы

На основе обобщенной модели контакта "металл—полупроводник" рассмотрено распределение потенциала, плотности заряда и напряженности электрического поля в контакте "металл—узкозонный полупроводник типа КРТ". Показано, что малая ширина запрещенной зоны и большое различие между эффективными массами дырки и электрона приводит к нестандартным соотношениям для указанных величин.

Моделирование токопрохождения в контакте "металл—узкозонный полупроводник" в рамках данной модели позволяет утверждать, что основную роль при прямом смещении играет диффузионный ток, а при обратном — туннельный (в области малых смещений, когда лавинные процессы не проявляются). Учет влияния сил зеркального изображения на обратные токи в диоде Шоттки на основе МРТ позволяет получить хорошее совпадение теоретических расчетов с экспериментальными данными.

Результаты могут быть использованы для расчетов параметров детекторов инфракрасного излучения в диапазонах $3—5$ и $8—14$ мкм.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Косяченко Л. А., Раренко И. М., Марков А. В., Остапов С. Э. Особенности электрических характеристик n^+ — p -перехода на основе узкозонных полупроводников // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2001. — № 3. — С. 11—14.
2. Косяченко Л. А., Марков А. В., Остапов С. Э., Раренко И. М. Генерационно-рекомбинационные и диффузионные токи в n^+ — p -переходах HgMnTe // ФТП. — 2001. — Т. 35, № 11. — С. 1326—1334.
3. Пикус Г. Е. Основы теории полупроводниковых приборов. — М.: Наука, 1965.
4. Sze S. M. Physics of semiconductor devices. — New York: Wiley-Interscience, 1981. (Зи С. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Мир, 1984.)

К. ф.-м. н. В. В. КОВАЛЬЧУК

Украина, г. Одесса, Южно-украинский гос. педагогический
ун-т им. К. Д. Ушинского
E-mail: wladik@tekom.odessa.ua

Дата поступления в редакцию
18.12.2001 г.

Оппонент д. т. н. В. А. МАЗУР
(ОГАС, г. Одесса)

УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЕ СУБФАЗЫ В МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Обзор посвящен систематизации результатов исследований механизмов возникновения, формирования и существования ультрадисперсных субфаз в твердотельной матрице.

Микроэлектроника постепенно превращается в субмикронную электронику — наноэлектронику или, как ее определяют авторы [1], *молекулярную электронику* (МОЭ). Сегодня уже очевидно, что МОЭ способна завоевать ключевые позиции в технологии электронного приборостроения XXI столетия.

Успех развития МОЭ основывается на продвижении инженерной технологии в область субмикронных пространственных масштабов и фемтосекундных отрезков времени, что открывает широкие перспективы развития совершенно иных — нанометровых технологий: нанооптики, нанолитографии, нанолокальной спектроскопии [2, 3]. С другой стороны, практика использования МОЭ позволит создать т. н. квантоворазмерные структуры: нульмерные — квантовые точки (КТ), одномерные — квантовые нити, квантовые проволоки, двумерные — легированные поверхностные структуры с квантовыми ямами, и другие системы, геометрические размеры которых определяются нанометрами (наноиглы, наноотверстия, нанотрубки и др.), т. е. *наноструктуры* (НС).

Пока существующие методы промышленного производства не позволяют создавать интегральные схемы нанометрового диапазона (ИС на основе НС — *ИНСы*), тем не менее интенсивно развивающаяся нанофизика поднимает на поверхность целый ряд качественно новых проблем электронного приборостроения, решение которых основывается на выяснении поведения и свойств отдельных НС, молекул, и даже атомов. В этой связи интенсивно исследуются, как теоретически, так и экспериментально, квантово-размерные структуры [4—6], и особое внимание здесь уделяется определению физико-химических свойств атомарных кластерных соединений (АКС) [7—9].

Например, для изготовления СБИС нового поколения (т. е. ИНСов) потребуются достаточно миниатюрные составляющие, а именно, такие элементы, которые созданы из полупроводниковых слоев (*p*-, *n*-типа) и диэлектрика размером в несколько нм [6]. Ре-

ализация такого высокого уровня миниатюризации приборов МОЭ разительно изменит возможности ЭВМ.

Многие вопросы современного электронного приборостроения определяются возможностью разрешения проблем транспорта и туннелирования носителей тока через квантово-размерные структуры, гранулированные НС и др. [10, 11]. Квантово-размерные структуры, проявляя эффекты квантовых ограничений, в свою очередь, определяют квантовые эффекты кластеризованных материалов (КМ) [12—14]. Другим и, на наш взгляд, очень важным аспектом МОЭ является то, что управление функциональными возможностями электронных приборов такого класса будут осуществлять носители тока, атомы, молекулы и АКС.

Особый интерес вызывает тот факт, что одно из передовых “электронных” государств мира — Япония в 1992 году предложила (сроком на 10 лет) и реализует специальный международный проект “Атомная технология” с общим объемом финансирования в 250 млн. долларов США [4]. Ключевыми определены следующие вопросы: 1) селективное исследование атомных поверхностных слоев Si(111) 7×7 с помощью сканирующей электронной микроскопии; 2) разработка специальной технологической методики “селекции” по геометрическим размерам Si-АКС; 3) селективное эпитаксиальное наращивание нанометровых Si-АКС с использованием тонких оксидных окон размером в 0,3 нм и др.

Важно отметить, что ежегодно публикуется свыше 5000 технических и научных статей, затрагивающих вопросы “кремниевой” проблематики (см. библиогр. [6, 7]). И тем не менее получаемой информации недостаточно. Это связано, во-первых, с тем, что большинство исследований подчинено определению свойств объемного материала, т. е. таких объектов, которые имеют относительно большие геометрические размеры (микрон и более). При переходе от макро- к микрометровой шкале свойства материала изменяются несущественно. Поэтому физика электронного приборостроения в микронном диапазоне почти аналогична макроскопической физике (т. е. физике непосредственного наблюдения за объектом).

Таким образом, результаты поиска новейшей информации относительно свойств Si-НС становятся актуальными в определении новых сфер их применения в электронном приборостроении. При этом следует добавить, что выявление функциональных оптических возможностей кремниевого ЧИПа (ИНСа) — это дополнительный и весьма немаловажный стимул

Автор благодарит проф. В. А. Дроздова за ряд ценных замечаний, высказанных в процессе подготовки рукописи к печати.

к решению проблем электронного материаловедения. Технологическая интеграция оптически функционирующих элементов на основе Si-AKC в значительной степени может быть достигнута с помощью т. н. прямозонных полупроводниковых компонент.

Поскольку и *c*-Si, и *a*-Si имеют малую эффективность лучеиспускательной рекомбинации, считалось, что для создания излучателей света сами по себе эти материалы являются непригодными. Фундаментальные причины этого кроются не только в прямом характере структуры зон, но также в пространственном разделении и локализации заряда.

В 1990-е годы, в связи с продвижением в развитии нанометровых технологий, ситуация коренным образом изменилась. Группа японских физиков выявила в *por*-Si интенсивную люминесценцию в видимой области спектра при комнатной температуре [15]. Эффективная люминесценция также была определена в пленках кремния, которые могут быть представлены как некая “смесь” нанокристаллической и аморфной фаз [16, 17]. Люминесценция имплантированного кремния, нелинейное стимулированное излучение, направленное голубое свечение и ряд других фактов — это те примеры, которые свидетельствуют в пользу проявления “оптических свойств” кремния [18—20].

В настоящее время для объяснения эффективной люминесценции кремния (в *por*-Si, в наноразмерном кристалле) в видимой области спектра используют две различные модели [21, 22]. Одна из них основывается на эффектах размерного квантования электронов в АКС, что объясняет возможность излучения световых волн кластерным кремнием в видимой области спектра. (Экспериментальная зависимость длины волны излучения от геометрии и размеров АКС доказывает позитивный момент этого подхода.) Вторая модель объясняет люминесценцию Si-AKC, основываясь на том факте, что система кластеров имеет довольно большую поверхность, где поверхностные атомы кремния формируют химические связи типа Si—H (H — атомы водорода), или Si—O—H. Предполагается, что люминесценция обусловлена электронными переходами в приграничных фрагментарных кластерных группах. Эта модель объясняет чрезвычайную чувствительность параметров люминесценции к термообработке и другим физико-химическим влияниям, в т. ч. и к структурному составу поверхности НС, т. е. зависит от концентрации т. н. “оборванных” химических связей в АКС. Естественно, что обе эти модели ограничены и определяют лишь некоторые свойства *por*-Si.

Технологические проблемы обусловлены трудностями в проведении эффективной токовой накачки Si-AKC, “погруженных” в изолирующую твердотельную матрицу. Причем идея поиска эффективной среды в системе Si—SiO₂ сейчас особенно популярна [23].

В [23] приведены результаты экспериментальных исследований структурных характеристик сферически-подобных нанометровых частиц кремния (Si-НЧ), полученных с помощью импульсного CO₂ лазерного отжига. Геометрическая структура НЧ была выявлена с помощью дифрактограмм цифрового электронного микроскопа. Выяснено, что Si-НЧ образована из кристаллически-подобного ядра, “закрытого” аморфной (окисной) оболочкой.

Толщина этой оболочки линейно уменьшается (приблизительно от 2,9 до 0,8 нм) при уменьшении размеров Si-НЧ. Как видим, электронно-микроскопический цифровой анализ позволяет определить диаметр НЧ, а также толщину окисного слоя. Полученные Si-НЧ имели довольно широкое распределение по геометрическим размерам: радиус НЧ изменялся в пределах от 2 до 25 нм.

Качественные экспериментальные исследования характеристик эмиссии позволили получить величину оптического усиления для образца с АКС в кварце на ~15% меньше, чем для АКС, локализованных в SiO₂-слое на поверхности *c*-Si. Тем не менее для электролюминесценции SiO₂-среда не является оптимальной, чтобы реализовать эффективную инжекцию зарядов в Si-AKC — слишком велика запрещенная зона. Аналогичные эффекты обнаружены в оксидированном *por*-Si [24]. Поэтому большинство практических разработок были направлены на усовершенствование технологии получения твердотельной матрицы SiO₂ с высокой плотностью квантовых точек в форме Si-AKC [18]. Варьируя концентрацию кислорода и силана, из которого проводится осаждение кремния, удается получать слои SiO₂, в которых содержатся Si-AKC [25]. Эта технология позволяет “строить” тонкослойную структуру, где среднее токовое возбуждение электролюминесценции АКС составляет 10—50 мА/см². Сверхрешетки чередующихся слоев Si/SiO₂ — это наборы упорядоченных спаренных слоев.

Уменьшения ширины запрещенной зоны (ΔE_g) по сравнению с системой SiO₂—Si-AKC можно добиться путем нанесения кремния из силана в атмосфере азота [20, 26]. Образуется слоеный “пирог” типа Si₃N₄—Si, причем нанометровые частицы кремния характеризуются аморфной структурой.

Заметим, что *a*-Si имеет $\Delta E_g \approx 1,6$ эВ ($\Delta E_g = 1,1$ эВ для *c*-Si, что отвечает ИК-области спектра). “Расширение” ΔE_g облегчает инжекцию зарядов вовнутрь Si-AKC. Варьируя степень аморфности Si-НЧ, реализуя переход от “упорядоченной субфазы” (в смысле симметрии, близкой к симметрии кристаллической решетки) к разупорядоченной ее структуре, можно добиться свечения в области видимого спектра. Квантовая эффективность электролюминесценции составляет в этом случае ~0,2% при сопротивлении слоев в десятки Ом [18].

Экспериментально выявленные еще в 1980-е годы кластерные пучки кремния, вылетающие (сублимирующие) с поверхности полупроводника в условиях ультравысокого вакуума, характеризуются высокой концентрацией оборванных химических связей (ОХС) [27, 28]. Поэтому в большинстве моделей тех лет [29 и др.] основное внимание отводилось решению проблемы пассивирования ОХС в АКС — и путем моделирования, и экспериментально.

Как ни парадоксально, но “массированное” квантово-механическое моделирование различных по размерам и симметрии Si-AKC оказало медвежью услугу в исследовании оптических свойств квантово-размерных структур, которые требовали точных оценок энергетических характеристик. Большинство модельных результатов определялись выбором методики расчета. В теории применялись подходы, предложенные

ранее для определения электронной структуры молекул [30], т. н. неэмпирические, полуэмпирические схемы [31]. Корректно полученные оценки вероятных пространственных конфигураций продемонстрировали зависимость многих характеристик АКС от их размеров (количества атомов). Нарастание АКС приводило к переходу к упрощенным расчетным методам анализа, а следовательно, и к неточным оценкам.

Несмотря на то, что история развития исследований НС-материалов, а также практические разработки в этом направлении не привели к появлению новых эффективных излучателей на основе кремния, тем не менее стало очевидным, что сформированные НС-субфазы типа Si-АКС способны все же вызвать люминесценцию. В пользу вывода о том, что именно квантово-размерные структуры Si ответственны за возникновение необычного свечения, свидетельствуют результаты достаточно большого количества работ, например [32 и др.].

Автор работы [33], проводя классификацию электрических свойств *por*-Si, отмечает, что одну из групп составляет структура с высокой степенью пористости (более 40—50%). Такой *por*-Si представляет собой совокупность Si-нанокристаллитов (размером 1—10 нм, т. е. Si-АКС, Si-НС) с различной фрактальной размерностью [34], находящихся в пористой матрице сложного химического состава. Отмечается, что для таких НС (АКС), размер которых < 4 нм, характерным является проявление квантово-размерных эффектов, которые приводят не только к квантованию энергетического спектра носителей, но и к увеличению ΔE_g (до 1,8—2,9 эВ), а также к росту диэлектрической проницаемости. Локализация носителей заряда в такой структуре становится причиной аномально высокого удельного сопротивления ($\sim 10^{11}$ Ом·см). По мере возрастания пористости структуры (40—80%) растет энергия активации температурных зависимостей темновой проводимости: от 0,3 до 1,01 эВ.

Определяя *por*-Si как *кластеризованный материал* (КМ), подчеркнем, что в такой структуре ΔE_g может изменяться соответствующим образом с изменением геометрических размеров пор. Поэтому начиная с момента открытия при комнатной температуре видимой фотолюминесценции в *por*-Si и Si-НЧ [15 и др.] основная цель теоретических исследований состояла в определении зависимости ΔE_g от размеров (количества атомов — n) и геометрии (симметрии) АКС [35]. Как предполагалось в [36, 37], квантовый размерный эффект, проявляющийся в сдвиге ΔE_g в область ультрафиолета при уменьшении n , становится причиной проявления новых оптических свойств материала.

Результаты многолетнего изучения КМ стали мощным мотивирующим фактором интенсификации исследований Si-АКС. Накопленный опыт свидетельствовал, что именно пространственная симметрия АКС определяет специфику свойств НЧ, КМ и др. Поэтому использование корректного компьютерного моделирования [38] позволит не только определить атомную, электронную и фононную структуру, но и выявить механизмы зарождения, роста и формирования АКС как определенных ультрадисперсных субфаз. Новые наработки в этой области служат толчком к дальнейшему развитию фундаментальной теории химической связи [39].

Увеличение числа теоретических работ, посвященных изучению т. н. “первородных”, фрагментарно-подобных АКС (т. е. таких АКС, которые словно “отщипнули” из кристаллической решетки Si; обозначим далее такие АКС аббревиатурой ПАКС), было связано с предположением, что АКС образуют *por*-Si и являются его составными частями [35]. *por*-Si “построен” из Si-АКС с высокой концентрацией ОХС как из “блоков” (как правило, это зачастую энергетически невыгодные пространственные конфигурации [8]).

Авторы [40] классифицировали Si_n -АКС по двум категориям. Кроме сетки атомов, имеющих тетраэдрическую симметрию (Т-АКС) (tetrahedral-bond-network: TBN) предложена модель полиэдрической структуры (П-АКС) (polyhedral-bond-network: PBN).

Рис. 1 наглядно иллюстрирует различие в геометрии Т-АКС и П-АКС [38] на примере малых Si-АКС.

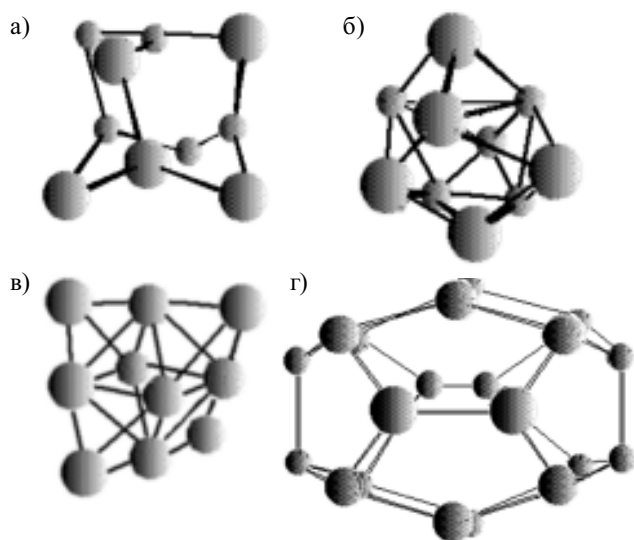


Рис 1. Схематическое изображение возможного пространственного расположения атомов в кластерных структурах с 10 (а, б, в) и 20 (г) атомами кремния: а — Т-АКС; б, в, г — П-АКС

Следует обратить внимание на то, что малые по размеру АКС имеют большой процент поверхностных атомов [41]. Если поверхность малого АКС реконструируется, неизменного кластерного ядра в нем не существует, т. к. процесс реконструкции сводится к образованию самой оптимальной из всех возможных пространственных конфигураций атомов (с некоторым количеством ОХС).

Исследования Si_n -АКС с помощью масс-спектрометрической техники (для $n \leq 7$), оценки энергии когезии (для соответствующих катионных кластерных соединений кремния [9]), а также калориметрические замеры с $150 \leq n \leq 890$ (т. е. НС) [42, 43] позволяют установить связь геометрических и энергетических (энергия связи АКС — $E_{св}$) характеристик для АКС и НС (рис. 2). Просматриваются три характерных области пространственно-энергетической корреляции. Малые АКС (первая область) построены компактно, образуя Т-АКС и П-АКС с возрастающим значением $E_{св}$ по мере их геометрического увеличения. Далее идут АКС среднего размера (10—25 ато-

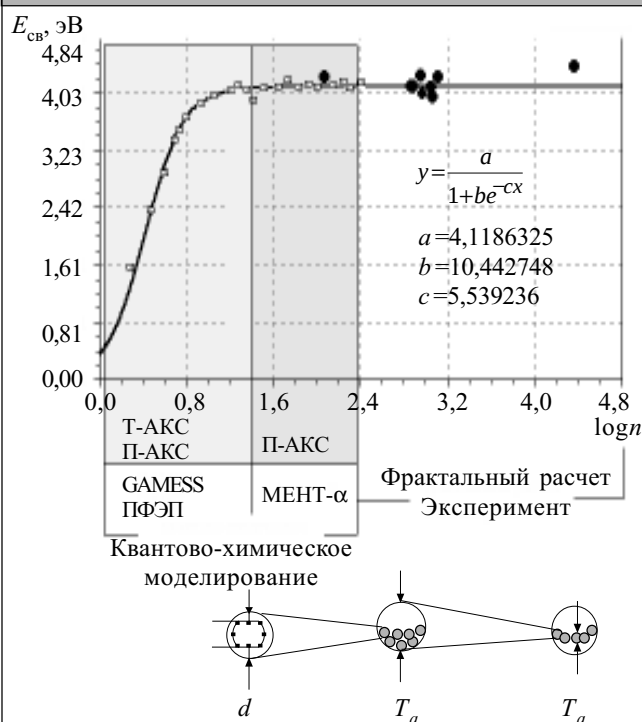


Рис. 2. Размерная зависимость (n — количество атомов) энергии связи АКС и НС кремния, рассчитанных в рамках неэмпирических и параметризованных схем [41, 68, 76], а также исходя из результатов фрактального анализа [34] и данных эксперимента [43]:

y — $E_{св}$; x — $\log n$; d — "диаметр" П-АКС; T_a — "радиус" НС (мов), которые возникают из мелких, достаточно стабильных АКС (например из 6, 10 атомов Si), приобретая форму эллипсоидальных (вытянутых) или сферически-подобных "клетчатых" структур с почти одинаковыми значениями $E_{св}$. Пример такого Si_{20} -АКС приведен на рис. 1, з.

В работе [44] было сделано предположение, что плотно упакованные структуры Si-АКС проявляют свойства более металлические, нежели ковалентные. Такой вывод стал причиной широкой дискуссии и движущим фактором в разработках новых и усовершенствовании известных экспериментальных методов и расчетных квантово-химических схем. Наиболее полно результаты подобных обсуждений представлены в [45]. Тем не менее на сегодня данная тема не является вполне выясненной и закрытой. В этой связи заметим, что c -Si — это типичный полупроводник, основные изменения электронных свойств которого можно связать с уменьшением его геометрических размеров, переходя в нм-диапазон, т. е. к таким объектам, как квантово-размерные структуры: НС, АКС. Критический размер АКС (n^*) в процессе перехода от металлической "субфазы" к ковалентной существенно разнится: $n^* = 100$ — 1000 [53], $n^* = 50$ [44].

Авторы [7, 8] отметили важные структурные перестройки Si-АКС и связывают их с изменением количества атомов: кластеры, содержащие приблизительно 27 атомов, имеют вытянутую (эллипсоидально-подобную) форму. Структуры, содержащие большее количество атомов, — напоминают сферу. Характерно резкие изменения свойств средних по размерам АКС были выявлены с помощью фотоионизацион-

ных измерений для $n^* = 20$ — 30 [8] и в расчетах размерных зависимостей частоты сдвига в спектрах Рамана ($n^* = 500$) [42].

Зависимость от размеров АКС (его симметрии) выявлена для электрической поляризации. Это подтверждают и результаты работы [46]. На основе метода функционала электронной плотности были рассчитаны дипольные моменты некоторых геометрических конфигураций Si_n -АКС, где $10 \leq n \leq 20$. Степень поляризации (α) АКС немонотонно изменялась в зависимости от n . Расчеты показали, что значение α является лимитированной величиной (т. е. существенно не изменяется в зависимости от n) и находится в пределах погрешности соответствующих значений для c -Si. По оценкам [46], $n^* > 20$.

Отметим, что поверхность c -Si и Si-ПАКС имеет высокую плотность ОХС [27, 28 и др.]. Минимизация поверхностной энергии осуществима путем реконструкции, например, типа 7×7 поверхности Si(111) (это наиболее известный пример), что вызывает уменьшение концентрации поверхностных ОХС без их полного уничтожения. Следовательно, перестройка Si-поверхности влечет за собой изменение ее химической активности. Пассивирование ОХС кислородом становится причиной того, что реактивность Si-поверхности заметно убывает (по сравнению с c -Si — довольно существенно), что проявляется также в случае пассивирования ОХС в Si-ПАКС [41, 47].

Пассивация ОХС в ПАКС приводит к его структурной релаксации. Возникающее при этом перераспределение электронной плотности в ПАКС вызывает изменение механических характеристик как АКС в целом, так и отдельных ХС в ПАКС [48].

Величина ΔE_g нейтральных и Si-ПАКС была определена экспериментально в работе [49]. Используя селекцию ПАКС по размерам, Si_{10} -ПАКС осаждали на поверхность $\text{Au}(001)(5 \times 20)$ в условиях ультравысокого вакуума. Сканирование с помощью туннельной микроскопии позволило исследовать структуру поверхности кремния. После анализа ВАХ оценивалась ширина запрещенной зоны ($\Delta E_g \approx 1 \text{ эВ}$). Некоторые рефлексы туннельной микроскопии демонстрировали темные окружности вокруг ПАКС за счет передачи заряда из окружающей кластер металлической подложки. Разброс в геометрических размерах ПАКС наблюдался в тех случаях, когда проводилось осаждение кластеров (определенных размеров) на поверхность подложки. Это свидетельствовало о том, что осажденные Si_{10} -ПАКС взаимодействовали не только между собой, но и с подложкой. Полученное значение $\Delta E_g \approx 1 \text{ эВ}$ свидетельствует о том, что это ширина запрещенной зоны не отдельного ПАКС, а взаимодействующей системы "ПАКС—подложка". Подобные эксперименты получили дальнейшее развитие в [50].

Увеличение числа атомов в АКС приводит к возрастанию возможных его геометрических "образов". Учет таких геометрических "перестроек" (в рамках данного АКС) модельными методами с применением хорошо зарекомендовавших себя квантово-химических схем — это непростая задача, но в условиях постоянно наращиваемой мощи современных ЭВМ (создания компьютерных массивов) вполне реализуема. Например, АКС, содержащее 29 атомов Si и 24 ОХС, которые пассивированы 24 атомами водорода ($\text{АКС-Si}_{29}\text{H}_{24}$), имеет достаточное многообразие возможных пространственных конфигураций [19]. Энергетически же именно сферически-подобная его (АКС) форма с одновремен-

ной симметрией тетраэдра является наиболее выгодной. Это проявляется в рефlekсах АКС-Si₂₉H₂₄, соответствующим тетраэдрической симметрии. Пассивация ОХС изменяет ΔE_g : полностью насыщенное водородом Si-AКС имеет запрещенную зону на ~1 эВ меньше, чем АКС-Si₂₉H₂₄, а для АКС-Si₂₉H₁₂ ΔE_g на 2 эВ больше, чем для АКС-Si₂₉H₂₄.

Таким образом, можно считать, что сегодня сформировалось перспективное направление в развитии нанофизики: разработка принципиально новых сред — ультрадисперсных, в состав которых входят ультрадисперсные субфазы (УДС) в форме квантовых точек, квантовых нитей, систем квантовых точек и других квантово-размерных структур. Конкретным примером УДС могут служить разные Si-AКС: по симметрии (Т-АКС, П-АКС), природе своего возникновения (ПАКС), проявляющие как металлические свойства, так и свойства полупроводников благодаря изменению “плотности упаковки”. Причем механизмы формирования, перестройки отмеченных УДС могут быть синергетическими, а вопрос об “увязывании” вероятной геометрии УДС (с одновременным учетом симметрии) с проявлением рефlekсов в дифракционной картине во многих экспериментах остается зачастую открытым.

Предложенные впервые теоретически, как модельные структуры, небольшие Si-AКС определялись как фрагменты квантово-размерного кремния (с-Si) [31]. Допускалось, что Si-AКС имеют алмазную структуру с нерелаксированными поверхностными атомами. Такое Т-АКС имеет довольно большую концентрацию ОХС и достаточно низкое значение координационного числа [39]. Расчеты с-Si-подобных фрагментов [51] обнаруживали или их высокую нестабильность, или довольно высокие значения энергий в локальном минимуме структуры. Тем не менее модельные исследования электронной структуры Si-AКС (с количеством атомов от 2 до 14) в рамках неэмпирических схем [42–44] позволяют корректно определить основное энергетическое состояние подобных ультрадисперсных субфаз.

Чтобы провести оптимизацию пространственного расположения атомов в Si-AКС, в [52] использовали некоррелированные волновые функции Хартри—Фока (HF). Для оптимизации геометрии Si-AКС в [53] воспользовались методом функционала электронной плотности (ФЭП) в локальном приближении (LDA). Для выяснения оптимальной симметрии Si-AКС в [54] усовершенствовали метод конфигурационного взаимодействия, ранее использовавшегося для исследования характеристик молекул [30]. Предложенная в свое время техника модельного отжига [55] получила дальнейшее развитие [56]. Вышеупомянутые теоретические схемы позволили в достаточной степени точно определить равновесные пространственные конфигурации малых (до 10 атомов) Si-AКС. Si_n-АКС, где $n < 10$, имеют компактно расположенные пространственные конфигурации с кубической (октаэдрической) или икосаэдрической симметрией.

Параллельно с теоретическим моделированием структурных, электронных и фононных свойств Si-AКС использовались и различные экспериментальные методики: фотофрагментации [57], возгонки с поверхности [27] и ионной имплантации [28], масс-спектрометрии [58], фотоэмиссионной спектроскопии [59, 60].

Возросший интерес к технике лазерного распыления поверхности вещества [61] также мотивировал выяснение механизмов образования АКС-Si. Кроме того, эффективными оказались исследования с участием фотохимических реакций [62], а также применение спектроскопии Рамана [63]. Все большую популярность приобретает метод ультравысоковакуумной туннельной микроскопии (УВВ ТМ) [1].

Величиной, которая эквивалентна ΔE_g , является теоретически определяемая разность энергий между самым верхним занятым (E_{HOMO}) и самым нижним свободным (E_{LUMO}) уровнями энергий АКС ($\Delta E = E_{HOMO} - E_{LUMO}$). Теоретические работы [53, 64, 65] демонстрируют, что ΔE для малых АКС сильно изменяется с изменением размеров и геометрической симметрии. В [66] проведен неэмпирический расчет с учетом всех электронов АКС, рассчитаны зависимости $\Delta E(n)$, где количество атомов кремния изменялось в пределах $n = 9–14$. Продemonстрировано, что $\Delta E(n)$ имеет осциллирующий характер и что осцилляции можно “загладить” путем “подбора” определенной симметрии АКС. Проведен исчерпывающий анализ всевозможных геометрических структур АКС с $n = 9–14$. Для АКС типа Si₉ и Si₁₄ найдены равновесные пространственные конфигурации, для остальных АКС (с $n = 10–13$) энергетические характеристики близки к хорошо известным данным других исследователей.

Проанализируем подробнее следствия модельного насыщения (пассивации) ОХС. Непассивированные Si-AКС должны иметь существенно меньшую энергетическую зону ΔE_g , чем об этом свидетельствуют оценки с учетом квантовых эффектов [35]. Для малых Si-AКС ΔE_g меньше, чем соответствующая величина для с-Si [53], и даже, согласно расчетам [67], равняется нулю. Оценки плотности состояний для Si-ПАКС показывают, что разность энергий имеет нулевое значение. Для полностью “насыщенного” Si-AКС ширина зоны увеличивается и достигает значения $\Delta E_g = 3,4$ эВ [53].

Автором настоящей статьи накоплен определенный опыт в проведении исследований разных по размерам Si-AКС (Т-АКС, П-АКС, ПАКС) с использованием молекулярно-динамической схемы, которая основывается на методе ФЭП (алгоритм GAMESS) и в его параметризованном варианте [68]. Главный вывод сводится к тому, что Т-АКС и П-АКС существенно отличаются друг от друга по отношению к экспериментальному процессу гидrogenизации (галогенизации), т. е. к модельной процедуре насыщения ОХС [47, 54–56]. Иллюстрацией подобного вывода может быть также анализ Si₆-АКС, предложенный в [69]. Внимание к таким АКС обусловлено тем, что уплотнение пространственной конфигурации именно малых Si-AКС ($n \leq 10$) приводит к уменьшению концентрации ОХС по сравнению с ПАКС. Кроме этого, выполнены исследования, позволившие экспериментально идентифицировать именно Si₆-АКС [70].

Свойства средних (по размеру) Si-AКС с количеством до сотни атомов являются наименее определенными. Именно для таких структур имеет место существенная зависимость ΔE от рассматриваемой пространственной и геометрической конфигурации АКС. Расчеты [67] указывают на коррелированное возрастание ΔE_g (в пределах от 1,3 до 2,5 эВ) с уменьшением n для Si-HС (геометрические размеры изменялись от 5 до 1 нм). Согласно полученным экспериментальным значениям (методом эффективных масс), для Si-HЧ величина ΔE_g подчинялась обратной степенной зависимости от геометрических размеров наноструктуры (т. е. от n в АКС). В [37] предлагались разнообразные степенные законы.

Следует подчеркнуть, что результаты теоретических исследований пассивированных Si-AКС доминируют,

в отличие от данных о свойствах Si-ПАКС. Относительно концепции ПАКС заметим следующее. На наш взгляд, ПАКС – это категория, аналогичная определению “реальная” АКС, предложенному в конце 1980-х годов [71]. Была выдвинута идея изучения Si-АКС не как удобных (для проведения теоретических исследований) расчетных твердотельных моделей [72], а именно как реальных структур. Этот подход получил свое дальнейшее развитие при проведении компьютерного квантово-химического моделирования поверхностных слоев кремния и НС [41, 47].

Подводя итог, подчеркнем, что дальнейшее развитие нанометровых технологий (НТ) изготовления МДП(МОП)-структур с необходимостью связывают с переходом к квантово-размерным структурам (КРС). В этом геометрическом диапазоне в игру вступают туннельные эффекты, которые и будут определять физику транзисторов недалекого будущего. Новые специфические функциональные возможности электронного приборостроения, определяемые наноразмерностью объектов, становятся уже ожидаемыми и даже реальными в текущем развитии индустриального производства [4].

Для КРС, благодаря ограничениям, накладываемым на волновую функцию электрона потенциальным барьером, в ΔE_g образуются локальные уровни (по аналогии с донорными или акцепторными примесями в процессе легирования полупроводника). Возникающую проблему формирования множества локальных уровней в зоне ΔE_g , т. е. довольно тонкого управления всем ансамблем структурных дефектов и примесей, необходимо обязательно связывать с возможностью заранее заданного распределения НС, АКС в твердотельной матрице. Это отличает кластерную НТ управления свойствами полупроводника от другой технологической процедуры, например, легирования. Ограничения, которые накладываются в таком случае, сводятся к подавлению естественных примесей, ответственных за создание локальных уровней в запрещенной зоне полупроводника (это актуально, когда растворимость примесей слишком мала).

Интересные возможности открывает процедура капсулирования легких атомов (Н, F, Li, Na и др.) вовнутрь полый П-АКС. В этом случае механизмы влияния на свойства материала отличаются от обычного легирования. Подобная процедура “управления” свойствами КРС основывается на создании т. н. клатратных (clathrate) атомных структур (КАС), которые успешно изучаются химиками. С нашей точки зрения, полупроводниковые КАС, например кремния [73], можно рассматривать как перспективные компоненты (в виде ультрадисперсных субфаз) современного и будущего электронного приборостроения.

При контакте металла с полупроводником возникает барьер Шоттки, а уровень Ферми (E_F) полупроводника, как правило, закрепляется на гетерогранице в ΔE_g . Для контакта металлов с таким полупроводником, как GaAs, уровень E_F закрепляется вблизи середины ΔE_g [7].

У полупроводников *n*- и *p*-типа возникают области обеднения (ΔE_o). Ширина $\Delta E_o = f(\sigma)$, где σ — проводимость полупроводника. Поскольку мышьяк

есть полуметалл, система As-АКС мышьяка в GaAs представляет собой совокупность пассивированных барьеров Шоттки, каждый из которых окружен областями ΔE_o . Увеличение концентрации As-АКС приводит к перекрыванию локальных областей ΔE_o с возможной реализацией фрактального протекания по всему объему, после чего твердотельная матрица (ТМ) GaAs должна приобрести полуизолирующие свойства, которые и наблюдаются в эксперименте. Высокая концентрация АКС и наличие закапсулированных электрических полей приводят к быстрому нарастанию и рекомбинации неравновесных носителей заряда. Характерное время жизни носителей заряда ($\tau_{ж}$), экспериментально полученное в ТМ GaAs, содержащих АКС As, составляет менее 1 пс. Таким образом, удельное сопротивление с рекордно малыми $\tau_{ж}$ для носителей заряда и высокое структурное совершенство ТМ-GaAs/As-АКС доказывают их чрезвычайную привлекательность для различных инженерных задач в молекулярной электронике. Тут и фотоприемники (активной областью которых является ТМ-GaAs/As-АКС) с временем отклика менее чем в 1 пс, и полевые транзисторы и СБИС, где такой материал используется в качестве буфера для увеличения пробивного напряжения на затворе и для устранения ряда паразитных эффектов в канале [7].

Если АКС составляют основную часть кластеризованных материалов, то изменение их размеров и концентрации приводит к изменению фундаментальных свойств полупроводника: величины проводимости, энергии фундаментальных оптических переходов и др., т. е. возникает абсолютно новая инженерия для создания оригинальных полупроводниковых структур со свойствами, которые отличаются от свойств аналогичного монокристалла или аморфного полупроводника.

Сегодня лазеры на квантовых точках (Л-КТ) по своим основным параметрам не уступают лучшим полупроводниковым лазерам с квантовыми ямами в активной области (а по стабильности порогового тока даже значительно превышают их). Поэтому в ближайшем будущем можно ожидать дальнейший прогресс Л-КТ за счет оптимизации приборов, а также использования новых материалов как в качестве ТМ, так и КРС. В частности, в Si-оптоэлектронике одним из ключевых устройств может стать Л-КТ, где в качестве активной оптической среды усиления выступают КРС. Использование кремния в форме квантовых точек (например Si-АКС), рассеянных с заданным характером функции распределения в кремниевой матрице диоксида, позволяет предложить алгоритмическую модель построения кремниевого лазера.

Эффективной является инженерия, основанная на т. н. “увлечении” одного электрона, расположенного в АКС, к запираанию узкого канала за счет эффекта кулоновской блокады электронного транспорта. В этой связи возможно создание нового класса электронных приборов: 1) одноэлектронных элементов памяти; 2) полевых транзисторов, управляемых одиночным электроном на затворе; 3) одноэлектронных аналогов биполярного транзистора; 4) одноэлектронных “насосов” и др. Практическая реализация таких структур, как правило, основана на использовании прецизионной литографии тонких металлических пленок или полупроводниковых слоев с двухмерным газом

[74–76]. Например, в [76] приведены данные о том, что создана одноэлектронная память, которая работает при комнатной температуре на основе полевого транзистора с очень узким каналом и плавающим затвором нанометрового размера. Поэтому нет сомнений в том, что разработка современных методов получения КРС, исследование их атомной, электронной и фононной структуры позволят провести управляемую процедуру формирования реальных конфигураций КРС с геометрическими размерами в единицы нм.

Следует отметить, что процессы самоорганизации, разупорядочения и упорядочения ультрадисперсных субфаз связаны с существенным массопереносом [77]. Вследствие этого их реализация в пределах кристаллической фазы становится сложной и, зачастую, даже невозможной. Более благоприятные условия формирования АКС связаны с процессами распада и упорядочения при эпитаксиальном наращивании новой фазы непосредственно на поверхности полупроводника или НС. Именно с помощью такого технологического приема возможно создание композиций КРС — квантовых точек, нитей, проволок и др. При подобной технологии необходимо обеспечить формирование на поверхности нанометровых островков, которые могут представлять собой АКС.

Основой современной технологии формирования АКС типа КРС является кристаллизация по механизму Странского—Красанова [4, 5]. В процессе нанесения тонкой эпитаксиальной пленки на твердотельную подложку с другими структурными параметрами кристаллической решетки ее свободная энергия зависит от толщины пленки и геометрии поверхности. Если при нарастании пленки ее поверхность остается планарной, то полная энергия поверхности не меняется, а энергия упругой деформации ($E_{\text{деф}}$) линейно возрастает [7].

Тем не менее при достижении определенной критической толщины пленки такая ситуация становится энергетически невыгодной. Минимуму свободной энергии системы отвечает формирование на поверхности трехмерных островков. Основание таких островков, стыкуемых с подложкой, сильно деформировано. Оценки показали [77], что в процессе отделения пленки от границы

раздела с подложкой $E_{\text{деф}}$ уменьшается. Более того, $E_{\text{деф}}$ выступает здесь как основная “движущая сила” процесса образования кластерной структуры. Одна из главных особенностей такого метода формирования ультрадисперсных субфаз состоит в том, что КРС возникают на “наращиваемой” поверхности непосредственно, т. е. в условиях существенно большей “свободы”, чем внутри ТМ. Процедура такого формирования КРС (квантовые точки, квантовые нити) зависит от экспериментальных средств тонкого управления потенциальным рельефом “наращиваемой” поверхности [78].

Манипулирование атомной структурой поверхности можно осуществить используя нетермические методы локального влияния на эту поверхность с дополнительной нетермической локальной стимуляцией процессов эпитаксиального роста (с применением облучения, ионной имплантации и др.). Прецизионное управление структурным составом и процессом пресыщения газовой фазы непосредственно на границах фронта кристаллизации, а также механизмами и кинетикой процессов кристаллизации сыграет здесь не последнюю роль.

Таким образом, на наш взгляд, перспективным является технологический подход, основанный на формировании твердотельных матриц, где образуется система самоорганизующихся ультрадисперсных субфаз в виде квантово-размерных структур (а именно, атомарных кластерных соединений). Конечно, геометрия подобных наноструктур требует получения хорошего пространственного разрешения, а это ограничивает рабочую температуру приборов такого класса. Поэтому процесс формирования КРС в ТМ сходен с процессом образования твердого раствора, для которого большинство физических процессов может быть рассмотрено с позиций статистического распределения атомов, формирующих наноструктуру, по узлам кристаллической решетки.

В заключение, оценивая перспективы развития современной технологической базы общества, а также экспериментальной и теоретической физики, следует отметить, что окончательно молекулярная электроника может полностью сформироваться в середине текущего столетия; **рис. 3**, полученный на основе анализа данных [4, 6, 74], иллюстрирует вероятный ход развития молекулярной электроники и нанотехнологии.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Seabaugh A. C., Mazumder P. Scanning the issue // Proc. IEEE.— 1999.— Vol. 87.— P. 535—545.
2. Летохов В. С. Проблемы нанооптики // УФН.— 1999.— Т. 169.— С. 345—348.
3. Лозовик Ю. Е., Меркулов С. П. Перспективы нанокалальной фемтосекундной спектроскопии и нанолитографии // УФН.— 1999.— Т. 169.— С. 348 — 352.
4. Tanaka K. Nanotechnology towards the 21st Century // Thin Sol. Films.— 1999.— Vol. 341.— P. 120 — 125.
5. Хайрутдинов Р. Ф. Химия полупроводниковых наночастиц // Успехи химии.— 1998.— Т. 67 (2).— С. 125 — 139.
6. Hersam M. C., Guisinger N. P., Lydrng J. W. Silicon-based molecular nanotechnology // Nanotechnology.— 2000.— Vol. 11.— P. 70—76.
7. Мильвидский М. Г., Чалдышев В. В. Наноразмерные атомные кластеры в полупроводниках — новый подход к формированию свойств материалов // ФТП.— 1998.— Т. 32, № 5.— С. 513—522.
8. Jarrold M. F. Nanosurface chemistry on size-selected silicon clusters // Science.— 1991.— Vol. 252.— P. 1085 — 1092.
9. Jarrold M. F., Constant V. A. Silicon cluster ions: evidence for a structural transition // Phys. Rev. Lett.— Vol. 67.— 1991.— P. 2994—2997.

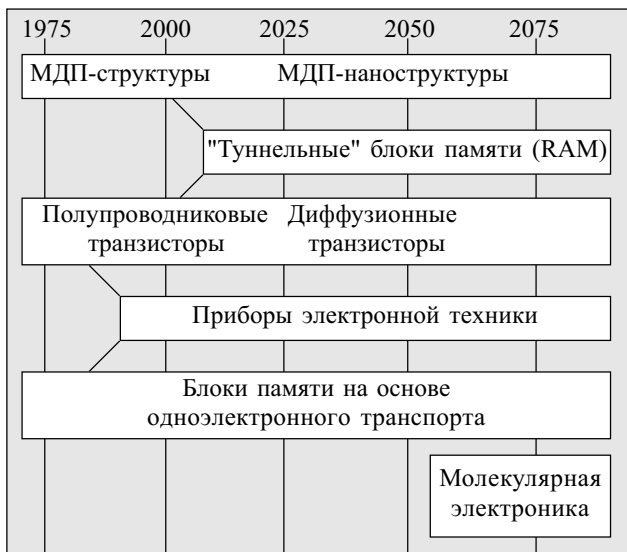


Рис. 3. Вероятное развитие электронных технологий

10. Li B., Yu D., Zhang S.-L. Raman spectral study of silicon nanowires // *Phys. Rev. B.*— Vol. 59.— 1999.— P. 1645—1654.
11. Chen X., Zhao X., Wang G., Shen X. The effect of size distributions of Si nanoclusters on photoluminescence from ensembles of Si nanoclusters // *Phys. Lett. A.*— 1996.— Vol. 212.— P. 285—289.
12. Chen G., Klimeck G., Datta S., Goddard W.A. Resonant tunnelling through quantum-dot arrays // *Phys. Rev. B.*— 1994.— Vol. 50.— P. 8035 — 8042.
13. Burr T. A., Seraphin A. A., Werwa E., Kolenbrander K. D. Carrier transport in thin films of silicon nanoparticles // *Ibid.*— 1997.— Vol. 56.— P. 4818 — 4824.
14. Zaidi S. H., Chu An.-S., Brueck S.R.J. Optical properties of nanoscale, one-dimensional silicon grating structures // *J. Appl. Phys.*— 1996.— Vol. 80, N 12.— P. 6997 — 7008.
15. Takagi H., Ogawa H., Yamazaki Y. et al. Quantum size effects on photoluminescence in ultra fine Si particles // *Appl. Phys. Lett.*— 1990.— Vol. 56.— P. 2379—2380.
16. Kanzawa Y., Kageyama, Takeoka S. et al. Size-dependent near-infrared photoluminescence spectra of Si nanocrystal embedded in SiO₂ matrices // *Sol. St. Com.*— 1997.— Vol. 102.— P. 533—537.
17. Голубев В. Г., Медведев А. В., Певцов А. Б. и др. Фотолюминесценция тонких пленок аморфно-нанокристаллического кремния // *ФТТ.*— 1999.— Т. 41, № 1.— С. 153—158.
18. Nayfeh M., Akcakir O., Belomoin G. et al. Second harmonic generation in microcrystallite films of ultrasmall Si nanoparticles // *Appl. Phys. Lett.*— 2000.— Vol. 77.— P. 4086—4088.
19. Mitas L., Therrien J., Twesten R. et al. Effect of surface reconstruction on the structural prototypes of ultrasmall ultrabright Si₂₉ nanoparticles // *Ibid.*— 2001.— Vol. 78.— P. 1918.
20. Park N. M., Kim T. S., Park S. J. Band gap engineering of amorphous silicon quantum dots for light-emitting diodes // *Ibid.*— 2001.— Vol. 78.— P. 2575—2777.
21. Delerue C., Allan G., Lannoo M. Optical band gap of Si nanoclusters // *J. Luminesc.*— 1999.— Vol. 80.— P. 65—73.
22. Baierle R. J., Caldas M. J., Molinari E., Ossicini S. Optical emission from small Si particles // *Sol. St. Comm.*— 1997.— Vol. 102, N 7.— P. 545—549.
23. Hofmeister H., Huysken F., Kohn B. Lattice contraction in nanosized silicon particles produced by laser pyrolysis of silane // *Book of abstracts 9th International Symp. on Small Particles and Inorganic Clusters.*— Lausanne (Switzerland). — 1998.— P. 1.13.
24. Porjo N., Kuustla T., Heikkilä L. Characterization of photonic dots in Si—SiO₂ thin-film structures // *Appl. Phys.* — 2001.— Vol. 89.— P. 4902—4904.
25. Chelan S., Elliman R. G., Gaff K., Durand A. Luminescence from Si nanocrystals in silica deposited by helicon activated reactive evaporation // *Appl. Phys. Lett.*— 2001.— Vol. 78.— P. 1670—1672.
26. Pavesi L., Dal Negro L., Mazzoleni C. et al. Optical gain in silicon nanocrystals // *Nature.*— 2000.— Vol. 408.— P. 440—444.
27. Кожухов А. В., Кантер Б. З., Стенин С. И., Яновицкий З. Ш. Образование кластеров на поверхностях (111) и (100) при сублимации кремния // *Поверхность. Физика, химия, механика.*— 1988.— № 7.— С. 54—60.
28. Бугай А. А., Зарицкий И. М., Кончиц А. А., Лысенко В. С. ЭПР в кремнии, аморфизированном ионной имплантацией // *ФТП.*— 1985.— Т. 19, № 2.— С. 257—262.
29. Nishida M. Cluster model approach for electronic structure of Si and Ge(111) and GaAs(110) surfaces // *Surface Science.*— 1978.— Vol. 72.— P. 589—616.
30. Местечкин М. М., Вайман Г. Е., Климо В., Тиньо Й. Расширенный метод Хартри—Фока и его применение к молекулам.— К.: Наукова думка, 1983.
31. Messmer R., Watkins G. D. Molecular-orbital treatment for deep levels in semiconductors: substitutional nitrogen and the lattice vacancy in diamond // *Phys. Rev. B.*— 1973.— Vol. 7, N 6.— P. 2568—2590.
32. Bisi O., Ossicini S., Pavesi L. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics // *Surf. Sci. Rep.* — 2000.— Vol. 38.— P. 1—126.
33. Зимин С. П. Классификация электрических свойств пористого кремния // *ФТП.*— 2000.— Т. 34, № 3.— С. 359—363.
34. Новиков В. У., Козлов Г. В. Фрактальный анализ макромолекул // *Успехи химии.*— 2000.— Т. 69.— С. 379—399.
35. Kux A., Chorin M. B. Band gap of porous silicon // *Phys. Rev.*— 1995.— B 51.— P. 17535—17544.
36. Buuren T., Dinh L. N., Chase L. L. et al. Changes in the electronic properties of Si nanocrystals as a function of particle size // *Phys. Rev. Lett.*— 1998.— Vol. 80.— P. 3803—3806.
37. Delley B., Steigmeier E. F. Quantum confinement in Si nanocrystals // *Phys. Rev.*— 1993.— B 56.— P. 1397—1400.
38. Nagase S. Polyhedral compounds of the heavier group-14 elements — silicon, germanium, tin, and lead // *Account of Chem. Research.*— 1995.— Vol. 28 (11).— P. 469—476.
39. Roby K. R. Quantum theory of chemical valence concepts // *Mol. Phys.*— 1974.— Vol. 27.— P. 81—104.
40. Paterson C. H., Messmer R. P. Bonding and structures in silicon clusters: a valence-bond interpretation // *Phys. Rev. B.*— 1990.— Vol. 42.— P. 7530—7537.
41. Ковальчук В. В. Модельный анализ деяких кластерних сполук // *Вісник ЧДУ ім. Ю. Федьковича.*— 1999.— Т. 32.— С. 8—12.
42. Zi J., Zhang K., Xie X. Comparison of models for Raman spectra of Si nanocrystals // *Phys. Rev. B.*— 1997.— Vol. 55.— P. 9263—9267.
43. Bachelis T., Schaefer R. Binding energies of neutral silicon clusters // *Chem. Phys. Lett.*— 2000.— Vol. 324.— P. 365—372.
44. Chelikowsky J. R. Transition from metallic to covalent structures in silicon clusters // *Phys. Rev. Lett.*— 1988.— Vol. 60.— P. 2669—2673.
45. Shvartsburg A. A., Jarrold M. F. Transition from covalent to metallic behaviour in group-14 clusters // *Chem. Phys. Lett.*— 2000.— Vol. 317.— P. 615—618.
46. Jackson K., Pederson M., Wang C.-Z., Ho K.-M. Calculated polarizabilities of intermediate-size Si clusters // *Physical Review A.*— 1999.— Vol. 59, N 5.— P. 3685—3689.
47. Kovalchuk V. V., Chislov V. V., Yanchuk V. A. Cluster model of the real silicon surface // *Phys. Stat. Sol.(b).*— 1995.— Vol. 187, N 7.— P. K47—K50.
48. Ковальчук В. В. Квантово-химическое моделирование реальных кремниевых кластеров // *Дисс. ... канд. физ.-мат. наук:* Одесса, 1988.
49. Kuk Y., Jarrold M. F., Bower J. E., Brown W. L. Preparation and observation of Si₁₀ clusters on a Au(001)-(5×20) surface // *Phys. Rev.*— 1989.— B 39.— P. 11168—11176.
50. Marsen B., Lonfat M., Scheier P., Sattler K. The energy gap of pristine silicon clusters // *J. Electron. Spectr. Related Phen.*— 2000.— Vol. 109.— P. 157—168.
51. Phillips J. C. Stability, kinetics and magic numbers of Si_N⁺ (N=7–45) clusters // *J. Chem. Phys.*— 1985.— Vol. 83 (7).— P. 3330—3333.
52. Raghavachari K., Logovinsky V. Structure and bonding in small silicon clusters // *Phys. Rev. Lett.*— 1985.— Vol. 55, N 26.— P. 2853 — 2856.
53. Tomanek D., Schluter M. A. Structure and bonding of small semiconductor clusters // *Phys. Rev.*— 1987.— B 36, N 2.— P. 1208—1217.
54. Pachioni G., Koutecky J. Silicon and germanium clusters — a theoretical study of their electronic-structures and properties // *J. Chem. Phys.*— 1986.— Vol. 84 (6).— P. 3301—3310.
55. Ballone P., Andreoni W., Car R., Parrinello M. Equilibrium structures and finite temperature properties of silicon microclusters from ab initio molecular-dynamics calculations // *Phys. Rev. Lett.*— 1988.— Vol. 60.— P. 271—274.
56. Zacharias C. R., Lemes M. R., Dal Pino A. Combining genetic algorithm and simulated annealing: a molecular geometry optimization study // *J. Mol. Struct.*— 1998.— Vol. 430.— P. 29—39.
57. Bloomfield L. A., Freeman R. R., Brown W. L. Photofragmentation of mass-resolved Si₂₋₁₂⁺ clusters // *Phys. Rev. Lett.*— 1985.— Vol. 54, N 20.— P. 2246—2249.

58. Begemann W., Meiwes-Broer K. H., Lutz H. O. Unimolecular decomposition of sputtered Aln^+ , Cun^+ and Sin^+ clusters // *Ibid.*— 1986.— Vol. 56, N 21.— P. 2248—2251.
59. Vardeny Z., Zhou T. X., Stoddart H. A., Taue J. Photomodulation spectroscopy of dangling bonds in doped and undoped a-Si:H // *Sol. State. Commun.*— 1988.— Vol. 65, N 9.— P. 1049—1053.
60. Smith N. V. Inverse photoemission // *Rep. Progr. Phys.*— 1988.— Vol. 51.— P. 883—921.
61. Лазнева Э. Ф., Федоров И. Н. Испарение с поверхности кремния при лазерном возбуждении // *Письма в ЖТФ.*— 1988.— Т. 14, № 6.— С. 537—540.
62. Stafast H. Initial steps in the photochemical vapour deposition of amorphous silicon // *Appl. Phys. A.*— 1988.— Vol. 45.— P. 93—102.
63. Honea E. C., Ogura A., Murray C. A. et al. Raman spectra of size-selected silicon clusters and comparison with calculated structures // *Nature.*— 1993.— Vol. 366.— P. 42—44.
64. Hagelberg F., Scheier P., Marsen B. et al. Coulomb blockade effects in charged Si_7 clusters on a graphite substrate // *J. Mol. Struct.*— 2000.— Vol. 529.— P. 149—160.
65. Bao-xing Li, Pei-lin Cao. Water adsorption on Si_{20} cluster: a full-potential linear-muffin-tin-orbital molecular-dynamics study // *Phys. Lett. A.*— 2000.— Vol. 275.— P. 274—280.
66. Siek A., Porezag D., Frauenheim Th. et al. Structure and vibrational spectra of low-energy silicon clusters // *Phys. Rev. A.*— 1997.— Vol. 56, N 6.— P. 4890—4898.
67. Gong X.G. Stability and electronic properties of nanoscale silicon clusters // *Phys. Rev.*— 1995.— B 52.— P. 14677—14682.
68. Kovalchuk V. V. Real nanodimensional silicon particles: cluster approximation // *Photoelectronics.*— 2001.— Vol. 10.— P. 12—17.
69. Miyazaki T., Uda T., Stich I., Terakura K. Theoretical study of the structural evolution of small hydrogenated silicon clusters // *Chem. Phys. Lett.*— 1996.— Vol. 261.— P. 346—352.
70. Watanabe M.O., Kanayama T. Growth and transport of structure-controlled hydrogenated Si clusters for deposition on solid surface // *Appl. Phys. A.*— 1998.— Vol. 66.— P. S1039—S1042.
71. Kiv A. E., Kovalchuk V. V., Yanchuk V. A. H adsorption by disordered Si clusters // *Phys. Stat. Sol.(b).*— 1988.— Vol. 156, N 2.— P. K101—K103.
72. Грехов А. М., Клапченко Г. М., Цященко Ю. П. Теоретические модели дефектов в аморфном кремнии // *ФТП.*— 1984.— Т. 18, № 8.— С. 1392—1396.
73. Menon M., Richter E., Subbaswamy K. R. Structural and vibration properties of Si clathrates in a generalised tight-binding molecular-dynamics scheme // *Phys. Rev. B.*— 1997.— Vol. 56 (19).— P. 12290—12295.
74. Hirschman K. D., Tsybeskov L., Duttagupta S. P., Fauchet P. M. Silicon-based light emitting devices integrated into microelectronic circuits // *Nature.*— 1996.— Vol. 384.— P. 338—340.
75. Devoret M. H., Esteve B., Urbina C. Single-electron transfer in metallic nanostructures // *Ibid.*— 1992.— Vol. 360.— P. 547—550.
76. Zhuang L., Guo L., Chou S. Y. Silicon single-electron quantum-dot transistor switch operating at room temperature // *Appl. Phys. Lett.*— 1998.— Vol. 72.— P. 1205—1210.
77. Kovalchuk V. V. The cluster modelling of the reaction on the Si surface // *Book of Abstracts 9th International Symp. on Small Particles and Inorganic Clusters.*— Lausanne (Switzerland), 1998.— P. 10—32.
78. Ковальчук В. В. ІЕНТ-α дослідження поверхні кремнію // *УФЖ.*— 1995.— N 7.— С. 716—719.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

Украина, Одесса
10—14 сентября 2002 г.

Научный совет по проблеме
«Физика полупроводников» НАНУ
Министерство образования и науки Украины
Украинское физическое общество
Институт физики полупроводников НАНУ
Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова

УНКФП-1

**1-я УКРАИНСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО ФИЗИКЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ
(с международным участием)**

Научные направления конференции

1. Теория зонной структуры, оптические, экситонные и фононные явления.
2. Фото-, акусто-, оптоэлектронные и электронные явления в объеме и на поверхности полупроводников.
3. Квантовые, оптические, электрические и магнитные свойства.
4. Физика современных полупроводниковых приборов и сенсоров.
5. Полупроводниковые материалы и технологии.

Статьи по докладам конференции планируется публиковать в журналах:

"Фотоелектроника" (Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова),
"Semicond. Phys. Quant. Electron. Optoelectron." (ИФПП НАНУ, г. Киев),
"Украинский физический журнал" (НАНУ),
"Журнал физических исследований" (Украинское физическое общество),
"Functional Materials" (Институт монокристаллов НАНУ, г. Харьков).

Объявлен конкурс на лучшие доклады,
сделанные на конференции аспирантами
и молодыми учеными.

Адрес Оргкомитета:

Украина, 65026, г. Одесса, ул. Дворянская, 2.
Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова. НИЛ-3.
Тел./факс: 380(482) 23-34-61
E-mail: <oguint@paco.net>, <ndl_lepikh@gmail.com.ua>

Д. ф.-м. н. А. О. МАТКОВСКИЙ, И. М. СЫВОРОТКА,
д. ф.-м. н. С. Б. УБИЗСКИЙ, С. С. МЕЛЬНИК,
к. т. н. Н. М. ВАКИВ, к. ф.-м. н. И. И. ИЖНИН

Украина, Львовский НИИ материалов НПП "Карат",
НИЦ "Кристалл" НУ "Львовская политехника"
E-mail: <granat@carat.lviv.ua> <crystal@polynet.lviv.ua>

Дата поступления в редакцию
18.02 2002 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Я. М. ЗАХАРКО
(ЛНУ им. И. Франко, г. Львов)

МИКРОЧИПОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

Описаны современные твердотельные микролазеры с пассивной модуляцией добротности с накачкой полупроводниковым лазером, их конструкции и сферы применения.

Общая тенденция современной микроэлектроники — миниатюризация электронных и электронно-оптических компонентов — выдвигает такие же требования к твердотельным лазерам. Одновременно резко повышаются требования к качественным характеристикам излучения, возможности генерации импульсов малой и средней (несколько десятков кВт в импульсе) мощности, стабильности, надежности при одновременном уменьшении или, по крайней мере, сохранении на существующем уровне потребительского соотношения "мощность/стоимость".

Благодаря быстрому прогрессу в технологии полупроводников современный сектор рынка микролазеров почти полностью представлен полупроводниковыми инжекционными лазерами. Однако, невзирая на доминирующее положение, полупроводниковые лазеры не могут удовлетворить потребности техники в полном объеме из-за принципиальных физических ограничений. К числу последних относятся многомодовый состав излучения, большой угол расхождения и асимметрия пучка излучения, сильная зависимость длины волны генерации от температуры p - n -перехода, практическая невозможность генерации коротких (нано- и субнаносекундных) импульсов, неудовлетворительная временная стабильность [1—3].

Удовлетворить всему комплексу выдвинутых требований могут компактные твердотельные лазеры с диодной накачкой, которые лишены большинства отмеченных недостатков полупроводниковых лазеров [1, 4, 5]. Микролазеры с рабочим объемом излучателя $\sim 1 \text{ мм}^3$ фактически играют роль преобразователя "некачественного" излучения полупроводникового лазера накачки в практически идеальное одночастотное, линейно поляризованное одномодовое излучение с распределением интенсивности в луче, близким к дифракционно-ограниченному гауссовому. (Микролазеры, изготовленные методами групповой технологии, принятыми в производстве полупроводниковых интегральных микросхем, получили название микрочиповых.)

Для иллюстрации преимуществ, которые обеспечивает микролазер, рассмотрим его простейшую схему (рис. 1). Микролазер — это тонкая пластина активной среды, на полированные поверхности которой нанесены зеркала резонатора в виде тонких диэлектрических слоев с дихроическими характеристиками [1, 5, 6]. Одно из них (входное зеркало) является антиотражающим для излучения накачки и полностью отражающим для излучения генерации, другое (выходное) — отражающим для излучения накачки и частично пропускающим для генерируемых в активной среде лучей. Длина резонатора подбирается таким образом, чтобы выполнялось условие генерации одной продольной моды резонатора. Благодаря малым размерам лазера обеспечивается не только одномодовый и одночастотный режим излучения, но и более высокая, по сравнению с традиционными твердотельными лазерами, температурная и временная стабильность свойств.

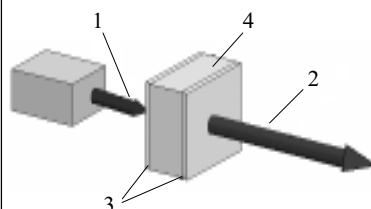


Рис. 1. Модель микролазера с продольной накачкой:

1 — излучение накачки;
2 — выходящий лазерный луч;
3 — зеркала резонатора;
4 — активная среда

Первые микролазеры на основе высококонцентрированных (до $5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$) неодимовых кристаллов $\text{NdP}_5\text{O}_{14}$, $\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$ и $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ были созданы еще в 1970-е годы [7]. Благодаря особенностям кристаллической структуры концентрационное гашение в этих материалах при высокой концентрации неодима не наблюдается. Это обеспечивает достижение больших коэффициентов усиления и дает возможность применять в лазерах активные элементы довольно малых размеров. Например, в микролазерах на основе кристаллов $\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$ получена генерация в непрерывном режиме на длине волны $\lambda=1,05 \text{ мкм}$ мощностью несколько милливатт при пороге накачки 0,35 мВт и дифференциальном к. п. д. $\sim 15\%$. Поскольку в кристаллах с высокой концентрацией активатора излучение накачки эффективно поглощается уже на глубинах 100...200 мкм, то активные среды таких микролазеров изготавливались в форме пластин толщиной менее 1 мм и длиной до 10 мм.

К микролазерам принадлежат также лазеры с волноводным распространением света в активной генерирующей среде. Они представляют собой тонкий слой вол-

новода, заключенного между слоями материала с меньшим показателем преломления [2, 5, 8]. Типичная конструкция волноводного лазера на основе эпитаксиальной двухслойной структуры представлена на рис. 2. Современное состояние и проблемы мощных волноводных лазеров (до 10 Вт в непрерывном режиме излучения) представлены в [9].

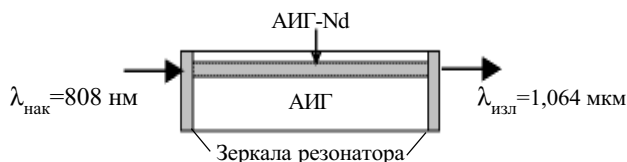


Рис. 2. Микролазер с волноводным распространением света в генерирующей среде ($\lambda_{\text{нак}}$ и $\lambda_{\text{изл}}$ — длины волн накачки и излучения лазера)

Настоящая статья посвящена преимущественно другому типу микролазеров, а именно, микрочиповым лазерам с модуляцией добротности и продольной накачкой.

Идея реализации микролазера с диодной накачкой активной среды и с пассивным модулятором добротности, изготавливаемого по групповой технологии, впервые была предложена в 1989 г. в Lincoln Laboratory (США) [4, 6, 10, 11]. Несколько позже свой подход к реализации микрочипового лазера начали разрабатывать специалисты научного центра CEA LETI (Франция) [12, 13]. Следует заметить, что обе идеи одинаковы, однако технологические подходы к реализации лазеров в каждом случае существенно отличаются, что будет отмечено ниже.

Схематически конструкция микролазера с пассивным модулятором добротности с генерирующей средой на основе монокристалла $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}$ (АИГ-Nd), излучающего на длине волны $\lambda=1,064$ мкм, приведена на рис. 3. Толщина активной среды составляет 750...1500 мкм, концентрация ионов неодима — около 1 ат.% и более. Накачка осуществляется лазерным

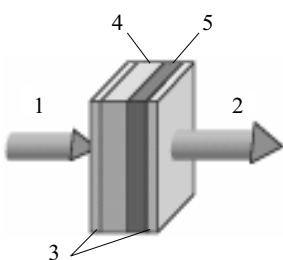


Рис. 3. Микрочиповый лазер с пассивной модуляцией добротности:

1 — излучение накачки; 2 — выходящий лазерный луч; 3 — зеркало резонатора; 4 — активная среда; 5 — пассивный абсорбер

диодом на основе гетероструктур GaAs-AlGaAs с $\lambda_n=808$ нм. Схема энергетических уровней ионов неодима, лазерные переходы и фрагмент спектра поглощения АИГ-Nd в области накачки представлены на рис. 4 [2, 3, 14].

В приведенной модели в качестве пассивного модулятора добротности используется монокристаллический слой алюмоиттриевого граната, содержащий ионы четырехвалентного хрома в тетраэдрических катионных позициях (АИГ- Cr^{4+}). Характерной особенностью кристаллов с ионами Cr^{4+} в тетраэдрической анионной координации является способность к т. н. насыщающемуся поглощению излучения в области максимума их полосы

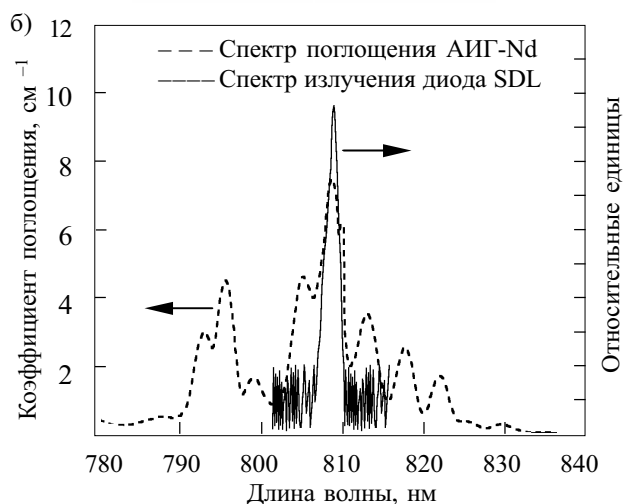
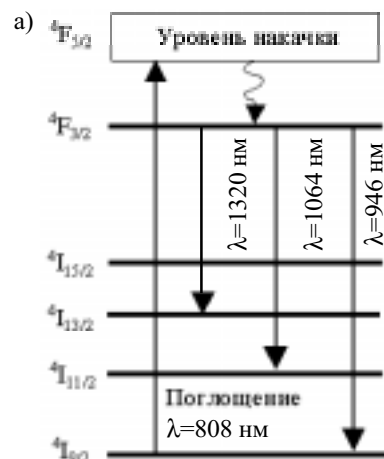


Рис. 4. Схема энергетических уровней ионов неодима и лазерные переходы в АИГ-Nd (a); спектр излучения GaAlAs диода накачки на фоне фрагмента спектра поглощения АИГ-Nd (б)

поглощения (переход $^3\text{A}_2 \rightarrow ^3\text{E}(^3\text{T}_2)$), т. е. около 1,1 мкм [15—17]. Эта особенность, получившая название фототропии, приводит к просветлению материала модулятора (насыщающегося поглотителя) при высокой плотности потока излучения.

Схема энергетических уровней ионов Cr^{4+} в тетраэдрическом анионном окружении представлена на рис. 5. При малой мощности излучения активной среды АИГ-Nd с длиной волны 1,06 мкм происходит возбуждение электронов с основного уровня на уровень $^3\text{E}(^3\text{T}_2)$, которые, через короткое время после поглощения кванта падающего света, без излучения переходят на уровень $^3\text{B}_2(^3\text{T}_2)$. Затем большая их часть снова без излучения возвращается на основной уровень. При малой интенсивности излучения переполнение с уровня $^3\text{B}_2(^3\text{T}_2)$ на $^3\text{E}(^3\text{T}_1)$ практически не происходит из-за малого поперечного сечения поглощения с возбужденного уровня. При увеличении мощности излучения заселенность уровня $^3\text{B}_2(^3\text{T}_2)$ в среде модулятора достигает значительной величины, и тогда электроны основного уровня и возбужденного уровня, поглотив квант излучения, перераспределяются между уровнями $^3\text{B}_2(^3\text{T}_2)$ и $^3\text{E}(^3\text{T}_1)$. Общее

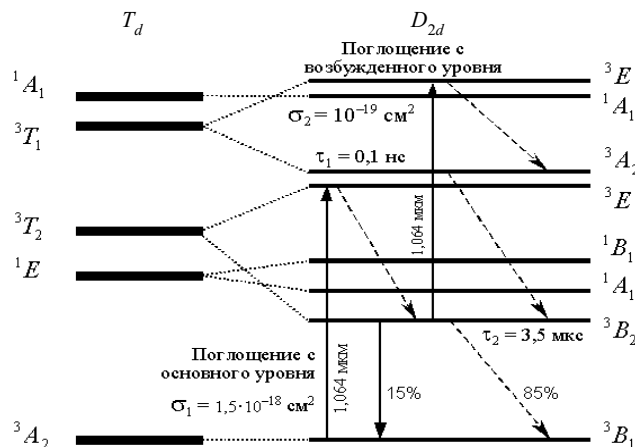


Рис. 5. Схема энергетических уровней ионов Cr^{4+} в тетраэдрической координации

количество актов поглощения уменьшается, и при этом наступает просветление слоя АИГ- Cr^{4+} в области 1,06 мкм. Из зависимости коэффициента поглощения АИГ- Cr^{4+} от мощности падающего излучения неодимового лазера АИГ- Nd^{3+} , показанной на рис. 6 [18], видно, что разница пропускания света в насыщенном и ненасыщенном состояниях может достигать нескольких десятков процентов.

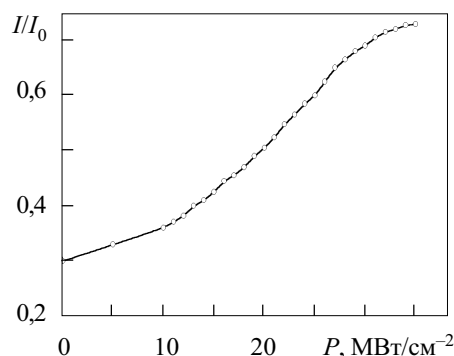


Рис. 6. Зависимость коэффициента поглощения АИГ- Cr^{4+} (I/I_0) от мощности падающего излучения неодимового лазера АИГ- Nd^{3+} (P)

В конструкции, приведенной на рис. 3, насыщаемый поглотитель и активная среда расположены между двумя диэлектрическими зеркалами, которые образуют оптический резонатор лазера. Благодаря значительному поглощению в слое поглотителя в ненасыщенном состоянии добротность резонатора недостаточна для возбуждения генерации. Поглощение света в слое АИГ- Cr^{4+} происходит до тех пор, пока заселенность уровня ${}^3\text{B}_2({}^3\text{T}_2)$ не достигнет определенного критического значения, а затем поглощение почти мгновенно уменьшается, добротность резко возрастает, и генерируется очень короткий импульс лазерного излучения. После этого система возвращается в исходное состояние.

Таким образом, свойство насыщающегося поглощения слоя АИГ- Cr^{4+} приводит к быстрому периодическому изменению добротности лазерного резонатора и генерации периодических импульсов лазерного излучения с длиной волны генерации АИГ- Nd^{3+} . Следует отметить, что временные и энергетические

параметры импульса генерации являются очень стабильными во времени и практически не зависят от мощности накачки, а определяются, в основном, толщиной слоя насыщаемого поглотителя и концентрацией фототропных центров в нем.

Дополнительное использование параметрических эффектов в нелинейно-оптических кристаллах типа ВВО (BaB_2O_4), КТР (KTiOPO_4), РРЛН (периодически поляризованный ниобат лития) и др. для умножения или существенного изменения частоты излучения значительно расширяет сферу применения микрочиповых лазеров [11, 12, 19, 20]. Типичная схема реализации микрочипового лазера с умножением частоты представлена на рис. 7 [4].

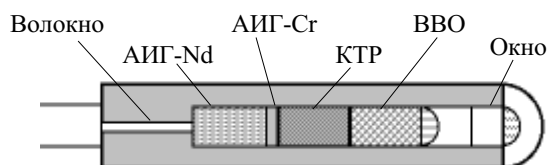


Рис. 7. Микрочиповый лазер с умножением частоты излучения

Для повышения эффективности и снижения энергопотребления, а также для использования в волоконно-оптических системах конструкция микрочиповых лазеров несколько видоизменяется. Для концентрации излучения накачки в активной среде входная грань изготавливается методом травления по специальной технологии в форме, близкой к сферической (рис. 8), а для фокусировки лазерного луча в оптическое волокно на выходной грани структуры методами тонкопленочной технологии формируется микролинза из диоксида кремния [21]. Такая конструкция обеспечивает возможность

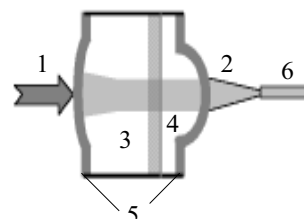


Рис. 8. Микрочиповый лазер со сферическим резонатором: 1 — излучение накачки; 2 — выходящий лазерный луч; 3 — активная среда; 4 — микролинза на основе диоксида кремния; 5 — зеркала резонатора; 6 — волновод

получения лазерного луча диаметром до 7,2 мкм, а концентрация энергии накачки позволяет на порядок снизить порог генерации и использовать для накачки маломощные (100...150 мВт) лазерные диоды.

Как уже упоминалось, для практической реализации рассмотренной схемы микрочипового лазера с пассивной модуляцией добротности было предложено два подхода. В первом, предложенном в Lincoln Laboratory, использовалась технология склеивания или диффузионного сращивания двух прецизионно отполированных пластин генерирующей и модулирующей сред, последующего нанесения входного и выходного диэлектрических зеркал и резки полученной заготовки на отдельные лазерные чипы [19, 22]. В качестве материала генерирующей среды могут использоваться практически все известные твердотельные матрицы, а насыщаемый поглотитель вы-

бирается в зависимости от типа матрицы и длины волны генерации.

Наибольшее распространение получили микроциповые лазеры на основе АИГ-Nd (активная среда) — АИГ-Cr⁴⁺ (насыщаемый поглотитель). Учитывая, что в объемных монокристаллах АИГ-Cr⁴⁺ концентрация активных фототропных центров обычно невысока (~5·10¹⁷ см⁻³) [18, 23], необходимая толщина слоя модулятора достигает нескольких миллиметров. Кроме традиционно используемых кристаллов АИГ, в качестве матриц неодимовых микроциповых лазеров применяются также монокристаллы YVO₄, YLiF₄, Y₂SiO₅, Sr₅(PO₄)₃F, YAl₃(BO₃)₄, причем генерацию получают не только на длине волны 1,06 мкм, но и на 0,9 и 1,3 мкм [25]. Для безопасных для зрения ("eye-safe laser") лазерных систем разработан микроциповый лазер с длиной волны излучения 1,54 мкм, в котором использована генерирующая среда на основе фосфатного стекла, активированного эрбием и сенсибилизированного иттербием, толщиной 750 мкм и насыщаемого поглотителя — кристаллической пластины LaMgAl₁₁O₁₉-Co²⁺ толщиной 500 мкм [12, 26, 27]. Схема энергетических уровней ионов Co²⁺ и их спектры поглощения в оксидных кристаллах приведены в работе [28]. Накачка в таком лазере происходит лазерными диодами на основе GaInAs. Типичные параметры такого лазера:

- длина волны накачки 0,973 мкм;
- основная длина волны генерации 1,55 мкм;
- энергия в импульсе 5...15 мкДж;
- средняя мощность 10...65 мВт;
- мощность в импульсе 1...4 кВт;
- длительность импульса <3 нс;
- частота повторения импульсов 1...20 кГц;
- расходимость пучка <10 мрад.

В стадии разработки находятся также микроциповые лазеры на основе кристаллических матриц, легированных тулием, с длиной волны генерации ~2 мкм и накачкой лазерными диодами в области 790 нм [12]. В качестве перспективных активных сред микроциповых лазеров рассматриваются также оксидные кристаллы, активированные ионами иттербия, привлекательность которых связывается в основном с относительно высокой концентрацией активатора, высокой эффективностью накачки (более 90%), большим временем жизни верхнего лазерного уровня (~0,95 мс), малой длиной поглощения накачки (<0,5 мм), минимизирующей проблему "термической линзы" [29, 30].

Полностью монолитная конструкция была предложена исследователями из CEA LETI. Она базировалась на использовании эпитаксиальных структур, в которых роль генерирующей среды выполняла подложка из АИГ-Nd, а роль пассивного модулятора — эпитаксиальная пленка АИГ-Cr⁴⁺ [12, 13, 20, 31]. Ключевым элементом технологического процесса изготовления такого типа лазеров является получение монокристаллического слоя насыщающегося поглотителя (АИГ-Cr⁴⁺) с заданной толщиной и концентрацией ионов Cr⁴⁺ на поверхности активной среды [31].

Для получения эпитаксиальной структуры практически безальтернативно используется метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) [13, 20, 32]. Из-за высоких скоростей пленкообразования (≥1 мкм/мин) он позволяет не только получать монокристаллические пленки толщиной до нескольких сот микрометров, но и, благодаря особенностям ЖФЭ, увеличить концентрацию фототропных центров более чем на порядок по сравнению с их концентрацией в монокристаллах, выращенных методом Чохральского. Принимая во внимание возможность получения эпитаксиальных структур большой площади с высокой однородностью, структурным совершенством и воспроизводимостью свойств пленок, такой подход является более технологичным в условиях серийного производства, позволяя методом групповой технологии изготовить до нескольких сот практически идентичных микролазеров из одной эпитаксиальной структуры.

На рис. 9 представлена типовая схема технологического процесса изготовления микроциповых лазеров из монолитных эпитаксиальных структур [20, 33—35]. Необходимо отметить, что такая схема обеспечивает изготовление в одном технологическом цикле большого числа (более 200 шт. на подложке Ø25,4 мм или около 1000 шт. на подложке Ø50,8 мм) идентичных по своим параметрам чипов микролазеров размерами ~1×1 мм. В конечном счете использование такого технологического процесса приводит к тому, что стоимость активной среды перестает быть определяющей в стоимости всего лазера, а его общая стоимость становится сравнимой со стоимостью газовых лазеров аналогичной средней мощности [4]. Последнее обстоятельство открывает огромные перспективы для возникновения новых применений микроциповых лазеров.

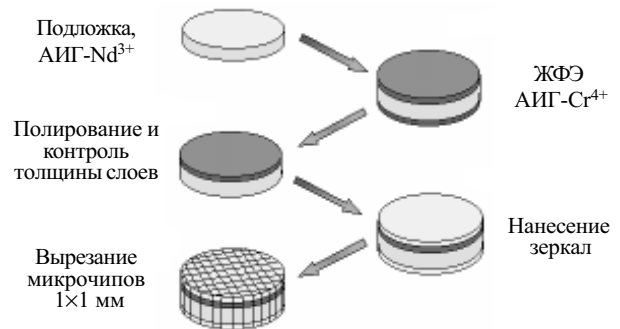


Рис. 9. Схема типового процесса изготовления микроциповых лазеров по технологии CEA LETI

На сегодняшний день серийный выпуск микроциповых лазеров различного назначения освоен фирмами NanoLase (Франция), Litton Airtron Synoptics (США), FIRN (Россия) и др. [26, 35, 36]. Фирма NanoLase выпускает микроциповые лазеры по лицензии CEA LETI, а фирма Litton Airtron Synoptics — по собственной технологии; обе основываются на использовании эпитаксиальных пленок АИГ-Cr⁴⁺. Коммерческая стоимость микроциповых лазеров на рынке составляет, в зависимости от типа лазера, 5,0—8,0 тыс. долл. США, что значительно меньше цены аналогичных традиционных твердотельных лазеров.

Общий вид микрочипового лазера фирмы NanoLase [12, 26] представлен на **рис. 10**. Типичные характеристики выпускаемых микрочиповых лазеров

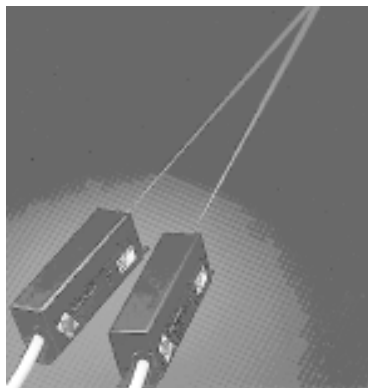


Рис. 10. Микрочиповый лазер фирмы NanoLase

с пассивной модуляцией добротности на основе эпитаксиальных структур АИГ-Nd/АИГ-Cr⁴⁺, по данным [20,26,33]:

- длина волны накачки 0,808 мкм;
- основная длина волны генерации 1,064 мкм;
- энергия импульса 1...10 мкДж;
- средняя мощность 10...50 мВт;
- пиковая мощность в импульсе 10...50 кВт;
- длительность импульса <1 нс;
- частота повторения импульсов 10...50 кГц;
- расходимость пучка <10 мрад.

Ввиду высокой пиковой мощности и качества излучения микрочипового лазера основная длина волны генерации ($\lambda=1,064$ мкм) может быть эффективно преобразована в высшие гармоники в видимой и УФ-области спектра с помощью умножителей частоты на основе нелинейно-оптических кристаллов. Так, при использовании монокристалла КТР длиной 5 мм были получены импульсы ($\tau_{\text{имп}}=0,44$ нс) второй гармоники ($\lambda=532$ нм) с эффективностью преобразования до 70% [19] и средней энергией 3,5 мкДж [4]. Комбинация преобразователей на основе кристаллов КТР и ВВО ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$), как схематично изображено на рис. 7, позволяет получать третью ($\lambda=355$ нм) или четвертую ($\lambda=266$ нм) гармоники. При этом эффективность преобразования в четвертую гармонику достигает 20% при средней энергии импульсов 0,7 мкДж. Применение параметрических генераторов позволяет перестраивать частоту лазерного излучения в инфракрасном диапазоне вплоть до 4 мкм с достаточно высокой эффективностью.

Преимущества монолитной конструкции микрочиповых лазеров с пассивной модуляцией добротности и многообещающие перспективы их использования в различных областях современных технологий стимулировали развитие работ по разработке оригинальной технологии получения эпитаксиальных лазерных структур во Львовском НИИ материалов научно-производственного предприятия "Карат" [32, 38, 39]. Эти исследования преследовали две цели: во-первых, получение, кроме уже известных эпитаксиальных структур АИГ-Nd/АИГ-Cr⁴⁺ на подложках ориентации (111), аналогичных структур на подложках (100), которые, согласно [40],

могут иметь ряд преимуществ при использовании лазерных импульсов с различной поляризацией. Во-вторых — разработка технологии получения структур на основе генерирующей среды — подложки $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}\text{-Nd}$ (ГГГ-Nd) и насыщаемого поглотителя — эпитаксиальной пленки ГГГ-Cr⁴⁺ (длина волны генерации 1,06 мкм) [38].

Применение ГГГ в качестве матрицы монолитных лазерных структур может иметь ряд преимуществ. Главное из них состоит в том, что мощность, при которой происходит насыщение поглощения фототропных центров ГГГ-Cr⁴⁺, несколько выше, чем в АИГ-Cr⁴⁺. Это позволяет накопить большую энергию в импульсе излучения лазера с модулированной добротностью. Кроме того, монокристаллы ГГГ являются более совершенными по структуре, и можно ожидать, что активированные подложки ГГГ-Nd диаметром до 76 мм могут быть более высокого качества, чем подложки АИГ-Nd такого же диаметра. В конечном счете это обещает снижение стоимости микрочиповых лазеров.

Эпитаксиальное наращивание пленок АИГ-Cr⁴⁺ и ГГГ-Cr⁴⁺ проводилось по схеме, типичной для технологии ЖФЭ гранатов [32, 38, 39]. Гранатообразующие оксиды (Al_2O_3 и Y_2O_3 либо Ga_2O_3 и Gd_2O_3), взвешенные в определенном соотношении, наплавляются в платиновом тигле вместе с флюсом-растворителем $\text{PbO-B}_2\text{O}_3$. Необходимое количество легирующей примеси (Cr_2O_3) добавляется в раствор-расплав. Учитывая, что устойчивым валентным состоянием хрома в структуре граната является состояние Cr^{3+} , то для стабилизации ионов хрома в состоянии Cr^{4+} и сохранения электронейтральности в расплав дополнительно вводится соединение, содержащее ионы со стабильной валентностью +2, например, Mg^{2+} . Для полного растворения всех компонентов и гомогенизации раствора-расплава температуру в печи поднимают до уровня выше температуры насыщения на 100...150°C и выдерживают несколько часов. После медленного понижения температуры расплава до температуры выращивания (на 10...30°C ниже температуры насыщения раствора по отношению к фазе граната) в расплав на определенное время погружается соответствующая монокристаллическая подложка толщиной 0,75...1,5 мм, поверхности которой обработаны до эпитаксиального качества, т. е. без каких-либо нарушений кристалличности поверхностного слоя. Толщина полученной эпитаксиальной пленки пассивного поглотителя определяется временем выдержки подложки в расплаве, а концентрация активных ионов Cr^{4+} — общей концентрацией хрома и компенсационно-стабилизирующего двухвалентного элемента в растворе-расплаве.

Таким образом были получены эпитаксиальные пленки АИГ-Nd(111)/АИГ-Cr⁴⁺, АИГ-Nd(100)/АИГ-Cr⁴⁺, а также ГГГ-Nd(111)/ГГГ-Cr⁴⁺ с толщиной до 250 мкм и контролируемой концентрацией фототропных центров до $\sim 10^{19}$ см⁻³, имеющие коэффициент поглощения на длине волны 1,06 мкм до ~ 40 см⁻¹ [38]. Типичный спектр поглощения пленки ГГГ-Cr⁴⁺ представлен на **рис. 11**.

Возможность управления концентрацией фототропных центров в эпитаксиальных пленках, а также мо-

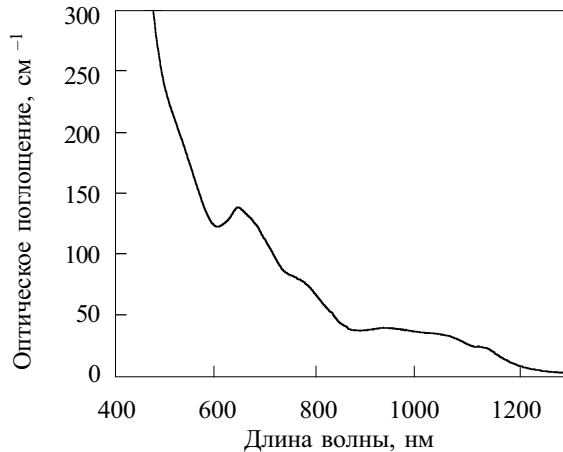


Рис. 11. Спектр оптического поглощения пленки ГТГ- Cr^{4+}

нокристаллах и АИГ- Cr^{4+} , с помощью окислительного высокотемпературного отжига исследовалась в [41, 42]. Полученные структуры и тестирование их способности к модуляции излучения неодимового лазера подтверждают возможность управляемого получения необходимых для конкретных применений лазерных структур с заданными характеристиками.

Микрочиповые лазеры, благодаря их малым размерам, возможности функционирования как в режиме непрерывной генерации, так и в импульсном режиме, множеству функциональных и конструктивных решений, низкой стоимости и исключительно высокому качеству луча, находят все более широкое применение в тех отраслях практической деятельности, где требуется использование лазерных источников малой и средней мощности излучения и которые традиционно используют аргоновые, гелий-кадмиевые, импульсные азотные лазеры, а также АИГ-лазеры с активной модуляцией добротности и другие. В отдельных отраслях техники, особенно там, где проблемы качества излучения и массогабаритных характеристик являются определяющими, твердотельные микролазеры вообще не имеют конкуренции.

Основные преимущества микрочиповых лазеров (малая длительность импульсов, достаточно высокая мощность в импульсе, стабильность выходной мощности и формы линии излучения, малая расходимость пучка и т. д.) наиболее очевидны при их использовании в дальнометрах как военного, так и гражданского назначения [4, 12, 20, 21, 43]. Так, уже разработаны автомобильные дальнометры, дальнометрические системы для альтиметров, для использования в строительстве и архитектуре, топографирования фасадов зданий, применения в робототехнике, навигации морских и воздушных судов и др. Разработанные дальнометрические системы обеспечивают измерение расстояний от нескольких сотен метров с сантиметровой точностью до 5 км с точностью ± 1 м. При этом при измерении дальности до 100 м точность определения не хуже чем 1 мм.

Специалисты CEA LETI на основе микрочипового лазера "eye-safe" (1,55 мкм) с импульсной мощностью в несколько кВт разрабатывают военный вариант дальнометра, способного измерять дальность до цели в несколько километров. Этой же фирмой на

основе АИГ:Nd/АИГ: Cr^{4+} микрочипового лазера (1,06 мкм) с пассивной модуляцией добротности была разработана система трехмерного видения для военного применения MALIS [44]. Гражданский вариант телеметрической системы MALIS успешно использовался для пространственного маневрирования подвижных робототехнических средств.

Автомобильный дальнометр-акселерометр, интегрированный в индивидуальную систему обеспечения безопасности движения, в котором используется микрочиповый лазер (1,06 мкм) с активным электрооптическим модулятором на основе LiTaO_3 , обеспечивает измерение дальности до 50 м с точностью определения ± 1 мм и скорости до 25 м/с [21]. Общий вид автомобильного дальнометра представлен на рис. 12, б.

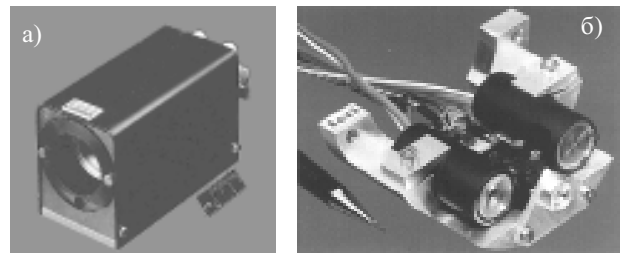


Рис. 12. Прототип компактного дальнометра на основе микрочипового лазера с пассивной модуляцией добротности [12] (а) и общий вид автомобильного дальнометра-акселерометра CEA LETI [20] (б)

Специалистами Lincoln Laboratory на основе зеленого ($\lambda=532$ нм) микрочипового лазера с безопасной для глаза энергией излучения в импульсе ($\sim 0,2$ мкДж) разработаны система для измерения дальности до 50 м с точностью определения ± 1 мм, а также система трехмерного видения для робототехнических устройств [4].

Ультрафиолетовые лазеры (λ 355 и 266 нм) являются основой устройств для непрерывного мониторинга окружающей среды и дистанционного контроля содержания вредных органических и неорганических веществ в атмосфере, воде, почве, продуктах питания [4, 45]. Способность биологических объектов к флуоресценции под действием ультрафиолетового излучения дает уникальную возможность создавать на основе УФ микрочиповых лазеров медицинские и биологические диагностические системы, которые благодаря своим малым размерам могут быть расположены вблизи исследуемого объекта. Для такого типа систем отпадает необходимость передачи мощного УФ-излучения с помощью оптического волокна, которое характеризуется значительным затуханием в этой области спектра.

Перспективным является также применение микрочиповых лазеров в микроэлектронике, коммуникационных и информационных технологиях.

Бесспорно, сфера применения микрочиповых лазеров не ограничивается упомянутыми областями и постоянно расширяется, а учитывая, что микролазерные технологии находятся только на начальной стадии своего развития, то с их прогрессом следует ожидать появления новых полезных и неожиданных научно-технических и технологических решений.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кравцов Н. В., Наний О. Е. Высокостабильные одностатотные твердотельные лазеры // Квантовая электроника.— 1993.— Т. 20, № 4.— С. 322—344.
2. Kaminskii A. A. Crystalline lasers: physical processes and operating schemes // Boca Raton, CRC Press.— 1996.
3. Матковский А. О. Материали квантової електроніки // Львів: Ліга-Пресс, 2000.
4. Zayhowski J. J. Microchip lasers create light in small spaces // Laser Focus World.— 1996.— Vol. 32, N 4.— P. 73—78.
5. Jankiewicz Z., Kopczynski K. Diode-pumped solid-state lasers // Opto-Electronics Review.— 2001.— Vol. 9, N 1.— P. 19—33.
6. Zayhowski J. J. Microchip lasers // The Lincoln Lab. Journal.— 1990.— Vol. 3, N 3.— P. 427—554.
7. Зверев Г. М., Куратьев И. И., Шестаков А. В. Твердотельные микролазеры на кристаллах с высокой концентрацией ионов неодима // Изв. АН СССР. Сер. Физ.— 1982.— Т. 46.— С. 1561—1566.
8. Bonner C. L., Brown C. T., Shepherd D. P. et al. Diode-bar and pumped high-power Nd:Y₃Al₅O₁₂ planar waveguide laser // Opt. Lett.— 1998.— Vol. 23.— P. 942.
9. Shepherd D. P., Hettrick S. J., Li C. et al. High-power planar dielectric waveguide lasers // J. Phys. D: Appl. Phys.— 2001.— N 34.— P. 2420—2432.
10. Zayhowski J. J., Dill C. Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers // Opt. Lett.— 1994.— Vol. 19, N 18.— P. 1427—1429.
11. Zayhowski J. Microchip lasers // Optical materials.— 1999.— Vol. 11.— P. 255—267.
12. Molva E. Microchip lasers and their applications in optical microsystems // Optical materials.— 1999.— Vol. 11.— P. 289—299.
13. Ferrand B., Chambaz B., Couchaud M. Liquid phase epitaxy: a versatile technique for the development of miniature optical components in single crystal dielectric media // Optical Materials.— 1999.— Vol. 11, N 1.— P. 101—114.
14. Зверев Г. М., Голяев Ю. Д. Лазеры на кристаллах и их применение.— М.: Радио и связь, 1994.
15. Zhavoronkov N. I., Mikhailov V. P., Kuleshov N. V. et al. Absorption saturation in Cr⁴⁺-activated silicate crystals and use of these crystals in passive laser switches // Quantum Electronics.— 1995.— Vol. 25, N 1.— P. 31—33.
16. Зверев Г. М., Шестаков А. В. Перестраиваемые лазеры ближнего ИК диапазона на основе оксидных кристаллов // Электронная техника. Сер. Лазерная техника и оптоэлектроника.— 1989.— Вып. 3.— С. 15—17.
17. Daskalu T., Philipps G., Weber H. Investigation of Cr⁴⁺:YAG passive Q-switch in CW pumped Nd:YAG lasers // Optics and Laser Technology.— 1997.— Vol. 29, N 3.— P. 145—149.
18. Frukacz Z., Łukasiewicz T., Malinowski M., Mierczyk Z. Growth of Cr⁴⁺:YAG crystals for applications in laser technique // Proc. SPIE.— 1995.— Vol. 2373.— P. 74—78.
19. Zayhowski J. Passively Q-switched Nd-YAG microchip lasers and applications // J. Alloys and Compounds.— 2000.— Vol. 303—304.— P. 393—400.
20. Microchip lasers // CEA-Leti Booklet.— 1998.
21. Hill P. France maintains lead in microchip lasers // Opto&Laser Europe.— 1998.— Issue 57.— P. 27—30.
22. Zayhowski J. J. Q-switched operation of microchip lasers // Opt. Lett.— 1991.— Vol. 16.— P. 575—577.
23. Sugimoto A., Nobe Y., Yamagishi K. Crystal growth and optical characterization of Cr, Ca:Y₃Al₅O₁₂ // J. Cryst. Growth.— 1994.— Vol. 140.— P. 349—354.
24. Markgraf S. A., Pangborn M. F., Dieckmann R. Influence of different divalent co-dopants on the Cr⁴⁺ content of Cr-doped Y₃Al₅O₁₂ // J. Crystal Growth.— 1997.— Vol. 180.— P. 81—84.
25. Henderson B., Bartman R. Crystal-field engineering of solid-state laser materials // University Press, Cambridge.— 2000.
26. Nanolase Technical Booklet, 1998.
27. Thony P., Ferrand B., Molva E. 1.55 μm passively Q-switched microchip laser // TOPS Advanced Solid State Lasers.— 1998.— Vol. 19.— P. 150—152.
28. Mierczyk Z. Nieliniowe absorber // Warszawa: WAT, 2000.
29. Pavel N., Saikawa J., Taira T. Radial pumped microchip high power composite Yb:YAG laser: design and power characteristics // Jap. J. App. Phys.— 2001.— Vol. 40.— P. 146—152.
30. DeLoach L. D., Payne S. A., Chase L. L. et al. Evaluation of absorption and emission properties of Yb³⁺ doped crystals for laser applications // IEEE Journal of Quantum Electronics.— 1993.— Vol. 29, N 4.— P. 1179—1190.
31. Ferretti M. YAG microchip laser development in France // EuroPhotonics.— Dec./Jan.— 1997.— P. 34—35.
32. Ubizskii S. B., Syvorotka I. M., Melnyk S. S. et al. Growth and characterization of YAG:Cr⁴⁺ epitaxial films // Proc. of SPIE.— 1998.— Vol. 3724.— P. 353—356.
33. NanoLasers Technology // Nanolase Technical Bulletin.— 1998, Sept.
34. Pat. 6014393 US. Laser materials and microlasers having high active ion concentration and production processes / L. Fulbert, E. Molva, B. Ferrand.— 11.01 2000.
35. Compact microlasers // Electrooptics.— 1999.— July/August.— P. 9.
36. FIRN. Technical Booklet, 2001.
37. Szweda R. Microchip lasers offer versatile power in a tiny low-cost package // Opto&Laser Europe.— 2000.— January.— P. 39—41.
38. Syvorotka I. M., Ubizskii S. B., Melnyk S. S. et al. Growth and optical absorption of GGG:Mg²⁺Cr⁴⁺ epitaxial films // Conference on laser and electro-optics Europe, CLEO-2000.— 10—15 September, 2000.— Nice, France.— CWF29.
39. Syvorotka I. M., Ubizskii S. B., Melnyk S. S., Matkovskii A. O. Growing and optical study of YAG:Cr⁴⁺ epitaxial films // Functional Materials.— 1999.— Vol. 6, N 2.— P. 345—348.
40. Brunel M., Emilie O., Vallet M. et al. Experimental and theoretical study of monomode vectorial lasers passively Q switched by Cr⁴⁺: yttrium aluminium garnet absorber // Phys. Rev. A.— 1999.— Vol. 60, N 5.— P. 4052—4058.
41. Ubizskii S. B., Syvorotka I. M., Melnyk S. S., Matkovskii A. O. Colour centres investigation in pure and doped yttrium aluminium garnet epitaxial films // Radiat. Effects & Defects in Solids.— 1999.— Vol. 149.— P. 375—379.
42. Ubizskii S. B., Melnyk S. S., Padlyak B. V. et al. Chromium recharging processes in the Y₃Al₅O₁₂:Mg, Cr single crystal under the reducing and oxidizing annealing influence // Proc. SPIE.— 2001.— Vol. 4412.— P. 63—68.
43. Aubert J. J. Q-switched microchip lasers bring new applications to light // Laser Focus World.— 1995.— N 35.— P. 11—13.
44. Besesty P. Robot sees by microlaser telemetry // Opto&Laser Europe.— 1999.— Issue 58.— P. 14.
45. Guillot D. Microchip lasers extend into the UV // Opto&Laser Europe.— 1999.— Issue 59.— P. 9.

К. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО, Б. М. РАССАМАКИН,
С. М. ХАЙРНАСОВ

Украина, г. Киев, НТУУ "КПИ"
E-mail: nikol@industry.gov.ua

Дата поступления в редакцию
07.02.2002 г.

Оппонент к. т. н. Е. В. БОНДАРЕНКО
(НИИ "Штурм", г. Одесса)

КОНТУРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ С АЛЮМИНИЕВЫМ ИСПАРИТЕЛЕМ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ РЭА

Исследованы тепловые трубы: корпус — алюминиевый сплав, нержавеющая сталь, теплоноситель — ацетон, аммиак, капиллярный насос — порошок на основе окисла алюминия.

Наиболее общим видом систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) подвижных объектов являются комбинированные системы охлаждения, использующие в теплопередающем тракте несколько теплопередающих элементов и устройств, работающих по разным физическим принципам (теплопередающие шины, радиаторы, термосифоны, термоэлектрические модули, вихревые трубы, оросительные испарительные устройства, воздушные и водяные нагнетатели, магистрали и теплообменники и т. п.). В ряде случаев в комбинированных системах охлаждения эффективным является использование тепловых труб. Так, использование двух тепловых труб в комбинированной системе охлаждения современного многоэлементного фотоприемного устройства "Гранат-32" космической инфракрасной техники нового поколения позволило обеспечить эффективный отвод теплоты от 3072 элементов фоторезисторов, размещенных в герметичном отсеке устройства, и обеспечить надежную работу фотоприемного устройства [1].

При использовании аналогичных фотоприемных устройств в мобильных изделиях авиационного или морского назначения, где охлаждаемая РЭА может изменять свою ориентацию в поле силы гравитации вплоть до 180 градусов, тепловые трубы должны обеспечить надежную передачу теплоты при самой неблагоприятной их ориентации (когда сила гравитации препятствует возврату теплоносителя в зону испарения тепловой трубы). Традиционные тепловые трубы мало пригодны для таких целей. Поэтому наиболее перспективным в комбинированных системах охлаждения РЭА подвижных объектов является использование более сложных, т. н. "антигравитационных" или контурных тепловых труб (КТТ), которые эффективно работают при любой ориентации в поле силы гравитации.

"Антигравитационные" или контурные тепловые трубы известны давно [2, 3], физические процессы, лежащие в основе их работы, изучены достаточно хорошо [4, 5]. Однако потенциальные возможности их пол-

ностью не реализованы, что объясняется в основном конструктивно-технологическими ограничениями [6]. В связи с этим разработка и исследование новых конструктивно-технологических решений по изготовлению КТТ является актуальной задачей.

Стоимостные характеристики, массу КТТ, технологичность изготовления и монтажа можно улучшить за счет использования материалов на основе алюминия вместо традиционно применяемых нержавеющей стали и титановых сплавов (для корпуса) и никелевых и титановых высокопористых структур в качестве капиллярного насоса КТТ. Так, в [7] было предложено разработать и изготовить недорогой образец КТТ, в основу которого были бы заложены доступные и недорогие конструкционные и технологические материалы. Корпус испарителя и контур КТТ было предложено изготовить из алюминиевого сплава АД-31, а капиллярный насос — из материала на основе окислов алюминия [8].

Однако высокая теплопроводность алюминиевого сплава АД-31 ($\lambda_m = 188$ Вт/(м·К)) может вызвать целый ряд проблем при обеспечении работоспособности КТТ: увеличение полного термического сопротивления, снижение стабильности, особенно пусковых характеристик. Для оценки влияния выбора конструкционных материалов на рабочие характеристики КТТ авторами были изготовлены и испытаны два типа образцов: корпус одного из них был изготовлен из алюминиевого сплава АД-31, другого — из нержавеющей стали 10Н12Х1Т.

Принципиально новой задачей, которую предстояло решить, было создание капиллярного насоса из материалов на основе оксидов алюминия.

С использованием традиционных методов порошковой металлургии была разработана технология и получен необходимый материал (оксидная высокопористая (ОВП) керамика) на основе двух видов порошка Al_2O_3 — ультрадисперсного криохимического (УДКХ) и мелкодисперсного порошка (МДП).

Таблица 1
Свойства ОВП-керамики на основе различных оксидов алюминия

Порошок основы	Пористость, %	Средний диаметр пор, мкм	Проницаемость $\times 10^{12}$, м ²	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Прочность на сжатие, МПа
УДКХ	65—80	0,2—2,8	0,5—0,8	0,4—0,7	20
МДП	60—70	2,0—10,0	0,6—0,8	0,3—0,5	12

При изготовлении ОВП-керамики ставилась задача получить материал со следующими параметрами: пористость более 60%, средний диаметр пор 1—10 мкм, проницаемость не ниже ранее применяемых материалов капиллярного насоса из металлических порошков, малая теплопроводность, достаточная технологическая прочность. Как показали результаты исследований, необходимый материал можно изготовить из каждого из указанных выше порошков. ОВП-керамика на основе УДКХ-порошка имела значительно лучшие характеристики пористой структуры по сравнению с ОВП-керамикой на основе МДП (см. табл. 1).

Методом ртутной порометрии изучалось распределение пор по размерам полученных материалов. Измерения производились на установке "Пор Сайзер 9300" фирмы Micromeritics (США).

Вид кривых распределения пор по размерам для ОВП на основе порошка МДП (см. рис. 1, а) указывает на наличие фракционной неоднородности порошка в начальной смеси, что приводит к заметной раз-

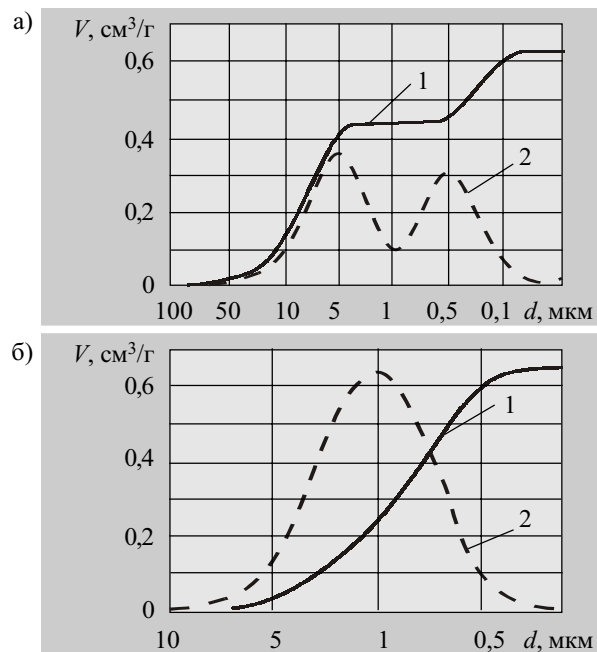


Рис. 1. Дифференциальная (1) и интегральная (2) кривые распределения пор по размерам для ОВП-керамики на основе МДП (а) и УДКХ-порошка Al_2O_3 (б): V — объем пор в одном грамме образца ОВП-керамики; d — средний диаметр пор

нородности структуры материала и может привести к ухудшению гидродинамических свойств капиллярного насоса КТТ в процессе эксплуатации. С этой точки зрения более предпочтительным является материал на основе УДКХ-порошка Al_2O_3 . Однако в данном исследовании, исходя из меньшей стоимости порошка МДП по сравнению с УДКХ (приблизительно на порядок) и более высокой степени отработанности технологии изготовления капиллярного насоса из ОВП-керамики на его основе, капиллярный насос был изготовлен из материала на основе МДП.

Для комбинированной системы охлаждения фотоприемного устройства инфракрасной техники была

разработана конструкция контурной тепловой трубы (рис. 2), учитывающая конструктивные особенности элементов охлаждения и объекта, в котором она функционирует. Площадка под установку тепловыделяющего элемента имеет размеры 30×30 мм, площадка конденсатора — 40×70 мм. Обе площадки были изготовлены из алюминиевого сплава. Диаметр испарителя 14 мм, расстояние между испарителем и конденсатором — 125 мм.

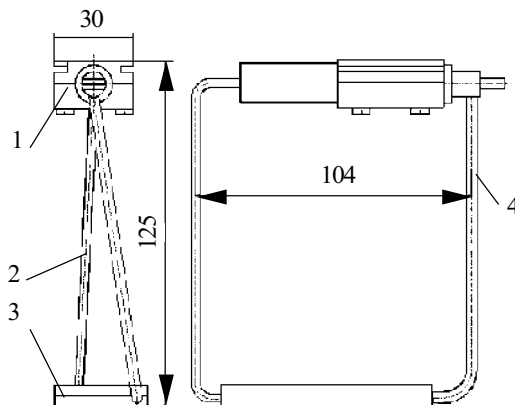


Рис. 2. Общий вид конструкции КТТ:
1 — испаритель; 2 — конденсаторовод; 3 — конденсатор;
4 — паропровод

Для проведения исследований были изготовлены четыре экспериментальных образца контурных тепловых труб (по два образца каждого типа):

- А1, А2 (корпус — сплав АД-31, капиллярный насос — окись алюминия);
- Н1, Н2 (корпус — сталь 10Н12Х1Т, капиллярный насос — окись алюминия).

Отличительные геометрические параметры конструкций образцов А1, А2: внутренний диаметр паропровода $d_{\text{п}} = 3$ мм; внутренний диаметр жидкостного провода $d_{\text{ж}} = 2$ мм. Конденсатор выполнен в виде коаксиального канала. Параметры конструкций образцов Н1, Н2: $d_{\text{п}} = 3$ мм, $d_{\text{ж}} = 1,6$ мм. Конденсатор выполнен в виде змеевика из трубки внутренним диаметром 1,6 мм, длиной 150 мм, уложенного в пределах площадки зоны конденсации.

Во всех образцах капиллярный насос был выполнен из ОВП-керамики на основе порошка МДП и имел следующие параметры: общая пористость 68%, открытая пористость 60%, средний диаметр пор 2 мкм, проницаемость $0,8 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$. Образцы были заправлены ацетоном марки ЧДА (массовая доля основного вещества 99,8%). Масса заправки — 4 г.

Основной задачей испытаний было определение максимальной теплопередающей способности (Q_{max}), минимальной тепловой мощности запуска (Q_{min}), термического сопротивления и закономерности формирования температурного поля изготовленных экспериментальных образцов КТТ при различном их расположении в поле силы гравитации. Исследования проводились в стационарных режимах и в динамических (пусковые режимы, изменение характеристик КТТ при изменении ее ориентации в поле силы гравитации, переход на различные уровни тепловой нагрузки).

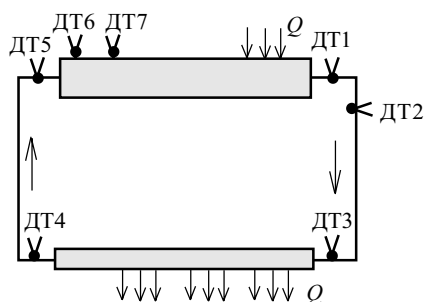


Рис. 3. Схема расположения датчиков температуры ДТ1—ДТ7

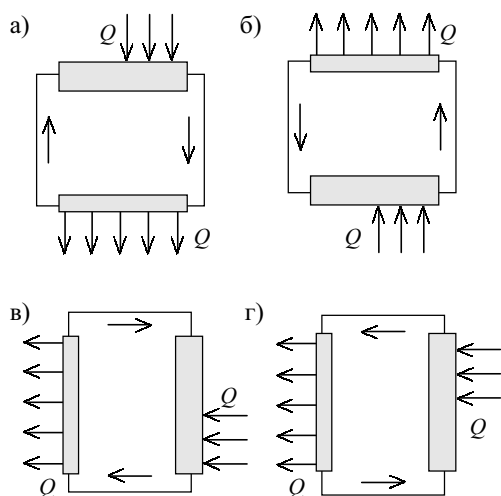


Рис. 5. Варианты ориентации КТТ

Исследования рабочих характеристик КТТ проводились на экспериментальной установке, представляющей собой специальную информационно-измерительную систему, построенную на базе ПЭВМ "Pentium-II". Схема и устройство экспериментальной установки описаны в [7].

Установка позволяла задавать тепловой поток на испарителе в пределах от 0 до 500 Вт. Значения подводимой тепловой мощности измерялись ваттметром Д522 с классом точности 0,2. Все наружные поверхности КТТ покрывались теплоизоляцией на основе базальтовых волокон, что сводило к минимуму теплооттоки из системы. Температура вдоль контура измерялась 7 датчиками температуры (медь-константановыми термопарами с диаметром электродов 0,16 мм), которые располагались на наружных поверхностях КТТ (схема расположения приведена на рис. 3).

Установка предусматривает получение информации о распределении температуры в пусковых и переходных режимах с частотой опрашивания каналов (датчиков температуры) не ниже 2 датчиков за 1 с, а также обеспечивает переключение одного температурного уровня охлаждающей воды на другой не более чем за 60 с при расходе 0,9...2,5 л/мин.

Для изучения пусковых характеристик КТТ при фиксированном положении контура в пространстве скачкообразно (от 0 до заданного начального теплового потока

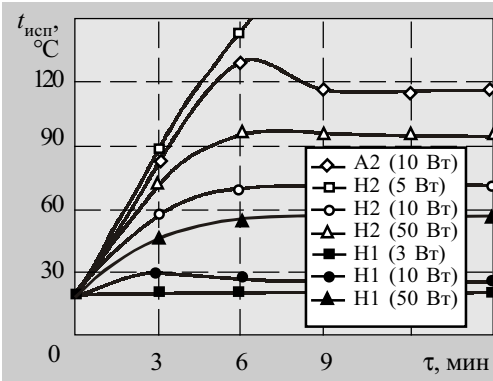


Рис. 4. Пусковые характеристики КТТ при $h=+125$ мм и $t_{\text{охл}}=20^\circ\text{C}$: $t_{\text{исп}}$ — температура стенки паропровода на выходе из испарителя (датчик ДТ1); А2, Н2 — ацетон; Н1 — аммиак

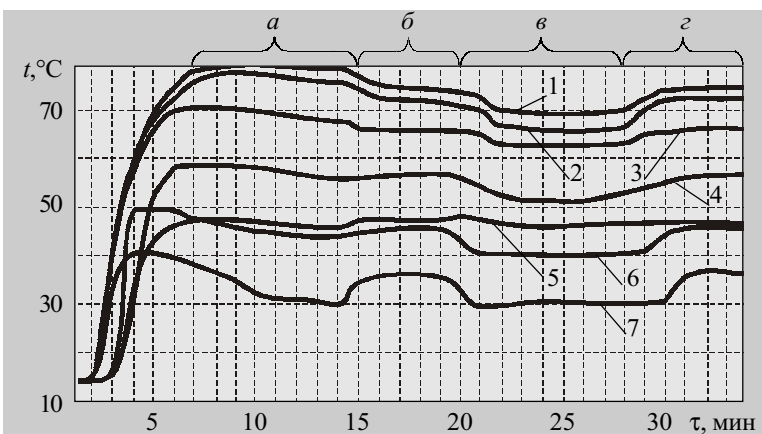


Рис. 6. Температурное поле КТТ Н2 при различной ориентации ее в поле силы гравитации ($Q=30$ Вт, $t_{\text{охл}}=15^\circ\text{C}$): 1 — ДТ1; 2 — ДТ2; 3 — ДТ3; 4 — ДТ7; 5 — ДТ6; 6 — ДТ5; 7 — ДТ4; а—г — варианты ориентации по рис. 5

$Q_i^{\text{н}}=\text{const}$) подавалась мощность на нагреватель. Определялись значения температуры во всех контрольных точках КТТ. При определении максимальных значений теплового потока Q_{max} тепловая нагрузка $Q_i^{\text{н}}$ плавно изменялась до предельной. Максимальная теплопередающая способность определялась при различной степени влияния силы гравитации. Изменение влияния силы гравитации имитировалось изменением высоты h превышения испарителя над конденсатором. Исследования проводились при температуре охлаждающей воды ($t_{\text{охл}}$) 10, 15 и 20°C .

На рис. 4 представлены результаты испытаний образцов КТТ А2 и Н2 при имитации режима запуска. На образце А2 наблюдался перегрев компенсационной полости образца, что привело к значительному росту полного термического сопротивления. Исследования показали, что при тепловом потоке 10 Вт движущий температурный напор (разность температур корпуса КТТ на выходе из испарителя и на входе в компенсационную полость) у образца А2 на 45°C выше, чем у образца Н2. Время выхода на стационарный режим составляет 9 и 6 мин для образцов А2 и Н2, соответственно.

Влияние превышения зоны испарения над зоной конденсации (в пределах его изменения от -125 до $+125$ мм) исследовалось путем снятия температурного поля КТТ при различной (рис. 5) ориентации теп-

ловой трубы. На **рис. 6** представлено температурное поле образца Н2 при различных значениях h (номера датчиков — в соответствии с **рис. 3**).

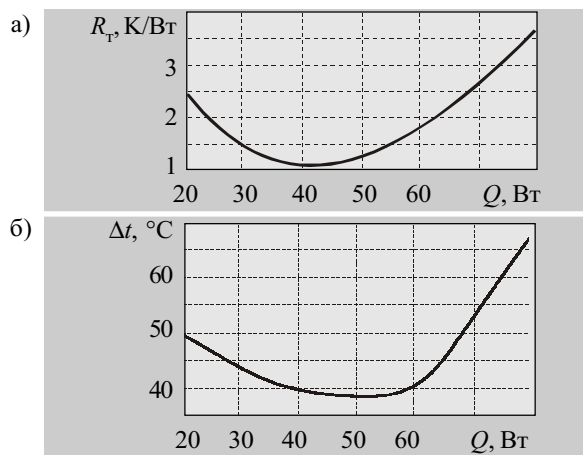


Рис. 7. Зависимость полного термического сопротивления R_t (а) и движущего температурного напора Δt (б) от подводимой тепловой нагрузки для образца Н2 (ацетон, $h=+125$ мм)

На **рис. 7, а** приведена зависимость термического сопротивления КТТ Н2 от подводимой тепловой нагрузки при $t_{\text{охл}}=15^\circ\text{C}$, а на **рис. 7, б** — зависимость движущего температурного напора. Испытания подтвердили, что для КТТ малые значения подводимой тепловой нагрузки ($Q < 20$ Вт) отрицательно сказываются на движущем температурном напоре. Для образца Н2 наиболее благоприятный диапазон подводимой тепловой мощности составляет 20...65 Вт.

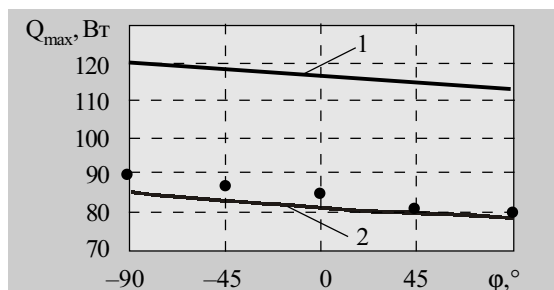


Рис. 8. Зависимость максимальной теплопередающей способности от угла превышения ϕ зоны испарения над зоной конденсации (КТТ Н2, ацетон): 1 — расчет, $t_v=43^\circ\text{C}$, $t_c=-4^\circ\text{C}$; 2 — расчет, $t_v=124^\circ\text{C}$, $t_c=43^\circ\text{C}$; ● — эксперимент, $t_v=124^\circ\text{C}$, $t_c=43^\circ\text{C}$

Была также исследована максимальная теплопередающая способность (Q_{max}) образца Н2 в зависимости от различной ориентации КТТ в поле силы гравитации. Сопоставление экспериментальных результатов и результатов расчета Q_{max} по модели, представленной в [6], приведены на **рис. 8**. (Здесь t_v — температура пара в испарителе, t_c — температура жидкой фазы теплоносителя на выходе из конденсатора.) Как видно из рисунка, наблюдается достаточно удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных.

Однако результаты экспериментального исследования КТТ из алюминиевого сплава и нержавеющей стали с ацетоном в качестве теплоноси-

теля свидетельствуют об ограниченной эффективности таких КТТ. Как и ожидалось, использование в качестве материала корпуса высокотеплопроводного алюминиевого сплава АД31 приводит к росту движущего температурного напора, ухудшению и снижению стабильности характеристик, особенно пусковых. Образцы Н1 и Н2 со стальным корпусом показали более стабильную работу как в стационарных, так и в динамических режимах. Вместе с тем значение полного термического сопротивления образцов Н1 и Н2 все же остается достаточно высоким. Для некоторых комбинированных систем охлаждения полученного термического сопротивления может оказаться вполне достаточно, но для комбинированных систем охлаждения фотоприемных устройств желательно иметь КТТ с меньшим термическим сопротивлением при передаче тепловых потоков в диапазоне 5...50 Вт.

В связи с этим был проработан вариант использования другого теплоносителя (аммиака) с более высоким значением крутизны линии насыщения dP/dT (см. **табл. 2**).

С этой целью образец Н1 был исследован с аммиаком в качестве теплоносителя (масса заправки 3,5 г).

Таблица 2
Сравнительная характеристика параметров теплоносителей КТТ (при температуре теплоносителя 50°C)

Теплоноситель	Поверхностное натяжение, $\sigma \cdot 10^2$, Н/м	Крутизна линии насыщения, dP/dT , кПа/К	Капиллярное давление, $\Delta P_{\text{стmax}}$ (при $d_n = 2$ мкм), кПа
Ацетон	2,0	2,8	40,0
Аммиак	1,6	72,0	32,0

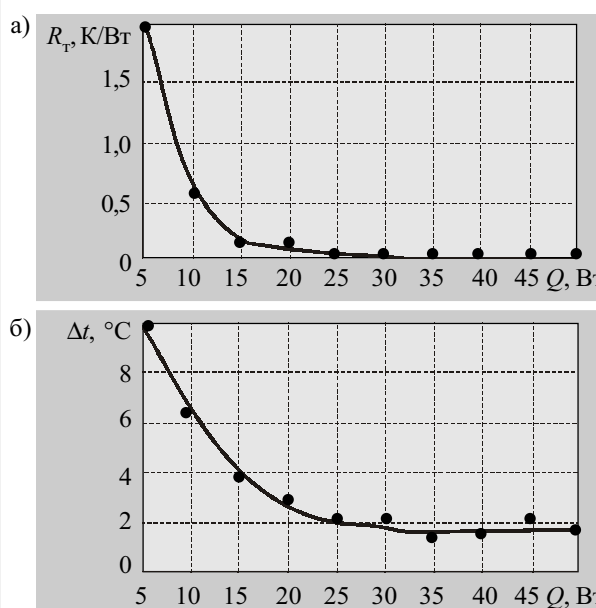


Рис. 9. Зависимость R_t (а) и Δt (б) от подводимой тепловой нагрузки для образца Н1 (аммиак, $h=+125$ мм)

Пусковые характеристики образца Н1 с аммиаком показаны на рис. 4. Значения минимального (3 Вт) и максимального (50 Вт) передаваемого теплового потока выбраны исходя из требований, предъявляемых к конкретной системе охлаждения.

Время выхода на стационарный режим составляет 5...7 мин. Перепад температуры между зонами испарения и конденсации аммиачной КТТ значительно ниже, чем у ацетоновой, и не превышает 10°C при тепловой нагрузке от 3 до 50 Вт.

Из рис. 9 видно, что полное термическое сопротивление и движущий температурный напор аммиачной КТТ в исследованном диапазоне передаваемого теплового потока значительно ниже, чем у ацетоновой КТТ (см. рис. 7), что позволяет использовать ее в комбинированной системе охлаждения фотоприемного устройства.

* * *

Таким образом, экспериментальные исследования контурных тепловых труб с относительно небольшим расстоянием между испарителем и конденсатором (до 125 мм) и капиллярным насосом, выполненным из порошка на основе окисла алюминия, показали, что использование алюминиевых сплавов в качестве корпуса КТТ не всегда может быть оправданным с точки зрения получения минимального термического сопротивления КТТ. В этой связи наиболее перспективным является использование в качестве материала корпуса нержавеющей стали, а в качестве теплоносителя — аммиака.

Вместе с тем в дальнейшем планируется исследовать возможность снижения полного термического сопротивления КТТ с корпусом из алюминиевого сплава путем создания теплового затвора, препятствующего перетеканию теплоты по корпусу испарителя из зоны нагрева в компенсационную полость.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Буткевич В. Г., Бочков В. Д., Глобус Е. Р. Фотоприемники и фотоприемные устройства на основе поликристаллических и эпитаксиальных слоев халькогенидов свинца // Прикладная физика.— 2001.— № 6.— С. 66—112.
2. Герасимов Ю. Ф., Майданик Ю. Ф., Щеголев Г. Т. и др. Низкотемпературные тепловые трубы с отдельными каналами для пара и жидкости // ИФЖ.— 1975.— Т. 28, № 6.— С. 957—960.
3. Герасимов Ю. Ф., Майданик Ю. Ф., Долгирев Ю. Е. и др. Некоторые результаты исследования низкотемпературных тепловых труб, работающих против сил тяжести // ИФЖ.— 1976.— Т. 30, № 4.— С. 581—586.
4. Майданик Ю. Ф. Контурные тепловые трубы и двухфазные теплопередающие контуры с капиллярной прокачкой // Автореф. дисс. ... д. т. н.— М.— 1993.
5. Кисеев В. М. Тепломассоперенос и фазовые превращения в капиллярных структурах // Автореф. дисс. ... д. ф.-м. н.— Екатеринбург.— 2001.
6. Кисеев В. М., Погорелов Н. П. Контурные тепловые трубы: анализ и нерешенные проблемы // Сб. науч. тр. "Вторая Российская национальная конференция по теплообмену".— М.: Изд-во МЭИ.— 1998.— Т. 5.— С. 203—207.
7. Хайрнатов С. М., Письменный Е. Н., Николаенко Ю. Е., Рассамкин Б. М. Экспериментальное моделирование контурной тепловой трубы // Тепловые режимы и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры.— 1999.— Вып. 1.— С. 57—61.
8. Михайленко А. А., Фокина Г. А. Структура, свойства и применение порошков на основе Al_2O_3 , полученных методом криохимической технологии // Физика и химия обр. материалов.— 1990.— № 6.— С. 119—123.

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции

- О возможности использования керамики на основе твердых растворов $(Ni, Co, Mn, Cu)_3O_4$ для создания толсто пленочных резисторов. О. И. Шпотьок, И. В. Гадзаман, Р. В. Охримович, Н. М. Вакив, С. И. Осечкин, В. М. Цмоць (Украина, г. Львов)
- Двухканальные контролепригодные логические схемы цифровых компараторов. А. И. Тимошкин (Украина, г. Днепропетровск)
- Получение структуры цифрового фильтра из описания в пространстве состояний. В. С. Ситников, П. В. Ступень, И. В. Бадерко (Украина, г. Одесса)
- Анизотропный термоэлектрический компаратор. А. А. Ащеулов, И. В. Гуцул (Украина, г. Черновцы)
- Влияние теплопереходов на температурный перепад многокаскадной термоэлектрической батареи. Ю. Е. Николаенко, Л. Н. Вихор (Украина, г. Киев)
- Методы уменьшения температурных погрешностей датчиков давления. В. А. Васильев (Россия, г. Пенза)
- Планарные взаимоиндуктивные сенсоры для датчиков положения и приближения. О. Н. Негоденко, С. А. Черевко (Россия, г. Таганрог)



- Влияние ионизирующего излучения на токоперенос в арсенидгаллиевом полевом транзисторе. Ф. Д. Касимов, А. Э. Лютфалибекова (Азербайджан, г. Баку)
- Экоинформационная система диагностического и экологического контроля транспортных средств. В. Ф. Примиский (Украина, г. Киев)
- О контроле токсичности выхлопа двигателей транспортных средств. М. Д. Скубилин, О. Б. Спиридонов (Россия, г. Таганрог)

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции

К. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО, к. т. н. С. И. КРУКОВСКИЙ,
И. Р. ЗАВЕРБНЫЙ, О. В. РЫБАК, И. А. МРЫХИН

Украина, г. Львов, НПП "Карат"
E-mail: krukovsky@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
18.03 2002 г.

Оппонент к. т. н. Л. М. СОЛДАТЕНКО
(НИИ "Квант", г. Киев)

ПОЛУЧЕНИЕ ТАНДЕМНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР GaAs—InGaAs—AlGaAs ДЛЯ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

С использованием низкотемпературной ЖФЭ получены многослойные тандемные гетероструктуры, пригодные для изготовления на их основе фотопреобразователей солнечной энергии.

Успехи развития космической фотоэнергетики в последние годы связаны с достаточно хорошо разработанной технологией получения гетероструктур GaAs—AlGaAs с одним p — n -переходом [1, 2]. Параметры фотоэлементов на основе этих гетероструктур близки к достижению своего теоретического предела при использовании планарного p — n -перехода и неконцентрированного солнечного излучения [3, 4].

Одним из путей повышения эффективности работы таких фотопреобразователей является использование концентрированного солнечного излучения. В настоящее время максимальные значения эффективности концентраторных солнечных элементов составляют 24,6% для космического солнечного излучения (AM0, 100 солнц) [4] и 27,6% [5] для солнечного излучения вблизи земной поверхности (AM1,5, 255 солнц). Однако дальнейшее повышение эффективности преобразования солнечной энергии сталкивается со значительными трудностями, обусловленными большими омическими потерями при попытках существенно увеличить степень концентрации солнечного излучения.

Повышение эффективности и коэффициента полезного действия фотопреобразователей может быть достигнуто за счет использования p — n -перехода с сильно развитой поверхностью. Этот способ сейчас усиленно разрабатывается на кремниевых фотопреобразователях. Для гетероструктур на основе A_3B_5 он пока применяется мало, что обусловлено сложностью сохранения изначально структурированной поверхности подложки при наращивании p — n -перехода методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), который до недавнего времени являлся базовым при получении эпитаксиальных структур для фотопреобразователей. (В последние годы значительно расширилось применение метода МОС-гидридной эпитаксии для изготовления гетероструктур для фотопреобразователей [5]. Однако ЖФЭ сохраняет неплохие перспективы, учитывая возможность получения слоев с высокой диффузионной длиной неосновных носителей при легировании расплавов редкоземельными элементами.)

В настоящей работе рассмотрены некоторые технологические особенности получения многослойных тандемных трехпереходных гетероструктур GaAs—InGaAs—AlGaAs, предназначенных для изготовления преобразователей солнечного излучения.

Тандемные гетероструктуры в системе GaAs—InGaAs—AlGaAs выращивались методом низкотемпературной ЖФЭ в атмосфере проточного водорода с точкой росы не выше -70°C в графитовой поршневой кассете на подложках GaAs n -типа проводимости, ориентированных по плоскости (100). Наращивание гетероструктур проводилось в интервале температур 650—500 $^\circ\text{C}$. Структура солнечных фотоэлементов на основе гетероструктур GaAs—InGaAs—AlGaAs показана на рис. 1.

Au—Ge	Au—Ge
$p\text{-Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$	0,2 мкм
$p\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$	0,8 мкм
$n\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$	0,9 мкм
$p\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$	0,1 мкм
$n\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$	0,1 мкм
$p\text{-In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$	2,0 мкм
$n\text{-In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$	2,5 мкм
Подложка n^+ -GaAs	400 мкм
Au—Ni	

Рис. 1. Схема поперечного разреза солнечного фотоэлемента на основе гетероструктуры GaAs—InGaAs—AlGaAs

На подложке из n -GaAs, легированной оловом, выращивался первый p — n -переход, образованный узкозонными слоями $n\text{-In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ и $p\text{-In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ с концентрацией основных носителей $(1\text{--}3)\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$. Далее наращивался лавинный диод, состоящий из двух тонких сильнолегированных слоев $n\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ и $p\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ с концентрацией основных носителей $(1\text{--}2)\cdot 10^{19}\text{ см}^{-3}$ и $(7\text{--}10)\cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$, соответственно. На поверхности слоя $p\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ кристаллизовался второй p — n -переход, состоящий из более широкозонных материалов $p\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ и $n\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ с уровнем легирования $(1\text{--}3)\cdot 10^{17}$ и $(1\text{--}5)\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$. Лавинный диод, соединяющий узкозонный и широкозонный p — n -переходы, предназначен для уменьшения омических потерь в фотоэлементе. Для уменьшения рекомбинационных потерь на поверхности структуры

наращивалось широкозонное окно из $p\text{-Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$ с концентрацией носителей $(8\text{--}10)\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$. Контакты к фронтальной поверхности гетероструктуры изготавливались из сплава Au–Ge, а к тыльной – на основе Au–Ni.

Для сохранения оптимальных условий преобразования солнечной энергии в tandemной гетероструктуре толщина слоя $p\text{-Al}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ не должна превышать $1,2\text{--}1,0\text{ мкм}$ (оптимально $0,8\text{--}1,2\text{ мкм}$), а уровень легирования — $(1\text{--}5)\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$. Особенностью tandemных гетероструктур является наличие в ее составе двух сильнолегированных слоев $\text{Al}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ p - и n -типа проводимости, образующих туннельный диод. Малые толщины слоев определяют выбор низкотемпературного варианта ЖФЭ для воспроизводимого получения tandemных гетероструктур. Однако при низких температурах значительно усложняется получение сильнолегированных слоев, особенно p -типа проводимости. Это обусловлено тем, что нелегированные слои GaAs имеют n -тип проводимости. Концентрация электронов, обусловленная фоновыми примесями, у них, как правило, снижается после дополнительной очистки шихты путем отжига или добавок редкоземельных элементов. Фоновая концентрация электронов в нелегированных слоях, полученных с использованием вышеуказанных способов очистки, может составлять $2\cdot 10^{16}\text{--}5\cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$. Чтобы получить слой p -типа проводимости с уровнем легирования $\sim 5\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$, необходимо ввести в слой акцепторную примесь в количестве не ниже $(2\text{--}5)\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ с учетом коэффициента ионизации примеси.

Для получения слоев AlGaAs p -типа наиболее подходящими примесями являются Zn, Mg, Si, Ge. Однако Si и Ge при низких температурах эпитаксии ($500\text{--}600^\circ\text{C}$) проявляют преимущественно донорные свойства в GaAs и AlGaAs [7, с. 147]. Цинк, по сравнению с магнием, имеет значительно большее парциальное давление паров — $4\cdot 10^{-15}\text{ мм рт. ст.}$ против $3,7\cdot 10^{-24}\text{ мм рт. ст.}$ Поэтому использование Zn при получении многослойных гетероструктур нежелательно из-за опасности загрязнения цинком через газовую фазу растворов-расплавов, содержащих донорную примесь. Таким образом, для получения слоев p -типа проводимости в составе многослойных структур при низких температурах ЖФЭ наиболее приемлемой примесью является магний. Однако, как показали исследования авторов [8], максимальная концентрация дырок в легированном магнием $\text{Al}_{0,65}\text{Ga}_{0,25}\text{As}$ не превышает 10^{18} см^{-3} . Приблизительно это же предельное значение концентрации дырок было получено и нами (рис. 2, кривая 1) при исследовании легирования магнием слоев $\text{Al}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$, выращенных методом ЖФЭ в интервале температур $500\text{--}600^\circ\text{C}$ из галлиевых расплавов.

Таким образом, перед нами возникла задача получения при низких температурах эпитаксии сильнолегированных слоев твердых растворов $\text{Al}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ p -типа проводимости в составе tandemных гетероструктур. Одним из путей решения этой задачи является

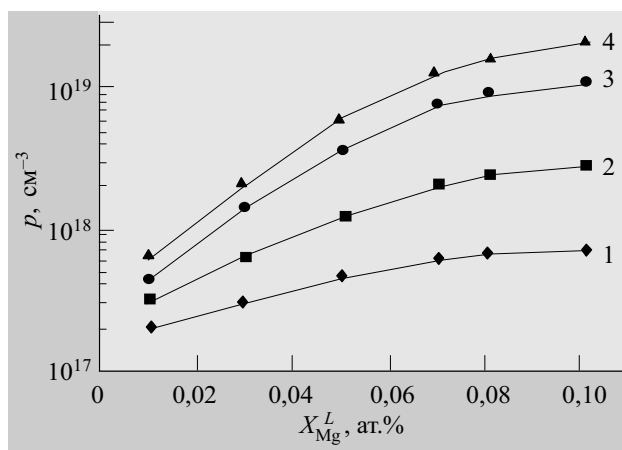


Рис. 2. Зависимость концентрации дырок (p) в слоях $p\text{-Al}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ от концентрации магния (X_{Mg}^L) и висмута в растворе-расплаве галлия:

1 — 0 ат. % Bi; 2 — 1 ат. % Bi; 3 — 2 ат. % Bi; 4 — 3,2 ат. % Bi

комплексное легирование полупроводников химическими элементами, оказывающими существенное влияние на перераспределение фоновых примесей по подрешеткам галлия и мышьяка. К таким примесям, как известно [9], относятся изovalентные элементы — висмут, индий, сурьма.

Нами был отработан режим наращивания слоев $p\text{-Al}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$, легированных магнием и висмутом. Зависимость концентрации дырок в этих слоях от концентрации висмута и магния в расплаве галлия приведена на рис. 2. Как видно из рисунка, возрастание количества висмута от 1,0 до 3,2 ат. % в растворе-расплаве галлия приводит к увеличению концентрации дырок на порядок, достигая значения более $1\cdot 10^{19}\text{ см}^{-3}$. Для всех слоев $p\text{-Al}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$, полученных из растворов-расплавов галлия с разным количеством висмута (рис. 2, кривые 2, 3, 4), наблюдается тенденция к насыщению уровня легирования при концентрациях магния в расплаве больше 0,08 ат. %. Однако, как показали наши эксперименты, при использовании многокомпонентных растворов-расплавов на основе Ga—Al—Bi в поршневых кассетах концентрация висмута не должна превышать 1—1,5 ат. %. Это обусловлено сильным влиянием добавок висмута на растворимость GaAs [10]. При смешивании галлий- и висмутсодержащих расплавов происходит образование нежелательных переходных эпитаксиальных слоев.

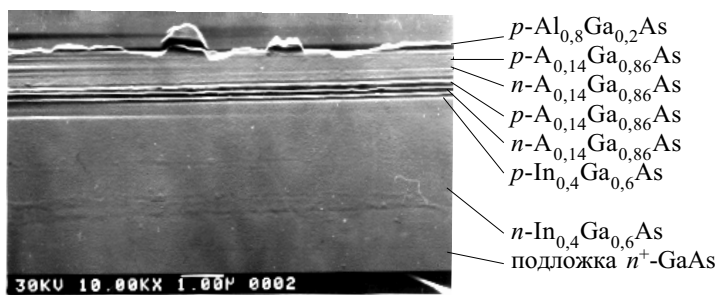


Рис. 3. Фотография поверхности скола многослойной tandemной гетероструктуры GaAs–InGaAs–AlGaAs

Полученные результаты по легированию слоев $p\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ магнием при низких температурах были использованы при получении многослойной гетероструктуры для фотопреобразователей солнечной энергии.

На рис. 3 показана фотография поверхности скола многослойной тандемной гетероструктуры GaAs–InGaAs–AlGaAs, полученная с помощью растрового электронного микроскопа. Использование низких температур роста позволило воспроизводимо получить тонкие ($\sim 0,1$ мкм) слои $n\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ и $p\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$, образующие туннельный диод, а использование комплексного легирования висмутом и магнием — достичь уровня легирования в p -слое выше $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Таким образом, проведенная работа с использованием низкотемпературной ЖФЭ позволила получить многослойные тандемные гетероструктуры, пригодные для изготовления на их основе фотопреобразователей солнечной энергии.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Николаенко Ю. Е., Вакив Н. М., Круковский С. И. и др. Состояние и тенденции развития твердотельных фотопреобразователей солнечной энергии // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 3.— С. 21—30.
2. Андреев В. М., Хвостиков В. П., Ларионов В. Р. и др. Высокоэффективные концентраторные (2500 солнц) AlGaAs/GaAs-солнечные элементы // ФТП.— 1999.— Т. 33, вып. 9.— С. 1070—1072.

3. Андреев В. М. Гетероструктурные солнечные элементы // Там же.— С. 1035—1038.

4. Yamaguchi Masafumi. Physics and technologies of super-high-efficiency tandem solar cells // Там же.— С. 1054—1058.

5. Martin A. Green, Keith Emery, Klaus Bucher et al. Solar cell efficiency tables (Version 9) // Progress in Photovoltaics: Research and Applications.— 1997.— Vol. 5.— P. 51—54.

6. Lawrence L. Kazmerski. Photovoltaics: a review of cell and module technologies // Renewable and Sustainable Energy Reviews.— March/ June 1997.— Vol. 1, N 1/2.— P. 71—170.

7. Шишияну Ф. С. Диффузия и деградация в полупроводниковых материалах и приборах.— Кишинев: Штиинца, 1978.

8. Ларионов В. Р., Минтаиров А. М., Смекалин К. Е. и др. Кристаллизация и легирование квантово-размерных слоев AlGaAs / Тез. докл. V Всесоюз. конф. по физическим процессам в полупроводниковых гетероструктурах.— Калуга, 1990.

9. Куницын А. Е., Новиков С. В., Чалдышев В. В. и др. Анализ спектров фотолюминесценции слоев GaAs, выращенных из Ga–Bi растворов-расплавов // ФТП.— 1995.— Т. 29, вып. 11.— С. 2088—2091.

10. Якушева Н. А., Чикичев С. И. Растворимость арсенида галлия в висмут-галлиевых расплавах // Изв. АН СССР. Неорганич. материалы.— 1987.— Т. 23, № 10.— С. 1607—1609.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

Труды третьей международной научно-практической конференции **«Современные информационные и электронные технологии»**.— Одесса: «Нептун-Технология», 2002.— 248 с.

В Трудах 3-й МНПК «СИЭТ-2002» опубликованы рефераты докладов, подготовленных учёными и специалистами Азербайджана, Беларуси, Грузии, Литвы, Молдовы, Польши, России, Турции, Узбекистана, Украины, Югославии.

«Труды» содержат материалы пленарного заседания и секций «Сигналопреобразующие телекоммуникационные технологии», «Прогрессивные информационные технологии», «Компьютерные технологии создания электронной аппаратуры», «Прогрессивные технологии создания материалов и изделий электронной техники».

«Труды» можно заказать по адресу:

Украина, 65028, Одесса,
ул. Б. Хмельницкого, 59,
ДП «Нептун-Технология».

Цена одного экземпляра эквивалентна 5 дол. США.

В соответствии с решением 3-й МНПК "СИЭТ-2002" проведение очередной конференции планируется в 2003 г. Предложения по ее организации можно направлять в адрес редакции журнала "ТКЭА".



К. т. н. Н. Г. ЧЕРНЯК, А. Н. БОНДАРЕНКО,
С. И. ПЕТРОВСКИЙ

Дата поступления в редакцию
21.03 2002 г.

Украина, г. Киев, Межотраслевой НИИ "Ритм" при НТУУ «КПИ»
E-mail: sashbond@cisavd.ntu-kpi.kiev.ua

Оппоненты
д. т. н. А. В. ЗБРУЦКИЙ (НТУУ "КПИ", г. Киев),
к. т. н. В. С. ГОЛУБ (НПФ "VD MAIS", г. Киев)

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЕЦИЗИОННОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ С ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ

Рассмотрена методика проектирования первичного и вторичного преобразовательных элементов датчика, получены формулы для вычисления их параметров.

Датчики давления (ДД) с пневмомеханическим резонатором (ПМР) обладают высокой чувствительностью к измеряемой величине, стабильностью метрологических характеристик, технологичностью изготовления, что обуславливает их широкое производство в странах с развитым приборостроением (США, Великобритания, Россия, Япония). Наиболее перспективными являются ДД с ПМР, наделенные первичным преобразовательным элементом в виде разделяющей мембраны и вторичным преобразовательным элементом на резонирующем элементе с сосредоточенными параметрами [1].

Но наряду с такими положительными качествами, как независимость условия работоспособности ПМР от верхнего предела измерения ($P_{вп}$), возможность измерения давления не только газов, но и жидкостей, датчик давления описанной конструкции имеет и существенные недостатки. Это температурная и временная нестабильность подмембранного давления (P_0), ведущая к нестабильности выходной характеристики ДД. Температурная нестабильность вызвана изохорным термодинамическим процессом в герметичной подмембранной полости. Временная нестабильность связана с некоторым, очень малым, но все же ощутимым во времени, натеканием газа в герметичную подмембранную полость сквозь ее стенки и соединения между ограничивающими ее корпусными деталями.

Эффективным способом устранения указанных недостатков является построение ПМР на резонирующем элементе (РЭ) специальной формы, которая позволяет поочередно или одновременно возбуждать несколько видов колебаний РЭ. Собственные частоты этих колебаний несут алгоритмически или структурно разделяемую информацию о влияющих факторах, включающих измеряемое давление (P_u), давление (P_0) и изменение температуры газа (ΔT) в подмембранной полости.

Целью данной статьи являются:

- получение зависимостей, по которым можно выбрать основные параметры первичного и вторичного преобразовательных элементов датчика давления с ПМР;

- оценка возможностей построения ПМР с несколькими собственными частотами колебаний РЭ специальной формы.

При рассмотрении элементов ДД с ПМР воспользуемся следующими исходными положениями.

1. Прогиб мембраны и упругих элементов меньше их толщины, поэтому их жесткость не зависит от величины прогиба и напряжения в материале. Прогиб линейно зависит от приложенных внешних усилий. Равномерные растягивающие напряжения в срединной поверхности очень малы.

2. Диапазон рабочих температур небольшой: $-55...+55^\circ\text{C}$. Температурные изменения модуля Юнга и линейных размеров элементов ДД в таком диапазоне считаются линейными, зависимости динамической вязкости (η) и коэффициента Пуассона (γ) газа от температуры не учитываются ($\gamma=1,4$; $\eta=1,8 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$).

3. Натекание газа в подмембранную полость происходит очень медленно (в пределах $5-30\%$ от ее объема за все время гарантийного срока работы ДД) и не сказывается на работоспособности ПМР.

Проектирование первичного преобразовательного элемента (ППЭ)

Зазор между газонепроницаемым экраном (ГНЭ) и эффективной частью РЭ (δ_0) и максимальное значение допустимого прогиба мембраны (z_0) при предельном измеряемом давлении ($P_{вп}$) выбираются из условий:

$$\delta_0 = \delta_{\min} + z_0 ; \quad (1)$$

$$z_0 \leq ([\delta] - \delta_{\min}) \frac{P_{вп} - P_0}{P_{вп}} , \quad (2)$$

где $\delta_{\min}$ — минимальный зазор между РЭ и подвижным ГНЭ, сравнимый с амплитудой колебаний РЭ и погрешностями сборки ДД;

$[\delta]$ — допустимая толщина пневмокамеры.

Величина допустимого зазора ПМР определяется подмембранным давлением P_0 , не зависящим от измеряемого [1]. Верхний предел измерения ДД обеспечивается требуемым прогибом, зависящим от фи-

зических и геометрических параметров мембраны (ППЭ) [2, с. 71]:

$$z_0 = \frac{3}{16} \frac{(1 - \nu_n^2) R_n^4}{E_n h_n^3} (1 - \xi^2) (1 - \xi)^3 (P_{\text{вп}} - P_0), \quad (3)$$

где E_n и ν_n — модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала мембраны, соответственно;
 h_n — толщина мембраны;
 $\xi = r_n / R_n$;
 r_n и R_n — радиусы жесткого центра и заземления мембраны ППЭ, соответственно.

Выбор параметров мембраны дополнительно ограничивается выполнением условия прочности [2, с. 72] при максимальном перепаде давления на ней:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{3}{4} (1 - \xi^2) \left(\frac{R_n}{h_n} \right)^2 \sqrt{1 - \nu_n + \nu_n^2} (P_{\text{вп}} - P_0) < [\sigma], \quad (4)$$

где $[\sigma]$ — предельно допустимое напряжение, $[\sigma] = \sigma_T / n$;
 σ_T и n — предел текучести и запас прочности материала мембраны, соответственно;

σ_{max} — максимальное эквивалентное напряжение в мембране по критерию удельной потенциальной энергии формоизменения [3, с. 198].

Выбор материала мембраны ограничен соображениями необходимой прочности, безгистерезисности, упругости, коррозионной стойкости, температурной стабильности. К таким материалам относятся сплавы 36НХТЮ и 12Х18Н10Т, бронза БрБ-2.

Радиус жесткого центра r_n выбирается как можно меньшим, чтобы снизить его влияние на характеристики мембранного чувствительного элемента, но достаточным с точки зрения технологичности изготовления. Этим требованиям удовлетворяет величина $r_n = 5 \dots 10$ мм.

Толщину и радиус заземления мембраны можно найти, решив систему уравнений (2) и (3). В результате получим:

$$h_n = 3 \sqrt{\frac{3}{16} \frac{(1 - \nu_n^2) R_n^4}{E_n} \frac{z_0}{(1 - \xi^2) (1 - \xi)^3 (P_{\text{вп}} - P_0)}}; \quad (5)$$

$$R_n \geq 2\sqrt{3} \sqrt{\frac{1 + \xi}{(1 - \xi)^5} \frac{(1 - \nu_n + \nu_n^2)^{0.75}}{1 - \nu_n^2}} E_n \frac{z_0}{(\sigma_{\text{max}})^{1.5}} \sqrt{P_{\text{вп}} - P_0}. \quad (6)$$

Таким образом, для проектирования ППЭ имеем зависимости (1), (2), (5) и (6).

Проектирование вторичного преобразовательного элемента (ВПЭ)

Рассмотрим ВПЭ с четырехкруговым РЭ, схема которого изображена на **рис. 1**. (Круги, лежащие на разных осях симметрии, выполняются разными, а на одной оси симметрии — одинаковыми.) В конструкцию вводится дополнительный неподвижный ГНЭ (**рис. 2**).

Рассматриваемая пневмомеханическая автоколебательная система возбуждает и поддерживает следующие колебания РЭ: поступательное вдоль оси x , перпендикулярной к срединной поверхности РЭ (**рис. 2, а**), и угловые вокруг осей симметрии РЭ y и z , которые делят круги пополам (**рис. 2, б и в**).

Система уравнений, которая описывает собственные частоты возбуждаемых видов колебаний ПМР, имеет вид (введение второго слагаемого в уравнениях обусловлено наличием дополнительного ГНЭ):

$$\begin{cases} f_x^2 = f_{0x}^2 (1 + \alpha_E \Delta T) + k_{1x} \frac{\gamma P_0}{\rho h \delta_1} + k_{2x} \frac{\gamma P_0}{\rho h \left[\delta_2 - \frac{z_0 (P_{\text{и}} - P_0)}{P_{\text{вп}} - P_0} \right]}; \\ f_y^2 = f_{0y}^2 (1 + \alpha_E \Delta T) + k_{1y} \frac{\gamma P_0}{\rho h \delta_1} + k_{2y} \frac{\gamma P_0}{\rho h \left[\delta_2 - \frac{z_0 (P_{\text{и}} - P_0)}{P_{\text{вп}} - P_0} \right]}; \\ f_z^2 = f_{0z}^2 (1 + \alpha_E \Delta T) + k_{1z} \frac{\gamma P_0}{\rho h \delta_1} + k_{2z} \frac{\gamma P_0}{\rho h \left[\delta_2 - \frac{z_0 (P_{\text{и}} - P_0)}{P_{\text{вп}} - P_0} \right]}. \end{cases} \quad (7)$$

где f_{0j} — собственные частоты колебаний РЭ в вакууме ($j=x, y, z$);

α_E — температурный коэффициент модуля упругости материала РЭ;

k_{ij} — числовые коэффициенты, зависящие от коэффициентов жесткостных и массовых характеристик ПМР ($i=1, 2$);

ρ — плотность материала РЭ;

δ_1 и δ_2 — воздушные зазоры под РЭ со стороны неподвижного и подвижного ГНЭ, соответственно.

Специальным образом подобранные размеры L_1 и L_2 и величины зазоров δ_1 и δ_2 позволяют создать необходимое отличие в собственных частотах f_{0j} и значениях коэффициентов k_{ij} , дающее линейную независимость системе уравнений (7).

Искомые величинами в системе являются измеряемое давление $P_{\text{и}}$, подмембранное давление P_0 и отклонение температуры ΔT от нормального значения.

Решение системы уравнений выполняется вычислительным устройством, на вход которого подаются выходные частоты пневмомеханической автоколебательной системы f_x , f_y и f_z , а с выхода снимаются сигналы, пропорциональные величинам $P_{\text{и}}$, P_0 и ΔT .

Критерием подбора числовых коэффициентов k_{ij} является следующее. Возьмем попарно отношения коэффициентов при одинаковых слагаемых любых двух уравнений системы и попарные отношения частот f_{0j} . Одно из соотношений должно отличаться от двух других. Если это отличие в два раза, точность

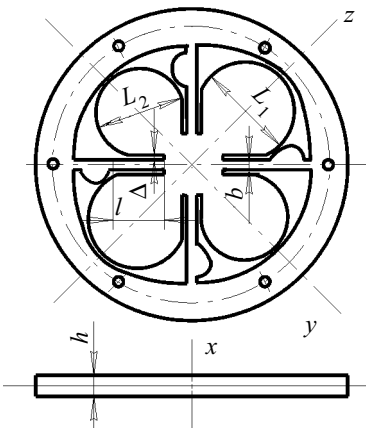


Рис. 1. Четырехкруговой резонирующий элемент:

h — толщина РЭ; L_1, L_2 — характерные размеры кругов РЭ; Δ — ширина прорезей; l, b — длина и ширина упругого элемента

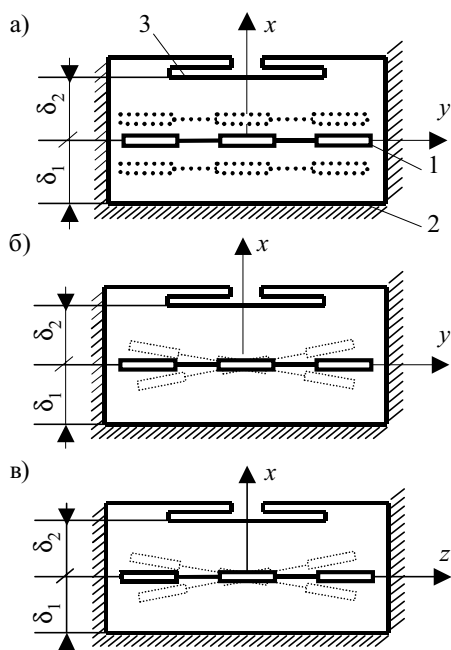


Рис. 2. Виды колебаний РЭ:

а — поступательное; б, в — угловые;
1 — резонирующий элемент; 2 — неподвижный ГНЭ; 3 — подвижный ГНЭ

вычисления величин $P_{и}$, P_0 и ΔT по известным f_x , f_y и f_z будет максимальной.

Чтобы правильно подобрать коэффициенты системы (7), необходимо провести численное моделирование конкретной конструкции ВПЭ.

При рассмотрении конструкции ВПЭ, представленной на рис. 1, вводились некоторые упрощения. Эффективные части больших и меньших кругов и центрального участка РЭ рассматривались как геометрические круги с диаметрами, равными их характерным размерам (L_1 — большего, L_2 — меньшего круга, $L_{ц}$ — центра, $L_1 > L_2 > L_{ц}$). Из конструктивных соображений размеры частей РЭ связывались между собой следующим образом:

$$l=0,5L_2; b=0,2l; L_{ц}=L_1\left(\sqrt{2\left(1+\frac{2\Delta+b}{L_1}\right)}-1\right);$$

$$Z_C=\frac{L_1+2\Delta+b}{\sqrt{2}}; Y_C=\frac{L_2+2\Delta+b}{\sqrt{2}}; \frac{L_2}{L_1}=\lambda; \lambda<1;$$

$$k_{1j} \approx k_{2j}(1+\Delta_j),$$

где Z_C , Y_C — центры масс больших и малых кругов относительно осей y и z , соответственно;

λ — числовой коэффициент, который вводится для удобства и наглядности моделирования;

Δ_j — относительные добавки из-за влияния жесткости газа [1] под малыми элементами РЭ, которые вносят различие в числовые коэффициенты последних двух слагаемых любого из уравнений системы (7), а физически изменяют характер зависимости жесткости газа в меньшем зазоре по сравнению с характером зависимости в большем зазоре на какую-то постоянную добавку.

Упругие элементы ВПЭ лежат на взаимоортogonalных осях. Оси симметрии РЭ тоже взаимоортogonalны.

Зазор δ_1 между РЭ и неподвижным ГНЭ формируется большим, чем допустимый зазор $[\delta_2]$ между РЭ и подвижным ГНЭ (рис. 2).

Величины зазоров δ_1 и δ_2 , характерных размеров L_1 и L_2 и подмембранного давления P_0 подбирались так, чтобы при любых перемещениях подвижного ГНЭ выполнялись следующие условия:

— для поступательного колебания РЭ (рис. 2, а) допустимые величины зазоров [1] между РЭ и ГНЭ 2 и 3 должны быть больше соответствующих величин δ_1 и δ_2 ;

— для углового колебания РЭ вокруг оси z , которая делит большие круги пополам (рис. 2, б), допустимые величины зазоров между РЭ и подвижным ГНЭ под всеми кругами должны быть больше величины δ_2 , а допустимые величины зазоров между РЭ и неподвижным ГНЭ под большими кругами (реально — половинками кругов) должны быть меньше δ_1 .

Только таким образом мы сможем удовлетворить условию подбора коэффициентов системы (7).

Желательно также, чтобы для углового колебания РЭ вокруг оси y (рис. 2, в) допустимые величины соответствующих зазоров под большими кругами были больше величин δ_1 и δ_2 , а под малыми кругами — меньше. Большую роль в том, что под меньшими кругами допустимые зазоры малы, играет то, что ось этих колебаний y делит их пополам, тем самым уменьшая существенно (в два раза) их характерный размер.

Назовем эти условия необходимыми условиями проектирования ВПЭ.

Расчет параметров ВПЭ проводился в несколько этапов с использованием прикладного пакета MathCad. Сначала определялись собственные частоты колебаний РЭ в вакууме и по ним выбирался зазор δ_2 между РЭ и подвижным ГНЭ. Далее, с учетом увеличения частоты колебаний РЭ от его взаимодействия с газом в меньшей пневмокамере (между РЭ и подвижным ГНЭ), вычислялся больший допустимый зазор δ_1 (между РЭ и неподвижным ГНЭ). В конце проверялось выполнение условия работоспособности под половинками кругов с учетом еще большего увеличения частоты колебаний ПМР из-за жесткости газа в пневмокамерах уже с двух сторон РЭ. Подбор параметров проводился до тех пор, пока не были выполнены необходимые условия проектирования ВПЭ.

Результаты численного моделирования конструкции датчика давления с ПМР

Параметры ВПЭ:

$L_1=2$ см; $\lambda=0,8$; $\Delta=0,2$ мм; $l=5$ мм; $b=2$ мм; $h=0,3$ мм; $\delta_{\min}=40$ мкм; материал РЭ — бронза БрБ-2 ($E=1,28 \times 10^{11}$ Па; $\nu=0,28$; $\rho=8,26 \cdot 10^3$ кг/м³).

Параметры ППЭ:

$R_n=29$ мм; $r_n=5$ мм; сплав 36НХТЮ ($E_n=1,9 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu_n=0,29$, $\sigma_T=1500$ МПа, $n=3$).

Подмембранное давление $P_0=0,1$ атм.

Параметры ДД:

$f_{0x}=507$ Гц; $f_{0y}=298$ Гц; $f_{0z}=420$ Гц; $k_{y1}=0,875$; $k_{z1}=0,751$; $\Delta_1=0,166$; $\Delta_2=0,029$; угловая и линейная жесткость РЭ 1,56 Н·м и $2,76 \cdot 10^4$ Н/м, соответственно; масса РЭ 2,7 г; сила возбуждения колебаний вдоль оси x

$F_x=0,08$ Н; начальная амплитуда колебаний 3 мкм; $\delta_2 \approx 70$ мкм; $[\delta_1] \approx 130$ мкм; $L_c = 9$ мм; минимальные частоты колебаний ПМР ($P_{и}=0$ атм) $f_x^{нп}=1,83$ кГц, $f_y^{нп}=1,7$ кГц, $f_z^{нп}=1,66$ кГц; максимальные девиации частоты при верхнем пределе измерения $\Delta f_x=452$ Гц, $\Delta f_y=444$ Гц, $\Delta f_z=436$ Гц; $z_0=30$ мкм при $P_{вп}=2,8$ атм; $h_n=1,6$ мм; $\sigma_{\max}=2 \cdot 10^7$ Па $\ll [\sigma]=5 \cdot 10^8$ Па.

Выводы и рекомендации

Результаты моделирования доказывают возможность практической реализации прецизионного датчика давления с пневмомеханическим резонатором.

Фрезерование мембраны толщиной в 1,6 мм не будет сложным, тогда как собственная частота колебаний жесткой мембраны будет существенно превышать частоты колебаний ПМР.

Зазоры $\delta_2=70$ мкм и $\delta_1=120$ мкм при диаметрах кругов $L_2=2$ см и $L_1=1,6$ см можно реализовать с помощью калибровочных шайб при довольно невысоких допусках на сборку (порядка $\pm 0,01$ мкм).

При измерении выходной частоты датчика давления по периоду с погрешностью $\delta_f=0,1$ Гц, распространенной для бортовых измерителей частоты, и девиации частоты порядка 400 Гц получаем чувствительность прибора к измеряемому давлению на уровне 0,025% от верхнего предела измерения. Одновременное измерение подмембранного давления и температуры РЭ, даже при полученном различии относительных добавок Δ_z и Δ_y в 13%, позволяет компенсировать температурную погрешность до уровня порога чувствительности ДД и допускает (без ущерба для точности прибора) увеличение давления в подмембранной полости на 10% из-за долговременного просачивания газа в нее.

Для достижения максимальной разности значений Δ_y и Δ_z , а также между частотами колебаний РЭ в вакууме, вопрос проектирования ДД с ПМР требует дальнейшей проработки, в том числе с применением известных методов оптимального проектирования [4].

Таким образом, разработана методика проектирования и расчета первичного и качественно нового вторичного преобразовательного элемента, получена система основных формул для вычисления их параметров. Результаты расчетов показали возможность технической реализации предложенной конструкции датчика давления с тремя выходными частотами.

Прибор имеет высокую технологичность и относительно небольшую себестоимость изготовления. Это придает ему ряд преимуществ перед существующими прецизионными датчиками давления авиационного использования, а значит, и конкурентоспособность на рынке датчиковой аппаратуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Черняк Н. Г., Бондаренко А. Н. Прецизионный датчик давления с пневмомеханическим резонатором для бортового оборудования ЛА // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 3.— С. 38—43.
2. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки.— М.: Физматгиз, 1963.
3. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.— К.: Наук. думка, 1988.
4. Хог Э., Арора Я. Прикладное оптимальное проектирование.— М.: Мир, 1983.



ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ и СИСТЕМЫ
Подписной индекс 40633

Каждому подписчику ЭКЭС —

все выпуски каталогов
электронных компонентов,
поставляемых VD MAIS!

Бесплатная рассылка производится по заявке, направленной в VD MAIS по почте или факсу (044) 227-3668 с указанием адреса, ФИО получателя и копией абонемента о подписке на 2002 год.

К. т. н. Н. М. ВАКИВ, к. т. н. С. И. КРУКОВСКИЙ,
И. Р. ЗАВЕРБНЫЙ, И. А. МРЫХИН

Украина, г. Львов, НПП “Карат”
E-mail: granat@carat.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
10.12 2001 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. И. КЛИМОВСКАЯ
(ИФПП НАНУ, г. Киев)

ДАТЧИКИ ХОЛЛА НА ОСНОВЕ СТРУКТУР GaAs, ПОЛУЧЕННЫХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЖФЭ ИЗ РАСПЛАВОВ Bi

*Рассмотрены особенности получения эпитаксиальных структур п. и. *-GaAs—n-GaAs из Ga—Bi-растворов-расплавов и параметры датчиков Холла, изготовленных на их основе.*

В настоящее время холловские датчики являются хорошо отработанными полупроводниковыми приборами и широко используются в различных отраслях техники.

Анализ датчиков Холла ведущих мировых фирм (см. табл. 1) показал, что основными материалами для создания датчиков Холла являются GaAs, InAs, InSb. Арсенид галлия имеет ряд преимуществ перед остальными, что обусловлено его высокой граничной рабочей температурой, а также хорошо отработанной технологией получения высококачественных полуизолирующих подложек.

Датчики Холла (ДХ) изготавливаются на основе тонких пластин объемного полупроводникового материала, эпитаксиальных структур, а также ионно-имплантированных структур. Из сравнения значений входного ($R_{вх}$) и выходного ($R_{вых}$) сопротивлений следует, что большинство холловских датчиков обладают несимметричным чувствительным элементом. Для высокочувствительных датчиков характерным является большой разброс нормированной магнитной чувствительности (в пределах 15—50%). Наиболее разнообразная номенклатура датчиков изготавливается на основе ионно-имплантированных структур. Эти датчики характеризуются, как правило, наибольшей чувствительностью, однако значения температурных коэффициентов холловского напряжения (U_x) и остаточного напряжения (U_0) почти в два раза больше, чем в датчиках Холла, изготовленных на основе эпитаксиальных слоев.

Особенностью высокочувствительных датчиков Холла является большое значение $R_{вх}$. Поэтому в аппаратуре, где лимитируется потребляемая мощность, необходимо искать компромисс между энергопотреблением датчика и электронной схемы. В таких случаях целесообразно использовать датчики Холла с малым значением входного сопротивления и, соответственно, невысокой чувствительностью. Применение датчиков Холла с большим значением U_0 и температурного коэффициента остаточного напряжения влекут за собой необходимость использования более сложной электрической схемы, что,

* п. и. — полуизолирующий.

соответственно, увеличивает стоимость прибора и его энергопотребление. Поэтому, несмотря на довольно разнообразную номенклатуру ДХ, в данное время существует потребность в датчиках Холла, которые бы характеризовались низкими температурными коэффициентами U_x и U_0 , высокой чувствительностью, а также небольшой стоимостью.

Типовая эпитаксиальная структура, пригодная для изготовления высокочувствительных ДХ, должна иметь толщину активного слоя меньше 1 мкм и концентрацию электронов на уровне $5 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Структуры с такими параметрами можно получить методами газовой эпитаксии (ГФЭ), МОС-гидридной, молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), а также низкотемпературной жидкофазной эпитаксией (ЖФЭ) [1].

В данной работе рассматриваются особенности получения эпитаксиальных структур для датчиков Холла методом низкотемпературной “висмутовой” ЖФЭ. Использование традиционного растворителя на основе галлия обеспечивает скорости кристаллизации 100—200 нм/с [2]. Для воспроизводимого получения слоев толщиной 0,1 мкм методом ЖФЭ эта скорость должна быть на порядок меньшей. Особенности фазовых равновесий в системе Ga—Bi—As, а именно, S-подобный ход кривой ликвидуса [3], предоставляют прекрасную возможность существенно уменьшить скорости кристаллизации слоев GaAs при температурах роста 500—700°C.

Низкая растворимость мышьяка в висмутовых и Ga—Bi-растворах-расплавах с большим содержанием висмута требует использования переохлажденных расплавов, причем с уменьшением растворимости мышьяка величина допустимого переохлаждения расплава возрастает. Для наращивания слоев GaAs из Ga—Bi-растворов-расплавов нами был выбран метод резкого охлаждения, обеспечивающий получение более гладких слоев, а также границ раздела между слоями.

На рис. 1 приведены рассчитанные по формуле (1) [4, с. 132] и экспериментально определенные зависимости толщины слоев GaAs от концентрации висмута в расплаве галлия для разных температур кристаллизации.

$$d = \frac{1}{C_{As}^S m} \left(\frac{D}{\pi} \right)^{0,5} \left(2 \Delta T t^{0,5} + \frac{4}{3} v t^{1,5} \right) \quad (1)$$

Параметры наиболее типичных датчиков Холла ведущих фирм

Способ получения активного слоя	Код сенсора	Номинальный ток, мА	Нормированная магнитная чувствительность, В/А·Т	Минимальное входное сопротивление, Ом	Минимальное выходное сопротивление, Ом	Максимальное нормированное остаточное напряжение, U_0 , мВ/мА	Температурный коэффициент напряжения, U_x , %/К	Температурный коэффициент остаточного напряжения, мВ/К	Стоимость, \$
Эпитаксия	HHP-SP ¹	5	10	150	150	0,04	—	—	—
	HHP-SA ¹	5	10	150	150	0,04	—	—	—
	KSY44 ²	7	150–265	600	1000	2,1	0,03	–0,3	—
	ПХИ312 ³	—	400	5000	5000	—	0,5	50	—
Ионная имплантация	ПХИ611 ³	—	1000	700	700	—	< –2	< ±200	—
	KSY46 ²	7	150–265	600	1000	2,1	0,03	–0,3	—
	GH-601 ⁴	5	100–280	450	580	3,2	–0,07	1	9,0
	KSY10 ⁵	5	170–230	900	900	5,0	–0,05	—	—
	KSY13 ⁵	5	190–290	900	900	6,0	–0,05	—	—
	GH-600 ⁴	5	100–280	450	580	3,2	–0,07	1	9,0
	GH-700 ⁴	5	100–280	450	—	2,8	–0,07	1	5,0
	GH-800 ⁴	5	190–260	600	600	4,0	–0,07	40	7,0
Объемный материал	HGA-2010 ⁶	1	110–280	450	—	2,8	–0,06	1	—
	KSY16 ⁷	5	190–260	900	900	4,0	–0,07	—	—
	MULTY-1 ¹	10	5	400	300	0,03	–0,03	0,1	0,6
	MULTY-7 ¹	20	2,5	350	150	0,015	–0,01	0,1	0,7

¹ Агерос, Словакия [Агерос]; ² Siemens/ Infineon/Tec., Германия [www.infineon.com]; ³ Россия (С.-Петербург) [Информ. лист. №№ 87-0482, 91-0]; ⁴ F.W.Bell, США [www.fwbell.com; F.W.Bell "Hall generators", p. 11]; ⁵ Siemens/ Infineon/Tec., Германия [Siemens "Magnetic Sensor" Data Book, p. 137, 140]; ⁶ Lake Shore, США [Lake Shore Cr.]; ⁷ Infineon Tec., Германия [www.infineon.com]

где C_{As}^S — концентрация мышьяка в твердой фазе;
 m — наклон кривой ликвидуса;
 D — коэффициент диффузии мышьяка,
 $D=5 \cdot 10^{-6}$ см²/с;
 ΔT — величина пересыщения раствора-расплава,
 $\Delta T=25^\circ\text{C}$;
 v — скорость охлаждения, $v=1^\circ\text{C}/\text{мин}$;
 t — время, с.

Толщина ростового зазора, принятая для расчета, равна 1 мм.

Как видно из рис. 1, кривые характеризуются S-подобным ходом. Минимальные толщины слоев можно получить при концентрациях висмута в расплаве 60–80 ат.%, причем толщины слоев GaAs, полученных из Ga–Bi-рас-

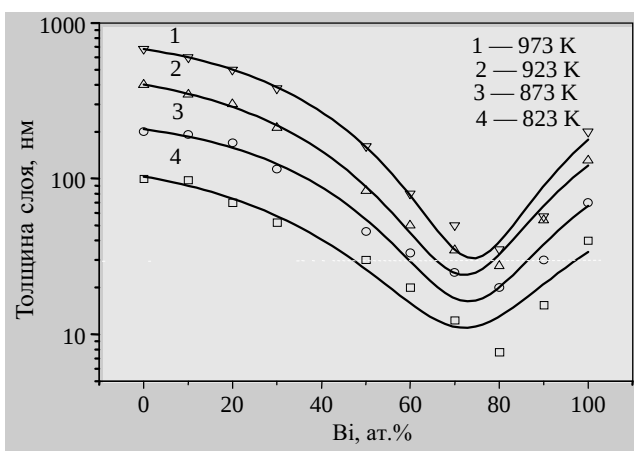


Рис. 1. Экспериментальные (точки) и расчетные зависимости толщин слоев GaAs от концентрации висмута в Ga–Bi-растворе-расплаве

плавов (70 ат.%) при температурах кристаллизации 973 К, почти в 25 раз меньше, чем толщины слоев, полученных из галлиевых расплавов. Однако наблюдаемое аномальное снижение скорости кристаллизации слоев GaAs в системе Ga–Bi–GaAs, к сожалению, не может найти широкого практического применения из-за значительного ухудшения электрофизических характеристик эпитаксиальных слоев.

Проведенные нами исследования зависимости концентрации основных носителей и их подвижности в слоях, полученных из Ga–Bi-растворов-расплавов различного состава, приведены на рис. 2. В интервале концентраций висмута в расплаве от 20 до 80 ат.% концентрация электронов (n) возрастает и достигает максимального значения, а подвижность (μ) снижается до 2500 см²/В·с, и только при 97 ат.% висмута концентрация электронов резко уменьшается, а подвижность достигает максимального значения, которое даже выше, чем в слоях, полученных из галлиевых расплавов.

Рассмотрим один из возможных механизмов, объясняющий такое поведение электрофизических свойств GaAs, выращенного из Ga–Bi-растворов-расплавов. Известно, что основными фоновыми примесями в GaAs являются кремний и углерод. Углерод проявляет ярко выраженные акцепторные свойства, и его концентрация в слоях не зависит от состава Ga–Bi-растворов-расплавов [5]. Значительно сложнее поведение кремния, который при низких температурах и малых концентрациях занимает узлы атомов галлия, проявляя при этом донорные свойства [6, с. 147]. При выращивании слоев GaAs из галлиевых расплавов концентрация вакансий галлия (N_{VGa}) в них значительно меньше концентрации вакансий мышьяка (N_{VAs}). Увеличение концентрации висмута

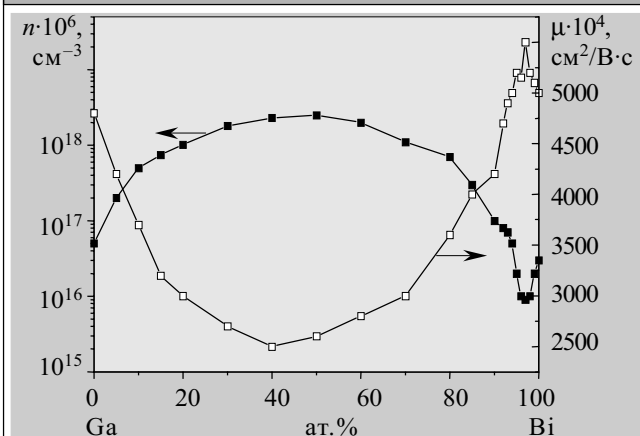


Рис. 2. Зависимость концентрации и подвижности электронов в слоях GaAs от концентрации Bi в Ga—Bi-растворе-расплаве (300 K)

в расплаве повышает стехиометрию расплава (соотношение количества атомов Ga и As), следствием чего является выравнивание концентрации N_{VGa} и N_{VAs} в слоях, а для висмутового расплава должно выполняться соотношение $N_{\text{VGa}} = N_{\text{VAs}}$. Увеличение концентрации вакансий галлия должно приводить к преимущественному вхождению кремния в подрешетку галлия. Центры такого типа являются донорными, чем и обусловлено резкое увеличение концентрации электронов в эпитаксиальных слоях GaAs при добавлении висмута в раствор-расплавы галлия.

Наблюдаемое при более 60 ат.% Bi в расплаве Ga снижение концентрации электронов и повышение их подвижности можно объяснить значительным уменьшением растворимости фоновое кремния в расплавах висмута [5]. Кроме того, на снижение концентрации электронов при более 60 ат.% Bi в Ga может оказывать процесс образования сложных комплексов с участием висмута. Связывание вакансий галлия происходит вследствие того, что изовалентная примесь (висмут), имея большой тетраэдрический радиус, взаимодействует с V_{Ga} и образует комплекс, который не является электрически активным. Уменьшение общего количества свободных вакансий галлия приводит к снижению вероятности закрепления кремния в подрешетке галлия и снижению соответственно концентрации электронов в слоях GaAs.

Таким образом, с приборной точки зрения наибольший интерес представляет висмутовый угол диаграммы состояния Ga—Bi—GaAs. Практическое применение могут найти Ga—Bi-растворы-расплавы, содержащие 95—100 ат.% висмута. Минимальные толщины слоев, полученных из этих расплавов при температуре 873 K, составляют 60—70 нм.

На основе полученных экспериментальных данных определена зависимость скорости кристаллизации слоев из Ga—Bi-растворов-расплавов (97 ат.%) от времени кристаллизации (рис. 3). Из сравнения кривых 1 и 3 следует, что при времени кристаллизации слоев GaAs 10 секунд скорость кристаллизации слоев составляет 5 нм/с. Эта величина на один порядок меньше скорости кристаллизации слоев из галлиевых расплавов при тех же температурах кристаллизации. При жидкофазной эпитаксии минимальное время наращивания слоя определяется временем за-

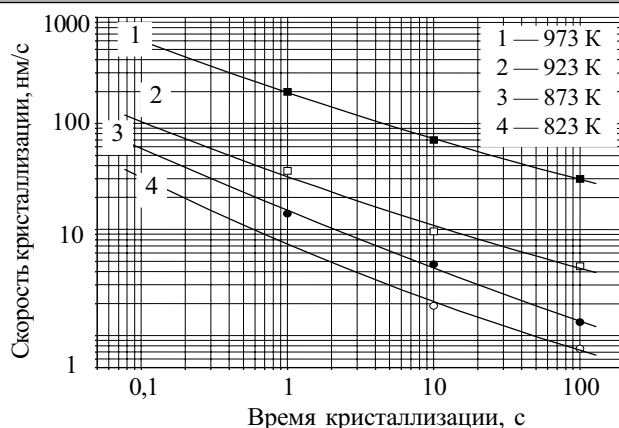


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные зависимости скорости кристаллизации слоев GaAs, полученных из Ga—Bi, от времени: 1 — 0 ат.% Bi; 2, 3, 4 — 97 ат.% Bi

мены растворов-расплавов, которое для наиболее распространенных типов поршневых контейнеров составляет 5—10 с. Поэтому, как видно из рис. 3, скорость кристаллизации из висмутовых расплавов при температуре 823 K может составлять 4—5 нм/с, что вполне достаточно для воспроизводимого наращивания слоев толщиной 0,01—0,1 мкм.

Однородность слоев и их структурное совершенство определяются методом получения и технологическими параметрами процесса. При кристаллизации слоев газодиффузионными методами однородная газовая смесь реагентов пропускается над нагретой полупроводниковой подложкой. Динамика газового потока приводит к образованию приграничного слоя возле поверхности подложки. Между этим приповерхностным слоем и остальным объемом газовой фазы в реакторе существует градиент концентрации, который определяет степень равновесности процессов кристаллизации. Аналогичный градиент существует и при ЖФЭ между приповерхностным слоем раствора-расплава и остальным объемом жидкой фазы, однако его величина значительно меньше, чем в газодиффузионных методах. Отмеченные выше особенности и определяют более высокое структурное совершенство слоев, полученных ЖФЭ. С этой точки зрения интересным является определение влияния висмутовых растворителей на однородность слоев GaAs, полученных низкотемпературной ЖФЭ.

Для сравнения эпитаксиальных структур, изготовленных газодиффузионными методами и ЖФЭ, нами были получены из галлиевых и Ga—Bi-растворов-расплавов эпитаксиальные структуры п.и.-GaAs— n -GaAs с концентрацией электронов $(1—3) \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$ и толщиной слоев n -GaAs, равной 0,9—1,0 мкм. Исследовались также эпитаксиальные структуры, полученные ГФЭ и МОС-гидридной эпитаксией с аналогичными параметрами. На основе этих структур были изготовлены чувствительные элементы датчиков Холла (ЧЭДХ). Как параметр, определяющий однородность структуры по толщине и концентрации, мы выбрали входное сопротивление ЧЭДХ. Эпитаксиальные структуры (ЭС) не разделялись на отдельные кристаллы, а электрическая развязка между отдельными чувствительными элементами на структуре обеспе-

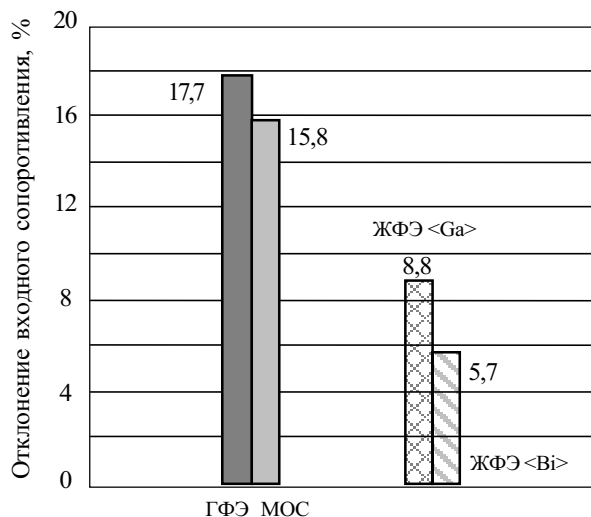


Рис. 4. Отклонение $R_{вх}$ от среднего значения для структур, полученных различными методами

чивалась мезаструктурами, что давало возможность оценить равномерность распределения $R_{вх}$ чувствительных элементов по площади структуры.

Степень однородности эпитаксиальных структур характеризует отклонение значения $R_{вх}$ от среднего значения. Как видно из диаграммы, приведенной на рис. 4, отклонение входного сопротивления ЧЭДХ, изготовленных на основе ЭС, полученных методом ЖФЭ<Ga—Bi>, в два раза меньше, чем в ЧЭДХ, изготовленных на ЭС, выращенных ГФЭ и МОС-гидридной эпитаксией. Это свидетельствует об их высокой однородности как по толщине, так и по концентрации носителей, а также о хорошем структурном совершенстве. Более высокой однородностью характеризуются также эпитаксиальные слои n -GaAs, полученные из висмутовых расплавов, по сравнению со слоями, выращенными из галлиевых расплавов.

Технология «висмутовой» ЖФЭ обеспечивает воспроизводимое изготовление структур п.и.-GaAs— n -GaAs диаметром 40 мм. Толщина эпитаксиального слоя n -GaAs может составлять 0,01 мкм, а концентрация электронов изменяться в пределах от 10^{16} до 10^{19} см⁻³. Таким образом, эпитаксиальные структуры п.и.-GaAs— n -GaAs представляют определенный интерес с точки зрения повышения выхода годных и уменьшения стоимости ДХ.

На основе этих структур авторами работы изготовлены датчики Холла. Их основные параметры при-

ведены в табл. 2. Особенностью датчиков являются сравнительно низкие значения температурных коэффициентов холловского напряжения (U_x) и остаточного напряжения (U_0) по сравнению с датчиками, изготовленными на основе ионно-имплантированных структур (табл. 1).

Технология висмутовой ЖФЭ слоев GaAs может представлять определенный интерес с точки зрения повышения их радиационной стойкости вследствие изовалентного легирования. На это, в частности, указывают полученные авторами [7] результаты исследований скорости удаления носителей в GaAs, легированном индием.

Таким образом, с использованием низкотемпературной «висмутовой» ЖФЭ получены эпитаксиальные структуры п.и.-GaAs— n -GaAs:Sn с толщиной слоев n -GaAs в пределах 0,1—1,0 мкм. На основе этих структур изготовлены датчики Холла, имеющие низкие температурные коэффициенты холловского и остаточного напряжения, а также высокую чувствительность. В то же время большинство датчиков Холла, выпускаемых ведущими фирмами, имеют достаточно высокие значения температурных коэффициентов U_x и U_0 , что обусловлено технологией изготовления структур для датчиков.

Сравнение однородности эпитаксиальных структур, изготовленных методами ГФЭ, МОС-гидридной эпитаксией и ЖФЭ, показало, что наиболее однородными по толщине и концентрации являются структуры, выращенные низкотемпературной «висмутовой» ЖФЭ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Алферов Ж. И., Андреев В. М., Конников С. Г. и др. Жидкофазные AlGaAs-структуры с квантово-размерными слоями толщиной до 20 Å // Письма в ЖТФ. – 1988. – Т. 14, вып. 2. – С. 171–176.
2. Ларионов В. Р., Минтаиров А. М., Смекалин К. Е. и др. Кристаллизация и легирование квантово-размерных AlGaAs-слоев // Тез. докл. V Всесоюз. конф. по физическим процессам в полупроводниковых гетероструктурах. – Калуга. – 1990. – Т. 2. – С. 25–26.
3. Якушева Н. А., Чикичев С. И. Растворимость арсенида галлия в висмут-галлиевых расплавах // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – 1987. – Т. 23, № 10. – С. 1607–1609.
4. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. Т. 2. – М.: Мир, 1981.
5. Куницын А. Е., Новиков С. В., Чалдышев В. В. и др. Анализ спектров фотолюминесценции слоев GaAs, выращенных из Ga—Bi растворов-расплавов // ФТП. – 1995. – Т. 29, вып. 11. – С. 2088–2091.
6. Шишияну Ф. С. Диффузия и деградация в полупроводниковых материалах и приборах. – Кишинев: Штиинца, 1978.
7. Брудный В. Н., Будницкий Д. Л., Колин Н. Г. и др. Влияние электронного облучения на электрофизические свойства и фотолюминесценцию ядерно-легированного арсенида галлия // Изв. вузов. Физика. – 1991. – № 4. – С. 45–51.

Таблица 2

Параметры датчиков Холла на основе полученных структур

Код сенсора	Номинальный ток, мА	Минимальная нормированная магнитная чувствительность, В/А·Т	Минимальное входное сопротивление, Ом	U_x , %/К	Температурный коэффициент U_0 , мВ/К
ΔХВ-03	10	35	250	0,008	0,1
ΔХВ-05	10	110	520	0,01	0,1
ΔХВ-08	10	150	680	0,02	0,2

К. ф.-м. н. В. И. ФАРЕНИК

Украина, г. Харьков, Науч. физ.-технологич. центр ХНУ им. В. Н. Каразина
E-mail: root@sptca.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию
18.03 2002 г.

Оппонент к. т. н. В. И. БОСЫЙ
("Сатурн-Микро", г. Киев)

ДИОДНЫЕ РЕАКТОРНЫЕ СИСТЕМЫ МИКРОТРАВЛЕНИЯ*

Приведены результаты исследований характеристик высокочастотного емкостного разряда и разработки диодных реакторов установок микротравления с малым энергозатратом.

Внедрение методов плазменной обработки поверхностей твердых тел в пленочных и полупроводниковых технологиях промышленной микроэлектроники, в частности и в особенности, для обеспечения комплекса ключевых в производстве микроприборов процессов формирования топологического рисунка, в отечественной промышленности получило массовый характер с начала 80-х годов минувшего столетия.

Усилиями технологов отрасли и специалистов в области электронного машиностроения к середине 1980-х годов были разработаны установки плазменной обработки микроструктур серии УВН, УРМ, УРМЗ, ПХО, "Плазма". Удачными единичными образцами подобного оборудования являлись разработки НПО "Кристалл" (г. Киев), ЦКБ ПО "Донец" (г. Луганск).

Автором в составе группы ученых и специалистов созданной Минвузом УССР и Минэлектронпромом СССР при Харьковском государственном университете** отраслевой научно-исследовательской лаборатории диагностики плазменных технологических процессов (ОНИЛ ДПТП) были начаты в то же время плановые научно-исследовательские (а с 1983 г., после организации СКТБ "Контур", опытно-конструкторские) работы по таким направлениям:

— исследование и разработка диагностических методов и устройств контроля плазменных процессов в технологии полупроводниковых приборов;

— фундаментальные исследования физики процессов зажигания и горения разрядов в скрещенных электрическом и магнитном полях, ВЧ-емкостного (ВЧЕ), ВЧ-индукционного (ВЧИ) и пучково-плазменного разрядов;

— изучение промышленного ионно-плазменного оборудования с целью оптимизации и разработки перспективного технологического оборудования, в ча-

стности, новых типов ионных источников ионно-лучевой обработки материалов и нанесения покрытий, вакуумно-реакционных камер для процессов плазменной обработки на базе ВЧЕ- и ВЧИ-разрядов;

— исследование процессов взаимодействия плазмы и потоков заряженных частиц с поверхностями твердых тел, изучение влияния плазменной обработки на электрофизические параметры и структуру поверхности.

При выполнении этих работ сформировалось самостоятельное научно-техническое направление: разработка низкоэнергетических, с малыми затратами рабочих (как правило, химически активных) газов, малогабаритных ионно-плазменных и ВЧ-разрядных устройств для создания управляемого высокоэффективного плазменного малоэнергоемкого оборудования индивидуальной обработки пластин.

Это направление, имея стратегическое значение, связанное с необходимостью микроминиатюризации электронных приборов и увеличением диаметра пластин-носителей, актуально и в связи с решением постоянно возникающих этапных задач, которые сопровождают развитие плазменных технологий в микроэлектронике. Например, разработка ионных источников без накаливаемого катода для реализации процессов ионно-химической обработки, что тождественно уменьшению физико-энергетического воздействия на поверхность; необходимость нанесения пленок на гибкие пластиковые носители с низкой температурой плавления; малогабаритные технологические модули для космических станций; применение вместо кремниевых носителей материалов группы A^3B^5 и органических полупроводников с низкими температурами деструкции; проблемы уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу, в частности, фтора.

Сейчас же, на пороге качественного преобразования процесса микроминиатюризации приборов и изделий электроники с помощью нанотехнологий, минимизация комплексного воздействия активированной технологической среды на наноструктуры при сохранении эффективности этого воздействия тем более актуальна.

Результаты разработок были испытаны в ведущих НИИ и внедрены на таких передовых предприятиях электронной промышленности как НПО «Кристалл», ПО «Сатурн», ПО «Орион» (г. Киев), ЦКБ ПО «Донец» (г. Луганск), Минский радиотехнический инсти-

*Публикуемая статья — первая в цикле "Малоэнергоемкие плазменные технологические системы с разрядами в комбинированных электрическом и магнитном полях".

** С 1999 года — Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина.

тут, ПО “Интеграл” (г. Минск), НИИ вакуумной техники им. С.А. Векшинского, Физико-технологический институт РАН, НИИ прикладной физики, НПО “Орион”, НПО “Сапфир” (г. Москва), НИИ точных технологий, завод “Ангстрем” (г. Зеленоград), ПО “Светлана”, ПО “Авангард” (г. С.-Петербург), НИИ полупроводниковых приборов, НПО “Электроника” (г. Воронеж) в процессах формирования топологического рисунка при производстве приборов микро- и микрофотозлектроники.

Характеристики ВЧ-емкостного разряда

Изучены условия пробоя самостоятельного ВЧЕ-разряда, его статические активные вольт-амперные характеристики (ВАХ), спектры оптического излучения оптимизированного ВЧЕ-разряда [1—5]. Эксперименты выполнялись в двухэлектродном разрядном устройстве. Кривые зажигания ВЧ-разряда измерялись в воздухе, аргоне, CF_4 и SF_6 при давлениях газа $P \cdot 10^{-3}$ —10 торр в диапазоне ВЧ-напряжений $U_0 < 1500$ В и частоте поля $f = 13,56$ МГц. Параметры разряда измерялись стандартными зондовыми методиками, модифицированными для использования в условиях ВЧ-разряда. Расстояние между плоскими параллельными электродами диаметром 100 мм изменялось в диапазоне 6—54 мм. Использовались электроды из нержавеющей стали и дюралюминия, а также стальные электроды, покрытые сажей и полимерной пленкой. На один из электродов подавалось ВЧ-напряжение, второй электрод был заземлен. Для исключения постоянного напряжения автосмещения между электродами подключался дроссель индуктивностью 4 мГн.

Показано, что кривая зажигания ВЧЕ-разряда имеет особенности: на левой ветви наблюдается неоднозначная зависимость напряжения зажигания от давления, а на правой, в определенных условиях, — точка перегиба. На основе диффузной кинетической теории ВЧ-пробоя [6] можно получить соотношение между значениями давления в точке перегиба, в минимуме и в точке поворота кривой зажигания.

Из экспериментальных кривых на рис. 1, 2 вытекает, что параметры, которые отвечают ветвям кри-

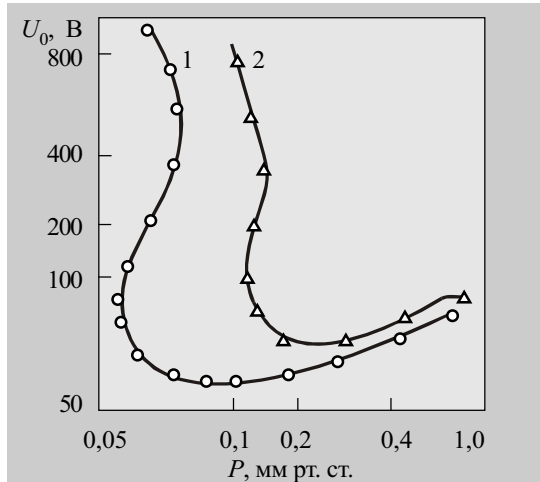


Рис. 1. Зависимость напряжения зажигания ВЧЕ-разряда от давления (P) аргона:

1 — расстояние между электродами $d=14$ мм;
2 — $d=29$ мм

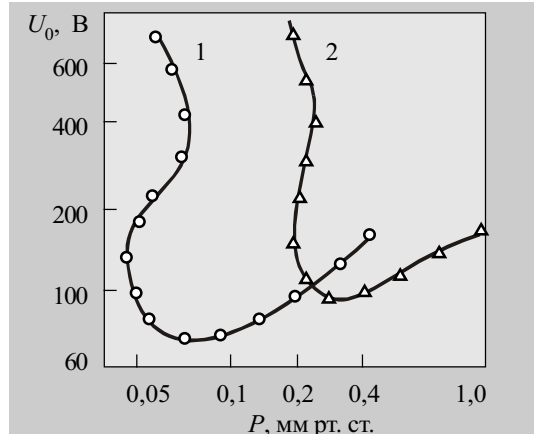


Рис. 2. Зависимость напряжения зажигания ВЧЕ-разряда от давления для различных газов при $d=20$ мм:

1 — SF_6 ; 2 — H_2

вой зажигания по правую и по левую сторону от минимума, удовлетворяют условиям применимости диффузной теории:

$$v \gg \omega, \lambda_e \ll d, E_{\text{lim}} \leq \frac{d}{2} \frac{m_e \omega v}{e},$$

где v — частота электрон-атомных соударений;

ω — частота электрического поля;

λ_e — длина свободного пробега электрона;

d — расстояние между электродами;

m_e, e — масса и заряд электрона;

E_{lim} — предельная амплитуда электрического поля, при которой все электроны достигают стенок разрядной камеры за половину периода изменения поля.

На рис. 3, 4 представлены кривые зажигания ВЧ-разряда в воздухе, SF_6 и CF_4 при разных материалах электродов. Из рисунков видно, что кривые зажигания ВЧ-разряда практически не зависят от материала электродов в диапазоне давлений газа вблизи и по правую сторону от точки перегиба. В области давлений по левую сторону от точки перегиба наблюдается заметное расхождение между кривыми зажигания.

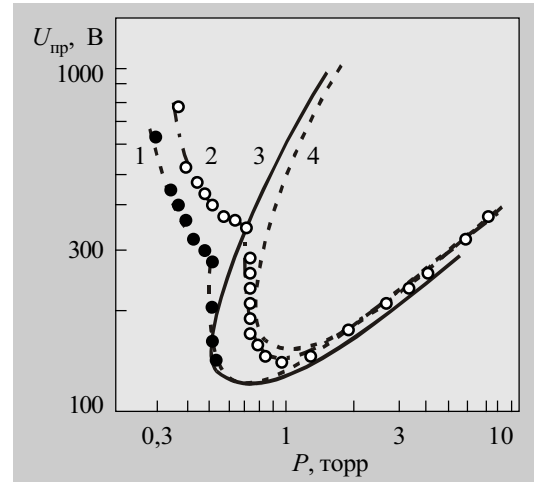


Рис. 3. Зависимость пробойного ВЧ-напряжения от давления воздуха при $d=14$ мм:

1 — чистые стальные электроды; 2 — стальные электроды, покрытые сажей; 3 — расчет по (1) для $\delta=0,1$; 4 — расчет по (1) для $\delta=0,02$

Чем выше коэффициент вторичной электронной эмиссии материала электродов δ , тем меньшие ВЧ-напряжения нужны для пробоя газа; кривая зажигания сдвигается в область более низких давлений. Использование электродов с более высоким значением δ влияет на кривую зажигания ВЧ-разряда таким же образом, как и небольшое увеличение расстояния между электродами d . Практически на всех экспериментальных кривых зажигания по левую сторону от минимума хорошо видно область неоднозначной зависимости пробойного ВЧ-напряжения от давления газа.

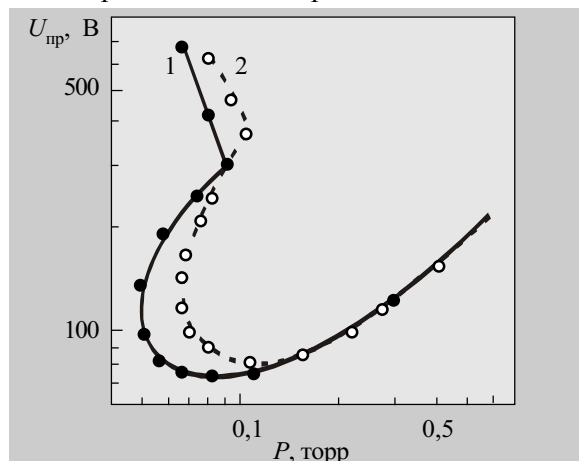


Рис. 4. Зависимость пробойного ВЧ-напряжения от давления SF_6 при $d=20$ мм:
1 — чистые стальные электроды; 2 — стальные электроды, покрытые сажей

Построена простая феноменологическая одномерная модель ВЧ-пробоя газа с учетом вторичной электронной эмиссии с поверхности электродов. В частности, получено уравнение ВЧ-пробоя

$$\exp\left(\frac{B_0 \rho}{\sqrt{2} E_0}\right) = A_1 \pi \left(L - \frac{E_0 \Lambda}{\sqrt{2} B_0 \rho C_2} \right) \times \left[2 \arccos \left[\delta \left(\frac{2 \pi m \omega}{e E_0} \right)^{1/2} \left(\frac{3 \pi}{2 \lambda} \right)^{-1/4} \right]^{-1} \right], \quad (1)$$

где B_0 , ρ , A_1 , C_2 , λ — молекулярные константы;
 E_0 — амплитуда ВЧ-поля;
 L — длина разрядного промежутка;
 Λ — вакуумная длина ВЧ-поля.

При отсутствии вторичной электронной эмиссии с поверхности электродов ($\delta=0$) уравнение (1) переходит в уравнения Кихары для пробоя газа в однородном ВЧ-поле. Как видно из рис. 3, уравнение (1) удовлетворительно описывает экспериментальные кривые зажигания ВЧ-разряда при разных материалах электродов.

Статическая активная ВАХ (зависимость омической составляющей ВЧ-тока проводимости $J_0 \cos \varphi$ от напряжения U_0 , связанных соотношением $W = U_0 J_0 \cos \varphi$, где W — мощность, потребляемая разрядом, φ — угол сдвига фазы между током и напряжением), как и кривая зажигания ВЧ-разряда, является важной его характеристикой. Проведенные иссле-

дования показали, что активная ВАХ высокочастотного разряда отличается от аналогичной зависимости в разряде постоянного тока. Основные особенности отличия ВАХ наблюдаются в области напряжений, близких к напряжению пробоя ВЧ-разряда.

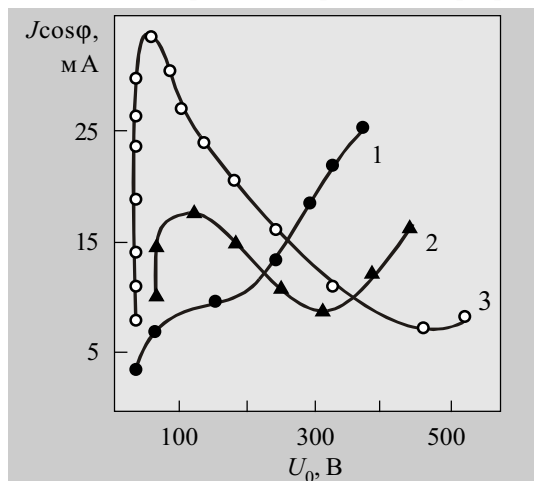


Рис. 5. Статические активные ВАХ ВЧ-разряда при $P=0,3$ торр и $d=50$ мм для различных газов:
1 — гелий; 2 — аргон; 3 — ксенон

При напряжении на разряде, превышающем потенциал зажигания, для некоторых газов наблюдается спад тока проводимости. Характерные зависимости приведены на рис. 5. Как видно из рисунка, чем тяжелее газ, тем больший спад тока наблюдается на ВАХ. Минимум ВЧ-тока проводимости приходится на меньшие напряжения для газа, у которого коэффициент вторичной ион-электронной эмиссии выше. Чем ярче выражена зависимость сечения упругих электрон-нейтральных столкновений от энергии электронов, тем большее падение тока наблюдается в эксперименте.

Аналогичное поведение наблюдается также и для ВЧ-мощности, вкладываемой в разряд. На участках с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП) на активных ВАХ ВЧ-мощность в разряде может не только замедлять свой рост при повышении ВЧ-напряжения, но даже падать. Это означает, что относительные энергозатраты на создание в разряде приэлектродного падения потенциала V_p , линейно зависящего от U_0 , для этих участков будут минимальными, а значит, минимальными будут также затраты ВЧ-мощности на создание ускоренного до соответствующей энергии потока ионов из плазмы. При равной энергетике ионной бомбардировки более экономичным будет режим разряда, соответствующий именно участкам с ОДП.

Диодные реакторы и установки плазмохимического травления (ПХТ)

Существенное уменьшение объема разрядной камеры и ограничение объема плазмы только размерами области, находящейся между электродами непосредственно над обрабатываемой пластиной, а также использование в качестве рабочих режимов реактора области параметров с минимальным потенциалом

зажигания разряда, в которой наблюдается ОДП, позволило значительно снизить энергозатраты на проведение процессов ПХТ в ВЧ-диодном разряде [7] и разработать серию малоэнергоемких реакторов ВЧЕ-типа, а также экспериментальных технологических установок на их основе.

Проведенные измерения температуры электронов T_e , плотности плазмы n_p , постоянной составляющей потенциала плазмы Φ_p , распределения этих параметров по радиусу и величине межэлектродного промежутка, спектров излучения и масс-спектрометрические исследования вместе с изучением газовых потоков в модельных диодных устройствах позволили разработать оптимальные плазмохимические реакторы для установок ПХТ «Контур-01», «Контур-03», «Титан».

Общим для перечисленных установок является использование минимизированного по размерам («в пластину») и энергоклада реактора с верхним электродом оригинальной конструкции [8], позволяющей осуществлять распределенные по площади электрода напуск рабочих газов и откачивание продуктов реакции. Схема реактора приведена на рис. 6.

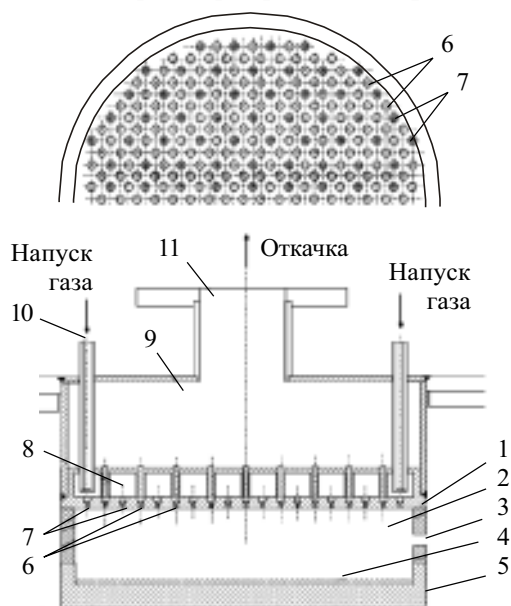


Рис. 6. Диодный реактор установок типа «Контур» и «Титан» и верхний электрод (в плане)

В реакционной камере 2 размещены два потенциальных электрода 1, 5. На электроде 5 находится обрабатываемая пластина 4. В потенциальном электроде 1 имеются отверстия для вакуумной откачки продуктов реакции 8 и напуска рабочего газа 7. Отверстия для откачки продуктов реакции расположены на площади электрода так, что они образуют симметричную относительно центра электрода решетку. Отверстия для напуска рабочего газа 7 находятся в центрах этой решетки. Через отверстия 8 вакуумный объем камеры 2 соединяется с объемом 9, который связан с системой вакуумной откачки через отверстие 11. Через отверстия 7 вакуумный объем камеры 2 соединяется с объемом 8, который связан с системой напуска рабочего газа через отверстие 10. Измерение вакуума в реакционной камере осуществляется через отверстие 3.

Экспериментальные технологические установки «Контур-01» и «Контур-03» [4], оснащенные реакторами такого типа, предназначены для индивидуального ПХТ пластин в плазме ВЧЕ-разряда. В этих установках можно осуществлять травление тонких пленок нитрида кремния, поликремния, диоксида кремния, металлов, глубинное травление кремния в атмосфере рабочих газов и их смесей (аргон, водород, кислород, фреоны). Частота ВЧ-генератора — 13,56 МГц, мощность генератора установки «Контур-01» — не более 100 Вт, «Контур-03» — не более 500 Вт, диапазон давлений в вакуумной камере 0,1—1,0 торр.

Установка «Контур-01» выполнена в виде стойки с габаритами 1750×550×560 мм. В состав установки входят система газонапуска и откачки, устройство регулирования скорости откачки и установки рабочего давления, вакуумная реакционная камера, блок управления режимами работы, высокочастотный генератор, прибор «Контроль» для определения момента окончания травления. Для удобства эксплуатации и наладки предусмотрены ручной и автоматический режимы работы. Блок управления режимами работы обеспечивает стыковку и совместную работу всех систем и устройств. ВЧ-генератор имеет согласующее устройство и контрольные приборы для измерения тока анода и подводимого ВЧ-напряжения.

Установка «Контур-03» является усовершенствованной модификацией установки «Контур-01». Основные отличия состоят в размерах обрабатываемых пластин (100 мм), мощности генератора. «Контур-03» при улучшенных эргономических показателях имеет значительно меньшие габариты. В установке применена система газонапуска, обеспечивающая большую равномерность травления, усовершенствован блок управления. Конструкция реактора обеспечивает возможность использования установки в составе линий плазмохимической обработки.

С развитием элементной базы установок ПХТ и благодаря выполненным исследованиям высокочастотного газового разряда появилась возможность создания миниатюрных настольных установок. Такой установкой является экспериментальная технологическая установка «Титан» (рис. 7). Установка серии «Титан» имеет габариты 60×30×50 см. В ее состав входят вакуумная реакционная камера, блок газонапуска, вакуумметр, генератор высокой частоты, блок управления, блок питания, механизм открывания камеры.



Рис. 7. Малогабаритная экспериментальная установка ПТХ серии «Титан»

На установках «Титан» проводились процессы травления различных тонкопленочных структур. Травление полиимидных пленок толщиной 12—36 мкм в атмосфере кислорода и фреона с контактной никелевой маской показало высокую скорость (5 мкм/мин)

и анизотропию. Осуществлялось травление кремниевых структур, органического и кремнийорганического фоторезистов. Скорость травления тонких пленок нитрида кремния, диоксида кремния, поликремния составляла 1 мкм/мин и больше. Проводились процессы глубинного травления кремния. Средняя скорость травления составляла 5 мкм/мин при глубине травления до 50 мкм.

Установлены оптимальные режимы травления кремния в технологических реакторах установок "Контур" и "Титан".

На рис. 8 показаны зависимости скорости травления кремния от давления SF_6 и кривая зажигания ВЧ-разряда в этом газе.

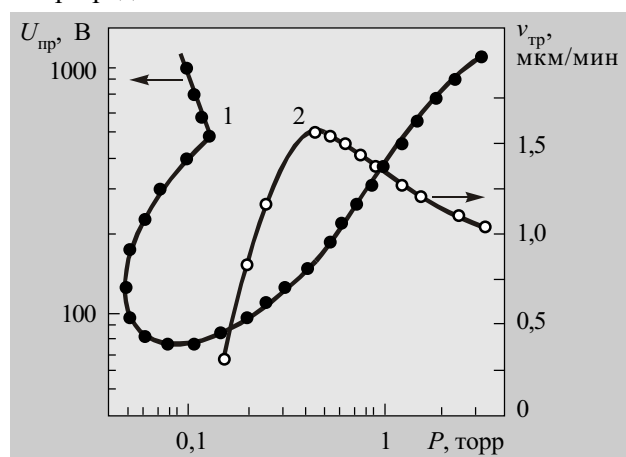


Рис. 8. Кривая зажигания ВЧ-разряда в SF_6 (1) и зависимость скорости травления кремния $v_{тр}$ от давления P (2) при $d=22$ мм

Из рисунка видно, что функция $v_{тр}(P)$ имеет максимум при давлении, лежащем в диапазоне между минимумом и точкой перегиба кривой зажигания ВЧ-разряда. Процесс скоростного травления начинается при некотором пороговом давлении вблизи минимума кривой зажигания. Наличие максимума на зависимости $v_{тр}(P)$ в диапазоне давлений 0,1—1 торр наблюдалось также в работах других авторов.

Измерениями электронной плотности и скорости генерации химически активных частиц в реакторах установлена связь между областью давлений, оптимальных для проведения процесса травления кремния в технологических малоэнергетических плазменных установках серии "Контур" и "Титан", и соответствующим участком ВЧ-кривой зажигания. Максимальные скорости травления кремния наблюдаются в диапазоне давлений между минимумом и точкой перегиба кривой зажигания. Получена аппроксимационная формула, позволяющая предсказать оптимальное для проведения процесса скоростного травления кремния в SF_6 давление в широком диапазоне расстояний между электродами.

Описанные выше установки позволяют осуществлять практически все процессы микротравления металлов, полупроводников и диэлектриков в рабочих газах (кроме хлорсодержащих, при использовании которых требуются известные изменения в конструкции установок).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кропотов Н. Ю., Качанов Ю. А., Реука А. Г. и др. Особенности пробоя газа низкого давления в высокочастотном однородном поле // Письма в ЖТФ.— 1988.— Т. 14, вып. 4.— С. 359—363.
2. Кропотов Н. Ю., Качанов Ю. А., Лисовский В. А. и др. Особенности вольт-амперных характеристик слаботочной формы высокочастотного разряда Е-типа // Там же.— 1989.— Т. 15, вып. 21.— С. 17—21.
3. Лисовский В. А., Кропотов Н. Ю., Фареник В. И. Влияние вторичной электронной эмиссии на ВЧ-пробой газа низкого давления // Там же.— 1996.— Т. 22, вып. 24.— С. 64—69.
4. Фареник В. И. Применение высокочастотных разрядов низкого давления для разработки малоэнергетических управляемых систем вакуумно-плазменного травления // Вестник Харьков. гос. политехнич. университета.— 1999.— Вып. 55.— С. 56—74.
5. Фареник В. И. Физико-технические характеристики высокочастотного диодного разряда в устройствах травления микроструктур // Радиоэлектроника и информатика.— 1999.— № 2.— С. 73—81.
6. Kihara T. The mathematical theory of electrical discharges in gases // Rev. Modern Phys. — 1952. — Vol. 24, N 1.— P. 45.
7. А. с. 1443689 СССР. Способ плазмохимического травления микроструктур / Н. Ю. Кропотов, Ю. А. Качанов, В. Д. Егоренков и др.— Оpubл. в Б. И.— 1988, № 12.
8. А. с. 1355053 СССР. Устройство для плазмохимического травления покрытий образцов / Н. Ю. Кропотов, В. Т. Сериков, В. И. Фареник и др.— Оpubл. в Б. И.— 1987, № 11.

КОНТРОЛЬ	ИЗМЕРЕНИЯ	ИСПЫТАНИЯ	КОНТРОЛЬ	ИЗМЕРЕНИЯ	ИСПЫТАНИЯ	КОНТРОЛЬ	ИЗМЕРЕНИЯ	ИСПЫТАНИЯ		
КОНТРОЛЬ	ИЗМЕРЕНИЯ	ИСПЫТАНИЯ	Украина, г. Киев НИИ «ОРИОН» имеет собственный современный испытательный центр. Может проводить испытания изделий, приборов и комплектующих на воздействие механических, климатических и других факторов. Испытания могут проводиться с представителем Заказчика и Отделом технического контроля. Справки по тел. ☎(044) 446-82-72 (Шведов Анатолий Николаевич)						ИЗМЕРЕНИЯ	ИСПЫТАНИЯ
КОНТРОЛЬ	ИЗМЕРЕНИЯ	ИСПЫТАНИЯ	КОНТРОЛЬ	ИЗМЕРЕНИЯ	ИСПЫТАНИЯ	КОНТРОЛЬ	ИЗМЕРЕНИЯ	ИСПЫТАНИЯ		

К. ф.-м. н. С. В. ДУДИН, А. П. ЯЦКОВ,
к. ф.-м. н. В. И. ФАРЕНИК

Украина, г. Харьков, Национальный ун-т им. В. Н. Каразина,
Научный физико-технологический центр
E-mail: root@sptca.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию
14.03 2002 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. В. ФЛОРКО
(ОНУ им. И. И. Мечникова, г. Одесса)

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЗОНДОВОЙ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Приведен обзор теоретических и практических аспектов применения электрических зондов для измерения параметров технологической плазмы и диагностики технологических процессов.

Опыт использования плазменных технологий свидетельствует, что высокое, повторяемое качество продукции могут гарантировать только устройства, в которых процесс плазменной обработки полностью автоматизирован. При этом одним из ключевых факторов в достижении стабильного качества является оперативный контроль параметров технологического процесса [1].

Традиционно для контроля плазменных технологических процессов используют измерение внешних параметров системы — напряжения и тока разряда, давления и расхода газа и т. п. Однако “инструментом”, который непосредственно воздействует на обрабатываемую поверхность, является плазма, и ее параметры определяются не только перечисленными внешними параметрами, но и количеством, формой и расположением обрабатываемых изделий, состоянием их поверхности, а также состоянием поверхности вакуумной камеры технологической установки и другими факторами, часто неконтролируемыми. То есть гарантией повторяемости результатов процесса является повторяемость параметров плазмы, контактирующей с обрабатываемым изделием, и потоков заряженных частиц на его поверхность. (Это особенно важно при разработке нового технологического оборудования и отработке новых технологий, когда необходима быстрая обратная связь, оперативная информация о параметрах плазмы и визуализация вносимых изменений в реальном масштабе времени. Кроме того, возможность воспроизводить параметры технологической плазмы позволяет обоснованно переносить существующие технологические процессы на другие типы технологических установок и новые типы обрабатываемых изделий.)

К настоящему времени наибольшее распространение получили эмиссионно-спектральные методы диагностики плазменно-технологических процессов, масс-спектрометрические, оптические, контактные и

др. Несмотря на достоинства перечисленных методов контроля, ни один из них не удовлетворяет требованиям универсальности, высокой точности, простоты реализации, технологичности и дешевизны одновременно [2].

В последние годы в технологии микроэлектроники и прецизионного машиностроения интенсивно развиваются зондовые методы контроля плазменной обработки покрытий. Они позволяют производить локальные измерения практически всех существенных параметров плазмы в очень широком диапазоне их изменения, обладая при этом относительной простотой реализации. Наряду с присущими им серьезными недостатками (сложность интерпретации результатов, возмущение плазмы в процессе измерения), эти методы отличают универсальность в отношении материала покрытий, типа разряда, сорта рабочего газа при высоком быстродействии и чувствительности. Они дают непосредственную численную информацию о таких важнейших параметрах плазмы (и их пространственных распределениях), как

— плотность плазмы, ответственная за плотность потока заряженных частиц, бомбардирующих обрабатываемую поверхность;

— потенциал плазмы, ответственный за их энергию;

— энергетический спектр электронов, ответственный за химические реакции в плазме и образование активных частиц.

Начиная с 1980 г. систематические исследования в области диагностики плазменных технологических процессов интенсивно проводились в Отраслевой научно-исследовательской лаборатории диагностики плазменно-технологических процессов Харьковско-го национального университета и Научном физико-технологическом центре Министерства образования и Национальной академии наук Украины (г. Харьков), а успешные испытания разработанных в этих организациях приборов были осуществлены на ведущих предприятиях Министерства электронной промышленности бывшего СССР: НИИ ВТ им. С. А. Векшинского, НПО “Сапфир” (г. Москва), НПО “Светлана” (г. Санкт-Петербург), НИИ ТМ, НИИ ТТ, НИИ МЭ (г. Зеленоград), НПО “Сатурн” (г. Киев), НПО “Интеграл” (г. Минск), НПО “Электроника” (г. Воронеж). В течение этого времени были проведены исследования фундаментальных и прикладных аспектов при-

Работа выполнена за счет финансирования Министерства образования и науки Украины.

менения электрических зондов для диагностики процессов ионно-плазменного травления и нанесения материалов, начиная с физических основ зондовых измерений в плазме различных типов технологических установок и заканчивая конкретными методами и устройствами контроля.

Настоящая статья посвящена краткому обзору результатов этих работ.

Особенности зондовых измерений в технологической плазме

Несмотря на то, что в области использования электрических зондов для диагностики плазмы накоплен богатый экспериментальный и теоретический материал [3—6], строгой универсальной теории зондовых измерений не существует, а построенные теории для частных случаев применения зондов очень сложны [3]. Более того, технологическая плазма, как правило, является неравновесной, неоднородной, неизотропной, часто химически активной средой, что ограничивает применимость стандартных зондовых методик. Поэтому разработка зондовых методик контроля плазменно-технологических процессов представляет собой достаточно сложную научно-техническую задачу и требует проведения широкого спектра исследований технологической плазмы и специфики работы в ней электрических зондов.

Опыт авторов показывает, что взаимосвязь параметров плазмы с результатом технологического процесса, как правило, нетривиальна и заранее неизвестна. В связи с этим была выработана следующая схема проведения комплекса исследований для каждого типа разряда.

В первую очередь, необходимо изучить особенности зондовых измерений в плазме данного типа разряда. Влияние постоянных и переменных электрических и магнитных полей, потоков заряженных частиц, осаждения проводящих и диэлектрических пленок на зондах может кардинально изменять зондовые характеристики, и часто требуется принятие специальных мер для устранения или корректного учета этих факторов.

Затем должна быть поставлена задача получения и систематизации максимально широкого комплекса экспериментальных данных о чувствительности зонда к конкретному технологическому процессу. На основании полученных результатов разрабатываются специфические методики контроля различных плазменно-технологических процессов.

Кроме того, для конкретных случаев применения зондов обычно можно выделить ограниченное количество доминирующих процессов в плазме и на этой основе построить (либо модернизировать существующие) математические модели, описывающие взаимосвязь зондовых характеристик с параметрами технологического процесса.

В работах [7—10] проведен анализ специфических особенностей применения электрических зондов в ионно-пучковой плазме (ИПП), образующейся в пространстве транспортировки пучков ионов в устройствах ионно-лучевого травления. Этот анализ показал, что ИПП является довольно сложным обра-

зованием. Она состоит [7] из четырех компонент с принципиально различными свойствами: ионы пучка; γ -электроны, выбитые из мишени в результате ион-электронной эмиссии; медленные ионы, рожденные в результате ионизации и резонансной перезарядки; запертые в потенциальной яме низкоэнергетичные электроны.

В работах [11—13] проанализированы особенности зондовых измерений в плазме ВЧ-разряда емкостного типа, широко используемого в микроэлектронной промышленности [14]. Показано, что наличие ВЧ-тока в цепи зонда приводит к существенному возмущению формы его ВАХ и к значительным погрешностям в оценках параметров плазмы [11]. Разработана методика, позволяющая устранить влияние паразитной емкости ввода и существенно повысить импеданс зонда [15].

Классические зондовые теории наиболее развиты для предельного случая низких давлений нейтрального газа, когда длина свободного пробега заряженных частиц λ значительно превышает размеры зонда R_p (бесстолкновительный режим зонда), и для другого предельного случая, когда $\lambda \ll R_p$ (зонд работает в режиме сплошной среды) [6]. В то же время давление газа в большинстве промышленных технологий лежит в области промежуточных давлений, в которой длина свободного пробега сопоставима с размерами зонда и слоя. При этом решение задачи значительно усложняется в силу нелокальной зависимости плотности заряженных частиц от потенциала и напряженности электрического поля. В наиболее общей постановке задача вычисления зондового тока при промежуточных давлениях решалась в [10]. В этой работе построена теоретическая модель ионного тока на цилиндрический лэнгмюровский зонд, погруженный в слабоионизованную газоразрядную плазму, при произвольных давлениях нейтрального газа и любом соотношении между толщиной слоя объемного заряда и радиусом зонда.



Рис. 1. Прибор «Плазмометр»

Базируясь на результатах отработки зондовых методик в технологической плазме, в лаборатории диагностики плазменных технологических процессов ХНУ был разработан универсальный измерительный комплекс «Плазмометр» (рис. 1), предназначенный для автоматизированного измерения ключевых стационарных параметров лабораторной и технологической газоразрядной плазмы и их пространственных распределений, а также для автоматизированного сбора, обработки, анализа и хранения результатов измерений. Измеряемыми параметрами являются: потенциал плазмы, плавающий потенциал, плотность электронов и положительных ионов, температура и энергетический спектр электронов. Область применения этого прибора — научные исследования, раз-

работка нового технологического оборудования и отработка новых технологий.

Плазмометр снабжен системой автоматизированного перемещения зонда по двум координатам, что позволяет получать пространственные распределения параметров плазмы. Кроме того, предусмотрено измерение временных зависимостей этих параметров. Прибор работает под управлением компьютера класса PC и оснащается сервисным программным обеспечением, позволяющим полностью автоматизировать процесс измерения и обработки информации.

Комплект зондов (см. рис. 2) представляет собой систему насадок с взаимосовместимыми металлическими и керамическими трубками и переходниками, позволяющими изменять длину зонда d_1 в диапазоне 50—500 мм при радиусе d_3 до 200 мм.

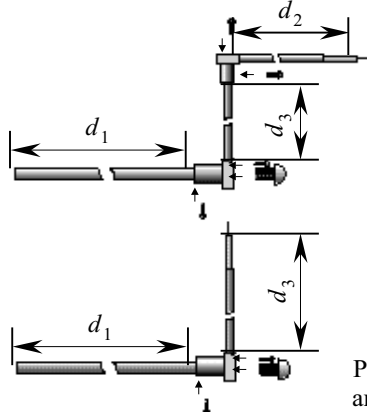


Рис. 2. Различные варианты компоновки зонда

Перемещение зонда происходит в вакууме, в то время как все электронные и механические системы комплекса смонтированы за пределами вакуумной камеры в едином металлическом корпусе. Вывод зонда и вся измерительная электроника полностью экранированы. Кроме того, предусмотрена система подавления ВЧ-сигнала с частотой 13,56 МГц.

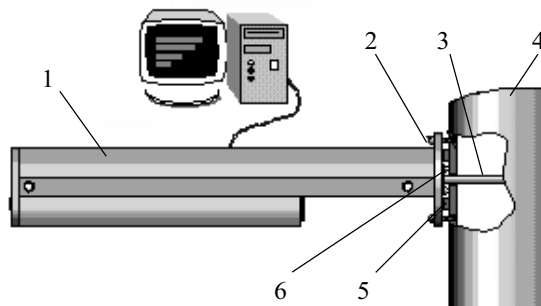


Рис. 3. Схема подключения "Плазмометра" к технологической установке:

1 — электронно-механический блок; 2 — присоединительный фланец; 3 — зонд; 4 — вакуумная камера; 5 — медное уплотнение; 6 — вакуумное уплотнение зонда

Предусмотрено несколько способов крепления прибора к камере (см. рис. 3): непосредственно при помощи базового фланца (диаметр 114 мм) с медным уплотнением, через переходный фланец, либо с использованием выносного вакуумного уплотнения (в случае отсутствия достаточного места для монтажа базового фланца).

В основу работы «Плазмометра» положен метод ленгмюровского зонда с комбинированной электронной и численной обработкой зондового сигнала. Данными, снимаемыми с зонда электронным контроллером, являются ВАХ и зависимости производных зондового тока от потенциала зонда, измеряемые по усовершенствованной модуляционной методике. При этом достигается высокая чувствительность (вплоть до 3—4 порядков по амплитуде) при измерении высокоэнергетичного «хвоста» функции распределения электронов по энергии даже в нестационарной плазме.

Через последовательный порт (интерфейс RS-232) данные поступают в персональный компьютер. С использованием численных моделей работы ленгмюровского зонда [14] производится определение основных параметров плазмы в различных условиях работы технологических устройств. Результатом измерений являются вольт-амперная характеристика зонда, ее вторая производная, функция распределения электронов по энергии и локальные параметры плазмы: плотности электронов и ионов, температура электронов, потенциал плазмы (рис. 4). Предусмотрена также возможность автоматизированного контроля процессов травления и нанесения покрытий.

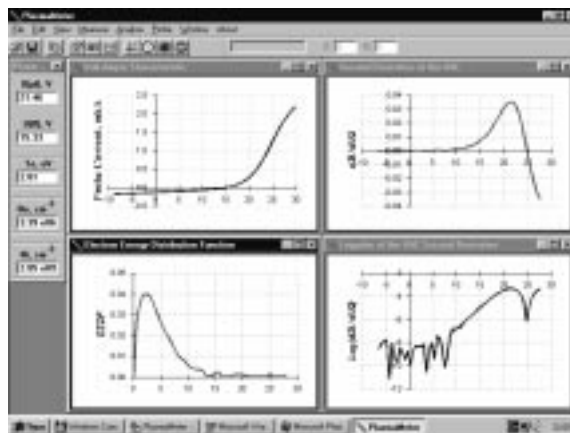


Рис. 4. Вид экрана компьютера при измерении параметров плазмы

Программное обеспечение «Плазмометра» включает полностью автоматизированные алгоритмы выбора режимов измерения, собственно измерений и обработки их результатов. В то же время следует учитывать, что в силу специфики зондовых измерений эти алгоритмы могут существенно меняться в зависимости от типа и характеристик разряда, давления газа, наличия магнитных полей и т. д. Поэтому в программном обеспечении предусмотрена возможность подстройки параметров измерения и анализа (всего около 60 параметров), а также отключения отдельных автоматических блоков с переходом в ручной режим.

Основным требованием к универсальному варианту прибора является возможность получения максимально возможного объема информации о плазме и ходе технологического процесса. «Плазмометр» включает оборудование и программное обеспечение как для измерения и анализа параметров плазмы, так

и для решения специфических технологических задач (поддержание какого-либо параметра плазмы в заданных пределах, определение момента окончания процесса). При этом обеспечиваются фильтрация шумов и флуктуаций, переходные процессы между этапами плазменно-технологического процесса, автоматическая настройка параметров анализа в зависимости от стадии и параметров процесса.

Основные характеристики "Плазмометра"

Диапазон изменения потенциала зонда	-400...+400 В
Разрешение по потенциалу зонда	0,01 В
Диапазон измеряемых токов	10 нА ...10 мА
Диапазон измерения электронной температуры	0,01...100 эВ
Диапазон измерения плотности плазмы	$10^7...10^{13}$ см ⁻³
Количество координат перемещения зонда	2
Диапазон перемещения зонда	0...300 мм
Точность позиционирования	0,5 мм

Зондовые методы контроля момента окончания ПТП

Рассматриваемые методы относятся, в основном, к контролю наиболее распространенных методов травления (ионно-лучевого — ИЛТ, реактивного ионно-лучевого — РИЛТ и плазмохимического — ПХТ) при параметрах, типичных для технологии микроэлектроники (плотность тока ионов 1—10 мА/см², энергия 0,1—2 кэВ). В процессах ИЛТ и РИЛТ использовались источник ионов холловского типа "Радикал-М" [17], источник Кауфмана [18], источник на основе ВЧ индукционно-емкостного разряда [19, 20]. Для ПХТ применялись плазмохимические реакторы на базе ВЧ емкостного разряда (рабочая частота 13,56 МГц) с использованием фтор- и хлорсодержащих газов. Подчеркнем, что эффективное применение даже самых надежных методов контроля плазменно-технологических процессов (ПТП) существенно зависит от технологического совершенства систем плазменной обработки, которое определяется, главным образом, такими параметрами как селективность и однородность травления, воспроизводимость процесса. Поэтому обработка описанных ниже методик контроля проводилась на серийных промышленных установках производства НИИ ТМ (г. Зеленоград, Россия), НИИ ПМ (г. Воронеж, Россия), Xenon (Австрия), Alcatel (Франция) в реальных технологических процессах производства интегральных микросхем.

Возможность зондового контроля ПТП обусловлена тем, что при травлении одного материала и появлении на поверхности обрабатываемой пластины другого изменяются некоторые характерные параметры контактирующей с поверхностью плазмы (плазменный потенциал, плотность и температура электронов), связанные с коэффициентами ион-электронной эмиссии, характером и составом нейтральной компоненты и примесей [21]. Одной из наиболее информативных методик, позволяющих контролировать такие изменения параметров плазмы, является методика измерения ВАХ ленгмюровского зонда. Анализ большого количества экспериментальных дан-

ных показал, что для контроля ПТП пригоден практически любой участок ВАХ (электронный или ионный ток насыщения, плавающий потенциал и т. д.). Выбор рабочего участка следует проводить в зависимости от конкретных условий и типа технологического процесса. В [2] описан целый ряд практически реализованных методик контроля процессов травления на основе чувствительности различных участков ВАХ зонда Ленгмюра к ПТП. Кратко перечислим некоторые из этих методик.

Контроль ионно-лучевого травления.

Одной из простейших является методика контроля ИЛТ по электронному току насыщения одиночного зонда, помещенного в ИПП (типичные значения 0,1—10 мА). Недостатком этой методики является невысокая точность контроля процессов травления покрытий образцов, возмущение плазмы из-за больших потерь частиц на зонд, сильный разогрев зонда. Наибольшей чувствительности метода можно достичь, поместив зонд в пограничный слой объемного заряда вблизи мишени. В то же время применение такого способа сопряжено с дополнительными техническими трудностями: небольшая толщина приповерхностного слоя (<5 мм) ограничивает возможность размещения зонда в слое (особенно в системах с вращающимися подложкодержателями). Кроме того, зонд, расположенный в непосредственной близости к обрабатываемой поверхности, реагирует лишь на локальные (вблизи зонда) изменения материала образца, что позволяет использовать методику только при соблюдении высокой однородности травления по поверхности.

Описанные в [22] экспериментальные и теоретические исследования ИПП показывают, что параметром, наиболее чувствительным к материалу поверхности мишени, является потенциал плазмы. Технически более просто регистрировать временную зависимость плавающего потенциала зонда, которая с достаточной степенью точности повторяет колебания потенциала плазмы (что и используется в методике контроля по плавающему потенциалу одиночного зонда). Зонд под плавающим потенциалом гораздо меньше возмущает плазму и не подвержен разогреву [22]. К тому же в этом случае зонд может располагаться практически в любой точке пространства транспортировки ионного пучка (ИП).

Методики, основанные на применении одиночного зонда, отличаются простотой реализации и не требуют дорогостоящего оборудования. Вместе с тем они достаточно универсальны и обладают хорошей чувствительностью к травлению различных функциональных слоев. К недостаткам однозондовых методик можно отнести сильную чувствительность к неустойчивости пучково-плазменной системы, т. е. работы источника ионов (ИИ), откачки, напуска и т. д. Для применения в системах со значительными флуктуациями тока пучка была разработана модифицированная зондовая методика, основанная на слежении за током ИП с помощью дополнительного электрода

или зонда, располагаемого в пучке. При этом для контроля используется отношение сигналов зонда и опорного электрода. Такой способ позволяет компенсировать нестабильность работы ИИ и тем самым повысить чувствительность и помехоустойчивость однозондовых методик контроля.

Контроль плазмохимического травления в плазме ВЧ-разрядов.

Наибольший объем экспериментальных данных по зондовому контролю ПТП накоплен для систем ПХТ в плазмохимических реакторах на основе ВЧ-разрядов емкостного и индукционно-емкостного типов с использованием в качестве контрольного сигнала плавающего потенциала зонда [23]. Поскольку плазма ВЧ-разряда имеет целый ряд качественных отличий от ИПП, необходимо более подробно описать специфические отличительные черты зондовой диагностики ПХТ в ВЧ-плазме.

Простейшим вариантом данного метода является способ контроля [24], по которому в зону разряда помещают одиночный зонд и располагают его в потоке продуктов реакции активного газа с веществом покрытия образца. В процессе травления измеряют изменение плавающего потенциала зонда, по которому производят контроль процесса травления покрытий. При травлении образца образуются летучие продукты реакции газа с веществом покрытия. Появление новых частиц в разряде приводит к перераспределению потенциала плазмы в области, где их концентрация достаточно велика. Это приводит, в свою очередь, к изменению потенциала зонда, помещенного в зону протока продуктов реакции. При неизменных прочих внешних параметрах разряда, как то: мощность, давление, температура, расход и скорость откачки газа, — изменение потенциала измерительного электрода связано только с процессом травления.

Недостатком описанного выше способа контроля является негативное влияние колебаний потенциала зонда (вызванных нестабильностью параметров режима установки) на точность определения момента травливания слоев. Для устранения этого недостатка был предложен метод двух зондов. Метод основан на измерении разности плавающих потенциалов двух зондов, один из которых расположен вблизи поверхности образца со стороны откачки, так, чтобы он находился в потоке продуктов реакции, а другой — со стороны напуска рабочего газа на таком же расстоянии от потенциального электрода, т. е. в точке с таким же потенциалом плазмы. Поскольку зонды находятся в одинаковых условиях, разностный сигнал практически нечувствителен к колебаниям разрядных параметров, а определяется лишь изменением материала обрабатываемой поверхности.

С целью повышения точности контроля процесса травления за счет исключения фоновых сигналов система измерительных электродов была также выполнена в виде трех зондов, размещенных последовательно один за другим между подложкодержателем и откачным патрубком, а их рабочие концы расположены в плоскости, параллельной поверхности мишени [15].

Испытания одно- и двухзондового датчика контроля по плавающему потенциалу совместно с приборами “Контроль” разных модификаций проводились также в технологических процессах скоростного травления пленок SiO_2 в локализованной плазме в реакторе индивидуальной обработки ВЧ-диодного типа на серийной промышленной установке “Плазма НД-125И”, в процессах ПХТ пленок Al в реакторе для групповой обработки “Плазма-планар”, в процессах скоростного удаления фоторезиста на установке “Плазма НД-125Ф”, в процессах ПХТ слоев Si_3N_4 , поли-Si, SiO_2 , фосфорно-силикатного стекла в ВЧ-диодных реакторах установок фирмы “Xenon” (групповой и индивидуальной обработки), в реакторе индивидуальной обработки ВЧ-диодного типа установки “ПХО-008” и др. Во всех случаях зондовый контроль показал высокую эффективность.

Устройства серии «Контроль» для зондового контроля ПТП

Для реализации перечисленных выше методик контроля ПТП была разработана серия приборов «Контроль», предназначенных для контроля процессов травления тонких пленок, используемых в производстве интегральных микросхем. Эти приборы являются специализированными устройствами, в которых из зондового сигнала извлекается информация лишь об одной технологической операции при производстве серийной продукции. Различные приборы серии отличаются типом ПТП, типом зондовых датчиков, алгоритмом обработки контрольного сигнала. Поскольку приборы «Контроль» обычно используются в составе технологических установок, конструктивно они оформлены в виде компактных встраиваемых модулей. Ниже дано краткое описание двух из них, на примере которых можно получить общее представление о приборах этой серии.

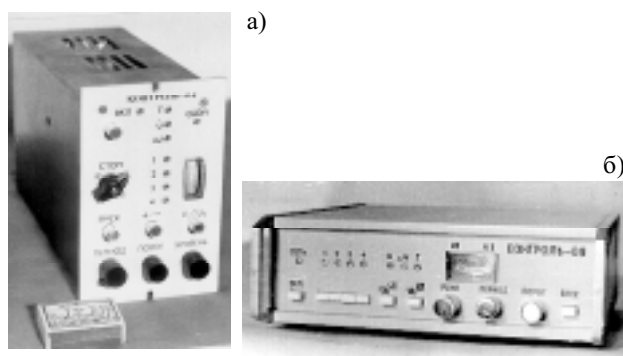


Рис. 5. Общий вид устройств “Контроль-01” (а) и “Контроль-09” (б)

Устройство “Контроль-01” предназначено для фиксации окончания процессов ИЛТ и РИЛТ тонких функциональных металлических, диэлектрических, полупроводниковых слоев, многослойных покрытий, структур со сложной топологией при изготовлении интегральных микросхем. Общий вид прибора показан на рис. 5, а.

Принцип действия устройства основан на измерении отношения токов двух зондов, один из которых расположен в приповерхностном слое у мишени с

образом, а второй контролирует ток пучка. По заданной величине этого отношения фиксируется момент травли слоя. Метод сравнения, заложенный в электрической схеме устройства, позволяет компенсировать линейные флуктуации зондовых сигналов (связанные с нестабильностью тока пучка ионов, давления в вакуумно-реакционной камере, анодного напряжения в ионном источнике) и выделить полезный сигнал, характеризующий именно сам процесс травления.

Устройство работает следующим образом. Сигналы с измерительных зондов подаются на входной блок, который производит согласование уровней зондовых сигналов с электрической схемой прибора. Далее сигнал поступает на блок сравнения, который формирует напряжение, пропорциональное частному входных напряжений. Это позволяет избавиться от синхронных флуктуаций входных сигналов с измерительных электродов. С выхода блока сравнения аналоговый сигнал поступает на контрольный вольтметр, позволяющий судить о величине сигнала. Прибор снабжен также аналоговым выходом (0—10 В) для совместной работы с ЭВМ. С блока сравнения сигнал поступает также на компаратор с регулируемым по конкретному процессу порогом срабатывания. Далее сигнал с компаратора поступает на блок сигнализации окончания процесса травления. Этот блок выдает цифровой сигнал в уровнях ТТЛ, который включает установку по окончании процесса травления.

Устройство универсально по отношению к типу травливаемого материала, имеет небольшие габариты. Применение оригинальной схемы компенсации обеспечило высокую чувствительность и надежность контроля ПТП в самых различных условиях. Относительная простота конструкции в сочетании с большими возможностями обеспечивают высокую эффективность эксплуатации прибора "Контроль-01" в составе обширного класса промышленных плазменно-технологических систем.

Однако применение этого прибора в составе автоматизированных систем управления ограничивается тем, что его аналитическая часть, ответственная за определение "момента выключения", представляет собой простое пороговое устройство, что может приводить к ложным срабатываниям. На основании опыта контроля разнообразных ПТП были разработаны более совершенные принципы обработки контрольного сигнала. Эти принципы были положены в основу устройства "Контроль-09", показанного на рис. 5, б.

Анализ большого количества измерений, проведенных для различных технологических процессов в разных условиях, показывает, что несмотря на определенные количественные отличия, временные зависимости контрольного сигнала обладают рядом характерных повторяющихся признаков, по которым с достаточно высокой точностью можно определить момент травления слоя. Действительно, в зависимости от типа установки и параметров технологического режима контролируемый ток может составлять 1 мкА—100 мА, напряжение — 0,1—500 В, а длительность процесса — 20 с—15 мин. Однако вы-

бором величины усиления входного согласующего блока можно установить некое номинальное значение напряжения на выходе (например 5 В), а период опрашивания входного сигнала выбрать равным, например, 1% от времени процесса (причем здесь достаточно грубой оценки). В этом случае, независимо от абсолютных измерений (в вольтах и секундах) контрольного сигнала, кривым одинаковой формы будут соответствовать одинаковые напряжения на входе логической схемы. Кроме того, все кривые травления (исключая их начальный участок) имеют общее свойство: переходу от слоя к слою соответствует существенное изменение уровня сигнала, причем в период установившегося травления фиксированного слоя сигнал остается примерно постоянным. Поскольку основную информацию о протекании процесса травления несут перепады уровня контрольного сигнала, а не его фоновое абсолютное значение, установившееся после стабилизации разряда, можно вычесть из сигнала его фоновое значение и выделить сигнал, связанный только с перепадами уровня, т. е. с травлением, и установить его номинальный уровень соответствующим выбором усиления.

Введение безразмерных характеристик кривой травления позволяет построить универсальную логическую обработку сигнала с фиксированным алгоритмом, обеспечивающим автоматическую регистрацию момента окончания процесса травления. Приведение кривых травления к единому масштабу по амплитуде и длительности дает возможность ввести в логическую схему фиксированные значения порогового напряжения и длительности для выделения и индикации основных принципиальных признаков травления и избавиться, таким образом, от сложной перестройки этой части прибора при переходе, например, к другому технологическому процессу с другими абсолютными измерениями кривой зондового сигнала.

Рассмотрим типичную кривую травления (I) на рис. 6. Точке $t=0$ соответствует момент включения

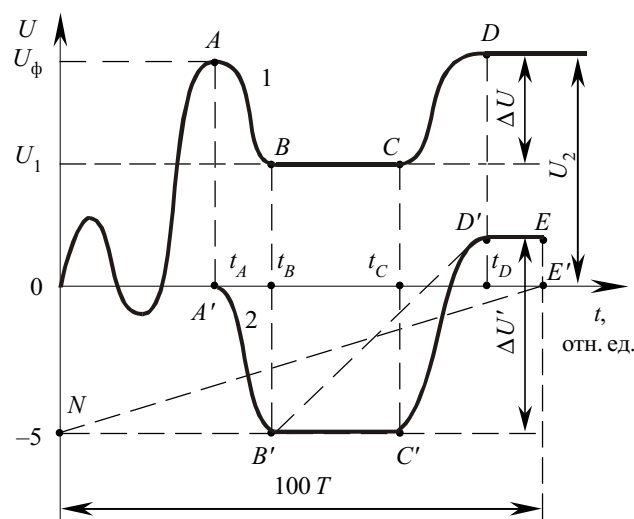


Рис. 6. Типичная кривая травления:
1 — временная зависимость входного сигнала; 2 — безразмерная
скомпенсированная кривая травления

разряда; участок t_{0A} — время стабилизации разряда после включения и установления фонового значения U_{Φ} ; t_{AB} — начало травления; t_{BC} — время установившегося травления; U_1 — уровень сигнала, соответствующий установившемуся травлению; участок CD — "дотрав", т. е. исчезновение с поверхности образца остатков данного слоя и обнажение поверхности следующего; U_2 — величина сигнала, соответствующая следующему (или промежуточному) слою покрытия. Ход временной зависимости входного сигнала на участке t_{0A} после включения разряда в источнике может быть совершенно произвольным для различных технологических процессов и не несет полезной информации о протекании процесса травления. Полное время травления t_{BD} зависит от режима обработки и толщины слоя; величина перепада $U_2 - U_1 = \Delta U$ зависит от площади обрабатываемой поверхности и падает с ее уменьшением; величина t_{CD} связана с неравномерностью травления по поверхности образца и увеличивается с ростом неравномерности. Для пластин из одной партии при неизменных условиях обработки величины t_{BC} , t_{CD} , ΔU , а также форма кривой на участках BC и CD могут незначительно отличаться, что является отражением «индивидуальности», т. е. неодинаковости образцов. Таким образом, времена t_{BC} , t_{CD} , величину и наклон перепада ΔU можно считать объективными характеристиками процесса травления конкретного образца.

Теперь рассмотрим скомпенсированную и приведенную к единому масштабу кривую травления 2 на рис. 6. Основным признаком участка $C'D'$ кривой, соответствующего окончанию процесса травления, является наличие отличного от нуля наклона, т. е. производной по времени от сигнала на ΔU за время t_{CD} . При каждом опросе входной цепи с периодом T величина напряжения на входе возрастает на $\Delta U/K$ вольт, где $K = t_{CD}/T$ — безразмерное время участка CD . Следовательно, величина $\Delta U/K$ представляет собой среднее значение производной приведенной к единому масштабу кривой травления на участке CD .

Для индикации отличной от нуля производной в устройстве выбран пороговый уровень величиной 50 мВ, что обеспечивается даже в случае кривой, соответствующей 100%-ной неравномерности травления по поверхности (кривая $A'B'D'$). Это видно из сравнения наклонов отрезков $B'D'$ и NE' , т. е., действительно, $\Delta U \cdot T / t_B > 5 \text{ В} / 100 = 50 \text{ мВ}$. Дальнейшее увеличение чувствительности устройства к величине производной не имеет смысла, поскольку случаю 100%-ной неравномерности травления по технологическим причинам уже соответствует брак.

Наличие отличной от нуля производной (т. е. $> 50 \text{ мВ}$) не является достаточным признаком участка CD кривой, поскольку оно может иметь место и при флуктуациях контрольного сигнала. Это требует введения еще двух дополнительных характерных признаков — наличия перепада уровня сигнала величиной ΔU вольт и следующего за ним участка с нулевой производной DE .

Этот набор признаков кривой травления был заложен в электронную схему прибора "Контроль-09".

Кроме того, учитывая, что начальные участки кривых не обладают набором характерных, повторяющихся признаков и могут привести к преждевременному срабатыванию логической схемы уже при включении разряда, необходимо (для предотвращения сбоев) исключить их попадание в логическую часть прибора и обработку. С этой целью в приборе предусмотрена регулируемая задержка включения логической части на этот переходный промежуток времени.

Таким образом, описанные устройства позволяют производить надежную регистрацию момента окончания процессов травления различных функциональных многослойных покрытий, рельефных структур при ИЛТ, РИЛТ и ПХТ и могут быть легко интегрированы в цепочку технологических операций с возможностью их полной автоматизации. Работоспособность приборов была испытана в различных ПТП на многих промышленных установках на предприятиях, упомянутых во вводной части статьи. Отмечена высокая точность контроля по толщине травливаемого слоя (не хуже 5%), хорошее разрешение по площади травливаемой поверхности (менее 1%), практически отсутствие запаздывания сигнала об окончании процесса по времени.

Изложенные результаты экспериментальных и теоретических исследований, а также материалы патентов и конструкторских разработок позволяют сделать вывод, что зондовые методы контроля являющиеся одним из наиболее эффективных диагностических средств и не уступают традиционным методам по универсальности, чувствительности, помехозащищенности, простоте, надежности, достоверности контроля, а во многих случаях превосходят их. Кроме того, применение этих методов не требует дорогостоящего оборудования, что делает их конкурентоспособными на рынке диагностических средств ПТП и весьма перспективными для применения в промышленности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Плазменные технологии в производстве СБИС / Под ред. Н. Айнспрука и Д. Брауна. — М.: Мир, 1987.
2. Фареник В. И., Дудин С. В., Зыков А. В. и др. Специфика диагностики параметров плазмы электрическими зондами в процессах ионно-лучевого и плазмохимического травления // В сб.: Ионно-лучевая обработка материалов в микро- и нанoeлектронике. — М.: Наука, 1999. — С. 86—116.
3. Чан П., Тэлбот Л., Турян К. Электрические зонды в неподвижной и движущейся плазме. — М.: Мир, 1978.
4. Алексеев Б. В., Котельников В. А. Зондовый метод диагностики плазмы. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. — М.: Атомиздат, 1989.
6. Чен. Ф. Электрические зонды // В кн.: Диагностика плазмы. — М.: Мир, 1967.
7. Дудин С. В. Исследование ионно-пучковой плазмы, создаваемой широким потоком ионов низкой энергии / Дисс. канд. физ.-мат. наук. — Харьков, ФТФ ХГУ. — 1994.
8. Дудин С. В., Зыков А. В., Фареник В. И. Экспериментальное исследование ионно-пучковой плазмы / Препринт НФТЦ. — Харьков, 1993.

9. Дудин С. В., Зыков А. В., Фареник В. И. Особенности зондовых измерений в ионно-пучковой плазме / Тез. докл. II межотрасл. науч.-техн. семинара «Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике». — Харьков, 1991. — С. 32—33.

10. Dudin S. V. Probe measurements in ion-beam plasma / 21st IEEE International Conference on Plasma Science. Conference Record-Abstracts. — 1994. — Santa Fe, USA. — P. 179—180.

11. Годяк В. А., Попов О. А. О зондовой диагностике ВЧ-плазмы // ЖТФ. — 1977. — Т. 47, № 4. — С. 768.

12. Cantin A., Gagne R. The behavior and correct use of electrostatic probes in rf plasmas // Third International Conf. on Gas Discharges. — London, 1974. — P. 625.

13. Cantin A., Gagne R. Investigation of an rf plasma with symmetrical and asymmetrical electrostatic probes // J. Appl. Phys. — 1972. — Vol. 43, N 6. — P. 2639.

14. Будянский А. М., Серeda Н. Д., Фареник В. И. Особенности зондового контроля ПХТ в диодном ВЧ разряде / Тез. докл. межотрасл. науч.-техн. семинара «Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике». — М.: ЦНИИТИ, 1989. — С. 226—227.

15. А. с. 1428167 СССР. Способ контроля ПХТ покрытий // А. М. Будянский, А. П. Дудин, Н. Б. Марущенко и др. — Оpubл. в Б. И., 1988. — № 9.

16. Дудин С. В., Фареник В. И., Шевченко А. В. Моделирование ленгмюровского зонда при произвольных давлениях нейтрального газа // Вестник Харьковского государственного университета. — 1998. — № 421. — С. 137.

17. Маишев Ю. П. Ионные и ионно-плазменные системы и пути их развития для задач микроэлектроники // Микроэлектроника. — 1977. — Т. 3, № 2. — С. 21—39.

18. Kaufman H. R. Technology of ion-beam sources in sputtering // J. Vac. Sci. Technol. — 1979. — Vol. 15, N 2. — P. 272—276.

19. Маишев Ю. П., Фареник В. И., Будянский А. М. и др. Исследование высокочастотного индукционного разряда низкого давления для создания широкоапертурных источников ионов с высокой однородностью тока пучка // В сб.: Ионно-лучевая обработка материалов в микро- и нанoeлектронике. — М.: Наука, 1999. — С. 33—59.

20. А. с. 1144548 СССР. Источник ионов // В. И. Фареник, А. В. Зыков, Н. Н. Юнаков, Ю. А. Качанов. — Оpubл. в Б. И., 1984. — № 17.

21. Зыков А. В., Марущенко Н. Б., Лукинов В. А. Особенности контроля поверхности при обработке ее компенсированным ионным пучком средних энергий / Всесоюз. совещ.-семинар молодых ученых «Диагностика поверхности ионными пучками». Тез. докладов. — Ужгород, 1985. — С. 106—107.

22. Маишев Ю. П., Фареник В. И., Калмыков Я. М. и др. Особенности зарядовой и токовой нейтрализации низкоэнергетичных пучков ионов в системах ионно-лучевого травления и нанесения покрытий // В сб.: Ионно-лучевая обработка материалов в микро- и нанoeлектронике. — М.: Наука, 1999. — С. 60—85.

23. Будянский А. М., Серeda Н. Д., Фареник В. И. Зондовый контроль ПХТ в ВЧ разряде / Тез. докл. межотрасл. науч.-техн. семинара «Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике». — М.: ЦНИИТИ, 1989. — С. 224—225.

24. А. с. 1204087 СССР. Способ контроля процессов плазмохимического травления покрытий подложек // Н. Ю. Кропотов, Ю. П. Крячко, В. Д. Егоренков и др. — Оpubл. в Б. И., 1986. — № 1.



«РЫНОК ТЕХНОЛОГИЙ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ» —

под таким девизом в Украинском институте
научно-технической и экономической информации

3—4 декабря 2002 г.

состоится

Международная научно-практическая конференция
и, одновременно,
выставка высоких технологий «УКРТЕХНОЛОГИЯ-2002»

Организаторами конференции и выставки выступают: Министерство образования и науки Украины, Министерство экономики и по вопросам европейской интеграции, Министерство промышленной политики, Государственный комитет связи и информатизации, Академия технологических наук, Украинский институт научно-технической и экономической информации.

Оргкомитет приглашает научных работников, производителей и предпринимателей, конструкторов и технологов принять участие в работе конференции и выставки.

Если Вы хотите ознакомиться с особенностями современного развития рынка технологий и путями продвижения технологий на внутренний и внешний рынки, или можете предложить конкурентоспособные технологии, то участие в работе конференции и выставки будет для Вас полезным и плодотворным.

Заявки на участие направлять по адресу: 03039, г. Киев, ул. Горького, 180, УкрИНТЭИ.

Телефоны для справок: (044) 268-25-22, 268-31-10, 268-25-57, факс (044) 268-25-41,

<http://www.uintei.kiev.ua> // E-mail: uintei@uintei.kiev.ua

К. т. н. В. Г. ВЕРБИЦКИЙ, Г. П. ЛИПОВЕЦКИЙ,
Л. В. ПРОЦЕНКО, П. В. СИВОБОРОД

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов

Дата поступления в редакцию
31.01 2002 г.

Оппоненты к. т. н. В. И. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ
(НИИ микроприборов, г. Киев),
к. т. н. Н. Б. КОПЫТЧУК (ОНПУ, г. Одесса)

ОДНОКРИСТАЛЬНАЯ МИКРО-ЭВМ ДЛЯ СИСТЕМ С ВЫСОКОРАЗВИТЫМИ ЛОКАЛЬНЫМИ СЕТЯМИ

Встроенный в микросхему контроллер последовательного канала реализует протокол HDLC/SDLC управления звеном последовательной передачи данных.

В продолжение публикации [1] представляем однокристалльную микро-ЭВМ (ОМЭВМ), интегрированную с контроллером последовательного канала, реализующего протокол HDLC/SDLC управления звеном последовательной передачи данных. Разработанная микросхема УМ5704BE44 дополняет семейство ОМЭВМ МК-51 [2, с. 107] (аналог семейства MCS-51 фирмы Intel, США) и предназначена для построения микроконтроллерных систем, объединенных высокоразвитыми недорогими сетями.

Микросхема объединяет на одном кристалле микро-ЭВМ KP1830BE51 с “интеллектуальным” контроллером последовательного канала (КПК). Блок-схема представлена на **рис. 1**. В состав микросхемы входят ПЗУ, ОЗУ, центральный процессор (ЦП) и периферийные устройства. Архитектура и набор команд микросхемы идентичны архитектуре и набору команд микро-ЭВМ KP1830BE51, а последовательный интерфейс, применяемый в KP1830BE51, заменен “интеллектуальным” контроллером последовательного канала, реализующим процедуру управления звеном передачи данных в соответствии с протоколом HDLC/SDLC, разработанным Международной организацией по стандартизации (ISO). Данная процедура соот-

ветствует ГОСТ 25873—83 и подробно описана для аналогичной по функциональному назначению микросхемы 8044 фирмы Intel в [3]. Структурная схема

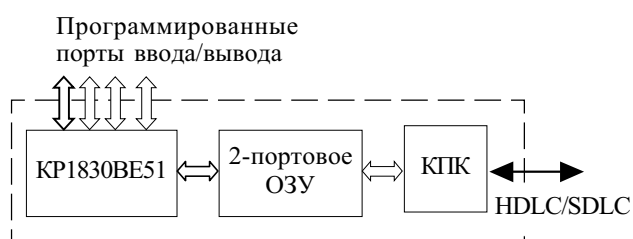


Рис. 1. Блок-схема ОМЭВМ

представлена на **рис. 2**. ОЗУ микросхемы, по сравнению с KP1830BE51, увеличено на 64 байта. КПК может работать со скоростью до 2,4 Мбит/с. КПК работает параллельно с микро-ЭВМ, поэтому ни в одном узле нет потерь пропускной способности. Поскольку КПК обладает собственным “интеллектом”, ЦП разгружен от большого числа задач по организации связи и, следовательно, может выделить большую часть своей вычислительной мощности для управления локальными периферийными устройствами или некоторым внешним процессом.

Общение между ЦП и КПК, работающим с шиной BITBUS, осуществляется через общую для обоих внутреннюю память данных посредством аппаратных и программных прерываний. Такая архитектура макси-

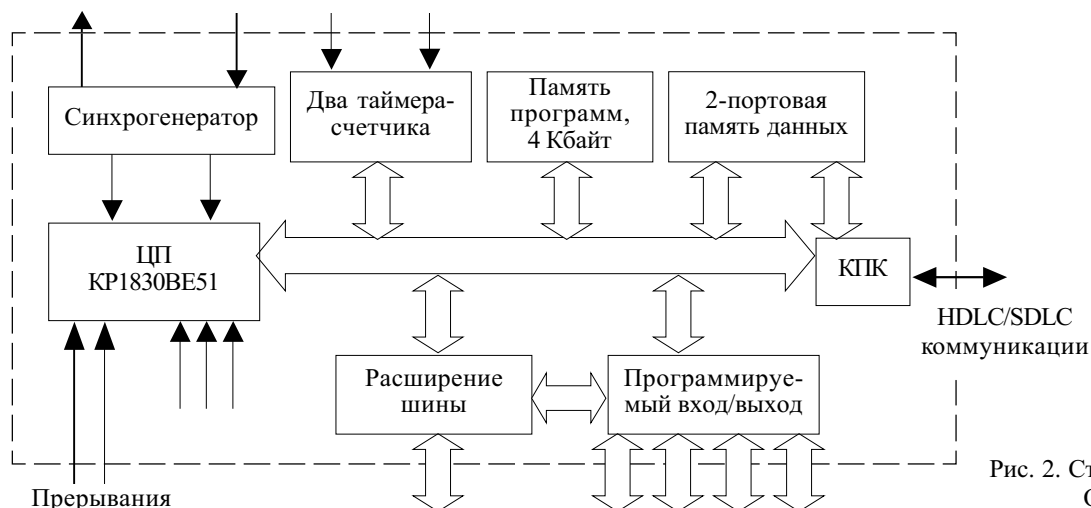


Рис. 2. Структурная схема ОМЭВМ

мально разгружает ЦП для решения задач сбора информации, контроля и управления объектами, в то время как КПК поддерживает связь, осуществляет обмен сообщениями с физически удаленными объектами.

ОМЭВМ имеет следующие *основные характеристики*:

Объем внутренней программной памяти команд (внутреннее ПЗУ) — 4 Кбайт.

Объем внутренней программной памяти данных (внутреннее ОЗУ) — 192 Кбайт.

Объем адресуемой внешней памяти программ (внешнее ПЗУ) — 64 Кбайт.

Объем адресуемой внешней памяти данных (внешнее ОЗУ) — 64 Кбайт.

Шина данных — 8 бит.

Двухуровневая структура прерываний от 5 источников.

Два 16-разрядных таймера/счетчика событий.

32 канала ввода/вывода.

Процессор булевой алгебры.

Операции с битами, ниблами (4 бита), байтами.

Частота тактового генератора

3,5 – 12,0 МГц.

Скорость передачи данных:

— до 2,4 Мбайт/с при внешней тактировке;

— 375 Кбайт/с при тактировке от внутреннего таймера.

Конфигурация в сети:

— полудуплексная радиальная;

— кольцевая.

Синхронизация в шине BITBUS:

— аппаратная реализация NRZI;

— встроенный ФАПЧ (цифровая фазовая автоподстройка частоты).

Аппаратная реализация CRC-кода, обеспечивающего контроль четности информации в кадре (блоке передаваемых данных).

Ток потребления – не более 18 мА (при $f=12$ МГц).

Ток потребления в режиме хранения содержимого ОЗУ — не более 50 мкА.

Контроллер последовательного канала используется для связи по протоколу HDLC/SDLC. Он управляет введением/удалением флага открытия/закрытия кадра данных, автоматическим распознаванием адреса и проверкой при помощи 16-разрядного избыточного кода. Кроме того, КПК аппаратно реализует подмножество протокола SDLC таким образом, что формирует ответы на многие блоки SDLC без участия центрального процессора. В некоторых практических случаях это является более предпочтительным, чем

организация управления ЦП приемом или передачей каждого отдельного кадра данных. Для этого КПК может работать в двух режимах:

— AUTO (автоматическом);

— FLEXIBLE или NONAUTO (гибком или неавтоматическом).

В режиме AUTO КПК формирует ответы на кадры данных SDLC без участия ЦП, а в режиме FLEXIBLE прием и передача каждого кадра данных осуществляется под управлением ЦП.

Для работы последовательного интерфейса используются три управляющих регистра и восемь регистров параметров (рис. 3). Управляющие регистры устанавливают режимы работы и обеспечивают информацию о состоянии. Восемь регистров параметров обеспечивают накопление адресов узлов передачи данных (ПД), прием и передачу полей управления и выполняют функции указателей буфера приема и передачи. Регистры и назначение их бит описаны далее.

Наименование регистров	Символьный адрес	Битовый адрес	Байтовый адрес
Регистр В	B	247 240	240 (F0H)
Аккумулятор	ACC	231 224	224 (E0H)
Три байта FIF	FIF		223 (DFH)
	FIF		222 (DEH)
	FIF		221 (DDH)
Начало буфера передачи	TBS		220 (DCH)
Длина буфера передачи	TBL		219 (DBH)
Байт управления передачей	TCB		218 (DAH)
Счетчик состояния КПК	SIUST		217 (D9H)
Счет посылки/приема	NSNR	223 216	216 (D8H)
Слово состояния программы	PSW	215 208	208 (D0H)
Счет ПДП	DMA CNT		207 (CFH)
Адрес станции	STAD		206 (CEH)
Длина принимаемого поля	RFL		205 (CDH)
Длина принимаемого буфера	RBS		204 (CCH)
Начало принимаемого буфера	RBL		203 (CBH)
Байт управления приемом	RCB		202 (CAH)
Последовательный режим	SMD		201 (C9H)
Регистр состояния	STS	207 200	200 (C8H)
Управление приоритетом прерывания	IP	191 184	184 (B8H)
Порт 3	P3	183 176	176 (B0H)
Управление разрешением прерывания	IE	175 168	168 (A8H)
Порт 2	P2	167 160	160 (A0H)
Порт 1	P1	151 144	144 (90H)
Старшие разряды таймера 1	TH1		141 (8DH)
Старшие разряды таймера 0	TH0		140 (8CH)
Младшие разряды таймера 1	TL1		139 (8BH)
Младшие разряды таймера 0	TL0		138 (8AH)
Режим таймера	TMOD		137 (89H)
Управление таймером	TCON	143 136	136 (88H)
Управление режимом микропотребления	PCON		135 (87H)
Старший разряд указателя данных	DPH		131 (83H)
Младший разряд указателя данных	DPL		130 (82H)
Указатель стека	SP		129 (81H)
Порт 0	P0	135 128	128 (80H)

Рис. 3. Регистры ОЗУ специальных функций

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Регистр последовательного режима SMD
(с поразрядной адресацией)

Биты	7	6	5	4	3	2	1	0
Обозначение	SCM2	SCM1	SCM0	NRZI	LOOP	PFC	NB	NFCS

Регистр последовательного режима (адрес C9H) выбирает режим функционирования КПК. Центральный процессор УМ5704BE44 может считать информацию из SMD, но не может записать в него информацию. Для того чтобы предотвратить конфликт между КПК и ЦП при доступе к SMD, ЦП может осуществлять запись в SMD только при условии, что в регистре состояния/команды (см. ниже) флаг запроса на передачу RTS и флаг RBE – оба равны нулю. В нормальном состоянии доступ к SMD возможен только при инициализации.

Отдельные биты регистра последовательного режима определяются следующим образом:

Биты	Имя	Описание
SMD.0	NFCS	В кадре SDLC нет поля FCS
SMD.1	NB	Безбуферный режим, в кадре SDLC нет поля управления
SMD.2	PFS	Режим синхронизации с предварительным кадром. В этом режиме микроконтроллер передает два байта перед флагом открытия кадра для синхронизации DPLL. Если разрешается модуляция типа NRZI, то передается 00H; в противном случае передается 55H. В любом случае гарантируется 16 переходов перед началом кадра данных
SMD.3	LOOP	Кольцевая конфигурация
SMD.4	NRZI	Модуляция по типу NRZI
SMD.5	SCM0	Выбранный режим синхронизации – бит 0
SMD.6	SCM1	Выбранный режим синхронизации – бит 1
SMD.7	SCM2	Выбранный режим синхронизации – бит 2

Биты расшифровываются следующим образом:

S C M 2 1 0	Режим синхронизации	Скорость передачи данных *
0 0 0	Внешняя синхронизация	0—2,4 Мбит/с **
0 0 1	Не определен	
0 1 0	Самосинхронизация, переполнением таймера	244—62,5 Кбит/с
0 1 1	Не определен	
1 0 0	Самосинхронизация, внешняя 16×	0—375 Кбит/с
1 0 1	Самосинхронизация, внешняя 32×	0—187 Кбит/с
1 1 0	Самосинхронизация, внутренняя фиксированная	375 Кбит/с
1 1 1	Самосинхронизация, внутренняя фиксированная	187,5 Кбит/с

* Базируется на частоте кристалла 12 МГц.

** В кольцевой конфигурации – 0–1 Мбит/с.

Регистр состояния/команды STS
(с поразрядной адресацией)

Биты	7	6	5	4	3	2	1	0
Назначение	TBF	RBE	RTS	SI	BOU	OPB	AM	RBP

Регистр состояния/команды (адрес CBH) обеспечивает управление КПК со стороны ЦП УМ5704BE44 и позволяет КПК регистрировать информацию о со-

стоянии для доступа ЦП. КПК может считывать информацию из STS и изменять некоторые биты, как показано ниже. ЦП может как считать информацию из STS, так и асинхронно записать информацию в STS. Однако 2-цикловые команды, осуществляющие доступ к STS в течение обоих циклов (JBC/B,REL и MOV/B,C), не должны использоваться, т. к. КПК может записать информацию в STS между двумя доступами со стороны ЦП.

Отдельно биты регистра состояния/команды определяются следующим образом:

Биты	Имя	Описание
STS.0	RBP	Защита буфера приема. Запрещает запись данных в буфер приема. В режиме AUTO RBP вызывает отклик RNR вместо RR
STS.1	AM	Режим AUTO/адресный режим. Выбирает режим AUTO, когда режим AUTO разрешен. Если NB=1 бит, AM выбирает адресный режим. AM может очищаться КПК
STS.2	OPB	Бит произвольного опроса. Определяет, будет ли КПК генерировать отклик AUTO на произвольный опрос (UP с P=0). OPB может устанавливаться или очищаться КПК
STS.3	BOU	Переполнение буфера приема. КПК может устанавливать или очищать BOU
STS.4	SI	Прерывание КПК. Это один из пяти источников прерывания ЦП. Вектор=23H. SI может устанавливаться КПК. Он должен очищаться ЦП перед выходом из программы прерывания
STS.5	RTS	Запрос на передачу. Свидетельствует о том, что микроконтроллер готов к передаче или находится в состоянии передачи. RTS может считываться или записываться ЦП, RTS может быть прочитан КПК, а в режиме AUTO может быть записан КПК
STS.6	RBE	Буфер приема пустой. RBE может восприниматься как разрешение на прием. RBE устанавливается в «1» ЦП, когда он готов к приему кадра данных (или хотя бы считал буфер), или сбрасывается в «0» КПК, если кадр данных уже принят
STS.7	TBF	Буфер передачи заполнен. Записывается ЦП, чтобы сигнализировать, что ЦП заполнил буфер передачи. TBF может очищаться КПК

Регистр счета передачи/приема NSNR
(с поразрядной адресацией)

Биты	7	6	5	4	3	2	1	0
Обозначение	NS2	NS1	NS0	SES	NR2	NR1	NR0	SER

Регистр счета передачи/приема (адрес D8H) содержит длину передаваемой или принимаемой последовательности плюс индикацию подсчета ошибок. КПК может считать информацию из NSNR и записать информацию в NSNR. ЦП может читать и записывать NSNR асинхронно. Однако 2-цикловые команды доступа к NSNR в течение обоих циклов (JBC/

B,REL и MOV/B,C) не должны использоваться, т. к. КПК может записать информацию в NSNR между двумя выборками ЦП микросхемы.

Отдельные биты регистра счета передачи/приема определяются следующим образом:

Биты	Имя	Описание
NSNR.0	SER	Ошибка принимаемой последовательности $NS(P) \neq NR(S)$
NSNR.1	NR0	Счетчик принимаемой последовательности – бит 0
NSNR.2	NR1	Счетчик принимаемой последовательности – бит 1
NSNR.3	NR2	Счетчик принимаемой последовательности – бит 2
NSNR.4	SES	Ошибка передаваемой последовательности $NP(P) \neq N(S), NP(P) \neq N(S) \neq 1$
NSNR.5	NS0	Счетчик передаваемой последовательности – бит 0
NSNR.6	NS1	Счетчик передаваемой последовательности – бит 1
NSNR.7	NS2	Счетчик передаваемой последовательности – бит 2

Как указывалось выше, в работе КПК совместно с ним используются восемь регистров параметров. Информация может заноситься во все восемь регистров и считываться из них ЦП.

В число этих восьми регистров входят следующие:

Регистр адреса узла ПД STAD
(с побайтной адресацией)

Регистр адреса узла ПД (адрес SEN) содержит адрес узла ПД. Для того чтобы избежать конфликтов при доступе, ЦП должен обращаться к STAD только в том случае, когда КПК находится в состоянии ожидания (RST=0 и RBE=0). В нормальном режиме к STAD доступ осуществляется только при инициализации.

Регистр адреса начала буфера передачи TBS
(с побайтной адресацией)

Регистр адреса начала буфера передачи (адрес DCH) указывает на положение во внутреннем ОЗУ микросхемы начала I-поля кадра, предназначенного для передачи. ЦП должен осуществлять доступ к TBS только тогда, когда КПК не осуществляет передачу кадра (TBF=0).

Регистр длины буфера передачи TBL
(с побайтной адресацией)

Регистр длины буфера передачи (адрес DBH) содержит длину (в байтах) I-поля кадра данных, предназначенных для передачи. Пустое I-поле (TBL=0) действительно. ЦП должен осуществлять доступ к TBL только когда КПК не осуществляет передачу кадра (TBF=0).

Регистр байта управления передачи TCB
(с побайтной адресацией)

Регистр байта управления передачи (адрес DAN) содержит байт, который должен быть помещен в поле управления передаваемого кадра данных. ЦП может обращаться к TCB только тогда, когда TCB не производит передачу кадра данных (когда TBF=0). Счетчики Ns и Nz в режиме NON-AUTO не используются.

Регистр адреса начала буфера приема RBS
(с побайтной адресацией)

Регистр адреса начала буфера приема (адрес CCH) указывает на положение во внутреннем ОЗУ микросхемы начала I-поля кадра данных, который принимается и запоминается. ЦП может заносить информацию в RBS только когда КПК не осуществляет прием кадра данных (когда RBE=0).

Регистр длины буфера приема RBL
(с побайтной адресацией)

Регистр длины буфера приема (адрес CBH) содержит длину (в байтах) памяти во внутреннем ОЗУ микросхемы, предназначенной для принимаемого I-поля. RBL=0 является действительным. ЦП заносит информацию в RBL только при RBE=0.

Регистр длины поля приема RFL
(с побайтной адресацией)

Регистр длины поля приема (адрес CDH) содержит длину (в байтах) принимаемого I-поля, которое необходимо запомнить во внутреннем ОЗУ микросхемы. RFL загружается при помощи КПК. RFL=0 является действительным. ЦП осуществляет доступ к RFL только когда RBE=0.

Регистр байта управления приема RCB
(с побайтной адресацией)

Регистр байта управления приема (адрес CAH) содержит поле управления принимаемого кадра данных. RCB загружается КПК. ЦП может только считывать информацию из RCB и его доступ к RCB осуществляется только при RBE=0.

В режиме AUTO КПК аппаратно реализует подмножество протокола SDLC таким образом, что он формирует ответ на многие кадры данных по протоколу SDLC без участия ЦП. Все ответы первичного узла ПД в режиме AUTO соответствуют определениям фирмы IBM протокола SDLC. Преимуществом режима AUTO является то, что для реализации вторичных узлов ПД требуется меньше программного обеспечения, а аппаратно ответ на опрос генерируется значительно быстрее, чем программно. Однако режим AUTO не может быть использован в первичном узле ПД.

Для того чтобы осуществить передачу в режиме AUTO, ЦП должен загрузить буфер передачи информации, регистр адреса начала буфера передачи, регистр длины буфера передачи и установить флаг “буфер передачи полон”. КПК автоматически отвечает на опрос передачей информационного кадра данных с битом P/F в поле управления. Когда КПК принимает подтверждение от первичного узла ПД, он автоматически инкрементирует поле N3 в регистре NSNR и прерывает ЦП. При отсутствии подтверждения КПК будет повторно передавать тот же кадр данных.

Для реализации приема информации в режиме AUTO ЦП загружает регистр начала буфера приема, регистр длины буфера приема, сбрасывает флаг защиты буфера приема и устанавливает флаг “буфер приема пуст”. Если в этой ситуации производится опрос и флаг TBF показывает, что буфер передачи пуст, то будет генерироваться автоматический ответ готовности к приему (RR). Если принимается правильный информационный кадр данных, КПК автоматически инкрементирует Nz в регистре NSNR и прерывает ЦП.

Находясь в режиме AUTO, КПК может распознавать и формировать ответы без участия ЦП на следующие команды:

- I — информация;
- RR — готовность к приему;

- RNR — нет готовности к приему;
- REJ — удаление;
- UP — непрономерованный опрос.

Без участия ЦП КПК может формировать следующие ответы:

- I — информация;
- RR — готовность к приему;
- RNR — нет готовности к приему.

Если флаг “буфер приема пуст” (RBE) указывает на то, что буфер приема пуст, то прием разрешен, а если RBE указывает на то, что буфер приема полон, то прием запрещен. Предполагая, что буфер приема пуст, КПК будет отвечать на опрос передачей I-кадра в том случае, если буфер передачи полон. Если же буфер передачи пуст, то КПК будет отвечать на опрос командой RR, если флаг защиты буфера приема (RBP) сброшен, либо командой RNR, если RBP установлен.

В режиме FLEXIBLE все связи устанавливаются под управлением ЦП. Задачей ЦП является кодирование и декодирование управляющих полей, управление подтверждениями и следование требованиям протоколов HDLC/SDLC. В этом режиме КПК может использоваться как первичный, так и как вторичный узел ПД.

Для того чтобы осуществить прием кадра данных в режиме FLEXIBLE, ЦП должен загрузить регистр адреса начала буфера приема, регистр длины буфера приема, сбросить флаг защиты буфера приема и установить флаг “буфер приема пуст”. Если принимается правильный флаг открытия кадра, а поле адреса соответствует байту в регистре адреса узла ПД или содержит адрес сообщения всем узлам ПД, микроконтроллер загружает поле управления в регистр принимаемого байта управления и загружает I-поле в буфер приема. Если при проверке посредством циклического избыточного кода (CRC) не обнаружено ошибок, то КПК прерывает ЦП, указывая кадр, который только что был принят. Если же CRC-проверка обнаружила ошибки, прерывание не происходит. Регистр длины буфера приема содержит число байт, которые были приняты в поле информации.

Для передачи кадра данных ЦП должен загрузить буфер передачи информации, регистр адреса начала буфера передачи, регистр длины буфера передачи, передаваемый байт управления и установить биты TBF и RFS. КПК, не опрашиваемый по протоколу HDLC/SDLC, будет передавать полный информационный кадр данных и вызовет прерывание ЦП по завершении передачи. Для управляющих кадров или непрономерованных кадров длина буфера передачи будет равна нулю.

При инициализации все разряды регистра FCS будут установлены в “1” до вычисления поля FCS. При нахождении CRC ошибки КПК не будет осуществлять прерывание ЦП (как в режиме AUTO, так и в режиме FLEXIBLE). Флаг ошибки CRC сбрасывается после приема открывающего флага.

Для реализации расширенного поля управления или расширенного поля адреса, использующего HDLC протокол, следует применять режим FLEXIBLE. Для реализации расширенного поля управления КПК про-

граммируется на работу в безбуферном режиме. Расширенное поле управления будет занимать первый и второй байты в буфере приема и в буфере передачи. Для реализации расширенного поля адреса КПК программируется на работу в безадресном режиме. В этом режиме ЦП должен реализовать распознавание адресов принимаемых кадров данных. Поле адреса занимает начальные байты, за которыми следует поле управления.

КПК может передавать и принимать только кадры данных длиной, кратной 8 разрядам.

КПК может быть использован в кольцевых сетях, организованных по протоколу SDLC, в качестве вторичного или первичного узла ПД. При работе в кольцевом режиме КПК принимает данные и передает данные с задержкой на интервал, равный длительности одного бита. Он также распознает сигнал запуска и преобразовывает его во флаг при готовности к передаче. В качестве вторичного узла ПД КПК может использоваться и в режиме AUTO, и в режиме FLEXIBLE. При использовании КПК в качестве первичного узла ПД применяется режим FLEXIBLE, однако для генерации сигнала запуска требуются дополнительные технические средства. При работе в кольцевом режиме максимальная скорость передачи данных при внешней синхронизации равна 1 Мбит/с, а при самосинхронизации — 375 Кбит/с.

КПК может использоваться в нескольких конфигурациях SDLC в качестве вторичного и первичного узла ПД. В некольцевом режиме возможно использование выводов интерфейса модема, RTS и CTS.

Последовательный порт UM5704BE44 может работать в системах с самосинхронизацией. Системы с самосинхронизацией используют встроенную в микросхему цифровую фазовую систему автоподстройки частоты (DPLL) для получения синхронизации из данных и синхронизации этих данных в последовательном сдвиговом регистре приема. В этом режиме синхропоследовательность, согласованная с данными, подается извне в микросхему. Эта синхропоследовательность может генерироваться внешней фазовой системой автоподстройки частоты или подаваться вместе с данными. Микросхема UM5704BE44 может передавать и принимать данные в этом режиме со скоростью до 2,4 Мбит/с.

Режим самосинхронизации позволяет передавать данные без общей синхронизации данных системы. Встроенная DPLL позволяет получать синхронизацию данных, которая закодирована в потоке данных. DPLL будет сходиться, в худшем случае, к номинальному биту центра в пределах восьми битовых переходов. DPLL требует опорную синхронизацию, в 16 или в 32 раза превышающую по частоте скорость передачи данных. Эта опорная синхропоследовательность может либо подаваться извне, либо генерироваться внутри микроконтроллера. При внутренней генерации в качестве опорной синхропоследовательности может использоваться либо внутренняя логическая синхропоследовательность микроконтроллера (частота кристалла, деленная на два), либо сигнал переполнения таймера 1. При использовании внутренней синхронизации таймером 1 скорость передачи данных

может изменяться от 244 до 62,5 Кбит/с. При использовании внутренней логической синхропоследовательности с частотой, в 16 раз превышающей частоту выборки, данные принимаются со скоростью 187,5 или 375 Кбит/с. При внешнем задании опорной синхропоследовательности для DPLL скорость передачи данных может изменяться от 0 до 375 Кбит/с при частоте выборки, превышающей скорость передачи данных в 16 раз.

Для того чтобы попасть в захват DPLL, в КПК применено кодирование/декодирование данных по методу NRZI (без возврата к нулю, инвертированный). Кроме того, КПК имеет предварительный кадр синхронизации до передачи кадра данных, который передает 2 байта чередующихся "1" и "0", чтобы

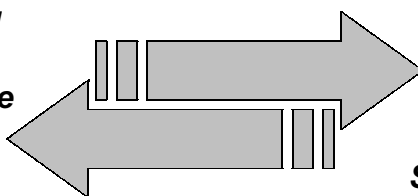
убедиться, что DPLL принимающего устройства будет синхронизирована с данными ко времени приема флага открытия кадра данных.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Вербицкий В. Г., Липовецкий Г. П., Сивобород П. В. Однокристалльная микро-ЭВМ с аналого-цифровым преобразователем // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 6.— С. 54—58.
2. Однокристалльные микро-ЭВМ / Бобрыкин А. В., Липовецкий Г. П., Литвинский Г. В. и др.— М.: БИНОМ, 1994.
3. Networking with the 8044.— Young Sohn & Charles Gopen, Design, May 1984, p. 136—137.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

**12-я Международная
Крымская конференция
«СВЧ-техника и
телекоммуникационные
технологии»
9—13 сентября 2002 г.
Севастополь, Украина**



**12th International
Crimean Conference
«Microwave &
Telecommunication
Technology»
September 9—13, 2002
Sevastopol, Ukraine**

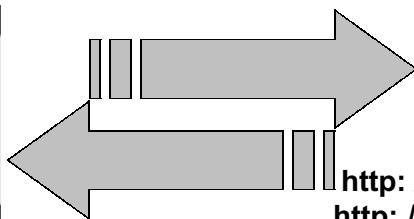
На конференции планируется работа следующих секций

1. Твердотельные приборы и устройства СВЧ (в т. ч. интегрированные устройства для средств связи и локации, а также для сопряжения с оптоволоконными и цифровыми устройствами)
2. Электровакуумные и микровакуумные приборы СВЧ
3. Системы СВЧ-связи, вещания и спутниковой навигации (в т. ч. методики оценки эффективности сетей связи)
4. Антенны и антенные элементы (в т. ч. оптические технологии в антенной технике)

5. Пассивные компоненты, материалы, технология изготовления СВЧ-приборов и нанотехнология
6. СВЧ-электроника сверхбольших мощностей и эффекты
7. СВЧ-измерения
8. СВЧ-техника в промышленности и на транспорте
9. Оптоэлектроника в телекоммуникационных системах
10. Микроволновое дистанционное зондирование и радиоастрономия
11. Автоматизированное проектирование СВЧ-устройств и систем (CAD/CAM)

В рамках конференции планируется проведение семинаров

- W1 — Мультисервисные сети кабельного телевидения
W2 — Применение СВЧ-техники в медицине и экологии



Тел: 0692-424287;
095-2739404

E-mail: <weber@execs.com>
<http://ieee.orbita.ru/aps/crim02r.htm>
<http://ieee.orbita.ru/aps/crim02e.htm>

К. т. н. В. П. СИДОРЕНКО, В. Н. СИДОРЧУК, О. Н. ЗАБРОДИНА,
к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов

Дата поступления в редакцию
15.03 2002 г.

Оппонент к. т. н. Я. В. МАРТЫНЮК
(НТУУ "КПИ", г. Киев)

ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМАЯ ПАМЯТЬ НА ЭЛЕМЕНТАХ FLOTOX ДЛЯ БИС ЭЛЕКТРОННЫХ КАРТ

Рассмотрены вопросы построения электронных пластиковых карт многоразового использования с учетом ужесточения требований к их эксплуатационным параметрам.

В 1983 г. в пластиковую карту был внедрен микропроцессор — так родилась карта «с интеллектом». «Интеллектуальная» карточка позволяет: получить доступ к телефону-автомату; вести персональные записи, обеспечивая защиту доступа к данным; производить дистанционные финансово-расчетные операции в банках; служить стандартной кредитной карточкой или применяться в системах безналичного расчета для магазинов розничной торговли.

Под термином «интеллектуальная карточка» (smart card) в зарубежной литературе понимаются два вида разноцелевых устройств:

— запоминающее устройство или микроконтроллер для широкого спектра применений (карты памяти);

— кредитно-расчетная карточка индивидуального пользования со встроенными средствами обработки информации (интеллектуальные карты).

Карты памяти имеют встроенную микросхему. Все «интеллектуальные» возможности карт поддерживаются считывающим устройством, которое может читать и записывать в память карты. Существуют карты с различной емкостью памяти, реализуемой либо в виде программируемого постоянного запоминающего устройства — ППЗУ (которое позволяет считывать много раз, но в каждый адрес информация может быть записана только один раз), либо в виде электрически стираемого репрограммируемого ПЗУ (ЭС РПЗУ), которое позволяет перезаписывать и считывать многократно. Наибольшее распространение электронные карты памяти получили в области предоставления услуг телефонной связи с помощью таксофонов.

Смарт-карты внешне не отличаются от карт памяти, однако содержат «логику», что делает их «интеллектуальными». Микросхемы смарт-карт представляют собой полные микроконтроллеры (микропроцессоры) и содержат следующие компоненты:

— центральный процессор для обработки инструкций карты;

— оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) для временного хранения данных, например, результатов вычислений, произведенных процессором;

— постоянное запоминающее устройство для хранения инструкций, используемых процессором, данных о владельце карты и т. п.;

— электрически стираемое репрограммируемое запоминающее устройство для хранения данных, изменяющихся в процессе эксплуатации карты (при этом содержимое памяти не должно теряться при отключении питания);

— систему ввода-вывода для обмена данными с внешними устройствами;

— встроенную операционную систему;

— встроенную систему безопасности для защиты данных с возможностью шифрования.

Смарт-карта по сути представляет собой небольшой компьютер, способный выполнять расчеты подобно персональному компьютеру. (Наиболее мощные современные смарт-карты сопоставимы с персональными компьютерами начала 1980-х годов.) В этих картах ЭС РПЗУ используется для хранения данных пользователя, которые могут считываться, записываться и модифицироваться. Смарт-карты имеют различную емкость памяти и обычно используются в приложениях, требующих высокой степени защиты (например, в финансовой практике).

Доступная для разработчиков БИС Украины производственная база позволяет успешно производить более простые по составу ИС *карты памяти*. Киевский НИИ микроприборов имеет опыт разработки интегральных микросхем для электронных карт памяти, применяемых в системах безналичных расчетов. Этот опыт показал, что создание всей системы безналичных платежей и успешное ее внедрение может быть осуществлено только при комплексном подходе — создании электронных карт, необходимого оборудования и программного обеспечения для оснащения всех участников системы.

В НИИ выполнены разработки специализированных интегральных схем для телефонной карточки одноразового и многоразового использования, ИС для предоплаты за пользование энергоносителями и БИС карты для безналичных расчетов в торговле и сфере услуг. Использование микросхемы в качестве носителя информации для электронных карт памяти потребовало введения многоступенчатой системы защиты данных от несанкционированного доступа, которая оказалась достаточно эффективной (с учетом затрат на защиту информации от мошенничества).

Комплекс специальных мер, включающих в себя возможность производства карточек только промыш-

ленным путем, занесение специальной информации производителем на этапе контроля микросхем и эмитентом карточек при ее электрической персонализации, возможность зачисления денег в карточку только после правильной подачи индивидуального секретного ключа, содержащегося в микросхеме, исключают возможность подделок и копирования карт, а также несанкционированный доступ.

Основные свойства защиты накопителя основаны на разделении памяти на различные функциональные области:

- область изготовителя для неизменных данных изготовителя кристалла;
- область персонализации для постоянных данных, относящихся к данным по применению;
- область применения для переменных данных, относящихся к данным по применению;
- защищенная область для несчитываемых данных.

Вышеуказанному делению областей памяти по их назначению соответствует деление энергонезависимой памяти на функциональные зоны — такие как ПЗУ, РПЗУ или чистое ЭС РПЗУ — в соответствии со специальной аппаратной логикой. Доступ по чтению к прикладным областям осуществляется после предъявления секретного кода. Каждая зона доступна для обновления только после предъявления специального кода, индивидуального для каждой зоны. Таким образом, одна зона может использоваться для записи максимальной суммы, разрешенной к расходованию, а вторая накапливает текущий расход. (Необходимо отметить, что разделение памяти на области напрямую связано с отработанной за рубежом в течение нескольких лет организацией и технологией проведения безналичных платежей за товары и услуги.)

Разработанные интегральные схемы карт памяти представляют собой ЭС РПЗУ для хранения данных, многократно изменяющихся в процессе эксплуатации карты; при этом содержимое памяти сохраняется при отключении питания. Ввод и вывод информации осуществляется в последовательном коде. Область памяти выполнена в виде матрицы X слов $\times 8$ (или 16) ячеек и обладает идентификационными (ПЗУ) и персонализационными (РПЗУ) областями информации. Чтение и программирование осуществляются побитно, а стирание — побайтно.

Существует несколько вариантов реализации РПЗУ с электрическим стиранием информации. В них используются отличающиеся по размерам и конструкции запоминающие элементы с разными физическими процессами при записи и стирании информации, которые обладают также разными показателями долговечности (количество циклов перезаписи) и времени хранения информации. В качестве базовой ячейки памяти нами принят элемент FLOTOX, который обладает рядом эксплуатационных характеристик, превосходящих характеристики ЭС РПЗУ с другими типами ячеек (ЭС РПЗУ с УФ-стиранием информации, «быстрых» ЭС РПЗУ на FLASH-элементах памяти или МНОП-элементах памяти на «горячих» носителях и др.). К таким характеристикам относятся:

— возможность стирания информации отдельными байтами или даже битами;

— возможность реализации режимов стирания и записи во всем рабочем диапазоне температур от -60°C до $+125^{\circ}\text{C}$ за счет температурно-независимого механизма записи-стирания (туннелирования Фаулера—Нордхейма);

— низкоэнергетический характер переноса заряда при программировании, что позволяет реализовать схему с одним внешним источником питания для всех режимов работы (напряжение программирования ячейки памяти амплитудой 16—20 В формируется на кристалле) и временем программирования 5 мс;

— количество циклов перепрограммирования до 10^6 ;

— время непрерывного считывания информации не менее 5000 ч, а энергонезависимого хранения — не менее 10 лет (при считывании и хранении записанная информация не разрушается, т. е. в нормальных условиях работы ее регенерация не требуется);

— технологическая совместимость с базовыми технологическими маршрутами КМОП-технологии с поликремниевым затвором;

— простота реализации аппаратной и программной защиты хранимой информации от несанкционированного доступа.

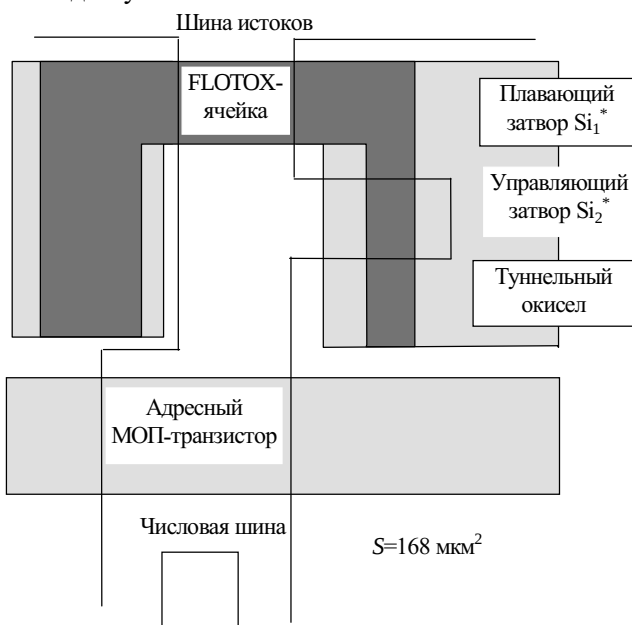


Рис. 1. Топология FLOTOX-элемента памяти

Для построения матрицы памяти на FLOTOX-приборах каждый запоминающий элемент выполняется на двух транзисторах (рис. 1): FLOTOX-прибор является собственно запоминающим элементом, а второй транзистор — транзистором выборки. Использование двух транзисторов является недостатком данного элемента памяти, т. к. не позволяет создать на его основе высокоплотный накопитель РПЗУ, который определяет размер кристалла и, в конечном счете, его стоимость.

В элементе FLOTOX область туннелирования, расположенная над стоком, используется как для заряда, так и для разряда плавающего затвора (первый уровень поликремния, на котором хранится информация).

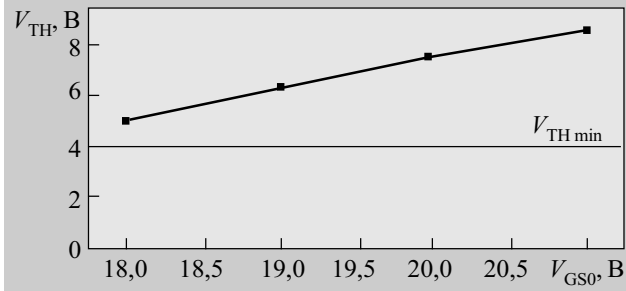


Рис. 2. Зависимость эффективности стирания от амплитуды импульса стирания V_{GS0} (длительность импульса стирания $T_{ER}=5$ мс)

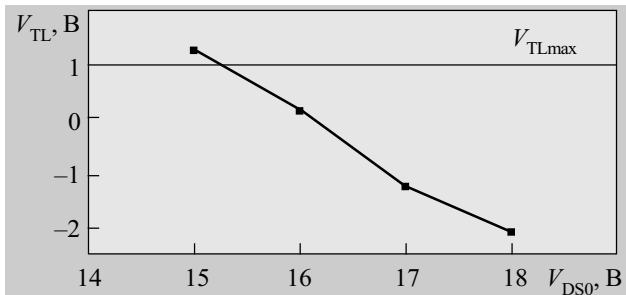


Рис. 3. Зависимость эффективности записи от амплитуды импульса записи V_{DS0} (длительность импульса записи $T_{WR}=5$ мс)

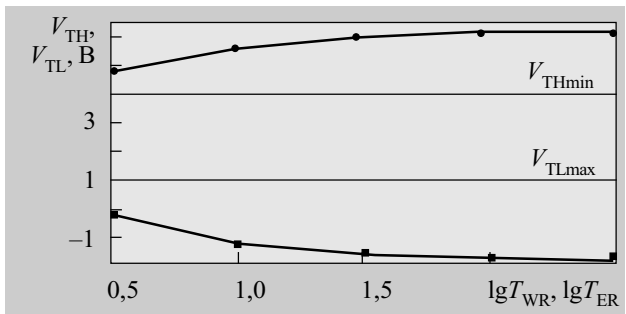


Рис. 4. Влияние длительности импульсов стирания T_{ER} (мс) и записи T_{WR} (мс) на эффективность программирования (амплитуда импульсов стирания $V_{GS0} = 20$ В, импульсов записи $V_{DS0} = 18$ В)

Работа FLOTOX-ячейки в режимах записи и стирания достаточно подробно описана в работах [1—4].

Логическая информация в накопителе ЭС РПЗУ отображается электрически изменяемым пороговым напряжением FLOTOX-ячейки. В режиме стирания элемент памяти переводится в состояние с высоким пороговым напряжением ($V_{TH} > 7$ В), а в режиме записи — в состояние с низким пороговым напряжением ($V_{TL} < -1$ В). Величина порогового напряжения запоминающего транзистора и время стирания/записи информации зависят от напряжения на затворе, диэлектрической проницаемости слоев диэлектрика затвора, а также их толщины.

На рис. 2—4 приведены вольт-амперные характеристики FLOTOX-ячейки после стирания и записи бита информации. Очевидно, что высокие напряжения программирования и большие длительности импульсов при записи/стирании крайне неудобны для потребителей БИС, т. к. увеличивают габариты аппа-

ратуры, усложняют требования к источникам питания, удлиняют время перепрограммирования. (Время перезаписи информации в накопителе может составлять от десятков микросекунд до десятков миллисекунд.) С целью сокращения общего времени программирования в БИС предпочтительно использовать адаптивный алгоритм, который строится таким образом, что после программирования коротким (десятки микросекунд) импульсом встроенная в БИС схема производит контроль правильности записанной информации. Если результат контроля удовлетворителен, режим программирования завершается. В результате может быть достигнуто значительное сокращение времени программирования, что очень важно при пользовании карточкой.

По нашему мнению, сейчас в Украине выпуск электронных карт является достаточно дорогим производством, поэтому наиболее оптимальной и экономически целесообразной является реализация карточки многоразового использования, которая обеспечивает повторную перезагрузку при зачислении денег на нее. Однако в этом случае необходимо ужесточение требований к таким эксплуатационным параметрам FLOTOX-ячейки как циклоустойчивость и время хранения информации.

Цикл перепрограммирования включает стирание информации в ячейке и следующую за ним запись. При увеличении количества циклов перепрограммирования ($N_{ц}$) происходят необратимые изменения (деградация) электрических свойств туннельного окисла, связанные с захватом положительных и отрицательных зарядов и генерацией новых ловушечных состояний. Это приводит к ухудшению характеристик элементов памяти, использующих этот окисел.

Исследования показали, что при малых интегральных потоках электронов ($< 10^{16}$ эл/см²) происходит захват положительного заряда вблизи N^+ -монокремниевое электрода, а при больших потоках начинает преобладать захват электронов на исходные и вновь генерируемые ловушки, причем по всему объему окисла. Одновременно с этим происходит генерация ловушек положительного заряда, концентрация которых растет с увеличением интегрального потока инжектируемого заряда. После прекращения высокополевого воздействия происходит выброс положительного заряда с этих ловушек. Захват заряда на вновь генерируемые ловушки увеличивает проводимость туннельного окисла при пониженных полях и уменьшает — при высоких электрических полях. При увеличении количества циклов перепрограммирования (или интегрального потока заряда, прошедшего через туннельный окисел) пороговое напряжение ячейки памяти после стирания уменьшается. Причем темп уменьшения его тем выше, чем больше сечение захвата электронов, выше концентрация исходных ловушек в окисле и выше скорость генерации новых ловушек в окисле. При увеличении тока туннелирования возрастает темп захвата электронов на исходные ловушки и скорость генерации новых ловушек, что приводит к интенсивному ухудшению эффективности стирания.

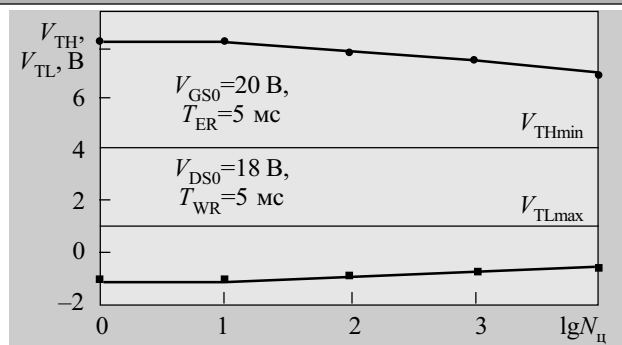


Рис. 5. Устойчивость ячейки памяти к циклам перепрограммирования

Полученные экспериментальные данные (рис. 5) показывают, что вплоть до 10000 циклов перепрограммирования не происходит существенной деградации параметров FLOTOX-ячейки, что вполне удовлетворяет требованиям к БИС электронных карт памяти.

Другим важнейшим для потребителя параметром является время хранения данных. Различают два режима: хранение в «активном» режиме и энергонезависимое хранение. Активным принято считать режим, когда на ИС подано напряжение питания, а к ячейке, находящейся в режиме хранения данных, есть обращение либо нет обращения. Энергонезависимым принято считать хранение информации, когда на схему не подано напряжение питания.

В активном режиме при хранении положительного заряда главную роль играет ток утечки через туннельный окисел. В результате воздействия инжектированного тока туннелирования, как отмечалось выше, происходит захват положительных зарядов вблизи N^+ -электрода, отрицательного заряда по всему объему окисла и генерация мелких ловушек около зоны проводимости окисла. Глубина залегания ловушки отсчитывается от дна зоны проводимости для электронов и потолка валентной зоны для дырок. Мелкие ловушки (E ловушки намного меньше E_g , где E_g — ширина запрещенной зоны [5, с. 148]) повышают проводимость пленки окисла, а захваченный положительный заряд приводит к увеличению локального поля в окисле, примыкающем к стоку, что облегчает протекание тока Фаулера—Нордхейма от N^+ -области стока к положительно заряженному плавающему затвору и приводит к потере информационного заряда. Ток надбарьерной эмиссии, ток смешанной термополевой эмиссии и дефекты в системе $Si-SiO_2-Si^*$ (Si^* — поликремний) увеличивают потерю положительного информационного заряда. Наблюдается (рис. 6) сильная зависимость времени хранения положительного заряда от толщины туннельного окисла и приложенного напряжения считывания.

При активном хранении на плавающем затворе отрицательного заряда поле на туннельном окисле значительно слабее, чем в случае положительного заряда, а увеличенное поле на толстом межзатворном полиоксиде существенно меньше известных из литературы полей [6, 7], при которых в полиоксиде возникает заметная проводимость, приводящая к стеканию отрицательного заряда на управляющий затвор. На практике она возникает только при очень сильной шероховатости поверхности поликремниевого затвора, на пиках зерен поликремния, т. е. в местах концентрации электрических полей [8].

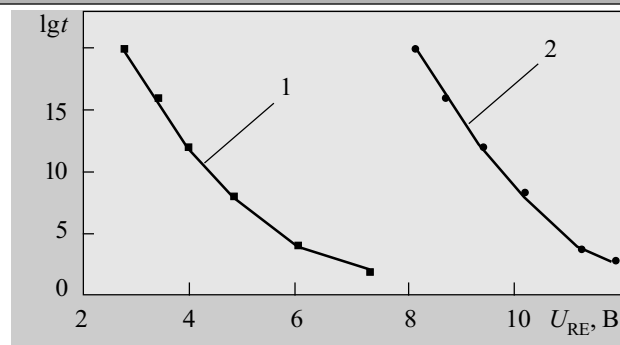


Рис. 6. Расчетная зависимость времени хранения информации после записи (t , с) от напряжения считывания (U_{RE}) и толщины туннельного окисла ($d_{тун}$):

1 — $d_{тун} = 8$ нм; 2 — $d_{тун} = 13$ нм

Более существенным, на наш взгляд, является стекание отрицательного заряда с плавающего затвора при хранении в пассивном режиме. В этом случае на ИС не подается напряжение питания, и все электроды ячейки, за исключением плавающего затвора, находятся под равным нулевым потенциалом. Скорость стекания заряда определяется величиной и местоположением в окисле захваченных положительных и отрицательных зарядов. Для наших условий захвата и из-за наличия зоны обеднения в монокремнии положительный заряд и в пассивном режиме будет стекать быстрее.

В реальной ситуации сужение межпороговой зоны элемента памяти происходит одновременно как во времени, так и при воздействии циклов перепрограммирования. Наихудшим случаем является воздействие максимально допустимого числа циклов перепрограммирования в начальный период эксплуатации ИС и последующее хранение в течение гарантируемого интервала времени. В процессе эксплуатации ИС деградация элементов памяти в пределах накопителя носит случайный характер и зависит от интенсивности обращения к каждой конкретной ячейке со стороны потребителя.

Особенности конструкции и функционирования, параметрические зависимости FLOTOX-ячеек памяти должны быть тщательно учтены при согласовании накопителя со схемами обрания БИС (особенно в режимах считывания и программирования). При правильном проектировании БИС с FLOTOX-ячейкой памяти потребитель получит электронную карту с высокими техническими характеристиками, работающую в широком температурном диапазоне с одним источником питания во всех режимах. К преимуществам следует также отнести технологическую совместимость FLOTOX-ячейки с базовой КМОП-технологией, что позволяет существенно снизить цену кристалла БИС.

Ведущие производители БИС для электронных карт, используя новейшие достижения в области технологии, непрерывно совершенствуют FLOTOX-элемент памяти, поскольку он, в конечном счете, определяет характеристики и цену изделия в целом. Разработаны однотранзисторные FLOTOX-ячейки, использующие качественно новые пленки диэлектрика с улучшенными параметрами. Важным преимуществом такого запоминающего элемента являются ма-

лые геометрические размеры, позволяющие создать на его основе высокоплотный накопитель РПЗУ большой информационной емкости с отличными эксплуатационными параметрами — один источник питания 1,5—3 В во всех режимах, время программирования — десятки микросекунд, время хранения в активном режиме не менее 15000 часов и не менее 10^6 циклов перепрограммирования.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Сидоренко В. П., Забродина О. Н., Сидорчук В. Н., Николаенко Ю. Е. БИС электронных пластиковых карт с предварительной оплатой // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 3.— С. 53 — 57.
2. Brattacharyya A. Effect of trapping in thin oxides on the writes and erase characteristics of floating gate EEPROM devices // Journal of Physics D: Applied Physics.— 1984.— Vol. 17, N 4.— P. 799 — 803.
3. Brattacharyya A. Modeling of writes/erase and charge retention characteristics of floating gate EEPROM devices

// Solid-State Electronics.— 1984.— Vol. 27, N 10.— P. 899 — 906.

4. Tanaka S., Ishicawa M. One-demotion writing model of N-channel floating gate ionization MOS (FIMOS) // IEEE Transactions on Electron Devices.— 1981.— Vol. ED-28, N 10.— P. 1190 — 1197.

5. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников.— М.: Наука, 1990.

6. Anderson P. M., Kerr D. R. Evidence for surface asperity mechanism of conductivity in oxide grown on polycrystalline silicon // Journal of Applied Physics.— 1977.— Vol. 48, N 11.— P. 4834 — 4836.

7. Heimann P. A., Murarca S. P., Sheng T. T. Electrical conduction and breakdown in oxides of polycrystalline silicon and their correlation with interface texture // Journal of Applied Physics.— 1982.— Vol. 53, N 9.— P. 6240 — 6245.

8. Корнюшкин Н. А., Ковчавцев А. П., Сапожникова А. Н., Франгузов А. А. Токи утечки через окисел, выращенный на поверхности затвора из поликристаллического кремния // Микроэлектроника.— 1983.— Т. 12, вып. 3.— С. 210 — 216.

Редакция журнала

"Технология и конструирование в электронной аппаратуре"

просит Вас поинтересоваться,

подписана ли Ваша организация на журнал "ТКЭА" до конца 2002 года (индекс в подписных каталогах — **71141**, периодичность — 6 номеров в год). Подписку можно оформить не только в почтовом отделении, но и непосредственно через редакцию. Для этого соответствующую сумму (цена одного номера — 15 грн.) необходимо перевести в адрес редакции **по почте** (Украина, 65005, Одесса, ул. Прохоровская, 45) или **на указанный расчетный счет**.

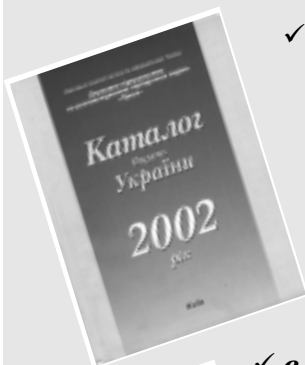
Реквизиты для перечисления на счет

✓ в гривнах:

Получатель ДП "Нептун-Технология", ОКПО 24543343.

Банк получателя: Отд. № 6 "Ильичевское" ЦО ПИБ в г. Одессе, МФО 328135, р/с 26002301535969.

Назначение платежа: за подписку на журнал "ТКЭА".



✓ в российских рублях:

Получатель: Проминвестбанк Украины.

Корсчет: корсчет типа К № 30122810400000000284.

Банк получателя: ИНН 7707083893 Сбербанк России, г. Москва, БИК 044525225, корсчет № 30101810400000000225 в ОПЕРУ Московского ГТУ Банка России.

Назначение платежа: для ДП "Нептун-Технология", ОКПО 24543343,

р/с 26002301535969, код 810 в отд. № 6 "Ильичевское" ЦО ПИБ



Д. т. н. Б. П. КРЕДЕНЦЕР, д. т. н. С. В. ЛЕНКОВ,
к. т. н. Р. А. САЛИМОВ, Д. А. ПЕРЕГУДОВ, С. А. ШОМИН

Украина, г. Киев, Национальный авиационный
университет, НТУУ «КПИ»
E-mail: shomin@mail.ru

Дата поступления в редакцию
13.02 2002 г.
Оппонент к. ф.-м. н. И. А. РАДЗИЕВСКИЙ
(НТЦ ССЭТ "Элси", г. Киев)

ОПТИМИЗАЦИЯ УРОВНЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ В СЛОЖНЫХ УСТРОЙСТВАХ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Рассматривается задача оптимизации показателя безотказности в сложных устройствах микроэлектроники с одно-временным учетом модернизации элементов и их резервирования.

Под сложными устройствами микроэлектроники обычно понимают большие и сверхбольшие интегральные схемы, микросборки, светодиодные матрицы, солнечные батареи и другие изделия с большим количеством составляющих элементов. Известно, что в ряде случаев отказ (сбой в работе) отдельного элемента приводит к отказу всего устройства микроэлектроники, а тот, в свою очередь, — к отказу целого радиоэлектронного комплекса. Это означает, что часть из последовательно соединенных (в смысле надежности) элементов (подсистем) может (должна) содержать структурный невосстанавливаемый резерв.

К настоящему времени определились два направления оптимизации надежности таких устройств [1]:

— оптимальное распределение требуемой надежности между элементами с учетом возможности их модернизации;

— оптимальное резервирование.

В первом случае считаются известными зависимости «надежность — стоимость» элементов и структура устройства, и здесь основная задача заключается в получении оптимальной надежности каждого элемента при условии обеспечения требуемой надежности всего устройства и минимальных затратах. При этом определяется уровень необходимой модернизации (акцентирования качества) элементов при фиксированной структуре устройства. Во втором случае надежность и стоимость элементов принимаются неизменными, и определяется оптимальное их число в резервированных подсистемах, обеспечивающее требуемую надежность устройства при минимальных затратах.

Заметим, что если затраты на устройство ограничены, то указанные выше задачи оптимизации решаются из условия обеспечения максимальной надежности устройства при заданных ограничениях на затраты.

Более общей представляется задача, в которой оптимизация надежности устройства проводится с одновременным учетом модернизации элементов и

их резервирования [2, 3]. При этом возникают вопросы: до какого уровня целесообразно повышать надежность элементов и начиная с какого уровня следует их резервировать, чтобы получить максимальное значение показателя надежности резервированной подсистемы. Рассмотрению данных вопросов и посвящена настоящая статья.

Сформулируем задачу. Пусть имеется резервированная подсистема, состоящая из одного основного и $m-1$ резервных идентичных элементов, и пусть резервные элементы находятся в нагруженном состоянии. Будем считать, что нам известна (или задана) зависимость $P_3(t) = f(C_3)$, где $P_3(t)$ — вероятность безотказной работы элемента, а C_3 — стоимость средств, выделяемых на его модернизацию (совершенствование технологического процесса его изготовления, диагностики и т. п.). Условимся в дальнейшем считать время t фиксированным и писать P_3 вместо $P_3(t)$ для упрощения записи аналитических соотношений.

На стоимость подсистемы C_{rp} накладывается ограничение:

$$C_{rp} \leq C_0, \quad (1)$$

где C_0 — граничное значение стоимости резервированной подсистемы.

Требуется определить такой уровень безотказности элементов и такое их количество, которые обеспечивали бы максимальное значение вероятности безотказной работы резервированной подсистемы при данном ограничении на ее стоимость.

С учетом указанных выше условий зависимость вероятности безотказной работы резервированной подсистемы P_{rp} от стоимости элемента C_3 определяется соотношением

$$P_{rp}(C_3) = 1 - [1 - f(C_3)]^{C_{rp}/C_3}, \quad (2)$$

где $f(C_3)$ — функция «вероятность безотказной работы — стоимость» элемента.

Учитывая ограничение (1), подставим в формулу (2) C_0 вместо C_{rp} и получим:

$$P_{rp}(C_3) = 1 - [1 - f(C_3)]^{C_0/C_3}. \quad (3)$$

Следует отметить, что зависимость $f(C_3)$ не является непрерывной функцией. Однако при реальной модернизации ее изменения практически настолько малы, что ими можно пренебречь, а зависимость аппроксимировать монотонной функцией, например, полино-

мом Лагранжа. Показатель степени C_0/C_3 в формуле (3) с изменением стоимости элемента C_3 принимает как целые, так и дробные значения, в то время как число резервных элементов может принимать только целые значения. Поэтому рассматривая зависимость (3) как непрерывную, мы допускаем некоторую погрешность.

Определим вначале зависимость $P_{\text{рп}}(C_3)$ с учетом модернизации и резервирования для случая дробного значения показателя степени C_0/C_3 , а затем оценим погрешность для случая целочисленного резервирования.

Для нахождения оптимального значения стоимости элемента C_3^* в случае нецелочисленного резервирования продифференцируем выражение (3) по стоимости элемента C_3 :

$$\frac{dP(C_3)}{dC_3} = -\left\{ \frac{C_0}{C_3} [1 - f(C_3)]^{C_0/C_3 - 1} [-f'(C_3)] + [1 - f(C_3)]^{C_0/C_3} \ln[1 - f(C_3)] \left(-\frac{C_0}{C_3^2} \right) \right\}.$$

Приравняв полученную производную нулю, после несложных преобразований при условии $C_3 = C_3^*$ получаем:

$$C_3^* f'(C_3) |_{C_3=C_3^*} + [1 - f(C_3^*)] \ln[1 - f(C_3^*)] = 0. \quad (4)$$

Из формулы (4) можно сделать важный вывод: оптимальная стоимость элемента C_3^* при нецелочисленном резервировании зависит только от вида функции $f(C_3)$ и не зависит от ограничения C_0 , накладываемого на стоимость $C_{\text{рп}}$ резервированной подсистемы.

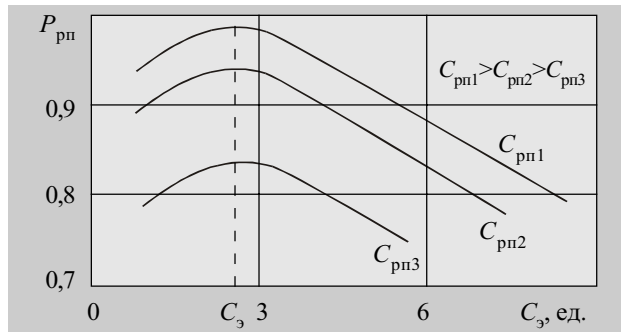


Рис. 1. Зависимость вероятности безотказной работы резервированной подсистемы $P_{\text{рп}}$ от стоимости элемента системы C_3 для разных значений стоимости подсистемы $C_{\text{рп}}$

На рис. 1 приведены графики зависимости вероятности безотказной работы резервированной подсистемы $P_{\text{рп}}$ от стоимости элемента C_3 при трех различных значениях стоимости подсистемы ($C_{\text{рп}1} > C_{\text{рп}2} > C_{\text{рп}3}$). Из графиков видно, что оптимальная стоимость элемента C_3^* , соответствующая максимальному значению вероятности $P_{\text{рп}}(C_3^*)$, остается постоянной и не зависит от стоимости резервированной подсистемы. Величина C_3^* может быть определена из формулы (4).

Рассмотрим теперь случай целочисленного резервирования и оценим погрешность, возникающую при решении задачи оптимизации на основании соотношения (3). Отношение C_0/C_3 в этом случае принима-

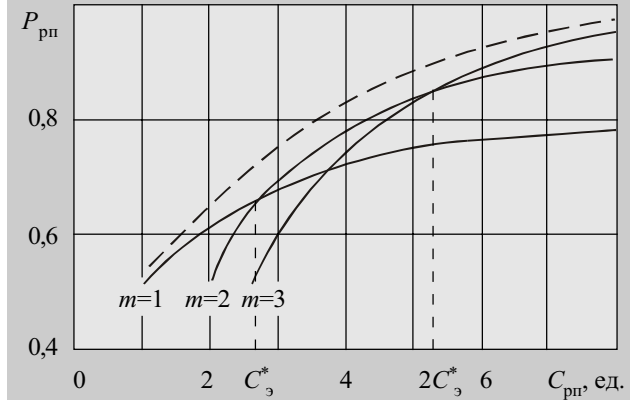


Рис. 2. Зависимость вероятности безотказной работы резервированной подсистемы $P_{\text{рп}}$ от стоимости подсистемы $C_{\text{рп}}$ для различного числа m резервных элементов в подсистеме

ет только целые значения. Поэтому значение стоимости элемента, определяемое из отношения $C_{\text{рп}}/m$, где m — число элементов в резервированной подсистеме, будет, как правило, отлично от значения C_3^* . Это иллюстрируется графиками рис. 2, где приведены зависимости вероятности безотказной работы резервированной подсистемы $P_{\text{рп}}$ от стоимости $C_{\text{рп}}$ для различного числа элементов в подсистеме m . Из графиков видно, что кривые для $m=1, m=2$ и $m=3$ при значениях стоимости $C_{\text{рп}}$, кратных значениям C_3^* , касаются пунктирной кривой, которая соответствует наибольшей вероятности $P_{\text{рп}}$ в случае нецелочисленного резервирования.

Определим значение стоимости одного элемента и число элементов, при которых обеспечивается максимальная вероятность безотказной работы подсистемы при целочисленном резервировании для $C_0 = \text{const}$ и конкретной функции $f(C_3)$.

Для этого исследуем поведение зависимости $P_{\text{рп}} = \Phi(C_{\text{рп}})$ в промежутках между точками $C_{\text{рп}} = mC_3^*$ и $C_{\text{рп}} = (m+1)C_3^*$.

Рассмотрим два равенства:

$$y^{(1)}(C_{\text{рп}}) = 1 - [1 - f(x^{(1)})]^m, \quad \text{где } x^{(1)} = C_{\text{рп}}/m; \quad (5)$$

$$y^{(2)}(C_{\text{рп}}) = 1 - [1 - f(x^{(2)})]^{m+1}, \quad \text{где } x^{(2)} = C_{\text{рп}}/(m+1). \quad (6)$$

Нетрудно видеть, что в точке $C_{\text{рп}} = mC_3^*$ $y^{(1)}(C_{\text{рп}}) > y^{(2)}(C_{\text{рп}})$, а в точке $C_{\text{рп}} = (m+1)C_3^*$ $y^{(1)}(C_{\text{рп}}) < y^{(2)}(C_{\text{рп}})$.

Обе величины — $y^{(1)}(C_{\text{рп}})$ и $y^{(2)}(C_{\text{рп}})$ — изменяются непрерывно и монотонно с изменением стоимости подсистемы $C_{\text{рп}}$, следовательно, на интервале $[mC_3^*, (m+1)C_3^*]$ существует точка, в которой $y^{(1)}(C_{\text{рп}}) = y^{(2)}(C_{\text{рп}})$. Значит, между точками mC_3^* и $(m+1)C_3^*$ существуют такие значения стоимости подсистемы $C_{\text{рп}}^{(m)}$, при которых вероятность безотказной работы подсистемы из m элементов со стоимостью одного из них $C_{\text{рп}}^{(m)}/m$ равна вероятности безотказной работы подсистемы из $(m+1)$ элементов со стоимостью одного из них $C_{\text{рп}}^{(m)}/(m+1)$. Поэтому при стоимости подсистемы $C_{\text{рп}} \leq C_{\text{рп}}^{(m)}$ целесообразно использовать m эле-

ментов, а при стоимости $C_{\text{рп}} > C_{\text{рп}}^{(m)}$ — группу из $(m+1)$ элементов.

Это значение стоимости подсистемы $C_{\text{рп}}^{(m)}$ можно определить из равенства

$$\left[1 - f(C_{\text{рп}}^{(m)} / m)\right]^m - \left[1 - f(C_{\text{рп}}^{(m)} / (m+1))\right]^{m+1} = 0. \quad (7)$$

Зависимость максимальной вероятности безотказной работы резервированной подсистемы от ее стоимости ($P_{\text{рп}}^{\text{max}} = \Phi(C_{\text{рп}})$) при целочисленном резервировании остается неубывающей, но она уже не обладает свойством монотонности (рис. 2). Ее первая про-

изводная по стоимости $\frac{dP_{\text{рп}}}{dC_{\text{рп}}}$ при выполнении усло-

вия $C_{\text{рп}} = C_{\text{рп}}^{(m)}$ для $m=1, 2, 3, \dots$ терпит разрыв.

Пример.

Пусть зависимость $P_3 = f(C_3)$ задана в виде приведенной ниже таблицы.

C_3	100	200	300	400	500	600	700	800
P_3	0,322	0,594	0,712	0,764	0,791	0,8	0,905	0,809

При этом стоимость резервированной подсистемы $C_{\text{рп}}$ не должна превышать $C_0=700$ ед. Требуется определить такой уровень показателя безотказности одного элемента P_3 и такое число m элементов в подсистеме, которые обеспечивают максимальное значение вероятности безотказной работы подсистемы.

Из равенства (7) определяем значение $C_{\text{рп}}^{(m)}$ для $m=1, 2, 3, \dots$ до значения $C_{\text{рп}}^{(m)} \geq C_0$: $C_{\text{рп}}^{(1)}=285$ ед., $C_{\text{рп}}^{(2)}=495$ ед., $C_{\text{рп}}^{(3)}=710$ ед. Как видно, это значение равно 710 ед. и соответствует подсистеме из трех элементов.

Далее определяем из соотношения $C_3 = C_0/m$ стоимость одного элемента из таблицы и соответствующее ей значение вероятности P_3 безотказной работы элемента. В результате получаем $C_3=233$ ед. и $P_3=0,646$.

Теперь нетрудно оценить вероятность безотказной работы подсистемы, содержащей два резервных элемента:

$$P_{\text{рп}}(700 \text{ ед.}) = 1 - (1 - 0,646)^3 = 0,956.$$

Таким образом, при заданных исходных данных максимальная вероятность безотказной работы достигается при двукратном резервировании, при этом $P_3=0,646$, и $P_{\text{рп}}(C_0)=0,956$. Заметим, что при другой кратности резервирования (например, при однократном резервировании более надежным элементом) вероятность безотказной работы подсистемы будет меньше и составит $P_{\text{рп}}=0,931$.

В заключение отметим, что рассмотренная выше задача может являться одним из этапов решения более сложной задачи, заключающейся в определении:

1) необходимых средств для повышения выбранного показателя надежности системы до заданного уровня и оптимального распределения их между подсистемами;

2) оптимального для каждой подсистемы значения показателя надежности отдельных элементов и оптимальной кратности резервирования, которые обеспечивают максимальное значение показателя надежности при затрате определенных средств.

Следует отметить, что решение поставленной задачи распространяется не только на изделия микроэлектроники, а на любые сложные высоконадежные технические средства с преобладанием ресурсных структур.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Барзилович Е. Ю., Беляев Ю. К., Каштанов В. Н. и др. Вопросы математической теории надежности. — М.: Радио и связь, 1983.

2. Неледва В. А., Шишенок Н. А. Оптимизация надежности элементов сложных систем с учетом экономических факторов // В кн.: Основные вопросы надежности элементов. — М.: Сов. радио, 1971. — С. 298—327.

3. Креденцер Б. П. Оптимизация избыточности в сложных технических системах // В кн.: Основные вопросы теории и практики надежности. — Минск: Наука и техника, 1982. — С. 67—74.

вторая выставка-симпозиум

Электроника Энергетика

18–21 сентября 2002 года
Одесса, Морвокзал



- ⇒ Промышленная и микроэлектроника
- ⇒ Электронные компоненты и системы
- ⇒ Электрооборудование
- ⇒ Электродвигатели, генераторы, трансформаторы
- ⇒ Силовые и распределительные щиты
- ⇒ Кабельно-проводниковая продукция
- ⇒ Электроустановочное оборудование
- ⇒ Светотехнические приборы

Украина, 65014, г. Одесса,
пер. Сабанский, 1/10
Тел. (0482) 24-60-18,
факс (0482) 21-05-91
E-mail: cvt@expo-odessa.com
http: \www.expo-odessa.com

