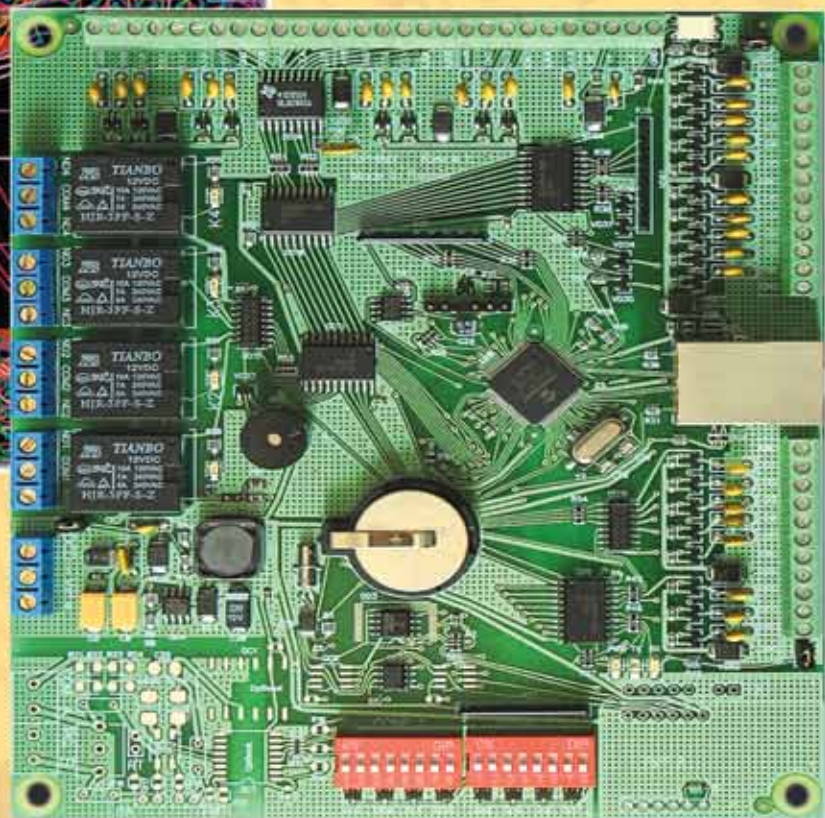
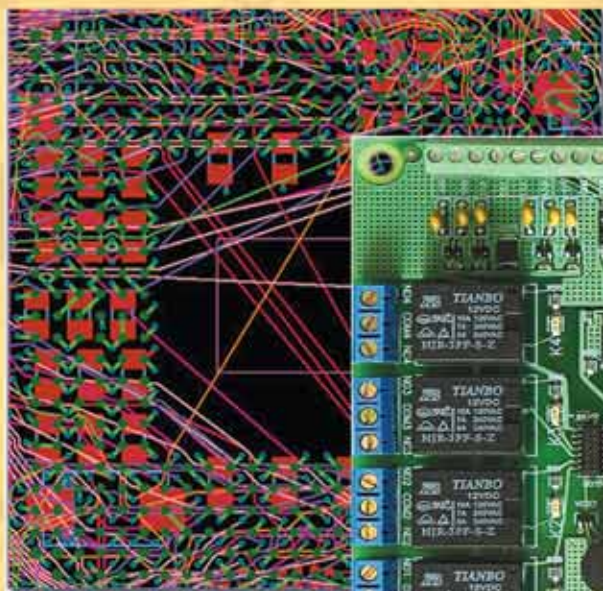


TOPA

**ТЕХНОЛОГИЯ И
КОНСТРУИРОВАНИЕ В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

ТopoR V4.2

**топологический
трассировщик
печатных плат
нового поколения**



TOPOR

www.FreeStyleTeam.com

6(78) 2008

ДЕСЯТАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

18–22 мая 2009 года
Украина, г. Одесса

Реквизиты для связи
e-mail <tkea@optima.com.ua>
тел. +38 (048) 728-49-46,
728-18-50.

- Информационные технологии и системы искусственного интеллекта
- Компьютерные системы и сети
- Радиотехнические, телекоммуникационные и телевизионные системы
- Проектирование, конструирование, производство и контроль электронных средств
- Функциональная электроника. Микро- и нанотехнологии
- Проблемы экологического мониторинга и биомедицинские электронные технологии
- Проблемы подготовки научных и инженерных кадров в области управления, радиотехники и компьютерных систем
- «Круглый стол», посвященный обсуждению проблем развития микроэлектроники в Украине

С текущей информацией
можно ознакомиться на сайте
www.tkea.com.ua/siet/inf.html

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ»

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 13418-2302ПР

Зарегистрирован в ВАК по разделам «Физико-математические науки», «Технические науки»
Реферируется в УРЖ «Джерело» (г. Киев) и в Реферативном журнале ВИНТИ (г. Москва)



Журнал издается при поддержке

ЗАО «Укрналіт»,

ОАО «Меридіан» ім. С. П. Королёва
(г. Киев),

НПП «Карат» (г. Львов),

ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

- В Украине Отделения связи. «Каталог изданий Украины». Индекс 23785.
Подписное агентство «Идея», www.idea.com.ua. Индекс 11146.
Подписное агентство «KSS», www.kss.kiev.ua. Индекс 20363.
- В России Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.
- В Белоруссии Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индекс 71141.
- В редакции «ТКЭА» можно подписаться с любого номера.

Адрес редакции: Украина, 65044, г. Одесса, а/я 17.

E-mail: tkea@optima.com.ua, web-сайт: www.tkea.com.ua,
тел. +38 (048) 728-18-50, 728-11-89,
тел./факс 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко, Н. М. Колганова,
М. Г. Микулнская, М. С. Назарова.

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корейская.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 8,0+1,0. Уч.-изд. л. 11,0. Тираж 500 экз. Заказ № 252.

Издательство «Политехперіодика»
(65044, г. Одесса-44, а/я 17).

Отпечатано в типографии издательства «ART-V»
(65091, г. Одесса, ул. Комитетская, 24а).

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

К.т.н. Н. М. Вакив (г. Львов)
Д.т.н. В. Н. Годованюк (г. Черновцы)
К.т.н. А. А. Дашковский (г. Киев)
Н. В. Кончиц (г. Киев)
Д.т.н. В. П. Малахов (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. В. Ф. Мачулин (г. Киев)
В. А. Проценко (г. Киев)
Е. А. Тихонова (г. Одесса)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. А. А. Ащеулов (г. Черновцы)
Д.т.н. В. В. Баранов (г. Минск)
К.т.н. Э. Н. Глушеченко,
зам. гл. редактора (г. Киев)
Д.т.н. В. В. Данилов (г. Донецк)
Д.т.н. В. Т. Дейнега (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. В. А. Дроздов (г. Одесса)
К.т.н. И. Н. Еримичой,
зам. гл. редактора (г. Одесса)
К.т.н. А. А. Ефименко,
ответственный секретарь (г. Одесса)
Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)
К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)
К.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)
Д.ф.-м.н. В. В. Новиков (г. Одесса)
К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)
К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)
Д. ф.-м. н. М. И. Самойлович (г. Москва)
Д.ф.-м.н. П. В. Серба (г. Таганрог)
Д.х.н. В. Н. Томашик (г. Киев)
Д.ф.-м.н. О. И. Шпотюк (г. Львов)

УЧРЕДИТЕЛИ

Министерство промышленной политики
Украины
Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарева
Научно-производственное
предприятие «Сатурн»
Одесский национальный
политехнический университет
Издательство "Политехпериодика"

Одобрено к печати Ученым советом ОНПУ
(Протокол № 2 от 25.10.08)

Новые компоненты для электронной аппаратуры

Термоэлектрические преобразователи электрических и оптических сигналов — новый класс термоэлектрических устройств. *Шер Э. М.* 3

Электронные средства: исследования, разработки

Программа анализа перекрестных помех в цепях печатных плат. *Сиротко В. К.* 11

Интегральный оптоэлектронный коммутатор на ДМОП-транзисторах. *Политанский Л. Ф., Лесинский В. В.* 23

Системы передачи и обработки сигналов

Система передачи цифровой информации на основе многоуровневых сигналов с компактным спектром. *Сукачев Э. А., Шкулипа П. А.* 28

Энергетическая электроника

Гетероструктуры на основе GaAs с квантовыми точками InAs для фотоэлектрических преобразователей. *Марончук И. Е., Дображанский Ю. А.* 32

Функциональная микро- и нанoeлектроника

Симметричный двухкоординатный фотодиод. *Добровольский Ю. Г., Рюхтин В. В., Фединчук И. И., Юрьев В. Г.* 35

Исследование термометрических характеристик GaP-диодов p^+-n -типа. *Краснов В. А., Шварц Ю. М., Шварц М. М., Конко Д. П., Ерохин С. Ю., Фонкич А. М., Шутов С. В., Сыпко Н. И.* 38

Технологические процессы и оборудование

Предэпитаксиальная обработка подложек GaSb для жидкофазного выращивания гомоэпитаксиальных слоев. *Андропова Е. В., Курак В. В.* 41

Источник магнитных полей сложной энергочастотной и поляризационной структуры. *Житник Н. Е., Плаксин С. В., Погорелая Л. М., Соколовский И. И., Яшин А. А.* 44

Получение эффективных катодолуминесцентных структур на базе пленочной технологии. *Коваленко Л. Ф., Севастьянов В. В., Хомченко В. С., Цыркунов Ю. А.* 48

Материалы электроники

Температурные и концентрационные зависимости подвижности носителей заряда в твердых растворах $(\text{PbS})_{1-x}(\text{Sm}_2\text{S}_3)_x$. *Гасанов Г. А., Мургузов М. И.* 50

Электропроводящие тонкие пленки для BaCuTeF прозрачных контактов в полупроводниковой электронике. *Готра З. Ю., Тейт Дж., Кикинеши Р., Закутаев А. А., Ракобовчук Л. М.* 54

Радиационная модификация структурной сетки халькогенидного стекла. *Кавецкий Т. С., Шпотюк О. И., Литовченко П. Г., Цмоць В. М.* 58

Метрология. Стандартизация

Расчет характеристик рентгеновского излучения. *Душкин С. А., Куров А. М., Одинец В. А., Оробинский А. Н.* 60

Библиография

Новые книги 10, 27, 31, 43

Выставки. Конференции

2-я, 3-я, 4-я стр. обл.

ЗМІСТ

Нові компоненти для електронної апаратури

Термоелектричні перетворювачі електричних та оптичних сигналів — новий клас термоелектричних пристроїв. *Шер Е. М.* (3)

Електронні засоби: дослідження, розробки

Програма аналізу перехресних перешкод у колах друкованих плат. *Сиротко В. К.* (11)

Інтегральний оптоелектронний комутатор на ДМОН-транзисторах. *Політанський Л. Ф., Лесинський В. В.* (23)

Системи передавання та обробки сигналів

Система передачі цифрової інформації на основі багаторівневих сигналів з компактним спектром. *Сукачов Е. О., Шкуліпа П. А.* (28)

Енергетична електроніка

Гетероструктури на основі GaAs з квантовими точками InAs для фотоелектричних перетворювачів. *Марончук І. Є., Доброжанський Ю. О.* (32)

Функціональна мікро- та наноелектроніка

Симетричний двокоординатний фотодіод. *Добровольський Ю. Г., Рюхтін В. В., Федінчук І. І., Юр'єв В. Г.* (35)

Дослідження термометричних характеристик GaP-діодів p^+-n -типу. *Краснов В. О., Шварц Ю. М., Шварц М. М., Копко Д. П., Єрохін С. Ю., Фонкіч А. М., Шутов С. В., Сипко М. І.* (38)

Технологічні процеси та обладнання

Передітаксіяна обробка підкладок GaSb для рідкофазного вирощування гомоепітаксійних шарів. *Андронова О. В., Курак В. В.* (41)

Джерело магнітних полів складної енергочастотної та поляризаційної структури. *Житник М. Є., Плаксін С. В., Погорела Л. М., Соколовський І. І., Яшин О. А.* (44)

Отримання ефективних катодолумінесцентних структур на базі плівкової технології. *Коваленко Л. Ф., Севаст'янов В. В., Хомченко В. С., Циркунов Ю. А.* (48)

Матеріали електроніки

Температурні та концентраційні залежності рухливості носіїв заряду у твердих розчинах $(\text{PbS})_{1-x}(\text{Sm}_2\text{S}_3)_x$. *Гасанов Г. А., Мургузов М. І.* (50)

Електропровідні тонкі плівки для BaCuTeF прозорих контактів у напівпровідниковій електроніці. *Готра З. Ю., Тейт Дж., Кікінеші Р., Закутаєв А. А., Ракобовчук Л. М.* (54)

Радіаційна модифікація структурної сітки халькогенідного скла. *Кавецький Т. С., Шпотьок О. Й., Литовченко П. Г., Цмоць В. М.* (58)

Метрологія. Стандартизація

Розрахунок характеристик рентгенівського випромінювання. *Душкін С. О., Куров О. М., Одінець В. О., Оробінський А. М.* (60)

CONTENT

New components for the electronic equipment

Thermoelectric converters of electrical and optical signals — a new class of thermoelectric devices. *Sher E. M.* (3)

Electronic means: investigations, development

The program of the crosstalk analysis in circuits PCB. *Sirotko V. K.* (11)

Integral optoelectronic switch based on DMOS-transistors. *Politsansky L. F., Lesinsky V. V.* (23)

Systems of transfer and processing of a signals

The system of transmission of digital information by using of multilevel signals with a compact spectrum. *Sukachov E. A., Shkulipa P. A.* (28)

Power electronics

Heterostructures on the basis of GaAs with quantum points of InAs for photo-electric transformers. *Maronchuk I. E., Dobrozhanskii Yu. A.* (32)

Functional micro- and nanoelectronics

The symmetric two-coordinate photodiode. *Dobrovolskii Yu. G., Ruytyn V. V., Fedinchuk I. I., Yur'ev V. G.* (35)

Investigation of thermometrical characteristics of p^+-n -GaP diodes. *Krasnov V. A., Shwarts Yu. M., Shwarts M. M., Kopko D. P., Erohin S. Yu., Fonkich A. M., Shutov S. V., Sytko N. I.* (38)

Technological processes and equipment

Preepitaxial substrate treatment of GaSb for liquid phase technology homoepitaxial growth. *Andronova O. V., Kurak V. V.* (41)

Methodology and design synthesis of source of the magnetic fields with complicated energy-frequency and polarization structure. *Zhitnik N. E., Plaksin S. V., Pogorelaya L. M., Sokolovskiy I. I., Yashin A. A.* (44)

Creation of the cathodoluminescence structures based on thin film technology. *Kovalenko L. F., Sevast'yanov V. V., Khomchenko V. S., Tzyrkunov Yu. A.* (48)

Materials of electronics

Temperature and concentration dependencies of mobility of charge carriers in solid solutions $(\text{PbS})_{1-x}(\text{Sm}_2\text{S}_3)_x$. *Hasanov G. A., Murguzov M. I.* (50)

Conductive BaCuTeF thin films for transparent contacts for semiconductor electronics. *Hotra Z. Y., Tate J., Kykyneshi R., Zakutayev A. A., Rakobovchuk L. M.* (54)

Radiation modification of chalcogenide glass structural network. *Kavetsky T. S., Shpotyuk O. I., Litovchenko P. G., Tsmots V. M.* (58)

Metrology. Standartization

The calculation of features of X-ray radiation. *Dushkin S. A., Kurov A. M., Odinets V. A., Orobinskiy A. N.* (60)

Д. т. н. Э. М. ШЕР

Россия, г. Санкт-Петербург, Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе
E-mail: Em@sher.ioffe.ru

Перепечатано из журнала
«Термоэлектричество», № 1, 2007

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ — НОВЫЙ КЛАСС ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Новый класс устройств для преобразования сигналов основан на применении термоэлектрического управления параметрами элементов с фазовыми переходами в узкой температурной области.

Термоэлектрическое управление фазовыми переходами

Термоэлементы обычно работают в условиях, когда разность температур ΔT «горячего» и «холодного» спаев близка к возможному максимуму $\Delta T_{\max}$. Однако в случае необходимости управления параметрами материалов с фазовыми переходами (как 1-го, так и 2-го рода) необходимое значение ΔT невелико. При небольшой разности температур и оптимальном токе максимальные коэффициенты охлаждения ϵ_c и нагрева ϵ_h термоэлемента примерно одинаковы и определяются уравнением Иоффе [1]

$$\epsilon = \frac{T}{\Delta T} f(z), \quad (1)$$

где T — температура холодного (или горячего) спаев термоэлемента;
 $f(z)$ — функция термоэлектрической добротности z .

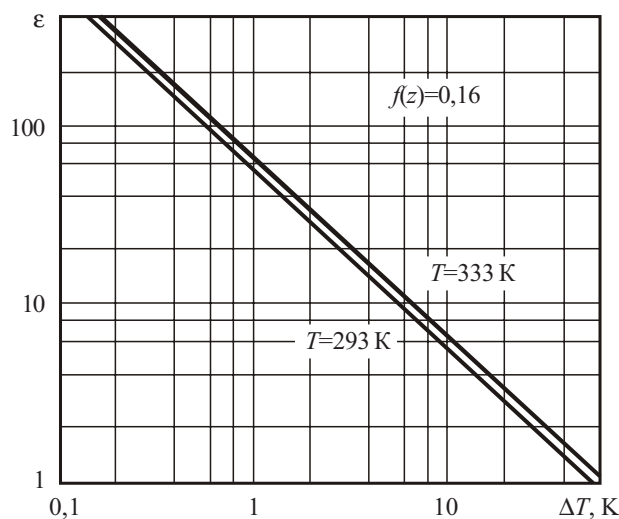


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициента охлаждения (нагрева) ϵ для термоэлемента, работающего как тепловой насос при небольшой ΔT

Из уравнения (1) и рис. 1 видно, что при значении $\Delta T \approx 1^\circ\text{C}$ (обычно, порядка ширины фазового перехода, рис. 2) значения коэффициента охлаждения (нагрева) на 1—2 порядка выше, чем при $\Delta T_{\max}$.

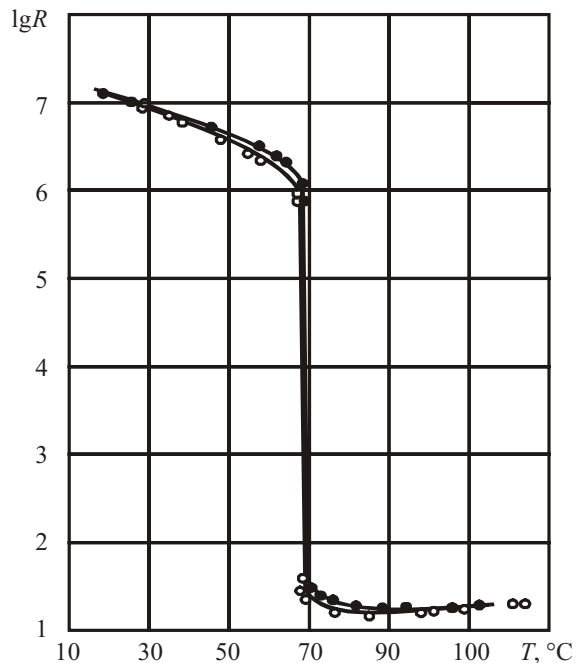


Рис. 2. Температурная зависимость сопротивления для элемента из VO_2 с фазовым переходом «металл—полупроводник» (ширина петли гистерезиса $\Delta T \leq 1^\circ\text{C}$)

При перекачке тепла тепловая мощность термоэлемента $Q = \epsilon W$, где W — электрическая мощность. Поэтому электрическая мощность, необходимая для управления процессом фазового перехода, в ϵ раз меньше тепловой. Это дает возможность с помощью небольшого электрического сигнала управлять разностью температур термоэлемента ΔT и, следовательно, параметрами (электрическими, оптическими, магнитными и т. д.) элементов с фазовыми переходами, что позволяет преобразовывать электрические сигналы. Таким образом колебания слабых электрических сигналов могут быть усилены и преобразованы в колебания оптических, электрических или магнитных сигналов. Мы назвали такие преобразования «термоэлектрическим преобразованием сигналов» [2]. Разработан ряд устройств, таких, как усилители и вы-

прямители небольших сигналов, генераторы, электрооптические преобразователи сигналов, запоминающие элементы электрических и оптических сигналов и т. д. [3—6].

Термоэлементы с преобразованием энергии при небольшой разности температур

Мощность, необходимая для поддержания режима небольшой ΔT для термоэлементов, резко снижается [1, 2] по сравнению с потреблением мощности в режиме $\Delta T_{\max}$. Из (1) видно, что когда необходимая ΔT на термоэлементе снижается, значение ϵ резко возрастает (рис. 1). При $\Delta T \rightarrow 0$ эффективность преобразования будет возрастать неограниченно. Это происходит потому, что термоэлемент работает как тепловой насос: он использует тепло окружающей среды, а энергия W расходуется только на перекачку тепла Q от одного спая к другому при равной на них температуре, то есть $W \approx 0$.

Для создания таких устройств необходимо помещать термоэлемент и элемент с фазовым переходом в термостат. Температура термостата должна быть равна температуре рабочей точки нелинейной характеристики $R(T)$ элемента с фазовым переходом. Тогда можно будет использовать преимущества режима термоэлемента с небольшим значением ΔT для управления элементом с фазовым переходом.

На рис. 3 приведена схема термоэлектрического преобразователя, работающего как усилитель или выпрямитель сигналов. Контролировать следует температуру элемента с фазовым переходом.

Рассмотрим принцип работы схемы. Входной сигнал ΔU_{inp} выделяет в термоэлементе 1 мощность $W = I U_{\text{inp}}$, где I — ток, проходящий через термоэлемент. Это приводит к выделению или поглощению (в зависимости от направления тока) на спаях 2 тепла $Q = \epsilon W$, где ϵ — коэффициент охлаждения или нагрева, соответственно.

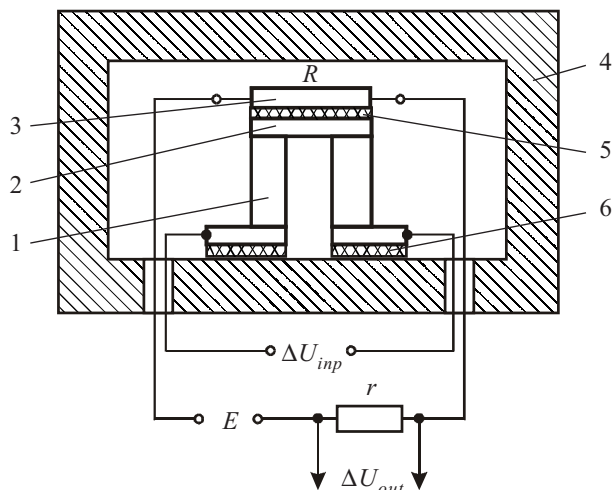


Рис. 3. Схема термоэлектрического преобразователя: 1 — термоэлемент; 2 — рабочий спай (коммутационная пластина); 3 — управляемый элемент с фазовым переходом «металл-полупроводник» (или позисторы); 4 — термостат; 5, 6 — электрически изолированные тепловые контакты; R — сопротивление управляемого элемента; r — сопротивление нагрузки; E — источник постоянного напряжения

Для современных термоэлектрических веществ $f(z) \approx 0,16$ и, например, при $\Delta T = 1$ К, из (1) и рис. 1 $\epsilon \approx 60$, т. е. количество тепла, проходящего через спай 2 (следовательно, и через элемент 3 с сопротивлением R), в 60 раз превышает мощность W , поступающую на вход схемы. При больших изменениях сопротивления R элемента с фазовым переходом (для окиси ванадия оно изменяется на 5 порядков, рис. 2) сигнал на выходе схемы многократно превысит сигнал на входе.

Получим соотношения для основных параметров таких преобразователей.

Сначала предположим, что джоулево тепло, выделяемое в элементе с фазовым переходом 3 (рис. 3), пренебрежимо мало по сравнению с теплом Пельтье на спаях термоэлемента. Тогда ток I , проходящий через термоэлемент, вызовет изменение температуры элемента

$$\Delta T_M = \alpha I T / K, \quad (2)$$

где α — термо-эдс;

K — теплопроводность термоэлемента.

Ток I выражается через изменение входного напряжения ΔU_{inp} как

$$I = \frac{1}{R_T} (\Delta U_{\text{inp}} - \alpha \Delta T_M), \quad (3)$$

где R_T — сопротивление термоэлемента.

Из (2) и (3), исключая I , находим ΔT_M как функцию сигнала на входе

$$\Delta T_M = \frac{\alpha T \Delta U_{\text{inp}}}{K R_T + \alpha^2 T}; \quad (4)$$

Учитывая, что $z = \alpha^2 / (K R_T)$, получим

$$\Delta T_M = \frac{\Delta U_{\text{inp}}}{\alpha} \cdot \frac{z T}{1 + z T}. \quad (5)$$

Тогда изменение выходного напряжения ΔU_{out} в связи с изменением температуры элемента ΔT_M составляет

$$\Delta U_{\text{out}} = \frac{E r}{(R + r)^2} \cdot \frac{dR}{dT} \Delta T_M. \quad (6)$$

Подставляя ΔT_M из (5) в выражение (6), получим коэффициент усиления напряжения

$$\beta_M = \frac{\Delta U_{\text{out}}}{\Delta U_{\text{inp}}} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{z T}{1 + z T} \cdot \frac{E r}{(R + r)^2} \cdot \frac{dR}{dT}. \quad (7)$$

Если выделением тепла в элементе 3 с сопротивлением R нельзя пренебречь, то изменение температуры ΔT будет меньше или больше, чем ΔT_M , в зависимости от того, выделяется (случай *a*) или поглощается (случай *b*) тепло на этом спая.

Тогда

$$\beta \approx \beta_M \frac{\Delta T_M}{\Delta T}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что в случае *a* мы можем получить значительный рост коэффициента усиления в результате положительной обратной связи. В определен-

ных условиях в этом случае могут генерироваться колебания.

При оценке коэффициента усиления мощности γ нельзя пренебрегать выделением тепла W_R на элементе 3 с сопротивлением R . Предположим, что оно равно выделению тепла W_r на нагрузке $W_r = W_R = W$ и колебание мощности составляет $W = 1/2 \Delta W$, где ΔW — нагрузка на термоэлемент:

$$\Delta W = \alpha I T - K T. \quad (9)$$

Согласно (2), $\alpha I T = K \Delta T_M$, следовательно,

$$\Delta W = K(\Delta T_M - \Delta T), \quad (10)$$

$$\gamma \approx \frac{\Delta W_{out}}{\Delta W_{inp}} = \frac{K(\Delta T_M - \Delta T)}{R I^2 + \alpha I \Delta T}. \quad (11)$$

Находя I из формулы (2): $I = K \Delta T_M / (\alpha T)$ и обозначив $\Theta = \Delta T / \Delta T_M$, после простых преобразований получим:

$$\gamma \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{\Delta T_M} \cdot z T \cdot \frac{1 - \Theta}{1 + z T \Theta}. \quad (12)$$

Выше рассмотрены случаи, когда тепло Пельтье и тепло Джоуля имеют противоположные знаки.

В случае, когда эти виды тепла суммируются, $\Delta T > \Delta T_M$ и

$$\gamma \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{\Delta T_M} \cdot z T \cdot \frac{\Theta - 1}{1 + z T \Theta}. \quad (13)$$

Анализ выражений (7) и (13) показывает, что в настоящее время вполне реально получить усиление напряжения и мощности в 10^2 — 10^3 раз. Оптимальные параметры материалов термоэлементов, которые обеспечивают эффективное преобразование сигналов, отличаются от параметров материалов, используемых для эффективного преобразования энергии.

Как видно из (7), коэффициент усиления напряжения β_M пропорционален выражению $\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{z T}{1 + z T}$, которое обозначим как δ .

На рис. 4 оптимум δ (в первом приближении, без учета электронной теплопроводности и вырождения

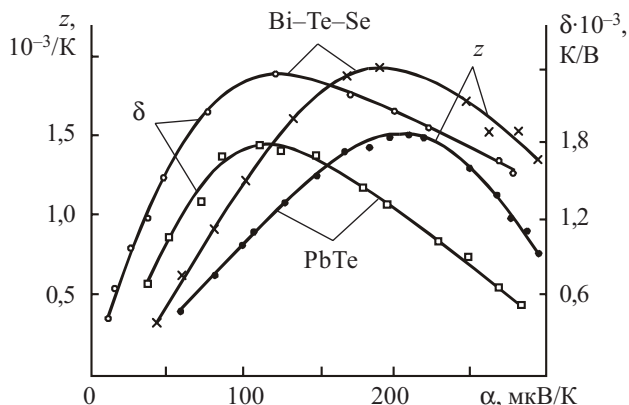


Рис. 4. Зависимости $z=f(\alpha)$ и $\delta=f(\alpha)$ для устройств с термоэлектрическим управлением элементами с фазовым переходом (из Bi-Te-Se и PbTe)

электронного газа) лежит в области меньших значений термо-эдс ($\alpha=80$ — 130 мкВ/К), чем оптимум z (при $\alpha \approx 200$ мкВ/К).

На основе этих принципов возможна разработка выпрямителей, преобразователей света, элементов памяти, генераторов и других преобразователей сигналов, требующих небольших затрат мощности для управления большими сигналами. Описание некоторых из них приведены ниже.

Термоэлектрический усилитель и выпрямитель малых сигналов

Особенности термоэлементов, работающих при небольшой разности температуры, позволяют создать термоэлектрический усилитель и выпрямитель малых сигналов.

Конструктивная схема этих устройств аналогична схеме, приведенной на рис. 3.

Термоэлемент 1 с ветвями из сплавов на основе Bi_2Te_3 припаян к внутренней стенке термостата 4 с помощью электрически изолированного теплового контакта 6. Элемент 3 с фазовым переходом «металл—полупроводник» (или другой элемент с нелинейной характеристикой) соединен через электрически изолированный тепловой контакт 5 с рабочим спаем 2 термоэлемента 1.

Небольшой входной переменный сигнал ΔU_{inp} подается на термоэлемент. Управляемый элемент 3 последовательно соединен с источником питания E и нагрузкой с сопротивлением r , с которой снимается выходной сигнал ΔU_{out} .

Температурные зависимости сопротивления используемых элементов показаны на рис. 5.

Для усиления малых сигналов температура термостата регулировалась так, чтобы значение сопротивления R элемента 3 (рис. 3) лежало в пределах линейного участка зависимости $R(T)$. Термоэлемент, работая в режиме малой ΔT , перекачивает тепло, которое во много раз превышает мощность входного сигнала. Это значительно снижает сопротивление элемента 3 с фазовым переходом и, соответственно, при-

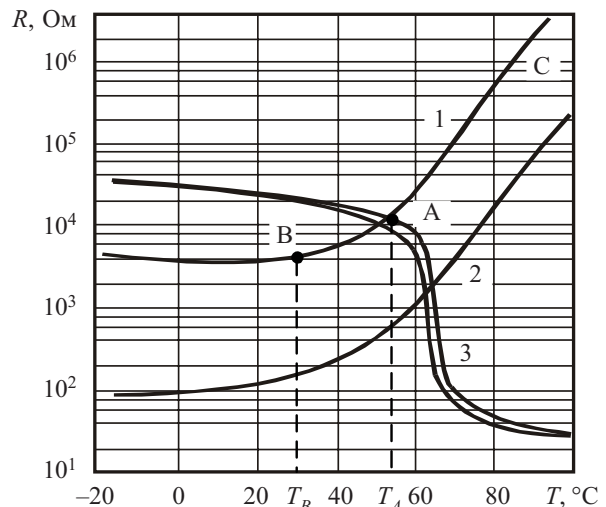


Рис. 5. Температурная зависимость сопротивления различных позисторов (1, 2) и элемента из VO_2 с фазовым переходом «металл—полупроводник» (3)

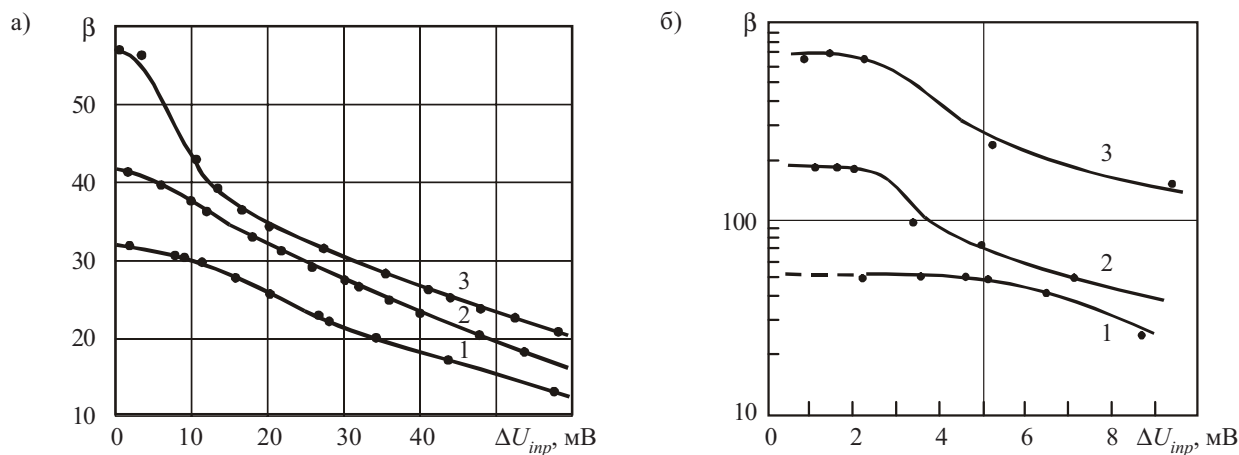


Рис. 6. Зависимость коэффициента усиления β от изменения напряжения на входе усилителя ΔU_{inp} : а — для позисторов; б — для элементов из VO_2 с фазовым переходом «металл–полупроводник»

водит к значительному росту выходного сигнала ΔU_{out} , т. е. к усилению входного сигнала ΔU_{inp} . Таким образом можно получить усиление электрического сигнала в несколько десятков, сотен и даже более раз.

На рис. 6 представлена экспериментальная зависимость коэффициента усиления устройств с различными управляемыми элементами.

На рис. 6, а видно, что коэффициент усиления β устройства с позисторами несколько падает с ростом входного напряжения ΔU_{inp} . Это связано с повышением температуры позистора, что изменяет его рабочие характеристики.

На рис. 6, б зависимости 1, 2, 3 относятся к элементам с фазовым переходом «металл–полупроводник», имеющим разную крутизну отрезка перехода из полупроводникового в металлическое состояние. Наименьшую крутизну этого отрезка имеет элемент, соответствующий графику 1, наибольшую — графику 2. Падение коэффициента усиления устройства с ростом ΔU_{inp} связано с тем, что сопротивление элемента выходит за пределы переходного участка «металл–полупроводник» с большой крутизной (рис. 5, кривая 3 за пределами петли гистерезиса).

При использовании элементов с фазовым переходом «металл–полупроводник», имеющих еще более резкую зависимость сопротивления от температуры, можно повысить коэффициент усиления до тысячи и более раз.

Одним из важных преимуществ таких устройств является то, что взаимодействие управляемого элемента и термоэлемента обеспечивается только за счет перекачки тепла (см. рис. 3). Благодаря этому осуществляется полная электрическая развязка входа и выхода.

Для выпрямления сигнала устройством по схеме 3 температуру термостата регулируют так, чтобы она находилась вблизи температуры точки перегиба зависимости $R(T)$ на рис. 5: для элемента с фазовым переходом «металл–полупроводник» — T_A , для позисторов — T_B . Видно, что для элемента с фазовым переходом малые изменения T вызывают существенные изменения R .

В этом случае термоэлемент также работает в режиме небольшой ΔT , температура его рабочего спая изменяется при изменении входного сигнала на ΔU_{inp} и колеблется вблизи температуры точки перегиба зависимости $R(T)$.

Выпрямление входного сигнала происходит с коэффициентом выпрямления, примерно равным разности коэффициентов усиления устройства при значениях T , соответствующих участкам с большим и малым искривлением графика зависимости $R(T)$. Графики на рис. 7 показывают, что рост коэффициента выпрямления K для устройств с позисторами связан с резким возрастанием зависимости сопротивления от температуры при $T > T_B$ (рис. 5). Той же причиной можно объяснить рост K на первоначальном участке для элемента с фазовым переходом «металл–полупроводник» ($T < T_A$, рис. 5). Затем рост K уменьшает-

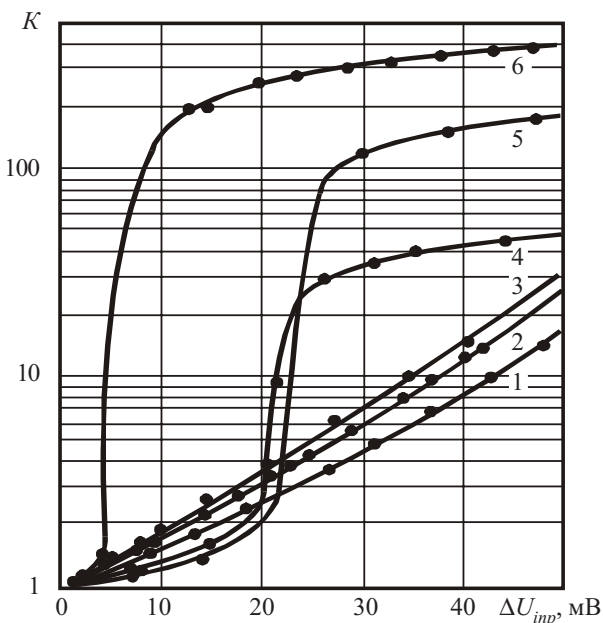


Рис. 7. Зависимость коэффициента выпрямления K от изменения входного напряжения ΔU_{inp} : 1—3 — для позисторов; 4—6 — для элементов с фазовым переходом «металл–полупроводник»

ся из-за небольшого изменения наклона графика зависимости $R(T)$ вдали от точки перегиба.

Таким образом, можно получить выпрямление небольших сигналов — от 5 мВ. Это одно из преимуществ таких выпрямителей, поскольку полупроводниковые диоды не выпрямляют сигналы переменного напряжения величиной менее 0,5 В.

Быстродействие термоэлементов в устройстве, работающем в режиме небольшой ΔT , зависит от доступных размеров экструдированных ветвей (при оптимальном токе). Например, при небольшой ΔT (до 0,1 К) и при высоте ветвей термоэлементов около 1 мм можно обеспечить функционирование таких устройств в диапазоне частот 10^2 — 10^3 Гц.

Термоэлементы, работающие при небольшой разности температур, для управления оптической прозрачностью

Оптический метод обработки информации позволяет:

- проводить параллельную обработку двумерной информации;
- сократить время отклика;
- проводить такие операции как преобразование Фурье и корреляционный анализ двумерной информации в реальном времени.

Когерентный корреляционный анализ может проводиться с помощью голографического сопряженного фильтра. Для одного из основных элементов оптического коррелятора — пространственного модулятора света — удобно использовать термический хромовый элемент (устройство) PhTIROS [7]. Физической основой работы этого устройства является фазовый переход «металл–полупроводник», который имеет место в оксидах ванадия при удобной для практического применения температуре около 60°C. Вещество элемента PhTIROS представляет собой тонкопленочную структуру оксидов ванадия, наносимую на отражающий нижний слой металла. При фазовом переходе «металл–полупроводник» оптические параметры вещества PhTIROS резко изменяются и позволяют записать и картографировать оптическую информацию [7].

Вещество устройства PhTIROS обладает необходимым комплексом свойств для применения в качестве пространственного модулятора света: обратимость, возможность работы в качестве постоянного запоминающего устройства, высокое оптическое разрешение и чувствительность, высокое быстродействие. Однако при реализации такого оптического коррелятора возникают трудности, главным образом, из-за невозможности его эффективного температурного управления.

Мы можем заметно улучшить характеристики этого устройства, используя режим работы термоэлементов при небольшой разности температур и реверсируя один из источников тока для попеременного охлаждения и нагрева элемента PhTIROS. Для этой цели термоэлементы с нанесенными на их рабочие спаи элементами PhTIROS были расположены в термостате с температурой на 1—2 градуса ниже, чем

температура середины петли гистерезиса PhTIROS, ширина которой около 3 К.

Термобатарея состояла из шести экструдированных элементов высотой примерно 2 мм. Элемент PhTIROS площадью около 0,3 см² контролировался при колебаниях температуры рабочих спаев 2—3 К. При такой частоте ввода и стирания оптических изображений на устройстве PhTIROS требовалось напряжение примерно 30 мВ при токе около 0,2 А. Затраченная мощность управления составляла всего 6 мВт. Для сравнения следует указать, что если не использовать условие небольшой ΔT и реверсирования источника тока, то соответствующая затрачиваемая мощность возрастет более чем на порядок.

Таким образом, предложенный функциональный режим работы термоэлементов для контроля оптической прозрачности позволяет получить более чем десятикратное усиление мощности. Частота изменения записанного изображения на элементе PhTIROS с помощью термоэлектрического устройства может достигать значения 25—30 Гц [8, 9] и достаточна для эффективного управления оптической прозрачностью.

Термоэлектрический генератор электрических и оптических сигналов

Экспериментальная модель такого устройства показана на рис. 8. В его состав входят элементы из VO₂ с фазовым переходом «металл–полупроводник», сопротивление которого меняется скачкообразно, и интерференционные элементы PhTIROS-типа с одинаковой температурой фазового перехода «металл–полупроводник». Работа этого устройства заключается в следующем. Температура термостата устанавливается выше температуры фазового перехода элементов 3 и 5, 6 из полупроводникового в металлическое состояние. Первоначально элемент 3 находится в металлическом (низкоомном) состоянии. При подключении источника питания к термоэлементу через него проходит ток, и тепло Пельтье поглощается на рабочем спае. Элемент 3 является охлаждающим и переходит в полупроводниковое (высокоомное) состояние. Затем ток, проходящий через термоэлемент, рез-

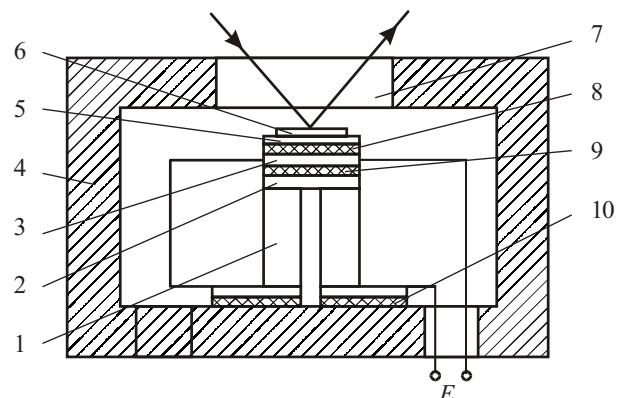


Рис. 8. Принципиальная схема термоэлектрического генератора:

1 — термоэлемент; 2 — рабочий спай; 3 — элемент с фазовым переходом «металл–полупроводник»; 4 — термостат; 5, 6 — элемент PhTIROS; 7 — окошко термостата; 8—10 — электрически изолированные тепловые контакты; E — источник питания

ко падает, охлаждение прекращается, и устройство возвращается в металлическое состояние. Весь процесс повторяется, и таким образом обеспечиваются недемпфированные электрические колебания, которые снимаются с термоэлемента.

Температурные колебания рабочего спая термоэлемента передаются к интерференционному элементу 5, 6 PhTIROS, который находится в хорошем тепловом контакте с рабочим спаем 2. При освещении его поверхности монохроматическим излучением начинаются колебания выходного оптического сигнала. Эти колебания вызваны быстрым изменением коэффициента отражения от прямой и противоположной дорожки элемента PhTIROS с фазовым переходом «металл–полупроводник».

В испытанной экспериментальной модели были использованы экструдированные термоэлементы и элемент с фазовым переходом «металл–полупроводник» (пластина $0,7 \times 0,5$ см и толщиной $2 \cdot 10^{-2}$ см), удельное сопротивление которого в металлическом состоянии составляло 10^{-2} Ом·см. Интерференционные элементы PhTIROS размером $0,1 \times 0,1$ см приклеивались к рабочим спаям 2. Электрические колебания частотой 5–6 Гц возникали при включении источника питания. Модуляция коэффициента поверхностного отражения элементов PhTIROS такой же частоты наблюдалась при их освещении лучом He–Ne-лазера.

Следовательно, такой генератор, основанный на совместной работе теплового насоса (элемента Пельтье) и элементов с фазовым переходом «металл–полупроводник» обеспечивает низкую частоту колебаний при существенной простоте конструкции.

Контроль оптического сигнала с помощью электрического

Термоэлементы, работающие в режиме небольшой ΔT , удобно применять и для контроля интенсивности световых лучей. С помощью электрического сигнала небольшой мощности и напряжения можно контролировать широкий диапазон оптических сигналов, используя элементы PhTIROS.

В интерференционном элементе PhTIROS в области фазового перехода «металл–полупроводник» оптический сигнал может создавать сильные и обратимые изменения коэффициента отражения [7]. Спектральная зависимость коэффициента отражения элемента PhTIROS при разной температуре показана на рис. 9. Слегка изменяя состав оксидов в элементе PhTIROS, можно сдвинуть минимум кривой с обеих сторон от температуры фазового перехода. При этом

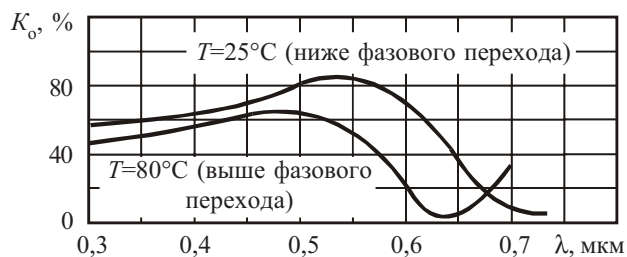


Рис. 9. Зависимость коэффициента отражения элемента PhTIROS от длины волны

качественная картина (рисунок) спектральной зависимости коэффициента отражения останется без изменений. В элементе PhTIROS, используемом для измерений, длина волны для минимума коэффициента отражения после фазового перехода «металл–полупроводник» была равна длине волны излучения He–Ne-лазера ($0,63$ мкм).

Принцип построения термоэлектрического устройства для управления коэффициентом отражения показан на рис. 10.

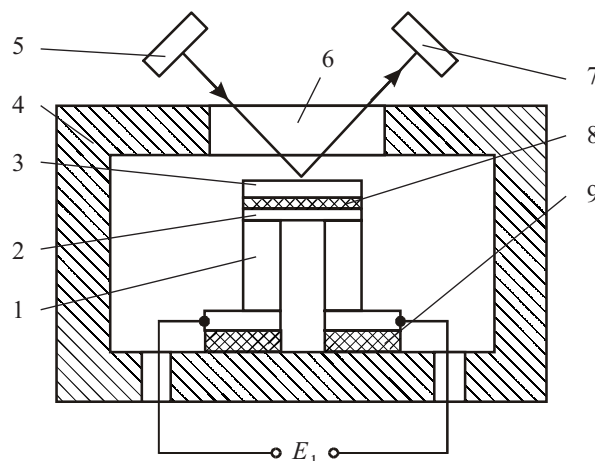


Рис. 10. Принципиальная схема термоэлектрического устройства для управления коэффициентом отражения: 1 — термоэлемент; 2 — рабочий спай; 3 — элемент PhTIROS; 4 — термостат; 5 — He–Ne-лазер; 6 — окошко термостата; 7 — датчик излучения; 8, 9 — электрически изолированные тепловые контакты; E_1 — управляющий сигнал

Температура термостата регулируется и выбирается вблизи температуры фазового перехода элемента 3.

Переход элемента PhTIROS из фазового состояния «металл» в состояние «полупроводник» и обратно осуществляется при подаче на термоэлемент небольшого напряжения прямой или обратной полярности. При этом термоэлемент, соответственно, нагревается или охлаждается. Коэффициент отражения элемента PhTIROS в экспериментальной модели устройства составлял около 40% для температур ниже температуры фазового перехода и около 1% для температур выше фазового перехода (рис. 9), т. е. изменялся почти в 40 раз. Такое управление коэффициентом отражения выполнялось входным электрическим сигналом около 5 мВ, а потребляемая мощность составила почти 0,3 мВт.

Следует подчеркнуть, что в описанных устройствах энергия управления оптическими сигналами (благодаря применению указанного функционального режима термоэлементов) на 1–2 порядка меньше, чем энергия, затрачиваемая в традиционном режиме управления.

Термоэлектрическое управление сегнетоэлектрическим и магнитным фазовыми переходами

Некоторые дополнительные возможности термоэлектрического управления предоставляют элементы с сегнетоэлектрическими и магнитными фазовыми переходами. На основе этих элементов и с помощью

эффекта Пельтье при небольшой разности температур можно создать устройства, аналогичные рассмотренным выше.

Температурный диапазон, в котором можно использовать сегнетоэлектрические и магнитные фазовые переходы, намного шире, чем диапазон для фазового перехода «металл–полупроводник». Свойства материала, которые характеризуются крутизной сегнетоэлектрического и магнитного фазового перехода, шириной петли гистерезиса и т. д., также открывают дополнительные потенциальные возможности. Управление магнитным фазовым переходом позволяет получать низкочастотную модуляцию магнитного потока.

На рис. 11, 12 показаны элементарные схемы, основанные на управлении с помощью эффекта Пельтье элементами с сегнетоэлектрическим или магнитным фазовым переходом, которые могут работать как усилитель, выпрямитель или преобразователь частоты.

На рис. 11 элемент 3 — конденсатор с сегнетоэлектрическим материалом ($0,65 \text{ PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3 +$

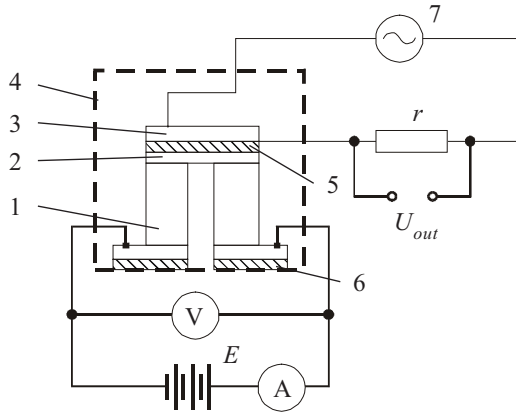


Рис. 11. Термоэлектрический преобразователь сигналов с сегнетоэлектрическим элементом:

1 — термоэлемент; 2 — рабочий спай; 3 — сегнетоэлектрический элемент; 4 — термостат; 5, 6 — электрически изолированные тепловые контакты; 7 — генератор аудиочастот

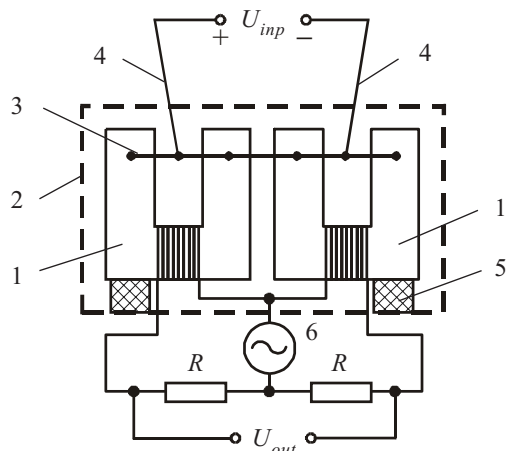


Рис. 12. Термоэлектрический усилитель и преобразователь частоты с магнитным элементом:

1 — железные сердечники; 2 — термостат; 3 — никелевая проволока; 4 — константановая проволока; 5 — немагнитные, электрически изолированные тепловые контакты; 6 — генератор аудиочастот

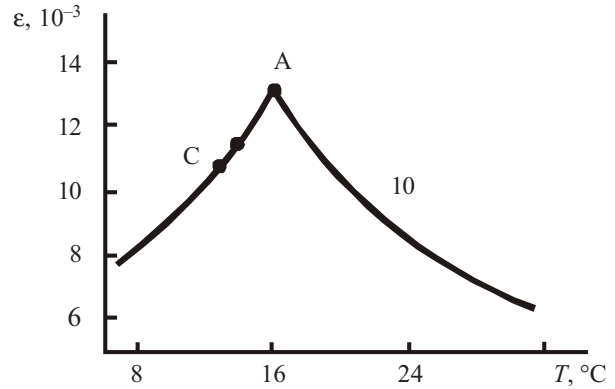


Рис. 13. Зависимость диэлектрической постоянной сегнетоэлектрика от температуры

$+0,35 \text{ PbSc}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_{1/3}$). Зависимость диэлектрической постоянной ϵ этого соединения от температуры T показана на рис. 13. Если температура термостата выбрана таким образом, что рабочая точка находится на линейном участке, схема работает как усилитель. Если температура термостата выбрана так, что рабочая точка соответствует точкам А или С зависимости $\epsilon(T)$, устройство будет работать как преобразователь частоты или выпрямитель.

Применение магнитного фазового перехода для преобразования сигналов показано на рис. 12. Здесь приведена принципиальная схема управления магнитным фазовым переходом в никеле с помощью эффекта Пельтье. П-образные сердечники 1 выполнены из пермаллоя; термостат 2 поддерживает температуру, близкую к точке магнитного фазового перехода в никеле. Константановая проволока 4 в контакте с никелевой 3 образуют управляющий термоэлемент. В зависимости от величины и направления входного сигнала, изменяющего температуру вблизи точки Кюри в никеле, разрушается либо правая, либо левая магнитная схема, и поэтому нарушается равновесие моста. Таким образом, на выходе появляется сигнал.

Устройство, собранное по такой схеме, работает как усилитель, если рабочая точка находится на линейном участке температурной зависимости магнитной восприимчивости никеля, либо как выпрямитель или преобразователь частоты, если рабочая точка находится на искривленном участке зависимости. Этот тип преобразователя может работать в области высоких температур, поскольку точка Кюри для никеля составляет 370°C , для железа — 770°C (при замене никеля железом).

Как известно, время распространения теплового процесса пропорционально квадрату длины ветвей термоэлемента и обратно пропорционально температуропроводности материала. В полупроводниковых термоэлементах, используемых в настоящее время, температуропроводность a составляет $10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$ (длина ветвей $l=1 \text{ мм}$, а константа времени $\tau \approx 1 \text{ с}$). В металлах и их сплавах $a=10^{-2}-10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$, длина термоэлектрических ветвей может составлять до 10^{-4} см , следовательно, можно получить $\tau=10^{-4}-10^{-5} \text{ с}$.

Итак, при микронном размере ветвей термоэлемента, рабочая частота преобразователей может возрасти до 10^4-10^6 Гц . В ряде исследований было по-

казано [3—6], что такое уменьшение размеров не снижает эффективности термоэлемента, а напротив, улучшает ее.

Выводы

Рассмотрена новая область применения термоэлектричества.

В предложенных функциональных режимах при небольшой разности температур термоэлементы работают с большими значениями коэффициентов охлаждения или нагрева, обеспечивая высокие коэффициенты преобразования и эффективное управление устройствами на основе различных типов элементов с фазовыми переходами, имеющих нелинейные характеристики.

Реализованы устройства, принадлежащие к новому типу термоэлектрических преобразователей информации. К ним относятся: усилители и выпрямители небольших электрических сигналов, преобразователи электрического сигнала в оптический, преобразователи оптического сигнала в электрический, термоэлектрические запоминающие элементы, устройство, позволяющее осуществлять управление оптической прозрачностью, термоэлектрические преобразователи частоты, анализатор и компаратор небольших сигналов и многие другие.

Для таких преобразователей информации возможный диапазон рабочих температур — от температуры жидкого азота до 1500°C в зависимости от выбранного вещества для термоэлементов. Существует много полупроводниковых и металлических веществ, в которых фазовый переход происходит при одной из температур, лежащих в указанном диапазоне (для Bi—Sb — до 100°C, для Bi₂Te₃ — до 300°C, для PbTe, GeTe — до 600°C, для SiGe — до 900°C, для бора и боридов — до 1500°C).

Полупроводниковые устройства, основанные на транзисторах и интегральных схемах, обычно могут работать при температуре не выше 110°C.

Термоэлементы и элементы с фазовым переходом намного более устойчивы к действию различного излучения, чем обычные полупроводниковые. Это объясняется тем, что в веществах полуметаллических термоэлементов и устройств с фазовым переходом плотность носителей тока составляет 10^{19} — 10^{20} см⁻³, что на несколько порядков (до семи) выше, чем в обычных полупроводниковых устройствах

(10^{14} — 10^{16} см⁻³). В связи с этим такие термоэлектрические устройства могут работать в экстремальных условиях — при высоких температурах и высоких уровнях радиации.

Одним из преимуществ устройств, рассматриваемых в данной статье, является полная электрическая развязка входа и выхода.

В настоящее время частотное преобразование электрических сигналов в описанных устройствах с применением экструзированных термоэлементов не превышает 20—25 Гц. Эту частоту можно увеличить до 10^4 — 10^6 Гц, используя элемент с фазовым переходом и петлей гистерезиса шириной меньше 1 К, а также применяя термоэлементы микронного размера.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Иоффе А. Ф. Термоэлементы и термоэлектрическое охлаждение. — Лондон, 1957.
2. Sher E. M. Thermoelectric conversion of signals // Proceed. of the First European Conf. on Thermoelectrics. — Cardiff, UK. — 1987. — P. 277—282.
3. Sher E. M. Electrical properties of dispersed porous oxides of alkaline-earth metals with high thermoelectric efficiency // Proceed. of the 15th International Conf. on Thermoelectrics. — Pasadena, CA, USA. — 1996. — P. 168—171.
4. Bulat L. P., Sher E. M. Increase of thermoelectric efficiency in macroscopically inhomogeneous medium // Proceed. of the 19th International Conf. on Thermoelectrics. — Cardiff, UK. — 2000. — P. 209—213.
5. Sher E. M. Thermoelectric properties of the transition metal oxides in finely dispersed state // Proceed. of the 20th International Conf. on Thermoelectrics. — Baipin, China. — 2001. — P. 184—186.
6. Bulat L. P., Sher E. M. Some aspects of phase transitions control by thermoelectric method // Proceed. of the 21st International Conf. on Thermoelectrics. — Long Beach, USA. — 2002. — P. 500—503.
7. Бугаев А. А., Захарченя Б. П., Чудновский Ф. А. Фазовый переход металл-полупроводник и его применение. — Л.: Наука, 1979.
8. Гальперин В. Л. Нестационарные процессы охлаждения в термоэлектрических устройствах импульсного режима // Тр. 14-й Междунар. конф. по термоэлектричеству. — Санкт-Петербург, Россия, 1995. — С. 446—448.
9. Гальперин В. Л., Хахаев И. А., Чудновский Ф. А., Шадрин Е. Б. Контроль фазового перехода металл-полупроводник с помощью быстродействующего термоэлектрического охладителя // Журнал технической физики. — 1998. — Т. 68, № 2. — С. 110—115.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Аляутдинов М. А., Галушкин А. И., Казанцев П. А., Остапенко Г. П. Нейрокомпьютеры: от программной к аппаратной реализации. — М.: Горячая линия — Телеком, 2008. — 152 с.

В книге представлена история развития и перспективы развития аппаратных реализаций нейрокомпьютеров в России и зарубежных странах. Приведен обзор современных разработок, в том числе рассмотрены вопросы построения нейрокомпьютеров на базе программируемых логических интегральных схем современных специализированных графических плат и процессоров Cell.

Для широкого круга читателей, будет полезна студентам и аспирантам соответствующих специальностей.



К. т. н. В. К. СИРОТКО

Россия, г. С.-Петербург, «Прософт–Технолоджи»
E-mail: sirotko.vk@mail.ru

Дата поступления в редакцию
11.03 2008 г.

Оппонент д. т. н. Л. Н. КЕЧИЕВ
(МИЭМ, г. Москва)

ПРОГРАММА АНАЛИЗА ПЕРЕКРЕСТНЫХ ПОМЕХ В ЦЕПЯХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Дан обзор существующих программ анализа перекрестных помех в цепях печатных плат, в том числе плат повышенного быстродействия. Предложена разработанная программа АПП.

Программа предназначена для анализа перекрестных помех в цепях печатных плат (ПП), в том числе и ПП повышенного быстродействия [1].

При анализе перекрестных помех необходимо определить величину помех на входах всех микросхем печатной платы, вызванных влиянием соседних цепей, в которых проходят сигналы. При этом необходимо учитывать, что часто одна микросхема передает импульсы нескольким другим, и проводники, соединяющие их, образуют разветвленную схему, а для ПП повышенного быстродействия необходимо учитывать распределенный характер линий передачи сигналов, состоящих из систем прямых и обратных проводников, соединяющих микросхемы.

В последнее время все большее применение находит разработанный в России топологический трассировщик ПП [2], с помощью которого может быть получена недостижимая в других известных трассировщиках плотность трассировки ПП — за счет размещения проводников по кратчайшим расстояниям под произвольными углами, минимизации количества межслойных переходов и использования дугообразных проводников. Описанная в настоящей статье программа позволяет с достаточной для практики точностью решать задачу анализа перекрестных помех и для таких ПП, превосходя в этом известные программы.

На основе информации о топологии печатной платы, толщине слоев металлизации и изолирующих слоев, об электрических характеристиках материалов слоев, размещении шин и проводников цепей питания и заземления, о частоте следования и длительности импульсов сигналов в программе производится оценка возможной величины перекрестных помех для всех сигнальных цепей для наихудшего случая, когда на входах микросхем, для которых определяются величины помех, отсутствуют сигналы.

Для всех цепей ПП в программе формируются эквивалентные схемы, включающие эквивалентные схемы линий передачи, соединяющих микросхемы, контактных площадок, к которым подключены выводы

микросхем, и переходных отверстий. Эквивалентные схемы линий передачи представляют собой симметричные цепные схемы, такие же, как в [1]. Количество ячеек в этих цепных схемах выбирается таким, что обеспечивает достаточную для практики точность определения перекрестных помех для ПП, спроектированных топологическим трассировщиком [2], и для ПП повышенного быстродействия [1]. Количество узлов в эквивалентной схеме цепи может достигать нескольких тысяч.

Определение напряжений перекрестных помех производится на нескольких частотах с помощью быстродействующего и точного алгоритма редукции схем, разработанного автором.

Обзор существующих программ анализа перекрестных помех в цепях ПП

Во многих системах проектирования ПП имеются программы анализа перекрестных помех в цепях. Можно выделить три типа программ:

1) интегрированные с программами трассировки, в которых определение перекрестных помех производится в процессе трассировки цепей, и каждая трасса корректируется, как только вычисленное значение помехи превосходит некоторую заданную величину; например, следующий отрезок проводника прокладывается с увеличенным зазором по отношению к генерирующей помехи цепи;

2) интегрированные в систему проектирования ПП, в которых определение перекрестных помех производится после окончания трассировки всех цепей ПП; далее определяются цепи, наиболее подверженные помехам, и производится повторная трассировка этих цепей;

3) автономные программы, которые производят анализ перекрестных помех полностью спроектированных ПП.

В широко известной программе трассировки SPECCTRA [3] применяется программа анализа перекрестных помех первого типа. Влияние одного проводника на другой трактуется как шум.

Рассматриваются два случая влияния отрезков проводников друг на друга:

- параллельные отрезки проводников в одном и том же слое;
- параллельные отрезки проводников в смежных слоях.

В правилах проектирования задаются условия, определяющие предельно допустимую длину параллельных участков проводников. Такие условия составляются для каждого возможного зазора между параллельными отрезками проводников на каждом слое и между параллельными участками проводников на смежных слоях. Если в процессе прокладки проводника цепи какое-либо условие нарушается, следующий отрезок проводника прокладывается с увеличенным зазором по отношению к генерирующей помехи цепи. Таким образом автоматически обеспечивается, что помехи на любом отрезке проводника, параллельном отрезку проводника другой цепи, будут меньше некоторой заданной величины. Однако каково соотношение между этой величиной и действительно допустимой величиной помех, неясно.

Кроме того, при анализе перекрестных помех важно напряжение помехи на входе микросхемы, а в цепи может оказаться несколько отрезков проводников, на которых возникают помехи, и тогда напряжение помехи на входе микросхемы может оказаться больше допустимой величины.

Таким образом, анализ перекрестных помех оказывается весьма приблизительным. Однако выбирая допустимую величину помехи достаточно малой, можно получить приемлемые для практики результаты. Важным преимуществом программы является автоматическое обеспечение допустимой величины помех в цепях ПП на этапе трассировки.

В программах анализа перекрестных помех в цепях ПП второго типа, например в программе фирмы Altium [4], необходимо выделять группу цепей, перекрестные помехи которых исследуются, указывать цепи-«агрессоры» и цепь-«жертву», что при большом количестве чувствительных к помехам цепей потребует большого количества манипуляций указателем на экране дисплея и многократных запусков программы.

Кроме того, анализ перекрестных помех проводится во временной области (при реальных импульсных сигналах), и помехи вследствие этого представляют собой смесь высокочастотных колебаний различных частот и амплитуд. Это затрудняет оценку возможности ложного срабатывания микросхемы, на входе которой появляется такая помеха.

В программах этого типа определяются напряжения помех на входах микросхем исследуемой цепи с помощью численного интегрирования уравнений цепи, в которых отрезки проводников, контактные площадки (КП), входы и выходы микросхем, а также взаимное влияние отрезков проводников, представлены их электрическими параметрами (сопротивлениями, емкостями и коэффициентами индукции).

Как показано в [5, с. 326], при численном интегрировании таких уравнений, если решение содержит «очень быструю» и «очень медленную» компоненты (а именно такие решения имеют уравнения даже двух связанных цепей ПП), возможны значительные погрешности, иногда приводящие к неверному результату. Преодолеть эти трудности можно за счет применения специальных методов численного интегриро-

вания, например использовать метод Гира [5, с. 463]. Однако сведений об обеспечении необходимой точности анализа перекрестных помех в цепях ПП в [4] не приводится.

Другим недостатком этих программ является отсутствие возможности анализа перекрестных помех в цепях, имеющих разветвления, т. е. когда к цепи подключены несколько входов микросхем. В результате не будут учтены помехи, генерируемые разветвлениями цепей.

В программах анализа перекрестных помех в цепях ПП третьего типа, например в программе Compliance фирмы Quantic EMC Inc. [6], производится анализ электрических и магнитных полей для плоских геометрических конструкций (отрезки проводников, планарные КП), для изломов и пересечений проводников, Т-образных соединений, печатных разъемов, переходных отверстий. На основе этого анализа полей составляются эквивалентные электрические схемы указанных элементов печатного монтажа в формате SPICE.

Далее составляются (с использованием этих эквивалентных схем) описания цепей ПП в формате SPICE и производится анализ во временной области электромагнитной совместимости цепей ПП и анализ искажений сигналов. Определяется также электромагнитное излучение ПП. При превышении допустимого уровня излучения диагностируется цепь или область ПП, вносящая наибольший вклад в уровень излучения. (Следует отметить высокую точность моделирования элементов печатного монтажа. Сообщается, что результаты моделирования совпадают с экспериментальными данными с точностью в несколько процентов.)

Так как программа является автономной, предусмотрен импорт описаний ПП из разных САПР (P-CAD, SPECCTRA, Mentor Board Station, OrCAD, Protel, PADS Power PCB и др.) и просмотр их.

Все рассмотренные программы анализа перекрестных помех в цепях ПП определяют перекрестные помехи только в тех цепях, отрезки проводников в которых размещаются под углами, кратными 45 градусам.

О цели создания и преимуществах программы АПП

Разработка программы анализа перекрестных помех в цепях ПП (АПП) была заказана С. Ю. Лузиным, под руководством которого был создан первый вариант программы трассировки ПП FreeStyle [2], основной особенностью которой была весьма плотная трассировка, обеспечиваемая за счет размещения отрезков проводников по кратчайшим путям в произвольных направлениях, минимизации количества переходных отверстий, использования дугообразных проводников.

У пользователей программы FreeStyle возникало опасение, что при такой плотной трассировке возможно значительное возрастание перекрестных помех, которое может привести к сбоям в работе цифровых узлов. Ни одна из существовавших тогда программ не обеспечивала анализ перекрестных помех для та-

ких ПП, да и в настоящее время, как видно из представленного обзора, не обеспечивает.

Однако автор имел опыт успешной разработки программ анализа характеристик многосвязных линейных схем [7] и функциональных устройств на поверхностных акустических волнах [8], в которых использовались эквивалентные схемы замещения элементов в виде симметричных цепных схем. Программы успешно применялись при проектировании радиоэлектронной аппаратуры на предприятии, где работал автор. Экспериментальная проверка рассчитанных по программам характеристик показала хорошие результаты.

Используя этот же подход (применение эквивалентных схем замещения элементов, в данном случае отрезков проводников, в виде симметричных цепных схем) автору удалось разработать описанную в статье программу.

Перекрестные помехи в цепях ПП представляют собой смесь синусоидальных сигналов различных амплитуд и частот, и сравнивать между собой такие помехи довольно сложно. Поэтому было решено использовать для оценки влияния одной цепи на другую синусоидальный сигнал частоты следования импульсов, а также синусоидальные сигналы, соответствующие нескольким гармоникам. Для каждой частоты проводился отдельный расчет. Это упрощает оценку возможной величины перекрестных помех в цепях ПП. Появляется возможность автоматической сортировки цепей по их чувствительности к помехам.

В программе определение перекрестных помех производится при условии, что все электрически длинные линии передачи согласованы. Для этого в программе предусмотрен расчет волновых сопротивлений для всех слоев анализируемой ПП с учетом ширины всех используемых в ПП проводников, что позволяет выбрать необходимые согласующие сопротивления.

Программа полностью автоматизирована и исключает необходимость ручных манипуляций пользователя с помощью указателя на экране по выбору анализируемых цепей, заданию видов и режимов анализа, форме и содержанию выводимой информации. Все это задается в файле формализованного технического задания (ФТЗ).

Типовое ФТЗ генерируется программой автоматически, и пользователь может перед началом анализа откорректировать его, изменяя нужным образом данные. Все данные ФТЗ снабжены подробными комментариями с указанием пределов их возможного изменения. Это значительно упрощает работу пользователя и не отвлекает его от осмысления результатов анализа. В начале работы программы или по ее окончании ФТЗ может быть выведено на печать.

В программе предусмотрена возможность выделения группы цепей, у которых помехи на входах микросхем превосходят заданную величину. Для этого в ФТЗ необходимо установить значение максимально допустимого напряжения помехи на входах микросхем. Имена этих цепей выводятся в файл РАП (результат анализа помех).

В этот же файл выводятся полные результаты анализа помех (количество цепей, количество отрезков проводников и КП, коэффициенты связей отрезков проводников, минимальное, среднее и максимальное значения напряжения помех на входах микросхем и др.).

Важным преимуществом программы является высокая скорость проведения анализа и достаточно высокая точность. Так, реализованная в настоящее время версия программы проводит полный анализ в частотной области взаимного влияния цепей двухсторонней ПП, содержащей 200 цепей, за 10 с.

Такие результаты получены за счет использования разработанного формата описания сигнальных цепей, в котором проводники соответствуют линиям с распределенными параметрами, КП соответствуют источнику, приемнику сигнала или промежуточному узлу цепи, переходные отверстия и соединения нескольких проводников в одной точке соответствуют узлам разветвления цепи, а также за счет использования точечного изображения ПП, представляющего собой символьный массив, в котором каждой точке изображения соответствует определенный символ. Так, цепочка символов «с» изображает отрезок проводника, группа символов «#» — КП и т. д.

Каждому символу «с» отрезка проводника соответствует Т-образная эквивалентная схема, состоящая из комплексов полных сопротивлений, определяемых на основе коэффициента самоиндукции этого отрезка проводника и его сопротивления, а также емкости и проводимости между прямым и обратным отрезками проводников линии передачи.

Аналогичным образом вводятся символы, имитирующие комплексы взаимных полных сопротивлений отрезков проводников. Таким образом рисунок печатной платы становится рисунком эквивалентной схемы, и оказываются возможными эквивалентные преобразования этой схемы, необходимые для определения напряжений сигналов и помех на входах элементов.

Эквивалентная схема проводника является неоднородной симметричной цепной схемой и при достаточно большом числе звеньев хорошо имитирует передачу сигналов и помех в линиях с распределенными параметрами. Расчеты помех по разработанной программе показали, что удовлетворительные результаты получаются при шаге сетки точечного изображения, равном половине ширины самого тонкого проводника. При этом количество звеньев эквивалентной неоднородной симметричной цепной схемы одной цепи для современных ПП может достигать нескольких тысяч. Все отрезки проводников цепей ПП представлены эквивалентными неоднородными симметричными цепными схемами, имеющими более 10 ячеек. Это гарантирует корректность моделей линий передач практически для всех ПП современных высокоскоростных цифровых систем. Быстрое и точное определение напряжений в узлах таких эквивалентных схем обеспечивается за счет применения метода редукции схем, рассматриваемого ниже.

Разработанная в настоящее время версия 8 программы АПП относится к третьей группе по рассмот-

ренной выше классификации, т. к. в ней предусмотрен импорт описаний ПП из САПР PCAD4.5. В то же время в ней предусмотрена возможность интеграции в САПР TороR [2]: имеется вход в программу АПП, при запуске с которого вместо полного описания ПП используется файл описаний цепей, сформированный в САПР TороR, а выходной файл программы АПП, содержащий полное описание результатов анализа перекрестных помех в цепях ПП, может быть передан в САПР TороR для корректировки цепей, помехи в которых превосходят допустимые значения. То есть, программа АПП имеет признаки, по которым она может быть отнесена ко второй группе по рассмотренной выше классификации.

После некоторой доработки возможно интегрирование программы АПП с программой трассировки САПР TороR. В этом случае программа АПП приобретает признаки программы первой группы по рассмотренной выше классификации, и программа трассировки САПР TороR будет работать аналогично программе SPECCTRA, но с более точным учетом величины перекрестных помех в цепях ПП.

Точечные изображения рисунков топологии ПП

Как указывалось выше, рисунок топологии цепи ПП соответствует рисунку эквивалентной электрической схемы этой цепи. Однако для обеспечения обработки этого рисунка в программе, а также с целью учета распределенного характера параметров проводников, необходимо разбить этот рисунок на достаточно мелкие элементы, для каждого из которых параметры можно считать сосредоточенными.

Наиболее простым способом решения этой задачи является преобразование рисунка топологии слоя ПП в точечное изображение (ТИ), напоминающее изображение на экране телевизора. Группы точек, находящиеся внутри круга, прямоугольника и других фигур, соответствующих КП, являются точечными изображениями КП, а цепочки точек являются точечными изображениями осевых линий отрезков проводников.

Каждая точка на изображении осевой линии отрезка проводника представляет отрезок проводника минимальной длины, который в дальнейшем будет называться элементарным отрезком проводника. Для элементарного отрезка проводника определяются, как будет показано ниже, параметры его эквивалентной электрической схемы.

Для обеспечения необходимой разрешающей способности ТИ необходимо выполнить условие

$$s \leq z/2, \quad (1)$$

где s — расстояние между смежными точками (s кратно $z/2$);

z — минимальный зазор между смежными отрезками проводников.

В программе создается символьный массив, каждый символ которого соответствует одной точке ТИ. В этом массиве размещаются ТИ всех слоев ПП. Для обеспечения высокого быстродействия программы АПП необходимо размещение этого массива в оперативной памяти.

В этом же массиве размещаются ТИ связей между смежными элементарными отрезками проводников, которые так же, как и отрезки проводников, представляют собой цепочки символов. Эти ТИ необходимы для ускорения расчетов комплексов взаимных полных сопротивлений.

Величина комплекса взаимного полного сопротивления между двумя элементарными отрезками проводников, при равной ширине проводников и одинаковых характеристиках диэлектрика и покрытия слоев, зависит от расстояния между ними и расстояния до обратного проводника. Расстояние до обратного проводника одинаково для всех проводников, размещенных на одном и том же слое. Поэтому комплекс взаимного полного сопротивления между двумя элементарными отрезками проводников одинаковой ширины, размещенными на одном и том же слое, зависит только от расстояния между ними.

Единицей измерения расстояний в ТИ ПП является величина s в условии (1), и поэтому расстояние между двумя элементарными отрезками проводников, измеренное этой единицей, будет целым числом. Так как имеет смысл рассматривать взаимные связи только между смежными близко расположенными отрезками проводников, это число лежит в диапазоне 4—60.

Поэтому для ускорения расчетов комплексов взаимных полных сопротивлений можно предварительно рассчитать их для всех возможных расстояний и всех слоев ПП, чтобы затем использовать при проведении эквивалентных преобразований цепей. Это и сделано в программе АПП.

В САПР TороR проводники при проведении трассировки размещаются не только под углами к горизонтальной оси ПП, кратными 45° , как в других САПР, но и, главным образом, под любыми другими, что обеспечивает недостижимую ранее плотность трассировки, уменьшение длины проводников и их взаимного влияния [2]. Кроме того, для сглаживания углов поворота трасс проводников в САПР TороR, наряду с прямолинейными отрезками проводников, широко используются дугообразные отрезки проводников.

Как уже говорилось выше, анализ перекрестных помех в цепях ПП при такой трассировке значительно сложнее, чем при обычно используемой трассировке, и может быть проведен лишь приближенно. Ни одна из существующих в настоящее время программ не обеспечивает проведения анализа электромагнитной совместимости цепей ПП, спроектированных в САПР TороR.

Эта задача приближенно решена в программе АПП за счет формирования ТИ отрезков проводников, замены дугообразных проводников последовательностью хорд, классификации направлений отрезков проводников и рационального выбора направлений отрезков линий, имитирующих комплексы взаимных полных сопротивлений между двумя элементарными отрезками проводников.

На рис. 1 показана используемая в программе АПП классификация направлений отрезков проводников. Толстыми линиями показаны обычно используемые

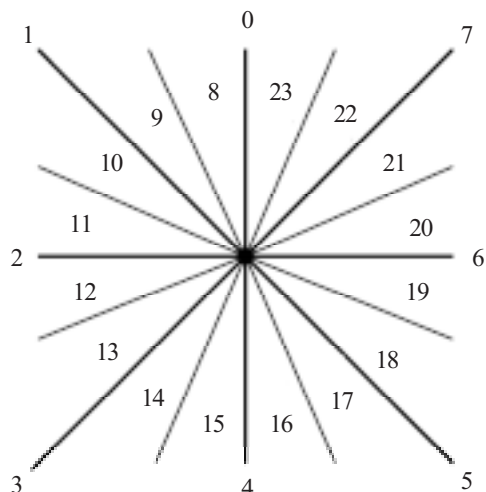


Рис. 1. Классификация направлений отрезков проводников

в САПР ПП направления отрезков проводников. Эти направления обозначаются в программе номерами 0...7. Числа 8...23, показанные на рис. 1 в секторах, разделяемых толстыми и тонкими линиями, обозначают отрезки проводников, имеющие направления лучей в соответствующих секторах. Номера этих направлений 8...23.

Отрезки проводников, имеющие номера направлений 8...23, в ТИ ПП отображаются комбинациями элементарных отрезков проводников, которые имеют номера направлений 0...7. Комбинация элементарных отрезков проводников, обеспечивающая максимально возможное приближение точек, соответствующих элементарным отрезкам проводников, к промежуточным точкам проводников, имеющих номера направлений 8...23, определяется в программе АПП при построении ТИ.

Как указывалось выше, взаимные связи между отрезками проводников в ТИ ПП, так же, как и отрезки проводников, отображаются цепочками символов, которые представляют собой отрезки линий, соответствующие расстоянию между элементарными отрезками проводников соседних цепей. Влияние отрезка проводника цепи на отрезок проводника соседней цепи зависит от расстояния и косинуса угла между ними.

Эквивалентные электрические схемы элементарных отрезков проводников, КП и переходных отверстий

Как указывалось выше, каждому элементарному отрезку проводника соответствует Т-образная эквивалентная электрическая схема, а влияние на каждый элементарный отрезок проводника одного или нескольких других элементарных отрезков проводников определяется объединением их эквивалентных схем, дополненных элементами, учитывающими это влияние.

На рис. 2 показана эквивалентная электрическая схема влияющих друг на друга элементарных отрезков проводников. Последовательные ветви в Т-образных эквивалентных электрических схемах элементарных отрезков представлены сопротивлениями r_l и

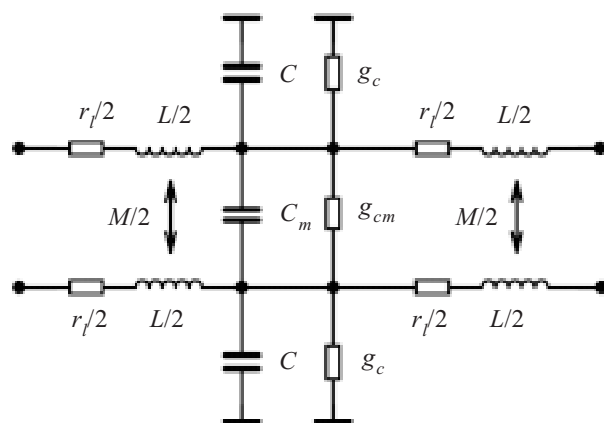


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема влияющих друг на друга элементарных отрезков проводников

коэффициентами самоиндукции L , а параллельные ветви — проводимостями g_c и емкостями C . Индуктивная связь между элементарными отрезками проводников представлена коэффициентом взаимной индукции M , а емкостная связь — ветвью, состоящей из проводимости g_{cm} и емкости C_m .

Параметр r_l рассчитывается в программе АПП с учетом скин-эффекта при высоких частотах по формулам, приведенным в [1, с. 146—149].

С помощью параметров g_c и g_{cm} учитываются потери в диэлектрике вокруг связанных элементарных отрезков проводников. Эти параметры зависят от частоты и определяются как небольшая часть соответствующего комплекса полной проводимости. В программе АПП принято, что величина этих проводимостей равна 2% от соответствующих комплексов полных проводимостей.

Определение параметров L , M , C и C_m должно быть произведено на основе анализа электрических и магнитных полей ПП. Как уже указывалось выше, проводники в программе АПП разбиваются на элементарные отрезки, электрические и магнитные поля которых могут считаться плоскопараллельными. Возникающая при этом погрешность для определения величины помех незначительна, т. к. взаимное влияние определяется только между проводниками, угол между которыми меньше 45° . Помеха же, возникающая в точке перехода от одного отрезка проводника к другому, имеет тот же порядок, что и помеха от одного элементарного отрезка проводника, и не может сколько-нибудь заметно повлиять на результат.

Все отрезки проводников имеют прямоугольные сечения малой высоты, т. е. являются по существу лентами. Чтобы определить плоскопараллельное электрическое поле, создаваемое отрезками проводников связанных цепей, нужно найти уравнения линий равного электрического потенциала и уравнения силовых линий электрического поля, а для определения плоскопараллельного магнитного поля, создаваемого этими же отрезками проводников, необходимо найти уравнения линий равного магнитного потенциала и уравнения силовых линий магнитного поля.

В теории электромагнитного поля [9, с. 53, 181] эти задачи решены точно только для проводников круглого

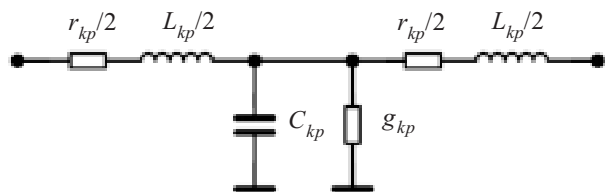


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема КП

сечения, а для других видов сечения проводников могут быть найдены лишь приближенные решения.

В многослойных ПП всегда имеется по крайней мере один слой заземления, что обеспечивает протекание обратных токов непосредственно под соответствующими сигнальными проводниками. Это позволяет рассматривать все линии передачи сигналов в многослойных ПП как полосковые или микрополосковые линии. Определение параметров эквивалентной схемы рис. 2 в программе АПП для многослойных ПП производится по формулам, приведенным в [9, с. 91, 204] и [1, с. 173].

При определении параметров эквивалентной схемы рис. 2 для двухсторонних ПП следует учитывать, что проводники цепей заземления, по которым протекают обратные токи, почти никогда не располагаются непосредственно под соответствующими сигнальными проводниками, а располагаются на некотором расстоянии, иногда на том же слое, иногда на противоположном. Анализ реальных ПП показал, что для всех сигнальных цепей это расстояние можно принять в среднем равным десятикратному значению толщины ПП. В программе принято, что все сигнальные цепи имеют обратный провод, расположенный параллельно на том же слое на этом расстоянии. Также принято, что сечения прямого и обратного проводников круглые, а диаметр круга равен ширине проводника сигнальной цепи. Это позволяет использовать для определения параметров эквивалентной схемы рис. 2 точные решения, приведенные в [9], что и сделано в программе. Конечно, такие допущения не позволяют достаточно точно определить величину перекрестных помех в ПП, однако результаты расчетов могут быть использованы для сравнительной оценки нескольких вариантов топологии ПП по чувствительности к помехам.

Эквивалентная электрическая схема КП показана на рис. 3. Такая же схема используется для переходного отверстия.

Параметры элементов эквивалентных электрических схем КП и переходных отверстий определяются по формулам, приведенным в [1, с. 173].

Алгоритм анализа перекрестных помех в цепях ПП

На рис. 4 показана эквивалентная электрическая схема двух отрезков проводников цепей ПП, угол между которыми меньше 45° , а расстояние таково, что влияние их друг на друга существует автоматически. Как видно из рис. 4, эквивалентная схема состоит из каскадного соединения эквивалентных схем влияющих друг на друга элементарных отрезков проводников (см. рис. 2). Параметры эквивалентных схем элементарных отрезков проводников могут быть разными (если отрезки проводников цепей имеют разную ширину, не являются параллельными, или расположены на разных слоях), и обозначены одинаковыми символами только для упрощения обозначений.

К началу каждой цепи подключен источник сигнала, имеющий внутреннее сопротивление r_s , а к концу — приемник сигнала, имеющий входное сопротивление R (сопротивление входа микросхемы). Электродвижущая сила источника сигнала нижней цепи на рис. 4 равна E , и эта цепь является «агрессором», а ЭДС источника сигнала верхней цепи равна нулю, и эта цепь является «жертвой».

Показанный на рис. 4 пример является простейшим случаем. В разрабатываемых в настоящее время ПП на цепь-«жертву» могут оказывать влияние до 8 цепей-«агрессоров», в цепи-«жертве» могут быть участки, на которые не оказывает влияние ни одна цепь, дерево цепи-«жертвы» и деревья цепей-«агрессоров» могут содержать до 5 разветвлений. В программе АПП производится анализ перекрестных помех цепей с учетом всех указанных особенностей ПП.

Так как величина сигнала в цифровых цепях на 1—2 порядка превосходит величину возможных помех, то можно пренебречь влиянием электромагнитных полей, создаваемых цепью-«жертвой» на элек-

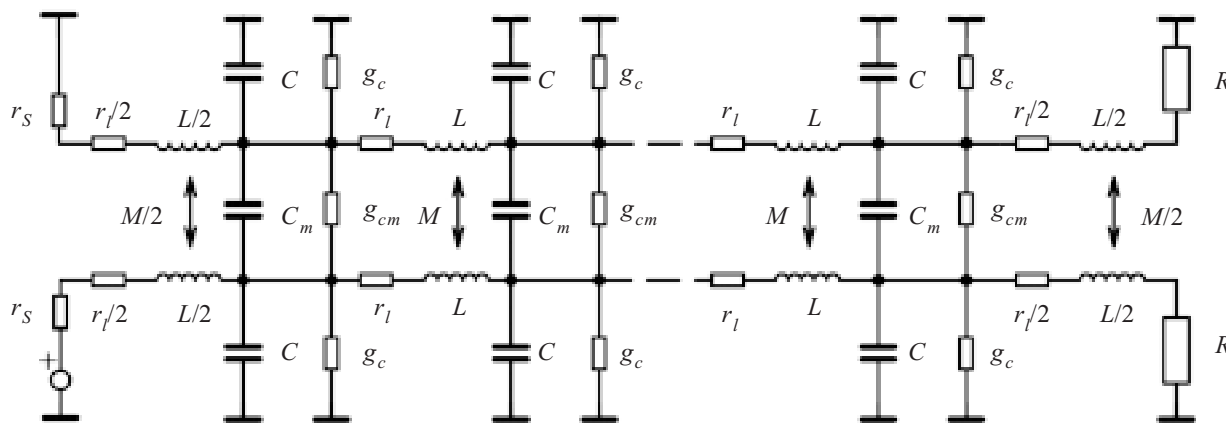


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема двух цепей ПП, используемая при анализе перекрестных помех в этих цепях

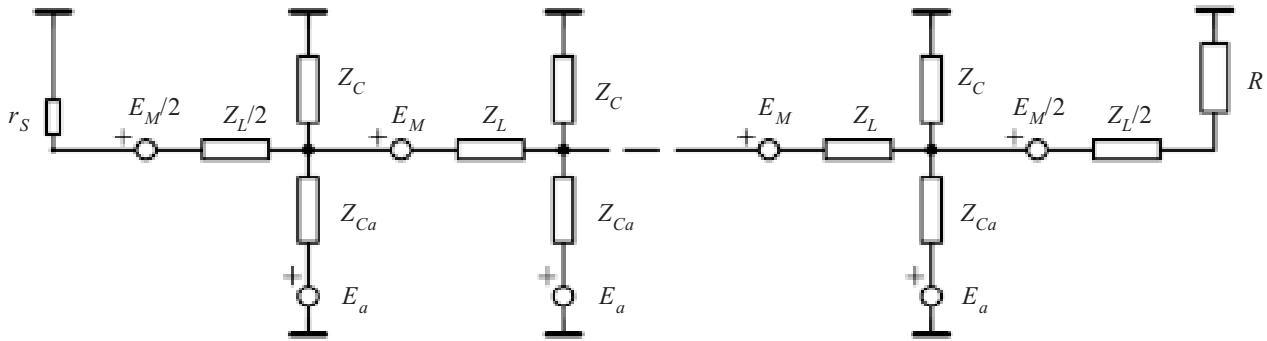


Рис. 5. Электрическая эквивалентная схема цепи с учетом влияния цепей-«агрессоров»

ромагнитные поля, создаваемые цепью-«агрессором», т. е. влияние цепи-«агрессора» на цепь-«жертву» можно считать односторонним. Величина напряжения помехи, определенная при этом предположении, будет больше истинного значения, и, следовательно, помехоустойчивость будет определена с запасом.

С учетом изложенных допущений, а также используя то, что ЭДС и токи в цепи, электрическая эквивалентная схема которой показана на рис. 4, являются синусоидальными функциями времени, а следовательно, возможно использование символического метода [10, с. 85], произведено преобразование этой схемы в электрическую эквивалентную схему, показанную на рис. 5.

Значения комплексов полных сопротивлений Z_L , Z_C , Z_{Cm} и комплексной ЭДС E_M схемы рис. 5 определяются через параметры схемы рис. 4 по известным формулам символического метода [10, с. 92]:

$$Z_L = r_l + j\omega L;$$

$$Z_C = \frac{1}{g_c + j\omega C};$$

$$Z_{Cm} = \frac{1}{g_{cm} + j\omega C_m};$$

$$E_M = I_a(j\omega M), \quad (2)$$

где ω — угловая частота; $j = \sqrt{-1}$.

Напряжения и токи для всех элементарных отрезков проводников в схеме рис. 5 различны по значению, но обозначены здесь одинаковыми символами (E_a и I_a) для упрощения обозначений. Эти значения предварительно рассчитываются для всех элементарных отрезков проводников цепей-«агрессоров» по эквивалентным схемам этих цепей от источников сигналов до приемников сигналов без учета влияния цепи-«жертвы». Как уже указывалось, количество элементарных отрезков проводников (звеньев эквивалентной схемы) для некоторых цепей ПП может быть велико (до нескольких тысяч), поэтому использование матричных методов затруднительно. Эффективное решение этой задачи обеспечивается за счет применения метода редукции эквивалентной схемы, подробно рассмотренного ниже.

Для оценки влияния цепи-«агрессора» на цепь-«жертву» необходимо определить напряжение на сопротивлении R (вход микросхемы) эквивалентной схемы, показанной на рис. 5. Применение символического метода значительно упростило эту задачу, т. к. определение этого напряжения сводится к решению алгебраической системы линейных уравнений, коэффициенты и переменные в которой являются комплексными числами.

Определение этого же напряжения на основе схемы рис. 4 потребовало бы решения системы интегродифференциальных уравнений, что значительно сложнее. В начале статьи уже говорилось о недостатках и сложностях такого анализа.

Другим важным преимуществом представления цепи в виде схемы рис. 5 является возможность редукции схемы путем эквивалентных преобразований ее частей. При этом значительно снижается количество арифметических операций и, что еще важнее, повышается точность вычислений [7, 8, 11, 13].

При нахождении решения алгебраической системы линейных уравнений, соответствующей всей цепи, производятся вычисления определителей этой системы, с помощью которых вычисляются значения всех переменных. При увеличении количества уравнений системы n количество арифметических операций увеличивается пропорционально n^3 , и сильно возрастает количество операций вычитания, у которых разность значительно меньше уменьшаемого и вычитаемого, и, следовательно, погрешность велика [5, с. 332].

При редукции схемы путем эквивалентных преобразований ее частей вычисляются определители этих частей системы линейных уравнений, соответствующей всей цепи, которые могут соответствовать во много раз меньшему количеству уравнений n , чем количество уравнений, соответствующее всей цепи. Вследствие этого количество арифметических операций уменьшится пропорционально n^3 и уменьшится погрешность, вызванная указанными выше операциями вычитания.

Особенно эффективны эквивалентные преобразования, когда схема разделяется на большое количество мелких частей, например эквивалентные преобразования последовательно или параллельно соединенных ветвей, а также преобразования «звезда—треугольник», при выполнении которых отсутствуют операции вычитания [14, с. 107].

В [7, 8, 12] приведены описания и результаты опытной эксплуатации программ, основанных на разделении схемы на большое количество мелких частей и использовании преобразований этих частей, подтвердившие эффективность такого подхода.

Однако не всякая схема может быть разделена на достаточно мелкие части, чтобы можно было использовать эквивалентные преобразования последовательно или параллельно соединенных ветвей, или преобразования «звезда—треугольник». В [12, с. 18, 58, 161] предложены преобразования цепей, называемые преобразованиями переноса I и II рода и преобразованиями обращения ветвей, которые позволяют разделить сложную схему на ряд подсхем, называемых эквивалентными многомерными генераторами. Показаны примеры применения этих преобразований при расчете сложных электрических цепей.

В [13] приведены сведения о программе расчета частотных характеристик линейных цепей методом редукции, в которой реализованы преобразования переноса I рода и преобразования обращения ветвей, правда, называются они просто эквивалентными преобразованиями. Опытная эксплуатация этой программы показала высокую точность расчетов и малые затраты машинного времени, что делает целесообразным использование при разработке программ анализа цепей метода эквивалентных преобразований вместо матричных методов.

Анализ схемы рис. 5 показывает, что для определения величины напряжения помех можно успешно использовать простейший вид эквивалентных преобразований — эквивалентные преобразования последовательно или параллельно соединенных ветвей цепи с учетом возможного наличия в преобразуемых ветвях источников напряжения. В результате этих преобразований схема рис. 5 свертывается до одной ветви (эквивалентного генератора), состоящей из эквивалентного комплекса полного сопротивления и эквивалентного источника напряжения, подключенной параллельно к сопротивлению R (входу микросхемы). Из этой простейшей схемы легко определяется напряжение помехи.

Рассмотрим процесс редукции подробнее. Обозначим в ветви эквивалентного генератора E_g — эквивалентный источник напряжения; Z_g — эквивалентный комплекс полного сопротивления. Преобразования эквивалентной схемы рис. 5 и формулы определения параметров преобразованных ветвей показаны на рис. 6—10.

Как видно из рис. 6—10, при вычислении комплекса полного сопротивления эквивалентного генератора отсутствуют операции вычитания, что гарантирует высокую точность вычислений. Операция вычитания при определении ЭДС эквивалентного генератора (при преобразовании последовательно соединенных ветвей) не приводит к увеличению погрешности вычислений, т. к. из физических соображений величины E_g и E_M не могут быть так близки по величине, чтобы их разность была соизмерима с погрешностью вычислений компьютера.

Как указывалось выше, схема рис. 5 является простейшим случаем, т. к. позволяет определить напря-

жение помехи на входе микросхемы цепи, обусловленное влиянием только одной цепи. Кроме того, в цепи-«жертве» отсутствуют элементарные проводники, на которые цепь-«агрессор» не оказывает влияния. Такая упрощенная схема выбрана для того, чтобы наглядно описать процесс эквивалентных преобразований при определении напряжения помех.

В то же время, схема рис. 5 может быть модифицирована таким образом, что будут учтены все случаи взаимного влияния цепей ПП при анализе перекрестных помех. Такая модифицированная схема и используется в программе АПП.

Рассмотрим кратко эти модификации. Если в цепи-«жертве» присутствуют элементарные проводники, на которые цепь-«агрессор» не оказывает влияния, то в структуру схемы цепи-«жертвы» вводятся эквивалентные схемы таких отрезков проводников, которые аналогичны эквивалентным схемам, показанным на рис. 5, но не содержат ветвей (E_M) и (E_a , Z_{Cm}).

Если на цепь-«жертву» оказывают влияние несколько цепей-«агрессоров», то в соответствующую ветвь схемы рис. 5 вводятся значения взаимных комплексов полных сопротивлений и комплексных ЭДС, учитывающих суммарное влияние цепей-«агрессоров», которые определяются по следующим формулам:

$$E_{Mn} = \sum_{k=1}^{k=n} E_{Mk}; \quad (3)$$

$$Z_{Cmn} = \left[\sum_{k=1}^{k=n} \frac{1}{Z_{Cmk}} \right]^{-1}; \quad (4)$$

$$E_{an} = \left[\sum_{k=1}^{k=n} \frac{E_{ak}}{Z_{Cmk}} \right] Z_{Cmn}, \quad (5)$$

где n — количество цепей-«агрессоров», влияющих на цепь-«жертву»;

E_{Mn} — комплексная ЭДС, соответствующая индуктивному влиянию n цепей-«агрессоров» на цепь-«жертву»;

E_{Mk} — комплексная ЭДС, соответствующая индуктивному влиянию k -й цепи-«агрессора» на цепь-«жертву»;

Z_{Cmn} — комплекс полного сопротивления, соответствующий емкостному влиянию n цепей-«агрессоров» на цепь-«жертву»;

Z_{Cmk} — комплекс полного сопротивления, соответствующий емкостному влиянию k -й цепи-«агрессора» на цепь-«жертву»;

E_{an} — комплексная ЭДС, соответствующая емкостному влиянию n цепей-«агрессоров» на цепь-«жертву»;

E_{ak} — комплексная ЭДС, соответствующая емкостному влиянию k -й цепи-«агрессора» на цепь-«жертву».

Цепь, показанная на рис. 5, имеет всего один приемник сигнала (вход микросхемы), и редукция схемы осуществляется самым простым способом — эквивалентные преобразования производятся в направлении от начала цепи к ее концу, в результате чего определяется напряжение на входе микросхемы.

Однако если в цепи имеется несколько приемников сигналов и цепь содержит разветвления, редук-

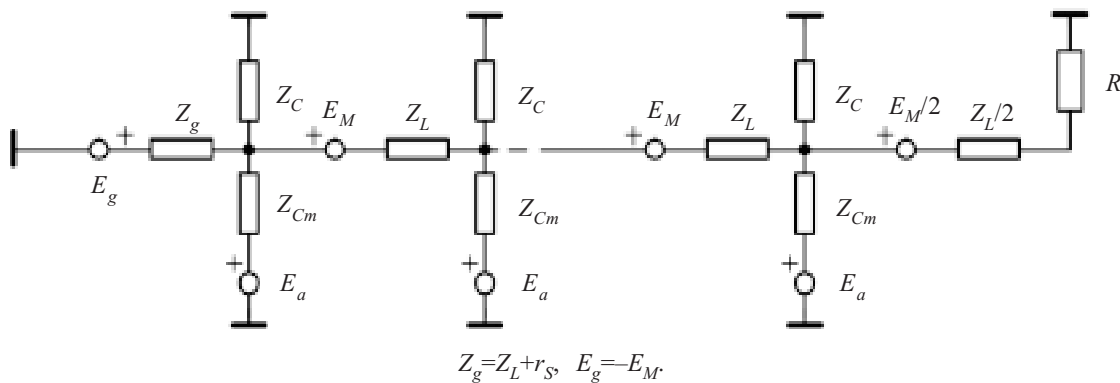


Рис. 6. Преобразование последовательно соединенных ветвей (r_s) и (E_M, Z_L)

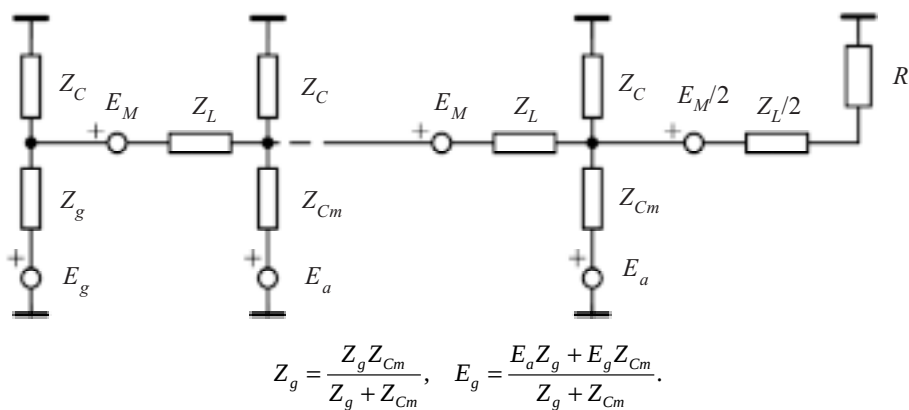


Рис. 7. Преобразование параллельно соединенных ветвей (E_g, Z_g) и (E_a, Z_{Cm})

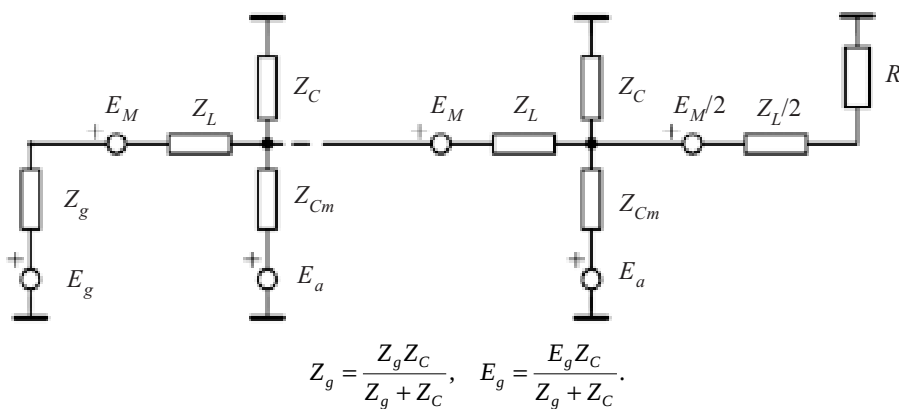


Рис. 8. Преобразование параллельно соединенных ветвей (E_g, Z_g) и (Z_C)

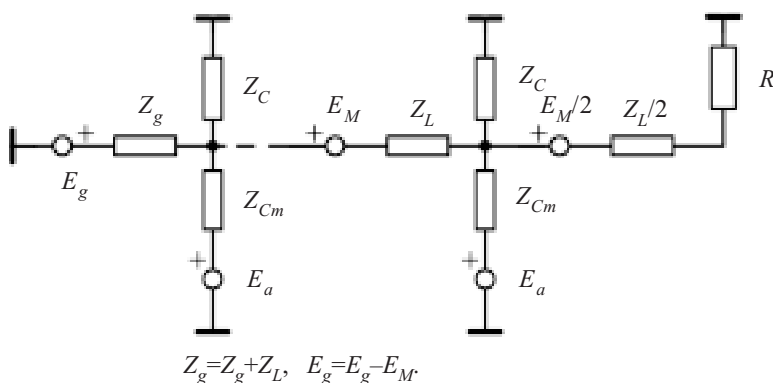
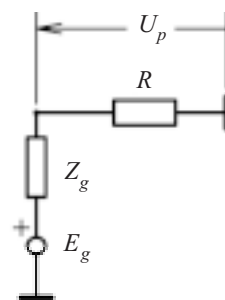


Рис. 9. Преобразование последовательно соединенных ветвей (E_g, Z_g) и (E_M, Z_L).



$$U_p = \frac{E_g R}{Z_g + R}.$$

Рис. 10. Вид схемы рис. 5 после окончания редукции и формула определения напряжения помех U_p

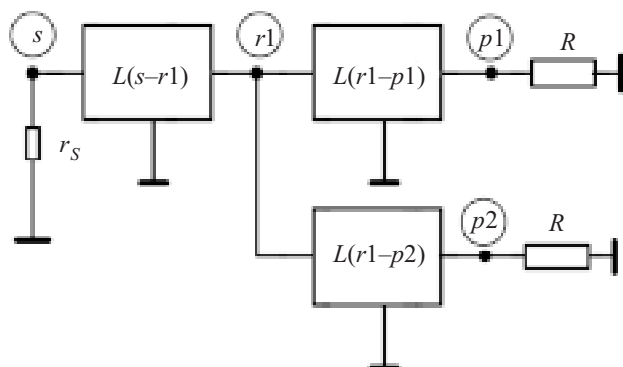


Рис. 11. Схема разветвленной цепи

ция схемы усложняется. На **рис. 11** показана схема цепи такого типа, которая имеет два приемника сигналов и содержит одно разветвление.

Символы $s, r1, p1, p2$ обозначают соответственно узел подключения источника сигналов, узел разветвления и узлы подключения приемников сигналов. Сигнал в цепи отсутствует, поэтому ветвь источника содержит только внутреннее сопротивление источника r_s . Сопротивления R соответствуют входным сопротивлениям приемников сигналов.

Подсхемы $L(s-r1), L(r1-p1), L(r1-p2)$ содержат эквивалентные схемы одного или нескольких последовательно включенных отрезков проводников, аналогичных показанным на рис. 5. Редукция этих подсхем производится в соответствии с рис. 6–10.

Редукция схемы рис. 11 при определении напряжения узла $p1$ показана на **рис. 12–15**.

Определение напряжения на сопротивлении R производится так же, как на рис. 10. Редукция схемы

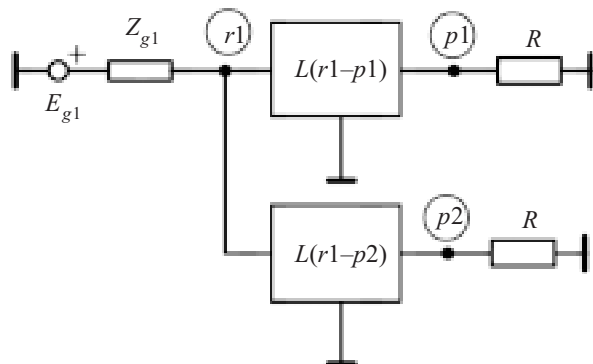


Рис. 12. Редукция подсхемы $L(s-r1)$

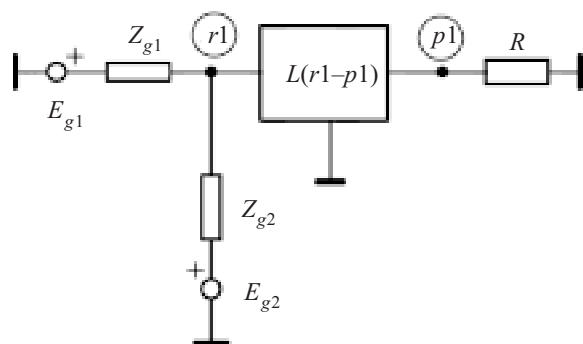


Рис. 13. Редукция подсхемы $L(r1-p2)$

рис. 11 при определении напряжения узла $p2$ производится аналогично, но после того как схема примет вид рис. 12, вместо редукции подсхемы $L(r1-p2)$ выполняется редукция подсхемы $L(r1-p1)$.

Так как программа АПП предназначена для анализа перекрестных помех цифровых электронных цепей, количество разветвлений в цепях, анализируемых с помощью этой программы, ограничено пятью. Этого вполне достаточно для разрабатываемых в настоящее время ПП, в которых до 80% цепей не имеют разветвлений, а остальные имеют не более двух-трех разветвлений.

Представление промежуточных данных и результатов анализа перекрестных помех в программе

На основе файла символьного описания топологии ПП (pdf-файла) САПР PCAD-4.5 или на основе формируемого САПР TороR файла символьного описания топологии цепей ПП (осс-файла) в программе АПП создается главный рабочий массив Ogc , содержащий описание геометрических характеристик сигнальных цепей ПП и другие рабочие массивы.

В процессе работы программы АПП массив Ogc дополняется описаниями ТИ, необходимых для формирования моделей элементарных отрезков проводников и вычисления значений помех на входах микросхем.

В процессе проведения анализа перекрестных помех описание каждого отрезка проводника цепи, на который оказывают влияние соседние цепи, дополняется значениями коэффициентов, характеризующих это влияние, а описание каждой КП, соответствующей входу микросхемы, в цепи, на которую оказы-

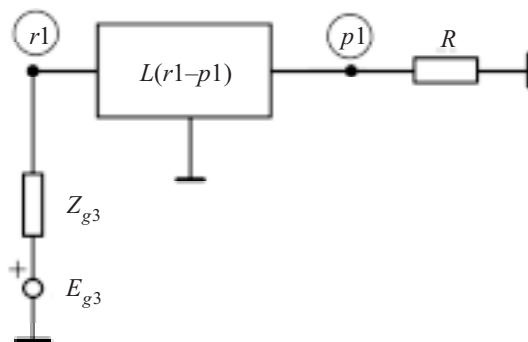


Рис. 14. Эквивалентное преобразование ветвей (E_{g1}, Z_{g1}) и (E_{g2}, Z_{g2})

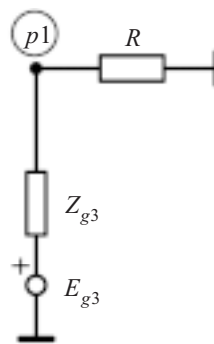


Рис. 15. Редукция подсхемы $L(r1-p1)$

вают влияние соседние цепи, дополняется вычисленными значениями помех. Таким образом, в этом рабочем массиве находятся полные результаты анализа перекрестных помех в формате, удобном для машинной обработки с помощью, например, САПР ТороR.

Для упрощения обработки этого массива предусмотрена выдача файла Oscrд, в который записываются из него описания только тех цепей, напряжения помех на входах микросхем которых больше величины, заданной в ФТЗ.

Для общей визуальной оценки уровня помех по команде «Показать/ТИ слоев ПП» на дисплей выводятся ТИ слоев ПП, на которых помечаются все элементарные отрезки проводников, влияющие друг на друга.

По команде «Показать/ Результаты анализа» пользователь может просмотреть файл РАП (результаты анализа помех), в который выводятся полные результаты анализа помех (количество цепей, количество отрезков проводников и КП, коэффициенты связей отрезков проводников, минимальное, среднее и максимальное значения напряжения помех на входах микросхем и др.).

Предусмотрено также динамическое отображение на дисплее этапов работы программы АПП, выполняемое модулем огр. Модуль представляет собой развитие широко используемого в Windows элемента управления индикатором выполнения [15], но в отличие от него, кроме индикации процента и времени выполнения этапа, обеспечивает также отображение названия выполняемого этапа, основные результаты работы этапа и объем используемой программой АПП оперативной памяти в «куче» на каждом этапе.

Это позволяет пользователю быстро оценить результаты работы программы анализа на каждом этапе, установить, на каком этапе происходит сбой в случае неправильной работы программы, и определить время проведения анализа.

Модуль огр представляет собой простейший встроенный отладчик и очень полезен при развитии и доработке программы и устранении ошибок в программе. Объем программного кода модуля огр и вызываемое его работой замедление работы программы АПП незначительны.

Сравнение результатов расчетов перекрестных помех в программах АПП и HyperLynx

Для оценки корректности моделей, используемых в программе АПП, определения точности расчетов перекрестных помех и частотного диапазона, в котором эта программа может быть использована, было проведено сравнение результатов расчетов перекрестных помех на одной и той же ПП по программе АПП и в программе HyperLynx [1].

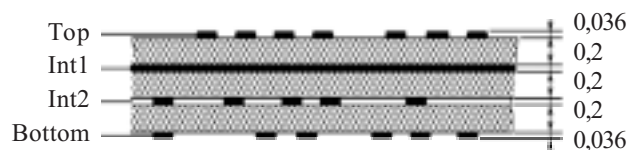


Рис. 16. Поперечный разрез фрагмента ПП, используемой для сравнительных расчетов перекрестных помех по программам АПП и HyperLynx

На рис. 16 показан в поперечном разрезе фрагмент ПП, для которой проводились сравнительные расчеты. Трассировка на этой ПП выполнена в двух направлениях (вертикальном и горизонтальном), что обеспечивает корректное сравнение программ АПП и HyperLynx.

Расчет волновых сопротивлений показал:

- по программе HyperLynx: на слое Top $Z_0=55,0$ Ом, на слое Bottom $Z_0=80,7$ Ом;
- по программе АПП: на слое Top $Z_0=55,620$ Ом, на слое Bottom $Z_0=80,713$ Ом.

Этот результат говорит о достаточно высокой точности определения емкости и коэффициентов самоиндукции элементарных отрезков проводников, на основе которых в программе АПП вычисляются волновые сопротивления.

К сожалению, в сравниваемых программах используются разные режимы работы линий передачи при определении величины перекрестных помех:

— в программе HyperLynx цепь-«агрессор» и цепь-«жертва» не имеют терминаторов, т. е. на приемных концах линий включена только входная емкость вывода микросхемы. Это обеспечивает максимально возможную величину помех. «Наводка» на линии-«жертвы» рассчитывается во временной области по длительности фронтов трапецидального импульса в линии-«агрессоре». Величины «наводок» от двух самых сильных «агрессоров» складываются. Этот расчет является предварительным. По результатам расчетов находятся наиболее чувствительные к помехам цепи, для которых проводится детальное моделирование. В процессе этого моделирования подбираются необходимые терминаторы, уменьшающие величину помех и отражения сигналов, или производятся изменения топологии этих цепей;

— в программе АПП принято, что все цепи имеют нагрузки, определенные на основе известных волновых сопротивлений, и напряжения помех на входах микросхем в цепи-«жертвы» вычисляются с помощью эквивалентной цепной схемы, в каждую ячейку которой введены источники напряжения, имитирующие индуктивное и емкостное влияние цепи «агрессора» на цепь-«жертву». Этот расчет, как и расчет по HyperLynx, является предварительным. По результатам вычислений находятся наиболее чувствительные к помехам цепи и производятся изменения топологии этих цепей.

Естественно, что ожидать полного совпадения результатов не приходится. Для определения до некоторой степени сопоставимых результатов синусоидальный сигнал в программе АПП выбирался таким, чтобы угол наклона восходящего участка синусоиды максимально приближался к переднему фронту трапецидального импульса. Расчеты показали, что длительности переднего фронта трапецидального импульса в программе HyperLynx в 1 нс соответствует частота синусоидального сигнала в программе АПП 200 МГц, 2 нс — 100 МГц, 4 нс — 50 МГц.

Результаты расчетов величины перекрестных помех U_p по сравниваемым программам для всех цепей ПП:

Цепь	КП	U_p , мВ					
		АПП	HyperLynx	АПП	HyperLynx	АПП	HyperLynx
		50 МГц	4 нс	100 МГц	2 нс	200 МГц	1 нс
DCLO	D14:2	25	—	50	—	23	—
	D13:2	28	—	57	—	34	—
	D6:14	26	100	128	189	228	298
RPLY	D14:3	35	—	69	—	19	—
	D13:3	38	—	79	—	33	—
	D6:11	48	156	215	295	374	472
IOW	D1:3	56	130	176	255	281	496
ADR20	D1:48	53	98	182	193	306	364
IAKO	D1:80	52	44	124	86	178	159
RES	D1:46	23	54	98	106	142	172
SIA	D1:79	58	104	139	206	316	387
REST	D1:54	32	85	126	168	261	323
ADR18	D1:57	24	52	100	103	218	193
IRQ7	D1:17	28	104	128	109	300	216

— по программе АПП —
200 МГц $U_p=1,21...66...374$ мВ,
100 МГц $U_p=0,46...27...215$ мВ,
50 МГц $U_p=0,09...9...58$ мВ;

— по программе HyperLynx —
1 нс $U_p=10...496$ мВ,
2 нс $U_p=10...295$ мВ,
4 нс $U_p=10...156$ мВ.

В таблице приведены подробные результаты расчетов перекрестных помех для 10 цепей ПП, имеющих наибольшую чувствительность к помехам.

Как видно из таблицы, перекрестные помехи, рассчитанные по программе АПП на частотах 100 и 200 МГц, достаточно близки к перекрестным помехам, рассчитанным по программе HyperLynx при соответствующих значениях длительности фронта трапецеидального импульса 2 и 1 нс. Однако при расчетах на частоте 50 МГц (соответствующая длительность фронта трапецеидального импульса 4 нс) величины помех, рассчитанные по программе АПП, в ряде случаев в несколько раз меньше, чем величины помех, рассчитанные по программе HyperLynx. Эти различия в результатах расчетов могут быть объяснены, как указывалось выше, разными режимами работы линий передачи при определении величины перекрестных помех.

Обе сравниваемые программы не могут быть использованы для достаточно точного определения величины перекрестных помех, но позволяют определить цепи, наиболее чувствительные к перекрестным помехам. Приведенные результаты сравнительных расчетов позволяют сделать вывод, что программа АПП может быть использована для оценки чувствительности цепей ПП к перекрестным помехам в тех же частотных диапазонах, что и программа HyperLynx.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кечиев Л. Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры.— М.: ООО «Группа ИДТ», 2007.
2. Лузин С., Полубасов О. Топологическая трассировка: реальность или миф?— EDA EXPERT.— 2002.— № 5.— С. 42—46.
3. Елшин Ю. М. Справочное руководство по работе с подсистемой SPECSTRA в PCAD 2000.— М.: СОЛОН-Р, 2002.
4. Altium. Putting Signal Integrity in its Place. Article: ARO127 (v.1.0). December 22, 2003.
5. Чуа Л. О., Лин Пен-Мин. Машинный анализ электронных схем: Алгоритмы и вычислительные методы.— М.: Энергия, 1980.
6. http://www.quantec-emc.com/compliance_new.asp.
7. Виноградова В. А., Сиротко В. К. Анализ на ЭВМ многозвенных линейных цепных схем в частотной и временной областях // Обмен опытом в радиопромышленности.— 1975.— Вып. 6.— С. 148—150.
8. Виноградова В. А., Сиротко В. К. Автоматизация проектирования функциональных устройств на поверхностных акустических волнах.— Л.: ЛДНТП, 1988.
9. Нейман Л. Р., Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехники. Ч. I. Физические основы электротехники.— Л., М.: Госэнергоиздат, 1948.
10. Нейман Л. Р., Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехники. Часть III. Теория электромагнитного поля.— Л., М.: Госэнергоиздат, 1948.
11. Калантаров П. Л., Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники. Часть II. Теория переменных токов.— Л., М.: Госэнергоиздат, 1948.
12. Калахан Д. Методы машинного расчета электронных схем.— М.: Мир, 1970.
13. Шакиров М. А. Преобразования и диакоптика электрических цепей.— Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980.
14. Рубинова А. Я., Сиротко В. К. Расчет частотных характеристик линейных схем методом редукции цепей // Обмен опытом в радиопромышленности.— 1973.— Вып. 10.— С. 128—130.
15. Саймон Р. Windows 2000 API. Энциклопедия программиста.— К., СПб.: ООО «ДиаСофтЮП», 2002.

Д. т. н. Л. Ф. ПОЛИТАНСКИЙ, В. В. ЛЕСИНСКИЙ

Украина, Черновицкий нац. университет им. Юрия Федьковича
E-mail: politanskyu@chnu.cv.ua

Дата поступления в редакцию
30.06 2008 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ КОММУТАТОР НА ДМОП-ТРАНЗИСТОРАХ

Разработана математическая модель приемопереключающих элементов оптронной пары «ДМОП-транзистор—фотодиоды». Предложена интегральная схема коммутатора, управляемого фотосигналом, на кремниевой структуре с диэлектрической изоляцией.

Вопросам интеграции фотоприемных элементов и электронных схем обработки посвящено множество работ [1—5]. В работах [6—8] описываются приборы с оптическим управлением фотодиодов и полевых транзисторов, использующих внешние источники питания. Однако в них не рассматривается математическая модель приемопереключающих элементов, учитывающая влияние конструктивных и электрофизических параметров элементов оптоэлектронной пары «полевой транзистор — фотодиоды» на ее электрические параметры. Кроме этого, не рассматриваются вопросы интеграции фотоприемных элементов с МОП-транзисторами с двойной диффузией (ДМОП-транзисторы), обладающими малым сопротивлением в открытом состоянии.

Целью данной работы является разработка математической модели переключающих элементов «ДМОП-транзистор—фотодиоды», устанавливающей взаимосвязь между их электрическими, конструктивными и электрофизическими параметрами, а также создание интегрального оптоэлектронного коммутатора на ДМОП-транзисторах, управляемого оптическим сигналом.

Выходная характеристика ДМОП-транзистора [9] имеет вид

$$I_c = \mu_n C_0 \frac{W}{L} \left[(U_{зи} - U_{пор}^*) U_{си} - 1/2 U_{си}^2 \right],$$

где I_c — ток стока;
 μ_n — подвижность электронов в канале;
 C_0 — удельная емкость подзатворного диэлектрика;
 W и L — ширина и длина канала, соответственно;
 $U_{зи}$ — напряжение на затворе относительно истока;
 $U_{пор}^*$ — эффективное пороговое напряжение транзистора, величина которого определяется концентрацией примеси доноров в исходной подложке, а также характером распределения акцепторов в p -канальной области прибора;
 $U_{си}$ — напряжение сток-исток.

Очевидно, что образованием индуцированного канала и током стока структуры можно управлять с помощью положительного потенциала, создаваемого при освещении последовательно включенных между стоком и истоком фотодиодов, работающих в фотогальваническом режиме.

Напряжение холостого хода фотодиода с учетом того, что величина фототока значительно больше темнового, равно

$$U_{xx} \cong \varphi_T \ln \frac{I_\Phi}{I_T}, \quad (1)$$

где φ_T — температурный потенциал;
 I_Φ — фототок;
 I_T — темновой ток.

Если длина p - и n -областей намного меньше диффузионной длины носителей $l \ll L_n, L_p$, то темновой ток фотодиода определяется следующим выражением [10, с. 356]:

$$I_T = q A_\Phi (n_{po} D_n + p_{no} D_p) / l, \quad (2)$$

где q — заряд электрона;
 A_Φ — площадь p - n -перехода;
 n_{po}, p_{no} — концентрации неосновных равновесных носителей;
 D_n, D_p — коэффициент диффузии электронов и дырок, соответственно;
 l — длина p - и n -областей.

Фототок фотодиода записывается в виде [2, с. 161]

$$I_\Phi = q \lambda \eta \Phi A_\Phi / (hc), \quad (3)$$

где λ — длина волны падающего светового излучения;
 η — квантовый выход;
 Φ — мощность падающего на элемент потока излучения;
 h — постоянная Планка;
 c — скорость света.

Таким образом, в предположении что $n_{po} D_n \gg p_{no} D_p$, напряжение холостого хода можно записать в следующем виде:

$$U_{xx} = \varphi_T \ln \frac{\lambda \eta \Phi l}{h c n_{po} D_n}. \quad (4)$$

Тогда напряжение между затвором и истоком, создаваемое фотодиодами в количестве N , равно

$$U_{зи} = N U_{xx} = N \varphi_T \ln \frac{\lambda \eta \Phi l}{h c n_{po} D_n}.$$

Следовательно, математическая модель вольт-амперной характеристики (ВАХ) приемопереключающего элемента системы «фотодиоды—МОП-транзистор» имеет следующий вид:

$$I_{\text{си}} = \mu_n C_0 \frac{W}{L} \times \left[\left(N\phi_T \ln \frac{\lambda \eta \Phi l}{hcn_{\text{po}} D_n} - U_{\text{пор}} \right) U_{\text{си}} - \frac{1}{2} U_{\text{си}}^2 \right]. \quad (5)$$

Как следует из полученного выражения, ВАХ оптоэлектронного приемопереключающего элемента «фотодиоды—МОП-транзистор» определяется электрофизическими и конструктивными параметрами фотодиода ($n_{\text{po}}, D_n, L_n, l, N$) и МОП-транзистора ($\mu_n, C_0, U_{\text{пор}}, W, L$), параметрами светового излучения (λ, Φ) и квантовым выходом η .

Чувствительность тока стока приемопереключающего элемента к изменению мощности падающего на фотодиоды потока излучения

$$\frac{dI_{\text{си}}}{d\Phi} = \mu_n C_0 \frac{W}{L} N\phi_T \frac{1}{\Phi} U_{\text{си}}. \quad (6)$$

Сопротивление $R_{\text{си отк}}$ переключающего элемента при $NU_{\text{xx}} - U_{\text{пор}} > U_{\text{си}}$ равно

$$R_{\text{си}} = \frac{dU_{\text{си}}}{dI_{\text{си}}} = \frac{L}{W} \frac{1}{\mu_n C_0 \left[N\phi_T \ln \frac{\lambda \eta \Phi l}{hcn_{\text{po}} D_n} - U_{\text{пор}}^* \right]}. \quad (7)$$

Следует отметить, что управлять выходным током $I_{\text{си}}$ можно также напряжением, подаваемым на затвор от источника постоянного тока через фотодиоды. В зависимости от полярности подключения фотодиодов напряжение на затворе ДМОП-транзистора может увеличиваться или уменьшаться на величину фото-эдс, возникающей под воздействием светового излучения.

При этом выходную ВАХ системы «ДМОП-транзистор—фотодиоды» можно записать следующим образом:

$$I_{\text{си}} = \mu_n C_0 \frac{W}{L} \times \left[\left(U_{30} \pm N\phi_T \ln \frac{\lambda \eta \Phi l}{hcn_{\text{po}} D_n} - U_{\text{пор}} \right) U_{\text{си}} - \frac{1}{2} U_{\text{си}}^2 \right], \quad (8)$$

где U_{30} — напряжение источника постоянного тока, подаваемое на затвор через фотодиоды.

Введя понятие порогового напряжения системы

$$U_{\text{пор с}} = U_{\text{пор}} \mp N\phi_T \ln \frac{\lambda \eta \Phi l}{hcn_{\text{po}} D_n}, \quad (9)$$

ВАХ приемо-переключающей оптоэлектронной пары можно записать как

$$I_{\text{си}} = \mu_n C_0 \frac{W}{L} \left[(U_{30} - U_{\text{пор с}}^*) U_{\text{си}} - \frac{1}{2} U_{\text{си}}^2 \right]. \quad (10)$$

Чувствительность порогового напряжения системы к изменению мощности падающего на группу фотодиодов потока излучения будет равна

$$\frac{dU_{\text{пор с}}}{d\Phi} = \frac{N\phi_T}{\Phi}. \quad (11)$$

Экспериментальные исследования ВАХ, спектральной и передаточной характеристик приемопереключающих элементов системы «арсенид-галлиевые фотодиоды — ДМОП-транзистор» показали, что выходные ВАХ носят обычный характер зависимостей, который имеет место для n -канальных МОП-транзисторов с индуцированным каналом. Зависимость $I_{\text{си}}(\lambda)$ имеет такой же характер, как спектральные зависимости фототока, возникающего в последовательно соединенных p - n -переходах. При этом ток $I_{\text{си}}$ значительно больше фототока, что указывает на увеличение интегральной и спектральной чувствительности оптоэлектронного элемента «фотодиоды—ДМОП-транзисторы» по сравнению с чувствительностью фотоэлементов.

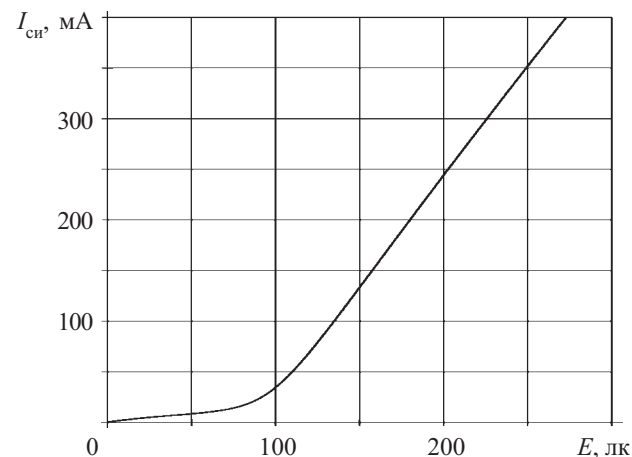


Рис. 1. Передаточная характеристика системы «ДМОП-транзистор — последовательно соединенные фотодиоды», работающей в фотогальваническом режиме

Передаточная характеристика исследуемой зависимости приведена на **рис. 1**. Из этой зависимости следует, что порог срабатывания элемента (минимальное значение освещенности E_0 , при котором открывается транзистор) зависит от величины порогового напряжения ДМОП-транзистора и определяется из условия

$$NU_{\text{од}}(E_0) = U_{\text{итд}}. \quad (12)$$

При воздействии световым излучением на батарею фотодиодов в зависимости от полярности их включения в схему управления элементов от внешнего источника питания можно уменьшать или увеличивать ток стока $I_{\text{си}}$ (**рис. 2**)

Зависимость тока $I_{\text{си}}$ от освещенности E при несовпадении полярностей напряжения источника питания и фото-эдс фотодиодов, освещенных световым излучением ламп накаливания, приведена на **рис. 3**.

Зависимость чувствительности элементов от длины волны падающего излучения аналогична спек-

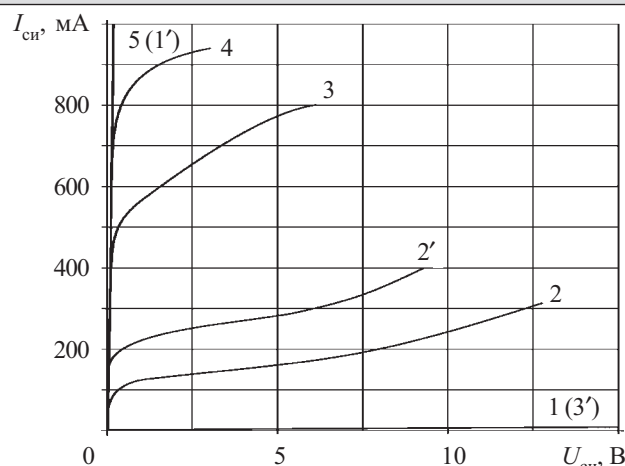


Рис. 2. Выходные ВАХ при прямом (1—5) и обратном (1'—3') включении фотодиодов при разных значениях освещенности (в лк):

I' — 0; 1 — 230; 2, 2' — 450; 3, 3' — 1340; 4 — 2300; 5 — 3500

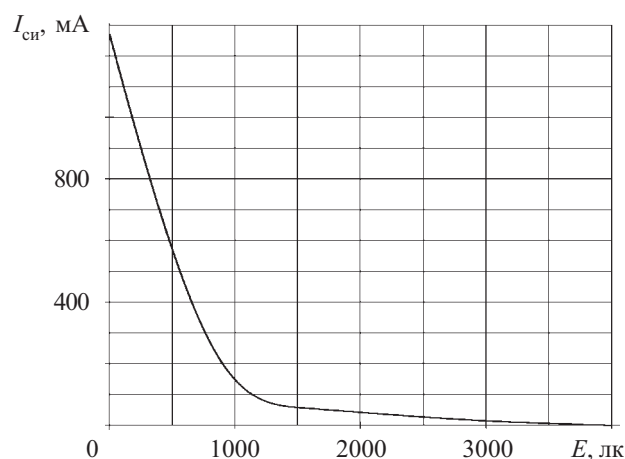


Рис. 3. Передаточная характеристика элементов при обратном включении фотодиодов

ральной характеристике фотодиодов. При этом их выходные токи могут превышать токи фотодиодов на несколько порядков.

Микроэлектронное исполнение оптоэлектронных переключающих элементов «фотодиоды—ДМОП-транзисторы» возможно на кремниевых структурах с диэлектрической изоляцией (КСДИ), позволяющих осуществлять планарное расположение контактов к областям ДМОП-структуры.

Очевидно, что для обеспечения удовлетворительных значений длительности фронтов выходных импульсов, а также возможности подключения исполнительных устройств к шинам разной полярности, необходимо использование дополнительных устройств согласования выходного электрического сигнала батареи фотодиодов, работающих в фотогальваническом режиме с емкостью переключающего ДМОП-транзистора. Это реализовано в предложенном нами интегральном оптоэлектронном коммутаторе на ДМОП-транзисторах с использованием в качестве исходной подложки монокристаллического кремния КЭФ-4,5(100), принципиальная электрическая схема которого приведена на рис. 4.

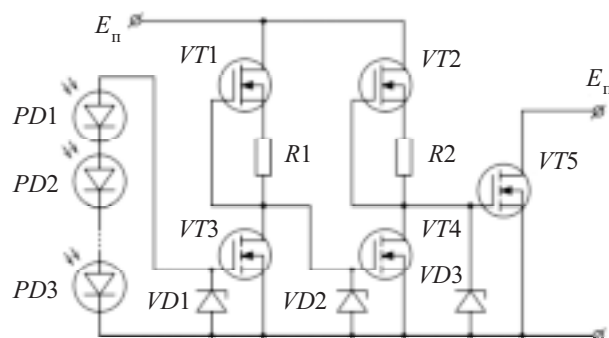


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема оптоэлектронного коммутатора в интегральном исполнении

При этом ДМОП-транзисторы и фотодиоды изготавливались в отдельных изолированных окислом карманах. С целью уменьшения сопротивления тела стока ДМОП-транзисторов, а также сопротивления n -области фотодиодов исходная монокристаллическая пластина легировалась сурьмой. При этом сформированный диффузионный слой, играющий роль скрытого слоя, имел поверхностное сопротивление $10 \text{ Ом}/\square \pm 20\%$ и толщину 5 мкм.

Снижение емкости фотодиодов обеспечивалось выполнением их p -области в виде сетки по методике, предложенной в [11]. Количество последовательно включенных фотодиодов $N=15$ выбиралось из условия, что напряжение фотогальванической батареи должно превышать значение порогового напряжения транзистора VT3 (рис. 4).

На рис. 5 приведен фрагмент поперечного сечения структуры интегрального коммутатора.

С целью уменьшения сопротивления тела стока ДМОП-транзистора в открытом состоянии формировалась n^+ -область под контакты стока на глубину залегания скрытого слоя. Аналогичным образом формировались контакты к n -области фотодиода со скрытым слоем.

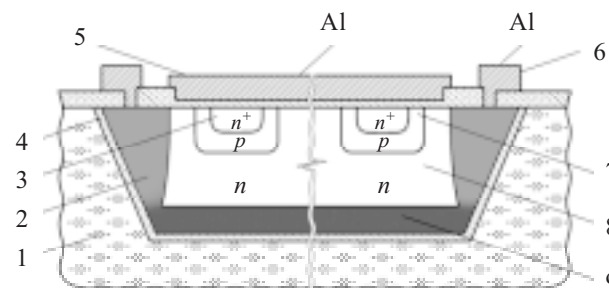


Рис. 5. Фрагмент поперечного сечения кристалла ИС интегрального коммутатора:

1 — поликристаллический кремний; 2 — n^+ -область под контакт стока; 3 — исток; 4 — изолирующий слой окиси кремния; 5 — затвор; 6 — контакт к стоку; 7 — p -канальная область; 8 — сток; 9 — скрытый слой

P -канальные области нагрузочных активных и переключающих МОП-транзисторов формировались методом ионного легирования. Их поверхностные сопротивления составляли 600—800 и 650—700 $\text{Ом}/\square$, соответственно. P -области диодных структур с поверхностным сопротивлением $R_s = 150—200 \text{ Ом}/\square$ так-

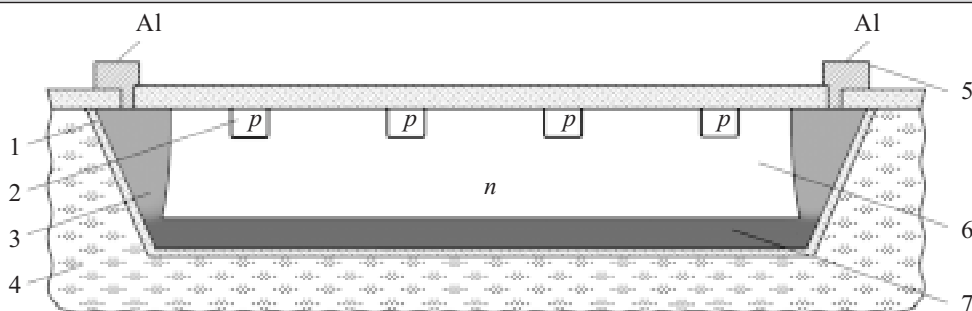


Рис. 6. Фрагмент поперечного сечения фотодиода ИС интегрального коммутатора:

1 — изолирующий слой окиси кремния; 2 — p -область; 3 — n^+ -область под контакт; 4 — поликристаллический кремний; 5 — контакт; 6 — n -область; 7 — скрытый слой

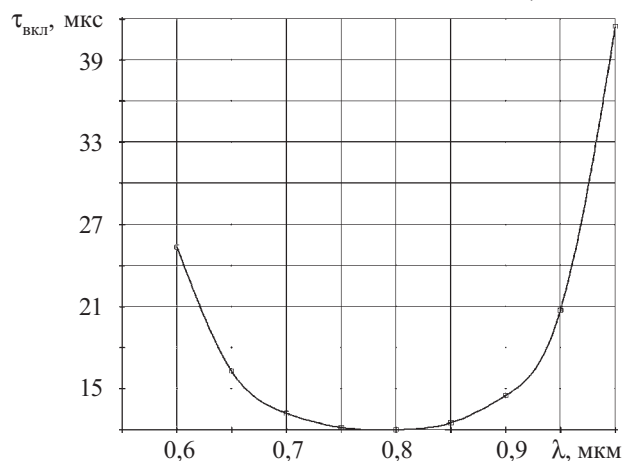


Рис. 7. Зависимость времени включения микросхемы от длины волны оптического излучения

же формировались ионным легированием. Глубина залегания p - n -перехода составляла 1,0 мкм.

На рис. 6 приведена топология p -областей сетчатой структуры фотодиодов интегрального коммутатора.

На рис. 7 приведена зависимость времени включения $\tau_{вкл}$ коммутатора от длины волны падающего излучения. Минимальное значение $\tau_{вкл}$ составляет 12 мкс при освещении оптическим излучением с длиной волны 0,77 мкм и возрастает как при уменьшении, так и при увеличении длины волны излучения.

Очевидно, что зависимость $\tau_{вкл}$ обусловлена спектральной характеристикой чувствительности $S=S(\lambda)$ фотобатареи (рис. 8).

Время выключения ИС определяется линейным сопротивлением активного транзистора VT4 (рис. 4), через который происходит разрядка входной емкости ключевого транзистора VT5, и составляет 0,5 мкс.

Следует отметить, что напряжение холостого хода U_{xx} фотодиодов батареи изменялось от 0,462 до 0,475 В (рис. 9) в диапазоне длины волны оптического излучения 0,6—1,0 мкм. Такое изменение U_{xx} несущественно влияет на выходной электрический сигнал батареи фотодиодов, являющийся уровнем отпираания транзистора VT3.

Сопротивление ключевого транзистора VT5 (рис. 4) и максимальная величина коммутируемого тока при комнатной температуре составляли 1,2 Ом и 0,6 А, соответственно. Напряжение коммутации $E_{ком}$ может изменяться в пределах 0—50 В.

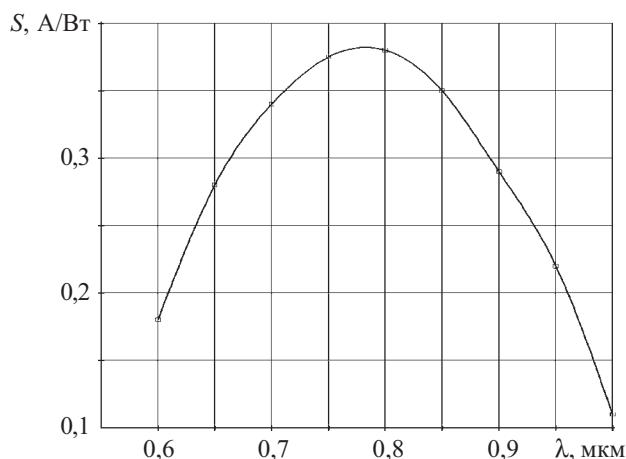


Рис. 8. Спектральная характеристика чувствительности фотовольтаической батареи

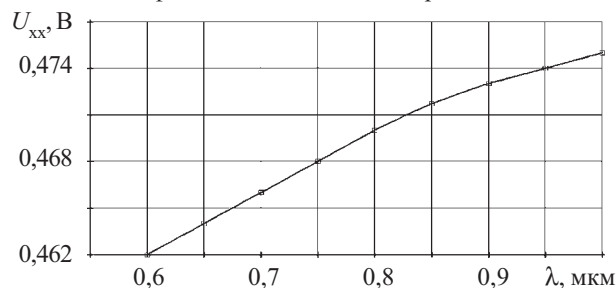


Рис. 9. Спектральная зависимость напряжения холостого хода диодов фотовольтаической батареи

Выводы

1. Разработана математическая модель переключающих элементов системы «ДМОП-транзисторы — фотодиоды», которая устанавливает взаимосвязь между их электрическими, конструктивными и электрофизическими параметрами.

2. Разработана конструкция и технология изготовления интегрального оптоэлектронного коммутатора на ДМОП-транзисторах на пластинах монокристаллического кремния КЭФ-4,5(100) с изоляцией элементов диэлектрической пленкой SiO_2 (КСДИ).

3. Оптоэлектронный коммутатор позволяет осуществлять управление исполнительными устройствами, подключаемыми к положительным и отрицательным шинам питания.

4. Величины коммутируемого напряжения и тока составляют 0—50 В и 0—0,6 А, соответственно.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Перевертайло В. Л., Елифанов А. А., Каренгин В. Г., Тарасенко Л. И. Интегральные схемы самосканируемых линейных фотоприемников в интроскопии и томографии // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2005.— № 6.— С. 1—6.
2. Аксёненко М. Д., Бараночников М. Л., Смолин О. В. Микроэлектронные фотоприемные устройства.— М.: Энергоиздат, 1984.
3. Яганов П. О. Мікроелектронні перетворювачі на кремнієвій структурі з діелектричною ізоляцією / Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Київ: НТУУ «КПІ», 2006.
4. Фізичні основи електронної техніки: Навч. посібник / За ред. З. Готри.— Львів: Видавництво НУ „Львівська політехніка”, 2002.
5. Mendis, S. K., Kemeny, S. E., Gee, R. C. et al. CMOS active pixel image sensors for highly integrated imaging systems // *IEEE J. Solid-State Circuits*.— 1997.— Vol. 32, N 2.— P. 187—197.

6. Пат. 4717948 USA 1984 г. Полупроводниковый прибор с оптическим управлением / Реф. журнал „Электроника”.— 1989. № 3.
7. Пат. 4346395 USA 1980 г. Фотодетектор на основе фотодиодов и МДП-транзисторов / Там же.— 1983. № 5.
8. Заявка 59-22360 Японии 1982 г. МОП-транзистор с оптическим управлением / Там же.— 1985. № 9.
9. Политанский Л. Ф., Лихобабин Н. П. Эффективное пороговое напряжение ДМОП-транзисторов // *Электронная техника. Сер. Полупроводниковые приборы*.— 1985.— Вып. 3 (176).— С. 54—56.
10. Пикус Г. Е. Основы теории полупроводниковых приборов.— М.: Наука, 1965.
11. Блынский В. И., Василевский Ю. Г., Малышев С. А., Чиж А. Л. Кремниевый фотодиод с сетчатым *p-n*-переходом // *Физика и техника полупроводников*.— 2007.— Т. 41, вып. 2.— С. 229—232.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: В 2-х томах.— Додэка-XXI, 2008.— 1774 с.

«Полупроводниковая схемотехника» — перевод 12-го издания широкоизвестной книги Ульриха Титце и Кристофа Шенка (в 1982 году издательство «Мир» выпустило перевод 5-го издания этой книги). Это фундаментальный труд, объединяющий принципы устройства полупроводниковых элементов (диоды, биполярные и полевые транзисторы, интегральные микросхемы) и основы создания из этих элементов различных функциональных узлов аналоговой (усилители, модуляторы, фильтры, радиоприемники) и цифровой (спусковые схемы, счетчики, регистры, шифраторы и дешифраторы, устройства памяти и т.д.) техники. Книга состоит из двух томов: первый посвящен основам схемотехники, второй — применениям функциональных узлов при создании более сложных устройств. При изложении материала широко используются эквивалентные схемы как полупроводниковых элементов, так и функциональных узлов, соответствующие работе в области постоянного тока и низких/высоких частот. Особое внимание уделено также переходным процессам цифровых схем. Описание каждого элемента или схемы сопровождается необходимым количеством достаточно элементарных формул, служащих для их инженерного расчета. Энциклопедическая полнота, обилие самых разных схем и доступное математическое обоснование делают книгу полезной широкому кругу читателей: радиолюбителям, техникам ремонтных предприятий, инженерам радиотехники и электроники и научным работникам.

НОВЫЕ КНИГИ



Наундорф У. Аналоговая электроника: основы, расчет, моделирование.— М.: Техносфера, 2008.— 472 с.

Знание основ аналоговой схемотехники является базой практически любой технической специальности. В книге подробно рассмотрены основные электронные элементы и базовые схемы с ними. Особое внимание уделяется нелинейным элементам, которые анализируются посредством соответствующего приближения, с последующим моделированием их характеристик на компьютере для практического усвоения материала. На CD записаны используемые в процессе изучения программы SPICE и GNUPLOT, а также документация и программы-примеры для систем LINUX и Windows. Большое количество упражнений, возможность проверять расчеты посредством компьютерного моделирования, наглядность делают книгу прекрасным современным учебником, особенно полезным студентам первых курсов, изучающим электронику в технических университетах. Книга предназначена также инженерам-практикам, техникам и всем интересующимся электроникой и схемотехникой.

Д. т. н. Э. А. СУКАЧЁВ, П. А. ШКУЛИПА

Украина, Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова
E-mail: sea-onat@rambler.ruДата поступления в редакцию
18.09 2008 г.Оппонент д. т. н. В. М. НИКОЛАЕНКО
(ОНПУ, г. Одесса)СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ
НА ОСНОВЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ СИГНАЛОВ
С КОМПАКТНЫМ СПЕКТРОМ

Предлагается структура системы передачи цифровой информации без межсимвольной интерференции, повышающая надежность работы устройства тактовой синхронизации за счет использования системы сигнальных функций специальной формы.

Межсимвольная интерференция (МСИ) в телекоммуникационных системах является следствием линейных искажений и селективных замираний в радиотракте. При значительном увеличении МСИ происходит снижение помехоустойчивости вплоть до срыва работы устройства тактовой синхронизации и прекращения связи. Для предупреждения подобных явлений был разработан ряд методов, которые позволяют поддерживать величину МСИ на допустимом уровне [1].

В частности, к наиболее известным методам можно отнести адаптивное выравнивание АЧХ радиотракта, разнесенный прием радиосигналов и др. Решение данной проблемы можно перенести в другую плоскость и связать его с синтезом сигнальных функций специального вида, которые позволяют согласовать энергетический спектр цифрового потока с характеристиками канала связи.

Цель настоящей статьи состоит в том, чтобы разработать структуру приемопередающего оборудования, реализующего передачу цифровых потоков с помощью многоуровневых сигналов с компактным спектром.

В теории сигналов всестороннее развитие получили сигнальные функции, которые свободны от МСИ. Подобные функции имеют финитный спектр и удовлетворяют первому критерию Найквиста [2, 3]

$$g(kT) = \begin{cases} U, & k = 0; \\ 0, & k = \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases} \quad (1)$$

где T — длительность тактового интервала или символа.

При реализации этих функций в современных телекоммуникационных системах возникают многочисленные осложнения, связанные с их формированием в передатчике и выделением из цифрового потока информации об оптимальных моментах регистрации символов в приемнике [4].

В частности, спектральная плотность таких сигналов имеет относительно высокий уровень вблизи нулевой частоты, что говорит о наличии значительной постоянной составляющей в спектре цифровой последовательности. Передача подобных сигналов по физическим каналам, которые не пропускают постоянную составляющую, приводит к возникновению искажений, что снижает помехоустойчивость цифровой системы связи.

С другой стороны, выделение тактовой частоты из случайной цифровой последовательности, в которой нет детерминированных признаков, связанных с положением символов в сигнальном потоке, делает систему тактовой синхронизации достаточно сложным устройством.

Задача снижения влияния указанных обстоятельств на технические характеристики системы связи может быть решена посредством перехода от двоичного алфавита символов цифрового потока к M -ичному алфавиту. Два алфавита связаны между собой соотношениями

$$M = 2^q \text{ и } q = \log_2 M,$$

где q — число преобразуемых символов двоичного потока;
 M — объем алфавита после преобразования (число символов в новом алфавите).

Таким образом, в потоке после преобразования используется M символов и каждый символ содержит q битов информации.

Для конструирования системы M -ичных сигнальных функций рассмотрим выражение

$$s_i(t) = m\varphi_1(t) + n\varphi_2(t), \quad i=0, 1, \dots, 7; \quad m, n=\pm 1, \pm 2, \quad (2)$$

где

$$\varphi_1(t) = U \operatorname{sinc}\left(\pi \frac{t-T}{T}\right), \quad \varphi_2(t) = U \operatorname{sinc}\left(\pi \frac{t-2T}{T}\right).$$

Функции $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ относятся к классу селективных сигналов с финитным спектром, которые удовлетворяют первому критерию Найквиста (1). Их максимумы смещены соответственно на T и $2T$ относительно начала координат.

Свяжем функции вида (2) с фрагментами цифровой последовательности двоичных символов. Для этого цифровой поток необходимо разделить на блоки по три символа в каждом, которые в дальнейшем будут называться триадами. В этом случае $q=3$ и $M=8$.

Схема отображения двоичных комбинаций
в пространство $s_i(t)$

i	Комбинация			$s_i(t)$	m	n
0	0	0	0	$s_0(t)$	1	-1
1	0	0	1	$s_1(t)$	1	-2
2	0	1	0	$s_2(t)$	2	-1
3	0	1	1	$s_3(t)$	2	-2
4	1	0	0	$s_4(t)$	-1	1
5	1	0	1	$s_5(t)$	-1	2
6	1	1	0	$s_6(t)$	-2	1
7	1	1	1	$s_7(t)$	-2	2

В таблице приведена взаимно-однозначная связь между комбинациями двоичных символов (триадами) и коэффициентами m, n , которым соответствуют сигнальные функции $s_i(t)$.

Сигнальные функции и их спектры

После несложных преобразований выражение (2) можно привести к следующему виду:

$$s_i(t) = U \sin c \left(\pi \frac{t-T}{T} \right) \frac{\left(\frac{t-T}{T} \right) (m-n) - m}{\frac{t-2T}{T}}, \quad (3)$$

$i = 0, 1, \dots, 7$.

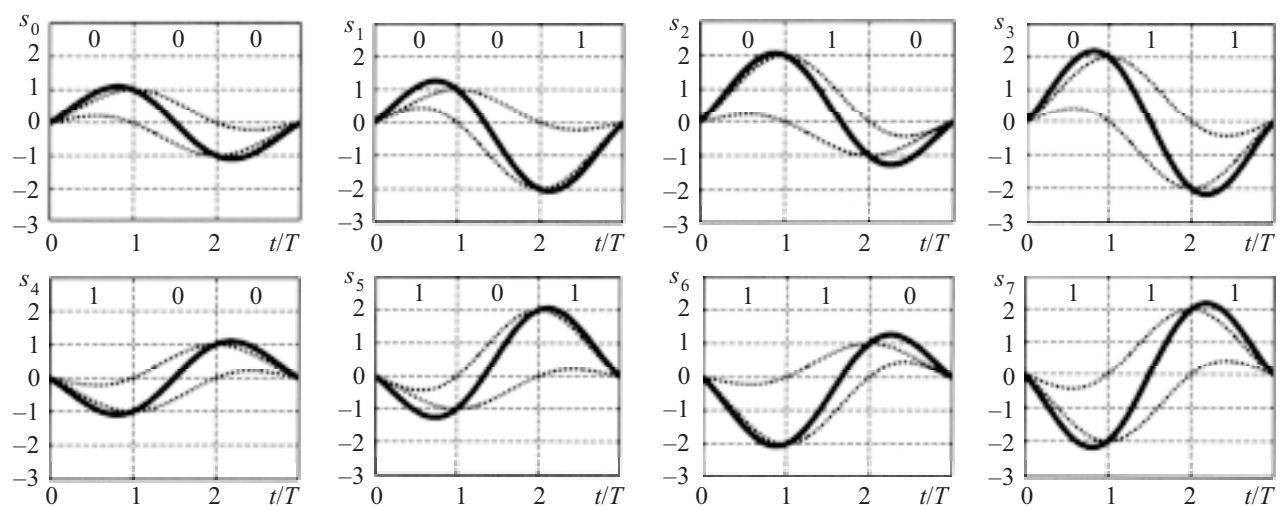


Рис. 1. Система сигнальных функций, свободных от межсимвольной интерференции

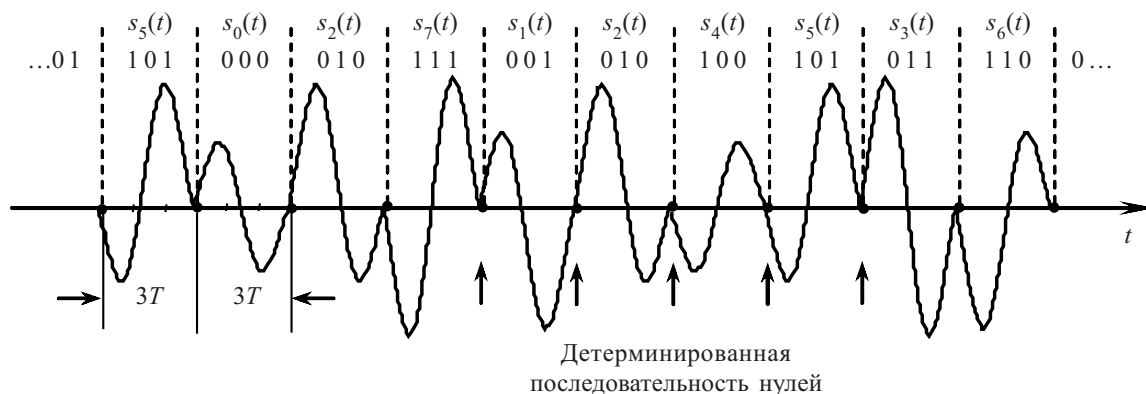


Рис. 2. Фрагмент цифрового потока, состоящего из функций $s_0(t) \dots s_7(t)$

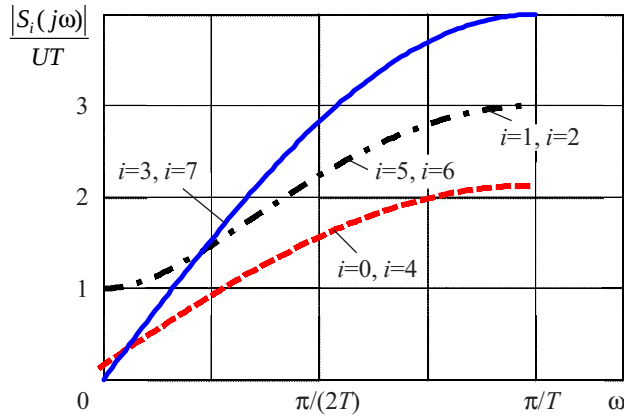
Сигнальные функции (3) за пределами рабочей зоны $[0, 3T]$ теоретически определены на всей оси $[-\infty, \infty]$. Следует отметить, что эти функции, согласно (2), представляют собой линейную комбинацию селективных сигналов, удовлетворяющих (1), т. е. они свободны от межсимвольной интерференции. Таким образом, в моменты $t_k = kT$ и $t_{k+1} = (k+1)T$, когда происходит регистрация принимаемого сигнала $s_i(t)$, воздействие соседних многоуровневых сигналов равно нулю.

Формы сигнальных функций $s_0(t) \dots s_7(t)$ приведены на рис. 1.

Сформированная последовательность из предложенных сигнальных функций на входе линии связи или модулятора передатчика показана на рис. 2 в виде фрагмента цифрового потока, содержащего десять триад.

Как следует из рис. 2, на границах триад сигнальные функции принимают нулевые значения, что порождает детерминированную последовательность эквидистантных нулей. Этот признак может служить основанием для разработки более совершенных систем тактовой синхронизации.

Рассмотрим спектральную плотность сигнальных функций $s_i(t)$. Воспользуемся тем, что в выражении (2) функция

Рис. 3. Спектральная плотность сигнальных функций $s_i(t)$

$$\varphi(t) = U \frac{\sin \omega_c t}{\omega_c t},$$

где $\omega_c = \pi/T$,
имеет спектральную плотность вида

$$\Phi(j\omega) = \begin{cases} UT, & |\omega| \leq \omega_c; \\ 0, & |\omega| > \omega_c. \end{cases}$$

Тогда спектральную плотность линейной комбинации $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ можно записать следующим образом [5]:

$$S(j\omega) = \begin{cases} UTme^{-j\omega T} + UTne^{-j\omega 2T}, & |\omega| \leq \omega_c; \\ 0, & |\omega| > \omega_c. \end{cases}$$

Таким образом, система сигнальных функций $s_i(t)$ имеет финитный спектр, который можно представить в виде

$$S_i(j\omega) = UT [m \cos \omega T + n \cos 2\omega T - j(m \sin \omega T + n \sin 2\omega T)], \quad -\pi/T \leq \omega \leq \pi/T. \quad (4)$$

На основании (4) можно записать амплитудный спектр

$$|S_i(j\omega)| = UT \sqrt{(m+n)^2 \cos^2 \frac{\omega T}{2} + (m-n)^2 \sin^2 \frac{\omega T}{2}}, \quad (5)$$

$$-\frac{\pi}{T} \leq \omega \leq \frac{\pi}{T}$$

и фазовый спектр

$$\psi_i(\omega) = -\arctg \frac{m \sin \omega T + n \sin 2\omega T}{m \cos \omega T + n \cos 2\omega T}, \quad -\frac{\pi}{T} \leq \omega \leq \frac{\pi}{T}$$

системы сигнальных функций (3).

На рис. 3 представлено графическое изображение модуля $|S_i(j\omega)|$ для различных значений i .

Спектральная плотность (5) отлична от нуля в полосе частот $-\pi/T \leq \omega \leq \pi/T$ и равна нулю всюду за пределами этого интервала. На частоте $\omega=0$ спектральная плотность равна нулю для $i \in \{0, 3, 4, 7\}$ и ниже на 9,5 дБ относительно максимального значения для $i \in \{1, 2, 5, 6\}$.

Структурная схема системы связи

Один из возможных способов организации передачи цифровых потоков посредством системы многоуровневых сигнальных функций (3) представлен на рис. 4. Оборудование состоит из передатчика и приемника [6].

Передатчик включает в себя блоки определения номера трехбитовой кодовой комбинации ($i=0, \dots, 7$) 1; блок тактовой синхронизации 2; кодовую книгу 3, которая содержит записи сигнальных функций $s_i(t)$, ($i=0, 1, \dots, 7$); цифро-аналоговый преобразователь и устройство согласования с каналом 4.

Приемник включает в себя решающее устройство 5; устройство выделения тактовых синхронизирующих импульсов 6; кодовую книгу 7, которая содержит записи трехбитовых кодовых комбинаций; устройство согласования формата двоичного потока с характеристиками аппаратуры пользователя 8.

Система связи работает следующим образом. Двоичный цифровой поток от источника информации поступает в блок 1, который разделяет поток на группы из трех символов (триады) и определяет номер полученной таким образом комбинации согласно таблице. Номер кодовой комбинации i в параллельном коде поступает в кодовую книгу 3. В соответствии с номером из кодовой книги извлекается сигнальная функция $s_i(t)$ в оцифрованном виде, которая после ЦАП приобретает аналоговую форму, затем фильтруется, усиливается и подается в канал связи, который имеет соответствующую пропускную способность.

В приемнике с помощью системы тактовой синхронизации из информационного потока выделяются интервалы длительностью $3T$, в пределах которых размещаются функции $s_i(t)$. Решающее устройство 5 измеряет мгновенные значения в точках $t_k = kT$ и

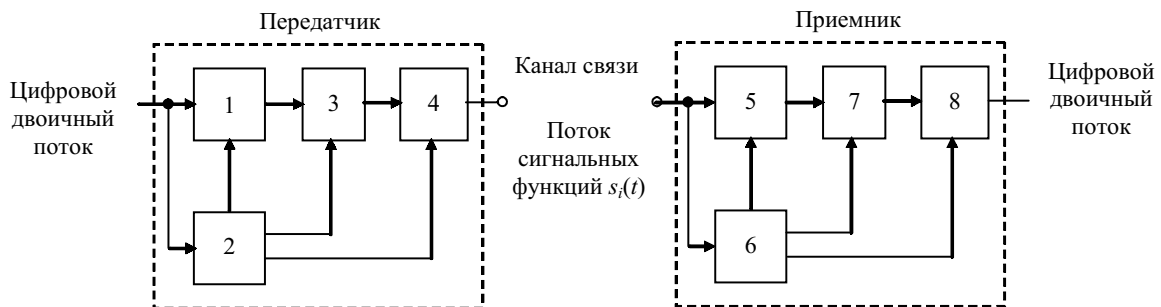


Рис. 4. Структура системы передачи цифровой информации

$t_{k+1} = (k+1)T$ и оценивает значения коэффициентов m и n . После этого в соответствии с таблицей устанавливается номер комбинации i , который в параллельном коде поступает в кодовую книгу 7. Согласно номеру из кодовой книги извлекается комбинация из трех двоичных символов, которая реализуется в виде набора из трех импульсов в формате, соответствующем техническим характеристикам терминала пользователя.

Заключение

Описанная в данной статье структура системы передачи цифровой информации без межсимвольной интерференции представляет собой как теоретический, так и практический интерес. Предложенная система сигнальных функций с финитным спектром позволяет применить ее для построения систем с малым уровнем межканальных помех, что эквивалентно повышению эффективности использования выделенной полосы частот.

Повышение числа сигнальных уровней снижает помехозащищенность информационного канала, однако появление в цифровом потоке детерминированного признака — последовательности эквидистантных нулей, следующих со скоростью передачи триад

— повышает помехозащищенность канала тактовой синхронизации.

Дальнейшие исследования помогут количественно оценить результирующую помехоустойчивость предложенного способа передачи, который реализуется посредством описанной структуры приемопередающих устройств.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. — М.: Вильямс, 2003.
2. Сукачев Э. А. Класс функций, удовлетворяющих первому критерию Найквиста // Труды УНИИРТ. — 1995. — № 1. — С. 30—31.
3. Сукачев Э. А. Класс функций, удовлетворяющих первому и второму критерию Найквиста // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. — 2001. — № 1. — С. 28—32.
4. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. — М.: Радио и связь, 2000.
5. Сукачев Э. А., Шкулипа П. А. Исследование спектральных характеристик конечных реализаций цифрового потока в системах с коррелятивным кодированием // Радиотехника: Всеукр. міжвед. науч.-техн. сб. — 2007. — Вып. 151. — С. 194—197.
6. Пат. України 84112. Спосіб передавання цифрової інформації / Сукачев Е. О., Шкуліпа П. А. — 2008. — Бюл. № 17.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Златин И. Л. Схемотехническое и системное проектирование радиоэлектронных устройств в OrCAD 10.5. — М.: Горячая линия – Телеком, 2008. — 352 с.

Книга предназначена, в первую очередь, для самостоятельного освоения системы OrCAD. В ней рассмотрены правила и приемы работы с системой OrCAD для начинающих пользователей. Подробно изложены вопросы графического анализа результатов моделирования при помощи шаблонов окна графика, проведения статистических расчетов в программе PSpice и моделирования радиоэлектронных устройств на системном (функциональном) уровне, в том числе за счет интеграции программ OrCAD и Matlab/Simulink при помощи интерфейса SLPS. Отдельно рассмотрены новый вид анализа Advanced Analysis (Расширенный анализ), позволяющий пользователям оптимизировать выполнение и улучшить качество проектов перед их аппаратной реализацией, и программа Transformer Designer, включенная в OrCAD 10.5 и предназначенная для разработки трансформаторов и дросселей. Изложенный материал иллюстрируется многочисленными примерами.

Для инженерно-технических работников, аспирантов и студентов.

НОВЫЕ КНИГИ



Динеш С. Дьюб. Электроника: Схемы и анализ. — М.: Техносфера, 2008. — 432 с.

Разработка и анализ электронных приборов и схем составляют неотъемлемую часть университетского курса физики. Книга представляет краткое, но всестороннее изложение по данной теме. Освещены физические аспекты работы биполярных и полевых транзисторов, все схемы проанализированы фундаментально. Глава о производстве интегральных схем выделяет эту книгу из ряда аналогичных изданий.

Простота и основательность изложения, большое количество примеров, задач и иллюстраций делают ее незаменимым пособием для студентов технических вузов.

Д. т. н. И. Е. МАРОНЧУК, к. ф.-м. н. Ю. А. ДОБРАЖАНСКИЙ

Украина, Херсонский национальный технический университет;
Одесский государственный экологический университет
E-mail: design@tlc.kherson.ua, yuriy@dobrozhanskiy.od.ua

Дата поступления в редакцию
27.06 2008 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ GaAs С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ InAs ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Процесс жидкофазной эпитаксии методом импульсного охлаждения насыщенного раствора в расплаве индия или олова позволяет получить гетероструктуры, содержащие квантовые точки.

Согласно прогнозу, представленному в [1], в развитии солнечной фотоэнергетики, в отличие от других возобновляемых видов энергетики, с 2000 по 2030 годы ожидается рост установленной мощности от 1 до 655 ГВт.

В соответствии с классификацией, предложенной в [2], к солнечным элементам (СЭ) I поколения относятся фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) с одним $p-n$ -гомо- или гетеропереходом, к СЭ II поколения — tandemные (каскадные) ФЭП, которые имеют не менее двух гетеропереходов, т. е. созданные на основе многослойных, многопереходных гетероструктур и имеющие в наше время рекордно высокие значения эффективности преобразования излучения — кпд около 40%. К III поколению относятся ФЭП, созданные на основе гетероструктур, содержащих квантовые точки (КТ).

Теоретический анализ, проведенный в [3], показал, что эффективность СЭ III поколения может достигать 68—70%. Однако, как показано в [4], гетероструктуры с КТ, полученные МОС-гидридной технологией, имеют параметры хуже, чем ФЭП, изготовленные на основе аналогичных гетероструктур, не содержащих КТ. Авторы [4] объяснили полученный результат наличием рекомбинации в области $p-n$ -перехода, где были расположены КТ.

Целью настоящей работы являлось исследование возможности получения гетероструктур с КТ в процессе жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) методом импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава (ИОНРР), пригодных для получения эффективных солнечных элементов. Предложение о возможности получения высокоэффективных СЭ на основе гетероструктур с КТ, выращенными ЖФЭ, базируется на том, что этот метод позволяет осуществлять кристаллизацию при условиях, близких к равновесным, т. е. при низком пересыщении и, следовательно, низком содержании дефектов.

Задачами исследования являлись: выбор оптимальных материалов матрицы и квантовых точек, выбор

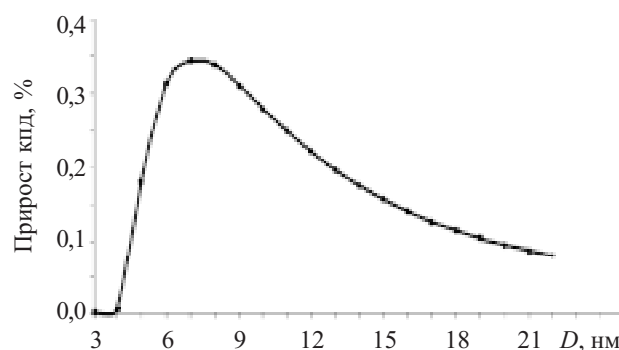


Рис. 1. Зависимость прироста эффективности СЭ от диаметра (D) квантовой точки для системы «КТ InAs — матрица GaAs» при падающем солнечном излучении спектра AM 1,5

оптимальных размеров КТ и толщины спейсерных слоев, выбор места размещения КТ — в p -, n -области или в области $p-n$ -перехода.

Теоретический анализ влияния размеров КТ на эффективность СЭ на основе арсенида галлия с квантовыми точками InAs, проведенный нами ранее [5], показал, что максимальный прирост кпд СЭ в 10,5% происходит при использовании более 50 массивов КТ InAs с линейными размерами КТ около 7 нм. На **рис. 1** представлена зависимость кпд солнечных элементов от размеров квантовых точек для случая одного массива.

Эксперимент. Обсуждение результатов

Выращивание массивов КТ методом ИОНРР осуществлялось в горизонтальном реакторе в атмосфере водорода на подложках GaAs (100) при температуре 400—450°C по методике, описанной в [6]. В качестве растворителя были использованы расплавы индия или олова. При выращивании многослойных гетероструктур с КТ спейсерные слои p - и n -типа проводимости, разделяющие массивы КТ, выращивались из раствора в расплаве галлия. Толщина спейсерных слоев при получении вертикально связанных массивов КТ не превышала 5 нм.

Характеристики КТ и гетероструктур с КТ изучались путем анализа изображений, полученных атомно-силовой микроскопией; спектров фотолюминесценции, полученных при 77 и 300 К; темновых и нагрузочных вольт-амперных характеристик изготовленных макетов ФЭП, размеры которых составляли

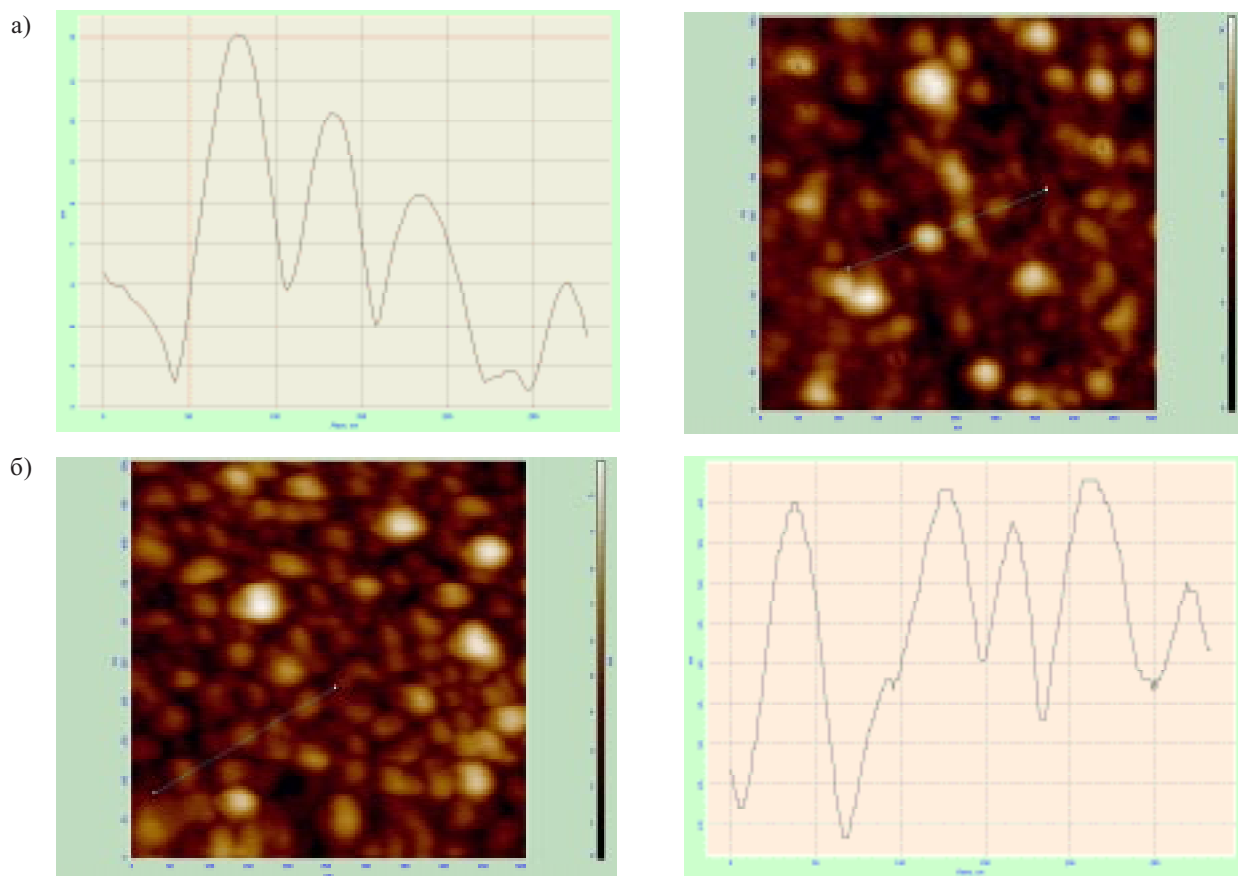


Рис. 2. Изображение и графики распределения квантовых точек по высоте образца с КТ InAs на подложке GaAs: *а* — КТ выращены из индиевого раствора-расплава, размеры подложки 500×500 нм; *б* — КТ выращены из оловянного раствора-расплава, размеры подложки 1000×1000 нм

3,2×3,2×0,3 мм, при обычном и концентрированном солнечном излучении.

На рис. 2 представлено полученное сканирующим микроскопом изображение квантовых точек InAs, выращенных на поверхности подложки GaAs при температуре 400°C, величине импульса охлаждения 5°C и толщине подложки $\delta=0,3$ см из раствора в расплаве индия и из раствора в расплаве олова. Из сопоставления приведенных на рис. 2 данных с учетом размеров образцов следует, что диаметр основания КТ, выращенных из оловянного раствора-расплава, в полтора раза больше, чем у КТ, выращенных из индиевого раствора-расплава, а высота, как следует из графиков, отличается в два раза.

Разница в размерах КТ, выращенных из оловянного и индиевого растворов-расплавов, связана, в основном, с различием растворимости, с различием поверхностного натяжения используемых расплавов, с изменением параметра кристаллической решетки КТ при легировании материалом растворителя.

Изображения, приведенные на рис. 2, подтверждают, что при выращивании КТ из оловянного раствора-расплава происходит сращивание КТ в островки, линейные размеры основания которых достигают 150—200 нм. Образование таких островков из КТ может быть связано с тем, что олово как легирующая примесь оказывает влияние на размер решетки слоев КТ вблизи гетерограницы.

Влияние температуры выращивания, величины импульса охлаждения и его длительности, а также материала подложки и ориентации ее поверхности на характеристики массивов КТ и структур с КТ исследовалось при помощи фотолюминесценции и описано в наших работах [5, 7, 8].

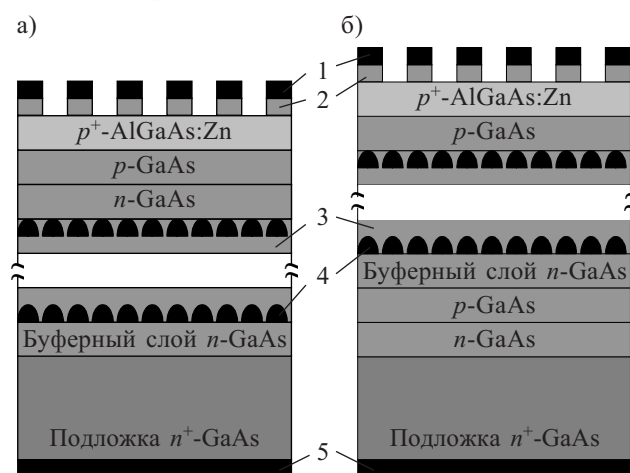


Рис. 3. Схема ФЭП на основе гетероструктуры AlGaAs-GaAs с КТ InAs в *n*-области (*а*) и *p*-области (*б*): 1 — фронтальный контактный слой; 2 — подконтактный слой; 3 — спейсер GaAs; 4 — массив КТ InAs; 5 — контактный слой со стороны подложки

На рис. 3 схематически представлены ФЭП, изготовленные на основе полученных гетероструктур AlGaAs–GaAs с КТ InAs. Тылный контакт был сплошным, а фронтальный имел форму гребенки. Ширина контактных дорожек составляет 20 мкм, расстояние между контактными дорожками — 80 мкм. Световая характеристика разработанных ФЭП приведена на рис. 4.

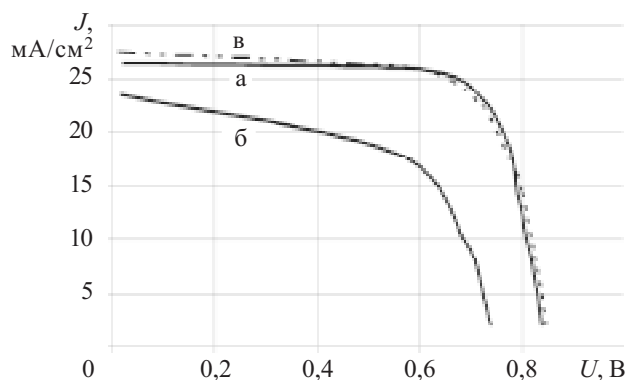


Рис. 4. Световая характеристика ФЭП с 12 слоями при $K_c=1$: а — контрольный ФЭП, не содержащий КТ; б — ФЭП с КТ в области p – n -перехода; в — ФЭП с КТ в p -области

Как следует из рис. 4 (кривая б), структуры с КТ в области p – n -перехода имели характеристики хуже, чем у контрольного образца, а именно: образец ФЭП с 12 слоями КТ в области p – n -перехода имел напряжение холостого хода $U_{xx}=0,75$ В, ток короткого замыкания $J_{кз}=23,5$ мА/см², а контрольный — $U_{xx}=0,84$ В, $J_{кз}=26,5$ мА/см². Полученные результаты совпадают с результатами работы [4] и могут быть объяснены рекомбинацией электронно-дырочных пар в области p – n -перехода, где размещены КТ.

ФЭП с 12 слоями КТ в p -области структуры имел $U_{xx}=0,85$ В, $J_{кз}=27,5$ мА/см² (рис. 4, кривая в). Увеличение $J_{кз}$, которое наблюдается в такой структуре по сравнению с контрольным образцом, свидетельствует о поглощении и преобразовании длинноволновой части солнечного спектра. Таким образом, введение КТ в p -область структуры, полученной методом ЖФЭ, не приводит к ухудшению параметров ФЭП с КТ.

Из рис. 4 видно, что ФЭП с 12 слоями КТ в p -области несущественно отличается от контрольного ФЭП, не имеющего КТ. Это связано со слабым поглощением длинноволнового излучения в связи с малым количеством массивов КТ. Это может быть также обусловлено отсутствием процессов рекомбинации неравновесных носителей в области расположения КТ.

Контрольный ФЭП был изготовлен на подложке n^+ -GaAs, на которой методом ЖФЭ при температуре 850°C сначала выращивался буферный слой n -GaAs, а потом слой p -Al_{0,8}Ga_{0,2}As:Zn толщиной 100 нм. В процессе выращивания p -слоя в буферном слое формировался диффузионный p – n -переход. Поверх p -Al_{0,8}Ga_{0,2}As выращивался подконтактный слой p^+ -GaAs толщиной 1 мкм для нанесения фронтальной контактной сетки.

Выводы

Исследования подтвердили, что метод жидкофазной эпитаксии позволяет получать гетероструктуры с квантовыми точками. Созданные на их основе фотоэлектрические преобразователи достаточно эффективны и, в отличие от ФЭП, полученных МОС-гидридной технологией, не ухудшают параметры в случае если КТ расположены не в области p – n -перехода. Небольшое увеличение КПД ФЭП с КТ связано, очевидно, с небольшим количеством массивов (12 массивов) квантовых точек.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Karokava K. Energy from the Desert.— James & James.— 2003.
2. Green M. A. Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond // Physica.— 2002.— Vol. E 14.— P. 65–70.
3. Brown A. S., Green M. A. Limiting efficiency of multiple band solar cells: an overview // Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference.— 2001.— Munich, Germany.— P. 246–249.
4. Norman A. G., Hanna M. C., Dippe P. et al. InGaAs/GaAs QD superlattices: MOVPE growth, structural and optical characterization, and application in intermediate-band solar cells // Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition.— 2005.— Lake Buena Vista, Florida, USA.— P. 3–7.
5. Maronchuk I. E., Erochin S. Yu., Kulutkina T. F. et al. Solar cells heterostructures with InAs quantum dots obtained by liquid phase epitaxy // Third World Conference on Photovoltaic Energy Conversion.— 2003.— Osaka, Japan.— P. 11–18.
6. Марончук И. Е., Марончук А. И., Кулюткина Т. Ф. и др. Формирование квантовых точек в процессе жидкофазной эпитаксии методом импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.— 2005.— № 12.— С. 95–99.
7. Maronchuk I., Minailov A., Andronova E. et al. Quantum dots PV-cells obtained by liquid phase epitaxy // Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference.— 2004.— Paris, France.— P. 352–354.
8. Maronchuk I. E., D'yachenko A. M., Minailov A. I. et al. Obtaining heterostructures with quantum dots for sensors by using liquid phase epitaxy // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.— 2004.— Vol. 7, N 4.— P. 363–367.

К. т. н. Ю. Г. ДОБРОВОЛЬСКИЙ, к. т. н. В. В. РЮХТИН,
И. И. ФЕДИНЧУК, В. Г. ЮРЬЕВ

Украина, г. Черновцы, НПФ «Тензор», ЦКБ «Ритм»
E-mail: td_tenzor@mail.ru

Дата поступления в редакцию
29.02 2008 г.

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

СИММЕТРИЧНЫЙ ДВУХКООРДИНАТНЫЙ ФОТОДИОД

Разработан и исследован двухкоординатный фотодиод на продольном фотоэффекте, имеющий симметричные по крутизне и продольному сопротивлению координатные характеристики.

Одной из актуальных задач современной оптоэлектронной техники является создание устройств для определения координат различных объектов. В качестве датчиков в таких устройствах используются координатные фотодиоды (ФД) разных конструкций. Принцип действия одного из координатных ФД базируется на продольном фотоэффекте. Этот эффект (наличие координатной чувствительности при локальной засветке p - n -перехода), основанный на растекании носителей фототока от места генерации, был открыт В. Шоттки в 1930 году и использован в патентах Д. Панкова и Дж. Волмарка в 50-х годах прошлого века [1]. Важнейшим условием применения таких фотодиодов является симметричность крутизны координатных характеристик как по оси X , так и по оси Y .

Актуальной задачей микрофотоэлектроники является создание конструкций фотодиодов, обеспечивающих выполнение этого условия.

В литературе описаны фотодиоды на продольном фотоэффекте [2, 3]. В конструкции таких ФД взаимоположенные контакты для снятия координатных характеристик формируются на тонком легированном слое (ось X) и на исходной кремниевой подложке (ось Y). Очевидно, что у них крутизна координатных характеристик, которая определяется продольным сопротивлением $R_{пр}$, по осям X и Y существенно различается. Для оси X это продольное сопротивление определяется режимами технологического процесса диффузии примеси, а для оси Y — толщиной и сопротивлением исходной полупроводниковой пластины.

Целью работы являлось создание и исследование двухкоординатного фотодиода на продольном фотоэффекте, который отличался бы идентичностью координатных характеристик по осям X и Y .

Результаты исследований

Разработанный двухкоординатный ФД базируется на подложке из кремния марки КЭФ с удельным сопротивлением 100 Ом·см толщиной 300 мкм. Поверхностное сопротивление ρ_s области, легированной бо-

ром (фоточувствительная площадка p^+ -типа проводимости), составляет около 500 Ом/□ при размерах 5×5 мм. На рис. 1 показано схематическое изображение кристалла ФД с контактными площадками, выполненными из алюминия.

Кристалл изготовлен методом стандартной планарной технологии. Основной проблемой технологического процесса получения слоя p^+ -типа проводимости (использован метод диффузии из твердых источников) являлось получение максимальной величины поверхностного сопротивления ρ_s при обеспечении небольшого разброса его значений по поверхности кристалла фотодиода, т. к. существенное изменение ρ_s по поверхности фоточувствительного элемента приводит к нелинейности координатной характеристики.

В предложенной конструкции ФД контакты для снятия координатной характеристики выполнены на p^+ -слое, что позволяет получить максимальную фоточувствительность. Исследования координатных характеристик проводились в различных режимах работы для определения наиболее эффективного режима.

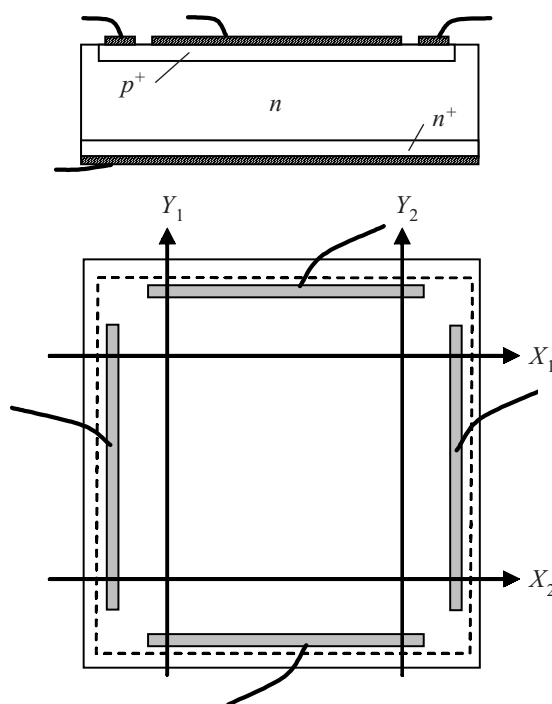


Рис. 1. Схематическое изображение кристалла фотодиода

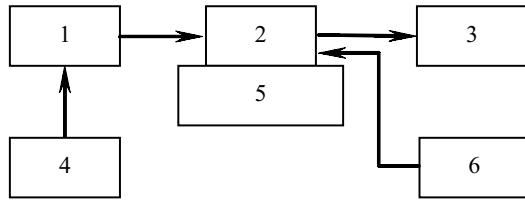


Рис. 2. Структурная схема установки для измерения координатной характеристики ФД:
1 — осветитель; 2 — исследуемый ФД; 3 — преобразователь ток—напряжение ППТН-2; 4 — блок питания лампы Б5-21 (АДБ109.00); 5 — координатный столик с ценой деления 0,01 мм; 6 — блок питания ФД (Б5-44)

Измерения в постоянном световом потоке проводились на установке, структурная схема которой приведена на **рис. 2**. Осветитель 1 состоял из источника излучения типа А (лампы накаливания с цветовой температурой $T_{\text{цв}}=2856$ К), диафрагмы и объектива «Юпитер-3».

С учетом соотношений геометрической оптики [4, с. 288—290], при помощи оптической системы в плоскости фоточувствительной площадки фотодиода формировался световой зонд диаметром 100 мкм (при диаметре диафрагмы 1 мм). При измерении координатной характеристики чувствительности ФД при немодулированном потоке оптическая схема осветителя защищалась от фоновых засветок светонепроницаемым экраном.

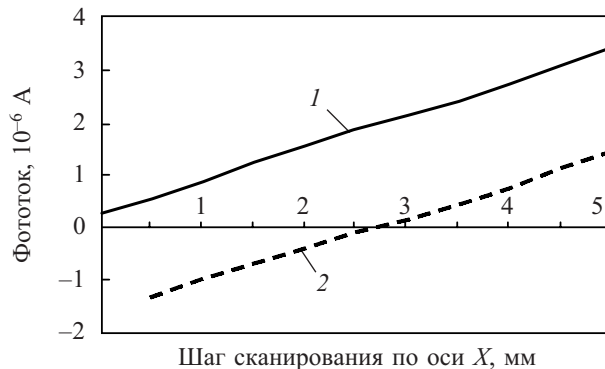


Рис. 3. Координатные характеристики ФД при рабочем напряжении 5 В (1) и 0 В (2), снятые в средней части фоточувствительного элемента

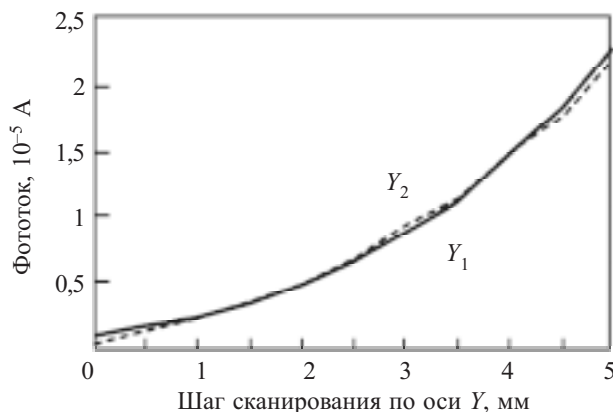


Рис. 4. Координатные характеристики ФД при двух значениях X. Рабочее напряжение на ФД не подавалось

Фоточувствительную поверхность фотодиода сканировали световым зондом вдоль осей X_1, X_2 (рис. 1) при неизменной координате Y и вдоль осей Y_1, Y_2 при неизменной координате X.

Результаты измерений координатной чувствительности ФД представлены на **рис. 3, 4**.

На рис. 3 показаны координатные характеристики, снятые в средней части фоточувствительного элемента вдоль оси X при двух значениях рабочего напряжения. Здесь видно, что обе характеристики достаточно линейны.

На рис. 4 представлены координатные характеристики фотосигнала, измеренные вдоль оси Y при двух значениях X в отсутствие рабочего напряжения (характеристики, полученные при сканировании вдоль оси X — аналогичны). Различие координатных характеристик Y_1 и Y_2 лежит в пределах точности измерений и не превышает 10%.

Как видно из рис. 3 и 4, линейность характеристик ФД ухудшается при удалении от центральной зоны фоточувствительного элемента и приближении к продольным контактам. Это объясняется шунтированием поверхностного сопротивления p^+ -слоя металлическим контактом.

Также были проведены измерения координатных характеристик фотодиодов, работающих в режиме холостого хода. Полученные результаты идентичны приведенным на рис. 3 и 4.

С помощью установки, структурная схема которой приведена на **рис 5**, исследовались условия работы фотодиода под действием импульсного излучения длительностью до 5 мкс.

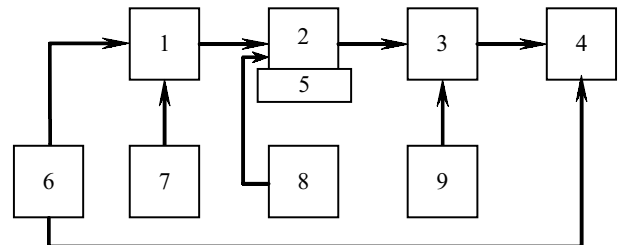


Рис. 5. Структурная схема установки для измерения импульсной монохроматической чувствительности ФД:
1 — источник импульсного излучения; 2 — исследуемый ФД; 3 — широкополосный усилитель; 4 — осциллограф; 5 — координатный столик; 6 — генератор импульсов; 7 — блок питания источника излучения; 8 — блок питания ФД; 9 — блок питания усилителя

Координатная характеристика фотодиода при засветке фоточувствительной площадки импульсным излучением с длиной волны 0,9 мкм, длительностью импульса 5 мкс и при диаметре светового зонда 400 мкм для различных величин рабочего напряжения U_p приведена на **рис. 6**.

Как видно, наиболее близки к линейным координатные характеристики на рис. 3. В случае, представленном на рис. 6, сравнительно линейные зоны наблюдаются в области, удаленной от контактов ФД на 1—2 мм. При приближении светового зонда к то-

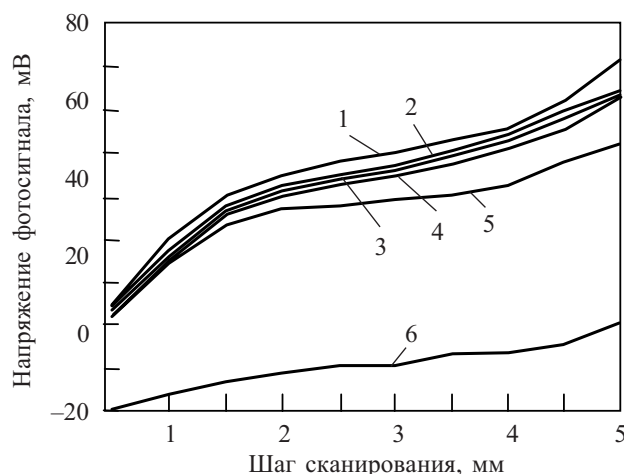


Рис. 6. Координатная характеристика ФД при засветке импульсным оптическим излучением, снятые в средней части фоточувствительного элемента, для различных U_p (в В): 1 — 5; 2 — 2,5; 3 — 1,5; 4 — 1; 5 — 0; 6 — U_p отсоединено

косъемным контактам координатная характеристика отклоняется от линейности. Это происходит из-за того, что слой контактной металлизации шунтирует продольное сопротивление тем больше, чем ближе световой зонд к контакту.

Таким образом, разработанная конструкция ФД может обеспечивать линейность координатной характеристики, в лучшем случае, на некотором удалении от периферии фоточувствительного элемента.

Крутизна координатной характеристики при фиксированном уровне засветки возрастает с ростом поверхностного сопротивления ρ_s и с уменьшением ширины области пространственного заряда. В фотодиоде, работающем на продольном фотоэффекте, продольное сопротивление $R_{пр}$ всегда меньше обратного сопротивления p - n -перехода и вычисляется по формуле

$$R_{пр} = 1/\lambda^{i_t}, \quad (1)$$

где i_t — темновое сопротивление насыщения p - n -перехода;
 $\lambda = q/(kT)$;
 q — заряд электрона;
 k — постоянная Больцмана;
 T — температура.

Для таких приборов при слабом световом сигнале ($Li_{\phi}\rho_s \ll 1$) координатная характеристика (зависимость выходного сигнала от координаты светового пятна) линейна и для $R_{пр} \ll R_{пп}$ и $Li_{\phi}\rho_s \ll 1$ определяется формулой [3]

$$U_x = \frac{i_{\phi} R_{пп} x}{2L}, \quad (2)$$

где i_{ϕ} — фототок;
 $2L$ — длина ФД;
 $R_{пп}$ — поперечное сопротивление;
 x — координата светового пятна.

Полученные результаты показывают, что практически невозможно получить оптимальное значение продольного сопротивления, которое является определяющим фактором линейности и идентичности координатных характеристик по осям X и Y . Это связано с тем, что сопротивление p^+ -слоя определяется режимами технологического процесса диффузии бора (фосфора), которые, в свою очередь, должны отвечать технологическим режимам, необходимым при создании фотодиодов. И если для однокоординатного фотодиода продольное сопротивление можно увеличить за счет конструкции, выполнив p^+ -слой в виде меандра или узкого прямоугольника, то для симметричного двухкоординатного фотодиода это невозможно. Авторы допускают, что этих недостатков можно избежать, изменив конструкцию фотоприемника так, чтобы контакты для снятия координатной зависимости были выполнены на подложке, в данном случае, n -типа, а общий контакт находился на p^+ -слое.

Действительно, простой расчет показывает, что используя кремний с удельным сопротивлением 600 Ом·см и толщиной подложки 0,03 см можно получить значение продольного сопротивления по обеим координатам 20 кОм. Крутизна координатной характеристики такого фотодиода должна возрасти по сравнению с рассмотренным фотодиодом.

Таким образом, разработан двухкоординатный фотодиод, принцип действия которого базируется на продольном фотоэффекте. Исследование его фотоэлектрических параметров показало, что наилучший вид (с точки зрения крутизны и линейности) координатная характеристика имеет в центральной части фоточувствительного элемента.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Wellmark J. T. A new semiconductor photocell using lateral photoeffect // Proc.IRE.— 1957.— Vol. 45.— P. 474—484.
2. Рюхтін В. В., Годованюк В. М. Кремнієвий фотодіод на поздовжньому фотоэффекті // Науковий вісник Чернівецького національного ун-ту.— 1998.— № 29.— С. 193—200.
3. Таубкин И. И., Фример А. И., Лисейкин В. П. и др. Продольный фотоэффект в p - и n -областях кремниевых фотодиодов // ОМП.— 1983.— № 5.— С. 16.
4. Ландсберг Г. С. Оптика.— М.: Наука, 1976.

К. т. н. В. А. КРАСНОВ, д. ф.-м. н. Ю. М. ШВАРЦ,
к. ф.-м. н. М. М. ШВАРЦ, Д. П. КОПКО, С. Ю. ЕРОХИН,
А. М. ФОНКИЧ, к. т. н. С. В. ШУТОВ, Н. И. СЫПКО

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарёва
E-mail: shwarts@isp.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
21.05 2008 г.

Оппонент к. ф.-м. н. А. В. РЫБКА
(ННЦ ХФТИ, г. Харьков)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК GaP-ДИОДОВ p^+-n -ТИПА

Разработана методика получения диодных эпитаксиальных структур фосфида галлия (p^+-n -типа), изготовлены опытные образцы сенсоров температуры и определены их технические параметры, показана перспективность применения.

Необходимость создания нового поколения высокоточных и взаимозаменяемых датчиков температуры на основе широкозонных диодов обусловлена требованиями экстремальной высокотемпературной электроники. Ведутся поиски материалов, перспективных для этой цели [1, 2]. Фосфид галлия известен как полупроводниковый материал для создания светодиодов, работающих в видимой области спектра, в частности красного и зеленого свечения. Вместе с тем, диодные структуры из широкозонного GaP ($E_g \approx 2,25$ эВ при 300 К) перспективны для создания чувствительных элементов высокотемпературных сенсоров [3—5].

Целью настоящей работы является разработка и апробирование методики изготовления диодов на основе эпитаксиальных структур фосфида галлия p^+-n -типа с конструктивно-технологическими параметрами, обеспечивающими их применение в высокотемпературной термометрии.

Методика изготовления диодов

Для получения эпитаксиальных p^+-n -структур GaP был выбран метод жидкофазной эпитаксии, перспективный для получения тонких, однородных и совершенных по структуре p^+ - и n -слоев эмиттера и базы диода, соответственно. Подложками служили промышленные, легированные теллуром, пластины n^+ -GaP с концентрацией свободных электронов $n^+ \approx (1—5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Подложки были выращены из расплава по методу Чохральского и ориентированы в плоскости (100).

Эпитаксиальное наращивание n -слоев базы диодов проводили при температуре подложки около 820°C в потоке высокочистого водорода с точкой росы -70°C методом зонной перекристаллизации с градиентом температуры [6]. В процессе роста слоя применяли фоновое легирование азотом по методу [7]. Легирование слоя мелкими донорными примесями не использовалось. Эмиттерный p^+ -слой GaP

наращивали методом принудительного охлаждения раствора-расплава Ga—GaP с добавками легирующих примесей цинка и магния при температуре начала кристаллизации $(900 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Контактные слои из сплава Ni наносили методом термического распыления с последующим их золочением или серебрением. Планарные операции завершались формированием мезоструктуры с использованием метода маскирования, операций фотолитографии и селективного травления. После разделения приборных пластин на чипы, используя стандартные технологические методы создания полупроводниковых приборов, осуществляли операции термокомпрессии чипов на коваровый держатель, разварку выводов и герметизацию диодов в корпусе из термореактивной пластмассы.

Толщина эпитаксиальных слоев контролировалась с помощью микроскопа МИИ-4 на сколе структур или путем изготовления шар-шлифов. Точность измерения толщины пленок составляла около $0,3 \text{ мкм}$.

Для определения концентрации носителей заряда и характера ее распределения по толщине пленки проводили послойное стравливание, а затем измерение вольт-фарадных характеристик структур с помощью измерителя емкости Л2-7.

Контроль однородности легирования по площади эпитаксиальных структур GaP осуществляли по разбросу величины пробивного напряжения U_b тестовых диодов с барьером Шоттки. Для исследования тонкопленочных p^+-n -структур GaP отбирались образцы с неоднородностью легирования, не превышающей 5%.

Для оценки плотности дислокаций N_D в n - и p^+ -слоях GaP применялся металлографический метод. Распределение дислокаций по диаметру и толщине эпитаксиальной пленки определялось при послойном стравливании слоев GaP в полирующем травителе с последующим избирательным травлением слоя и выявлением дислокаций методом декорирования. Затем подсчитывалось число фигур травления в поле зрения микроскопа МИМ-8М при увеличении $\times 200$ в $40—50$ участках. Полученное число усреднялось и делилось на площадь поля зрения, равную примерно $3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$. Для исследованных пленок $N_D \approx (1—5) \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$.

Концентрацию и подвижность носителей заряда в n - и p^+ -слоях эпитаксиальной структуры GaP определяли по эффекту Холла при двух температурах ($77,4$

Параметры исследуемых p^+-n -структур GaP

Слой	Толщина слоя, мкм	Концентрация носителей заряда, см^{-3}	Холловская подвижность носителей заряда, $\mu, \text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$		Плотность дислокаций, см^{-2}
			77,4 К	300 К	
n -GaP	$d_n \approx 3-7$	$n \approx (5-20) \cdot 10^{14}$	1100—1220	230—270	$N_{dn} \leq 3 \cdot 10^4$
p^+ -GaP	$d_{p^+} \approx 10-15$	$p^+ \approx (2-3) \cdot 10^{18}$	—	—	$N_{dp} \leq 3 \cdot 10^4$

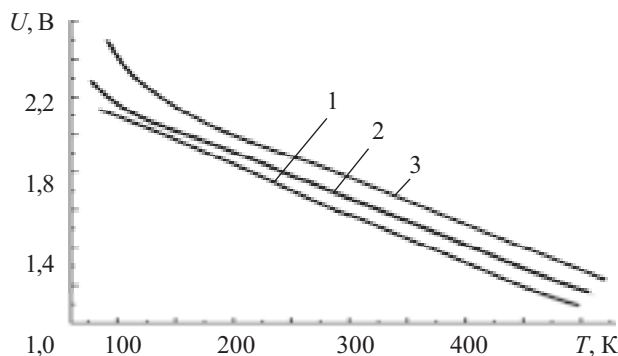


Рис. 1. Термометрические характеристики p^+-n -GaP-диодов при трех значениях рабочего тока (в мкА): 1 — 1; 2 — 10; 3 — 100

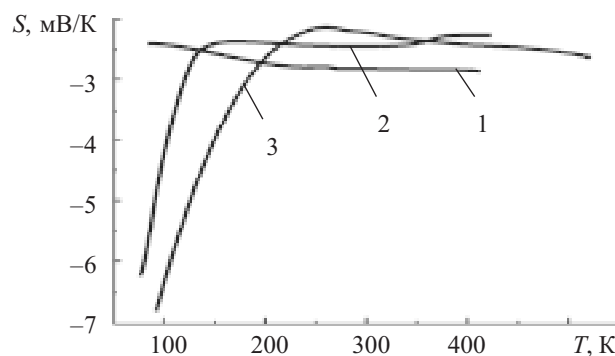


Рис. 2. Чувствительность p^+-n -GaP-диодов при трех значениях рабочего тока (в мкА): 1 — 1; 2 — 10; 3 — 100

и 300 К) с использованием технологических пластин-спутников.

Термометрические характеристики (ТМХ) диодов при трех значениях рабочего тока (1, 10 и 100 мкА) измерены на метрологическом стенде УГТ-А в диапазоне 78—520 К. Точность поддержания рабочего тока была не ниже $\pm 0,1\%$. Основная абсолютная погрешность измерения температуры не превышала $\pm 0,03$ К.

Прямые вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов измерены на автоматизированной установке в интервале токов 10^{-11} — 10^{-2} А и диапазоне температуры 77,3—473 К. Погрешность поддержания температуры не превышала $\pm 0,1$ К.

Результаты измерений электрофизических и структурных характеристик эпитаксиальных слоев p^+-n -структур GaP, выращенных методом жидкостной эпитаксии, представлены в **таблице**.

Для проведения исследований была сформирована партия из десяти образцов фосфид-галлиевых диодов со следующими параметрами: $d_n \approx (5 \pm 1)$ мкм,

$d_{p^+} \approx (12 \pm 2)$ мкм, $n \approx (5-8) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $p^+ \approx (2-3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $\mu (300 \text{ К}) \approx 250 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, $N_{dn} \approx 8 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$, $N_{dp} \approx 1,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$.

При комнатной температуре отклонение величины прямого напряжения экспериментальных образцов термодиодов от номинального значения лежит в пределах ± 4 мВ. Зная величину чувствительности термодиодов при данной температуре, можно определить меру их идентичности как отношение U/S , которая в исследованной партии образцов лежит в пределах $\pm 1,2$ К.

Типичные ТМХ и температурные зависимости чувствительности опытных диодов представлены на **рис. 1 и 2**. Следует отметить, что при температуре 500 К падение напряжения на структуре в зависимости от величины тока составляет 1,05—1,3 В. Исследования стабильности свойств диодов показали, что в течение 5 месяцев отклонения температурных характеристик диодов составляют $\pm 2\%$.

Как видно из рис. 2, для тока 1 мкА ТМХ в температурном диапазоне 78—520 К отличается высокой линейностью с чувствительностью $-2,5$ мВ/К. Для

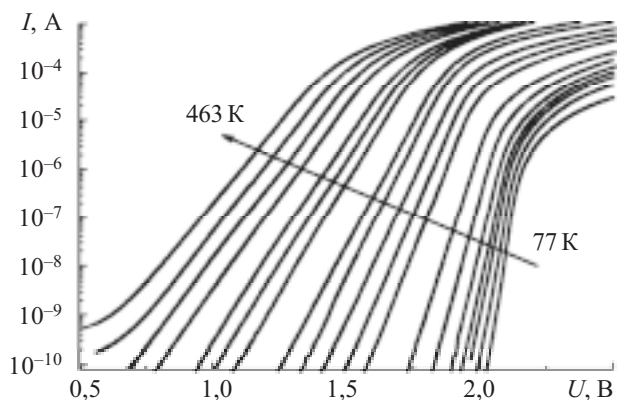


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики GaP-диодов, измеренные в диапазоне температуры 77—463 К

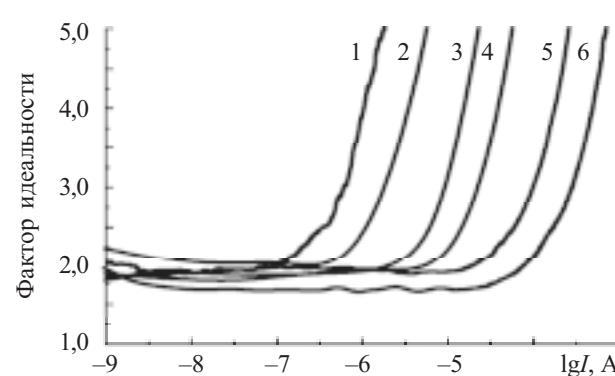


Рис. 4. Токосовые зависимости фактора идеальности для GaP-диодов при разной температуре (в К): 1 — 77; 2 — 129; 3 — 160; 4 — 208; 5 — 250; 6 — 471

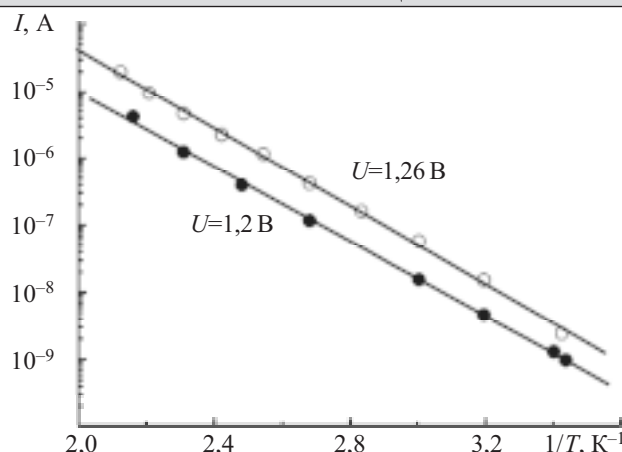


Рис. 5. Зависимость тока GaP-диода от $1/T$ при разных значениях напряжения U на диоде

тока 10 мкА отклонение от линейности ТМХ и последующее возрастание чувствительности наблюдается при температурах до 170 К, а для 100 мкА — до 250 К.

На рис. 3 показаны ВАХ диодов, измеренные в диапазоне 77—463 К. Из анализа ВАХ определены токовые зависимости фактора идеальности диодов (рис. 4). Видно, что для тока 1 мкА во всем исследованном диапазоне температуры доминирующим является рекомбинационный механизм токопереноса с фактором идеальности, близким к двум. Для токов 10 и 100 мкА преобладание рекомбинационного механизма сохраняется при температуре выше 160 и 250 К, соответственно. Величина энергии активации, найденная из зависимостей $I(T)$ при постоянной величине напряжения на диоде (рис. 5), равна 1,2 эВ, что соответствует половине ширины запрещенной зоны GaP.

Таким образом, разработана методика получения эпитаксиальных p^+-n -структур на основе GaP с повышенной надежностью и минимальным разбросом падения прямого напряжения. Определены термометрические характеристики разработанных GaP-диодов p^+-n -типа и показана перспективность их применения в качестве чувствительных элементов высокотемпературных сенсоров.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шварц Ю. М. Фізичні основи напівпровідникових приладів екстремальної електроніки / Дис....-ра фіз.-мат. наук.— Киев: ІФН ім. В. Є. Лашкарьова, 2004.
2. Беляев А. Е., Болтовцев Н. С., Иванов В. Н. и др. Термостойкий диод Шоттки $TiB_x-n-GaP$ // ФТП.— 2008.— Т. 42, №4.— С. 463—467.
3. Griffing B. F., Shivashankar S. A. Use of light-emitting diodes as temperature sensors // Rev.Sci.Instrument.— 1977.— Vol. 48, N 9.— P. 1225—1226.
4. Acharya Y. B., Vyavahare P. D. Study on the temperature sensing capability of a light-emitting diode // Rev.Sci.Instrument.— 1997.— Vol. 68, N 12.— P. 4465—4467.
5. Соболев М. М., Никитин В. Г. Высокотемпературный диод на основе эпитаксиальных слоев GaP // Письма в ЖТФ.— 1998.— Т. 24, № 9.— С. 1—7.
6. Краснов В. А., Шварц Ю. М. Жидкофазная эпитаксия слоев GaP(N) для высокотемпературных диодных сенсоров // Тез. докл. X нац. конф. по росту кристаллов «НКРК-2002».— Россия, г. Москва.— 2002.— С. 525.
7. Василенко Н. Д., Краснов В. А., Крыжановский А. Н., Чернер В. М. Процессы дефектообразования и их влияние на механические напряжения в структурах фосфида галлия зеленого свечения // Известия высших учебных заведений. Физика.— 1991.— № 1.— С. 23—27.

в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Инфракрасные отрезающие фильтры для оптофотоэлектронных устройств на основе монокристаллов CdSb, ZnSb для оптофотоэлектронных устройств. (Украина, г. Черновцы)
- Электроосаждение конформных электродов для получения туннельного перехода с вакуумным нанозазором. (Грузия, г. Тбилиси)
- Микропроцессор звездообразной структуры. (Украина, г. Одесса)
- Алгоритмическая фильтрация помех методом α -усеченного среднего в устройствах преобразования угол — код. (Украина, г. Черкассы)
- Технология и оборудование для обработки алмазных материалов современной электроники. (Россия, г. Фрязино, г. Москва)
- Универсальная матрица структурно-логических преобразований n -мерного куба E_n единого кодируемого формата. (Украина, г. Одесса)
- Связь параметров спектральной плотности фликкер-шума с особенностями внутренней структуры системы. (Украина, г. Львов)
- Расчет нормальных допусков с учетом отклонений коэффициентов внешних воздействий. (Украина, г. Запорожье)
- О возможности бесконтактного определения эффективности термоэлектрических материалов. (Украина, г. Черновцы)
- Измерения температуры с использованием оптических датчиков на основе двупреломляющих кристаллов лейкосапфира и ниобата лития. (Украина, г. Львов)

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции

К. т. н. Е. В. АНДРОНОВА, к. т. н. В. В. КУРАК

Украина, Херсонский национальный технический университет
E-mail: vk_74@mail.ruДата поступления в редакцию
03.06 2008 г.Оппонент д. х. н. В. Н. ТОМАШИК
(ИФП им. В. Е. Лашкарева, г. Киев)

ПРЕДЭПИТАКСИАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ПОДЛОЖЕК GaSb ДЛЯ ЖИДКОФАЗНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ГОМОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ

Представлены результаты исследований по оптимизации режимов предэпитаксиальной обработки подложек GaSb химическим травлением в смеси на основе неорганических кислот.

Известно, что одной из ключевых стадий, оказывающих существенное влияние на совершенство эпитаксиальных слоев, является предэпитаксиальная обработка подложек. В случае использования для эпитаксиального наращивания слоев методов жидкофазной эпитаксии, помимо структурного и морфологического совершенства подложки, существенным также является обеспечение равномерной смачиваемости поверхности подложки раствором-расплавом.

Стандартная технология подготовки пластин GaSb к эпитаксиальному наращиванию слоев включает ряд этапов, таких как механические шлифовка и полировка, а также химико-механическая полировка. Однако относительно низкая твердость антимонида галлия (микротвердость по Моосу 448 кг/мм² [1, с. 434]) обуславливает большую глубину нарушенного слоя (60—80 мкм) после разрезания слитка на пластины, а также после механических обработок и химико-механической полировки пластин (≥ 5 мкм) [2, с. 107]. Кроме того, согласно [3, с. 58], при механической шлифовке и полировке в пластине возникают неконтролируемые механические напряжения, релаксация которых сопровождается перестройкой структурных дефектов и приводит к появлению нарушенного слоя, скрытого в объеме пластины на расстоянии 15—50 мкм от поверхности и негативно влияющего на параметры эпитаксиальных структур, в частности на время жизни неосновных носителей заряда.

Целью данной работы являлась разработка методики предэпитаксиальной обработки пластин GaSb, исключающей стадии механической шлифовки и полировки, но обеспечивающей требуемое для жидкофазной эпитаксии качество поверхности подложек.

Методика эксперимента

Для получения подложек без скрытого нарушенного слоя многостадийная предэпитаксиальная обработка пластин GaSb, включающая механическую шлифовку и полировку, была заменена одним видом обработки — химической полировкой в растворах, обладающих разной скоростью реакции: для предвари-

тельного сглаживания больших неровностей применялся травитель с повышенной скоростью, а для финишной полировки — травитель с меньшей скоростью травления. Такие растворы использовались ранее для обработки подложек арсенида галлия [3, с. 59], а также теллурида кадмия и твердых растворов на его основе [4].

Анализ литературных источников показал отсутствие информации о применении такой двухстадийной химической полировки для пластин антимонида галлия сразу же после операции разрезания слитка. Тем не менее, удалось установить, что для GaSb наиболее часто используются полирующие травители на основе неорганических кислот, в частности азотной и плавиковой [2, с. 121; 5, с. 72; 6, с. 380; 7, с. 150; 8], хотя детальное описание режимов предэпитаксиальной обработки подложек GaSb в литературе отсутствует. Поэтому возникла необходимость проведения исследований по выбору полирующих травителей и разработке оптимальных режимов химической полировки подложек GaSb.

Двухстадийной химической полировке подвергались пластины GaSb марки ГСЭ(Т)2-2 с ориентацией (111), а также ГСДГ(Ц)-1 с ориентацией (100). Использовались травители двух составов, отличающиеся скоростью травления: $\text{H}_2\text{O}_2\text{:HF:H}_2\text{O}=4\text{:}1\text{:}15$ и $\text{HNO}_3\text{:HF:H}_2\text{O}=3\text{:}1\text{:}2$ [5, с. 72; 7, с. 150]. Полировка осуществлялась во вращающемся реакционном сосуде из фторопласта при частоте вращения ν до 30 об/мин в диапазоне температуры от 10 до 40°C. Частота вращения реакционного сосуда контролировалась с точностью $\pm 0,5$ об/мин.

Морфология поверхности подложек изучалась с помощью металлографического микроскопа ММУ-3 и интерференционного микроскопа МИИ-4. Измерение параметров шероховатости поверхности осуществлялось с помощью микроскопа МИИ-4, снабженного винтовым окулярным микрометром, по изгибу интерференционных полос в местах, где имеют место неровности.

Средняя скорость травления определялась по изменению толщины пластин в результате химической полировки и времени химической обработки.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Вне зависимости от кристаллографической ориентации поверхности при обработке пластин GaSb в полирующем травителе $\text{H}_2\text{O}_2\text{:HF:H}_2\text{O}=4\text{:}1\text{:}15$ в иссле-

Состав травителя	Технологическое использование	Механизм растворения	V , мкм/мин	T , °C	ν , об/мин	t , мин	Rz , мкм
$\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=3:1:2$	Предварительная обработка	Кинетический	43	15	20	2	0,08
$\text{H}_2\text{O}_2:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=4:1:15$	Финишная полировка	Диффузионный	9	15	20	5	0,05

дую поверхность при $\nu=8\text{--}11$ об/мин. С увеличением частоты вращения до 20 об/мин поверхность пластин становилась зеркально гладкой (минимальное значение шероховатости Rz составляло 0,05 мкм), что объясняется интенсификацией процесса отвода продуктов реакции от поверхности подложки в объем травителя. В то же время, при полировке в травителе $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=3:1:2$ получали зеркальную поверхность пластин (минимальное значение $Rz=0,08$ мкм) в диапазоне частоты вращения от 18 до 21 об/мин.

Представленные результаты дают возможность утверждать, что оптимальная частота вращения реакционного сосуда при полировке пластин GaSb в указанных композициях составляет порядка 20 об/мин.

Исследование зависимости качества полировки поверхности подложек от температуры травителя показало, что минимальное значение шероховатости достигалось при температуре порядка 15°C: для травителя $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=3:1:2$ удалось достичь значения $Rz=0,08$ мкм, а для состава $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=4:1:15$ — $Rz=0,05$ мкм.

Температурные зависимости скорости травления V (рис. 1), а также использование уравнения Аррениуса, дали возможность определить энергию активации процессов полировки, которая для травителя $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ составила 79,4 кДж/моль, что отвечает кинетическому лимитированию процесса травления, а для раствора $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ — 28 кДж/моль, что характерно для диффузионного ограничения процессов полировки подложки [9, 10].

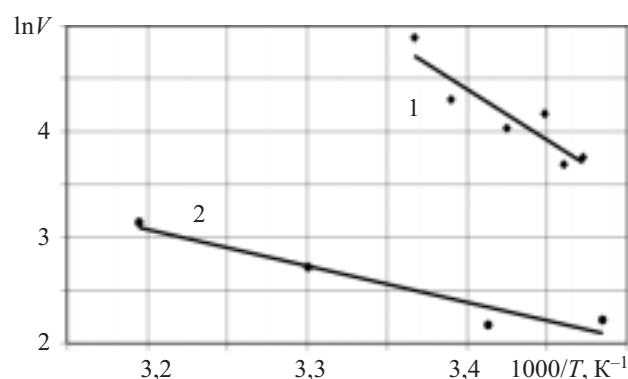


Рис. 1. Зависимость скорости полировки подложек GaSb от температуры травителя:

1 — $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=3:1:2$; 2 — $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=4:1:15$

Зависимости, представленные на рис. 1, позволяют сделать вывод о том, что травитель $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=4:1:15$, обладающий меньшей скоростью травления и обеспечивающий меньшее значение Rz по сравнению с составом $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$, должен использоваться для финишной полировки пластин, в

то время как травитель $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=3:1:2$ — для предварительного удаления нарушенного слоя.

Анализ полученных результатов дает возможность установить оптимальные режимы предэпитаксиальной обработки пластин GaSb, а именно: минимальное время травления t , достаточное для гарантированного удаления нарушенного слоя, температуру травителя T и частоту вращения реакционного сосуда ν , обеспечивающие минимальное значение шероховатости поверхности (см. таблицу).

На подложках GaSb, прошедших предэпитаксиальную обработку в указанных оптимальных режимах, выращены гомоэпитаксиальные слои антимонида галлия методами принудительного охлаждения насыщенного раствора-расплава [11] и импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава [12]. Морфология поверхностей полученных эпитаксиальных слоев представлена на рис. 2.

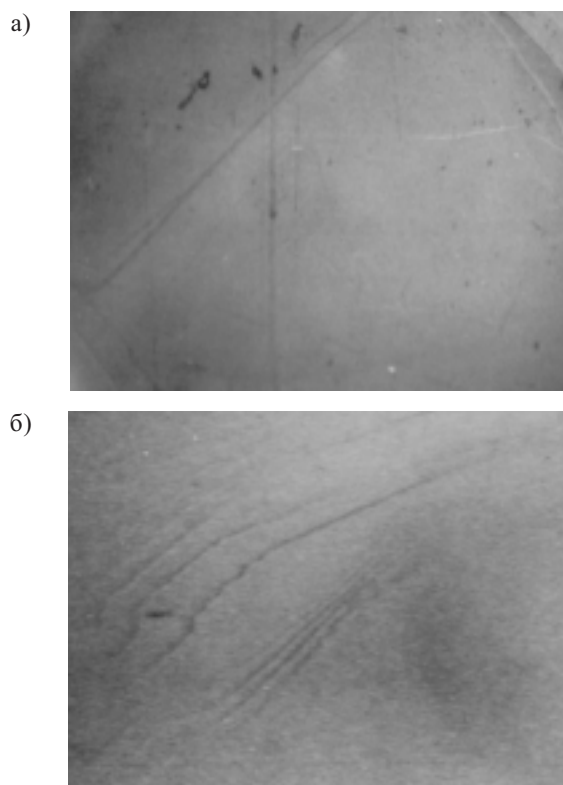


Рис. 2. Морфология поверхности гомоэпитаксиальных слоев антимонида галлия толщиной 1 мкм (а) и 5 мкм (б), полученных жидкофазной эпитаксией на подложках GaSb с ориентацией (111)А

Эпитаксиальные слои были сплошными с планарной границей «слой—подложка», что свидетельствует об отсутствии на поверхности подложек стабильных окисных слоев, препятствующих смачиванию раство-

ром-расплавом. Высота микронеровностей поверхности эпитаксиальных слоев в лучших образцах не превышала 0,03 мкм, плотность дислокаций составляла около 10^3 см^{-2} , что соответствует плотности дислокаций в подложке ($2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$).

Таким образом, предложенная методика предэпитаксиальной обработки подложек, позволяет удовлетворять требования, предъявляемые к подложкам GaSb при жидкофазной эпитаксии.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Баранский П. И., Клочков В. П., Потыкевич И. В. Полупроводниковая электроника. Справочник.— К.: Наукова думка, 1975.
2. Готра З. Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник.— М.: Радио и связь, 1991.
3. Круковский С. И. Тонкие и субмикронные слои на основе GaAs, полученные из растворов в расплаве висмута / Дис. ... канд. техн. наук.— Херсон, ХИИ.— 1993.
4. Білевич Є. О. Формування полірованої поверхні монокристалів телуриду кадмію та твердих розчинів на його основі в травильних композиціях HNO_3 - HNaI -комплексотворювачів для приладів електронної техніки / Автореф. дис. ...канд. техн. наук.— Київ, Ін-т фізики напівпровідників.— 2002.

5. Луфт Б. Д., Перевошиков В. А., Возмилова Л. Н. и др. Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников.— М.: Радио и связь, 1982.
6. Сангвал К. Травление кристаллов. Теория, эксперимент, применение.— М.: Мир, 1990.
7. Кузнецов В. В., Лунин Л. С., Ратушный В. И. Гетероструктуры на основе четверных и пятерных твердых растворов соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$.— Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2003.
8. Dutta P. S., Bhat H. L., Kumar V. The physics and technology of gallium antimonide: An emerging optoelectronic material // J. Appl. Phys.— 1997.— Vol. 81, N 9.— P. 5821—5870.
9. Даниленко С. Г. Розробка травильних композицій та технологічних процесів формування полірованих поверхонь підкладок арсеніду та антимоніду індію для приладів ІЧ-техніки / Автореф. дис. ...канд. техн. наук.— Київ, Ін-т фізики напівпровідників.— 2000.
10. Кусяк Н. В. Взаємодія InAs, InSb та GaAs з бромвідляючими травильними композиціями / Автореф. дис. ...канд. хім. наук.— Львівський нац. ун-т ім. І. Франка.— 2003.
11. Курак В. В., Андропова Е. В. Выращивание тонких гомоэпитаксиальных слоев GaSb принудительным охлаждением раствора-расплава // Тр. 8-й Междунар. науч.-практич. конф. "СИЭТ-2007".— Одесса.— 2007.— С. 372.
12. Maronchuk I. Ye., Kurak V. V., Andronova E. V., Baganov Ye. A. Obtaining GaSb/InAs heterostructures by liquid phase epitaxy // Semiconductor Science and Technology.— 2004.— Vol. 19.— P. 747—751.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Волоконно-оптические датчики / Под ред. Э. Удда.— М.: Техносфера, 2008.— 520 с.

Книга, написанная всемирно признанными специалистами, представляет собой вводный курс в быстроразвивающуюся и охватывающую новые сферы приложений область волоконно-оптических датчиков. В каждом из трех разделов — Основные компоненты; Технология; Приложения — приводятся отдельные примеры основных достижений в этой области. Вместе они предоставляют инженерам, научным работникам, студентам старших курсов и аспирантам возможность составить цельное впечатление о волоконно-оптических датчиках. Книга может использоваться в качестве пособия при чтении учебных курсов, а также на промышленных семинарах по волоконно-оптическим датчикам.



НОВЫЕ КНИГИ

Нанотехнологии. Наноматериалы. Наносистемная техника-2008 / Под ред. П. П. Мальцева.— М.: Техносфера, 2008.— 432 с.

Данная работа является продолжением серии книг издательства «Техносфера» по мировым достижениям в области нанотехнологий. Книга охватывает материалы, опубликованные в 2006—2008 гг. в журнале «Нано- и микросистемная техника», которые сгруппированы по разделам, охватывающим наноматериалы, наноэлектронику, нанодатчики и наноустройства, диагностику наноструктур и наноматериалов, нанобиотехнологию и применение нанотехнологий в медицине. В издании представлены примеры реализации и применения в области технологии формирования наноструктур методов исследования наноматериалов, метрологическое обеспечение и основы технологии наносистемной техники. Книга представляет интерес для ученых, инженеров и преподавателей высшей школы, аспирантов и студентов, специализирующихся в области нанотехнологий, наноматериалов, наноэлектроники, микро- и наносистемной техники.



Н. Е. ЖИТНИК, д. ф.-м. н. С. В. ПЛАКСИН, Л. М. ПОГОРЕЛАЯ,
к. ф.-м. н. И. И. СОКОЛОВСКИЙ, д. т. н. А. А. ЯШИН

Украина, г. Днепропетровск, Институт транспортных систем
и технологий «Трансмаг»
E-mail: plm@westa-inter.com

Дата поступления в редакцию
06.06 2008 г.

Оппонент д. ф.-м. н. В. Я. БРАТУСЬ
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ИСТОЧНИК МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СЛОЖНОЙ ЭНЕРГОЧАСТОТНОЙ И ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ

Обсуждается метод конструкторско-го синтеза магнитоформирующей системы с изменяющимся направлением вращения магнитного поля, которое позволяет учесть хиральную дисимметрию молекул веществ, подлежащих обработке магнитным полем.

В современном производстве широко применяются аппараты и аппаратные комплексы, в которых энергия физических полей — магнитных, электрических, электромагнитных, акустических и их комбинаций — эффективно используется для реализации и ускорения различных технологических процессов. Широкое применение получили магнитные поля [1—5]. Например, при производстве радиоэлектронной аппаратуры и ее компонентов в процессах травления пластин полупроводниковых материалов, корпусов конструкций и очистки после травления, при производстве автономных источников питания радиоэлектронных устройств, очистке промышленных стоков, когда возникают задачи изменения химических и физических свойств веществ, в частности активации соответствующих реагентов, в качестве модификатора указанных свойств используется магнитное поле.

В [6, 7] показана возможность создания переменного вращающегося магнитного поля сложной поляризационной структуры путем комбинации подвижных и неподвижных постоянных высокоэергетических магнитов (преимущественно систем самарий—кобальт и неодим—железо—бор), позволяющего учитывать при обработке веществ пространственную и зарядовую асимметрию молекул и их агрегаций и таким образом существенно изменять физические характеристики материала или ход технологических процессов.

Результатом развития таких исследований должно стать создание аппаратов, в которых модификация параметров вращающегося магнитного поля — амплитуды, частоты, направления вращения — могла бы осуществляться в динамическом режиме, в том числе и программируемым способом. Такие возможности могут быть обеспечены аппаратами с соленоидальной магнитоформирующей системой, в которой

управление режимами работы реализуется вариацией параметров питающих токов.

Целью данной работы является разработка метода синтеза вращающихся магнитных полей, создаваемых комбинацией трех взаимно ортогональных соленоидальных контуров, запитываемых переменным током.

Синтез магнитоформирующей системы. Исходя из априорных представлений о необходимой структуре магнитного поля, магнитоформирующая система была построена с использованием трех катушек, плоскости обмоток которых перпендикулярны друг другу. Каждая из обмоток создает магнитное поле с индукцией, соответственно, B_1 , B_2 , B_3 , представленными на рис. 1 в виде векторов, при этом их длина и направление зависят от фазы и величины протекающего в соответствующей катушке тока. Векторы индукции направлены вдоль осей x , y , z декартовой системы координат, образуя стороны прямоугольного параллелепипеда. В каждый последующий интервал времени парциальные векторы меняют свою длину и направление (на рис. 1 это векторы со штрихом).

При питании катушек переменным током, величина и частота которого может программироваться, нетрудно обеспечить такой режим, когда конец суммарного вектора будет двигаться по определенной пространственной кривой, программируемой путем за-

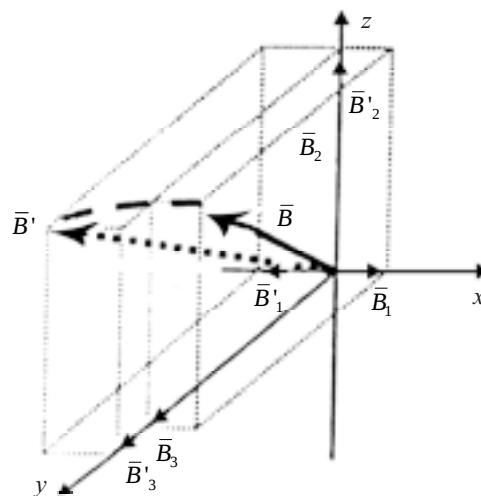


Рис. 1. Геометрическая сумма трех взаимно перпендикулярных векторов индукции

Авторы выражают благодарность С. П. Куротченко за помощь в проведении исследований.

дания во времени трех питающих токов, при этом начало этого вектора «закреплено» в геометрическом центре сферы, образованной указанными тремя катушками.

Если в полости сферы как магнитоформирующей системы аппарата разместить обрабатываемое вещество, последнее будет подвержено влиянию синтезированного магнитного поля, интенсивность и частота которого могут быть изменены в широком интервале.

Из известных соотношений

$$B_{r0} = \frac{\mu\mu_0 NI}{2r}; \quad I = \frac{U}{Z}; \quad Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}; \quad X_L = 2\pi fL, \quad (1)$$

где B_{r0} — значение магнитной индукции в геометрическом центре катушки;

I — ток, протекающий через катушку;

N — число витков;

μ_0 — магнитная постоянная;

μ — относительная магнитная проницаемость среды;

r — средний радиус катушки;

R — активное сопротивление обмотки;

L — индуктивность катушки;

Z — полное сопротивление обмотки;

X_L — индуктивное сопротивление;

f — частота электрического сигнала;

U — напряжение на концах обмотки,

получим

$$B_{r0} = \frac{\mu\mu_0 N}{2r\sqrt{R^2 + 4\pi^2 f^2 L^2}} U. \quad (2)$$

При фиксированном значении частоты $f_{\text{фикс}}$ из (2) следует линейная зависимость индукции B_{r0} от напряжения $U(t)$:

$$B_{r0} = \frac{\mu\mu_0 N}{2r\sqrt{R^2 + 4\pi^2 f_{\text{фикс}}^2 L^2}} U(t); \quad (3)$$

а при изменении частоты во времени результирующее значение индукции будет изменяться соответственно по закону

$$B_{r0} = \frac{\mu\mu_0 N}{2r\sqrt{R^2 + 4\pi^2 f^2(t) L^2}} U(t). \quad (4)$$

Как видно из (4), при непостоянной частоте сигнала зависимость индукции магнитного поля от напряжения на концах обмоток имеет существенно нелинейный вид и отличается от вида функции магнитного поля на каждой из катушек. То есть B_{r0} — сложная функция, зависящая и от напряжения, и от характера изменения частоты сигнала.

Рассмотрим наиболее типичную траекторию движения конца вектора индукции — плоскую круговую траекторию, и ее формирование с помощью трех катушек, схематично изображенные на рис. 2. Здесь вращающееся магнитное поле представлено в виде суммы двух ортогонально ориентированных переменных магнитных полей. Значения $t_0 \dots t_{15}$ — это те моменты времени, которым соответствуют изображенные на рисунке положения суммарного вектора магнитной индукции, создаваемого скрещенными магнитными полями с индукциями B_1 и B_2 .

Для получения вращающегося в плоскости катушки 3 магнитного поля необходимо, чтобы в катушке 1 создавалось магнитное поле с изменяющейся по закону косинуса индукцией

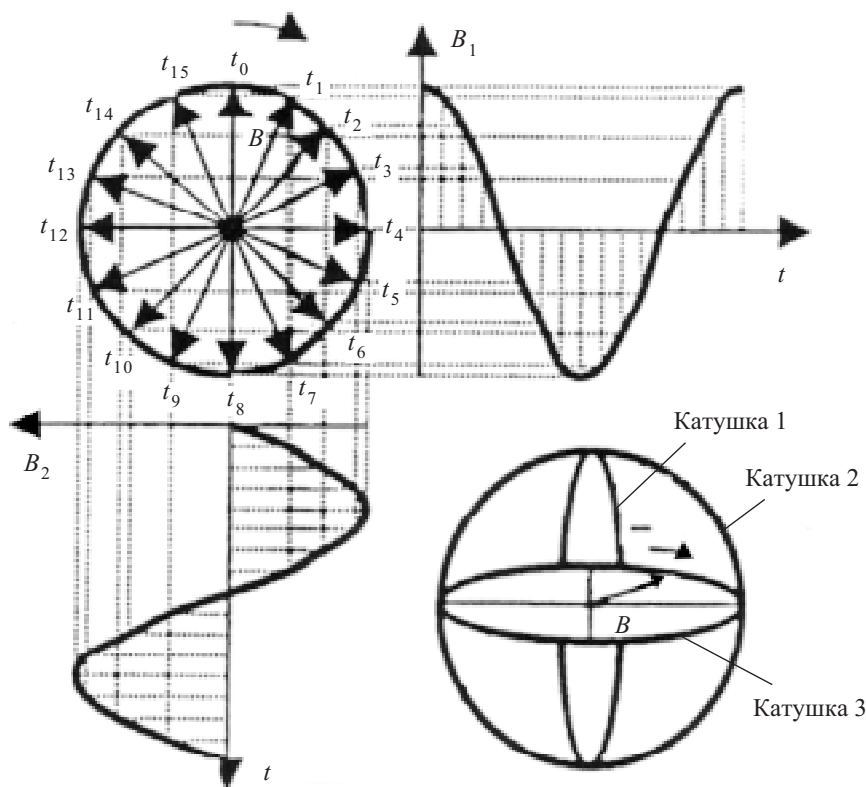


Рис. 2. Магнитное поле как сумма двух ортогональных переменных магнитных полей

$$B_1(t) = B_1 \cos \omega t, \quad (5)$$

а в катушке 2 — магнитное поле той же амплитуды и частоты, изменяющееся по синусоидальному закону

$$B_2(t) = -B_1 \sin \omega t = B_1 \cos(\omega t + 90^\circ), \quad (6)$$

где ω — круговая частота напряжения питания (она же — угловая скорость вращения вектора индукции).

То есть для получения круговой траектории движения конца вектора магнитной индукции, лежащего в плоскости одной из катушек, на входы двух других катушек необходимо подать сигналы одинаковой частоты и амплитуды, изменяющиеся по гармоническому закону со сдвигом фаз $+90^\circ$ или -90° , причем знак сдвига фаз определяет направление вращения поля, частота — угловую скорость вращения поля, амплитуда сигналов — модуль вектора магнитной индукции.

Вращение поля можно визуализировать, подав на катушки 1 и 2 сигналы малой частоты (доли герца) и поместив в сферическую магнитоформирующую систему компас. Стрелка компаса, ориентированная вдоль силовых линий поля, будет вращаться вправо или влево в зависимости от знака сдвига фаз питающих токов в катушках.

Очевидно, что суммарный вектор магнитной индукции будет совершать пространственное перемещение, если запитать и катушку 3.

Для получения с помощью трех катушек вращающегося магнитного поля, плоскость вращения которого поворачивается относительно оси катушки 1, необходимо, чтобы выполнялись следующие условия:

— напряжение питания U_1 , подаваемое на обмотку катушки 1, не должно меняться по амплитуде и должно быть гармоническим;

— в любой момент времени для подаваемых на катушки 2 и 3 напряжений должно быть справедливым соотношение

$$U_2^2 + U_3^2 = \text{const}, \quad (10)$$

т. е. на катушки 2 и 3 необходимо подавать модулированные по амплитуде напряжения, огибающая каждого из которых изменяется по гармоническому закону;

— при приближении плоскости катушки 3 к плоскости одной из двух других, напряжение на ней должно уменьшаться до нуля, а после момента совпадения плоскостей фаза напряжения на данной катушке должна изменяться на 180° ;

— в любой момент времени должно быть справедливым выражение

$$U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 = \text{const}. \quad (11)$$

Этим условиям удовлетворяют представленные на **рис. 3** зависимости $U_1(t)$, $U_2(t)$, $U_3(t)$, описываемые выражениями

$$U_1(t) = U_0 \cos \omega t; \quad (7)$$

$$U_2(t) = -U_0 \cos \omega_1 t \sin \omega t; \quad (8)$$

$$U_3(t) = -U_0 \sin \omega_1 t \sin \omega t, \quad (9)$$

где ω_1 — круговая частота модулирующего напряжения (она же угловая скорость вращения в плоскости катушки 1);

U_0 — амплитуда питающих напряжений на катушках магнитоформирующей системы.

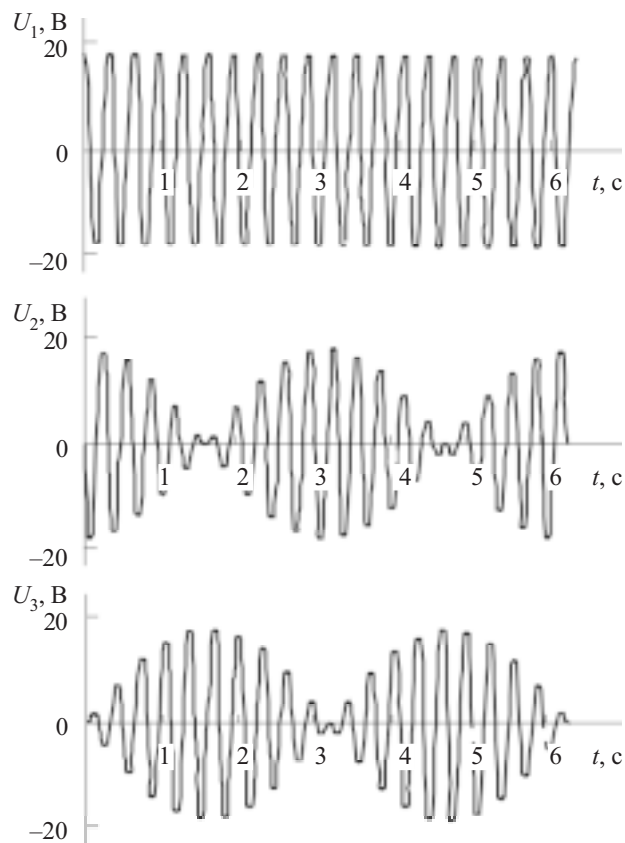


Рис. 3. Временные диаграммы напряжений на обмотках катушек магнитоформирующей системы с вращающимся в пространстве магнитным полем

Потребность изменять направление вращения магнитного поля вытекает из пространственной и зарядовой несимметричности молекул подавляющего числа веществ — изменив вращающимся электромагнитным полем пространственную ориентацию атомов в молекуле, можно изменить и свойства вещества, в том числе его оптическую активность. Это свойство заключается в том, что если линейно поляризованный свет пропустить через раствор хирально дисимметричных молекул, произойдет поворот плоскости его поляризации: по часовой стрелке, если молекулы в растворе «правые» (*D*-молекулы), и против — если «левые» (*L*-молекулы). Поэтому указанное свойство можно использовать как тест для определения эффективности электромагнитной обработки веществ и сред, а также для выявления изменения направления химической активности веществ при реализации технологических процессов. Возможность изменять скорость протекания химических реакций с помощью вращающихся влево/вправо магнитных полей позволяет именовать последние хиральными катализаторами.

Потребность в использовании магнитных полей с пространственной (объемной) вариацией направления вектора магнитной индукции (при запитке трех катушек) возникает при обработке веществ со сложной хиральной структурой, обладающих суперхиральностью (модель Дж. Дугунджи, Д. Маркуардинга и

И. Уги [8, с. 47—52]), например π -олефиновых комплексов металлов.

Конструкция. В реальной конструкции несущей основой магнитоформирующей системы является каркас из алюминия — диамагнитного материала с хорошей теплопроводностью. Каркас выполнен в виде трех пересекающихся колец со щечками для укладки обмоток, концы которых выведены наружу, при этом оси колец взаимно перпендикулярны, так же как и плоскости обмоток. Обмотки укладывают виток к витку по слоям, чередуя намотки каждой из трех катушек. Для обеспечения симметрии полей катушек необходимо обеспечить равное количество витков в слоях катушки и в целом во всех катушках. В центральной части катушек имеется полость, в которую будет помещаться обрабатываемый материал, при этом расположенная в нижней части сферической камеры подставка выполнена так, чтобы точка пересечения осей катушек находилась внутри объекта воздействия. Изменением величины питающих токов достигается создание магнитных полей в диапазоне от 0 до 100 мТл при частоте питающих токов 50 Гц. Магнитные поля с индукцией 50—100 мТл были эффективны для целого ряда обрабатываемых сред.

Апробация и выводы. Разработанная магнитоформирующая система, благодаря использованию компьютерной программы, позволяет устанавливать параметры вращающегося магнитного поля в широком спектре частот и амплитуд, а также направление вращения вектора индукции. Потенциально это предполагает возможность изменять параметры широкого класса материалов и технологических процессов.

Так, путем активации вращающимся магнитным полем деионизованной воды, используемой для изготовления активных масс электродов свинцово-кислотных аккумуляторов, ее физико-химические свойства были существенно изменены: магнитная восприимчивость изменилась более чем на 5%, диэлектрическая проницаемость на 8%, электропроводимость на 2,48%. Магнитная обработка электролита (водного раствора серной кислоты) стандартной плотности существенно изменяла смачиваемость, причем результаты зависели от направления вращения вектора магнитного поля. Эти изменения отразились на свойствах компонентов и самих свинцово-кислотных аккумуляторов, а именно, происходило предотвращение или снижение накопления крупнокристаллического сульфата свинца вдоль поверхности жилок решетки положительного электрода в процессе саморазряда. При разряде током нагрузки снижался темп абсорбции ингибитора на кристаллах сульфата свинца, что снижало скорость коррозии положительного токоотвода.

Магнитная обработка раствора серной кислоты приводит к улучшению структуры активной массы: в отключенном состоянии аккумуляторной батареи поры активной массы в жилках решеток практически не закупориваются и свободно сообщаются с основным объемом электролита, что препятствует возникновению градиента концентрации по толщине электродных пластин и, соответственно, предотвращает анодную

поляризацию жилок решетки. Предотвращается образование пассивного сульфата свинца на поверхности жилок токоотвода, существенно замедляется скорость коррозии токоотводов положительных электродов, что повышает эксплуатационную надежность свинцово-кислотных аккумуляторов.

Омагничивание молярных растворов сульфата кобальта, меди, цинка, натрия, магния, никеля, приводит к изменению их магнитной восприимчивости, причем результат зависит от концентрации раствора. Так, магнитная восприимчивость раствора сульфата никеля после омагничивания тем выше, чем больше его концентрация. Растворы низкой концентрации имеют диамагнитные свойства, т. е. их магнитная восприимчивость меньше нуля, и магнитная обработка усиливает диамагнитный эффект. Концентрированные растворы имеют парамагнитные свойства, которые усиливаются в результате магнитной обработки.

Следует отметить, что предлагаемый способ магнитной обработки жидкостей имеет высокую эффективность независимо от гидравлического режима движения жидкости — она может быть и неподвижной, а потому позволяет легко адаптировать предлагаемый способ к условиям уже сформированных технологических процессов. Также представленный метод синтеза магнитных полей со сложной энергочастотной и поляризационной структурой может оказаться более эффективным при решении медико-биологических проблем по сравнению с техническими решениями, в которых используются вращающиеся сосредоточенные постоянные высококоэрцитивные магниты [9, 10].

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кульский Л. А., Душкин С. С. Магнитные поля и процессы водопереработки. — Киев: Наукова думка, 1987.
2. Соколовский Ю. М. Омагничиванная вода: правда и вымысел. — Л.: Химия, 1990.
3. Белый В. А., Снежков В. В., Безруков С. В. и др. О структурной упорядоченности расплавов полиэтилена в магнитном поле // Докл. АН СССР. — 1988. — Т. 302, № 2. — С. 355—357.
4. Пат. 57995А України. Спосіб підвищення оптичної прозорості полімерних матеріалів / В. О. Дзензерський, М. Я. Житник, І. І. Соколовський. — 2003. — Бюл. № 7.
5. А. с. 1537647 СССР. Способ магнитной обработки жидкости / А. В. Пугачев. — 1990. — Бюл. № 3.
6. Дзензерский В. А., Житник Н. Е., Плаксин С. В. и др. Моделирование электромагнитных полей сложной поляризационной структуры на основе вращающихся сосредоточенных постоянных магнитов // Технічна електродинаміка. — 2007. — Тем. вип. «Силовa електроніка та енергоефективність», ч. 3. — С. 107—112.
7. Пат. 47831 України. Спосіб магнітної обробки рідин / В. О. Дзензерський, І. І. Соколовський, М. Я. Житник та інш. — 2005. — Бюл. № 7.
8. Кинг Р. Химические приложения топологии теории графов. — М.: Мир, 1987.
9. Пат. 79897 України. Магнітотерапевтичний пристрій / М. Я. Житник, С. В. Плаксін, І. І. Соколовський та інш. — 2007. — Бюл. № 11.
10. Заявка на патент України № а 2008 05483 від 25.04.2008. Спосіб модифікації властивостей біологічних структур / І. І. Соколовський, І. Ф. Аршава, М. Я. Житник та ін.

Л. Ф. КОВАЛЕНКО, В. В. СЕВАСТЬЯНОВ,
к. ф.-м. н. В. С. ХОМЧЕНКО, Ю. А. ЦЫРКУНОВ

Украина, г. Винница, НИИ «Гелий»;
г. Киев, СКТБ ИФП им. В. Е. Лашкарёва
E-mail: helium@svitonline.com

Дата поступления в редакцию
29.08 2008 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

ПОЛУЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СТРУКТУР НА БАЗЕ ПЛЕНОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Получены и исследованы катодолюминесцентные структуры с яркостью свечения до 1000 кд/м^2 на пленках толщиной 7–9 мкм, на базе которых могут быть созданы средства отображения информации с высокой разрешающей способностью.

Средства отображения информации с использованием эффекта катодолюминесценции, т. е. свечения люминесцентного материала, широко применяются в бытовой и специальной технике [1]. Однако получение катодолюминесцентных (КЛ) структур для мониторов малого размера, например для электронно-оптических преобразователей, с повышенными требованиями к разрешающей способности является проблематичным в связи с отсутствием эффективных порошковых и пленочных катодолюминофоров (КЛФ) для серийного производства [2–5].

Целью настоящей работы была разработка технологического маршрута и подбор технологических режимов изготовления пленочных КЛФ, а также их исследование, с учетом результатов, полученных в [6, 7].

Основными этапами разработанной технологии являются электронно-лучевое напыление в вакууме пленок ZnS:Cu и их дальнейший отжиг с одновременным легированием Ga в атмосфере серы для получения структур ZnS:Cu.Ga или в атмосфере кислорода для получения структур ZnO:Cu.Ga . Толщина напыленных на сапфировые подложки пленок ZnS:Cu составила 7–9 мкм. Весовая доля Cu в мишенях менялась от 0,06 до 0,12%. Отжиг проводился в диапазоне температур 700–800°C. Легирование пленок осуществлялось термическим испарением галлия из кварцевого тигля. Необходимую при отжиге и легировании атмосферу обеспечивали специально подобранные порошковые смеси. После отжига на КЛ-структуры вакуумным напылением наносился слой Al толщиной 0,1 мкм.

На рис. 1 схематически показано устройство, которое применялось для легирования полученных пленок во время отжига методом испарения Ga с близкого расстояния при атмосферном давлении.

Было установлено, что пленки ZnS:Cu.Ga и ZnO:Cu.Ga после отжига под воздействием ультрафиолетового излучения приобретают фотолюминесцентные свойства в зеленой области спектра. Этот эффект был использован для первичной отбраковки

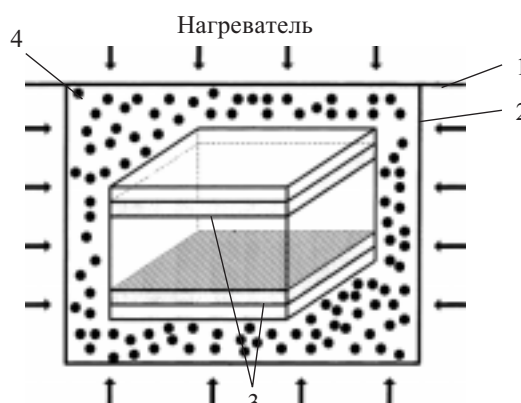


Рис. 1. Схема устройства для легирования пленок методом испарения:

1 — кварцевая пластина; 2 — кварцевый тигель; 3 — материал для легирования; 4 — порошковая смесь

КЛ-структур путем проверки однородности свечения образцов до напыления пленки алюминия.

Определение взаимосвязи между технологическими режимами и структурными параметрами КЛФ проводилось с помощью рентгеновского дифрактометра «Дрон-4», а исследование морфологии поверхности — на сканирующем зондовом микроскопе Nanoscope D3000. На рис. 2 представлены результа-

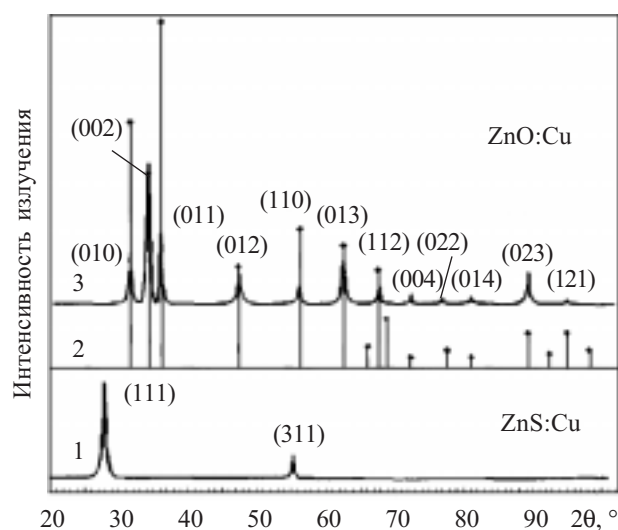


Рис. 2. Результаты рентгено-дифракционных исследований пленок ZnS:Cu (1), ZnO:Cu (3), нанесенных на сапфировые подложки, и порошка ZnO (2)

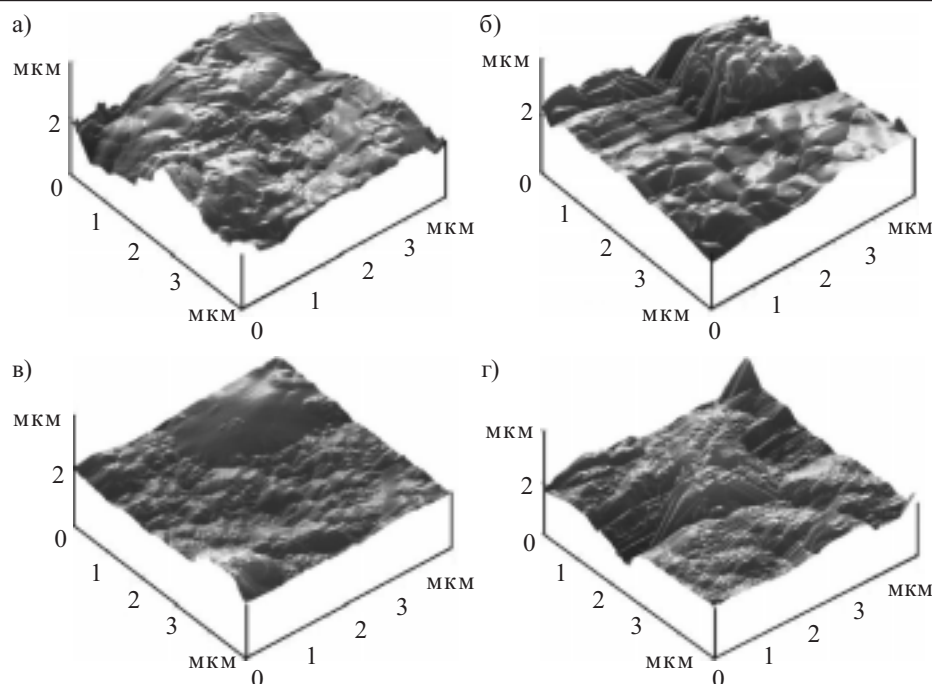


Рис. 3. Морфология поверхности исследуемых пленок:

а — ZnS:Cu после отжига в атмосфере S; б — ZnS:Cu.Ga после отжига в атмосфере S с одновременным легированием Ga; в — ZnO:Cu после отжига в атмосфере O₂; г — ZnO:Cu.Ga после отжига в атмосфере O₂ с одновременным легированием Ga

ты рентгено-дифракционных исследований пленок ZnS:Cu и ZnO:Cu, а также порошка ZnO. Из рисунка видно, что после отжига в атмосфере, обогащенной серой, пленки ZnS:Cu имеют кристаллическую структуру сфалерита с ориентацией преимущественно $\langle 111 \rangle$. Структура пленок ZnO:Cu — вюрцит с ориентацией преимущественно $\langle 001 \rangle$. Кристаллическая структура порошка ZnO также вюрцит и, в достаточной мере, она подобна структуре пленки ZnO:Cu. Это подтверждает предположение о том, что в процессе отжига пленки ZnS:Cu в атмосфере, содержащей кислород, при температуре около 800°C происходит как изменение ее кристаллической структуры, так и преобразование пленки в ZnO:Cu. Исследования показали, что легирование галлием не изменяет структуру ни пленок ZnS:Cu, ни пленок ZnO:Cu.

Изображения поверхностей исследуемых пленок, полученные на сканирующем микроскопе, представлены на **рис. 3**.

Установлено, что до отжига пленки ZnS:Cu толщиной более 7—9 мкм состоят из зерен размером 150—300 нм, отжиг в атмосфере, содержащей серу, приводит к их увеличению до 750 нм, а отжиг с одновременным легированием Ga — к увеличению до 1 мкм.

Как видно на рис. 3, в, поверхность пленок ZnO:Cu очень неоднородна. Здесь доминируют зерна размером 350—500 нм, однако встречаются и большие, размером до 2 мкм. Отжиг с одновременным легированием Ga приводит к появлению, в основном, зерен размером около 1,2 мкм, но наблюдаются также зерна размером от 1,5 до 3 мкм, а на поверхности

крупных зерен размещаются малые, размером около 80 нм. Исследования показали, что причиной образования малых зерен является реакция взаимодействия между ZnS и загрязнениями атмосферы, в которой проводился отжиг.

При исследовании спектральных характеристик было установлено, что для структур ZnS:Cu.Ga максимум спектра КЛ-структур находится в зеленой области на 530 нм, а для ZnO:Cu.Ga — на 520 нм. Яркость свечения КЛ-структур при плотности тока возбуждения 50 мкА/см² составила для пленок ZnS:Cu.Ga около 200 кд/м², для ZnO:Cu.Ga — около 1000 кд/м².

В процессе проведения настоящей работы были получены и исследованы

катодолуминесцентные структуры с яркостью свечения до 1000 кд/м² на пленках толщиной 6—8 мкм. Полученные экспериментальные данные позволяют рассматривать возможность создания конкурентоспособных мониторов с высокой разрешающей способностью на базе применения серийной пленочной технологии.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Беляев В. Современные электронные дисплеи // Электронные компоненты. — 2002. — № 1. — С. 24—28.
2. Беляев В. Дисплеи на основе эффектов катодолуминесценции // В кн.: Дисплеи 1990 годов. — М.: Рос. отд. общества информ. дисплеев. — 2005. — С. 12—20.
3. Михайлова С. П., Тимофеева Т. М., Кораблёв Н. М. Разработка новых люминофоров для электронно-оптических преобразователей // Сб. научных трудов ВНИИ люминофоров. — Ставрополь. — Вып. 39. — 1990. — С. 45—50.
4. Мироненко В. М., Подлужный В. В. Современное состояние и перспективы разработки люминофоров для цветного телевидения и цветных дисплеев // Там же. — Вып. 38. — С. 7—20.
5. Givargizov E. I., Zadorozhnaya L. A., Stepanova A. N., Galstyan V. G. Phosphors with columnar structure // Book of Ext. Abstr. 5 Inter Conf. on the Science and Technology of Display Phosphors. — San Diego, California. — 1999. — P. 301—305.
6. Byng Soo Leon, Jae Soo Yoo, Jong Duk Lee. The effects of growth conditions on the luminescence of ZnO:Zn thin film phosphor grown by MOCVD // Proc. 4-th Inter Conf. on the Science and Technology of Display Phosphors. — Bend, Oregon, U.S.A. — 1998. — P. 14—17.
7. Khomchenko V. S., Rodionov V. P., Pekar G. S. et al. Fabrication and cathodoluminescent properties of the ZnO—Cu, Ga and ZnS—Cu, Ga film phosphor // Journal of the SID. — 2003. — № 11/1. — P. 21—25.

К. ф.-м. н. Г. А. ГАСАНОВ, М. И. МУРГУЗОВ

Азербайджан, г. Баку, Государственный педагогический университет
E-mail: fredkasimi@mail.ruДата поступления в редакцию
12.06 2008 г.Оппонент К. ф.-м. н. З. Ф. ЦИБРИЙ
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)ТЕМПЕРАТУРНЫЕ И КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ
ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА
В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ $(\text{PbS})_{1-x}(\text{Sm}_2\text{S}_3)_x$ *Исследованы твердые растворы на основе сульфида свинца, относящиеся к классу узкощелевых полупроводников. Обнаружены аномалии в зависимости подвижности носителей заряда от концентрации примеси.*

В оптоэлектронике (особенно в инфракрасной области) широко используются халькогениды свинца и твердые растворы на их основе [1]. При разработке новых материалов на основе соединений PbX (X — S, Se, Te) были исследованы электрофизические свойства [2—6] ряда твердых растворов в области малых концентраций примеси (с молярной долей 0,01—0,2 %). Обнаружены аномалии, наличие которых можно объяснить концентрационными фазовыми переходами, присущими любым твердым растворам и обусловленными переходом от примесного дисконтинуума к «примесному конденсату» [2]. Наблюдаемый эффект требует всестороннего исследования и должен быть принят во внимание при прогнозировании свойств твердых растворов.

К числу важнейших характеристик полупроводниковых материалов, определяющих в ряде случаев возможности их практического использования, относятся подвижность носителей заряда.

Объектом исследования являются твердые растворы на основе сульфида свинца в системе $\text{PbS}-\text{Sm}_2\text{S}_3$, относящиеся к классу узкощелевых полупроводников, вызывающих интерес в настоящее время.

Целью работы являлось изучение температурных и концентрационных зависимостей подвижности носителей заряда в твердых растворах системы $\text{PbS}-\text{Sm}_2\text{S}_3$.

Методика эксперимента

Для приготовления сплавов использована методика, предложенная в [7, с. 361—368]. Сплавы $\text{PbS}-\text{Sm}_2\text{S}_3$ (с молярной долей Sm_2S_3 от 0 до 4,0 %) были приготовлены в кварцевых ампулах из элементов высокой степени чистоты и подвергнуты гомогенизирующему отжигу при 900 К в течение 300 ч. Как показывают результаты микроструктурного и рентгенографического анализов, после указанной термообработки растворимость Sm_2S_3 в PbS составляла около 4,0%. Из полученных слитков формировали образцы. Для этого синтезированные сплавы измельчались

на воздухе (средний размер частиц соответствовал 500 мкм), после чего путем горячего прессования (при $T=720$ К и давлении 100 МПа) изготавливались образцы в форме параллелепипедов размером $6 \times 6 \times 10$ мм, которые отжигались в течение 300 ч при 900 К и охлаждались на воздухе.

Измерения электропроводности σ и коэффициента Холла R_H проводились в постоянном магнитном поле с индукцией 2 Тл при постоянном токе через образец. Омические контакты изготавливались из индия путем пайки к поверхности образца. Холловская подвижность рассчитывалась по формуле $\mu_H = R_H \sigma$. Погрешность измерений σ и R_H не превышала 7%. Все исследуемые образцы имели проводимость p -типа.

Полученные результаты

Характер температурных зависимостей R_H для литых и прессованных образцов $\text{PbS}-\text{Sm}_2\text{S}_3$ различных составов имеет сходный вид: во всем интервале с ростом температуры наблюдается рост R_H (рис. 1, а). При $x=0,001—0,016$ в твердых растворах коэффициент Холла в температурном интервале 80—150 К растет, а при дальнейшем увеличении температуры монотонно уменьшается (рис. 1, б).

Факт незначительного роста R_H при повышении температуры в p - PbS хорошо известен и обычно связывается со сложной структурой валентной зоны, состоящей из двух перекрывающихся зон с различной плотностью состояний [2]. Носители в подзоне с меньшей энергией имеют меньшую подвижность. Их роль в кинетических эффектах в этой подзоне возрастает с повышением температуры. С учетом наличия тяжелых и легких дырок выражение для вычисления R_H имеет вид

$$R_H = \frac{\tau}{e} \cdot \frac{p_1 \mu_1^2 + p_2 \mu_2^2}{(p_1 \mu_1^2 + p_2 \mu_2^2)^2} = \frac{\tau}{e p_1} \cdot \frac{1 + \eta f^2}{(1 + \eta f)^2}, \quad (1)$$

где p_1, p_2 и μ_1, μ_2 — соответственно, концентрация и подвижность легких и тяжелых дырок;

$$\eta = p_2/p_1;$$

$$f = \mu_2/\mu_1;$$

τ — холл-фактор, зависящий от степени вырождения и механизма рассеяния;

e — заряд электрона.

Как видно из формулы (1), при увеличении вклада тяжелых дырок с ростом температуры растет и R_H . Аналогичный эффект должен наблюдаться и в спла-

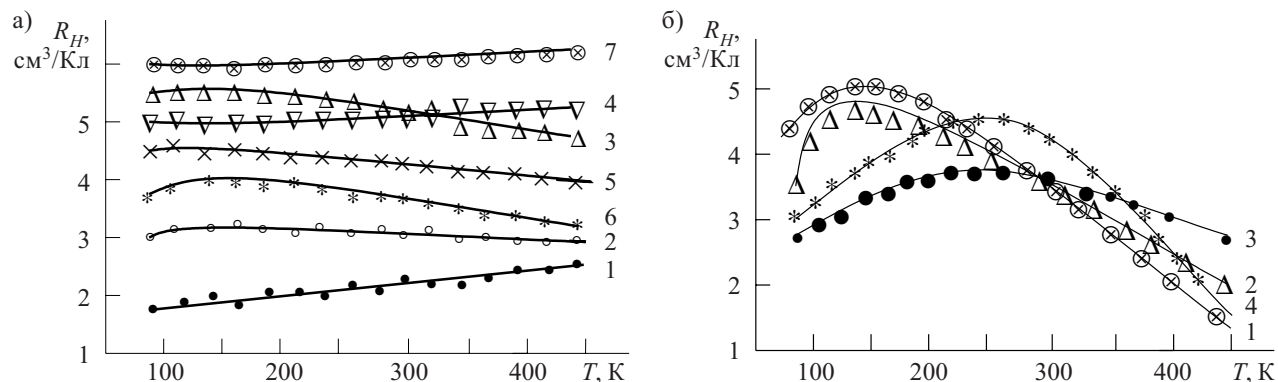


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициента Холла в твердых растворах PbS-Sm₂S₃ с различной молярной долей Sm₂S₃ (в %) для литых (а) и прессованных (б) образцов:

а) 1 — 0; 2 — 0,25; 3 — 0,5; 4 — 1; 5 — 2; 6 — 3; 7 — 4;

б) 1 — 0,1; 2 — 0,12; 3 — 0,14; 4 — 0,16

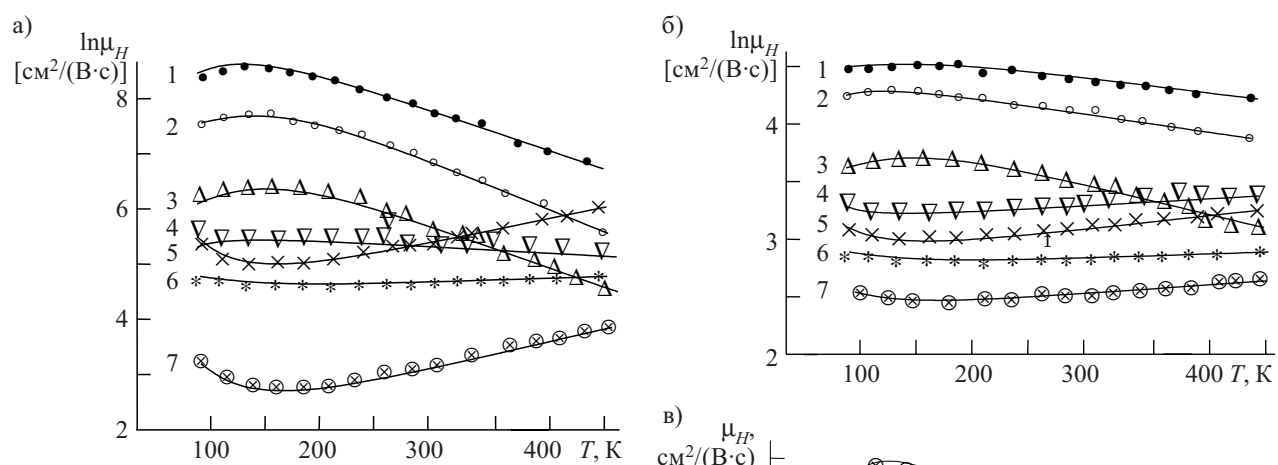


Рис. 2. Температурная зависимость подвижности носителей заряда μ_H в твердых растворах PbS-Sm₂S₃ с различной молярной долей Sm₂S₃ (в %) для литых (а) и прессованных (б, в) образцов:

а), б) 1 — 0; 2 — 0,25; 3 — 0,5; 4 — 1; 5 — 2; 6 — 3; 7 — 4;

в) 1 — 0,1; 2 — 0,12; 3 — 0,14; 4 — 0,16

вах PbS-Sm₂S₃, имеющих структуру валентной зоны, идентичную валентной зоне p-PbS [8].

Как видно из **рис. 2**, температурную зависимость холловской подвижности носителей заряда в твердых растворах можно разделить на две группы. В литых и прессованных образцах 1, 2, 3, 4 (рис. 2, а, б) в интервале температуры 200—450 К холловская подвижность уменьшается; в образцах 5, 6, 7 она незначительно увеличивается. При $x=0,001—0,0016$ в литых образцах с ростом температуры до 150 К μ_H экспоненциально растет, после чего снижается по степенному закону $\mu_H = AT^{-\nu}$, характерному для неупорядоченных полупроводников. Здесь A — коэффициент, равный $eL/2\pi m^*k$, где L — характерный размер неоднородности, m^* — эффективная масса электрона [9, с. 62]. Значение показателя степени $\nu=1,2—2,2$ зависит от состава твердого раствора (рис. 2, в). Для прессованных образцов 5, 6, 7 с ростом темпе-

ратуры до 450 К наблюдается небольшой рост подвижности, как и в случае литых образцов (рис. 2, б). Для составов $x=0,001—0,016$ (рис. 2, в) в интервале температуры до 150 К зависимость носит экспоненциальный характер:

$$\mu_H \sim \exp(-\Delta E_a / (kT)),$$

где ΔE_a — энергия активации, k — постоянная Больцмана. В интервале температуры 80—150 К были рассчитаны значения ΔE_a для прессованных образцов различного состава.

На **рис. 3** приведена температурная зависимость удельной электропроводности σ литых и прессованных образцов PbS-Sm₂S₃. Электропроводность литых образцов монотонно снижается с ростом температуры (рис. 3, а), что характерно для полупроводников с вырожденным газом носителей тока. Особенностью зависимости $\sigma(T)$ прессованных образцов

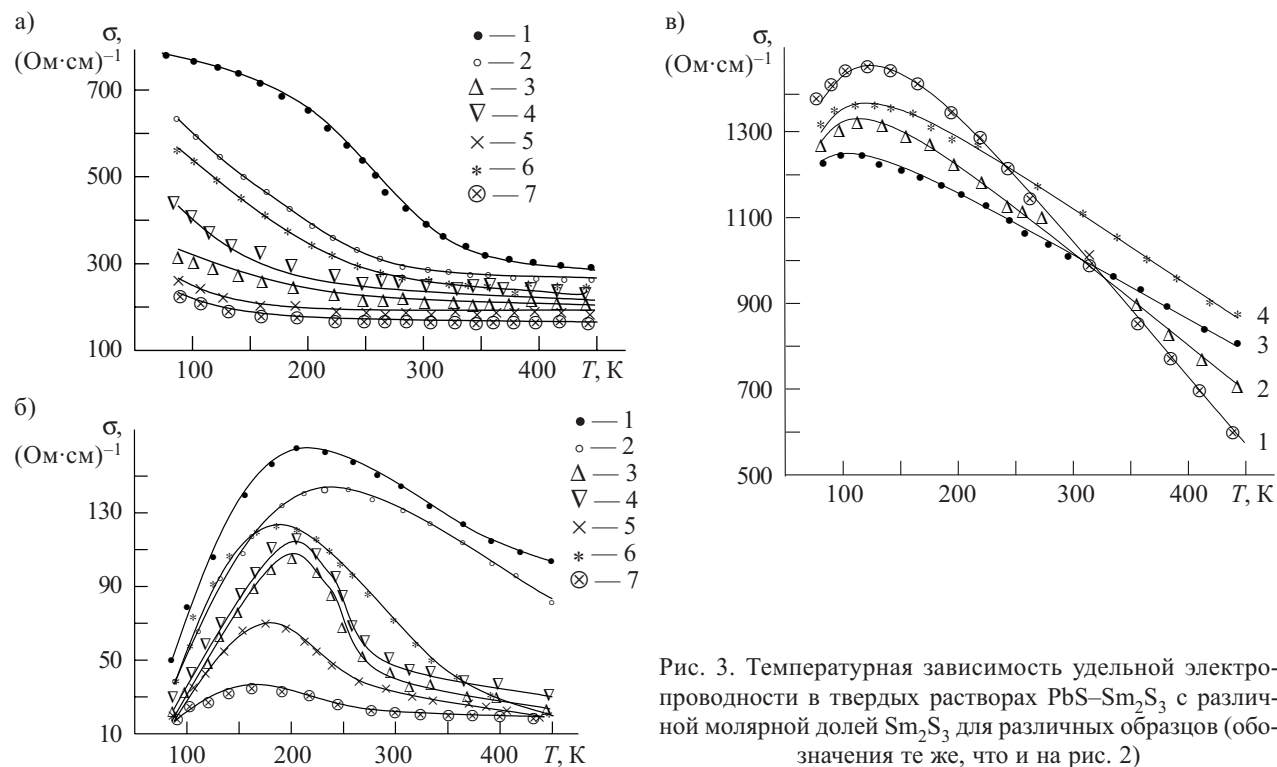


Рис. 3. Температурная зависимость удельной электропроводности в твердых растворах PbS–Sm₂S₃ с различной молярной долей Sm₂S₃ для различных образцов (обозначения те же, что и на рис. 2)

(рис. 3, б) является наличие отчетливо выраженного участка роста σ в интервале температуры 80—220 К.

Полученные из зависимостей $\mu_H(T)$ литых и прессованных образцов значения степенного коэффициента $\nu=1,2\text{--}2,2$ свидетельствуют о том, что ход температурной зависимости подвижности носителей заряда в большинстве образцов не может объясняться только их рассеянием на решетке при акустических колебаниях, т. к. в этом случае для невырожденных полупроводников $\nu=3/2$, а для вырожденных $\nu=1$. Наблюдаемые в PbS более высокие значения ν в настоящее время обычно связываются с наличием температурной зависимости эффективной массы [2], поскольку считается установленным, что основным механизмом рассеяния носителей заряда в PbS при средних и высоких температурах является рассеяние на акустических фоновых. Из полученных в настоящей работе данных видно, что при увеличении концентрации Sm₂S₃ наблюдается тенденция к падению степенного коэффициента.

Активационный характер подвижности носителей заряда прессованных образцов ($x=0,001\text{--}0,016$) в интервале 80—150 К может быть связан с наличием энергетических барьеров, обусловленных образованием тонких прослоек окислов на границах отдельных зерен [1]. Прессованные образцы готовились из порошков, полученных путем измельчения слитков на воздухе и последующего горячего прессования в атмосфере воздуха, что могло привести к окислению. По-видимому, именно окисные пленки по границам зерен, создавая энергетические барьеры, обуславливают низкие значения μ_H в прессованных образцах при низких температурах. Образованием акцепторных уровней в приповерхностном слое зерен в результате адсорбции кислорода авторы [1] объясняли

инверсию знака термо-эдс в мелкодисперсных прессованных образцах PbS с электронной проводимостью. Для слоя, состоящего из хорошо проводящих кристаллитов, окруженных тонкими изолирующими прослойками, R_H определяется концентрацией носителей заряда в кристаллитах, а μ_H связана с подвижностью носителей в кристаллитах μ_{H0} и с высотой энергетического барьера на границах ΔE_a соотношением

$$\mu_H = \mu_{H0} e^{-\Delta E_a / (kT)}. \quad (2)$$

В интервале температуры 200—240 К возросшая энергия носителей заряда становится достаточной для преодоления ими энергетических барьеров, созданных прослойками на границах зерен прессованных образцов, и μ_H , как и в случае литых образцов, начинает падать с ростом температуры.

Наблюдаемое различие в значениях и характере температурных зависимостей μ_H в литых и прессованных образцах с $x=0\text{--}0,04$, а также в прессованных образцах с $x=0,001\text{--}0,0016$ показывает, что при интерпретации результатов измерений электрофизических параметров образцов следует проявлять большую аккуратность и внимание.

На рис. 4 представлена зависимость холловской подвижности носителей заряда от состава твердого раствора, полученная для литых (а) и прессованных (б) образцов с $x=0\text{--}0,04$ и для образцов с $x=0,001\text{--}0,0016$. Как видно, во всех случаях можно отметить резкое уменьшение холловской подвижности с увеличением молярной доли Sm₂S₃, что естественно связать с ростом степени дефектности кристаллической решетки и увеличением рассеяния электронов при увеличении содержания Sm. Авторы [6], также наблюдавшие значительное снижение подвижности но-

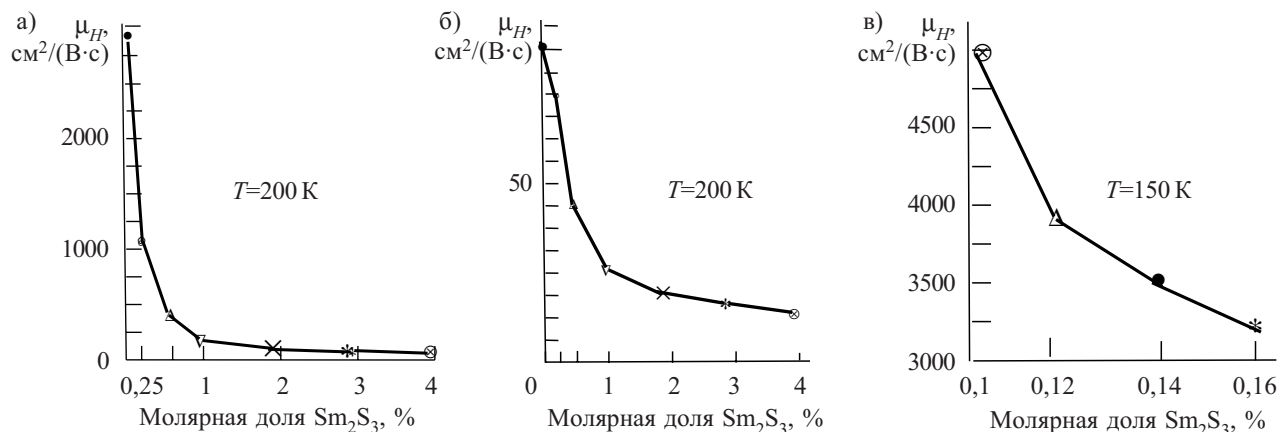


Рис. 4. Зависимость холловской подвижности носителей заряда от состава твердого раствора PbS–Sm₂S₃ для литых (а) и прессованных (б, в) образцов

сителей заряда в PbS при введении примеси, отмечают факт сильного нарушения периодического потенциала решетки. Отсюда можно сделать заключение, что в отличие от других изовалентных твердых растворов, действие Sm в твердых растворах PbS–Sm₂S₃ не может рассматриваться как слабое возмущение.

Примесные атомы являются центрами локальных искажений решетки, источниками внутренних напряжений и деформаций, поле которых можно считать близкоедействующим [10] с характерным радиусом деформационного взаимодействия R_0 . При малой концентрации примесей, когда выполняется условие $l \geq R_0$ (l — расстояние между примесными атомами), деформационные поля, создаваемые отдельными атомами, практически не перекрываются и вносят аддитивный вклад в снижение подвижности. По мере увеличения концентрации примесей происходит перекрытие деформационных полей соседних атомов, приводящее к усилению упругих напряжений противоположного знака и возрастанию общего уровня упругих напряжений. Когда этот процесс становится достаточно монотонным, он может привести к постепенному уменьшению μ_H . Последующее введение атомов примеси приведет к новым искажениям решетки, а следовательно, и к новому падению величины μ_H . Не исключено, что при определенном составе твердого раствора (в данном случае при $x=0,001–0,016$) ситуация может быть аналогичной переходу Мотта, когда образование каналов протекания по электронным оболочкам отдельных примесных атомов при определенной их концентрации приводит к появлению электрической проводимости [8].

При $x=0,001$ увеличивается вероятность процессов упорядочения примесных атомов. Проведенный расчет показывает, что при молярной доле Sm₂S₃ 0,1–0,16% в твердом растворе PbS–Sm₂S₃ возможно упорядоченное распределение примесных атомов по узлам примитивной кубической решетки с периодом $a=3a_0$, где a_0 — параметр элементарной ячейки. Рост величин μ_H , ν и ΔE_a в интервале составов 0,1–0,16 % молярной доли Sm₂S₃ может косвенно указывать на наличие процессов упорядочения, сопровождающих образование примесного континуума.

Выводы

В твердых растворах PbS–Sm₂S₃ при увеличении содержания Sm₂S₃ наблюдается уменьшение подвижности носителей заряда (при $T=77–450$ K), а также уменьшение показателя степени ν в температурной зависимости $\mu_H \sim T^{-\nu}$. Эти данные согласуются с обычно наблюдаемым снижением величин μ_H и ν при увеличении концентрации примеси. Мы полагаем, что обнаруженный эффект является результатом взаимодействия деформационных полей примесных атомов в случае достаточно высокой их концентрации, когда этот процесс приобретает «коллективный» характер и приводит к усилению упругих напряжений, создаваемых примесными атомами в кристалле. Наблюдаемый рост подвижности носителей заряда при $x=0,001–0,008$ является еще одним подтверждением высказанного в [2] предположения о существовании в любом твердом растворе концентрационных фазовых переходов перколяционного типа, соответствующих переходу к примесному континууму. Характер проявления и возможность наблюдения этого эффекта в других полупроводниковых системах должны в значительной степени зависеть от свойств матрицы и примеси.

Обнаружено, что прессованные образцы PbS–Sm₂S₃ ($x=0,001–0,0016$), в отличие от литых, имеют низкотемпературный участок активационной проводимости, наличие которого связывается с окислением на границах зерен.

Полученные результаты уточняют физические механизмы процессов, происходящих в твердых растворах (PbS)_{1-x}(Sm₂S₃)_x, что позволяет изменением технологических режимов достигать нужных параметров. Исследованные растворы можно использовать для создания фотоприемников в ближней ИК-области.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Рогачева Е. И., Кривулькин И. М. Температурные и концентрационные зависимости подвижности носителей заряда твердых растворов PbTe–MnTe // Физика и техника полупроводников. — 2002. — Т. 36, вып. 9. — С. 1040–1044.
2. Rogacheva E. I., Sinelnik N. A. Critical phenomena in heavily-doped semiconducting compounds // Japan J. Appl. Phys. — 1993. — Vol. 32, N 3. — P. 775.

3. Клето Г. И., Цалый В. З. Рентгеноструктурные исследования тонких пленок PbS, получаемых методом вакуумного напыления // Тезисы докл. Национ. конф. по применению рентгеновского, синхронного излучения нейтронов и электронов для исследования материалов «РСНЭ-2007». — Москва. — 2007. — С. 285.

4. Фрейк Д. М. Особенности явлений переноса в тонких полупроводниковых пленках. — Материалы 11-й Междунар. конф. «Физика и технология тонких пленок». — Ивано-Франковск. — 2007. — С. 92—95.

5. Kumar Sush, Khan M. A., Husai M. J. Photochemistry and photophysics of coordination compounds: Lanthanides. — Mater. Sci. — 2007. — Vol. 42, N 1. — P. 363—367.

6. Скипетров Е. П., Голубев А. В., Слышко В. Е. Резонансный уровень галлия в сплавах // Физика и техника полупроводников. — 2007. — Т. 41, № 2. — С. 149—153.

7. Мургузов М. И., Гуршумов А. П., Гасанов Г. А. Новые неорганические материалы. — Баку: Элм, 1992.

8. Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. — М.: Наука, 1979.

9. Кучис Е. В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования. — М.: Радио и связь, 1990.

10. Судзуки Е., Есиага Х., Такеути С. Динамика дислокаций и пластичность. — М.: Мир, 1989.

Д. т. н. З. Ю. ГОТРА, проф. Дж. ТЕЙТ, Р. КИКИНЕШИ,
А. А. ЗАКУТАЕВ, к. т. н. Л. М. РАКОВОВЧУК

Украина, г. Львов, Нац. ун-т «Львовская политехника»;
США, г. Корваллис, штат Орегон, Гос. ун-т штата Орегон.
E-mail: larar@svitonline.com; zakutaya@onid.oregonstate.edu

Дата поступления в редакцию
29.05 2008 г.

Оппонент д. х. н. В. Н. ТОМАШИК
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ ТОНКИЕ ПЛЕНКИ ДЛЯ BaCuTeF ПРОЗРАЧНЫХ КОНТАКТОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Исследованы химический состав и физические свойства тонких пленок BaCuTeF. Показана возможность улучшения электрических параметров пленок путем добавления в них избыточной меди.

Одной из важных проблем при производстве электронной аппаратуры является изготовление надежных электрических контактов к элементам полупроводниковых приборов. Обеспечение высокого качества контактов — это необходимое условие эффективной работы диодов, транзисторов и других элементов современной полупроводниковой техники. Особенно важным это условие становится для прозрачных полупроводников p -типа. Эти материалы могут быть использованы в солнечных элементах третьего поколения, голубых и ультрафиолетовых светодиодах, прозрачных транзисторах, электронных цепях и в других приборах современной электроники [1].

Для получения омического контакта к полупроводнику p -типа необходимо, чтобы работа выхода контактного металла была не меньше энергетического расстояния между уровнем вакуума и максимумом валентной зоны полупроводника. Для прозрачных полупроводников p -типа это расстояние может быть больше, чем работа выхода любого из известных металлов. Следовательно, изготовление на их основе омических контактов становится невозможным. Альтернативой этому может быть использование в качестве контакта сильно легированных полупроводников p -типа (p^{++} -полупроводников). Это дает возможность эффективной инжекции носителей заряда с помощью туннельного эффекта через образовавшийся барьер Шоттки. Доказательством практической реа-

лизации этого подхода к изготовлению контактов для прозрачных полупроводников p -типа является использование p^{++} -NiO для изготовления ультрафиолетового светодиода на основе гомоперехода p -ZnO/ n -ZnO [2]. Наличие p^{++} -контактов с большой работой выхода также необходимо для снижения рабочего напряжения органических светодиодов. Экспериментально доказано, что замена легированного оловом оксида индия (ITO) на сильно легированный прозрачный полупроводник p -типа в два раза уменьшает контактный энергетический барьер на границе с N,N'-дифенил-N,N'-бис(1,1'-3,4 бифенил)-4,4'-диамином (NPB) [3].

Необходимым условием получения высококачественного p^{++} -контакта является большая концентрация дырок в нем (больше 10^{19} см⁻³), а в оптоэлектронных приборах зачастую p^{++} -контакт должен быть еще и прозрачным. На сегодняшний день известно несколько классов широкозонных полупроводников с дырочным типом проводимости. Получение необходимой концентрации дырок в легированных оксидах и нитридах (ZnO, GaN, NiO) обычно затруднительно. Сравнительно высокая концентрация дырок может быть достигнута в дельтафосфатах (CuMO₂, M=Al, Cr, Ga и т. д.), но только за счет уменьшения прозрачности. Наиболее перспективным является использование для этих целей недавно открытых слоистых окси-халькогенидов [4] и халькогено-фторидов [5]. Эти материалы обладают всеми необходимыми свойствами для изготовления прозрачных высокопроводимых p^{++} -контактов.

BaCuTeF — это один из представителей группы слоистых халькогено-фторидов с шириной запрещенной зоны порядка 3 эВ [6]. Получение тонких пленок

BaCuTeF методом импульсного лазерного напыления дает высокую концентрацию дырок в этом материале ($\approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$) без какого-либо специального добавления легирующих примесей [7]. В [8] было показано, что добавление меди в тонкие пленки BaCuTeF простым технологическим методом приводит к значительному улучшению их электропроводности и незначительному изменению их оптических свойств. Возможность использования поликристаллических пленок BaCuTeF с избытком меди в функциональных приборах электронной аппаратуры недавно была доказана на практике [9]. Дальнейшее изготовление прозрачных высококачественных контактов p -типа из этого материала требует подтверждения полученных ранее результатов с помощью других экспериментальных методов, а также более подробного изучения структурных, химических и электрофизических свойств поликристаллических пленок BaCuTeF.

Эксперимент

Тонкие пленки BaCuTeF с избытком меди были получены методом импульсного лазерного напыления на стеклянную подложку, подогретую до 400°C . Для получения пленок с избытком меди проводилось поочередное напыление с мишеней керамического BaCuTeF и металлической меди. Избыток меди в пленках контролировался с помощью изменения количества лазерных импульсов на медную мишень при постоянном количестве импульсов на мишени BaCuTeF. Остальные технологические подробности получения пленок были описаны нами ранее [8].

Химический состав пленок изучался методом рентгеновского микроанализа с помощью электронного микроскопа Cameca SX50, оснащенного энергодисперсионным спектрометром (EDX). В основе этого метода лежит следующий принцип: ускоренный электронный пучок, попадая в исследуемый образец, выбивает электроны, что вызывает рентгеновское излучение, характерное для химических элементов, из которых состоит вещество. Концентрации элементов определяются по интенсивности этого излучения. Для повышения точности результатов рентгеновского микроанализа тонких пленок эксперименты проводились при трех разных ускоряющих напряжениях электронного пучка (10, 15 и 20 кВ). Во избежание накопления заряда и искажения результатов эксперимента поверхность пленок предварительно покрывалась тонким слоем графита. Результаты обрабатывались с помощью программного обеспечения Probe for Windows и Stratagem.

Структура поверхности тонких пленок BaCuTeF изучалась методом сканирующей электронной микроскопии с использованием микроскопа Zeiss Ultra (Mark II). Для получения высокого качества снимков поверхности пленки эксперименты проводились с помощью детектора вторичных электронов. Зернистость поверхности поликристаллической пленки изучалась с помощью детектора отраженных электронов. Все вышеупомянутые эксперименты проводились при достаточно низком ускоряющем напряжении электронного пучка (3 кВ), чтобы избежать накопления электрического заряда на тонкой пленке и

не допустить снижения разрешения сканирующего электронного микроскопа.

Изучение электрических свойств тонких пленок BaCuTeF проводилось по методу Ван дер Пау на установке Lakeshore 7504. Для обеспечения точности контактов тонкие пленки были нанесены на подложку с помощью маски в форме креста. В качестве контактов к пленке использовался припой на основе индия. Свойства контактов были проверены снятием вольт-амперных характеристик для каждой из пар контактов. Для определения электрофизических свойств пленок, таких как концентрация носителей тока и их подвижность, были измерены удельное сопротивление и коэффициент Холла. Коэффициент Холла измерялся при потоке магнитного поля 2,75 Тл. Толщина пленок измерялась с помощью метода оптической интерференции в видимой области спектра.

Результаты исследований и их обсуждение

Разработка методов контроля электрических свойств полупроводников — это одна из фундаментальных задач технологии изготовления электронной аппаратуры. Изменение проводимости кремния и германия обычно осуществляется с помощью легирования. В случае многокомпонентных полупроводников электропроводность может также быть изменена за счет изменения стехиометрии материала. При использовании этого метода важно точно знать и контролировать концентрацию химических элементов в составе полупроводника.

На рис. 1 показана зависимость избыточного количества меди в пленке BaCuTeF от количества меди, распыленной с медной мишени. Эта зависимость в исследованном диапазоне описывается формулой $y=0,12 \ln x-0,6$. Высокая точность аппроксимации позволяет изготавливать пленки BaCuTeF с избытком меди по заранее заданным требованиям и точно контролировать их параметры, что является важным условием для использования данной технологии при изготовлении высокопроводящих прозрачных p^{++} -контактов для потребностей полупроводниковой электроники.

Из рис. 1 следует также, что добавление меди в пленки BaCuTeF возможно на уровне 20% относи-

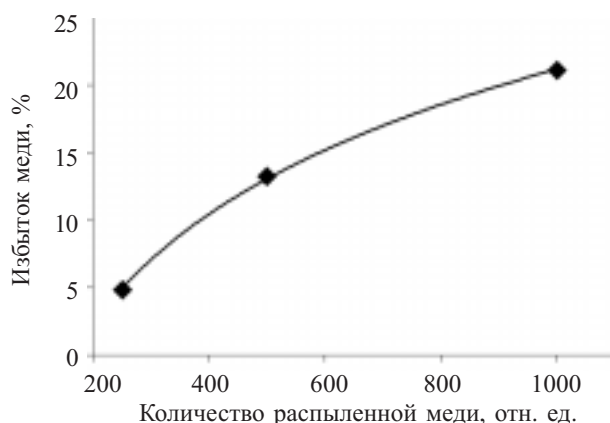


Рис. 1. Зависимость избытка меди в тонкой пленке BaCuTeF от количества меди, распыленной с медной мишени

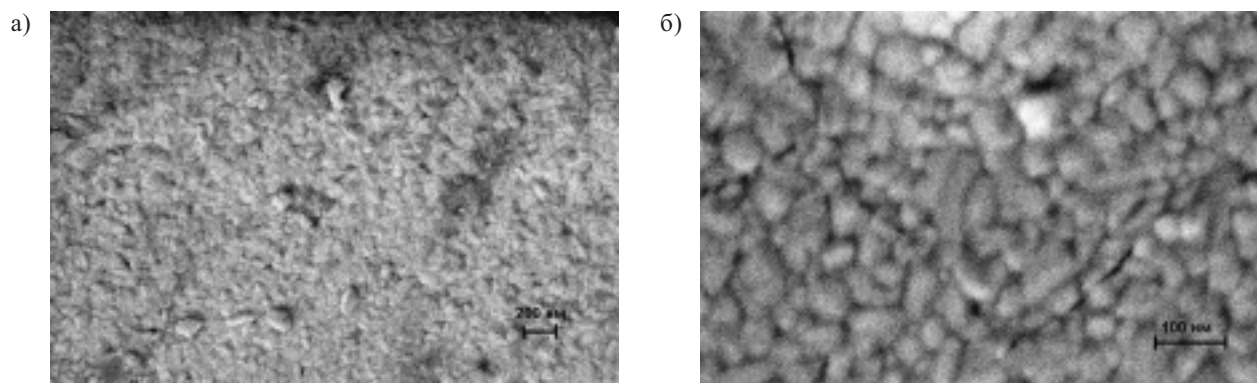


Рис. 2. Изображения поверхности пленок, полученные с помощью детектора рассеянных электронов:
а — BaCuTeF; б — BaCuTeF с добавлением избыточной меди

тельно ее изначальной концентрации. Это значение является достаточно высоким. Добавление большого количества избыточных атомов одного из химических элементов в тонкую пленку может привести к изменению ее фазового состава.

Результаты проведенного ранее рентгеноструктурного анализа [8] свидетельствуют об отсутствии разделения фаз в пленке на металлическую медь и BaCuTeF. В настоящей работе эти выводы были проверены с использованием сканирующего электронного микроскопа с детектором рассеянных электронов (см. рис. 2). Имеющийся небольшой контраст на границах зерен на поверхности пленки BaCuTeF (рис. 2, а) объясняется наличием неровностей. Аналогичная картина наблюдается и на поверхности пленки BaCuTeF с избытком меди (рис. 2, б). Отсюда можно сделать заключение, что добавление избыточной меди не ведет к сегрегации ее в границы зерен. Эта характеристика также является необходимым условием для использования тонких пленок BaCuTeF с избытком меди.

Одним из важнейших условий надежности измерения электрических свойств материала является качество контактов при проведении эксперимента. Свойства контактов к пленкам BaCuTeF во время измерений электрических параметров определялись снятием вольт-амперных характеристик для каждой из пар контактов. Линейность вольт-амперных характерис-

тик (рис. 3) свидетельствует о том, что результаты экспериментов по определению электрических свойств пленок BaCuTeF можно считать надежными.

Тип проводимости полупроводника определяется знаком коэффициента Холла. Коэффициент Холла для всех пленок был положительным, независимо от количества меди в них, что свидетельствует о дырочной проводимости BaCuTeF. Из вставки на рис. 4 можно сделать заключение, что концентрация дырок в пленках практически не зависит от количества добавленной меди. (Точность определения концентрации дырок в этом эксперименте ограничена точностью измерения толщины пленок.)

С другой стороны, подвижность носителей электрического заряда в материале определяется его внутренними характеристиками и поэтому не зависит от толщины пленки. Подвижность дырок в этом эксперименте определялась отношением коэффициента Холла к удельному сопротивлению материала.

Из рис. 4 видно, что подвижность дырок в пленках BaCuTeF растет линейно с увеличением избытка меди в них и достигает значения $0,65 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Следует также отметить высокое среднее значение концентрации дырок в пленках ($3,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$). Вместе эти параметры определяют значение удельной проводимости на уровне 40 См/см , что на сегодняшний день является достижением для тонкопленочных поликристаллических прозрачных полупроводников *p*-типа. Та-

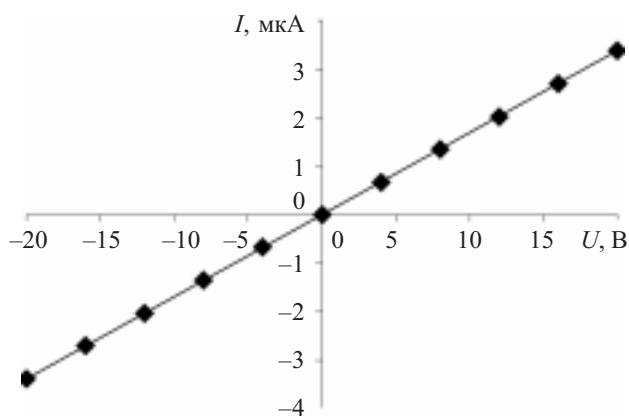


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика контактов к пленкам BaCuTeF

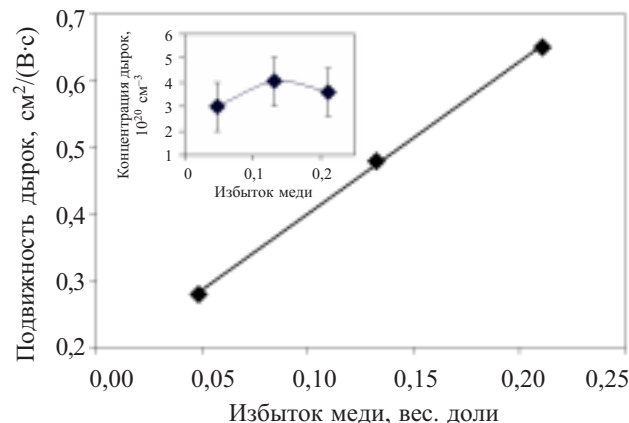


Рис. 4. Зависимость электрофизических свойств пленок BaCuTeF от избытка меди в них

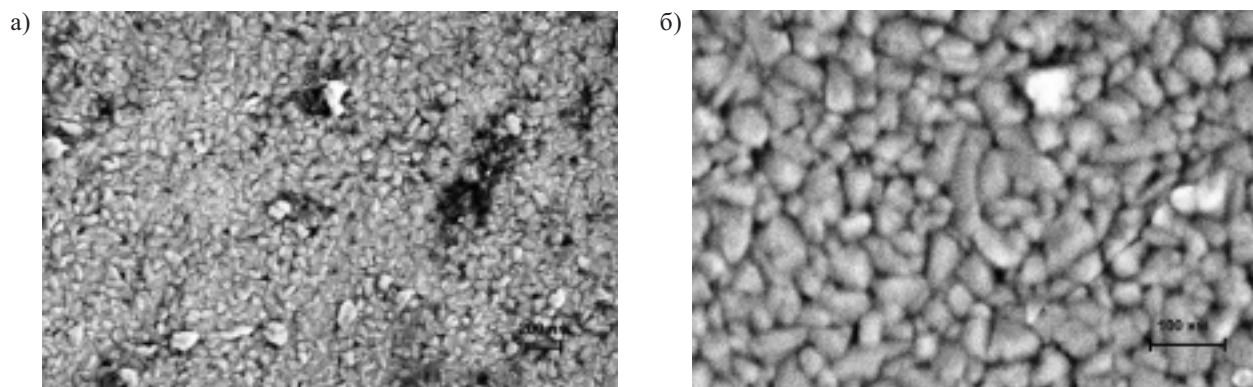


Рис. 5. Изображения поверхности пленок, полученные с помощью детектора вторичных электронов:
а — BaCuTeF; б — BaCuTeF с добавлением избыточной меди

ким образом, тонкие пленки BaCuTeF могут быть использованы для изготовления прозрачных p^{++} -контактов к элементам современной электронной техники.

Кроме высокой технологической ценности, полученные результаты представляют большой интерес для физики. Вопрос о механизме повышения подвижности зарядов без существенного изменения их концентрации требует подробного изучения. Как известно, отклонение от номинальной стехиометрии в эпитаксиальных полупроводниковых пленках обычно ведет к уменьшению подвижности носителей заряда за счет создания дефектов в кристаллической структуре пленки. Для поликристаллических пленок наибольшая концентрация дефектов обычно наблюдается возле границ зерен. Соответственно, одной из возможных причин повышения подвижности дырок может быть уменьшение количества дефектов за счет изменения размера зерен в поликристаллических пленках. Вместе с тем, изображения, полученные методом сканирующей электронной микроскопии с детектированием вторичных электронов (рис. 5) для пленок BaCuTeF и BaCuTeF с избытком меди показывают, что добавление избыточной меди не изменяет размера зерен в поликристаллической пленке BaCuTeF. Следовательно, улучшение проводимости пленок BaCuTeF вследствие добавления в них меди определяется другими факторами.

Заключение

Проведенные исследования тонких пленок BaCuTeF показали, что добавление избыточной меди в этот материал приводит к улучшению его электрофизических параметров и дает возможность точно контролировать свойства таких пленок без изменения их фазового состава. Установлено, что улучшение электропроводности происходит за счет увеличения подвижности дырок при неизменном размере зерен в структуре пленки. Результаты экспериментов дают ос-

нование утверждать, что тонкие пленки BaCuTeF могут быть использованы в качестве прозрачных p^{++} -контактов для применения в современных элементах электронной техники.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Wager J. F., Keszler D. A., Presley R. E. Transparent Electronics.— N.-York: Springer, 2008.
2. Chu S., Lim J. H., Mandalapu L. J. et al. Sb-doped p -ZnO/Ga-doped n -ZnO homojunction ultraviolet light emitting diodes // Applied Physics Letters.— 2008.— Vol. 92.— P. 152103.
3. Yanagi H., Kikuchi M., Kim K. et al. Low and small resistance hole-injection barrier for NPB realized by wide-gap p -type degenerate semiconductor, LaCuOSe:Mg // Organic Electronics.— 2008.— In press, doi:10.1016/j.orgel.2008.03.004.
4. Kazushige U., Hidenori H., Masahiro H. et al. Wide-gap layered oxychalcogenide semiconductors: Materials, electronic structures and optoelectronic properties // Thin Solid Films.— 2006.— Vol. 496.— P. 8—15.
5. Tate J., Newhouse P. F., Kykyneshi R. et al. Chalcogen-based transparent conductors // Thin Solid Films.— 2007.— In press, doi:10.1016/j.tsf.2007.10.073.
6. Готра З. Ю., Тейт Дж., Закутаев. А. А. та ін. Структура та оптичні властивості прозорих провідних плівок на основі BaCuTeF // Вісник «Електроніка» НУ «Львівська політехніка».— 2007.— № 592.— С. 13—17.
7. Готра З. Ю., Тейт Дж., Закутаев. А. А. та ін. Дослідження впливу температури відпалу на електричні властивості прозорих плівок на основі BaCuTeF // Восточно-Европейский журнал передовых технологий.— 2007.— № 5/4(29).— С. 37—40.
8. Zakutayev A. A. High conductivity in transparent polycrystalline BaCu_{1+x}TeF thin films // Easter-European Journal of Enterprise Technologies.— 2008.— № 2/3(32).— P. 48—51.
9. Черпак В. В., Стахіра П. Й., Закутаев А. А. Спектральна чутливість анізотипної гетероструктури BaCuTeF/DiMe-PTCDI/Al // XI відкрита наук.-техн. конф. професорсько-викладацького складу Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки НУ «Львівська політехніка» з проблем електроніки.— Львів.— 2008.— С. 43.

К. ф.-м. н. Т. С. КАВЕЦКИЙ, д. ф.-м. н. О. И. ШПОТЮК,
д. ф.-м. н. П. Г. ЛИТОВЧЕНКО, д. ф.-м. н. В. М. ЦМОЦЬ

Украина, г. Львов, НПП «Карат»;
Дрогобычский гос. педагогический ун-т им. И. Франко;
г. Киев, Институт ядерных исследований НАНУ
E-mail: kavetskyu@yahoo.com

Дата поступления в редакцию
24.06 2008 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. В. СТРОНСКИЙ
(ИФП им. В. Е. Лашкарева, г. Киев)

РАДИАЦИОННАЯ МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРНОЙ СЕТКИ ХАЛЬКОГЕНИДНОГО СТЕКЛА

Изучено влияние γ -излучения на структурную сетку халькогенидного стекла химического состава $Ge_{15,8}As_{21}S_{63,2}$. Показано, что имеет место радиационно-индуцированное уменьшение хрупкости структурной сетки облученного образца.

Халькогенидные стекла (ХС) известны как перспективные материалы современной оптоэлектроники. Благодаря характерной для них высокой прозрачности в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра они эффективно используются в качестве конструктивных элементов приборов ИК-оптики и оптоволоконных линий связи [1]. Эффекты переключения и памяти в тонких пленках ХС находят свое применение в портативной микроэлектронике [2]. В последнее время интенсивно исследуется возможность использования ХС, легированных редкоземельными элементами, в качестве коммуникационных окон [3]. Ведутся разработки и в направлении использования ХС в качестве активных элементов для оптической записи и воспроизведения информации в высокочастотных носителях информации CD-RW и DVD [4]. Однако, несмотря на широкое практическое использование этих материалов, все еще нерешенной остается проблема посттехнологической структурной модификации стеклообразного состояния вещества для достижения оптимальных эксплуатационных параметров.

Целью данной работы является апробация способа уменьшения хрупкости халькогенидного стекла путем модификации его структурной сетки в поле радиации. Степень хрупкости структурной сетки определялась по отношению минимума и максимума интенсивности излучения в низкочастотном спектре комбинационного (рамановского) рассеяния [5] на образцах химического состава $Ge_{15,8}As_{21}S_{63,2}$, слитки которых синтезированы из расплава традиционным методом охлаждения.

Полученный массивный слиток разрезали алмазной пилой на плоскопараллельные пластины одинаковой толщины, а затем шлифовали и полировали до высокого оптического качества. Для достижения лучшей гомогенности и снятия внутренних напряжений

образцы отжигались при температуре на 20—30 градусов ниже температуры стеклования. Облучение образцов проводилось высокоэнергетическими ^{60}Co γ -квантами со средней энергией 1,25 МэВ при дозе облучения 2,41 МГр. Возбуждение рамановских спектров рассеяния осуществлялось при помощи Kr^{+} -лазера с длиной волны 647,1 нм (мощностью 40 мВт). Спектры регистрировались двухканальным монохроматором SPEX 1403. Исследования проведены при параллельной («vertical-vertical» — VV) и перпендикулярной («vertical-horizontal» — VH) поляризациях света.

На рис. 1 приведены низкочастотные рамановские спектры для немодифицированного образца, измеренные при комнатной температуре в VV- и VH-конфигурациях. В стеклообразных материалах в низкочастотное комбинационное рассеяние вносит вклад релаксационное псевдоупругое рассеяние, уменьшающееся с увеличением частоты ω , и колебательный (бозонный) процесс, интенсивность которого увеличивается с ростом частоты ω и достигает максимального значения (бозонного пика) в области 20—30 cm^{-1} (в зависимости от химического состава стекла). Поэтому минимум интенсивности рамановского рассеяния является следствием наложения минимумов релаксационной и колебательной составляющей процесса и дает информацию о структурных параметрах стекла. Авторы [5] использовали отношение минимума интенсивности бозонного процесса (I_{min}) к его

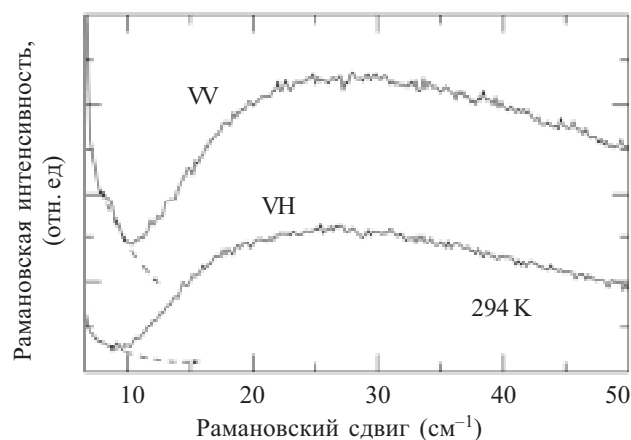


Рис. 1. Низкочастотные рамановские спектры рассеяния для необлученного образца, измеренные при параллельной (VV) и перпендикулярной (VH) поляризациях света

Авторы выражают благодарность за содействие данной работе Украинскому НТЦ и проф. К. Раптису из Афинского НТУ

максимуму ($I_{\max}$) для определения хрупкости стекла при температуре стеклования. Авторы [6, 7] рассматривали отношение $I_{\min}/I_{\max}$ как относительную степень хрупкости стекла, которая чувствительна к среднему порядку атомной структуры сетки. Как доказательство, авторы [7] продемонстрировали зависимость отношения $I_{\min}/I_{\max}$ от значения среднего координационного числа $\langle r \rangle$ для стекол систем $\text{Ge}_x\text{S}_{1-x}$ и $\text{Ge}_x\text{Se}_{1-x}$. Полученная ими зависимость $I_{\min}/I_{\max} = f(\langle r \rangle)$ подтверждает наличие перколяции (изменения) жесткости в структурной сетке стекла при $\langle r \rangle = 2,4$, что полностью согласуется с теорией напряжения среднего поля [8, 9].

Из рис. 1 видно, что для VV-поляризации наблюдается дополнительное псевдоупругое рассеяние света, которое удовлетворительно описывается моделью рассеяния T-J [10] (на рисунке схематически показано пунктирными линиями). Аналогичная картина наблюдается и для облученного образца. Сравнение спектров при VV- и VH-поляризации света, позволяет сделать вывод, что для более качественного анализа колебательного вклада и получения отношения $I_{\min}/I_{\max}$ следует рассматривать рамановские спектры, зарегистрированные в VH-конфигурации.

На рис. 2 показаны низкочастотные VH рамановские спектры для необлученного (1) и γ -облученного (2) образцов.

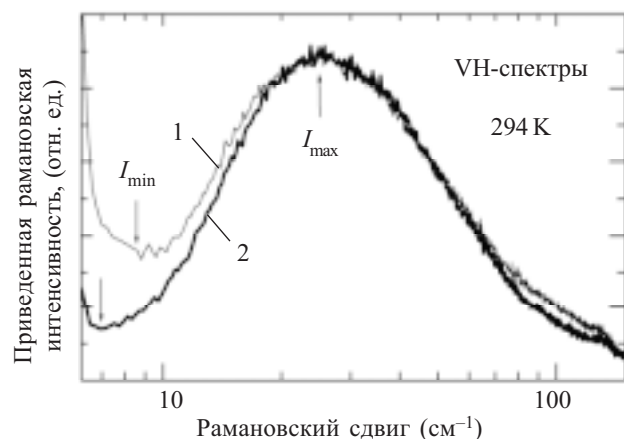


Рис. 2. Низкочастотные VH рамановские спектры рассеяния для необлученного (1) и γ -облученного (2) образцов. Спектры нормированы к интенсивности максимума бозонного пика при 25 cm^{-1} (показано стрелкой вверх)

В этом случае бозонный пик можно также интерпретировать как экспериментальное наблюдение особенностей плотности колебательных состояний [11]. По полученным спектрам рассчитаны отношения минимума интенсивности к максимуму. Для необлученного образца $I_{\min}/I_{\max} = 0,51$, для облученного $I_{\min}/I_{\max} = 0,31$, что свидетельствует о радиационно-индуцированном уменьшении относительной степени хрупкости структурной сетки стекла. Также видно, что радиационное воздействие приводит к сдвигу минимума кривой в низкочастотную область, тогда как частотного сдвига максимума не наблюдается. Умень-

шение отношения $I_{\min}/I_{\max}$, сопровождаемое частотным сдвигом минимума колебаний, наблюдалось также и в работе [7] при исследовании низкочастотных VH рамановских спектров стекол систем $\text{Ge}_x\text{S}_{1-x}$ и $\text{Ge}_x\text{Se}_{1-x}$ в зависимости от их химического состава.

Из полученных нами результатов следует, что при радиационном воздействии на халькогенидное стекло колебательный (бозонный) вклад в рамановское рассеяние в низкочастотной области (5—10 cm^{-1}) доминирует над релаксационным вкладом псевдоупругого рассеяния. Уменьшение относительной степени хрупкости можно связать с увеличением плотности колебательных состояний в облученном образце за счет радиационно-индуцированного координационного дефектообразования [12].

Таким образом, установлено, что благодаря радиационной модификации халькогенидного стекла его матрица становится более прочной, при этом колебательный (бозонный) вклад в низкочастотной области спектра доминирует над релаксационным вкладом псевдоупругого рассеяния. Это связано, скорее всего, с увеличением плотности колебательных состояний за счет формирования радиационно-индуцированных координационных топологических дефектов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Sanghera J. S., Aggarwal I. D. Active and passive chalcogenide glass optical fibers for IR applications: a review // J. Non-Cryst. Solids.— 1999.— Vol. 256–257.— P. 6—16.
2. Ovshinsky S. R. Reversible electrical switching phenomena in disordered structures // Phys. Rev. Lett.— 1968.— Vol. 21.— P. 1450—1453.
3. Lee T. H., Heo J., Choi Yu. G. et al. Emission properties of $\text{Ho}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ co-doped in $\text{Ge}_{30}\text{Ga}_{20}\text{As}_{80}\text{S}_{60}$ glass // J. Appl. Phys.— 2004.— Vol. 96.— P. 4827—4832.
4. Ohta T. Phase-change optical memory promotes the DVD optical disks // J. Optoelectron. Adv. Matter.— 2001.— Vol. 3.— P. 609—626.
5. Sokolov A. P., Rossler E., Kisliuk A., Quitmann D. Dynamics of strong and fragile glass formers: Differences and correlation with low-temperature properties // Phys. Rev. Lett.— 1993.— Vol. 71.— P. 2062—2065.
6. Wang Y., Nakamura M., Matsuda O., Muraze K. Rigidity percolation and structure of Ge-Se system // Physica B.— 1999.— Vol. 263–264.— P. 313—316.
7. Wang Y., Nakamura M., Matsuda O., Muraze K. Raman spectroscopy studies on rigidity percolation and fragility in Ge-S(Se) glasses // J. Non-Cryst. Solids.— 2000.— Vol. 266–269.— P. 872—875.
8. Philips J. C. Topology of covalent non-crystalline solids II: Medium-range order in chalcogenide alloys and a-Si(Ge) // J. Non-Cryst. Solids.— 1981.— Vol. 43.— P. 37—77.
9. Thorpe M. F. Continuous deformations in random networks // J. Non-Cryst. Solids.— 1983.— Vol. 57.— P. 355—370.
10. Theodorakopoulos N., Jackle J. Low-frequency Raman scattering by defects in glasses // Phys. Rev. B.— 1976.— Vol. 14.— P. 2637—2641.
11. Sokolov A. P., Kisliuk A., Quitmann D., Duval E. Evaluation of density of vibrational states of glasses from low-frequency Raman spectra // Phys. Rev. B.— 1993.— Vol. 48.— P. 7692—7695.
12. Kavetsky T., Vakiv M., Shpotyuk O. Charged defects in chalcogenide vitreous semiconductors studied with combined Raman scattering and PALS methods // Radiation Measurements.— 2007.— Vol. 42.— P. 712—714.

С. А. ДУШКИН, А. М. КУРОВ, В. А. ОДИНЕЦ,
к. ф.-м. н. А. Н. ОРОБИНСКИЙ

Украина, г. Харьков, Нац. науч. центр «Институт метрологии»;
Ин-т медицинской радиологии им. С. П. Григорьева
E-mail: orobin@mail.ru; imr@online.kharkiv.net

Дата поступления в редакцию
08.07 2008 г.

Оппонент к. т. н. Б. А. ДЕМЬЯНЧУК
(ОНУ им. И. И. Мечникова, г. Одесса)

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Приведен алгоритм расчета характеристик рентгеновского излучения: спектрального разрешения, средней энергии, коэффициента гомогенности, первого и второго слоя половинного ослабления.

Режимы работы рентгеновских установок, которые определяют характеристики рентгеновского излучения, заданы нормативными документами [1, с. 8—10] и [2, с. 9—12].

Актуальность данной работы связана со следующими аспектами.

При лечении онкологических заболеваний и медицинских обследованиях применяется рентгеновское излучение. Для эффективного лечения или обследования, а также для безопасности пациентов и медицинского персонала, который обслуживает рентгеновские установки, необходимо знать разрешение, среднюю энергию, коэффициент гомогенности, толщину первого и второго слоя половинного ослабления (СПО1 и СПО2) рентгеновского излучения. Кроме того, нужно знать поглощенные дозы рентгеновского излучения, которые отпускают пациентам при той или иной процедуре, и эффективные дозы [3, табл. 5.1], которые получает персонал.

Необходимость расчета характеристик рентгеновского излучения возникает при создании нового оборудования:

- медицинских рентгеновских установок с заданными характеристиками;
- дозиметров рентгеновского излучения с минимальной энергетической зависимостью показаний дозы;
- метрологических рентгеновских установок с заданными характеристиками для настройки, аттестации и поверки дозиметров рентгеновского излучения;
- средств противорадиационной защиты медицинского персонала.

В [4, 5] приведены результаты расчета спектров рентгеновского излучения в диапазоне напряжений на аноде рентгеновской трубки от 30 до 140 кВ с помощью алгоритма TASMIP, который основан на полиномиальной интерполяции экспериментальных спектров рентгеновской трубки с вольфрамовым анодом.

Научная новизна данной работы состоит в том, что:

- на основе теоретических исследований разработан алгоритм, позволяющий рассчитать спектральное разрешение, среднюю энергию, коэффициент гомогенности, СПО1 и СПО2 при помощи построения спектров тормозного рентгеновского излучения и определения средних энергий без учета и с учетом фильтра, необходимого для определения СПО1;
- при построении спектров применялись аналитические зависимости линейных коэффициентов ослабления воздуха, материалов фильтров и слоев половинного ослабления от энергии независимо от материала анода рентгеновской трубки;
- теоретически исследованы характеристики спектров рентгеновского излучения в более широком энергетическом диапазоне (от 12 до 300 кВ), чем приведено в [4, 5];
- расчет выполнен с помощью стандартных математических пакетов типа MathCAD и Origin Pro, что значительно упрощает процедуру расчета по сравнению с [4, 5];
- определен критерий применимости разработанного алгоритма.

Спектр рентгеновского излучения

Флюэнс частиц пропорционален интенсивности тормозного рентгеновского излучения, а максимальная энергия рентгеновского излучения в кВ численно равна напряжению на аноде рентгеновской трубки в кВ ($E_{\max, \text{кВ}} = U_{\text{а, кВ}}$ [6, с. 12]). С учетом этого, флюэнс частиц тормозного рентгеновского излучения в зависимости от энергии частиц, начиная с энергии $E \approx 12$ кВ, без учета фильтрации на заданном расстоянии от фокуса рентгеновской трубки можно представить в виде [6, с. 16—17]

$$\Phi(E, U_a) = \Phi_{\max} \left(1 - \frac{E}{U_a} \right) \text{ при } E \geq 12 \text{ кВ.} \quad (1)$$

Нормированное к энергии $E=300$ кВ значение флюэнса запишем в виде

$$\Phi_N(E) = \Phi_N(E, U_a) = \frac{\Phi(E, U_a)}{\Phi_{\max} |_{U_a=300 \text{ кВ}}} = \left(1 - \frac{E_{\text{кВ}}}{U_{\text{а, кВ}}} \right) \frac{U_{\text{а, кВ}}}{300} \text{ при } E \geq 12 \text{ кВ.} \quad (2)$$

Для получения спектров рентгеновского излучения с заданной средней энергией применяются фильтры. Общая фильтрация образуется из собственной

(фиксированной) фильтрации плюс дополнительная фильтрация.

Обычно, для собственной фильтрации рентгеновской трубки применяют бериллиевый фильтр толщиной 1 мм, дополнительно могут применять фильтры из алюминия толщиной до 4 мм [2, табл. 3].

Для дополнительной фильтрации рентгеновского излучения применяются фильтры из Al, Cu, Sn и Pb. Кроме этого, при расчете средней энергии рентгеновского излучения необходимо учитывать фильтрацию, получаемую за счет воздуха.

Измерение средней энергии выполняют, как правило, на расстоянии $R=1$ м от фокуса рентгеновской трубки.

Нормированное значение флюэнса частиц рентгеновского тормозного излучения с учетом собственной и дополнительной фильтрации определим как

$$\Phi_{\Sigma N}(E) = \Phi_N(E) \cdot K_{\text{ocn}}(E), \quad (3)$$

где $K_{\text{осл}}(E)$ — коэффициент ослабления рентгеновского излучения, прошедшего через фильтры [7, с. 218] — $K_{\text{осл}}(E) = \exp[-\mu(E)d]$;

d — толщина фильтров;

$\mu(E)$ — линейный коэффициент ослабления для энергий, меньших 1500 кэВ [7, с. 220] —

$$\mu(E) = \tau(E) + \sigma_{\text{кор}}(E) + \sigma_{\text{некор}}(E);$$

$\tau(E)$ — линейный коэффициент ослабления за счет фотоэффекта;

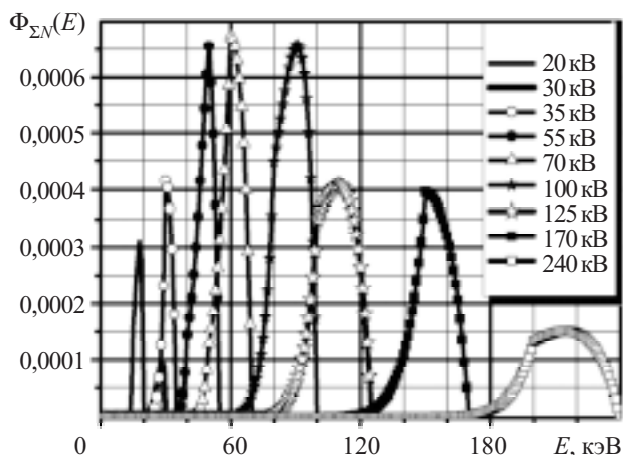


Рис. 1. Спектры рентгеновского излучения серии L

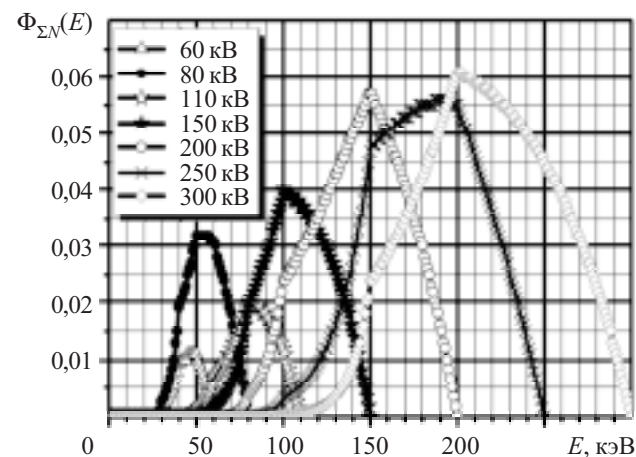


Рис. 3. Спектры рентгеновского излучения серии W

$\sigma_{\text{кор}}(E), \sigma_{\text{некор}}(E)$ — линейный коэффициент ослабления за счет рэлеевского и комптоновского рассеяния, соответственно;

$$\sigma_{\text{некор}}(E) = \sigma_{\text{некор}k}(E) + \sigma_{\text{некор}c}(E);$$

k, s — индексы, указывают на истинное поглощение и рассеяние, соответственно.

Коэффициент ослабления рентгеновского излучения, прошедшего через фильтры, представим в виде

$$K_{\text{OCL}}(E) = e^{-\mu_{\text{Be}}(E) \cdot d_{\text{Be}}} \cdot e^{-\mu_{\text{B}}(E) \cdot R} \cdot e^{-\mu_{\text{Al}}(E) \cdot d_{\text{Al}}} \times \\ \times e^{-\mu_{\text{Cu}}(E) \cdot d_{\text{Cu}}} \cdot e^{-\mu_{\text{Sn}}(E) \cdot d_{\text{Sn}}} \cdot e^{-\mu_{\text{Pb}}(E) \cdot d_{\text{Pb}}}, \quad (4)$$

где μ_{Be} , μ_{B} , μ_{Al} , μ_{Cu} , μ_{Sn} и μ_{Pb} — линейные коэффициенты ослабления Be, воздуха, Al, Cu, Sn и Pb;

$d_{\text{Be}}, d_{\text{Al}}, d_{\text{Cu}}, d_{\text{Sn}}$ и d_{Pb} — толщина фильтров из Be, Al, Cu, Sn и Pb.

Зная линейные коэффициенты ослабления для воздуха, Be, Al, Cu, Sn и Pb [1, с. 17; 7, с. 222, 226, 234, 246, 266, 267], при помощи кусочно-линейной аппроксимации получим зависимости этих коэффициентов в диапазоне энергий от $E_0=1$ кэВ до $E_\infty=300$ кэВ:

[illegible]

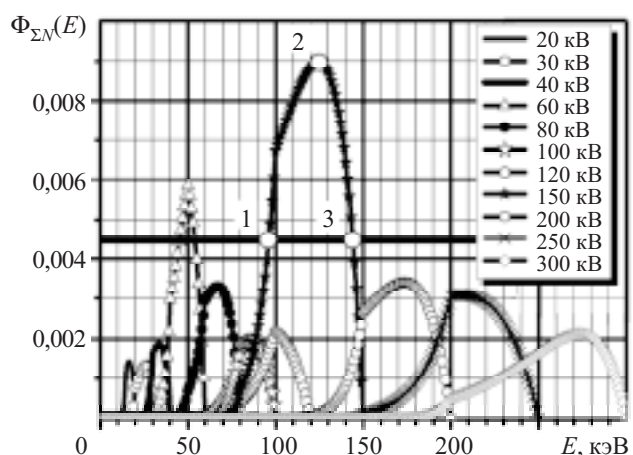


Рис. 2. Спектры рентгеновского излучения серии N

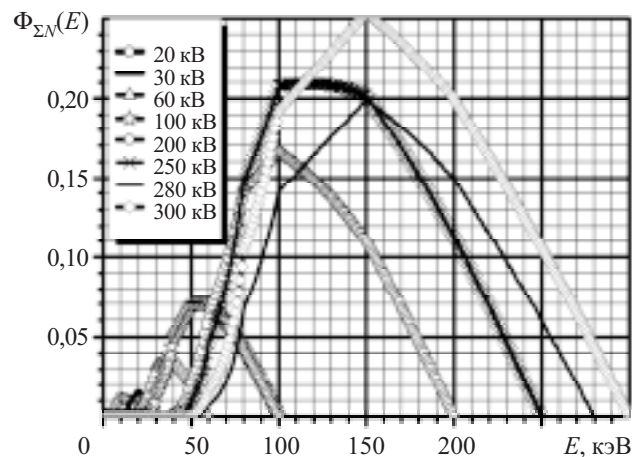


Рис. 4. Спектры рентгеновского излучения серии H

Таблица 1

Характеристики рентгеновского излучения серии L

U_a , кВ	R_E , % [2]	R_{Ep} , %	δR_{Ep} , %	$\bar{E}$, кэВ [2]	$\bar{E}_\delta$, кэВ	$\bar{E}_{d_{1/2}}$, кэВ	$\delta \bar{E}_\delta$, %	h_p
20	21	24,5	16,7	17	17,3	17,6	1,8	0,965
30	21	13,8	-34,2	26	26,9	27,3	3,5	0,965
35	21	16,7	-20,6	30	30,8	31,1	2,7	0,977
55	22	17,5	-20,3	48	47,9	48,7	-0,2	0,948
70	22	20,2	-8,0	60	60,3	61,1	0,5	0,973
100	22	21,1	-4,1	87	87,3	88,2	0,3	0,978
125	21	22,5	7,2	109	107,9	108,7	-1,0	0,986
170	18	13,8	-23,3	149	152,1	153,2	2,1	0,990
210	18	12,8	-28,7	185	188,1	189,1	1,7	0,994
240	18	18,3	1,4	211	212,3	212,9	0,6	0,998

Таблица 2

Характеристики рентгеновского излучения серии N

U_a , кВ	R_E , % [2]	R_{Ep} , %	δR_{Ep} , %	$\bar{E}$, кэВ [2]	$\bar{E}_\delta$, кэВ	$\bar{E}_{d_{1/2}}$, кэВ	$\delta \bar{E}_\delta$, %	h_p	h	δh_p , %
15	33	32,4	-1,9	12	12,3	12,7	2,5	0,914	0,875	4,4
20	34	29,2	-14,2	16	16,5	17,0	3,1	0,935	0,895	4,5
25	33	26,4	-20,0	20	20,3	20,8	1,5	0,938	0,904	3,8
30	32	35,6	11,2	24	24,5	25,2	2,1	0,917	0,885	3,7
40	30	28,2	-5,9	33	33,5	34,1	1,5	0,948	0,923	2,7
60	36	33,6	-6,5	48	48,2	49,8	0,4	0,895	0,923	-3,1
80	32	31,5	-1,6	65	65,4	66,9	0,6	0,939	0,935	-0,4
100	28	24,4	-12,7	83	84,4	85,9	1,7	0,963	0,949	1,5
120	27	23,1	-14,5	100	100,4	101,8	0,4	0,968	0,966	0,2
150	37	38,6	4,3	118	118,6	121,5	0,5	0,952	0,955	-0,4
200	30	27,4	-8,6	164	168,1	169,8	2,5	0,987	0,985	0,2
250	28	24,8	-11,3	208	210,0	211,4	1,0	0,994	0,992	0,2
300	27	23,8	-11,8	250	254,7	256,5	1,9	0,995	0,995	0

Таблица 3

Характеристики рентгеновского излучения серии W

U_a , кВ	R_E , % [2]	R_{Ep} , %	δR_{Ep} , %	$\bar{E}$, кэВ [2]	$\bar{E}_\delta$, кэВ	$\bar{E}_{d_{1/2}}$, кэВ	$\delta \bar{E}_\delta$, %	h_p	h	δh_p , %
60	48	39,8	-17,2	45	45,6	47,8	1,3	0,861	0,857	0,5
80	55	59,5	8,1	57	57,6	61,1	1,1	0,896	0,853	5,0
110	51	42,9	-15,9	79	82,4	86,3	4,3	0,903	0,865	4,4
150	56	56,0	0	104	107,7	112,7	3,6	0,917	0,886	3,6
200	57	48,2	-15,5	137	143,3	150,1	4,6	0,936	0,931	0,6
250	56	46,2	-17,5	173	181,1	186,7	4,7	0,966	0,959	0,8
300	57	54,2	-4,9	208	215,2	220,5	3,5	0,978	0,974	0,5

Таблица 4

Характеристики рентгеновского излучения серии H

U_a , кВ	R_{Ep} , %	$\bar{E}$, кэВ [2]	$\bar{E}_\delta$, кэВ	$\bar{E}_{d_{1/2}}$, кэВ	$\delta \bar{E}_\delta$, %	h_p	h	δh_p , %
20	101,7	12,9	13,8	15,2	7,0	0,820	0,750	10,9
30	57,3	19,7	20,4	22,0	3,6	0,832	0,725	14,8
60	66,4	37,3	38,7	42,3	3,8	0,796	0,745	6,9
100	84,5	57,4	60,8	65,6	5,9	0,905	0,815	11,0
200	96,1	102	116,1	130,9	13,8	0,788	0,708	11,3
250	113,7	122	140,4	159,1	15,1	0,839	0,751	11,7
280	92,1	146	162,6	179,7	11,4	0,881	0,845	4,3
300	101,8	147	167,3	187,3	13,8	0,873	0,819	6,6

4. Погрешность аппроксимации $\mu(E)$ и $d_{1/2 \text{ Al, Cu}}(E)$ зависит от интервала дискретизации по энергии рентгеновского излучения (ΔE_d) при аппроксимации линейных коэффициентов ослабления.

С использованием данного алгоритма, численными методами были рассчитаны характеристики стандартных рентгеновских излучений серий L , N , W и H , которые приведены в табл. 1—4. При этом принималось во внимание, что для серии L не нормируется коэффициент гомогенности, а следовательно, и СПО2; для серии H не нормируется спектральное разрешение [2, с. 9—12].

Для анализа полученных результатов вычислены значения δR_{Ep} , $\delta \bar{E}_p$ и δh_p — отклонения рассчитанных значений R_{Ep} , $\bar{E}_p$ и h_p от R_E , $\bar{E}$ и h , приведенных в [2].

Проанализировав рассчитанные характеристики стандартных рентгеновских излучений серий L , N , W и H , и сравнив их с характеристиками, приведенными в [2] (табл. 1—4), определим критерий применимости алгоритма расчета характеристик рентгеновского излучения с учетом выражений, приведенных в данной работе.

Для рентгеновских установок коэффициент гомогенности h , как правило, должен быть в пределах $0,8 \leq h < 1$ [2]. Поэтому за критерий применимости алгоритма расчета характеристик рентгеновского излучения примем коэффициент h .

Как видно из табл. 1—4,

— при $0,9 \leq h_p < 1$ $|\delta \bar{E}_p| \leq 5,0\%$ и $|\delta h_p| \leq 5,0\%$;

— при $0,8 \leq h_p \leq 0,9$ $|\delta \bar{E}_p| \leq 15,0\%$ и $|\delta h_p| \leq 15,0\%$;

— $|\delta R_{\max Ep}| \leq 35\%$.

Для более точного определения спектрального разрешения необходимо уменьшать интервал дискретизации по энергии рентгеновского излучения ΔE_d , который можно определить как $\Delta E_a \leq |\delta R_{Ep}| \cdot \bar{E}$ (рис. 2).

Выводы

1. На основе теоретических исследований разработан алгоритм расчета характеристик рентгеновского излучения — спектрального разрешения, средней энергии, первого слоя половинного ослабления, второго слоя половинного ослабления и коэффициента гомогенности. Эти характеристики можно определить, построив спектр рентгеновского излучения для заданной комбинации фильтров и напряжения на аноде, рассчитав среднюю энергию заданного спектра и среднюю энергию заданного спектра с учетом фильтра, необходимого для определения первого слоя половинного ослабления.

2. Рассчитать характеристики рентгеновского излучения можно, зная аналитические зависимости линейных коэффициентов ослабления воздуха и материалов фильтров от энергии и зависимости толщины слоев половинного ослабления от энергии, что мож-

но получить при помощи кусочно-линейной аппроксимации этих функций.

3. Чем меньше интервал дискретизации по энергии рентгеновского излучения при аппроксимации линейных коэффициентов ослабления и чем более однороден, применительно к средней энергии, спектр рентгеновского излучения, тем ближе к истинным рассчитанные значения спектрального разрешения, средней энергии, коэффициента гомогенности, толщины СПО1 и СПО2.

4. Критерием применимости алгоритма расчета характеристик рентгеновского излучения является коэффициент гомогенности h_p . В диапазоне энергий от 12 до 300 кэВ:

— при $0,9 \leq h_p < 1$ $|\delta \bar{E}_p| \leq 5\%$ и $|\delta h_p| \leq 5\%$;

— при $0,8 \leq h_p \leq 0,9$ $|\delta \bar{E}_p| \leq 15\%$ и $|\delta h_p| \leq 15\%$.

5. По спектру рентгеновского излучения можно оценить значение флюэнса (мощности дозы) рентгеновского излучения.

6. Рассчитав спектральное разрешение и коэффициент гомогенности по алгоритму, приведенному в данной работе, можно определить, является ли спектр рентгеновского излучения стандартным [2], и если да, то к какой серии этот спектр относится: с низким содержанием кермы в воздухе, узким спектром, широким спектром или с высоким содержанием кермы в воздухе.

7. Приведенный алгоритм расчета не учитывает нестабильности напряжения на аноде и тока анода рентгеновской трубки и особенности каждой рентгеновской установки (геометрические размеры, место расположения, диаметр однородного поля) с точки зрения коэффициентов рассеяния рентгеновского излучения. Поэтому окончательно определить характеристики рентгеновского излучения и их погрешности можно только экспериментальным путем при их измерениях.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- ГОСТ 8.087—2000. Государственная система обеспечения единства измерений. Установки поверочные дозиметрические фотонного и электронного излучений. Методы и средства поверки.
- ДСТУ ISO 4037-1:2006. Стандартні рентгеновське та гамма-випромінювання для калібрування дозиметрів і вимірювачів потужності дози та для визначення їх чутливості в залежності від енергії фотонів. Частина 1. Характеристики випромінень та методи, що їх створюють.
- ГН 6.6.1-6.5.001—98. Нормы радиационной безопасности Украины. НРБУ-97.
- Sanchez del Rio M., Dejus R. J. XOP: recent developments // SPIE proceedings.— 1998.— Vol. 3448.— P. 340—345.
- Boone J. M., Seibert J. A. An accurate method for computer-generating tungsten anode X-ray spectra from 30 to 140 kV // Medical Physics.— 1997.— Vol. 24, N 11.— P. 1661—1670.
- Рентгеновские лучи: Пер. с нем. и англ. Л. Н. Бронштейн / Под ред. М. А. Блохина.— М.: Издательство иностранной литературы, 1960.
- Немец О. Ф., Гофман Ю. В. Справочник по ядерной физике.— Киев: Наукова думка, 1975.
- Кронгауз А. Н., Петров В. А., Линчевская Г. А., Палладиева Н. М. Измерение и расчет поглощенных доз при внешнем и внутреннем облучении.— М.: Медгиз, 1963.

Презентаційно-виставковий центр
«Радмір Експохол»
Харків

вул. Академіка Павлова, 271 (метро «Ак. Павлова»)



**18-20 лютого
2009 року**

XI СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА



ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ
ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ
ЕНЕРГЕТИКА · КВПІА

- Енергозберігаючі технології
- Електронні компоненти і телекомунікації
- Енергетика
- Енергозбереження в ЖКГ
- Контрольно-вимірювальні прилади

ОРГАНІЗАТОР:

«К.І.» - «Kharkiv Info Expo»



(057) 719-45-17, 719-45-18, 754-65-69

www.INFOEXPO.kharkov.ua



18-20
БЕРЕЗНЯ
2009.

Іноземний партнер виставки
International Electric & Automation Show
(Румунія)

dk expo

Офіційні інформаційні партнери у Росії

Электротехники

КАБЕЛЬ

Інтернет-партнер у Росії

RusCable.Ru



8-а СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА
енергетики, енергозбереження та електротехніки
з міжнародною участю

ЕНЕРГОПРОМ-2009

ТОВ "Експо-центр "МЕТЕОР", 49008, Україна,
м. Дніпропетровськ, вул. ім. О.М. Макарова, 27а
тел.: +38 (056) 373-93-70, +38 (0562) 357-357

e-mail: energoprom@expometeor.com

<http://www.expometeor.com>

Номер готували
Баку, Вінниця, Дніпропетровськ, Дрогобич,
Київ, Корваліс, Львів, Одеса,
С.-Петербург, Харків, Херсон, Черновці.



Пишите
Подписывайтесь
Читайте

6(78) 2008