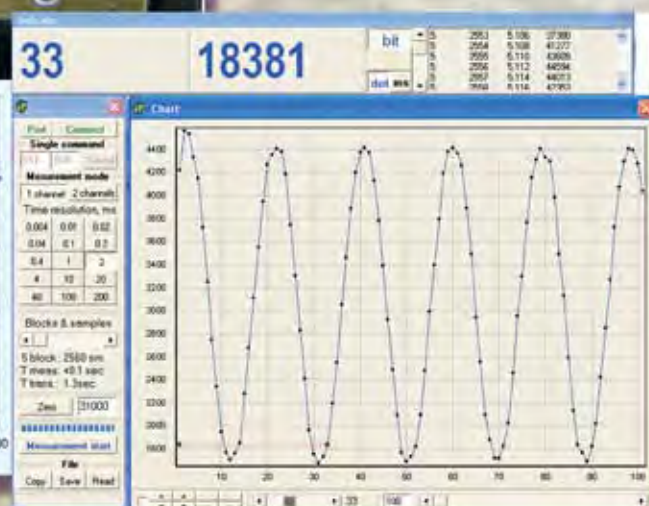
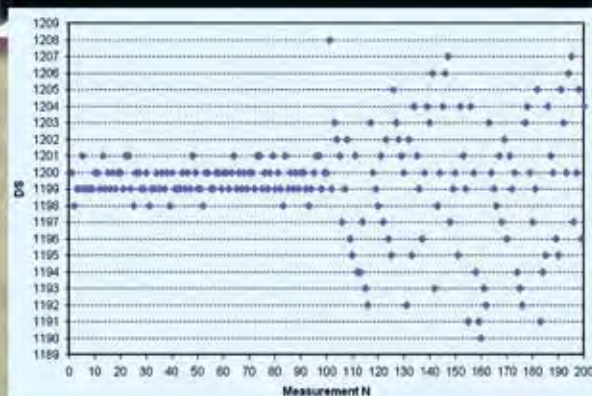


ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

К статье «Повышение
электромагнитной
помехоустойчивости
сигнальных преобразователей
на сенсорах Холла»



4 2013

ИЮЛЬ — АВГУСТ

Редакция «ТКЭА»
принимает к рассмотрению статьи
по следующим тематическим направлениям:

- современные электронные технологии;
- новые компоненты для электронной аппаратуры;
- электронные средства: исследования, разработки;
- СВЧ-техника;
- системы передачи и обработки сигналов;
- микропроцессорные устройства и системы;
- вопросы приборостроения;
- энергетическая электроника;
- биомедицинская электроника;
- сенсоэлектроника;
- функциональная микро- и наноэлектроника;
- обеспечение тепловых режимов;
- технологические процессы и оборудование;
- материалы электроники;
- метрология, стандартизация

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

ISSN 2225-5818

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 13418-2302ПР

Зарегистрирован в ВАК Украины по разделам «Физико-математические науки», «Технические науки»

Реферируется в УРЖ «Джерело» (г. Киев) и в Реферативном журнале ВИНИТИ (г. Москва).

Включен в базы данных DOAJ и РИНЦ



Номер выпущен при поддержке
НПП «Сатурн», (г. Киев)
ЧАО «Укрналит» (г. Киев),
НПП «Карат» (г. Львов),
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

- В Украине** Отделения связи. «Каталог видань України». 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,

тел./факс 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко,

А. А. Алексеева, М. Г. Глава, Н. М. Колганова.

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корещкая.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Подписано к печати 14.06 2013. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 6,0+1,0. Уч.-изд. л. 8,5. Тираж 200 экз. Заказ № 189.

Издательство «Политехперіодика»

(65044, г. Одесса-44, а/я 17).

Отпечатано в типографии РА «ART-V»

(65091, г. Одесса, ул. Комитетская, 24а).

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2013

№ 4

Год издания 37-й

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

СОДЕРЖАНИЕ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Д.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.ф.-м.н. В. Ф. Мачулин (г. Киев)
Д.т.н. Г. А. Оборский (г. Одесса)
Е. А. Тихонова (г. Одесса)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. С. Г. Антошук (г. Одесса)
Д.т.н. А. А. Ащелулов (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)
К.т.н. И. Н. Еримичой,
зам. гл. редактора (г. Одесса)
К.т.н. А. А. Ефименко,
ответственный секретарь (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк (г. Киев)
Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)
К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)
Д.т.н. И. Ш. Невлюдов (г. Харьков)
Д.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)
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.т.н. В. С. Ситников (г. Одесса)
Д. т. н. Я. Стеванович (г. Белград)
Д. т. н. З. Стевич (г. Белград)
Д.х.н. В. Н. Томашик (г. Киев)
Д.ф.-м.н. О. И. Шпотьок (г. Львов)

УЧРЕДИТЕЛИ

МПП Украины
Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарева
Научно-производственное
предприятие «Сатурн»
Одесский национальный
политехнический университет
Издательство «Политехперіодика»

Одобрено к печати Ученым советом
ОНПУ
(Протокол № 6 от 18.06 2013 г.)

Электронные средства: исследования, разработки

Переходное контактное сопротивление в электрических соединениях с плоскими контактами. *Ефименко А. А., Мерляк С. В.* 3

СВЧ-техника

Применение высокотеплопроводной керамики из нитрида алюминия в вакуумных электронных приборах СВЧ. *Часнык В. И.* 8

Системы передачи и обработки сигналов

Повышение электромагнитной помехоустойчивости сигнальных преобразователей на сенсорах Холла. *Готра З. Ю., Голяк Р. Л., Ильканич В. Ю., Марусенкова Т. А., Бойко О. В.* 13

Устройство управления лазерным модулем оптоэлектронной вычислительной среды с динамически изменяемой архитектурой. *Липинский А. Ю.* 19

Сенсоэлектроника

Двухфункциональный датчик давления-температуры на основе нитевидных кристаллов кремния. *Дружинин А. А., Кутраков А. П., Лях-Кагуй Н. С., Вуйцик А. М.* 23

Обеспечение тепловых режимов

Экспериментальное моделирование тепловых режимов наноспутника. *Завадская Е. С., Рассемакин Б. М., Рогачёв В. А., Хайрнатов С. М., Хоминич В. И.* 27

Технологические процессы и оборудование

Ненакаливаемые катоды на основе углеродных наноструктурированных слоистых структур. *Беянин А. Ф., Борисов В. В., Тимофеев М. А., Ламский А. Н.* 31

Источник бескапельных плазменных потоков для наноэлектроники. *Борисенко А. Г.* 37

Устройства для контроля качества сварных соединений выводов бескорпусных микросхем. *Спирин В. Г.* 42

Материалы электроники

Электропроводность композита «полиэтилен — диоксид ванадия». *Антонова Е. В., Колбунов В. Р., Тонкошкур А. С., Ляшков А. Ю.* 44

Список рецензентов номера 3-я стр. обложки

Новые книги 7, 43

Выставки. Конференции 18

ЗМІСТ

Електронні засоби: дослідження, розробки

Перехідний контактний опір у електричних з'єднаннях з плоскими контактами. *Єфіменко А. А., Мерлян С. В.* (3)

НВЧ-техніка

Застосування високотеплопровідної кераміки з нітриду алюмінію у вакуумних електронних приладах НВЧ. *Часник В. І.* (8)

Системи передачі та обробки сигналів

Підвищення електромагнітної завадостійкості сигнальних перетворювачів на сенсорах Холла. *Готра З. Ю., Голяка Р. Л., Ільканич В. Ю., Марусенкова Т. А., Бойко О. В.* (13)

Пристрій керування лазерним модулем оптоелектронного обчислювального середовища з динамічно змінюваною архітектурою. *Ліпінський О. Ю.* (19)

Сенсоелектроніка

Двофункціональний датчик тиску-температури на основі нитковидних кристалів кремнію. *Дружинін А. О., Кутраков О. П., Лях-Кагуй Н. С., Вуйцик А. М.* (23)

Забезпечення теплових режимів

Експериментальне моделювання теплових режимів наносупутника. *Завадська Є. С., Рассамкін Б. М., Рогачов В. А., Хайрмасов С. М., Хомініч В. І.* (27)

Технологічні процеси та обладнання

Нерозжарювані катоди на основі вуглецевих наноструктурованих шаруватих структур. *Белянін О. Ф., Борисов В. В., Тимофеев М. А., Ламський О. М.* (31)

Джерело безкраплинних плазмових потоків для наноелектроніки. *Борисенко А. Г.* (37)

Пристрої для контролю якості зварних з'єднань виводів безкорпусних мікросхем. *Спірін В. Г.* (42)

Матеріали електроніки

Електропровідність композиту «поліетилен — діоксид ванадію». *Антонова Є. В., Колбунов В. Р., Тонкошкур А. С., Ляшков А. І.* (44)

CONTENTS

Electronic means: investigations, development

Transient contact resistance in electrical connections with flat pins. *Efimenko A. A., Merlyan S. V.* (3)

Microwave technology

Use of high-thermal conductive aluminum nitride based ceramics in vacuum UHF electronic devices. *Chasnyk V. I.* (8)

Systems of transfer and processing of signals

Electromagnetic noise-immunity improving of signal transducers based on Hall sensors. *Hotra Z. Yu., Holyaka R. L., Ilkanych V. Yu., Marusenkova T. A., Boyko O. V.* (13)

A control unit for a laser module of optoelectronic computing environment with dynamic architecture. *Lipinskii A. Y.* (19)

Sensoelectronics

Dual-function pressure-temperature sensor based on silicon whiskers. *Druzhinin A. A., Kuttrakov A. P., Liakh-Kaguy N. S., Vuitsyk A. M.* (23)

Ensuring of thermal modes

Experimental simulation of nanosatellites heat modes. *Zavadskaja E. S., Rassamakin B. M., Rogachov V. A., Khayrnasov S. M., Khominich V. I.* (27)

Technological processes and equipment

Cold cathodes based on carbonic nanostructured layered structures. *Belyanin A. F., Borisov V. V., Timofeev M. A., Lamskiy A. N.* (31)

The source of macroparticle-free plasma flows for nanoelectronics. *Borisenko A. G.* (37)

Devices for quality control of welded joints of leads of packageless chips. *Spirin V. G.* (42)

Materials of electronics

Electrical conductivity of the «polyethylene — vanadium dioxide» composite. *Antonova E. V., Kolbunov V. R., Tonkoshkur A. S., Lyashkov A. Yu.* (44)

УДК 621.38.001(031)

К. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО, С. В. МЕРЛЯН

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: aiefimen@gmail.com, stasmerlyan@gmail.com

ПЕРЕХОДНОЕ КОНТАКТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЯХ С ПЛОСКИМИ КОНТАКТАМИ

На основании экспериментальных исследований получены зависимости, позволяющие по заданному значению переходного контактного сопротивления $R_{пер}$ оперативно, при небольшом объеме вычислений найти оптимальное давление упругих элементов плоских контактов с различными покрытиями (олово-висмут, никель, палладий, серебро, золото). Кроме этого, полученные результаты оценки величины и стабильности $R_{пер}$ позволяют выбрать оптимальное покрытие в зависимости от условий работы контактов.

Ключевые слова: переходное контактное сопротивление, контактное давление, плоский контакт, материал покрытия контакта.

Электрические контактные соединения в большом количестве входят во все электронные модули и аппараты и являются очень ответственными элементами. От состояния электрических контактов в наибольшей степени зависит безотказная работа электронной аппаратуры. Для создания оптимальных конструкций электрических соединений и их правильного использования нужно знать характеристики контактных соединений, в первую очередь переходное контактное сопротивление, и их зависимость от различных факторов. Особенно это актуально для разъёмных контактов, когда вступает в силу противоречие между значениями переходного контактного сопротивления и усилия сочленения-расчленения [1, 2].

По роду соприкасающихся поверхностей различают плоские, линейные и точечные контакты, причем плоские наименее изучены с точки зрения определения переходного контактного сопротивления. Плоские контакты, образующиеся при соприкосновении плоских поверхностей, могут использоваться как в электрических соединителях, так и при создании контактных непаяных соединений при поверхностном монтаже электронных компонентов на печатные платы [3].

Анализ плоских контактов показывает, что действительная (эффективная) площадь соприкосновения плоских контактов меньше, чем общая площадь их поверхности (кажущаяся площадь контактирования) [2]. Объясняется это тем, что на поверхности даже хорошо обработанных и пригнанных друг к другу контактных поверхностей остаются микроскопические неровности и при отсутствии силы прижатия контактирование происходит лишь в небольшом количестве точек. При сжатии контактов верши-

ны неровностей, по которым они соприкасаются, сминаются, образуя небольшие площадки касания контактов. Увеличение сжимающей силы приводит к еще большему смятию неровностей, сближению контактов и возникновению новых дополнительных площадок касания [2]. Таким образом, действительная площадь соприкосновения контактов, равная сумме элементарных площадок касания, меньше полной контактной поверхности и зависит от контактного давления, шероховатости, неплоскостности и вида покрытия контактирующих поверхностей.

В случае малой площади соприкосновения контакт может иметь значительное сопротивление для прохождения тока, что в свою очередь может приводить к его перегреву, потерям в нем мощности и затуханию сигналов. Поэтому определение переходного контактного сопротивления $R_{пер}$ является весьма важным этапом проектирования контактных соединений. Однако процесс этот представляет собой сложный расчет и требует к тому же проведения испытаний в каждом конкретном случае, поскольку $R_{пер}$ зависит от коэффициента, характеризующего относительную деформацию микронеровностей при усилии, необходимом для механического удаления пленки, которая покрывает контакты. Прямые измерения этого коэффициента очень сложны, поэтому большее применение находят косвенные экспериментальные оценки. Все это делает процесс определения переходного контактного сопротивления труднореализуемым в инженерной практике. К тому же вызывает сомнение возможность получения приемлемых показателей точности [2].

Альтернативой расчетно-экспериментальному методу определения переходного сопротивления

могут быть его измерения в условиях, приближенных к реальным на макетных стендах, и распространение результатов измерений после соответствующей обработки на другие условия (размеры, контактное давление).

Целью настоящей работы является получение пригодных для применения в инженерных расчетах зависимостей переходного контактного сопротивления от контактного давления для плоских контактов с различными покрытиями (олово-висмут, никель, палладий, серебро, золото), предназначенных для использования в электрических соединителях для поверхностного непаяного монтажа [3] и в других конструкциях контактных соединений, использующих плоские контакты и прижим контактирующих поверхностей.

Экспериментальное исследование

В рассматриваемом контактном соединении одна печатная плата (ПП) жесткая, другая выполнена на гибком основании — гибкая печатная плата. Такая конструкция позволяет при использовании прокладки из эластомерного материала, располагаемой над гибкой ПП, избежать негативного влияния неплоскостности контактирующих поверхностей и таким образом повышать эффективную площадь контактирования [3]. Материал покрытий на обеих контакти-

рующих поверхностях одинаковый. В качестве плоских контактов использована фольга печатных плат, чистота поверхности которой определяет чистоту поверхности образцов.

Измерение переходного контактного сопротивления проводилось на специальном приспособлении, конструкция которого показана на **рис. 1**.

Упрощенная схема контактирования показана на **рис. 2**. Контакт создается между контактными площадками 2 и 4 на жесткой 1 и гибкой 3 печатных платах. Усилие прижима прикладывается к гибкой ПП через прокладку 5, изготовленную из эластомерного материала, и жесткую пластину 6. Для определения давления с известной точностью используются грузы с нормированными значениями массы.

Для исследования переходного контактного сопротивления была проведена серия испытаний для каждого из изучаемых покрытий и получены данные при различных значениях давления. При этом для одного значения давления измерение $R_{пер}$ выполнялось не менее пяти раз (каждое измерение проводилось после снятия и установления нагрузки). Результаты измерений были усреднены и приведены к удельным величинам $R_{пер.уд}$ и $P_{уд}$.

Как видно из представленных на **рис. 3** графиков, сопротивление контактов, покрытых никелем, сплавом олово-висмут и палладием, сни-

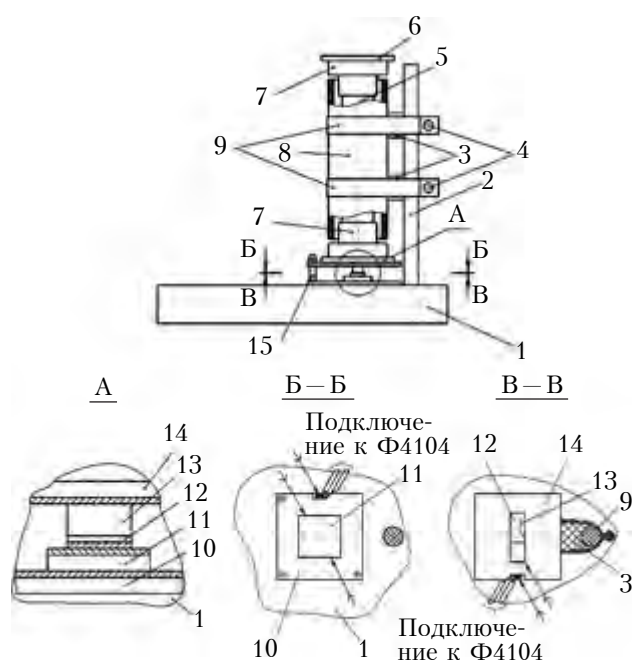


Рис. 1. Испытательная установка:
1 — основание; 2 — штатив; 3 — упор; 4 — винтовой зажим; 5 — внутренняя труба; 6 — подставка для грузов; 7 — пустотелые насадки; 8 — внешняя труба; 9 — хомут; 10 — нижняя, неподвижная ПП со слоем фольги; 11 — жесткая ПП с испытуемым покрытием; 12 — гибкая ПП с испытуемым покрытием; 13 — эластомерная прокладка; 14 — верхняя, подвижная ПП со слоем фольги; 15 — фиксатор положения ПП 10 и 14 в горизонтальной плоскости; Ф4104 — микрометр

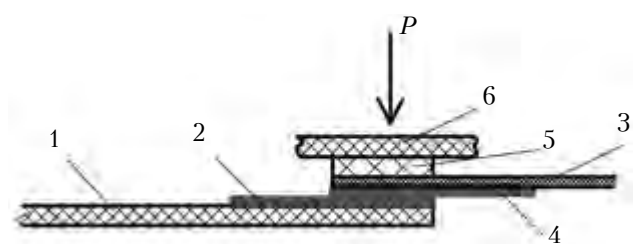


Рис. 2. Схема контактирования:
1 — жесткая ПП с контактом 2; 3 — гибкая ПП с контактом 4; 5 — эластомерная прокладка; 6 — жесткая пластина

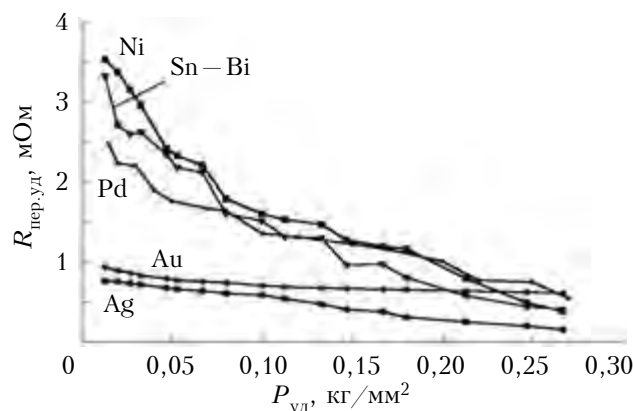


Рис. 3. Типичные зависимости переходного контактного сопротивления от давления для различных покрытий

жается достаточно резко вначале, что объясняется быстрым ростом числа точек и площадок контактирования при увеличении усилия прижатия в области малых давлений. При дальнейшем повышении $P_{уд}$ сопротивление уменьшается медленнее, поскольку снижается интенсивность деформации неровностей материала, и начиная с некоторого значения $P_{уд}$ величина $R_{пер.уд}$ остается практически неизменной либо уменьшается очень незначительно. В случаях же когда покрытие выполнено из серебра или золота переходное контактное сопротивление мало зависит от давления, поскольку уже при малых усилиях сжатия такие поверхности имеют значительную эффективную площадь контактирования.

Таким образом, очень важно правильно выбрать контактное давление, чтобы установить оптимальное соотношение между переходным сопротивлением и контактным давлением: с одной стороны, давление в контакте должно быть достаточным для того, чтобы обеспечить малое переходное сопротивление, с другой — оно не должно вызывать в металле контактов пластических деформаций, способных привести к их разрушению.

Обработка экспериментальных результатов

Для удобства использования полученных экспериментальных данных при создании конструкций контактных соединений найдем такие аналитические зависимости, которые с наибольшим приближением описывали бы зависимости переходного контактного сопротивления от контактного давления не только в диапазоне измерений, но и за его пределами.

На основании измеренных зависимостей $R_{пер.уд}$ от $P_{уд}$ для каждого из покрытий с помощью программы MATLAB были получены наборы формул (более сорока), каждая из которых может быть использована для вычисления переходного контактного сопротивления с различной степенью приближения к экспериментальным значениям. Из них необходимо выбрать те, что позволяют получить наиболее точный результат.

Для оценки отклонения значений параметров, вычисленных по эмпирическим формулам, от экспериментальных данных используют различные методы, например метод наименьших квадратов, метод средних, приближение в отдельных точках и т. д. [4]. Все они позволяют подобрать эмпирические формулы так, чтобы получить удовлетворительное приближение определяемого параметра к его истинному значению. В данной работе был использован метод средних.

С целью уменьшения количества расчетов из набора формул для каждого покрытия были отобраны три-четыре зависимости, графики которых визуально наиболее приближены к экспериментальным точкам. Выбранные зависимости были обработаны, и результаты вычисления от-

клонений для каждого покрытия сведены в таблицы, имеющие следующий вид:

Экспериментальное значение $R(P_{уд i})$	Результаты вычислений по формулам:				
	1	...	n		
	$R^{(1)}(P_{уд i})$	$\varepsilon_i^{(1)} = R^{(1)}(P_{уд i}) - R(P_{уд i})$	...	$R^{(n)}(P_{уд i})$	$\varepsilon_i^{(n)} = R^{(n)}(P_{уд i}) - R(P_{уд i})$
$R(P_{уд 1})$	$R^{(1)}(P_{уд 1})$	$\varepsilon_1^{(1)} = R^{(1)}(P_{уд 1}) - R(P_{уд 1})$	...	$R^{(n)}(P_{уд 1})$	$\varepsilon_1^{(n)} = R^{(n)}(P_{уд 1}) - R(P_{уд 1})$
...
$R(P_{уд k})$	$R^{(1)}(P_{уд k})$	$\varepsilon_k^{(1)} = R^{(1)}(P_{уд k}) - R(P_{уд k})$	...	$R^{(n)}(P_{уд k})$	$\varepsilon_k^{(n)} = R^{(n)}(P_{уд k}) - R(P_{уд k})$
	$\sum_{i=1}^k \varepsilon_i^{(1)}$		...	$\sum_{i=1}^k \varepsilon_i^{(n)}$	

Здесь приняты следующие обозначения:

$R(P_{уд i})$ — экспериментальное значение удельного переходного контактного сопротивления при i -м удельном давлении;

k — количество экспериментальных значений давления, при которых проводились измерения $R(P_{уд i})$;

n — количество формул для расчета, отобранных из первичного множества;

$R^{(n)}(P_{уд i})$ — удельное переходное сопротивление, вычисленное по n -й формуле для i -го удельного давления;

$\varepsilon_i^{(n)}$ — отклонение расчетной величины от экспериментальной.

На основании табличных данных из набора эмпирических формул для каждого покрытия была выбрана та, которая дает минимальное суммарное отклонение. В результате были получены следующие аналитические зависимости удельного переходного контактного сопротивления от удельного давления:

— для контактов, покрытых никелем

$$R_{Ni} = \frac{4 \cdot 10 P_{уд}^{-4}}{P_{уд}^4 - 0,37 P_{уд}^3 + 0,04 P_{уд}^2 - 2 \cdot 10^{-4} P_{уд} + 10^{-4}}; \quad (1)$$

— для контактов, покрытых серебром

$$R_{Ag} = \frac{4 \cdot 10^{-3} P_{уд} + 10^{-3}}{P_{уд}^3 - 0,13 P_{уд}^2 + 0,02 P_{уд} + 2 \cdot 10^{-3}}; \quad (2)$$

— для контактов, покрытых золотом:

$$R_{Au} = 1,037 \cdot P_{уд}^{-0,08} - 0,55; \quad (3)$$

— для контактов, покрытых сплавом олово-висмут

$$R_{Sn-Bi} = 3,29 \cdot \exp(-7,83 P_{уд}) + 0,96 \cdot \exp(-152 P_{уд}); \quad (4)$$

— для контактов, покрытых палладием

$$R_{Pd} = \frac{0,09P_{уд}^2 - 0,05P_{уд} + 0,01}{P_{уд}^3 - 0,35P_{уд}^2 + 0,04P_{уд} + 4 \cdot 10^{-3}}; \quad (5)$$

Рассчитанное по этим формулам значение удельного переходного контактного сопротивления имеет размерность мОм при задании давления $P_{уд}$ в кг/мм².

Графики зависимости переходного контактного сопротивления от давления, полученные по формулам (1)–(5) для различных покрытий, приведены на рис. 4.

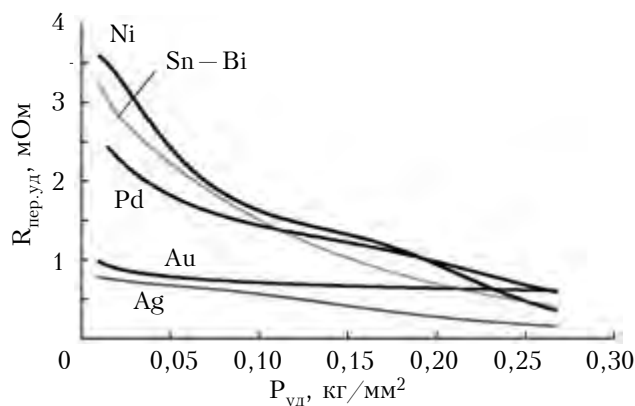


Рис. 4. Расчетные зависимости переходного контактного сопротивления от давления для различных покрытий

При создании конструкции контактного соединения важное значение имеет выбор покрытия, которое характеризует, с одной стороны, качество контакта, а с другой — его экономические показатели, и зачастую эти характеристики находятся в противоречии. Зависимости, приведенные на рис. 4, позволяют по заданному значению переходного сопротивления определить не только давление, создаваемое упругими элементами контакта, но и выбрать покрытие исходя из определенных условий.

При оценке качества различных покрытий следует учитывать также стабильность переходного контактного сопротивления не только во времени, но и в условиях сочленений-расчленений элементов контакта.

Как отмечалось ранее, при экспериментальном исследовании для каждого $P_{уд}$ проводилась серия измерений переходного контактного сопротивления. Расчет среднеквадратических отклонений измеренных величин для каждого значения давления проводился по формуле [5, с. 93]

$$\sigma[X] = \sqrt{D[X]}, \quad (6)$$

где дисперсия рассчитывается по формуле

$$D[X] = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p_i. \quad (7)$$

Здесь x_i — возможные значения случайной величины X (в данном случае $R_{пер}$) с вероятностью p_i . Считаем события равновероятными, т. е. $p_1 = p_2 = \dots = p_n$, и тогда $p_i = 1/n$, поскольку

$p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1$. Математическое ожидание (обозначено через m_x вместо $M[X]$ для удобства записи [5]) вычислялось по формуле

$$m_x \equiv M[X] = \sum_{i=1}^n x_i p_i.$$

Результаты исследования среднеквадратического отклонения значений $R_{пер}$ приведены на рис. 5.

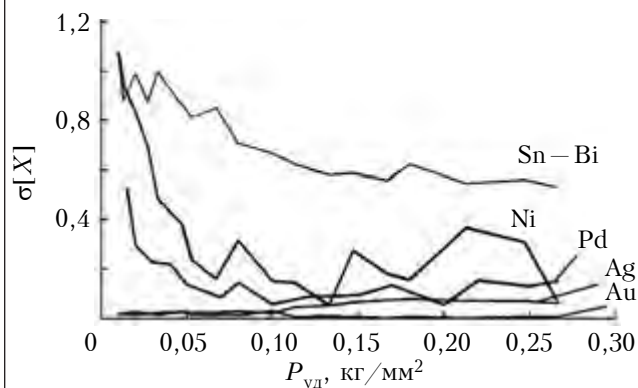


Рис. 5. Зависимость среднеквадратического отклонения значений $R_{пер.уд}$ от давления для различных покрытий

Результаты исследования показали, что, как и ожидалось, наиболее стабильными из пяти исследованных контактных покрытий являются золото и серебро — для них среднеквадратическое отклонение значений $R_{пер.уд}$ и колебания его величины при изменении $P_{уд}$ наименьшие. Для палладия имеются заметные колебания $\sigma[X]$, но их значения относительно небольшие. Наибольшей нестабильностью характеризуются контакты с покрытием олово-висмут, а также с никелевым покрытием при небольших удельных давлениях.

Выводы

Таким образом, в результате проведенных исследований получены зависимости, позволяющие по заданному значению переходного контактного сопротивления $R_{пер}$ оперативно, при небольшом объеме вычислений найти оптимальную величину контактного давления упругих элементов плоских контактов с различными покрытиями. Кроме этого, полученные результаты оценки величины и стабильности $R_{пер}$ позволяют выбрать оптимальное покрытие в зависимости от условий работы контактов, в том числе при различных значениях тока и напряжения передаваемых сигналов и в силовых цепях.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лярский В. Ф., Мурадян О. Б. Электрические соединители: Справочник. — Москва: Радио и связь, 1988. [Lyarskii V. F., Muradyan O. B. Elektricheskie soediniteli: Spravochnik. — Moscow: Radio i svyaz', 1988]
2. Белоусов А. К., Савченко В. С. Электрические разъёмные контакты в радиоэлектронной аппаратуре.

ре. — Москва: Энергия, 1975. [Belousov A. K., Savchenko V.S. Elektricheskie raz'emnye kontakty v radioelektronnoi apparature. — Moscow: Energiya, 1975]

3. Ефименко А. А. Электрические соединители для поверхностного непаяного монтажа // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2012. — № 4. — С. 9—15. [Efimenko A. A. // Tekhnologiya i konstruirovanie v elektronnoi apparature. 2012. N 4. P. 9]

4. Фролов В. А. Анализ и оптимизация в прикладных задачах конструирования РЭС. — Киев: Выща шк., 1991. [Frolov V. A. Analiz i optimizatsiya v prikladnykh zadachakh konstruirovaniya RES. — Kiev: Vyscha shk., 1991]

5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — Москва: Гос. издательство физико-математической литературы, 1958. [Venttsel' E. S. Teoriya veroyatnostei. — Moscow: Gos. izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury, 1958]

Дата поступления рукописи
в редакцию 26.06 2013 г.

Efimenko A. A., Merlyan S. V. **Transient contact resistance in electrical connections with flat pins.**

Keywords: transient contact resistance, contact pressure, flat contact, contact coating material.

On the basis of experimental research, the authors have obtained dependences allowing to find promptly and with a small amount of calculations the optimum pressure value for elastic elements of flat contacts with

different coatings (tin-bismuth, nickel, palladium, silver, gold), using the preset value of contact resistance $R_{\text{пер}}$. Moreover, the obtained results of estimation of quantity and stability of $R_{\text{пер}}$ allow to choose the optimal coating according to the operating conditions of the contacts.

Ukraine. Odessa National Polytechnic University.

Єфіменко А. А., Мерлян С. В. **Перехідний контактний опір у електричних з'єднаннях з плоскими контактами.**

Ключові слова: перехідний контактний опір, контактний тиск, плоский контакт, матеріал покриття контакту.

На підставі експериментальних досліджень отримано залежності, що дозволяють по заданому значенню перехідного контактного опору $R_{\text{пер}}$ оперативно, при невеликому обсязі обчислень знайти оптимальну величину тиску пружних елементів плоских контактів з різним покриттям (олово-вісмут, нікель, паладій, срібло, золото). Крім цього, отримані результати оцінки величини і стабільності $R_{\text{пер}}$ дозволяють вибрати оптимальне покриття залежно від умов роботи контактів.

Україна, Одеський національний політехнічний університет.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Ефименко А. А. Проектирование межблочных электрических соединений электронных средств в базовых несущих конструкциях. — Одесса: Политехпериодика, 2013.

В монографии рассматриваются вопросы проектирования межблочных электрических соединений в электронной аппаратуре, создаваемой с использованием базовых несущих конструкций (БНК). Приводится классификация и характеристика современных типов электрических соединений и БНК, формализованы задачи их проектирования. Большое внимание уделено методам и средствам проектирования межблочных электрических соединений и БНК, а также вопросам создания моделей и алгоритмов проектирования. Отдельно рассмотрены методы проектирования электромонтажа с использованием непаяных контактных соединений. Монография предназначена для разработчиков электронных средств. Вместе с тем, она может быть полезна студентам и аспирантам соответствующих специальностей.



УДК 621.315.61

К. т. н. В. И. ЧАСНЫК

Украина, г. Киев, НИИ «Орион»

E-mail: ndiorion@tsua.net

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНОЙ КЕРАМИКИ ИЗ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ В ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ СВЧ

Проведен анализ свойств и характеристик керамических материалов, применяемых в электронных приборах СВЧ: корундовых керамик, керамики из оксида бериллия и керамики из нитрида алюминия. Показано, что по комплексу параметров, включающих конструкционные и функциональные характеристики, высокотеплопроводная керамика из нитрида алюминия превосходит все типы корундовой керамики и не уступает керамике из оксида бериллия, особенно при температурах выше 450°C. Приведены примеры преимущественного использования керамики из нитрида алюминия в вакуумных электронных приборах СВЧ-диапазона: ЛБВ и клистронах.

Ключевые слова: керамика, нитрид алюминия, диэлектрические опоры, спираль, ЛБВ, окно вывода энергии, изолятор, коллектор.

Для всесторонней и объективной оценки разных керамических материалов, применяемых в электронной технике и в вакуумных приборах СВЧ-диапазона волн, необходима комплексная оценка их конструкционных и функциональных характеристик. Часто в работах, где анализируются разные керамические материалы, их физико-механические свойства приводятся не в интервале температур от 0 до 600°C, а при комнатной температуре, и не в диапазоне частот, в котором работают СВЧ-приборы (клистроны, ЛБВ, магнетроны), а только на нескольких частотах, которые могут и не совпадать с рабочим диапазоном приборов. Тем более ценны работы, в которых функциональные характеристики керамических материалов приводятся в широком интервале температур и СВЧ-диапазоне частот [1–3].

Нередко данные для керамического материала, полученные разными экспериментальными методами, отличаются между собой на 20–30%, а иногда и больше. Это может быть вполне приемлемым для обсуждения свойств материала в теоретическом плане, однако для применения материала в конкретном приборе или аппаратуре необходимы достоверные сведения в широком интервале температур (0–600°C) и в диапазоне частот от 3 до 40 ГГц. Обычно интервал температур окружающей среды для приборов СВЧ задается техническим заданием и составляет от –60 до +85°C. Кроме того, при работе СВЧ-приборов, а особенно приборов с большой выходной мощностью (сотни ватт и киловатты), температура внутри прибора и особенно на конечном участке замедляющей системы в выходной секции лампы бегущей волны (ЛБВ), а также на внутренних поверхностях токоприемников

в коллекторе ЛБВ может достигать 450–600°C, а иногда и выше. Именно поэтому сравнение конструкционных и функциональных характеристик разных керамических материалов в интервале температур от 0 до 450–600°C позволяет разработчикам электронной аппаратуры и приборов СВЧ объективно оценить преимущества или недостатки керамического материала и использовать этот материал в конструкции прибора с учетом всех его особенностей.

Целью данной статьи является сопоставление свойств и характеристик керамических материалов, применяемых в приборах СВЧ.

Сравнение характеристик керамических материалов

По данным [1–4] были построены приведенные на **рис. 1, 2** температурные зависимости коэффициента теплопроводности, тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости в интервале температур от 0 до 600°C для трех основных типов керамических материалов, применяемых в приборах и устройствах электронной техники: керамики на основе оксида бериллия (ВБ-100-1), корундовой керамики (основа — оксид алюминия (22ХС, сапфирит, поликор)) и керамики на основе нитрида алюминия (НИТАЛ-17, ЭЛАНТИНИТ и др.). Физические и механические параметры этих материалов приведены в **таблице**.

Как следует из **рис. 1**, коэффициент теплопроводности керамики из AlN повышенной чистоты в интервале температур от 0 до 350°C всего на 12% меньше коэффициента теплопроводности бериллиевой керамики ВБ-100-1, а в интервале 400–500°C они практически одинаковы. При

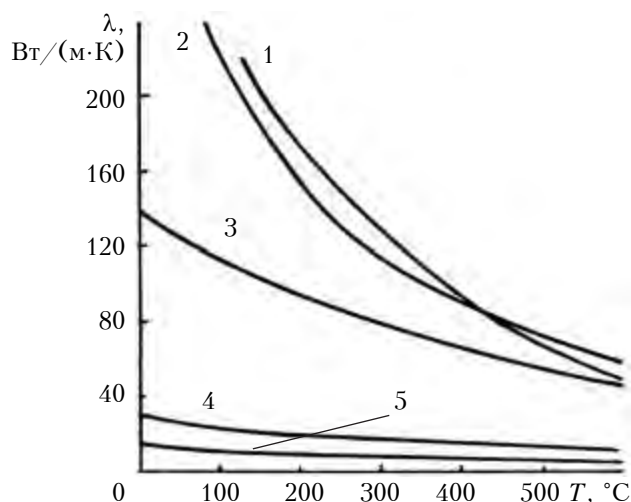


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности для различных материалов: 1 — оксид бериллия (ВБ-100-1); 2 — нитрид алюминия повышенной чистоты; 3 — нитрид алюминия НИТАЛ-17; 4, 5 — корундовая керамика (4 — поликор (ВК-100); 5 — 22ХС(ВК-94-1))

температуре выше 500°C теплопроводность керамики из AlN превосходит теплопроводность бериллиевой керамики. Однако такое высокое значение теплопроводности керамики из нитрида алюминия имеют лишь образцы небольшого размера и содержащие незначительное количество примеси кислорода — 0,1% по массе [2]. Теплопроводность современных керамических материалов, разработанных на основе нитрида алюминия (НИТАЛ-17, ЭЛАНТИНИТ) с содержанием кислорода 0,6–0,7% по массе (кривая 3 на рис. 1), составляет $\lambda=140-74$ Вт/(м·К) в интервале температур от 0 до 350°C. Это в 1,35–2 раза ниже теплопроводности керамики из AlN повышенной чистоты, но почти в 5 раз выше теплопроводности лучших видов корундовой керамики — поликора и сапфира. Вместе с этим следует отметить, что коэффициент теплопроводности в разработанных керамических материалах (типа НИТАЛ-17) в интервале температур 0–200, 200–400 и 400–600°C уменьшается всего в 1,45 раза, а в керамике из AlN повышенной чистоты, соответственно, в 2,56, 1,73 и в 1,5 раза. Таким образом, наличие большого количества примеси кислорода играет положительную стабилизирующую роль в отношении деградации теплопроводности материала из AlN при изменении температуры. Кроме того, при этом возрастает также прочность материала из AlN. Известно, что периоды кристаллической решетки AlN зависят от концентрации примесей [3]. Тетраэдрический ковалентный радиус кислорода, который замещает азот, меньше, чем у азота. Одна молекула $Al_{0,67}O$ замещает одну молекулу AlN. При этом образуются металлические вакансии, что приводит к уменьшению параметров решетки AlN при увеличении содержания кислорода. Это уменьшение размера кристаллической

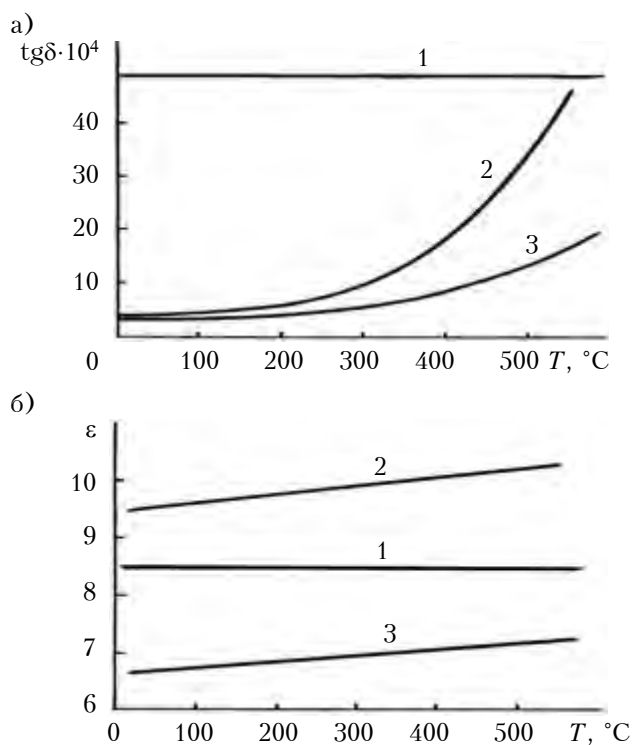


Рис. 2. Температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь (а) и диэлектрической проницаемости (б) на частоте 5,5 ГГц для различных материалов:

1 — керамика НИТАЛ-17; 2 — ВК 94-1; 3 — оксид бериллия ВБ-100-1

решетки AlN не только приводит к упрочнению материала, но и тесно связано с уникальным качеством керамики из нитрида алюминия — высокой термостойкостью и низким коэффициентом термического линейного расширения в интервале температур от 0 до 600°C.

Керамика из AlN, получаемая свободным спеканием (НИТАЛ-17, ЭЛАНТИНИТ и др.) с использованием активирующих добавок Y_2O_3 и $CaCO_3$ (от 2 до 5%), имеет не только высокую теплопроводность при удельном весе 3,20–3,26 г/см³, но и большое электросопротивление. В [6] отмечается, что в области примесной проводимости большее сопротивление обеспечивают именно добавки оксида иттрия и оксида кальция, причем наличие 2–3% по массе оксида иттрия стабилизирует электросопротивление на высоком уровне независимо от вида используемого при спекании порошка AlN. Переход от примесной проводимости к собственной наблюдается при 800–900°C.

Диэлектрическая проницаемость ϵ при наличии добавок увеличивается благодаря образованию плотных кристаллических фаз с повышенной ϵ , например за счет образующегося при спекании алюмоиттриевого граната $Y_3Al_5O_{13}$ с $\epsilon=11,7$ [6, 7]. Вместе с тем, их наличие стабилизирует диэлектрические характеристики

Физико-механические свойства керамических материалов [1–4]

Параметр	Керамика из AlN НИТАЛ-17	Корундовая керамика			Керамика из оксида бериллия
		ВК 94-1 (22ХС)	ВК 98-1 (сапфи- рит)	ВК-100 (поликор)	ВБ-100-1
Удельный вес, г/см ³	3,20–3,26	3,65–3,85	3,88–3,94	3,96–3,99	2,84–2,95
Предел прочности при ста- тическом изгибе, МПа, при: 20°C 400°C	160–290 —	320–400 90–100	300–400 230	280–350 240	200 230
Термический коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁷ °C ⁻¹ , в диапазоне: 20–200°C 20–400°C 20–600°C 20–900°C	28–38 38–48 40–50 48–55	55–65 60–68 65–72 79–84	58–67 — 70–75 77–86	57 — — 75–85	53 60 65 78–86
Электрическая прочность, кВ/мм	30–45	30–45	32–47	50	—
Удельное объемное элек- трическое сопротивление, Ом·см, при 100°C 500°C	10 ¹³ 10 ⁸ –10 ⁹ (400°C)	10 ¹⁴ 5·10 ⁷	10 ¹⁴ 5·10 ⁷ –10 ⁸	10 ¹⁵ —	1,1·10 ¹⁵ 4,3·10 ¹⁴ (300°C)
Коэффициент вторичной электронной эмиссии	1,9–2,5	5,8	6,5	—	4,5
Разрушающий перепад тем- ператур при охлаждении в воде, °C	500–600	180–230	180–210	—	165

при изменении температуры. Так, при частотах выше 3 ГГц диэлектрические характеристики у керамики из AlN остаются неизменными в интервале температур от 0 до 500°C: $\epsilon=8-8,5$, $\text{tg}\delta=(40-50)\cdot 10^{-4}$, в то время как у алюмооксидной керамики ВК 94-1 ϵ увеличивается в 1,2 раза, а $\text{tg}\delta$ — в 6,5–7 раз (см. рис. 2 и 3). Важным преимуществом керамики из AlN по сравнению с плотной алюмооксидной и оксидно-бериллиевой керамикой является ее высокое сопротивление термоудару. Разрушающий перепад температур при охлаждении в воде составляет от 300–400 [2] до 500–600°C [5], что в 2–3 раза выше, чем у вышеуказанных типов оксидной керамики. Характерной особенностью керамики из AlN является также менее резкое изменение прочности с повышением температуры, чем у оксидной керамики. Так, предел прочности AlN при сжатии уменьшается с 120 кН/см² при 20°C до 29 кН/см² при 1100°C и до 20 кН/см² при 1600°C, тогда как у алюмооксидной керамики в том же интервале температур прочность уменьшается более чем в 50 раз [5, 8].

Все перечисленные свойства и преимущества керамики из AlN, полученной свободным спеканием с использованием активирующих спекание

добавок Y₂O₃ или CaCO₃, и являются основой для ее широкого применения в приборах СВЧ и электронной техники.

Применение керамики из AlN в СВЧ-приборах

Из всех существующих в настоящее время усилителей СВЧ-сигнала в диапазоне частот от единиц до десятков ГГц наиболее широкополосным прибором, с полосой усиливаемых частот от десятков процентов до двух-трех октав, является лампа бегущей волны с замедляющей системой на спирали. В разных конструкциях ЛБВ неизменным является наличие трех или четырех диэлектрических опор (обычно это стержни разного профиля), которые служат как для закрепления спирали, так и для отвода тепла от нее. Чем выше выходная мощность электронного потока, рассеиваемая на последних витках спирали в выходной секции ЛБВ, тем большее количество тепла необходимо отвести от спирали из внутривакуумной части прибора наружу. Если при этом не обеспечить хороший теплоотвод, то возможно не только выгорание последних витков спирали, но и расплавление в этом месте диэлектрических опор, что приводит к вы-

ходу из строя всего прибора. Поэтому для материала опор самым важным параметром является высокая теплопроводность.

В мощных спиральных ЛБВ для увеличения теплоотвода от последних витков спирали в выходной секции между основными диэлектрическими опорами располагают дополнительно три-четыре стержня с высокой теплопроводностью длиной около 10–15 мм. Материалом для них служат как разнообразная вакуумплотная керамика, так и искусственный алмаз, несмотря на его высокую стоимость. В таком случае, однако, из-за увеличения количества диэлектрика на выходном участке спирали возрастают высокочастотные потери и, как следствие, выходная мощность уменьшается на 5–10% в зависимости от ϵ и $\text{tg}\delta$ материала дополнительных опор. Для того чтобы потери выходной мощности были минимальными, материал диэлектрических опор, как основных, так и дополнительных, должен иметь небольшие значения ϵ и $\text{tg}\delta$. В ЛБВ средней и большой мощности наиболее подходящими материалами, удовлетворяющим этим требованиям, являются материалы на основе оксида бериллия, такие как керамика ВБ-100-1. Она применяется уже достаточно долго, и это несмотря на ее меньшую, чем у корундовых керамик, прочность и чрезвычайно высокую токсичность — при работе с деталями из керамики ВБ-100-1 необходимо соблюдать те же меры предосторожности, что и при работе с радиоактивными материалами.

Проведенный выше анализ керамических материалов позволяет сделать вывод, что керамика из AlN не уступает традиционной для СВЧ-приборов корундовой керамике из оксида алюминия (22ХС, сапфиру и поликору), особенно в области температур выше 450°C. При этих температурах диэлектрические потери ($\epsilon \times \text{tg}\delta$) в ней такие же, как у керамики 22ХС, а теплопроводность — как у бериллиевой керамики ВБ-100-1 и в четыре-пять раз выше, чем у корундовых керамик. Поэтому уже сейчас, с достигнутыми на настоящее время диэлектрическими и конструктивными характеристиками, применение керамики из нитрида алюминия в СВЧ-приборах в качестве диэлектрических опор для спирали более предпочтительно, чем использование корундовых керамик.

В настоящее время фирмы передовых стран мира, разрабатывающие приборы и устройства электронной и СВЧ-техники, проводят комплекс мероприятий и работ по замене токсичных материалов из оксида бериллия на экологически чистые и нейтральные для окружающей среды. Так, например, фирмы Sienna Technologies, Inc. и L-3 Communication Electron Devices провели совместную работу по замене алюмооксидной и бериллиевой керамики в сверхмощных приборах (20–100 МВт) на керамику из нитрида алюминия. Фирма L-3 Communication Electron

Devices провела испытания окон вывода энергии из керамики AlN на своих мощных клистронах. Полученные результаты подтвердили, что керамику AlN можно использовать в качестве материала окон выводов энергии в мощных и сверхмощных приборах СВЧ [9].

В НИИ «Орион» и ИСМ НАНУ (г. Киев) были проведены совместные работы по замене изоляторов из алюмооксидной керамики 22ХС на керамику из нитрида алюминия в коллекторном узле широкополосной ЛБВ (УВ-009) с выходной непрерывной мощностью до 30 Вт в полосе частот 8–18 ГГц. Замена изолятора из керамики 22ХС на керамику из AlN (при тех же ее размерах) позволила уменьшить перепад температуры на 40°C в первой ступени коллектора и на 18°C во второй. Мощность электронного потока, рассеиваемая в первой ступени коллектора, составляла 160 Вт, во второй — 80 Вт. Снижение перепада температур в первой и второй ступенях коллектора привело к облегчению теплового режима всей ЛБВ, охлаждаемой потоком воздуха с температурой +85°C, и, как следствие, к повышению надежности и долговечности работы ЛБВ. В ИСМ НАНУ на изоляторы из керамики AlN, применяемые в ЛБВ (УВ-009), были составлены технические условия — ТУ 88 УССР 90.1256-91 «Изоляторы из материала ЭЛАНТИНИТ», в соответствии с которыми коэффициент теплопроводности материала изоляторов должен быть не менее 120 Вт/(м·К), плотность материала 3,26 г/см³, значения коэффициента термического расширения (2,8; 4,5; 4,9; 4,6)·10⁻⁶ К⁻¹ при температуре 293, 673, 1073, 1273 К соответственно.

В [2] сообщается, что существует технология нанесения на детали из керамики AlN покрытий на основе нитрида бора. При этом устраняется опасность увеличения коэффициента вторичной электронной эмиссии из-за возможного образования оксидной пленки на их поверхности. Применение в ЛБВ деталей из керамики AlN приведет к повышению надежности и долговечности работы всего прибора.

Выводы

По комплексу параметров, включающих конструкционные и функциональные характеристики в СВЧ-диапазоне (3–40 ГГц) в интервале температур 450–600°C, керамика из нитрида алюминия превосходит все типы корундовой керамики и не уступает керамике из оксида бериллия (ВБ-100-1), не говоря уже о токсичности последней. Керамика из AlN может применяться для внутривакуумных деталей приборов СВЧ: изоляторов токоприемников в коллекторных узлах приборов, диэлектрических опор, поддерживающих спиральные замедляющие системы, и для деталей вакуумплотных узлов — окон ввода и вывода СВЧ-энергии, а также для изоляторов электронной пушки.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Аветиков В. Г., Бершадская М. Д., Неделько Э. Е. и др. Нитрид алюминия — новый высокотеплопроводный диэлектрик // Электронная техника. Сер. Материалы. — 1984. — Вып. 6. — С. 54 — 57. [Avetikov V. G., Bershadskaya M. D., Nedel'ko E. E. i dr. // Elektronnaya tehnika. Ser. Materialy. 1984. Iss. 6. P. 54]
2. Бершадская М. Д., Ерошев В. К., Кузнецова И. Г., Неделько Э. Е. Преимущества нитридных диэлектриков при производстве ИЭТ // Электронная промышленность. — 1984. — Вып. 5. — С. 72 — 78. [Bershadskaya M. D., Eroshev V. K., Kuznetsova I. G., Nedel'ko E. E. // Elektronnaya promyshlennost'. 1984. Iss. 5. P. 72]
3. Косолапова Т. Я., Андреева Т. В., Бартницкая Т. С. и др. Неметаллические тугоплавкие соединения. — Москва: Металлургия, 1985. [Kosolapova T. Ya., Andreeva T. V., Bartnitskaya T. S. i dr. Nemetallicheskie tugoplavkie soedineniya. Moscow: Metallurgiya, 1985]
4. Голант М. Б., Маклаков А. А., Шур М. Б. Изготовление резонаторов и замедляющих систем электронных приборов. — Москва: Советское радио, 1969. [Golant M. B., Maklakov A. A., Shur M. B. Izgotovlenie rezonatorov i zamedlyayushchikh sistem elektronnyh priborov. Moscow: Sovetskoe radio, 1969]
5. Полубояринов Д. Н., Гордова М. Р., Кузнецова И. Г. и др. Основные свойства высокоплотной керамики из AlN // Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы. — 1979. — Т. 15, № 11. — С. 2055—2060. [Poluboyarinov D. N., Gordova M. R., Kuznetsova I. G. i dr. // Izv. AN SSSR. Ser. Neorganicheskie materialy. 1979. Vol. 15, N 11. P. 2055]
6. Кабышев А. В., Лопатин В. В. Влияние активирующих добавок на диэлектрические свойства алюмонитридной керамики // Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы. — 1990. — Т. 26, № 2. — С. 418—422. [Kabyshev A. V., Lopatin V. V. // Izv. AN SSSR. Ser. Neorganicheskie materialy. 1990. Vol. 26, N 2. P. 418]
7. Каминский А. А. Лазерные кристаллы. — Москва: Наука, 1975. [Kaminskiy A. A. Lazernye kristally. Moscow: Nauka, 1975]
8. Павлушкин Н. М. Спеченный корунд. — Москва: Госстройиздат, 1961. [Pavlushkin N. M. Spechennyi korund. Moscow: Gosstroyizdat, 1961]
9. Информационный сборник «Новости СВЧ-техники». — Московская обл., г. Фрязино: ФГУП «НПП Исток», 2004, № 12. [Informacionnyi sbornik «Novosti SVCh-tehniki». Moskoov reg., Fryazino: FGUP «NPP Istok», 2004, N 12]

*Дата поступления рукописи
в редакцию 08.11 2012 г.*

Chasnyk V. I. Use of high-thermal conductive aluminum nitride based ceramics in vacuum UHF electronic devices.

Keywords: ceramics, aluminum nitride, dielectric support, helix, TWT, output window, isolator, collector.

Analysis of properties and characteristics of the alumina, beryllium oxide and aluminum nitride based ceramic materials used in UHF electronic devices has been made. It was shown that the complex of parameters including structural and functional characteristics of the high-thermal conductive aluminum nitride ceramics prevail over all types of alumina ceramics and is not lower than the same characteristics of the beryllium oxide ceramics especially at the temperatures higher than 450 °C. The examples of the prevailing use of the aluminum nitride ceramics inside vacuum UHF-region devices: TWT's and klystrons.

Ukraine, Kiev, RSI «Orion».

Часник В. І. Застосування високотеплопровідної кераміки з нітриду алюмінію у вакуумних електронних приладах НВЧ.

Ключові слова: кераміка, нітрид алюмінію, діелектричні опори, спіраль, ЛБХ, вікно виводу енергії, ізолятор, колектор.

Проведено аналіз властивостей та характеристик керамічних матеріалів, які застосовуються в електронних приладах НВЧ: корундових керамік, кераміки з оксиду берилія та кераміки з нітриду алюмінію. Показано, що за комплексом параметрів, які складаються з конструкційних та функціональних характеристик, високотеплопровідна кераміка з нітриду алюмінію має вищі якості, ніж усі типи корундової кераміки, і не поступається кераміці з оксиду берилія, особливо при температурах вище 450°C. Наведено приклади переважного застосування кераміки з нітриду алюмінію в електронних приладах НВЧ-діапазону: ЛБХ та клістронах.

Україна, м. Київ, НДІ «Оріон».

УДК 621.315.592

Д. т. н. З. Ю. ГОТРА, д. т. н. Р. Л. ГОЛЯКА,
В. Ю. ИЛЬКАНИЧ, Т. А. МАРУСЕНКОВА, к. т. н. О. В. БОЙКО

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»
E-mail: holyaka@yahoo.com

ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИГНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА СЕНСОРАХ ХОЛЛА

Рассмотрена эффективность подавления электромагнитной помехи в гальваномагнитных устройствах измерения магнитного поля на сенсорах Холла. Представлен микропроцессорный сигнальный преобразователь с высокой помехоустойчивостью, которая обеспечивается двухтактным измерением сигнала при противоположных направлениях тока питания сенсоров Холла. Показано, что при наличии значительной электромагнитной помехи использование двухтактного режима обеспечивает повышение воспроизводимости результата измерения сигнала до 8 раз.

Ключевые слова: сенсор Холла, сигнальный преобразователь, помехоустойчивость.

Электромагнитные помехи силовых электросетей частотой 50 Гц (или 60 Гц — в зависимости от стандарта электросети) являются причиной ухудшения точности измерения во многих сенсорных устройствах. Проблема подавления электромагнитных помех является актуальной в задачах разработки устройств измерения биопотенциалов [1], емкостных сенсоров [2, 3], сенсоров измерения температуры [4], магнитного поля [5] и т. д.

В данной работе исследуется эффективность подавления электромагнитных помех силовых электросетей, а следовательно, повышение отношения сигнал/шум в устройствах измерения магнитного поля на основе сенсоров Холла. Актуальность такой задачи имеет место, в частности, в двух областях применения сенсоров Холла.

Первой областью являются сенсорные сети с автономными маломощными источниками питания [6]. С целью минимизации энергопотребления в таких устройствах используют импульсные режимы питания и измерения. Обычно измерения проводят в коротких интервалах времени (единицы — десятки миллисекунд), за которыми следуют длительные паузы с минимальным энергопотреблением. При этом используют Wake-up-режимы циклического перехода от состояния ожидания к импульсам измерения. Актуальность задачи подавления электромагнитной помехи в таких сенсорах определяется необходимостью обеспечения заданной точности измерения при минимально возможной длительности импульса питания.

Другой областью, в которой необходимо обеспечить подавление электромагнитных помех, является картографирование магнитных полей ускорителей заряженных частиц и магнитная

диагностика реакторов термоядерного синтеза [7, 8]. Проблемой здесь является довольно низкая чувствительность сенсоров Холла и значительная длина (несколько десятков метров) сигнальных линий между сенсорами и сигнальным преобразователем. Причиной низкой чувствительности сенсоров Холла является необходимость обеспечения высокой радиационной и температурной стабильности, что реализуется специальными технологиями легирования полупроводниковых материалов [9]. Как правило, такие радиационно стойкие сенсоры Холла характеризуются магнитной чувствительностью не более 200 мВ/Тл. Значительная длина сигнальных линий обусловлена невозможностью размещения сигнальных преобразователей (драйверов тока питания, усилителей, аналого-цифровых преобразователей) вблизи сенсоров, которые находятся в магнитных системах ускорителей и реакторов. Длина сигнальных линий, соединяющих сенсоры Холла с сигнальными преобразователями, может составлять несколько десятков метров. Это приводит к возникновению в сигнальных линиях электромагнитных помех, которые с целью повышения отношения сигнал/шум необходимо минимизировать с помощью соответствующих режимов работы сигнального преобразователя.

На **рис. 1** упрощенно показаны сенсор Холла (HG — Hall Generator) и соединительные сигнальные линии (TL — Transmission Line). При токе питания I_H под действием индукции магнитного поля B на потенциальных выводах сенсора Холла формируется полезный сигнал — холловское напряжение V_H . Изменение магнитного потока F через площадь паразитного контура (как сенсора S_H , так и сигнальной линии S_L) обуславливает наведение электромагнитной

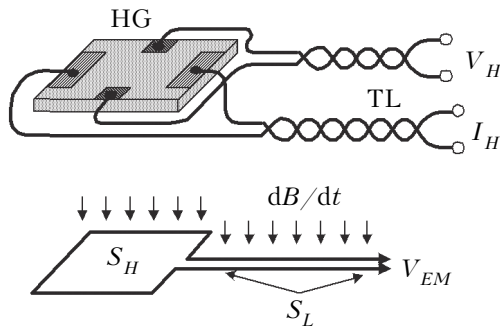


Рис. 1. Наведение электромагнитной помехи в контуре сенсора Холла

помехи — паразитного напряжения V_{EM} , которое в первом приближении определяется выражением [10]

$$V_{EM} = -\frac{d\Phi}{dt} = -(S_H + S_L) \frac{dB}{dt}.$$

С целью минимизации электромагнитной помехи выводы сенсоров Холла укладывают с минимальной площадью паразитного контура, а сигнальные линии формируют в виде витой пары. Более эффективный способ уменьшения помехи базируется на двухтактном измерении сигнала при противоположном токе питания сенсора. Изменение знака (направления) тока обуславливает соответствующее изменение знака (полярности) выходного холловского напряжения. В противоположность этому, напряжение электромагнитной помехи не зависит от тока питания. Таким образом, можно записать

$$V_{I+} = V_H + V_{EM}, \quad V_{I-} = -V_H + V_{EM},$$

где V_{I+} , V_{I-} — напряжение на выходе измерительной цепи при противоположных направлениях тока питания;

V_H , V_{EM} — холловская (полезная) и электромагнитная (паразитная) составляющие выходного напряжения.

Результатом двухтактного измерения является половина разностного значения:

$$V_{COR} = (V_{I+} - V_{I-})/2,$$

которое в первом приближении равно холловскому напряжению:

$$V_{COR} = (V_H + V_{EM} + V_H - V_{EM})/2 = V_H$$

и не зависит от электромагнитной помехи. Эффективность двухтактного измерения обеспечивается минимальной временной задержкой dt между импульсами с противоположным направлением тока.

На практике используют разновидность двухтактного измерения — одновременно с переключением направления тока сенсора Холла переключают коммутатор полярности выходного напряжения. Преимущественно такое преобразование реализуют схемой синхронного детектора, в котором полярность полезной составляющей сигнала остается неизменной, а полярность электромагнитной помехи попеременно переключается. Тогда, учитывая временную задержку dt между импульсами, сигнал двухтактного измерения определяется выражением

$$V_{COR} = \frac{-V_{I-}(t) + V_{I+}(t + \Delta t)}{2}.$$

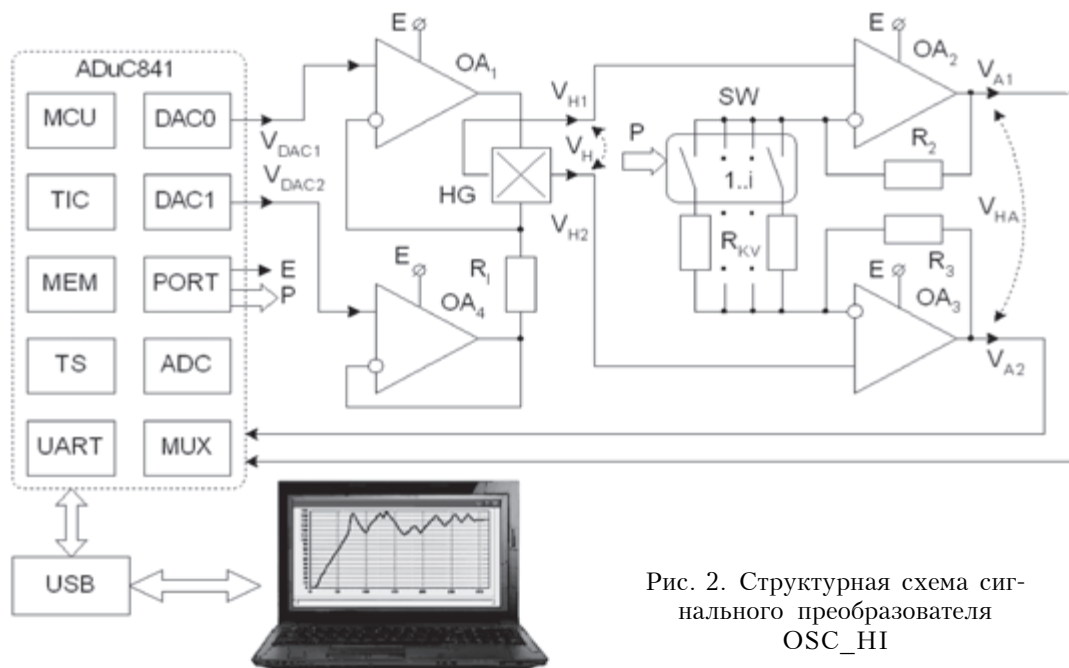


Рис. 2. Структурная схема сигнального преобразователя OSC_HI

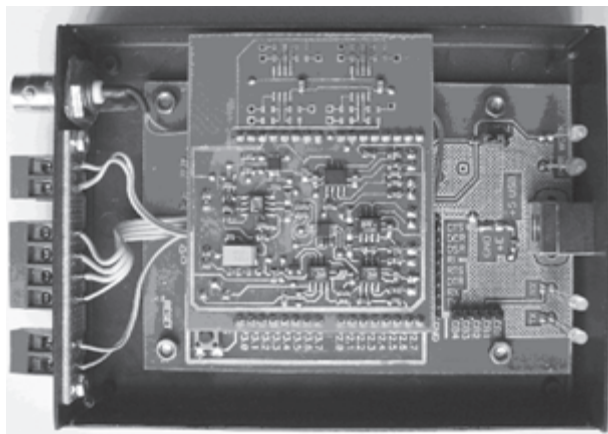


Рис. 3. Фотография сигнального преобразователя OSC_HI

С целью экспериментального исследования эффективности двухтактного измерения сигнала сенсоров Холла в условиях значительных электромагнитных помех был разработан и изготовлен опытный образец аппаратно-программного устройства OSC_HI. Структурная схема сигнального преобразователя OSC_HI приведена на **рис. 2**, а его фотография — на **рис. 3**.

Цифровой тракт устройства реализован на микроконвертере ADuC841 (Analog Devices), основными узлами которого являются: ADC — аналого-цифровой преобразователь; MUX — аналоговый мультиплексор входных напряжений ADC; MCU — ядро микроконвертера; TIC — цифровой порт, выходы которого формируют импульсы напряжения питания операционных усилителей, а также управляют мультиплексором цепи отрицательной обратной связи дифференциального усилителя сигнала; DAC0, DAC1 — два цифро-аналоговых преобразователя; TS — встроенный сенсор температуры, информация с которого используется для компенсации температурного дрейфа сенсора; UART — универсальный последовательный порт управления и передачи данных (в данном устройстве используется USB-контроллер FT232R).

Аналоговый тракт реализован на операционных усилителях OA_1 — OA_4 (AD8554) и аналоговых ключах SW (ADG704), с помощью которых обеспечивается программное управление коэффициентом усиления сигнала. Управление амплитудой и полярностью тока питания сенсора Холла I_H обеспечивается напряжениями V_{DAC1} , V_{DAC2} цифро-аналоговых преобразователей микроконвертера:

$$I_H = \frac{V_{DAC1} - V_{DAC2}}{R_I}.$$

Ток стабилизируется цепью обратной связи операционного усилителя OA_1 . Операционный усилитель OA_2 используется в режиме повтори-

теля напряжений, что необходимо с точки зрения минимизации влияния токовой цепи сенсора HG на выход цифро-аналогового преобразователя. Усиление выходного напряжения сенсора Холла производится дифференциальным усилителем на OA_3 , OA_4 , SW и матрице резисторов R_2 , R_3 , R_{KV} . Результат двухтактного измерения определяется выражением

$$V_S = (V_{A1} - V_{A2})_{T1} - (V_{A1} - V_{A2})_{T2},$$

где $(V_{A1} - V_{A2})_{T1}$ и $(V_{A1} - V_{A2})_{T2}$ — разность напряжений на выходах дифференциального усилителя в первом (T_1) и во втором (T_2) тактах соответственно.

Значение напряжения V_{DAC1} в обоих тактах определяется оптимальным значением синфазной составляющей сигнала, методика определения которого приведена в [11]. Значение напряжения V_{DAC2} в первом такте выбирается минимально возможным, а во втором такте — максимально возможным с точки зрения гарантированного диапазона выходных напряжений цифро-аналоговых преобразователей и нормального функционирования операционного усилителя OA_4 . В первом приближении $V_{DAC2} = 0$ в первом такте измерения сигнала и $V_{DAC2} = V(E)$ — во втором.

Вид окон программного обеспечения OSC_HI приведен на **рис. 4**.

Экспериментальные исследования проводились с использованием радиационно стойкого тонкопленочного InSb-сенсора Холла, магнитная чувствительность которого при номинальном токе питания $I_H = 10$ мА составляла $S = 194$ мВ/Тл. Магнитное поле формировалось постоянным магнитом с индукцией поля $B = 0,132$ Тл, а электромагнитная помеха частотой 50 Гц — размещенным рядом с магнитом силовым трансформатором.

Пример типичных результатов измерения воспроизводимости сигнального аналого-цифрово-

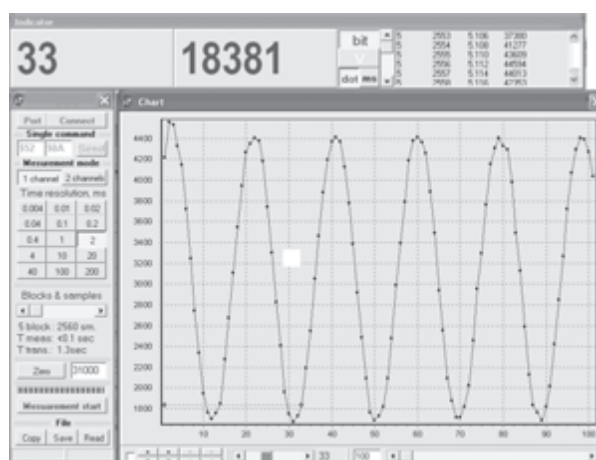


Рис. 4. Вид окон программного обеспечения OSC_HI

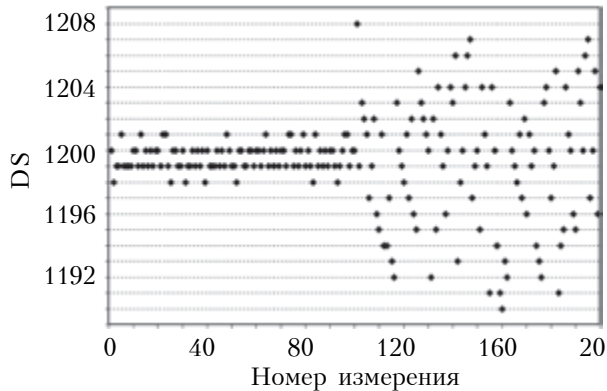


Рис. 5. Пример типичных результатов сигнального преобразования без ЭМ-помехи (измерения от 1 до 100) и с ЭМ-помехой (от 101 до 200)

го преобразования в режиме одноактного измерения без электромагнитной (ЭМ) помехи (измерения от 1 до 100) и с ЭМ-помехой (измерения от 101 до 200) приведен на рис. 5. Параметр DS обозначает результат аналого-цифрового преобразования в десятичной системе исчисления DEC. Как видно, разброс результатов измерения при отсутствии помехи не превышает плюс-минус две единицы, а при наличии помехи увеличивается в 3–5 раз.

Целью экспериментальных исследований был анализ эффективности двухтактного измерения

при разных отношениях сигнал/шум, что обеспечивалось изменением тока питания сенсора Холла от номинального $I_H = 10$ мА до минимально возможного с точки зрения дальнейшего сигнального преобразования — $I_H = 0,1$ мА. Уменьшение полезной составляющей сигнала (напряжения Холла при фиксированной индукции магнитного поля) при уменьшении тока питания сенсора Холла компенсировалось соответствующим увеличением коэффициента усиления K_V сигнального преобразователя. Коэффициент усиления дискретно изменялся путем переключения резисторов цепи обратной связи R_{KV} дифференциального усилителя, что осуществлялось соответствующими логическими сигналами P управления коммутатора-мультиплексора SW.

В проводимых исследованиях коэффициент усиления сигнала K_V дискретно изменялся в зависимости от тока питания сенсора Холла: $K_V \approx 35$ для $I_H = 10$ мА; $K_V \approx 350$ для $I_H = 1$ мА; $K_V \approx 3500$ для $I_H = 0,1$ мА. Таким образом, во всех режимах измерения при фиксированном магнитном поле $B = 0,132$ Тл и разных значениях тока питания 10, 1 и 0,1 мА (чувствительность — 194, 19,4 и 1,94 мВ/Тл соответственно) разность выходных напряжений дифференциального усилителя составляла $V_{AH} \approx 0,88$ В. В режиме двухтактного измерения задержка между тактами с противополож-

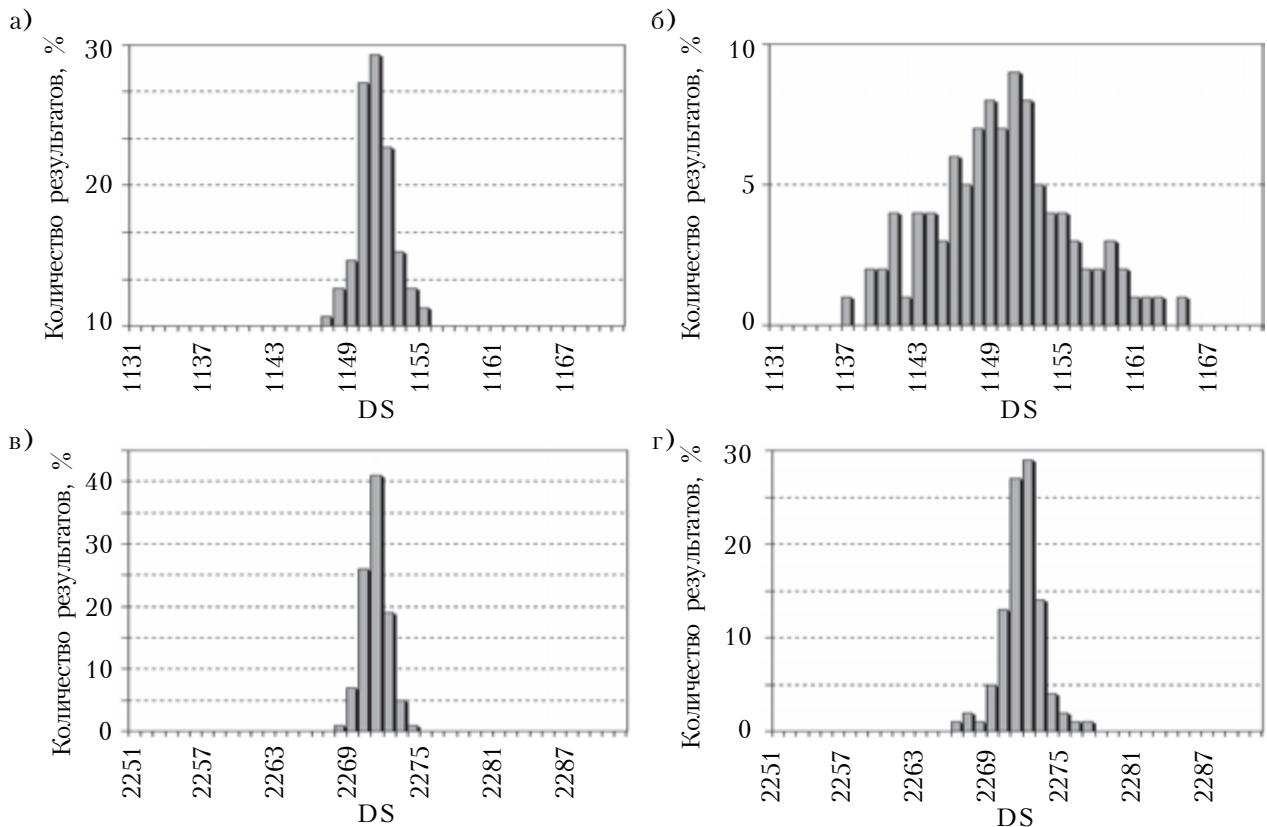


Рис. 6. Гистограммы распределения результатов аналого-цифрового преобразования сигналов от сенсора Холла при $I_H = 1$ мА без помехи (а, в) и с ЭМ-помехой (б, г) в режиме Direct (а, б) и в режиме Bidirect (в, г)

ными направлениями тока сенсора Холла составляла $\Delta t = 0,5$ мс.

Примеры гистограмм экспериментальных исследований распределения аналого-цифрового преобразования с одноктактным (режим Direct) и с двухтактным (режим Bidirect) измерением приведены на **рис. 6**. Измерения проводились без помехи и с ЭМ-помехой частотой 50 Гц.

Количественную оценку результатов выполнен с использованием правила “трех сигм”, согласно которому при нормальном законе распределения практически все измерения, а точнее 99,7%, лежат в интервале $[m_x - 3\sigma; m_x + 3\sigma]$. Тогда относительную ошибку δ сигнального преобразования можно записать в виде

$$\delta = \left(\frac{m_x \pm 3\sigma}{m_x} - 1 \right) \cdot 100\% = \pm \frac{3\sigma}{m_x} 100\%,$$

где σ — стандартное отклонение,

$$\sigma = \sqrt{D_x} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2};$$

m_x — математическое ожидание, $m_x = \sum_{i=1}^k x_i p_i$;

D_x — дисперсия;

n — количество результатов в массиве;

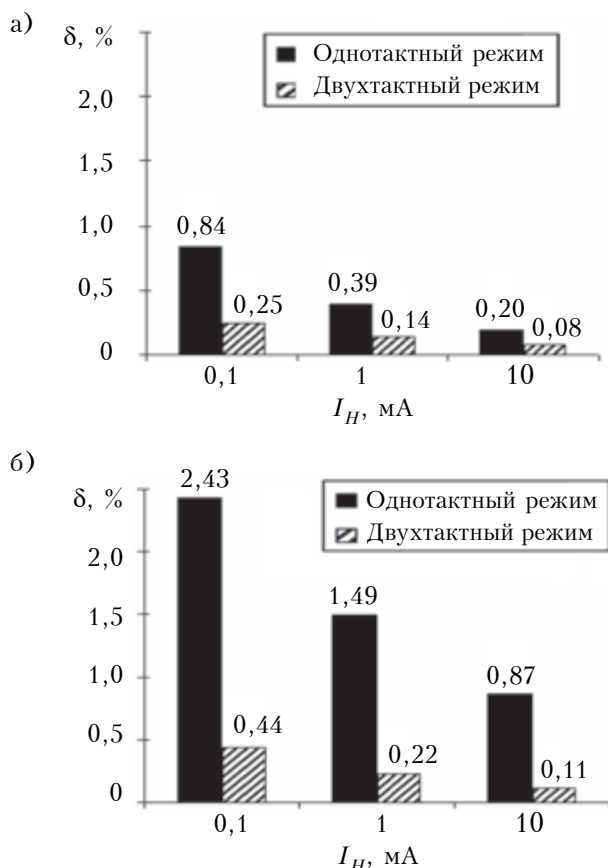


Рис. 7. Относительная ошибка сигнального преобразования без помехи (а) и с ЭМ-помехой (б) при разных режимах измерения

x_i — i -й результат измерения;

p_i — вероятность получения результата измерения;

k — количество различных результатов измерений в серии, каждый из которых встречается с вероятностью p_i .

Поскольку анализ проводился на основе массива данных в серии из 100 измерений, вероятность p_i значения x_i определялась соотношением $p_i = N(x_i)/100$, где $N(x_i)$ — количество полученных значений x_i . Результаты анализа приведены на **рис. 7**.

* * *

Полученные результаты экспериментальных исследований показывают, что минимальное значение относительной ошибки измерения сигнала в гальваномангнитных устройствах измерения магнитного поля при отсутствии электромагнитной помехи имеет место при токе сенсора Холла $I_H = 10$ мА и находится на уровне $\delta \approx 0,2\%$ в режиме одноктактного измерения и $\delta \approx 0,08\%$ в режиме двухтактного измерения. В целом, эти значения соответствуют минимально возможному разбросу сигнала DS на уровне одного-двух квантов аналого-цифрового преобразования. При уменьшении тока питания сенсора Холла относительная ошибка возрастает, что обусловлено увеличением коэффициента усиления сигнала, а следовательно — увеличением уровня шумов на выходе усилителя. Электромагнитные помехи, отрицательно влияющие на качество измерения, можно существенно уменьшать, используя метод двухтактного измерения сигнала при противоположных направлениях тока сенсоров Холла. Реализация метода обеспечивается разработанным микропроцессорным сигнальным преобразователем на основе микроконвертора ADuC841 и программно-управляемого аналогового тракта. Режим двухтактного измерения при наличии электромагнитной помехи обеспечивает повышение точности до 8 раз.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Spinelli E. M., Mayosky M. A. Two-electrode biopotential measurements: power line interference analysis // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. — 2005. — Vol. 52, N. 8. — P. 1436–1442.
2. Akinori Ueno, Yasunao Akabane, Tsuyoshi Kato et al. Capacitive sensing of electrocardiographic potential through cloth from the dorsal surface of the body in a supine position: a preliminary study // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. — 2007. — Vol. 54, N. 4. — P. 759–766.
3. Hotra Z., Holyaka R., Marusenкова T., Potenci J. Signal transducers of capacitive microelectronic sensors // Elektronika. Poland. — 2010. — N 8. — P. 129–132.
4. Готра З. Ю., Голяка Р. Л., Павлов С. В. и др. Дифференциальный термометр с высокой разрешающей способностью // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 6. — С. 19–23. [Hotra Z., Holyaka R.,

Pavlov S. et al. Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature. 2009. N. 6. P. 19]

5. Lenz J., Edelstein A. S. Magnetic sensors and their applications // IEEE Sensors journal. — 2006. — Vol. 6, N. 3. — P. 631 — 649.

6. Fuemmeler J. A., Veeravalli V. V. Energy efficient multi-object tracking in sensor networks // IEEE Transactions on Signal Processing. — 2010. — Vol. 58, N. 7. — P. 3742 — 3750.

7. Bolshakova I., Holyaka R., Erashok V., Kumada M. High precision mapper for cyclotron magnet // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2004. — Vol. 14, N. 2. — P. 1818 — 1821.

8. Antokhin E., Bolshakova I., Holyaka R. et al. Permanent magnet system for PET cyclotron // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2008. — Vol. 18, N. 2. — P. 965 — 968.

9. Bolshakova I., Krukovskii S., Holyaka R. et al. Ways of providing radiation resistance of magnetic field semiconductor sensors // Radiation Physics and Chemistry. — 2001. — Vol. 61. — P. 743 — 745.

10. Bill Drafts. Understanding Hall Effect Devices // <http://archives.sensorsmag.com/>.

11. Готра З. Ю., Голяка Р. Л., Годинюк І. М. та ін. Універсальний сигнальний перетворювач холлівських сенсорних пристроїв // Автоматика, вимірювання та керування. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». — 2012. — № 741. — С. 3 — 11. [Hotra Z., Holyaka R., Hodynyuk I. et al. // Avtomatyka, Vymiruvannya ta keruvannya. Visnyk Natsional'nogo universytetu "L'viv's'ka politekhnika". 2012. N. 741. P. 3]

*Дата поступления рукописи
в редакцию 11.03 2013 г.*

Hotra Z. Yu., Holyaka R. L., Ilkanych V. Yu., Marusenkova T. A., Boyko O. V. **Electromagnetic noise-immunity improving of signal transducers based on Hall sensors.**

Key words: Hall sensor, signal transducer, noise-immunity.

The authors consider electromagnetic noise cancellation in galvanomagnetic magnetic field measurement devices based on Hall sensors. The paper presents the advanced microprocessor signal transducer featuring high noise-immunity, provided by two-stage signal measurement at reversed directions of Hall sensor supply current. It is shown that the use of two-stage mode at high electromagnetic interference provides the improvement of signal measurement results reproducibility up to 8 times.

Ukraine, Lviv Polytechnic National University.

Готра З. Ю., Голяка Р. Л., Ільканич В. Ю., Марусенкова Т. А., Бойко О. В. **Підвищення електромагнітної завадостійкості сигнальних перетворювачів на сенсорах Холла.**

Ключові слова: сенсор Холла, сигнальний перетворювач, завадостійкість.

Розглянуто ефективність заглушення електромагнітної завади в гальваномагнітних пристроях вимірювання магнітного поля на сенсорах Холла. Представлено мікропроцесорний сигнальний перетворювач з високою завадостійкістю, яка забезпечується двотактним вимірюванням сигналу при протилежних напрямках струму живлення сенсорів Холла. Показано, що при наявності значної електромагнітної завади використання двотактного режиму забезпечує підвищення відтворюваності результатів вимірювання сигналу до восьми разів.

Україна, НУ «Львівська політехніка».

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
30 октября-01 ноября 2013
Петербургский СКК
XIII международная специализированная промышленная выставка

Организатор выставки: выставочное объединение ФАРЭКСПО

Международная выставка RADEL — специализированная выставка электронных компонентов и комплектующих, материалов, технологий, оборудования, услуг, сертификации, сервиса в радиоэлектронике и приборостроении, проходящая в Петербурге с 2001 года.

Из года в год на выставке RADEL демонстрируются современные достижения отечественных и зарубежных производителей электронных компонентов, печатных плат, приборов, источников питания, поставщиков радиоизмерительного оборудования как широкого использования, так и эксклюзивных товаров.

Выставка RADEL традиционно проходит в международном формате, в ней регулярно принимают участие компании из стран ближнего и дальнего зарубежья, таких как США, Тайвань, Китай, Беларусь, Голландия, Украина.

УДК 004.31:004.22:534:621.382

К. т. н. А. Ю. ЛИПИНСКИЙ

Украина, Донецкий национальный университет

E-mail: o.lipinskii@donnu.edu.ua

УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ МОДУЛЕМ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ С ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЕМОЙ АРХИТЕКТУРОЙ

Представлено разработанное устройство управления лазерными модулями оптоэлектронной акустооптической вычислительной среды на основе микроконтроллера семейства Cortex M3, которое позволяет чередовать режимы записи (стирания) и чтения в соответствии с предварительно заданными алгоритмом и параметрами — временем экспонирования и интенсивностью излучения. Приведены электрическая принципиальная схема устройства, блок-схема алгоритма работы микроконтроллера, пример применения разработанного блока управления в составе макета экспериментальной установки.

Ключевые слова: лазерный модуль, оптоэлектронная акустооптическая вычислительная среда, микроконтроллер.

Применение оптических информационных технологий при разработке современных вычислительных средств является в настоящее время одним из основных технических направлений, позволяющих реализовать устройства с большой вычислительной мощностью и объемом памяти. Важными компонентами современных оптических компьютерных систем являются источники когерентного излучения [1]. Требованиям микроминиатюризации и интегральности вполне соответствуют матрицы поверхностно-излучающих лазеров с вертикальным резонатором (VCSEL), используемые в коммерчески доступных устройствах [2]. В оптоэлектронной акустооптической вычислительной среде (ОАВС) [3], которая является оптическим аналогом программируемых логических интегральных схем (FPGA), запоминающее устройство реализовано на основе фоторефрактивной оптоэлектронной запоминающей среды (ФОЗС). Нелинейность ее физических характеристик определяет достаточно сложный, с точки зрения управления, алгоритм функционирования лазерного модуля, что делает актуальным решение задачи по созданию устройств управления лазерными модулями, входящими в состав ОАВС.

Оптоэлектронная акустооптическая вычислительная среда

Высокая производительность современных оптических вычислительных систем, в основе которых лежит параллелизм выполнения математических операций, определяет потоковую обработку данных как приоритетное направление развития их архитектуры [4, 5].

Сходство процессов обработки потока данных оптоэлектронной акустооптической вычислительной средой [3] и электронными схемами

FPGA [6—8] делает возможным построение ОАВС с динамически изменяемой архитектурой при наличии запоминающего устройства в ее составе. Основными компонентами такой ОАВС (рис. 1) являются источник когерентного излучения (матрица VCSEL [10]), акустооптическое вычислительное устройство (АОВУ), выполняющее операции умножения и накопления,

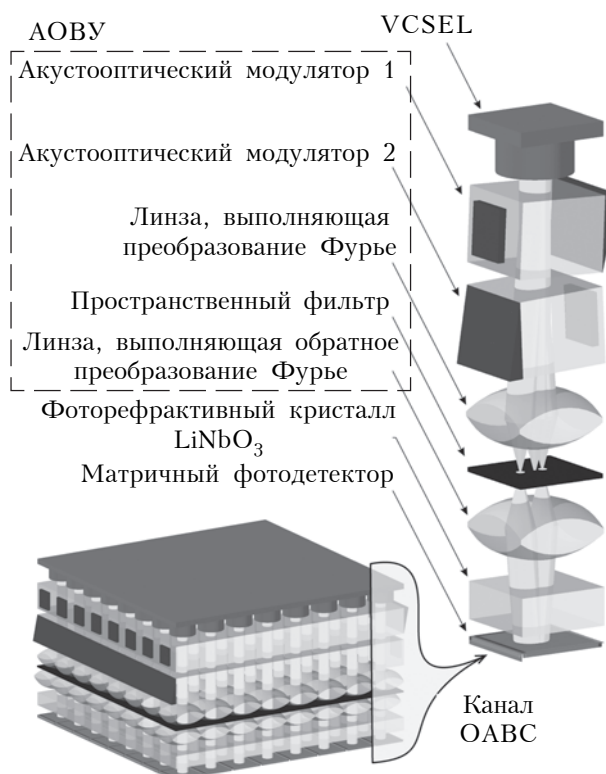


Рис. 1. Структурная схема ОАВС [9]

и устройство памяти — ФОЗС (фоторефрактивный кристалл LiNbO_3). В состав АОВУ входит два акустооптических модулятора, линзы, выполняющие прямое и обратное преобразования Фурье, и пространственный фильтр. В основе работы фоторефрактивной оптоэлектронной запоминающей среды лежит эффект локального изменения показателя преломления электрооптических кристаллов под воздействием светового потока [11]. В качестве устройства регистрации предлагается использовать ПЗС-матрицу [5].

Устройство памяти ОАВС

Запоминающее устройство служит для хранения операндов, коэффициентов и т. п., необходимых для выполнения различных задач. Проводя аналогию с FPGA, перезапись информации в ФОЗС [12] можно рассматривать как динамическое изменение архитектуры ОАВС.

В качестве основы для создания ФОЗС предлагается использовать ниобат лития, один из наиболее изученных и перспективных материалов вычислительной оптики.

В большинстве работ, посвященных исследованию фоторефрактивного эффекта в LiNbO_3 , рассматриваются кристаллы, легированные катионами Fe, Cu и др. [13]. Вместе с тем, в [14, 15] получены результаты, из которых следует, что кристаллы ниобата лития стехиометрического состава характеризуются существенно большим проявлением фоторефрактивного эффекта под воздействием светового потока с длиной волны 0,53 мкм, чем кристаллы конгруэнтного состава.

В [16] было проведено исследование фоторефрактивных свойств номинально чистого монокристалла ниобата лития стехиометрического состава в зависимости от времени экспозиции, мощности лазерного излучения и температуры образца.

Исследование динамики фоторефрактивного рассеяния света (ФРРС) при изменении угла раскрытия индикатрисы ФРРС, показало, что при мощности оптического излучения от 65 до 160 мВт наибольшее проявление фоторефрактивного эффекта наблюдается в те-

чение первой минуты облучения с последующим монотонным уменьшением, которое связано с разогревом кристалла световым потоком. Мощности излучения 35 мВт соответствует непрерывное увеличение индикатрисы рассеяния. Фоторефрактивное изменение показателя преломления в кристалле LiNbO_3 сохраняется в полной темноте в течение длительного времени — порядка года [16]. Стирание записанной информации можно осуществлять засветкой оптическим излучением той же длины волны, УФ-источником [17] или нагревом кристалла до температуры 170–200°C.

Таким образом, в номинально чистом ниобате лития стехиометрического состава фоторефрактивный эффект выражен в степени, достаточной для создания на его основе оптических устройств записи и хранения информации.

Устройство управления лазерными модулями ОАВС

Источники оптического излучения в ОАВС должны обеспечивать световой поток в соответствии с выбранным режимом работы (запись/чтение). Возможной альтернативой применению матрицы VCSEL (рис. 1) могут быть твердотельные лазеры с диодной накачкой при соот-

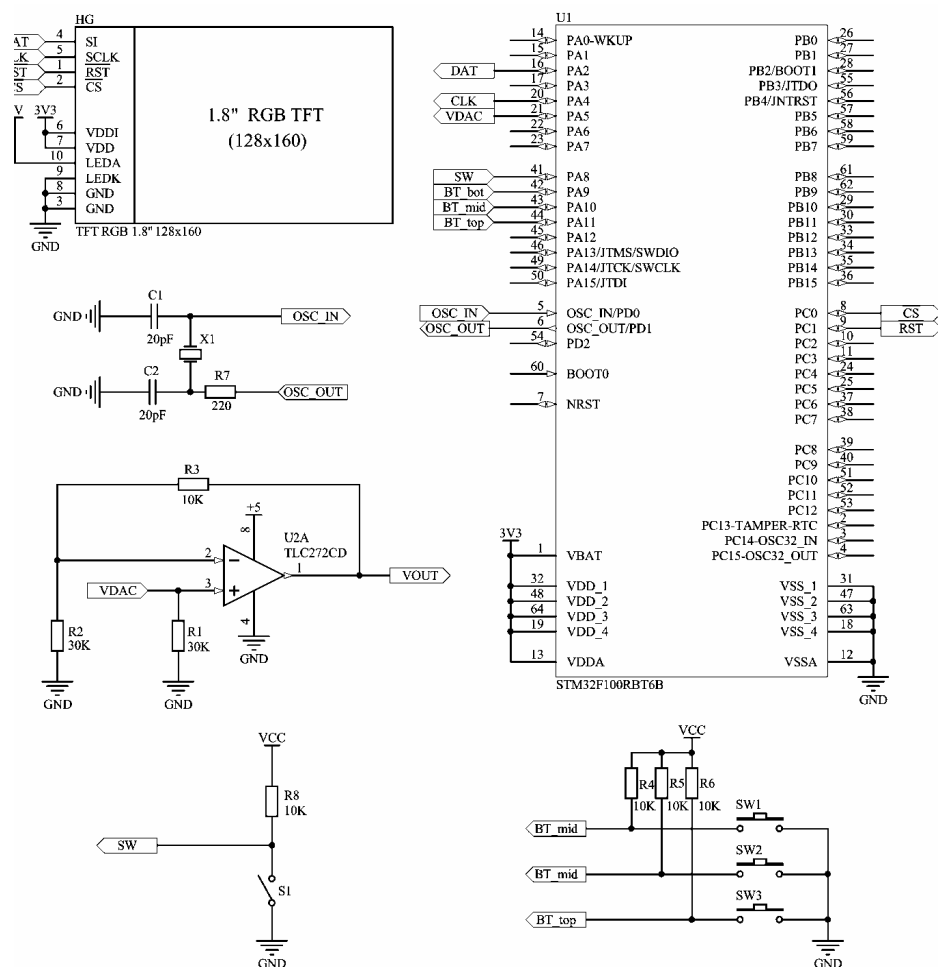


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема устройства управления лазерным модулем

ветствующем изменении оптической схемы устройства.

В режиме записи информации в ФОЗС необходимо генерировать оптическое излучение сравнительно большой интенсивности в заданном временном интервале с возможностью управления характеристиками включения-выключения, не допуская перегрева кристалла. Режим чтения предполагает формирование светового потока малой интенсивности с возможностью импульсной модуляции. Это существенно усложняет задачу управления лазером, входящим в состав модуля, поскольку чередование режимов записи и чтения обеспечивается работой лазера во всем диапазоне нелинейной характеристики «выходная мощность — мощность накачки».

Перечисленные особенности работы лазерного модуля были учтены при разработке микропроцессорного управляющего устройства, принципиальная электрическая схема которого приведена на **рис. 2**.

Блок управления построен на 32-разрядном микроконтроллере STM32F100RB с ядром Cortex M3, который содержит встроенный 12-разрядный модуль цифро-аналогового преобразования, последовательные интерфейсы USART, SPI, TWI, многоканальный контроллер прямого доступа к памяти, программируемые параллельные порты ввода-вывода [18].

В качестве устройства индикации выбран цветной жидкокристаллический дисплей TFT RGB с диагональю 1,8 дюйма, разрешением 128×160 точек, с контроллером SPFD54124B, который подключается к микроконтроллеру STM32F100RB в режиме 9-битного интерфейса SPI. Кроме линий DAT и CLK, по которым передаются данные и тактовый сигнал соответственно, для обеспечения корректной инициализации дисплея требуется подключение линий выбора кристалла CS и сброса RST.

Информация о режиме работы с ключа S1 и кнопок SW1 — SW3 поступает на выходы PA8 — PA11 порта A микроконтроллера.

Управляющее напряжение для лазерного модуля V_{OUT} формируется на выводе PA5 с использованием встроенного цифро-аналогового преобразователя микроконтроллера. Амплитуда напряжения определяет мощность излучения лазерного диода, а длительность удержания напряжения — экспозицию. Блок-схема алгоритма работы микроконтроллера приведена на **рис. 3**.

Разработанное устройство управления лазерным модулем (рис. 2) использовалось в составе макета экспериментальной установки (**рис. 4**) для записи и последующего считывания информации с фоторефрактивных транспарантов. Световой поток от лазера DHL-G200 (DHOM, Suzhou Daheng Optics and Fine Mechanics) освещает амплитудный транспарант, размещенный на поверхности образца (кристалла LiNbO_3). Режиму записи соответствует интенсивность око-



Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы микроконтроллера STM32F100RB

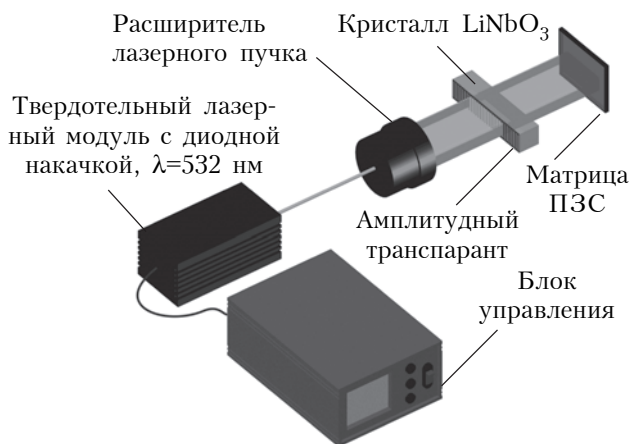


Рис. 4. Макет экспериментальной установки

ло 3 Вт/см² (время экспонирования — до 10 минут), режиму считывания — 75 мВт/см².

Возможность чередования режимов записи (стирания) и чтения в соответствии с предварительно заданной последовательностью позволяет применять устройство управления при исследовании процессов записи/считывания в оптоэлектронной вычислительной среде с динамически изменяемой архитектурой. Разработанное устройство обеспечивает широкий диапазон изменения характеристики интенсивности излучения выходного светового потока, времени экспонирования и программное управление режимами работы, что позволяет решать задачи регистра-

ции и обработки информации нелинейными оптическими устройствами.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Белов П. А., Беспалов В. Г., Васильев В. Н. и др. Оптические процессоры: достижения и новые идеи // В сб.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики / Под ред. И. П. Гурова и С. А. Козлова. — СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. [Belov P. A., Bepalov V. G., Vasil'ev V. N. i dr. // V sb.: Problemy kogerentnoi i nelineinoi optiki / Pod red. I. P. Gurova i S. A. Kozlova. SPb: SPbGU ITMO, 2006]
2. Tamir D. E., Shaked N. T., Wilson P. J., Dolev S. High-speed and low-power electro-optical DSP coprocessor // Journal of the Optical Society of America A. — 2009. — Vol. 26, N 8. — P. A11–A20.
3. Липинский А. Ю. Оптоэлектронные интегральные вычислительные среды. — Донецк: Ноулидж, 2010. [Lipinskii A. Yu. Optoelektronnye integral'nye vychislitel'nye sredy. Donetsk: Noulidzh, 2010]
4. Васильев В. Н., Павлов А. В. Оптические технологии искусственного интеллекта. Т.1. — СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. [Vasil'ev V. N., Pavlov A. V. Opticheskie tekhnologii iskusstvennogo intellekta. Vol.1. — SPb: SPbGU ITMO, 2008]
5. Lipinskii A. Y., Rudiakova A. N. Acousto-optic computing environment for stream data processing // Applied Optics. — 2011. — Vol. 50. — P. 4917–4921.
6. Choi Y., You K., Choi J., Sung W. A real-time FPGA-based 20000-word speech recognizer with optimized DRAM access // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. — 2010. — Vol. 57, N 8. — P. 2119–2131.
7. Sudarsanam A., Barnes R., Carver J. et al. Dynamically reconfigurable systolic array accelerators: a case study with extended Kalman filter and discrete wavelet transform algorithms // IET Computers & Digital Techniques. — 2010. — Vol. 4, N 2. — P. 126–142.
8. Chun H. H., Yiu C. K. F. Hybrid reconfigurable architecture for low power digital signal processing system // Proc. of 2010 International Conference on Green Circuits and Systems. — 2010. — P. 370–374.
9. Липинский А. Ю., Рудякова А. Н. Оптоэлектронные вычислительные среды с динамически изменяемой архитектурой // Тр. XIII Междунар. науч.-практич. конф. «Современные информационные и электронные технологии». — Одесса. — 2012. — С. 316. [Lipinskii A. Yu., Rudyakova A. N. // Proceed. of the 13th Int. conf. "Modern information and electronic technologies". Odessa. 2012. P. 316]
10. Kasahara D., Morita D., Kosugi T. et al. Demonstration of blue and green GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers by current injection at room temperature // Applied Physics Express. — 2011. — N 4. — P. 072103-1–072103-3.
11. Липинский А. Ю., Рудякова А. Н., Данилов В. В. Моделирование процессов записи-чтения фоторефрактивных транспарантов методом распространяющегося пучка // Регистрация, хранение и обработка данных. — 2011. — Т. 13, № 2. — С. 16–26. [Lipinskii A. Yu., Rudyakova A. N., Danilov V. V. // Registratsiya, khranenie i obrabotka dannykh. 2011. Vol. 13, N 2. P. 16]
12. Липинский А. Ю. Синтез дифракционных решеток в кристалле LiNbO₃ // Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. «Радиотехника». — 2012. — № 169. — С. 343–348. [Lipinskii A. Yu. // Vseukr. mezhved. nauch.-tekhn. sb. «Radiotekhnika». 2012. N 169. P. 343]
13. Максименко В. А., Сюй А. В., Карпец Ю. М. Фотоиндуцированные процессы в кристаллах ниобата лития. — Москва: Физматлит, 2008. [Maksimenko V. A., Syui A. V., Karpets Yu. M. Fotoindutsirovannye protsessy v kristallakh niobata litiya. Moskva: Fizmatlit, 2008]
14. Сидоров Н. В., Волк Т. Р., Маврин Б. Н., Калинин В. Т. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны. — Москва: Наука, 2003. [Sidorov N. V., Volk T. R., Mavrin B. N., Kalinnikov V. T. Niobat litiya: defekty, fotorefraktsiya, kolebatel'nyi spektr, polyaritony. Moskva: Nauka. 2003]
15. Volk T., Wohlecke M. Lithium niobate. Defects, photorefraction and ferroelectric switching. — Berlin: Springer, 2008.
16. Антонычева Е. А., Сидоров Н. В., Сюй А. В. и др. Кинетика фоторефрактивного рассеяния света в кристаллах ниобата лития стехиометрического состава // Перспективные материалы. — 2010. — № 5. — С. 36–40. [Antonycheva E. A., Sidorov N. V., Syui A. V. i dr. // Perspektivnye materialy. 2010. N 5. P. 36]
17. Ушаков Н. М., Колосов В. В. Брэгговское отражение оптических и акустических волн от оптически наведенных периодических структур в ниобате лития с примесью железа // Письма в ЖТФ. — 2001. — Т. 27, вып. 24. — С. 40–45. [Ushakov N. M., Kolosov V. V. // Pis'ma v ZhTF. 2001. Vol 27, iss. 24. P. 40]
18. STM32F100RB Mainstream Value line, ARM Cortex-M3 MCU with 128 Kbytes Flash, 24 MHz CPU, motor control and CEC functions: <http://www.st.com/internet/mcu/product/216844.jsp>

*Дата поступления рукописи
в редакцию 07.02 2013 г.*

Lipinskii A. Y. A control unit for a laser module of optoelectronic computing environment with dynamic architecture.

Key words: laser module, optoelectronic acousto-optic computing environment, microcontroller.

The paper presents the developed control unit of laser modules of optoelectronic acousto-optic computing environment. The unit is based on ARM microcontroller of Cortex M3 family, and allows alternating between recording (erase) and reading modes in accordance with a predetermined algorithm and settings — exposure time and intensity. The principal electric circuit of the presented device, the block diagram of microcontroller algorithm, and the example application of the developed control unit in the layout of the experimental setup are provided.

Ukraine, Donetsk national university.

Ліпінський О. Ю. Пристрій керування лазерним модулем оптоелектронного обчислювального середовища з динамічно змінюваною архітектурою.

Ключові слова: лазерний модуль, оптоелектронне акустооптичне обчислювальне середовище, мікроконтролер

Представлено розроблений пристрій керування лазерними модулями оптоелектронного акустооптичного обчислювального середовища на основі мікроконтролера сімейства Cortex M3, який дозволяє чергувати режими записів (стирання) та читання, відповідно до попередньо заданих алгоритму і параметрів (часу експонування та інтенсивності випромінювання). Наведено електричну принципову схему пристрою, блок-схему алгоритму роботи мікроконтролера, приклад застосування розробленого блоку управління у складі макета експериментальної установки.

Україна, Донецький національний університет.

УДК 621.315.592

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, к. т. н. А. П. КУТРАКОВ, к. т. н. Н. С. ЛЯХ-КАГУЙ, А. М. ВУЙЦИК

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ДВУХФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ-ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

Представлена конструкция датчика давления-температуры на основе нитевидных кристаллов кремния p -типа, легированных бором, с удельным сопротивлением $0,005 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, который работоспособен в интервале температур от -100 до $+200^\circ\text{C}$ и в диапазоне давлений от 0 до 20 МПа . Датчик предназначен для широкой области применений.

Ключевые слова: нитевидные кристаллы, кремний, датчик, температура, давление.

К современным датчикам физических величин предъявляется целый ряд требований: многофункциональность, миниатюрность, высокая точность преобразования, стабильность и др., которые могут быть достигнуты с помощью новых структурных и схемотехнических решений [1–3]. Анализ литературных источников показал, что в настоящее время интенсивно разрабатываются совмещенные датчики давления и температуры [4–6]. Потребность в таких датчиках значительна, т. к. 60 – 70% от общего объема измерений приходится на измерение давления и температуры. Известные многофункциональные датчики, которые позволяют одновременно получать информацию о нескольких измеряемых параметрах, таких как температура, деформация, давление, магнитное поле и др., создаются по сложным микроэлектронным технологиям, требующим специальных материалов и оборудования [7]. Поэтому существует потребность в создании более простой технологии изготовления многофункциональных датчиков, отвечающих всем современным требованиям к первичным преобразователям.

В основу разработанного двухфункционального датчика давления-температуры была положена зависимость сопротивления полупроводниковых кристаллов, в частности кристаллов кремния, не только от деформации, но и от температуры. С этой целью проводились исследования электрофизических и механических свойств нитевидных кристаллов (НК) кремния p -типа, легированных бором, с различным удельным сопротивлением ρ в широком интервале температур и деформаций [8, 9]. Анализ результатов исследований показал, что тензорезисторы на основе НК кремния с $\rho=0,005 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ обладают оптимальными для создания на их основе двухфункциональных датчиков давления-температуры характеристиками: линейной зависимостью сопро-

тивления от температуры и минимальной зависимостью коэффициента тензочувствительности от температуры. На основании этого нами была предложена мембранная конструкция двухфункционального датчика давления-температуры. Основой конструкции является мембрана с двумя закрепленными на ней тензорезисторами на основе НК кремния p -типа с удельным сопротивлением $0,005 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, включенными в измерительную схему. В режиме реального времени схема обеспечивает раздельное непрерывное преобразование избыточного давления и измеренной температуры в унифицированные токовые электрические выходные сигналы (4 – 20 мА постоянного тока).

Конструкция разработанного датчика показана на **рис. 1**. Измеряемое давление воспринимается мембраной 1, на которой закреплены тензорезисторы 2 и 3. Под действием давления мембрана деформируется, и эта деформация передается тензорезисторам. Место закрепления тензорезисторов выбрано таким образом, что один из них испытывает деформацию растяжения, а другой — сжатия. Под воздействием давления

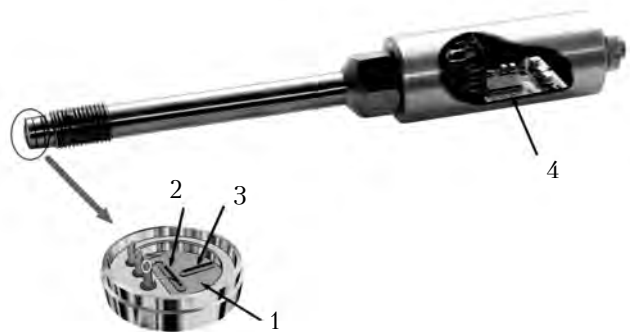


Рис. 1. Датчик давления-температуры: 1 — мембрана; 2, 3 — тензорезисторы; 4 — информационно-измерительная система

и температуры тензорезисторы изменяют свое сопротивление пропорционально деформации и температуре:

$$R1 = R1_0 + \Delta R1_{\varepsilon} + \Delta R1_t, \quad (1)$$

$$R2 = R2_0 - \Delta R2_{\varepsilon} + \Delta R2_t, \quad (2)$$

где $R1_0$, $R2_0$ — номинальное сопротивление тензорезисторов;

$\Delta R1_{\varepsilon, t}$, $\Delta R2_{\varepsilon, t}$ — изменение сопротивления тензорезисторов от давления (индекс ε) и от температуры (индекс t) соответственно.

Изменения значений сопротивления тензорезисторов от температуры и давления преобразуются информационно-измерительной системой 4 по каналам измерения давления и температуры в унифицированные токовые электрические выходные сигналы. Расположение тензорезисторов непосредственно на мембране обеспечивает минимальную инерционность измерения температуры. Изменяя толщину мембраны, можно в широком диапазоне изменять верхний предел измерения давления.

На **рис. 2** представлены графики температурной зависимости относительного изменения сопротивления свободного тензорезистора и закрепленного на мембране. Как видно из рисунка, температурный коэффициент сопротивления закрепленного тензорезистора больше, чем свободного, и равен $+0,2\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. Кроме того, закрепление тензорезистора приводит к уменьшению нелинейности зависимости его сопротивления от температуры. Такое различие температурных зависимостей обусловлено тем, что коэффициенты линейного расширения связующего материала, материалов мембраны и чувствительного элемента тензорезистора различны [10].

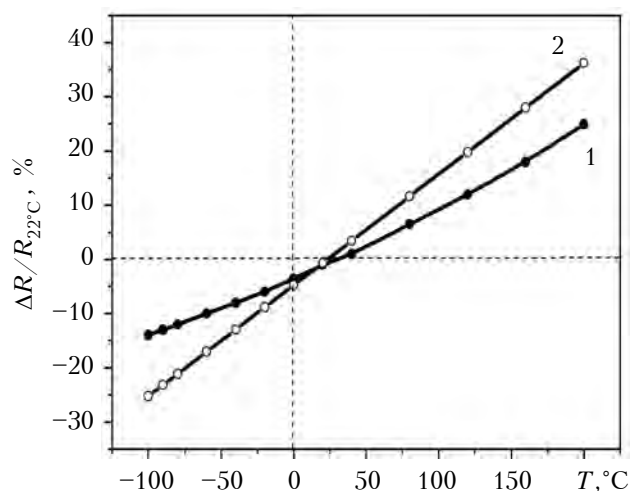


Рис. 2. Температурная зависимость относительного изменения сопротивления свободного тензорезистора (1) и закрепленного на мембране (2)

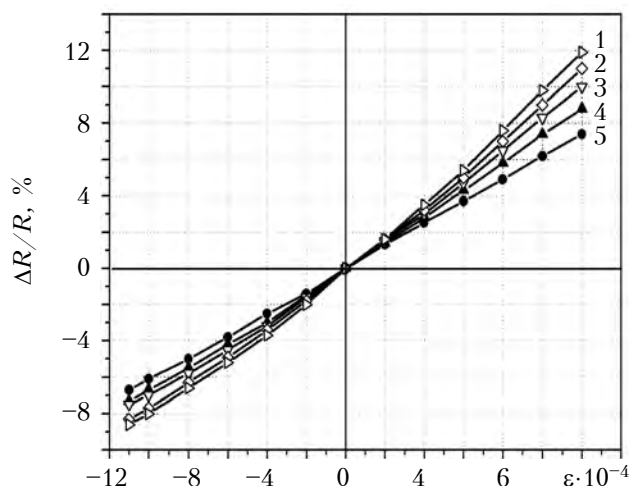


Рис. 3. Деформационные характеристики тензорезистора на основе НК Si с $\rho=0,005$ Ом·см при температуре -100°C (1); -50°C (2); $+20^\circ\text{C}$ (3); $+100^\circ\text{C}$ (4); $+200^\circ\text{C}$ (5)

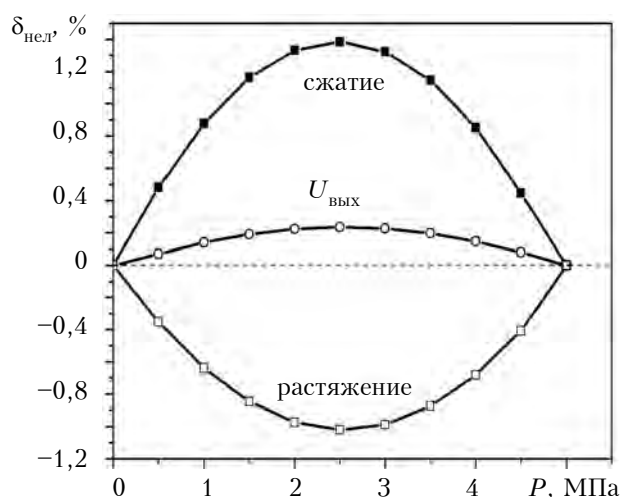


Рис. 4. Зависимость нелинейности характеристик датчика на основе НК Si и измерительной схемы от давления на мембрану

На **рис. 3** представлены типичные градуировочные характеристики тензорезисторов на основе НК кремния, полученные при деформации сжатия и растяжения при разных температурах. Как следует из рисунка, деформационные характеристики практически линейны до уровня деформации порядка $1 \cdot 10^{-3}$. Различие в наклоне кривых, полученных при сжатии и при растяжении, обусловлено термической деформацией, возникающей при закреплении тензорезистора на упругом элементе.

При включении двух тензорезисторов (RT_1 — для восприятия деформации растяжения, RT_2 — деформации сжатия) в полумостовую измерительную схему, зависимость напряжения $U_{\text{вых}}$, снимаемого с измерительной диагонали, от при-

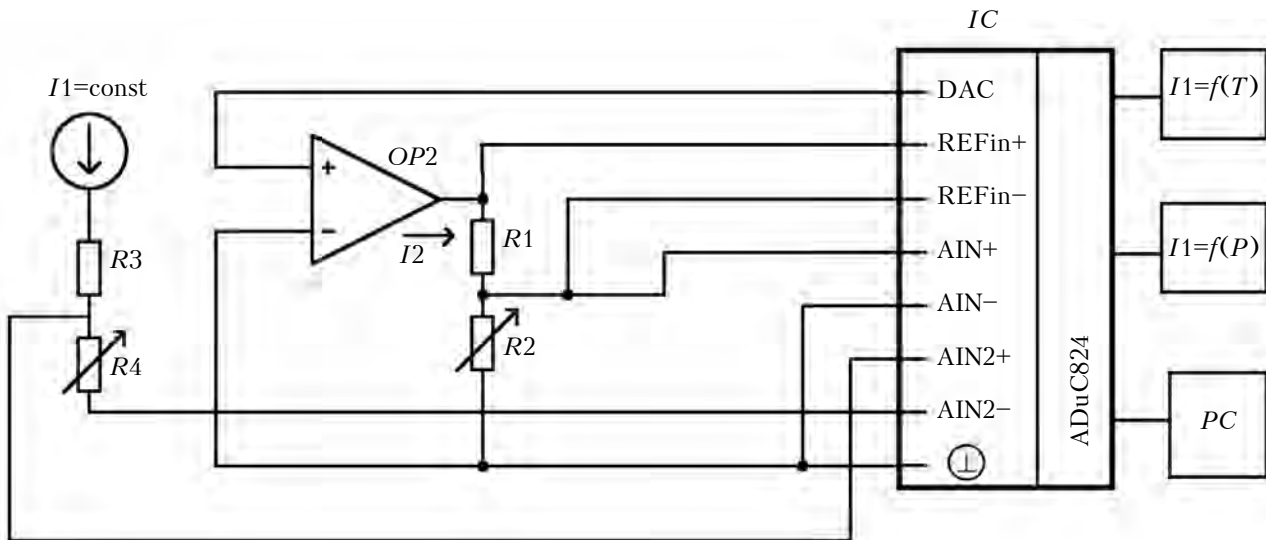


Рис. 5. Структурная схема информационно-измерительной системы

ращения их сопротивлений ΔR имеет нелинейный характер:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{п}}}{2} \left(\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right), \quad (3)$$

где $U_{\text{п}}$ — напряжение питания мостовой схемы.

В качестве примера на **рис. 4** приведена зависимость относительной нелинейности $\delta_{\text{нел}}$ характеристик одного из разработанных датчиков от давления. Как видно из рисунка, нелинейность этой зависимости относительно прямой линии, соединяющей крайние точки, достаточно велика: она составляет около 1,4...1,5% при деформации сжатия и -1,0...-1,1% при деформации растяжения.

При включении тензорезисторов RT_1 и RT_2 в неуравновешенную мостовую схему первого вида симметрии [11] обеспечивается относительно малая нелинейность выходной характеристики датчика давления (кривая $U_{\text{вых}}$ на **рис. 4**) — порядка 0,24%, что вполне достаточно для большинства технологических измерений [12], но при решении целого ряда прикладных задач необходимы датчики с более высокими метрологическими характеристиками.

Для увеличения точности и коррекции погрешностей преобразования в разработанном датчике используется микроконвертор ADUC824 [13], который включает аналоговые и цифровые блоки, а также микропроцессор на базе ядра 8052, с помощью которого осуществляется вторичная обработка сигнала. В системе используется отдельный управляемый источник тока, построенный на базе цифро-аналогового преобразователя, который является частью микроконтроллера (**рис. 5**). Раздельное питание двух тензорезисторов позволяет устранить аддитивную погрешность смещения нуля, возникающую при отклонении от номинала сопротивлений тензо-

резисторов. Большое влияние на точность измерения давления оказывает температурная погрешность, вызванная изменением температурных коэффициентов тензочувствительности и сопротивления. Предложенная схема позволяет осуществить гибкую программно-аппаратную термокомпенсацию канала измерения давления путем контроля температуры и введения поправочных коэффициентов.

Технические характеристики разработанного датчика представлены в **таблице**. Его стабильность, чувствительность и диапазон измерения достаточно удовлетворительны. Благодаря своей конструктивной простоте и функциональной завершенности он выгодно отличается от аналогичных датчиков давления, изготовленных с применением сложных микроэлектронных технологий, а наличие в нем канала изме-

Основные технические характеристики датчика давления-температуры

Параметр	Значение параметра
Верхние пределы измерения, МПа	от 0,1 до 20
Пределы погрешности канала измерения давления, %	$\pm 0,1$; $\pm 0,25$; $\pm 0,5$
Температурный дрейф начального сигнала, $\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	$\pm 0,03$
Температура измеряемой среды, $^\circ\text{C}$	-100...+200
Пределы погрешности канала температуры, $^\circ\text{C}$	0,5...1,5
Постоянная времени канала температуры (зависит от диапазона измеряемого давления), с	12

рения температуры позволяет значительно повысить информативность процесса измерения. Разработанный двухфункциональный датчик давления-температуры может использоваться в различных областях — в моторостроении, авиационной, нефтедобывающей и других отраслях промышленности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Войтович І. Д., Корсунський В. М. Інтелектуальні сенсори. — Київ: Інститут кібернетики НАН України, 2007. [Voitovich I. D., Korsun'skii V. M. Intel'ktual'ni sensori. Kyiv: Institut kibernetiki NAN Ukrayini, 2007]
2. Лепіх Я. І., Гордієнко Ю. О., Дзядевич С. В. та ін. Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем. — Одеса: Астропринт, 2010. [Lepikh Ya. I., Gordiyenko Yu. O., Dzyadevich S. V. ta in. Stvorenniya mikroelektronnikh datchikiv novogo pokolinnya dlya intelektual'nikh sistem. Odesa: Astroprint, 2010]
3. Вуйцик В., Голяка Р., Каліта В. та ін. Аналогова мікросхемотехніка вимірювальних та сенсорних пристроїв. — Львів: ДУ «Львівська політехніка», 1999. [Vuitsik V., Golyaka R., Kalita V. ta in. Analogova mikroskhemotekhnika vimiryuv'al'nikh ta sensornikh pristroyiv. — L'viv: DU «L'viv's'ka politekhnika», 1999]
4. Harrop P., Das R. // Active RFID and Sensor Networks 2007-2017 // www.idtechex.com/products/en/view.asp?publicationid=ib6.
5. Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е., Васильев В. А. Повышение устойчивости датчиков к внешним воздействиям факторам // Современная техника и технологии. — Ноябрь, 2011 [Belozubov E. M., Belozubova N. E., Vasil'ev V. A. // Sovremennaya tekhnika i tekhnologii. Noyabr', 2011]
6. <http://www.mems-issys.com>
7. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Кутраков А. П., Павловский И. В. О возможности создания высокочувствительных пьезорезистивных сенсоров механических величин для криогенных температур // Датчики и системы. — 2005. — № 7. — С. 17—21. [Druzhinin A. A., Mar'yamova I. I., Kuttrakov A. P., Pavlovskii I. V. // Datchiki i sistemy. 2005. N 7. P. 17]
8. Дружинин А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П., Лях-Кагуй Н. С. Ниткоподібні кристали кремнію для сенсорної електроніки // Фізика і хімія твердого тіла. — 2011. — Т. 12, № 4. — С. 1078—1084. [Druzhinin A. O., Mar'yamova I. I., Kuttrakov O. P., Lyakh-Kagui N. S. // Fizika i khimiya tverdogo tila. 2011. Vol. 12, N 4. P. 1078]
9. Дружинин А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П., Лях-Кагуй Н. С. Тензорезистивні сенсори тиску на основі ниткоподібних кристалів кремнію // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. — 2012. — Т. 3, № 9 (3). — С. 16—24. [Druzhinin A. O., Mar'yamova I. I., Kuttrakov O. P., Lyakh-Kagui N. S. // Sensorna elektronika ta mikrosistemni tekhnologiyi. 2012. Vol. 3, N 9 (3). P. 16]
10. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Кутраков А. П. и др. Полупроводниковые сенсоры механических величин

на основе микрокристаллов кремния для экстремальных условий // Микросистемная техника. — 2001. — № 9. — С. 3—8. [Druzhinin A. A., Mar'yamova I. I., Kuttrakov A. P. i dr. // Mikrosistemnaya tekhnika. 2001. N 9. P. 3]

11. Воробьев С. А. Электрические измерения неэлектрических величин. Вып. 2. Основы теории и расчета неуравновешенных мостовых схем с датчиками сопротивления. — Свердловск: УПИ им. С. М. Кирова, 1975. [Vorob'ev S. A. Elektricheskie izmereniya neelektricheskikh velichin. Vyp. 2. Osnovy teorii i rascheta neuravnovesennykh mostovykh skhem s datchikami soprotivleniya. Sverdlovsk: UPI im. S. M. Kirova, 1975]

12. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи. — Москва: Энергоатомиздат, 1983. [Vaganov V. I. Integral'nye tenzopreobrazovateli. Moskva: Energoatomizdat, 1983]

13. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADUC824.pdf

*Дата поступления рукописи
в редакцию 27.05 2013 г.*

Druzhinin A. A., Kuttrakov A. P., Liakh-Kagui N. S., Vuitsyk A. M. **Dual-function pressure-temperature sensor based on silicon whiskers.**

Keywords: whiskers, silicon, sensor, temperature, pressure.

The article presents the design of a pressure-temperature sensor based on p-type silicon whiskers, doped with boron, with a resistivity of 0,005 Ohm·cm. The sensor is operable in a temperature range from –100 to +200°C and at pressures from 0 to 20 MPa. The sensor is designed for a wide range of applications.

Ukraine, Lviv Polytechnic National University.

Дружинин А. О., Кутраков О. П., Лях-Кагуй Н. С., Вуйцик А. М. **Двофункціональний датчик тиску-температури на основі нитковидних кристалів кремнію.**

Ключові слова: ниткоподібні кристали, кремній, датчик, температура, тиск.

Представлено конструкцію датчика тиску-температури на основі ниткоподібних кристалів кремнію *p*-типу, легованих бором, з питомим опором 0,005 Ом·см, який є працездатним в інтервалі температури від –100 до +200°C і в діапазоні тиску від 0 до 20 МПа. Датчик призначений для широкої області застосувань.

Україна, Національний університет «Львівська політехніка».

УДК 629.782

Е. С. ЗАВАДСКАЯ, к. т. н. Б. М. РАССАМАКИН, к. т. н. В. А. РОГАЧЁВ,
к. т. н. С. М. ХАЙРНАСОВ, к. т. н. В. И. ХОМИНИЧ

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»

E-mail: sergey.khairnasov@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ НАНОСПУТНИКА

Разработана методика моделирования теплового режима и проведены термовакуумные испытания наноспутника (НС) PolyITAN-1. Результаты показали корректность моделирования орбиты НС и факторов космического пространства и подтвердили работоспособность узлов и элементов наноспутника в заданных условиях.

Ключевые слова: космический аппарат, наноспутник, термовакуумные испытания.

В последнее десятилетие отмечается значительный рост числа запусков космических аппаратов, масса которых не превышает 10 кг, так называемых пико- и наноспутников. Значительную роль среди космических аппаратов такого типа играют наноспутники стандарта CubeSat — малые искусственные спутники Земли для исследования космоса и зондирования Земли, имеющие объем примерно 0,001 м³ и массу не более 1,33 кг. Образование такого класса спутников повлекло за собой развитие совершенно нового направления в аэрокосмических технологиях — микротехнологии. Это стало возможным благодаря достижениям в микроминиатюризации элементной базы, использованию новых полимерных и композиционных материалов, интеграции бортового аппаратного комплекса на основе средств вычислительной техники, использованию негерметичных конструкций и др.

В НТУУ «КПИ» по университетской программе разрабатывается наноспутник (НС) PolyITAN-1 и на сегодняшний день изготовлена его инженерная модель (рис. 1). Это малый космический аппарат (искусственный спутник Земли), который имеет форму прямого параллелепипеда размерами 140×140×120 мм, весом око-

ло 1 кг. Запуск PolyITAN-1 со временем планируется на ракетоносителе «Днепр».

Одним из важных этапов при разработке космических аппаратов и их элементов являются термовакуумные испытания, в ходе которых моделируется влияние на аппарат факторов космического пространства: низкой температуры, вакуума, различных видов излучения, черноты пространства и др. [1–4]. Так, проходя по орбите вокруг Земли, НС непрерывно подвергается воздействиям солнечного и земного излучений, которые значительно влияют на тепловое состояние и температурный режим электронной аппаратуры НС и, соответственно, на ее надежность в полете. В различные промежутки времени влияние этих факторов будет неодинаковым: в зависимости от положения НС на орбите и условий функционирования его систем на поверхности корпуса НС будут попадать переменные тепловые потоки различной интенсивности, которые и будут определять тепловой режим всех узлов и элементов, в том числе и электронной аппаратуры НС.

Целью моделирования тепловых режимов наноспутника при термовакуумных испытаниях в лабораторных условиях было установление работоспособности узлов и систем НС при длительном комплексном воздействии факторов космического пространства, определение возможных нештатных ситуаций, которые могут возникнуть в реальном полете.

Объект испытаний

НС состоит из подсистем обработки данных, ориентации и стабилизации, навигации, телеметрии, электроснабжения, приемопередающей подсистемы, межсистемной кабельной сети и элементов несущей конструкции. Все подсистемы компактно расположены на трех платах, закрепленных в направляющих фермы. На верхней плате расположены магнитометр, гиро-



Рис. 1. Наноспутник PolyITAN-1

скоп, датчик температуры и датчик координат Солнца, которые представляют собой подсистему телеметрии, ориентации и стабилизации НС. Посередине размещается плата с GPS-модулем и центральным процессором, в котором содержится циклограмма полета НС и основная программа (подсистема обработки данных и навигации). Нижняя плата представляет собой подсистему электроснабжения. Конструкция НС обеспечивает механическое соединение бортовой аппаратуры и всех элементов спутника в единое целое, монтаж кабельной сети, зачековку и фиксацию концов на время его транспортировки, выведения на орбиту и приведения в рабочее состояние.

Сотопанельный каркас представляет собой трехслойную панель с облегченным алюминиевым сотовым заполнителем, двумя углепластиковыми обшивками и приклеенной диэлектрической полиимидной пленкой. В качестве заполнителя использовались «соты» высотой 10 мм из фольги толщиной 0,023 мм. Монослойные углепластиковые обшивки выполнялись из углеродистой конструкционной ленты. Удельный вес такого каркаса не превышает 0,82 кг/м². На каждом сотопанельном каркасе крепится по шесть фотоэлектрических преобразователей.

Экспериментальное оборудование и методика испытаний

Для проведения термовакuumных испытаний НС и воспроизведения условий воздействия солнечного и земного излучений использовался лабораторный стенд ТВК-0,12 [5]. Общий вид и структурная схема моделирующего стенда представлены на **рис. 2**.

Термовакuumный стенд ТВК-0,12 включает в себя следующие основные системы: вакуумную камеру 1, криогенную систему 3, имитатор земного излучения (ИЗИ) (4), имитатор солнечного излучения (ИСИ) 5. Для измерения температуры поверхностей элементов НС и криоэкранов применялись 14 миниатюрных контактных датчиков (термопар и термометров сопротивления). Регистрация и обработка температурных данных осуществлялась автоматизированной многоканальной системой измерения температуры [5].

Имитатор солнечного излучения, разработанный и созданный в НТУУ «КПИ», расположен вне камеры и состоит из оптической системы, источника излучения в виде ксеноновой лампы ДКсШ-3000-3 и блока питания. Имитатор предназначен для создания в рабочей зоне камеры лучистого потока, который по своим спектральным характеристикам близок к заатмосферному солнечному излучению.

Имитатор излучения Земли представляет собой электронагреватель, выполненный в виде плиты, покрытой черной термоэмалью, размерами 185×140×30 мм, к которой нижней гранью (IV) через дистанцирующие прокладки крепится НС. С помощью блока термостабилизации регу-

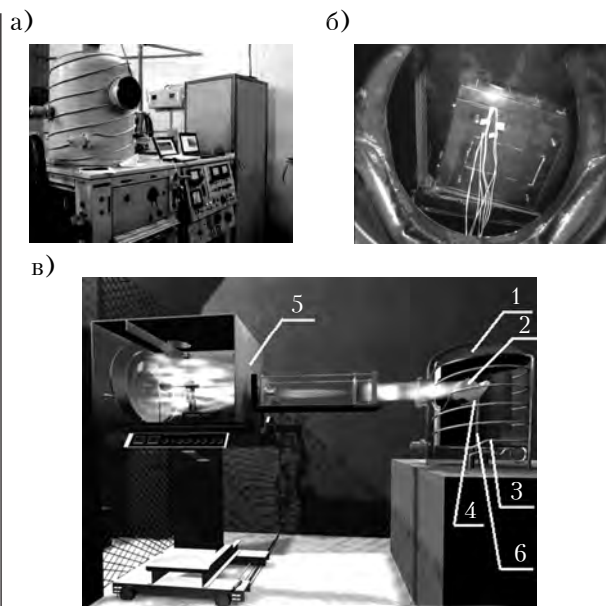


Рис. 2. Общий вид термовакuumного стенда ТВК-0,12 (а), положение НС в камере (б) и структурно-функциональная схема (в):

1 — вакуумная камера; 2 — НС; 3 — криогенная система; 4 — ИЗИ; 5 — ИСИ; 6 — опорно-поворотное устройство

лируется величина теплового потока, поступающего от имитатора на грань IV.

Для моделирования орбиты НС с периодом вращения 97 мин, что соответствует одному полному витку, использовалось опорно-поворотное устройство 6, позволяющее вращать НС вокруг собственной оси и изменять угол его наклона по отношению к падающему солнечному потоку.

Грань IV в полете ориентирована на Землю, поэтому при проведении испытаний она подвергалась воздействию только земного излучения. Тепловое состояние НС исследовалось в двух орбитальных режимах — «солнечном» и «тенивом». В ходе эксперимента основные факторы космического пространства воспроизводились в следующих пределах:

- вакуум до $8 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. с приведенной погрешностью $\pm 30\%$;
- солнечное излучение не меньше 1400 Вт/м² с неоднородностью $\pm 7\%$;
- земное излучение от 190 до 750 Вт/м² с погрешностью $\pm 5\%$;
- температура азотоэкранов до -193°C с разбросом $\pm 3^\circ\text{C}$;
- относительная степень черноты криоэкранов со стороны объекта $\geq 0,93$.

Эксперимент проходил в следующем порядке. НС крепился на опорно-поворотном механизме под углом к вертикальной оси камеры Z_k таким образом, чтобы на грань I солнечное излучение попадало под прямым углом в точке С на **рис. 3**. Начальное положение НС при моделировании — точка А — соответствует выходу НС из тени Земли. Вращением НС по часовой стрелке (скорость вращения НС вокруг оси каме-

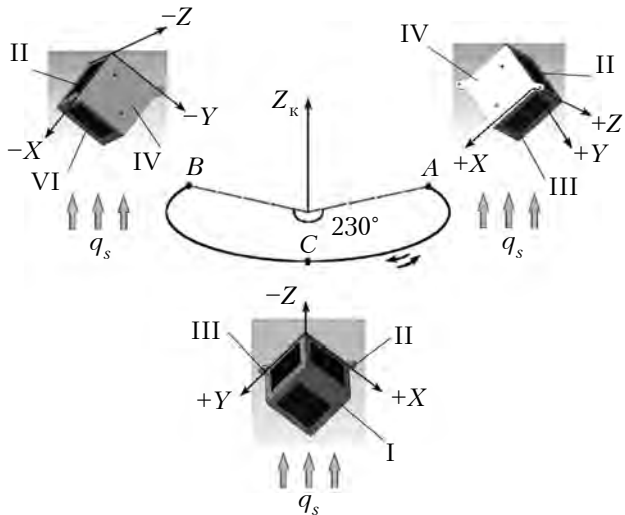


Рис. 3. Положение НС относительно оси камеры при испытаниях

ры составляла примерно $3,3^\circ/\text{мин}$) начиналось моделирование «солнечного» орбитального режима, во время которого имитаторы солнечного и земного излучений были постоянно включены. Этот процесс длился 63 мин, после чего НС оказывался в точке *B*, соответствующей моменту, когда НС заходит в тень Земли. Точка *C* соответствует положению, в котором облучение НС максимальное (суммарный тепловой поток от Солнца $q_s=1400 \text{ Вт/м}^2$ и от Земли $q_z=750 \text{ Вт/м}^2$). Для моделирования «теневого» режима ИСИ выключали и против часовой стрелки НС возвращали в точку *A*. Этот процесс длился 34 мин. Таким образом, имитатор земного излучения работал в течение всего эксперимента непрерывно, а ИСИ включался периодически, что в целом соответствовало условиям прохождения НС по теневой и солнечной частям околоземной орбиты.

Для обеспечения надежного теплового контакта с контролирующей поверхностью термодатчики крепились к поверхности с помощью высокотеплопроводного клея (коэффициент теплопроводности не менее $0,5 \text{ Вт/(м·К)}$). Погрешность измерения температуры составляла $\pm 0,2^\circ\text{C}$. С помощью регулятора напряжения температура имитатора Земли циклически менялась в зависимости от угла поворота и времени движения НС по орбите.

Во время проведения эксперимента были смоделированы четыре витка прохождения НС по орбите и получены зависимости распределения температуры на двух сотовых панелях, на платах системы энергообеспечения, навигации и телеметрии.

Одной из основных задач экспериментальных исследований было определение температурных диапазонов функционирования элементов НС при перемещении его по орбите, в частности наиболее теплонагруженных элементов — микроконтроллеров платы обработки данных, телеметрии и системы энергообеспечения, а также аккумуляторных батарей. В соответствии с

требованиями к обеспечению тепловых режимов бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов, а также к характеристикам электронных компонентов, допустимым для функционирования микроконтроллеров является температурный интервал от -20 до $+50^\circ\text{C}$, для блока аккумуляторов — от 0 до $+40^\circ\text{C}$.

Результаты испытаний

Результаты измерения температурных полей в элементах НС для второго и третьего орбитальных витков приведены на рис. 4 и 5.

На рис. 4 показано изменение температуры поверхностей граней I и III, а также соответствующие точки расположения НС во время испытаний (*A*, *B*, *C*). Как и ожидалось, температура поверхностей была наименьшей сразу после окончания «теневого» режима (от -23 до -32°C), а наибольшая (-5°C) — на грани I при нахождении НС в точке *C*.

На рис. 5 приведены графики изменения во времени температуры электронных элементов НС: микроконтроллеров платы обработки дан-

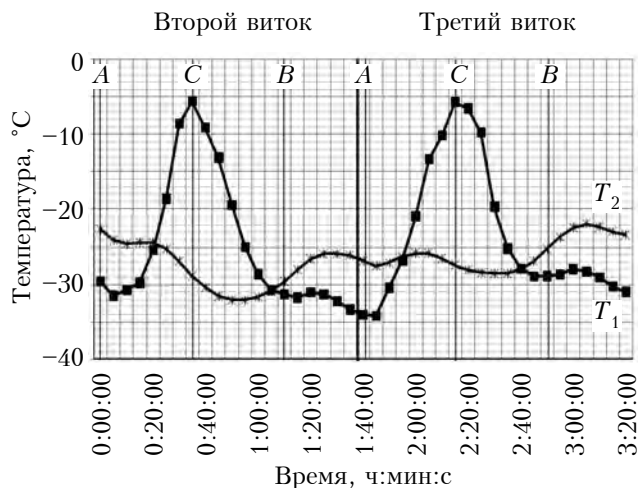


Рис. 4. Изменение во времени температуры поверхности граней I (T_1) и III (T_2) на втором и третьем витках

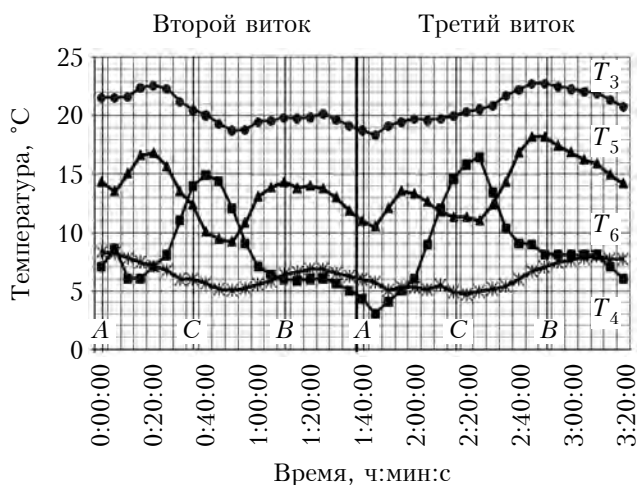


Рис. 5. Изменение во времени температуры электронных элементов НС на втором и третьем витках

ных (T_3) и платы системы телеметрии (T_4), а также системы энергообеспечения — аккумуляторных батарей (T_6) и микроконтроллера платы энергообеспечения (T_5).

Как видно из рисунка, самая высокая температура во время испытаний была у микроконтроллера подсистемы обработки данных (T_3), что связано с ее непрерывной работой в течение полета: значение T_3 изменялось от 18 до 23°C. Самую низкую температуру имели аккумуляторные батареи ($T_6=5...9^\circ\text{C}$), поскольку они расположены ближе к источнику земного излучения.

Колебания температуры на микроконтроллере подсистемы телеметрии (T_4) от 5 до 17°C связаны с периодичностью ее работы. Наибольшие значения T_4 достигались при включении рабочей нагрузки на подсистему, когда НС находился в области правее точки максимального облучения НС. Смещение максимального значения T_4 , так же как и значений температуры других элементов НС (см. рис. 5), относительно точки С связано с инерционностью процессов теплообмена внутри аппарата. Характер запаздываний и их временные характеристики зависят от места расположения элемента внутри аппарата, теплового влияния на него других компонентов, а также циклограммы его работы в течение эксперимента.

Температура микроконтроллера платы энергообеспечения (T_5) изменяется в пределах от 9 до 17°C. При этом следует обратить внимание на характер этих изменений — он демонстрирует влияние на температурный режим микроконтроллера не только внешних тепловых потоков, но и циклограммы его работы (т. е. моменты его включения и выключения). Так, на графике видно, что всплески температуры T_5 имеют не только при прохождении НС по солнечной части орбиты, но и по теневой, и соответствуют включению устройства. Также отметим процесс влияния температуры T_5 на другие элементы: при включении микроконтроллера платы энергообеспечения наблюдается незначительное повышение температуры и микроконтроллера платы обработки данных (T_3), и аккумуляторных батарей (T_6). Что касается некоторого роста T_5 на третьем витке по сравнению со значениями на втором, его можно объяснить квазистационарностью процессов в камере и в самом аппарате при проведении испытаний.

Выводы

Таким образом, разработанная методика позволила провести термовакuumные испытания наноспутника PolyITAN-1. Полученные результаты показали корректность моделирования орбиты НС и факторов космического пространства и подтвердили работоспособность узлов и элементов аппарата в заданных условиях. Все приборы работали при положительных значениях температуры, лежащих в соответствующих допустимых диапазонах. При этом не было заме-

чено никаких отклонений в функционировании и работе электронной аппаратуры НС.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Козлов Л. В., Нусинов М. Д., Акишин А. И. и др. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды. — Москва: Машиностроение, 1971. [Kozlov L. V., Nusinov M. D., Akishin A. I. i dr. Modelirovanie teplovykh rezhimov kosmicheskogo apparata i okruzhayushchei ego sredy. Moscow: Mashinostroyeniye, 1971]
2. Нусинов М. Д. Воздействие и моделирование космического вакуума. — Москва: Машиностроение, 1982. [Nusinov M. D. Vozdeistvie i modelirovanie kosmicheskogo vakuuma. Moscow: Mashinostroyeniye, 1982]
3. Копяткевич Р. М., Альтов В. В., Мишин Г. С. Тепловые режимы радиоэлектронных приборов космических аппаратов // Тр. Второй российской нац. конф. по теплообмену. — 1998. — Т. 1. — С. 129—132. [Kopyatkevich R. M., Al'tov V. V., Mishin G. S. // Tr. Vtoroi rossiiskoi nats. konf. po teploobmenu. 1998. Vol. 1. P. 129]
4. Рассамакин Б. М., Рогачев В. А., Хайрнасов С. М. и др. Экспериментальное моделирование тепловых режимов эксплуатации оптико-электронного прибора для микроспутника // Космична наука і технологія. — 2003. — Т. 9, № 4. — С. 34—39. [Rassamakin B. M., Rogachov V. A., Khairnasov S. M. i dr. // Kosmichna nauka i tekhnologiya. 2003. Vol. 9, N 4. P. 34]
5. Рассамакин Б. М., Рогачев В. А., Хоминич В. И. и др. Экспериментальное моделирование тепловых режимов малогабаритных космических аппаратов и их внешних тепловых потоков. Ч. 1. Термовакuumная установка ТВК-2,5 // Космична наука і технологія. — 2002. — Т. 8, № 1. — С. 37—41. [Rassamakin B. M., Rogachov V. A., Khominich V. I. i dr. // Kosmichna nauka i tekhnologiya. 2002. Vol. 8, N 1. P. 37]

Дата поступления рукописи
в редакцию 14.06 2013 г.

Zavadskaja E. S., Rassamakin B. M., Rogachov V. A., Khairnasov S. M., Khominich V. I. **Experimental simulation of nanosatellites heat modes.**

Keywords: spacecraft, nano-satellite, thermal vacuum tests.

The technology of thermal modes modelling for nanosatellite (NS) PolyITAN-1 has been developed and thermal vacuum tests have been carried out. The results have shown that the simulation of the NS orbit and space factors is correct and confirmed that NS nodes and elements are operable under the specified conditions.

Ukraine, NTUU «KPI».

Завадська Є. С., Рассамакін Б. М., Рогачов В. А., Хайрнасов С. М., Хомініч В. І. **Експериментальне моделювання теплових режимів наносупутника.**

Ключові слова: космічний апарат, наносупутник, термовакuumні випробування.

Розроблено методику моделювання теплового режиму та проведено термовакuumні випробування наносупутника (НС) PolyITAN-1. Результати показали коректність моделювання орбіти НС і факторів космічного простору і підтвердили працездатність вузлів та елементів НС в заданих умовах.

Україна, НТУУ «Київський політехнічний інститут».

УДК 678.747:621.317

Д. т. н. А. Ф. БЕЛЯНИН¹, В. В. БОРИСОВ², к. ф.-м. н. М. А. ТИМОФЕЕВ²,
А. Н. ЛАМСКИЙ¹Россия, г. Москва, ¹ЦНИТИ «Техномаш», ²НИИЯФ им. Д. В. Скобельцына МГУ
E-mail: belyanin@technomash.ru

НЕНАКАЛИВАЕМЫЕ КАТОДЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР

Рассмотрены условия формирования и строение пленок алмазоподобных материалов, используемых при изготовлении слоистых ненакаливаемых катодов устройств эмиссионной электроники. Изучены строение и автоэмиссионные свойства слоистых структур с поликластерными пленками алмаза и с алмазоподобными углеродными пленками (АУП), сформированными различными методами. Установлено, что лучшими эмиссионными характеристиками обладают АУП, полученные катодным распылением, эмиссия с поверхности которых происходит по границам глобул.

Ключевые слова: слоистые структуры, эмиссионная электроника.

Одной из задач эмиссионной электроники является снижение барьера эмиссии с поверхности катодов. Перспективы применения устройств эмиссионной электроники, обладающих улучшенными характеристиками, связаны с разработкой слоистых ненакаливаемых (автоэмиссионных) катодов на основе широкозонных полупроводниковых материалов — поликластерных пленок алмаза (**ППА**), алмазоподобных углеродных пленок (**АУП**), пленок AlN и др. Наличие автоэмиссии означает возможность существенного снижения напряженности электрического поля (до 1–10 В/мкм), требуемой для возникновения полевой эмиссии электронов.

Автокатоды на основе углеродных материалов находят применение при создании рентгеновских трубок (досмотровых, микрофокусных, для сканирующего томографа), СВЧ-приборов, электронных пушек для возбуждения лазеров, катодо-люминесцентных осветительных приборов, плоских экранов, электронных проекторов и дисплеев, нейтрализаторов заряда положительных ионных потоков [1, 2]. Наряду с уникальными характеристиками автоэмиссионных катодов, имеется ряд трудностей в их применении. Например, при работе автоэмиссионных катодов с АУП в объем вакуумного прибора в результате катодного распыления этих пленок выделяется атомарный углерод, что требует оснащения вакуумных приборов магниторазрядными насосами или применения геттерирования. Старение автоэмиссионных катодов вызывает необходимость использования технически сложных источников стабилизированного тока.

Цель настоящей работы — изучение строения и автоэмиссионных свойств слоистых ненакали-

ваемых катодов с поликластерными пленками алмаза и с алмазоподобными углеродными пленками, сформированными различными методами.

Формирование и строение многослойных структур

Изучались эмиссионные свойства следующих слоистых структур: Si/ППА(АУП), W/WC, W/WC/ППА(АУП), плавленый кварц/AlN+Al/АУП.

Пленки для исследований формировали следующими методами (см. **таблицу**): AlN+Al — магнетронным распылением, ППА — дуговым (концентрация алмазной фазы С составляла 99% от объема и больше) и СВЧ-разрядом (C=20–60 об.%), АУП (C<5 об.%) — тлеющим разрядом (АУП_{тр}) [3–5] и последующим катодным распылением полученного алмазоподобного углерода. Отметим, что в подложках, предназначенных для получения пленок СВЧ-разрядом, предварительно создавались необходимые для формирования ППА центры нуклеации [6]. Этот процесс проводили при температуре 1025 К бомбардировкой ионами H⁺ и C_xH_y⁺ (ВЧ-разряд — 13,56 МГц, 40 Вт — в течение 20 мин), образующимися в СВЧ-плазме (H₂+(8–10 об.%)CH₄, давление около 6,6·10³ Па). Для легирования пленок бором в вакуумную камеру вводили пары смеси этанола (CH₃OH) с триметилборатом ((CH₃O)₃B). При использовании тлеющего разряда на подложку наносили затравочные наночастицы алмаза размером менее 5 нм. При получении пленок катодным распылением использовали диодную и триодную схемы (процесс проводили в импульсном режиме со скважностью 100), при этом в качестве катода-мишени

Метод	Рабочий газ*	Давление газа, кПа	Мощность разряда, Вт	Температура подложки, К	Скорость осаждения, мкм/ч	Состав пленки
Дуговой разряд	(1,5–4) об.% CH ₄ + H ₂	>1	—	870–1470	до 40	ППА
СВЧ-разряд	0,5 об.% CH ₄ + H ₂	5–10	1000–6000	1000–1125	≈2	ППА, АУП
Тлеющий разряд	(1,5–4) об.% CH ₄ + H ₂	>1	—	800–1300	≈6	АУП _{ТР}
Катодное распыление АУП _{ТР}	—	6,7·10 ⁻⁸	1,2	300	<0,01	АУП
Магнетронное распыление Al	Ar+ (20–60) об.% N ₂	0,8·10 ⁻³	700 (ВЧ)	470–570	1,0–1,3	AlN, AlN+Al

применяли пластину из монокристаллического Si со слоем АУП_{ТР}.

Концентрация алмазной и алмазоподобной углеродной фаз оценивалась спектроскопией комбинационного рассеяния (КР) с помощью микрорамановского спектрометра LabRam HR800 (HORIBA Jobin-Yvon). Основные максимумы на спектрах КР для ППА — узкие, хорошо выраженные пики при значениях волнового числа $k \approx 1330$ см⁻¹, а для АУП — размытые пики при k , равном 1330 и 1550 см⁻¹ [7]. Интенсивность пиков на спектрах КР ППА, сформированных как дуговым, так и СВЧ-разрядом, зависела от температуры подложки (рис. 1), а для АУП, сформированных тлеющим разрядом, — от кон-

струкции разрядного устройства и предварительной подготовки подложек (рис. 2). Пик при $k \approx 1600$ см⁻¹, наблюдаемый у АУП, сформированных тлеющим разрядом, характерен для углеродных нанотрубок. На спектрах КР АУП, сформированных катодным распылением, можно выделить четыре перекрывающихся размытых пика с максимумами в области 1225–1232, 1328–1333, 1418–1423 и 1526–1547 см⁻¹ (рис. 2, в).

При использовании высокотемпературных методов (СВЧ- и дугового разрядов) в результате химического взаимодействия с углеродом на границе контакта подложки и углеродной пленки образуются поликристаллические и рентгеноаморфные фазы карбидов. На подложках из Si образуется пленка карбида кремния (α -SiC, гексагональная сингония, пространственная группа $P6_3mc$), толщина которой не превышает 0,1 мкм. С подложками из вольфрама активно взаимодействует углерод, при этом образуются слои карбидов вольфрама: WC (гексагональная сингония) и W₂C (ромбическая сингония; $Pbcn$) толщиной до 10 мкм (рис. 3, рентгеновский дифрактометр ДРОН-6,0, Cu $K\alpha$ -излучение, графитовый монохроматор). На различных участках поверхности подложки, покрытой слоем WC и W₂C, содержание W изменяется от 8,91 до 22,87 ат.%, содержание C — от 68,76 до 78,91 ат.%. Дисперсионный энергетический спектр одного из образцов показан на рис. 3, б (растровый электронный микроскоп CARL ZEISS LEO 1430 VP, оснащенный микроанализатором состава INKA X-act). Анализ состава пленок на Si, полученных катодным распылением, показал увеличение концентрации углерода от 18,16 до 59,37 ат.% в зависимости от толщины пленки, что указывает на ее островковый характер (рис. 3, в).

ППА, полученные как дуговым, так и СВЧ-разрядом, имели развитую поверхность (с шероховатостью $R_z \approx 0,6$ мкм при толщине пленки около 2 мкм) с характерной для алмаза огранкой

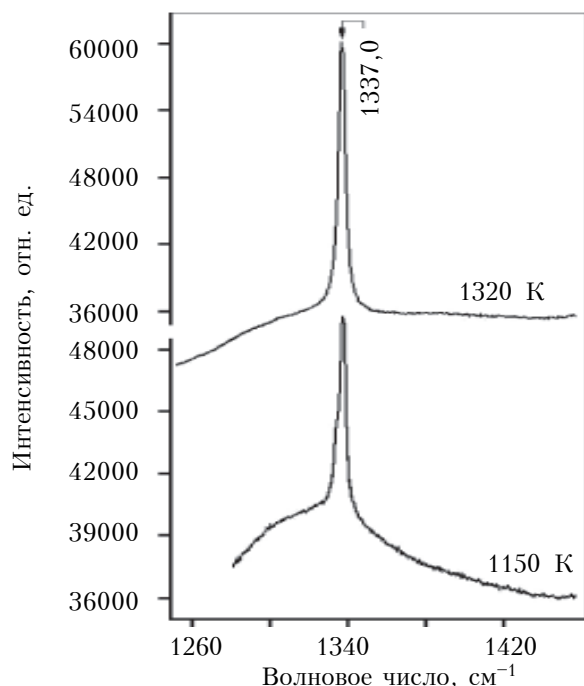


Рис. 1. Спектры КР света ППА, сформированными методом дугового разряда при различных температурах подложки из вольфрама

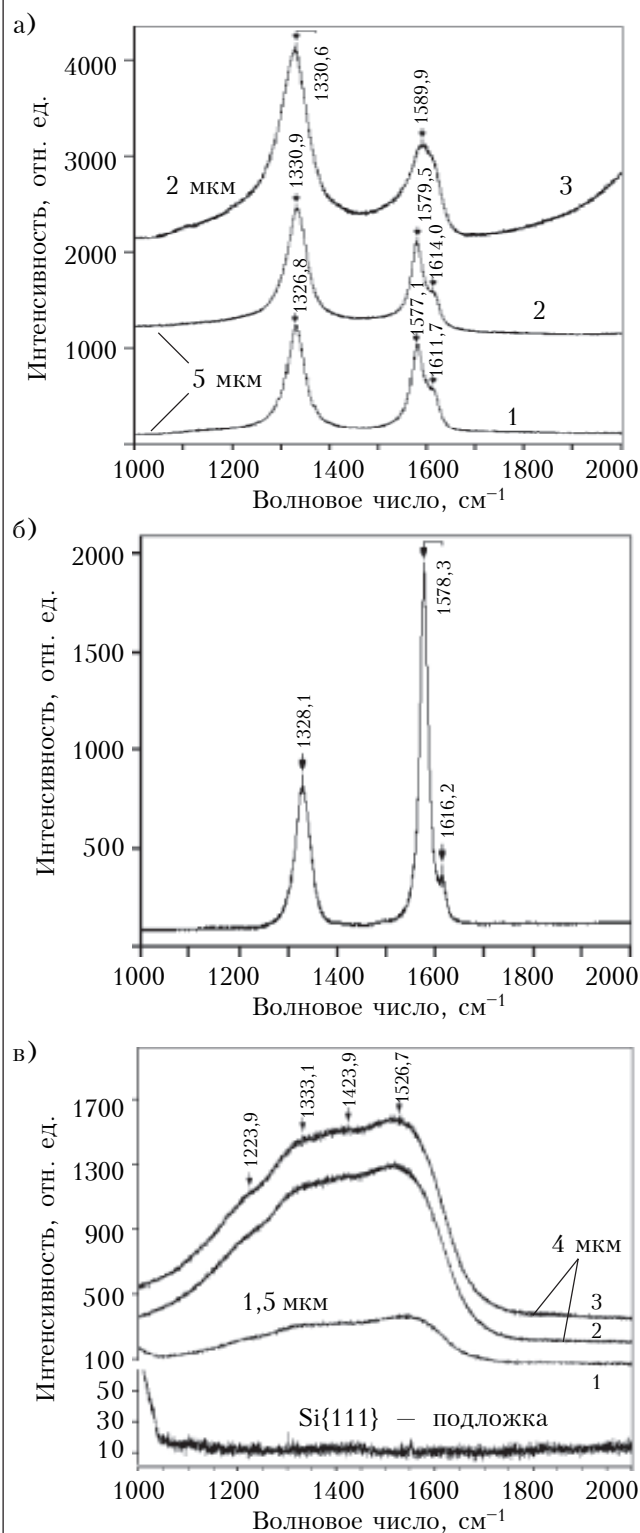


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния света АУП, сформированными на подложках из Si {111} тлеющим разрядом (а, б) и катодным распылением (в) при разных условиях:

а — без затравочных наночастиц (1) и с затравочными наночастицами алмаза (2, 3); б — после предварительной обработки подложки в плазме H_2 ; в — при использовании диодного (1, 2) и триодного (3) разряда (толщина пленок указана на рисунках)

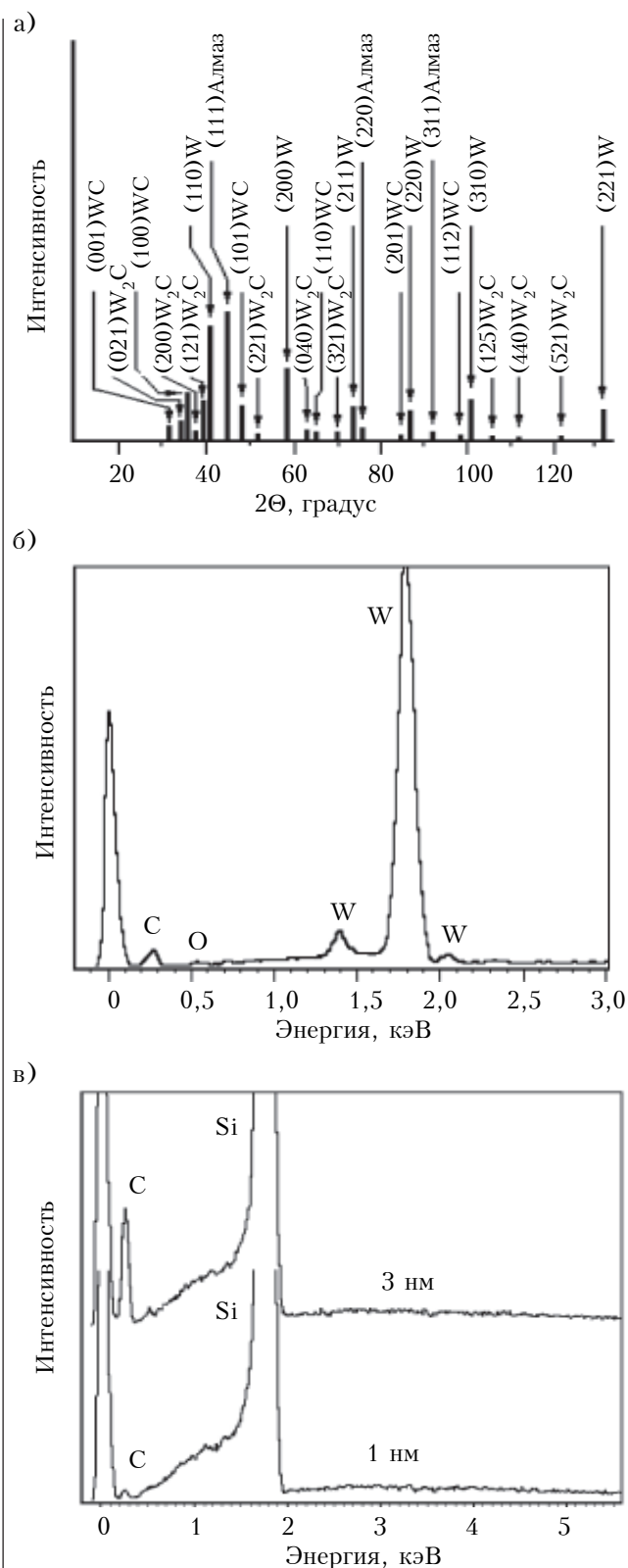


Рис. 3. Состав углеродных пленок, сформированных дуговым разрядом (а, б) и катодным распылением (в):

а — штрихрентгенограмма (Cu $K\alpha$ -излучение) ППА, сформированной на полочке из вольфрама; б, в — энергетические спектры, полученные от поверхности слоев, соответственно, W/WC и Si/АУП различной толщины

зерен по кристаллографическим направлениям $\{100\}$ и $\{111\}$ (рис. 4, а, в). Наблюдаемые на сколах ППА зёрна имеют пластинчатое строение. Рассчитанный по рентгенограммам размер кристаллитов (областей когерентного рассеяния рентгеновского излучения, $L_{\text{ОКР}}$) соответствовал толщине пластин, формирующих зерна (рис. 4, б). В количестве от 0,4 до 60 об.% в образцах ППА содержатся рентгеноаморфные кластеры, представляющие собой смесь алмазоподобного углерода и наноструктурированного алмаза с размером кристаллитов $L_{\text{ОКР}} < 1$ нм. Электронограммы и рентгенограммы, снятые с ППА, показывают наличие текстуры, при этом тип формирующейся текстуры не зависит от материала и кристаллографической ориентации подложки, а

определяется условиями проведения процесса и толщиной ППА. После снятия слоя, большего толщины ростовой поверхности пленки, получается гладкая беспористая поверхность с шероховатостью $R_z \approx 0,025$ мкм (рис. 4, б). АУП, сформированные катодным распылением, имеют гладкую поверхность (при толщине пленки до 6 нм перепад высоты рельефа слоя составляет 1,14 – 1,17 нм) и глобулярное строение (рис. 5, а) (измерения проведены с использованием, соответственно, спектрографического эллипсометра SENTECH SE800 и атомно-силового микроскопа NOVA-873). Пленки, полученные тлеющим разрядом, имеют чешуйчатое строение независимо от наличия или отсутствия затравочных наночастиц алмаза (рис. 5, б, в).

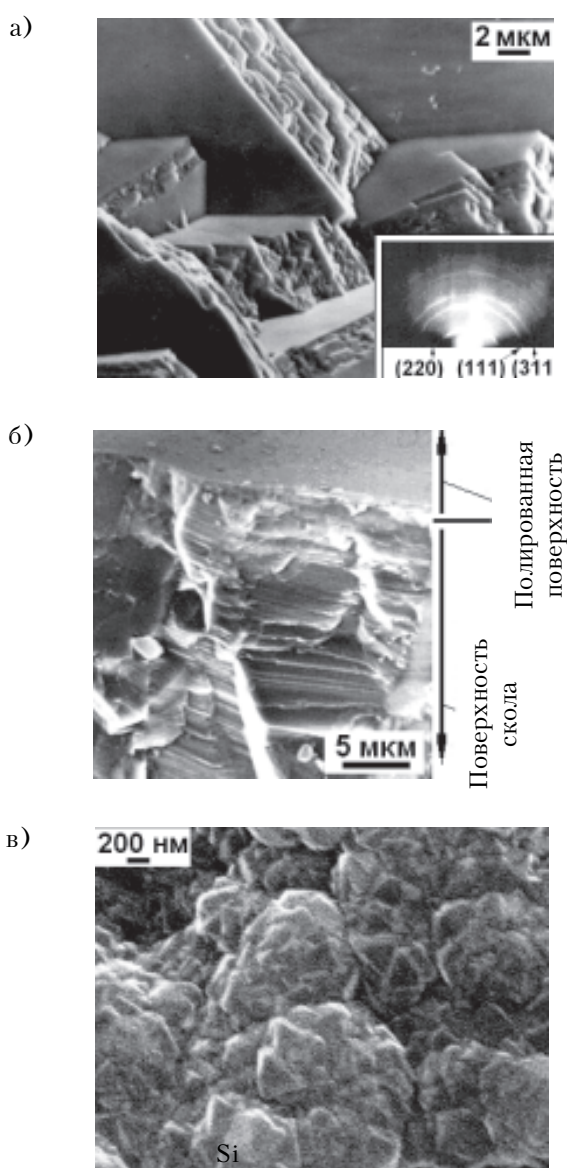


Рис. 4. Строение (РЭМ) поверхностей ППА, сформированных на подложках из Si дуговым разрядом (а, б) и СВЧ-разрядом (в) (вставка на а — электронограмма на отражение)

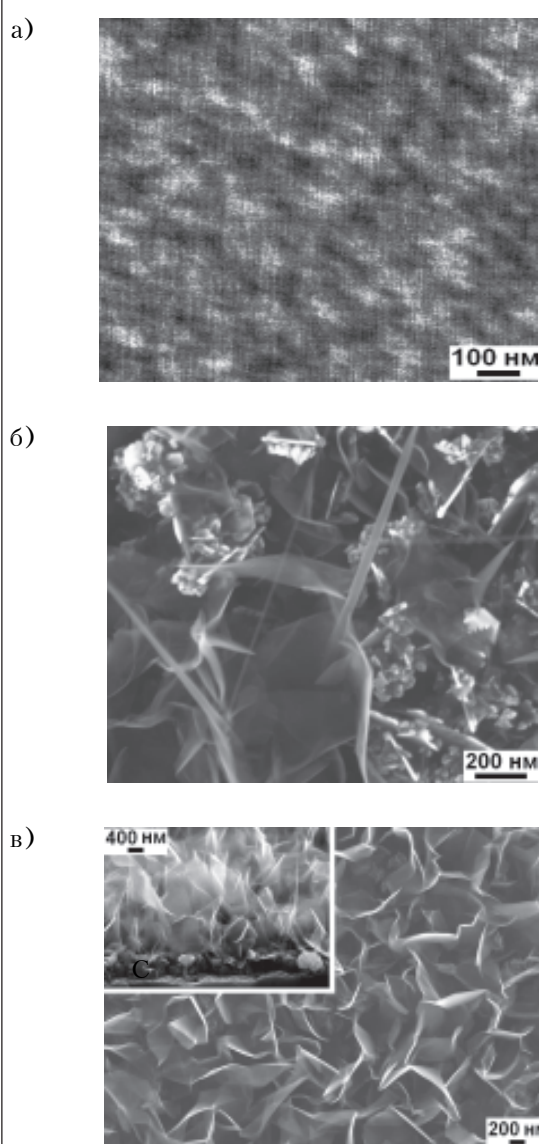


Рис. 5. Строение (а — АСМ, б, в — РЭМ) поверхностей АУП, сформированных на подложках из Si катодным распылением (а) и тлеющим разрядом без обработки (б) и с предварительной обработкой подложки в плазме H_2 (в, на вставке — скол пленки)

Автоэмиссионные характеристики ненакаливаемых катодов на слоистых структурах

Измерение эмиссионных характеристик планарных катодов проводилось при давлении 10^{-3} – 10^{-5} Па в постоянном и импульсном режимах (частота $f=50$ Гц, длительность $\delta=20$ – 50 мкс). Зазор Δ между ненакаливаемым катодом и анодом — цилиндром из нержавеющей стали диаметром 4 мм или композицией «стекло/ InSnO_x /люминофор» — составлял от 40 до 250 мкм. Если испытания в случае цилиндрического анода давали положительный результат при напряженности поля $E \leq 20$ В/мкм, т. е. была обнаружена эмиссия электронов, то для выяснения однородности автоэмиссии образцы испытывали с люминофорным экраном (стекло/ InSnO_x /люминофор) в качестве анода. Напряженность электрического поля в зазоре между анодом и катодом $E=U/\Delta$ (U — разность потенциалов между электродами), а плотность тока $J=I/S$ (I — ток, S — площадь катода). Автоэмиссионные испытания проводились на образцах, поверхность которых имела собственную проводимость.

От структур Si/ППА, в которых ППА синтезировали методом дугового или СВЧ-разряда, эмиссия электронов не обнаружена ни от поверхности формирования, ни от полированной по-

верхности. Эмиссия была получена (при полях с $E > 30$ В/мкм) только со скола ППА от границ пластин, формирующих зерна (вольт-амперная характеристика представлена на рис. 6, а, строение ППА — на рис. 4). Эмиссия электронов от ППА наблюдалась после осаждения на их полированную поверхность слоя АУП методом катодного распыления, при этом эмиссионная интенсивность больше у того образца, ППА которого содержит больше рентгеноаморфной углеродной фазы (данные по строению образцов можно получить из спектров на рис. 1). Достигнутый порог автоэмиссии был равен 2,2 В/мкм, однако уже при $E=3,8$ В/мкм происходил отрыв АУП от поверхности ППА. Исследования показали, что эмиссионные свойства углеродных пленок значительно улучшаются с увеличением их дефектности вплоть до формирования рентгеноаморфного материала, существенным признаком которого остается sp^3 -гибридизация связей валентных электронов атомов углерода. Для таких эмиттеров пороговые значения напряженности электрического поля, при которых наблюдается полевая эмиссия электронов, находятся в пределах от 2 до 20 В/мкм (рис. 7).

Эмиссия электронов от поверхности формирования структур W/WC и W/WC/ППА обнаружена у одного из образцов W/WC (рис. 6, б, кривая 1, порог 37,5 В/мкм), в то время как у образца W/WC/ППА, в котором поверхность ППА отполирована, эмиссии не обнаружено (происходили пробой при $E=42$ В/мкм на постоянном токе и $E=50$ В/мкм в импульсном режиме при скважности 1000). Снижение порога эмиссии электронов достигалось за счет осаждения АУП (методом катодного распыления) на поверхность образца W/WC (рис. 6, б, кривая 2, порог 22 В/мкм).

Исследование слоистых структур плавный кварц/ $\text{AlN}+\text{Al}$ и Si/ППА (ППА сформирована СВЧ-разрядом) показало, что только осаждение (катодное распыление) на их поверхность АУП толщиной 0,8 нм активирует эмиссию элек-

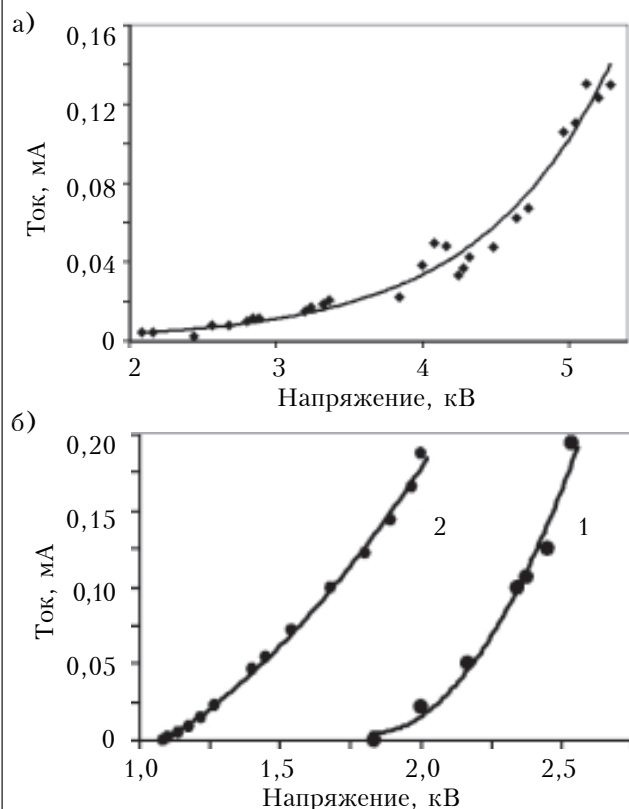


Рис. 6. ВАХ слоистых структур: а — Si/ППА (условия измерения: $\delta=200$ мкм, $f=50$ Гц, $\tau=20$ – 25 мкс); б — W/WC (1) и W/WC/АУП (2) (штыревой анод диаметром 1 мм, $\Delta=50$ мкм, $\tau=50$ мкс)

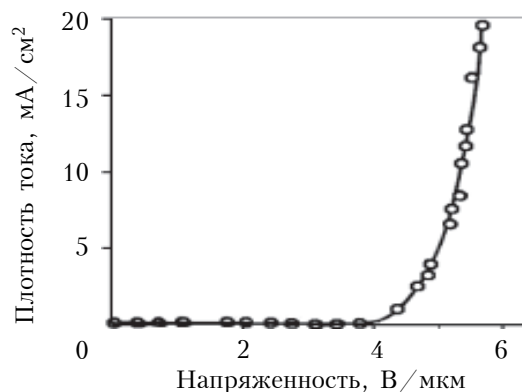


Рис. 7. ВАХ слоистой структуры Si/АУП (АУП получена методом тлеющего разряда, $\Delta=250$ мкм, $f=50$ Гц, $\tau=20$ – 30 мкс)

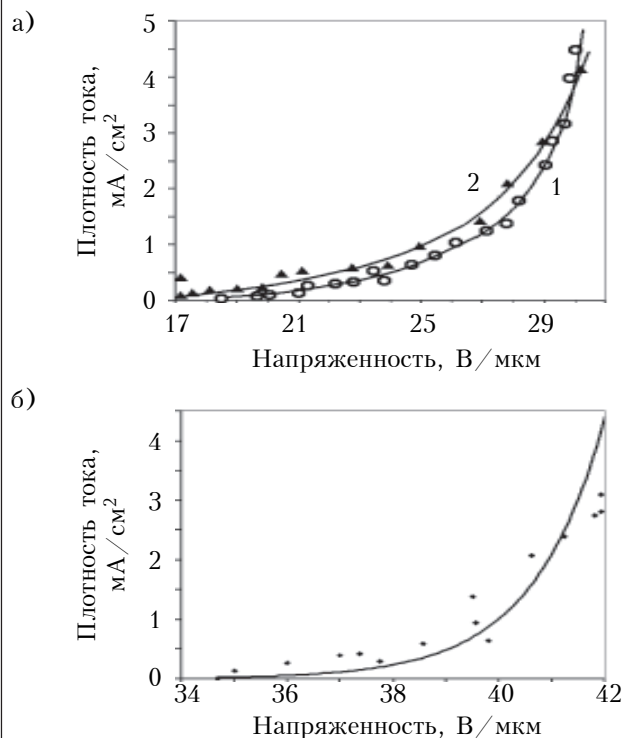


Рис. 8. ВАХ слоистых структур плавный кварц/AlN+Al/AUP (а: 1 — понижение, 2 — повышение напряжения) и Si/ППА/AUP (б) (штыревой анод диаметром 1 мм, $\Delta=80$ мкм, $\tau=50$ мкс)

тронов (рис. 8). Использование сильнолегированных бором ППА не приводит к возникновению эмиссии.

В результате исследований состава и строения пленок, составляющих слоистые структуры, а также их автоэмиссионных характеристик было установлено, что улучшение эмиссионных характеристик слоистых структур проявляется при использовании алмазоподобных углеродных пленок, полученных катодным распылением, эмиссия с поверхности которых происходит по границам глобул. Эффект улучшения эмиссионных характеристик слоистых катодов может быть связан с некристаллографическим упорядочением различных фаз, включая АУП, сформированные катодным распылением.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Busta H. N., Chen J. M., Shen Z. et al. Characterization of electron emitters for miniature X-ray sources // J. Vac. Sci. Technol. B. — 2003. — Vol. 21. — P. 344.
2. Дзбановский Н. Н., Минаков П. В., Пилевский А. А. и др. Сильноточная электронная пушка на основе автоэмиссионного катода и алмазной сетки // ЖТФ. — 2005. — Т. 75, № 10. — С. 111–114. [Dzbanovskii N. N., Minakov P. V., Pilevskii A. A. i dr. // ZhTF. 2005. Vol. 75, N 10. P. 111]
3. Самойлович М. И., Белянин А. Ф. Формирование наноструктурированных пленок алмазоподобных материалов. Часть 1, 2 // Нано- и микросистемная техника. — 2006. — № 7, с. 21–34; № 8, с. 14–25. [Samoilovich M. I., Belyanin

A. F. // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2006. N 7, P. 21; N 8, P. 14]

4. Белянин А. Ф., Самойлович М. И., Пашенко П. В. и др. Слоистые ненакаляемые катоды // Нано- и микросистемная техника. — 2005. — № 8. — С. 39–47. [Belyanin A. F., Samoilovich M. I., Pashchenko P. V. i dr. // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2005. N 8. P. 39]

5. Белянин А. Ф., Пашенко П. В., Борисов В. В. и др. Техника формирования многослойных ненакаляемых катодов // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. — 2002. — № 1, 2. — С. 64–67. [Belyanin A. F., Pashchenko P. V., Borisov V. V. i dr. // Sistemy i sredstva svyazi, televideniya i radioveshchaniya. 2002. N 1, 2. P. 64]

6. Белянин А. Ф., Самойлович М. И., Дзбановский Н. Н. и др. Формирование наноструктурированных пленок и слоистых структур иридия и поликластерного алмаза // Нано- и микросистемная техника. — 2008. — № 2. — С. 16–30. [Belyanin A. F., Samoilovich M. I., Dzbanovskii N. N. i dr. // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2008. N 2. P. 16]

7. Collins J. L. Diamond-like carbon (DLC) — a review // Industrial diamond review. — 1998. — Vol. 58, N 578. — P. 90–92.

Дата поступления рукописи
в редакцию 28.12.2012 г.

Belyanin A. F., Borisov V. V., Timofeev M. A., Lamskiy A. N. **Cold cathodes based on carbonic nanostructured layered structures.**

Keywords: layer structures, emission electronics.

The paper describes formation conditions for and the structure of diamond-like materials films used in the manufacture of layered cold cathodes of emission electronics devices. The authors study the structure and field emission properties of layered structures with polycluster diamond and diamond-like carbon films (DCF) formed by various methods. It has been found that the best emission properties are characteristic of DCFs obtained by cathode sputtering. Emission from the surface of such films occurs on the boundaries of the globules.

Russia, Moscow, CSRTI "Tekhnomash", Skobel'syn Institute of Nuclear Physics of MSU.

Белянін О. Ф., Борисов В. В., Тимофєєв М. А., Ламський О. М. **Нерозжарювані катоди на основі вуглецевих наноструктурованих шаруватих структур.**

Ключові слова: шаруваті структури, емісійна електроніка.

Розглянуто умови формування та будову плівок алмазоподібних матеріалів, використовуваних при виготовленні шаруватих нерозжарюваних катодів пристроїв емісійної електроніки. Вивчено будову і автоемісійні властивості шаруватих структур з полікластерними плівками алмазу і з алмазоподібними вуглецевими плівками (АВП), сформованими різними методами. Встановлено, що кращі емісійні характеристики мають АВП, отримані катодним розпыленням, емісія з поверхні яких відбувається по межах глобул.

Росія, м. Москва, ЦНДТІ «Техномаш», НДІ ядерної фізики ім. Д. В. Скобельщина МДУ.

УДК 537.52

К. ф.-м. н. А. Г. БОРИСЕНКО

Украина, г. Киев, Институт ядерных исследований НАНУ

E-mail: boris@kinr.kiev.ua

ИСТОЧНИК БЕСКАПЕЛЬНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Описан источник потоков плазмы твердофазных материалов, генерируемых вакуумно-дуговым разрядом в парах диффузно испаряемого анода. Источник способен эффективно создавать бескапельные потоки плазмы различных металлов в вакууме, а при напуске в вакуумную камеру необходимых рабочих газов — потоки газовой и газометаллической плазмы. Приведены основные характеристики разряда и параметры создаваемых плазменных потоков, имеющих компенсированный объемный заряд. Источник может быть использован для нанесения островковых и тонких металлических пленок на подложки из различных материалов, в том числе и диэлектрических.

Ключевые слова: вакуум, дуговой разряд, анод, наноструктура.

О возможности формирования тонких функциональных слоев в электронике с помощью катодно-дугового осаждения различных твердофазных материалов известно давно. В широко используемом дуговом разряде в парах материала катода протекающие физические процессы таковы, что делают неизбежным присутствие в создаваемых потоках плазмы капельно-кластерной фазы материала катода [1, 2]. Эти потоки содержат капли катодного материала, размеры которых изменяются от единиц до десятков микрометров. Исследования показали, что плазменные потоки, создаваемые с помощью вакуумной катодной дуги, содержат капли диаметром до 20 мкм, причем доля капель диаметром более 2 мкм в общем массопереносе превышает 90% [3]. Такие макровключения ухудшают характеристики покрытий, т. к. имеют плохое сцепление с подложкой и могут по размерам превосходить толщину покрытия (проступать сквозь него). Поэтому для решения ряда технологических задач в нано- и микроэлектронике такие потоки оказываются неприемлемыми и требуют разработки разных методов их дополнительной фильтрации [4–8]. Однако фильтрация потоков не только способствует удалению капельной фазы, но и приводит к значительному ослаблению интенсивности потоков плазмы на выходе источников [8, 9].

Бескапельные потоки плазмы твердофазных материалов способен генерировать несамостоятельный дуговой разряд в парах материала анода благодаря диффузной привязке разряда на аноде и испарению рабочего материала из широкой зоны [10, 11]. Реализация режима локального испарения рабочего материала с поверхности анода в этом типе разряда весьма

затруднена [12]. Кроме того, этот разряд позволяет изменять в генерируемых им потоках плазмы в довольно широком диапазоне значения коэффициента ионизации потока, т. е. долю ионов в потоке. При этом интенсивность выходящего потока остается практически постоянной. Как известно, воздействие ионов, особенно на начальной стадии процесса осаждения, способно влиять на процессы образования точечных дефектов на поверхности осаждения, процессы поверхностной диффузии, зарождение и развитие металлических кластеров, дальнейший рост и структуру пленки [13, 14]. Поэтому возможность регулирования доли ионов в осаждаемом потоке плазмы может быть дополнительно использована как средство управления процессами зарождения и роста кластеров и пленок, позволяющее целенаправленно влиять на структуру и свойства создаваемых пленок. Отмеченные выше особенности вакуумного дугового разряда в парах материала анода делают целесообразным и актуальным изучение его свойств и характеристик для различных рабочих материалов и в различных диапазонах разрядного тока, а также изучение различных конструкций источников плазмы, создаваемых на его основе.

Экспериментальное устройство

Принципиальная схема экспериментального устройства приведена на **рис. 1**. Разряд зажигался между охлаждаемым водой анодом 3 и заземленным накаливаемым катодом 1 в парах рабочего материала 2. В качестве рабочих материалов в проведенных экспериментах использовали медь, никель и титан, которые размещали непосредственно на аноде разряда 3 или в установившемся на аноде тигле. Зажигание разря-

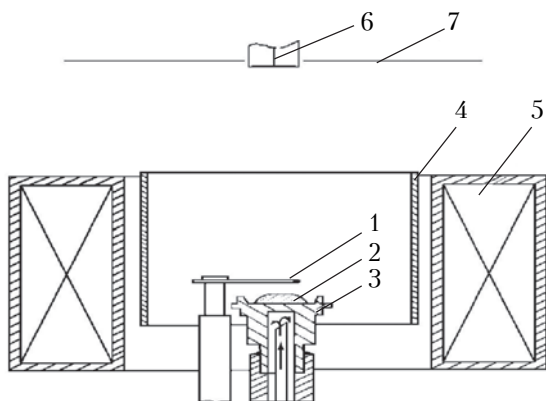


Рис. 1. Схема экспериментального устройства:

1 — накаливаемый катод; 2 — рабочий материал; 3 — водоохлаждаемый анод; 4 — цилиндрический электрод; 5 — магнитная катушка; 6 — электрический зонд; 7 — подложкодержатель

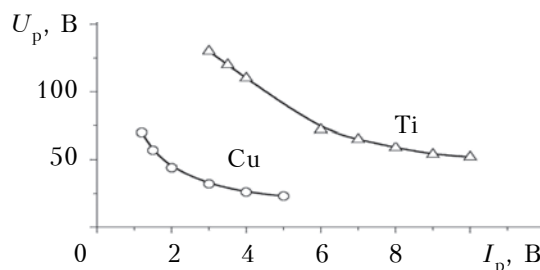
да происходило следующим образом. Между анодом 3 и предварительно нагретым катодом 1 прикладывали напряжение, которое приводило к нагреву рабочего материала термоэлектронами, эмитируемыми с катода, и к образованию в зоне между катодом и анодом паров рабочего вещества. Когда давление паров в разрядном промежутке достигало определенного значения, происходило зажигание разряда. Для облегчения зажигания разряда и с целью управления параметрами создаваемых плазменных потоков в зоне разряда использовали скрещенные электрическое и магнитное поля, создаваемые с помощью цилиндрического электрода 4 и магнитной катушки 5. Потенциал электрода U_4 изменялся относительно заземленного катода разряда. В описываемых экспериментах индукция магнитного поля B в зоне разрядного промежутка составляла $80 \cdot 10^{-4}$ Тл и была выбрана исходя из условий формирования максимальной доли ионной компоненты в создаваемых плазменных потоках. Для измерения параметров плазменных потоков использовали плоский электрический зонд 6, который располагался на оси системы на расстоянии $0,17-0,19$ м от анода или $0,09-0,11$ м от верхней плоскости электрода 4 и обычно находился под отрицательным относительно катода разряда потенциалом $U_6 = -200$ В.

Источник плазмы позволял работать с различными твердофазными материалами. Для нанесения на подложку оптических покрытий в качестве рабочего материала использовали медь, а для формирования резистивных слоев — такие материалы, как Ni, Ti, Cr, Ta и другие. В качестве подложек при определении скорости осаждения пленок использовали ситалловые пластины Ст. 50 размером $0,048 \times 0,06$ м, которые размещались на держателе подложек 7. Приводимые ниже скорости осаждения пленок, которые определялись весовым методом, являются усредненными по поверхности подложек. В описываемых экспериментах подложки располага-

лись на расстоянии $0,180-0,185$ м от анода разряда. Геометрические размеры описываемого источника в целом соответствуют размерам цилиндра $\varnothing 0,17 \times 0,20$ м, поэтому он легко размещается в вакуумной камере установок вакуумного напыления, например УВН 83П-1, УРМЗ.279.014П. Для получения высокого вакуума использовали магнитоэлектрический или диффузионный вакуумные насосы. Предельное давление в вакуумных камерах составляло $(0,5-1) \cdot 10^{-3}$ Па. В режиме напыления давление P_k в вакуумных камерах было близко к предельному и практически не превышало $1 \cdot 10^{-3}$ Па, а при работе с титаном наблюдалось уменьшение давления в камере примерно на порядок.

Результаты исследований

На рис. 2 для разных рабочих материалов приведены типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) разряда, т. е. зависимости напряжения разряда U_p от величины разрядного тока I_p . Видно, что ВАХ такого разряда имеет вид, типичный для вакуумной дуги, т. е. увеличение тока разряда сопровождается уменьшением разрядного напряжения. В нашем случае


 Рис. 2. ВАХ разряда, полученного в парах меди и в парах титана при $U_4 = 0$

при увеличении I_p в парах меди от 1,5 до 5 А напряжение U_p уменьшалось от 57 до 23 В. Для разряда в парах титана U_p изменялось от 130 до 52 В при увеличении I_p от 3 до 10 А. Вольт-амперная характеристика описываемого типа разряда кардинально отличается от ВАХ самостоятельного дугового разряда в газе, для которого рост разрядного тока сопровождается не понижением, а повышением напряжения разряда.

С учетом того, что в ряде случаев необходимы плазменные потоки, в состав которых входят и частицы металлов, и газы, нами были изучены характеристики разряда в таких комбинированных средах. На рис. 3 приведены ВАХ самостоятельного дугового разряда в парах титана при различном давлении газа, напускаемого в вакуумную камеру. В качестве рабочего газа был использован азот. Кривая 1 представляет собой типичную ВАХ разряда в парах Ti (при $P_k = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па) без напуска рабочего газа в вакуумную камеру, а кривая 6 получена в чистом азоте (при $P_k = 4 \cdot 10^{-2}$ Па), т. е. при отсутствии испаряемого рабочего материала на аноде. Кривые 2—5 получены при различном

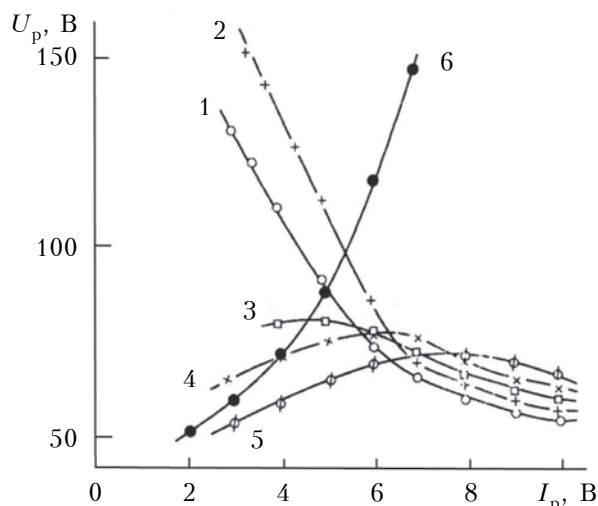


Рис. 3. ВАХ разряда в парах Ti при $P_k=1,3 \cdot 10^{-3}$ Па (1), в чистом азоте при $P_k=4 \cdot 10^{-2}$ Па (6) и в смеси паров Ti и азота, напускаемого в камеру при различном давлении (в Па):

2 — $2,7 \cdot 10^{-2}$; 3 — $3,3 \cdot 10^{-2}$; 4 — $4 \cdot 10^{-2}$; 5 — $5,5 \cdot 10^{-2}$

давлении напускаемого в вакуумную камеру газа и демонстрируют динамику изменения вольт-амперной характеристики самостоятельного дугового разряда в смеси паров материала анода и газа при различных соотношениях их давления в разрядном промежутке. Они свидетельствуют о возможности реализации устойчивого горения разряда в таких комбинированных средах и о возможности использования данного типа разряда для создания потоков газометаллической плазмы. Приведенные данные свидетельствуют также о возможности осуществления непрерывного перехода с одной рабочей среды на другую и обратно в условиях постоянного горения разряда и демонстрируют степень влияния появляющихся в газовом разряде металлических примесей на его вольт-амперную характеристику (кривые 4 и 6).

Возможная скорость роста осаждаемых пленок и покрытий относится к основным характеристикам технологических источников плазменных потоков. На рис. 4 приведены полученные для описываемого экспериментального устройства зависимости скорости роста q осаждаемых покрытий от тока разряда I_p для различных рабочих материалов: Cu, Ti и Ni. Результаты по-

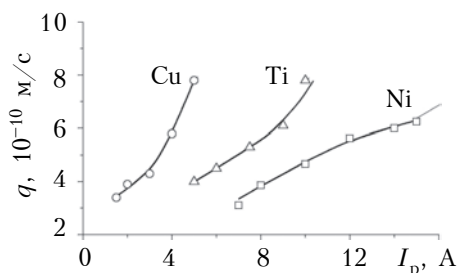


Рис. 4. Зависимости скорости роста осаждаемых пленок и покрытий от тока разряда для различных материалов

лучены в одной установке путем простой замены рабочего вещества на аноде разряда. Обращает на себя внимание тот факт, что при минимальных токах горения разряда значения q для трех материалов близки по величине. Это свидетельствует о том, что зажигание разряда для исследованных материалов происходит при одинаковых или близких значениях давления паров используемых рабочих материалов в разрядном промежутке. То есть, как и следовало ожидать, зажигание разряда происходит при некоем минимальном значении давления паров, практически одинаковом для разных рабочих материалов. При этом значение тока разряда зависит от материала. На рис. 4 также видно, что на начальной стадии, сразу после зажигания разряда, изменение q с увеличением тока разряда для всех материалов может быть аппроксимировано зависимостью, близкой к линейной. С ростом тока разряда характер зависимости $q(I_p)$ для Cu и Ti изменяется — рост q превышает линейный, а для Ni наблюдаемое изменение $q(I_p)$ остается близким к линейному и даже проявляет тенденцию к дальнейшему насыщению. Для прояснения этой ситуации требуются дополнительные исследования. В целом же, приведенные на рис. 4 данные показывают, что представленное экспериментальное устройство позволяет осаждать медные, титановые или никелевые покрытия со скоростью от 0,3 до 0,8 нм/с при токах разряда до 5, до 10 и до 15 А соответственно.

Проведенные измерения показали, что изолированный зонд, размещенный на оси создаваемых плазменных потоков, приобретает отрицательный потенциал, который незначительно изменяется по всему диаметру плазменного потока. Эти данные свидетельствуют о том, что формируемый плазменный поток имеет компенсированный объемный заряд и может быть успешно использован для нанесения кластеров и пленок на подложки из любых материалов, не только металлических и полупроводниковых, но и диэлектрических.

Проблема получения кластеров, наноструктур и пленочных систем с необходимыми свойствами требует поиска методов воздействия на составляющие комплексного процесса их роста. Использование регулируемой скорости осаждения и управление коэффициентом ионизации α поступающего на подложку плазменного потока может быть отнесено к числу основных таких методов. Поэтому измерение этих величин является важным и с научной, и с практической точек зрения. Как следует из рис. 4, изменяя ток разряда в парах меди от 1,5 до 5 А, можно менять q от 0,3 до 0,7 нм/с. Измерения показывают, что при этом одновременно изменяется коэффициент α , который также может быть определен как доля ионов в осаждаемом плазменном потоке. Способ измерения коэффициента иони-

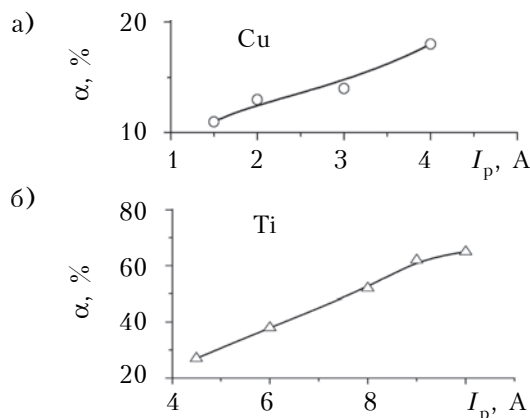


Рис. 5. Зависимость коэффициента ионизации плазменного потока α от тока разряда в парах меди (а) и в парах титана (б) при $I_4 = 0$

зации плазменного потока подробно описан в [10]. Из рис. 5, а видно, что α в этих условиях изменяется от 10 до 19%. Для разрядов в парах Ni и Ti наблюдались более высокие значения коэффициентов ионизации создаваемых плазменных потоков. Так, из рис. 5, б видно, что для разряда в парах Ti повышение тока разряда от 5 до 10 А позволяет создавать потоки титановой плазмы с изменяемыми от 25 до 60% значениями α .

Существует и дополнительная возможность изменения коэффициента ионизации плазменного потока — путем подачи положительного относительно катода разряда потенциала на цилиндрический электрод 4 и реализации дополнительного разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях. Приведенные на рис. 6 данные демонстрируют зависимость α от тока дополнительного разряда I_4 при горении разряда в парах трех разных материалов. Видно, что для меди при увеличении I_4 от 0 до 2 А можно изменять величину α от 11 до 48%. Эксперименты показали, что увеличение α происходит при незначительном изменении q . Для случаев разряда в парах Ti и Ni при токе основного разряда 10 А подача положительного потенциала на цилиндрический электрод 4 и увеличение тока

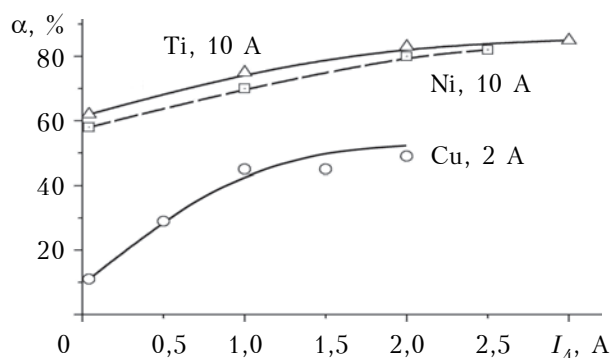


Рис. 6. Зависимость коэффициента ионизации α плазменного потока различных материалов от тока I_4 при разных значениях тока основного разряда

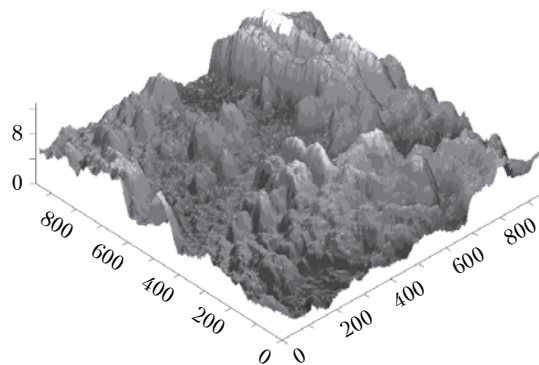


Рис. 7. Фотография участка титановой пленки (размеры — в нм)

дополнительного разряда от 0 до 3 А позволяет повышать α до 85%. Потенциал электрода 4 в этих условиях не превышает 145 В.

На рис. 7 приведено фото осажденной с помощью экспериментального устройства титановой пленки. Учитывая, что размерность отложенных по осям величин — нанометры, можно сказать, что фото свидетельствует о полном отсутствии капель в осаждаемом потоке плазмы. Можно также говорить о том, что минимальная толщина формируемых сплошных пленок не превышает 7 нм.

Следует отметить, что при самых неблагоприятных режимах работы источника максимальное содержание примесей в нанесенных медных покрытиях не превышало 0,05%, а работа в стандартных режимах позволяла легко создавать лазерные зеркала с коэффициентом отражения более 99% на длине волны 1,315 мкм.

Заключение

Таким образом, приведенные результаты исследований показывают, что описываемый источник плазмы действительно позволяет создавать бескапельные и высокоионизированные плазменные потоки и позволяет управлять ионизацией потока в достаточно широких пределах. Необходимо также отметить возможность успешного использования данного источника и для создания потоков газометаллической плазмы [11].

Представленные данные показывают возможность и целесообразность практического использования источников бескапельных плазменных потоков на основе несамостоятельного дугового разряда в парах материала анода для нанесения тонких пленок в технологиях наноэлектроники. Компенсированный объемный заряд создаваемых плазменных потоков позволяет наносить функциональные слои на подложки из различных материалов, включая диэлектрические. Возможность управления изменением долей ионов в создаваемых потоках плазмы может быть использована для целенаправленного влияния на процессы зародышеобразования металлических кластеров и пленок, в том числе на размер и плотность образующихся зародышей, структуру и

свойства возникающих на поверхности подложки образований.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Daalder J. E. Components of cathode erosion in vacuum arc // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1976. — Vol. 9, N 11. — P. 2379—2395.

2. Аксенов И. И., Коновалов И. И., Кудрявцева Е. Е. и др. Исследование капельной фазы эрозии катода стационарной вакуумной дуги // ЖТФ. — 1984. — Т. 54, Вып. 8. — С. 1530—1533. [Aksenov I. I., Konovalov I. I., Kudryavtseva E. E. i dr. // ZhTF. 1984. Vol. 54, Iss. 8. P. 1530]

3. Хороших В.М. II. Капельная фаза эрозии катода стационарной вакуумной дуги // Физическая инженерия поверхности. — 2004. — Т. 2, № 4. — С. 200—213. [Khoroshikh V.M. II. // Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti. — 2004. Vol. 2, N 4. P. 200]

4. Anders A. Approaches to rid cathodic arc plasma of macro- and nanoparticles: a review // Surface and Coatings Technology. 1999. — Vol. 120—121. — P. 319—330.

5. Бизюков А. А., Ромащенко Е. В., Середа К. Н. и др. Динамика капельной фазы в плазме дугового разряда низкого давления // Вісник Харківського університету. Серія фізична «Ядра, частинки, поля». — 2004, № 642. — Вип. 3/25/. — С. 42—46. [Bizyukov A. A., Romashchenko E. V., Sereda K. N. i dr. // Visnik Kharkivs'kogo universitetu. Seriya fizichna «Yadra, chastinki, polya». 2004, N 642. Iss. 3/25/. P. 42]

6. Белоус В. А., Хороших В. М. Динамика плазмы вакуумной дуги в магнитном поле и системы формирования плазменных потоков // Физическая инженерия поверхности. — 2005. — Т. 3, № 1—2. — С. 108—126. [Belous V. A., Khoroshikh V. M. // Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti. 2005. Vol. 3, N 1—2. P. 108]

7. Аксёнов Д. С., Аксёнов И. И., Стрельницкий В. Е. Подавление эмиссии макрочастиц в вакуумно-дуговых источниках плазмы // Вопросы атомной науки и техники. — 2007. — № 6. — С. 106—115. [Aksyonov D. S., Aksyonov I. I., Strel'nitskii V. E. // Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. 2007. N 6. P. 106]

8. Anders A. Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation. — New York: Springer, 2008.

9. Хороших В. М., Комарь А. А., Бровина М. А. Об эффективности вакуумно-дуговых источников плазмы с сепарацией капельной фазы эрозии катода // Физическая инженерия поверхности. — 2009. — Т. 7, № 1—2. — С. 54—59. [Khoroshikh V. M., Komar' A. A., Brovina M. A. // Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti. 2009. Vol. 7, N 1—2. P. 54]

10. Borisenko A. G., Saenko V. A., Rudnitsky V. A. Nonself-sustained arc discharge in anode material vapors // IEEE Trans Plasma Science. — 1999, August. — Vol. 27, N 4. — P. 877—881.

11. Borisenko A. G., Saenko V. A., Rudnitsky V. A. Semi-self sustained arc discharge in mixtures of metal vapors with gas // High Temperature. — 1999. — Vol. 37, N 1. — P. 1—8.

12. Borisenko A. G., Saenko V. A., Podziray J. S. Destruction of the arc discharge in vapors of the anode material by the gas entering into the vacuum chamber // Proceeding Int. Conf. on Plasma of Low Temperature Plasma, PLTP-03. — Ukraine, Kyiv. — 2003. — P. 6-2-5.

13. Палатник Л. С., Фукс М. Я., Косевич В. М. Механизм образования и субструктура конденсированных пленок. — Москва: Наука. Главная редакция физ.-мат. литературы, 1972. [Palatnik L. S., Fuks M. YA., Kosevich V. M. Mekhanizm obrazovaniya i substruktura kondensirovannykh plenok. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiz.-mat. literatury, 1972]

14. Гусева М. Б. Ионная стимуляция в процессах образования тонких пленок на поверхности твердого тела // Соросовский образовательный журнал. — 1998. — № 10. — С. 106—112. [Guseva M. B. // Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal. 1998. N 10. P. 106]

*Дата поступления рукописи
в редакцию 05.04 2013 г.*

Borisenko A. G. The source of macroparticle-free plasma flows for nanoelectronics.

Keywords: vacuum, arc discharge, anode, nano-structure.

The paper describes the source of solid-phase materials plasma flow generated by vacuum-arc discharge in vapors of diffuse evaporated anode. The source can efficiently create macroparticle-free plasma flows of various metals in vacuum, and provided the vacuum chamber is filled with required working gases, the source creates gas and gas-metal plasma flows. The main characteristics of the discharge and the parameters of the plasma flows with compensated volume charge are presented. The source can be used for application of island and thin metal films on substrates of different materials, including dielectrics.

Ukraine, Kiev, Institute for Nuclear Research of NASU.

Борисенко А. Г. Джерело безкраплинних плазмових потоків для наноелектроніки.

Ключові слова: вакуум, дуговий розряд, анод, наноструктура.

Описано джерело потоків плазми твердофазних матеріалів, генерованих вакуумно-дуговим розрядом в парах дифузно випаровуваного аноду. Джерело здатне ефективно створювати безкраплинні потоки плазми різних металів у вакуумі, а при напусканні у вакуумну камеру необхідних робочих газів — потоки газової та газометалічної плазми. Наведено основні характеристики розряду та параметри створюваних плазмових потоків, що мають компенсований об'ємний заряд. Джерело може бути використане для нанесення острівцевих і тонких металевих плівок на підкладки з різних матеріалів, в тому числі й діелектричні.

Україна, м. Київ, Інститут ядерних досліджень НАНУ.

УДК 621.3.049.776

Д. т. н. В. Г. СПИРИН

Россия, Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р. Е. Алексеева

E-mail: spvl49@mail.ru

УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫВОДОВ БЕСКОРПУСНЫХ МИКРОСХЕМ

Рассмотрены конструкция и принцип действия двух устройств контроля качества сварных соединений алюминиевых выводов бескорпусных микросхем с контактными площадками тонкопленочной платы.

Ключевые слова: микросборка, контроль качества сварки выводов микросхем.

При монтаже бескорпусных микросхем (БМ) алюминиевые проволоочные и ленточные выводы присоединяют ультразвуковой микросваркой. Качество сварного соединения проволоки с контактными площадками (КП) платы можно проверить методом обрыва свободной части приваренного вывода, диаметр которого обычно составляет 30–60 мкм. Качество же сварки ленточных выводов, которые присоединяются к КП платы с помощью крестообразного электрода, этим методом проверить невозможно ввиду высокой прочности ленты (обычно такой вывод имеет толщину 20–30 мкм и ширину 150–300 мкм). Поэтому возникла необходимость в разработке устройства для контроля качества ультразвуковой сварки ленточных алюминиевых выводов БМ с КП платы. Упрощенная конструкция такого устройства [1] со звуковым или световым сигналом показана на **рис. 1**.

К пружинным контактам 10 припаивают два провода, которые идут к устройству звуковой или световой сигнализации. При настройке или при работе с устройством его берут за нижний корпус, как ручку или карандаш. Настройку устройства на заданное усилие 20 ± 2 Г произво-

дят нижней и верхней втулками. При приложении к игле заданного усилия хвостовик 8 замыкает контакты 10, которые в свою очередь включают звуковую или световую сигнализацию.

При контроле качества сварного соединения иглой устройства касаются боковой поверхности ленточного вывода в месте сварки, при этом иглу располагают под углом 30–60° к поверхности платы. Затем плавно перемещают нижний корпус в направлении иглы до тех пор, пока не услышат звуковой или не увидят световой сигнал. Если при этом отрыва вывода не произошло, то сварное соединение считается качественным. Недостатком данного устройства является то, что к нему нужно изготавливать специальные звуковые или световые устройства, которые сигнализируют достижение заданного усилия нажима на ленточный вывод. В связи с этим автором было разработано устройство [2], основанное на органолептическом методе фиксации достижения заданного усилия (**рис. 2**).

Отличие конструкции нового устройства от устройства, изображенного на **рис. 1**, состоит в том, что в нем исключены верхняя втулка, хвосто-

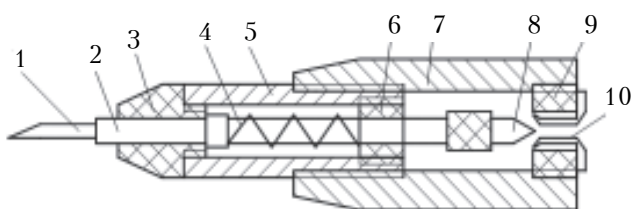


Рис. 1. Устройство со звуковым (световым) сигналом: 1 – игла; 2 – стержень; 3 – наконечник; 4 – пружина; 5 – нижний корпус; 6 – нижняя втулка; 7 – верхний корпус; 8 – хвостовик; 9 – верхняя втулка; 10 – контакты

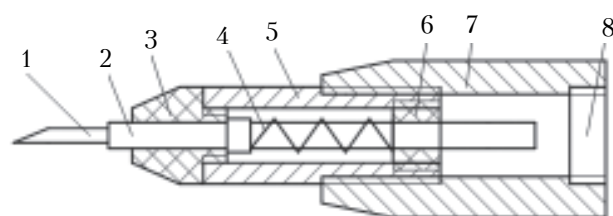


Рис. 2. Устройство, основанное на органолептическом методе:

1 – игла; 2 – стержень; 3 – наконечник; 4 – пружина; 5 – нижний корпус; 6 – втулка; 7 – верхний корпус; 8 – крышка

вик и контакты и добавлена металлическая крышка 8. Настройку на заданное усилие производят перемещением втулки 6. При достижении заданного усилия при настройке устройства или при контроле качества сварного соединения, пальцы ощущают легкий удар стержня 2 о крышку 8, при этом слышен характерный звук удара. Это устройство является относительно недорогим, т. к. оно конструктивно проще, чем предыдущее, и не требует внешних систем сигнализации. Кроме того, оно легко настраивается и надежно в эксплуатации.

Разработанные устройства контроля качества сварных соединений алюминиевых выводов БМ, присоединяемых к КП платы методом ультразвуковой сварки, обладают следующими преимуществами по сравнению с известными методами и устройствами: обеспечивают высокую производительность и достоверность при определении качества сварных соединений; отличаются простотой конструкции, низкой себестоимостью и высокой надежностью при эксплуатации. Немаловажным преимуществом является также то, что контроль выполняется неразрушающим методом.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. А.с. 1589743 СССР. Устройство для контроля качества приварки вводов и выводов микросхем / В. С. Кораблев, В. Г. Спирин., В. З. Гончаров. — 01.05.90. [A.s. 1589743 SSSR. / V. S. Korablev, V. G. Spirin., V. Z. Goncharov. 01.05.90.]

2. Заявка № 4799691. Устройство для контроля качества приварки вводов и выводов микросхем / В. Г. Спирин. —

Решение о выдаче патента РФ от 15.06.92. [Zayavka № 4799691. / V. G. Spirin. Reshenie o vydache patenta RF ot 15.06.92.]

*Дата поступления рукописи
в редакцию 17.01 2013 г.*

Spirin V. G. Devices for quality control of welded joints of leads of packageless chips.

Keywords: microassembly, quality control of micro-circuit leads welding.

The author considers the design and operation of two devices for quality control of welded joints between aluminum leads of packageless microcircuits and contact pads of a thin-film circuit.

Russia, Arzamas polytechnic institute (branch) of the R.E. Alekseev NSTU.

Спирин В. Г. Пристрої для контролю якості зварних з'єднань виводів безкорпусних мікросхем.

Ключові слова: мікроскладання, контроль якості зварювання виводів мікросхем.

Розглянуто конструкцію та принцип роботи двох пристроїв контролю якості зварних з'єднань алюмінієвих виводів безкорпусних мікросхем з контактними площинками тонкоплівкової плати.

Росія, Арзамаський політехнічний інститут (філія) НГТУ ім. Р. Є. Алексєєва.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Митягин А. Ю., Фещенко В. С. Фотоприемники УФ-диапазона на природных алмазах (на английском языке + CD с переводом текста на русский язык).— Одесса: Политехперіодика, 2013.

В монографии представлены результаты исследований фотоприемников на основе природных алмазов, в частности конструкции, технологии изготовления и результаты тестирования экспериментальных моделей одно- и многоэлементных УФ-фотоприемников. Показана принципиальная возможность создания на основе алмаза высокочувствительных элементов матрицы. В книге также представлены разработки двухканальных алмазных фотоприемников, работающих в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах.

НОВЫЕ КНИГИ



Красников Г. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов.— Москва: Техносфера, 2011.

Рассмотрены особенности работы субмикронных МОП-транзисторов, направления развития и ограничения применения методов масштабирования транзисторов, требования к подзатворным диэлектрикам, технологии их формирования, различные конструкции стокоисточковых областей МОПТ и технологические процессы создания мелкозалегающих легированных слоев. Рассмотрено влияние масштабирования размеров элементов в субмикронную область и технологических процессов на надежность и долговечность субмикронных МОП-транзисторов. Представлены данные о влиянии технологических процессов изготовления субмикронных СБИС на деградацию подзатворного диэлектрика, а значит — на уровень выхода, надежность и долговечность годных готовых изделий.

УДК 621.315.5

Е. В. АНТОНОВА, к. ф.-м. н. В. Р. КОЛБУНОВ,
д. ф.-м. н. А. С. ТОНКОШКУР, к. ф.-м. н. А. Ю. ЛЯШКОВ

Украина, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара
E-mail: vdnv@yandex.ru

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ КОМПОЗИТА «ПОЛИЭТИЛЕН — ДИОКСИД ВАНАДИЯ»

Получены образцы композита «полиэтилен — VO_2 » по технологии изготовления самовосстанавливающихся предохранителей типа polyswitch. Объемная доля диоксида ванадия в образцах изменялась в пределах от 0,25 до 0,6. Показано, что электропроводность композита носит перколяционный характер. Приведены результаты исследования микроструктуры, температурной зависимости сопротивления и вольт-амперных характеристик образцов полимерного композита, а также влияния на них содержания VO_2 .

Ключевые слова: электропроводность, композит, полиэтилен, VO_2 , самовосстанавливающийся предохранитель типа polyswitch.

Разработка стабильных объемных критических терморезисторов на основе компонента с фазовым переходом «металл — полупроводник» (ФПМП) важна для ряда областей электроники и электротехники, где пленочные структуры не могут быть использованы из-за сравнительно малых рабочих токов [1, 2]. Одной из нерешенных до настоящего времени проблем технологии терморезисторов, которая сдерживает их производство и использование, является нестабильность параметров материала. Эта нестабильность связана с изменением линейных размеров образца из-за перестройки кристаллической решетки при ФПМП и с механическим разрушением вследствие этого как структуры керамики в целом, так и отдельных кристаллитов VO_2 [3, 4]. Одним из перспективных направлений преодоления этого недостатка является разработка на основе поликристаллических порошков VO_2 композитов, где в качестве материала матрицы используется эпоксидная смола [5], полиэтилен [5, 6] и политетрафторэтилен (тефлон) [7].

В последнее время достигнуты определенные успехи в исследованиях и технологии изготовления композитов с проводящими наполнителями [8–10], в частности самовосстанавливающихся предохранителей (структур polyswitch) на основе графита или технического углерода в полиэтиленовой матрице [11–13]. Тем не менее, область применения таких материалов может быть существенно расширена, если в качестве наполнителя использовать материалы с ФПМП. Такие структуры, кроме защиты от токовых перегрузок и высоких температур, в перспективе могут реализовать функцию отключения при низких температурах, что важно для электронных

устройств, не предназначенных для эксплуатации при пониженных температурах.

В настоящей работе приведены результаты исследования микроструктуры, температурной зависимости сопротивления и вольт-амперных характеристик образцов полимерного композита и влияния на них содержания VO_2 .

Образцы для исследований

Исходными компонентами композита были мелкодисперсный кристаллический диоксид ванадия (VO_2), полученный методом восстановления из пентаоксида ванадия (V_2O_5) углеродом [14], и полиэтилен низкой плотности (15803-020) [15, 16]. Процесс синтеза композита «полиэтилен — VO_2 » проводился по технологической схеме, сходной с технологией изготовления самовосстанавливающихся предохранителей типа polyswitch [17].

Схема включала в себя следующие операции:

- механическое измельчение полиэтилена низкой плотности до размера частиц менее 1 мм;
- смешивание порошка диоксида ванадия с размером частиц менее 20 мкм с измельченным в фарфоровой ступке полиэтиленом;
- прессование шихты под давлением 20 МПа и получение образцов в виде дисков толщиной порядка 1 мм и диаметром 10 мм;
- прогревание полученных дисков при температуре плавления кристаллитов полиэтилена (110–130°C) [15];
- повторное перетирание материала (для улучшения однородности образцов), его прессование под давлением 20 МПа в виде дисков толщиной порядка 1 мм;
- впрессовывание электродов из тонкой медной сетки в образцы;

— прогревание полученных дисков при температуре 110–130°C в течение 1 часа для окончательной формовки и стабилизации механических свойств образцов (не подвергнутые такой обработке образцы композита имели склонность к расслоению при термоциклировании).

Методика исследований

Теоретическое значение плотности образцов композита $\rho_x^{(th)}$ определяли из задаваемого значения доли наполнителя (микрочастиц VO_2) v_{VO_2} . При этом плотность диоксида ванадия (ρ_{VO_2}) принималась равной 4,339 г/см³, полиэтилена — 0,92 г/см³ [16]. Геометрическая плотность синтезированных образцов композита ρ_x определяли на основе данных об их массе и объеме.

Исходя из предположения о гомогенном распределении наполнителя в объеме полимерной матрицы усредненное расстояние L между частицами наполнителя можно определить по формуле [18]

$$L = D(1 + (1 - \rho_{VO_2}) / \rho_{VO_2})^{1/3} - D,$$

где D — средний размер зерен наполнителя.

Для изучения микроструктуры материала образцы охлаждали в жидком азоте, затем производили их механический раскол. На поверхность скола для повышения электропроводности поверхности напыляли тонкий слой углерода. Микрофотографии структуры образцов получали при помощи сканирующего электронного микроскопа.

При исследовании температурных зависимостей скорость изменения температуры T составляла не более 1°C/мин при точности измерения 0,5°C. Один цикл измерений включал в себя нагрев и охлаждение образца.

Измеряли статические вольт-амперные характеристики (**ВАХ**) образца, помещенного в экранную камеру. Данные регистрировали после установления термодинамического равновесия исследуемого образца с окружающей средой. Чтобы не допустить перегрева образцов, количество удельной теплоты, выделяемой на образцах в единицу времени за счет протекания электрического тока, ограничивалось (не более 300 Дж/см³).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Структура

Микроструктура исследуемых образцов приведена на **рис. 1**. Материал композита представляет собой неоднородную систему, в которой кристаллиты проводящей компоненты — VO_2 — размещаются в матрице изолятора — полиэтилена (**ПЭ**). Размеры частиц диоксида ванадия варьируются от 1–2 до 30 мкм, что соответствует в верхнем пределе размеру зерен VO_2 в

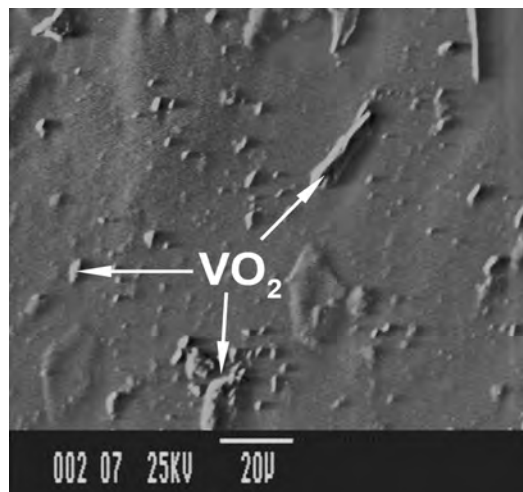


Рис. 1. Микроструктура образца композита «полиэтилен — VO_2 » ($v_{VO_2}=0,6$)

исходном материале, который был использован для изготовления композита [14].

В **таблице** представлены некоторые физические параметры исследуемых образцов. Измеряемая геометрическая плотность композитов ρ_x при малых значениях объемной доли VO_2 больше расчетной $\rho_x^{(th)}$, а при больших значениях v_{VO_2} — наоборот. Эффективные значения плотности полиэтилена $\rho_{ПЭ}$, образующего матрицу композита, были оценены в соответствии с формулой для двухкомпонентной гетерогенной системы с невзаимодействующими компонентами:

$$\rho_{ПЭ} = (\rho_x - \rho_{VO_2} v_{VO_2}) / (1 - v_{VO_2})$$

и в предположении, что плотность микрочастиц VO_2 не изменяется в процессе изготовления композита.

При малых значениях v_{VO_2} эффективная плотность композита превышает максимально возможные значения этого параметра (1 г/см³ [15, 16]) для чистого полиэтилена, когда он весь находится в кристаллическом состоянии. Это можно связать с образованием поверхностных более плотных фаз [19], что, в соответствии с [20], вероятно для композитов с полупроводниковыми

Физические параметры исследованных композитов и их матричной фазы

Параметр	Объемная доля VO_2				
	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60
$\rho_x^{(th)}$, г/см ³	1,77	1,94	2,29	2,63	2,97
ρ_x , г/см ³	2,22	2,36	2,22	2,65	2,80
L , мкм	11,8	9,9	7,1	5,2	3,7
$\rho_{ПЭ}$, г/см ³	1,51	1,51	0,81	0,97	0,49

наполнителями. В области больших концентраций наполнителя VO_2 обнаруживается уменьшение плотности $\rho_{\text{ПЭ}}$, значения которой становятся меньше минимального значения этого параметра для чистого ПЭ ($0,85 \text{ г/см}^3$ [15, 16]), что свидетельствует о значительной пористости полиэтилена, образующего матрицу композита. Это также подтверждается уменьшением плотности полиэтилена матрицы после электротепловой «тренировки» образца при измерении температурных и полевых зависимостей его сопротивления [3].

Зависимость электропроводности от объемной доли наполнителя

Характер зависимости удельной электрической проводимости композита σ_x от объемной доли наполнителя имеет вид (рис. 2), наблюдаемый в диэлектриках с проводящими включениями [21].

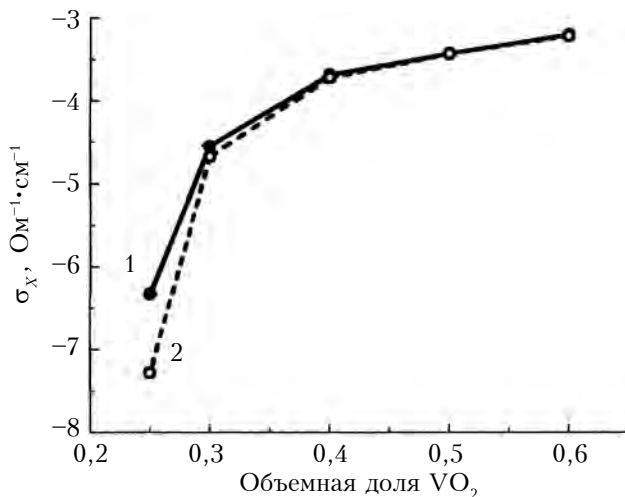


Рис. 2. Зависимость удельной электрической проводимости композита σ_x при температуре 25°C от объемной доли наполнителя v_{VO_2} до (1) и после (2) электротепловой «тренировки»

При значениях объемной доли полупроводникового наполнителя $v_{\text{VO}_2} \geq 0,4$ удельная электрическая проводимость композита σ_x медленно возрастает до значений, характерных для электропроводности диоксида ванадия [22]. Это соответствует области зависимости $\sigma_x(v_{\text{VO}_2})$ за порогом протекания. Резкое увеличение электропроводности обнаруживается в области значений объемной доли проводящего наполнителя от 0,2 до 0,3. Таким образом, порог протекания в исследуемой неоднородной системе соответствует известным представлениям перколяционной теории электропроводности [21, 23]. Электротепловая «тренировка» приводит к существенным изменениям только в области значений v_{VO_2} , меньших порога протекания.

Температурная зависимость удельного электрического сопротивления

На рис. 3, где представлены графики температурной зависимости удельного сопротивления ρ образцов композита при разных объемных долях фазы диоксида ванадия, видно, что зависимость имеет гистерезисный характер. Это связано со структурными изменениями из-за ФПМП в диоксиде ванадия [3, 4], а также с характером протекания релаксационных процессов деформации в полимерах.

Электрическое сопротивление образцов композитов с объемной долей диоксида ванадия 0,3 испытывает два скачка, так же как и для полимерного композиционного материала на основе VO_2 и политетрафторэтилена в [5]. Скачок с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления в области температуры 64°C связан с фазовым переходом «металл — полупроводник» в VO_2 [22]. Скачок в области температуры $80 - 90^\circ\text{C}$, имеющий положительный температурный коэффициент сопротивления (позисторный эффект), может быть интерпретирован так же, как и в структурах polyswitch — разрывом цепей протекания электрического тока по частицам проводящей фазы вследствие резкого увеличения объема полимерной матрицы в указанной температурной области.

Для образца с объемной долей наполнителя $v_{\text{VO}_2} = 0,6$ позисторный участок не наблюдается. Это может быть интерпретировано в рамках представлений о перколяционной электропроводности [21, 23]. Такое высокое содержание проводящей компоненты соответствует об-

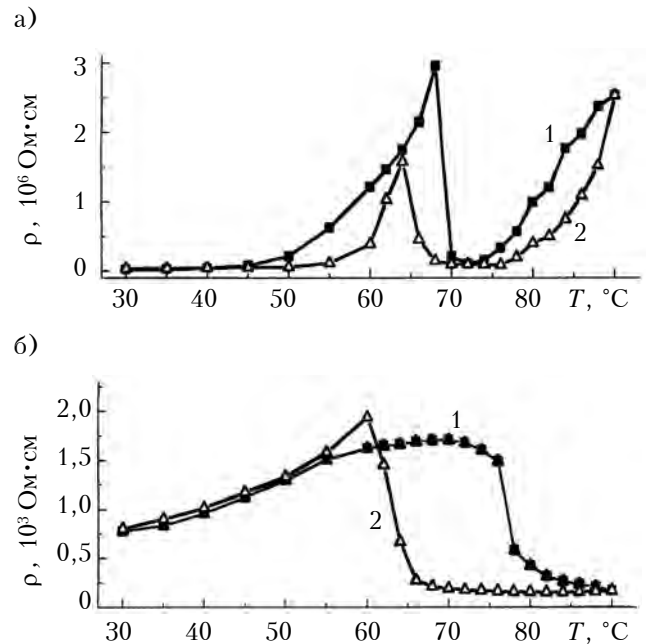


Рис. 3. Температурная зависимость удельного сопротивления образцов композита при $v_{\text{VO}_2} = 0,3$ (а) и $v_{\text{VO}_2} = 0,6$ (б) (1 — нагрев образца, 2 — охлаждение)

ласти зависимости электропроводности σ_x от v_{VO_2} выше порога протекания (см. рис. 2), где характер проводимости в образце определяется самим наполнителем.

Вольт-амперные характеристики

Характерной особенностью вольт-амперных характеристик $J(E)$ исследуемых образцов композита «полиэтилен — диоксид ванадия» является их нелинейность (рис. 4). С ростом прикладываемого напряжения количество теплоты, выделяемой в образце в единицу времени, увеличивается, и он нагревается. При температуре фазового перехода «полупроводник — металл» в фазе VO_2 его сопротивление скачкообразно уменьшается, что ведет к существенному перераспределению электрического поля в такой структуре и обуславливает наблюдаемую нелинейность и S-образность ВАХ.

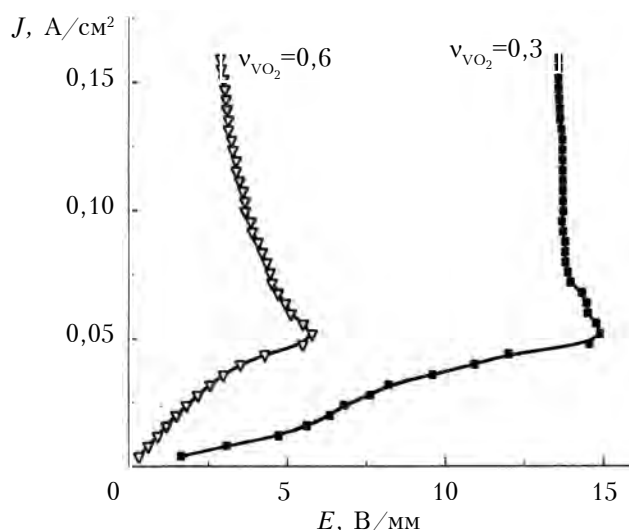


Рис. 4. ВАХ образцов композита с разной объемной долей диоксида ванадия

ВАХ для образца с объемной долей диоксида ванадия $v_{VO_2}=0,3$ смещена в сторону относительно больших значений напряженности электрического поля. Она в большой степени напоминает ВАХ варистора [24]. По-видимому, в формировании наблюдаемой варисторной ВАХ существенным механизмом также является туннелирование носителей заряда через барьер, сформированный разделяющим кристаллиты VO_2 слоем матричной фазы полиэтилена (или поверхностной фазы [20]) в самом тонком его месте [8].

Мелкокристаллический VO_2 в образце композита с $v_{VO_2}=0,6$ образует в полимерной матрице перколяционные каналы проводимости, что обуславливает значительное снижение удельного сопротивления (примерно в 10^3 раз, см. рис. 3), а также смещение вольт-амперной характеристики в сторону меньших значений напряженности электрического поля (рис. 4).

Заключение

В результате исследования композита «полиэтилен — VO_2 » с разным содержанием VO_2 , полученных по технологии, сходной с технологией изготовления самовосстанавливающихся предохранителей типа polyswitch, было обнаружено, что электропроводность образцов носит перколяционный характер.

При изучении механизма токопереноса в композите установлено, что электрическое сопротивление образцов скачкообразно уменьшается в области температуры фазового перехода «полупроводник — металл» в диоксиде ванадия. Для образцов, у которых объемная доля VO_2 была меньше порога протекания, обнаружено увеличение сопротивления при температуре около 90°C вследствие резкого увеличения объема полимерной матрицы с ростом температуры.

Установлено, что с ростом содержания поликристаллических частиц VO_2 ВАХ композита изменяют форму от близкой к варисторной до S-образной.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Jakub A. Koza, Zhen He, Miller Andrew S., Jay A. Resistance switching in electrodeposited VO_2 thin films // Chemistry of Materials. — 2011. — Vol. 23, Iss. 18. — P. 4105–4108. — DOI: 10.1021/cm2019394.
2. Yang Zheng, Hart Sean, Ko Changhyun et al. Studies on electric triggering of the metal-insulator transition in VO_2 thin films between 77 K and 300 K // J. Appl. Phys. — 2011. — 110 (3). — P. 033725. — DOI: 10.1063/1.3619806.
3. Bruckner W., Opperman H., Reihelt W. et al. Vanadiumoxide: Darstellung, Eigenschaften, Anwendung. — Berlin: Akademie-Verlag, 1983.
4. Ivon A. I., Kolbunov V. R., Chernenko I. M. Stability of electrical properties of vanadium dioxide based ceramics // J. Eur. Ceram. Soc. — 1999. — Vol. 19. — P. 1883–1888. — DOI: 10.1016/S0955-2219(98)00285-4.
5. Pan Y., Wu G. Z., Yi X. S. Artificial thermistors prepared by incorporating V_2O_5 and VO_2 into polymer matrices // Proc. of International Conf. on Electronic Ceramics & Applications. «Electroceramics V». — Aveiro, Portugal. — 1996. — Book 2. — P. 195.
6. Kerimov M. K., Kurbanov M. A., Sultanahmedova I. S. et al. Varistor effect in polymer-semiconductor composites // Semiconductors. — 2010. — Vol. 44, N 7. — P. 934–942. — DOI: 10.1134/S1063782610070134.
7. Turov V. V., Gorbik P. P., Ogenko V. M. et al. Influence of tetraethylammonium bromide on phase inhomogeneity of disperse vanadium dioxide particles in matrix of polyethylene glycol // Applied Surface Science. — 2000. — Vol. 166. — P. 492–496. — DOI: 10.1016/S0169-4332(00)00481-5.
8. Mamunya Ye. P., Davydenko V. V., Pissis P., Lebedev E. V. Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders // European Polymer Journal. — 2002. — Vol. 38. — P. 1887–1897. — DOI: 10.1016/S0014-3057(02)00064-2.
9. Aneli J., Zaikov G., Mukbaniani O. Physical principles of the conductivity of electrical conducting polymer composites (review) // Molecular Crystals and Liquid Crystals. — 2012. — Vol. 554. — N 1. — P. 167–187. — DOI:10.1080/15421406.2012.633866.
10. A. B. Glot A. B., Makeev A. M. Non-linear electrical characteristics of composite layers conductor-dielectric //

Physics and Chemistry of Solid State. — 2001. — Vol. 2, N 3. — P. 375—378.

11. Pat. 19970130 US5747147. Conductive polymer composition and device / M. F. Wartenberg, J. G. Lahlouh, James Toth. — 05.05.1998.

12. Pat. 19960319 TW538416. Conductive polymer compositions and method of making the conductive polymer composition / M. F. Wartenberg, J. G. Lahlouh, James Toth. — 21.06.2003.

13. Degtyar'ov A. V., Tonkoshkur A. S., Lyashkov A. Yu. Electrical properties of posistor composite materials based on polyethylene-graphite // Multidiscipline Modeling in Materials and Structures. VSP. — 2006. — Vol. 2. — N 4. — P. 435—441.

14. Деклар. пат. 40041 А України. Спосіб одержання діоксиду ванадію / О. І. Івон, І. М. Черненко, В. Р. Колбунов. — 2001. — Бюл. № 6. [Deklar. pat. 40041 A of Ukraine / O. I. Ivon, I. M. Chernenko, V. R. Kolbunov. 2001. Byul. N 6]

15. Peacock A. J. Handbook of Polyethylene: Structures, Properties and Applications (Plastics Engineering). — New York-Basel: Marcel Dekker. Inc., 2000.

16. ГОСТ 16337-77. Полиэтилен низкой плотности. [ГОСТ 16337-77]

17. Degtyar'ov A. V., Tonkoshkur A. S. Electric conductivity of PTCR polyethylene-graphite composites // Ukrainian Journal of Physics. — 2007. — Vol. 52. — N 9. — P. 863—867.

18. Shandryuk G. A., Matukhina E. V., Vasil'ev R. B. et al. Effect of H-bonded liquid crystal polymers on CdSe quantum dot alignment within nanocomposite // Macromolecules. — 2008. — Vol. 41, Iss. 6. — P. 2178—2185. — DOI: 10.1021/ma701983y.

19. Mamunya E. P., Davidenko V. V., Lebedev E. V. Effect of polymer-filler interface interactions on percolation conductivity of thermoplastics filled with carbon black // Composite Interfaces. — 1996. — Vol. 4. — N 4. — P. 169—176. — DOI: 10.1163/156855497X00145.

20. Fistul V. I., Polyanskaya T. A. Percolation of the current in a polymer-semiconductor structure // Semiconductors. — 1993. — Vol. 27. — N 11/12. — P. 984—987.

21. Kirkpatrick S. Percolation and conduction. I. Transport theory of percolation processes // Rev. Mod. Phys. — 1973. — Vol. 45. — P. 574—588. — DOI: 10.1103/RevModPhys.45.574.

22. Berglund C. N., Guggenheim H. J. Electronic properties of VO₂ near the semiconductor-metal transition // Physical Review. — 1969. — Vol. 185. — N 3. — P. 1022—1033. — DOI: 10.1103/PhysRev.185.1022.

23. Shklovskii B. I., Efros A. L. Electronic properties of doped semiconductors. — Berlin: Springer-Verlag, 1983.

24. Gupta T. K. Application of zinc oxide varistors // Journal of American Ceramic Society. — 1990. — Vol. 73

(7). — P. 1817—1840. — DOI: 10.1111/j.1151-2916.1990.tb05232.x.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 27.05 2013 г.*

Antonova E. V., Kolbunov V. R., Tonkoshkur A. S., Lyashkov A. Yu. **Electrical conductivity of the «polyethylene — vanadium dioxide» composite.**

Keywords: electrical conductivity, composite, polyethylene, VO₂, self-healin polyswitch fuse.

Samples of the «polyethylene — VO₂» composite have been obtained using technologies for manufacturing self-healing polyswitch fuses. The volume fraction of vanadium dioxide in the samples ranged from 0,25 to 0,6. It is shown that the electrical conductivity of the composite is of percolation character. The paper presents research results of the microstructure, the resistance temperature dependence and current-voltage characteristics of polymer composite samples, as well as the impact of the VO₂ content on the samples.

Ukraine, Oles Gonchar Dnepropetrovsk National University.

Антонова Є. В., Колбунов В. Р., Тонкошкур А. С., Ляшків А. І. **Електропровідність композиту «поліетилен — діоксид ванадію».**

Ключові слова: електропровідність, композит, поліетилен, VO₂, самовідновлюваний запобіжник типу polyswitch.

Отримано зразки композиту «поліетилен — VO₂» за технологією виготовлення самовідновлюваних запобіжників типу polyswitch. Об'ємна частка діоксиду ванадію в зразках змінювалася в межах від 0,25 до 0,6. Показано, що електропровідність композиту носить перколяційний характер. Наведено результати дослідження мікроструктури, температурної залежності опору і вольт-амперних характеристик зразків полімерного композиту, а також впливу на них змісту VO₂.

Україна, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара.

РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

- Барабанов Николай Алексеевич*, старший преподаватель, Одесский национальный политехнический университет
- Белявский Евгений Данилович*, докт. физ.-мат. наук, профессор, НТУУ «Киевский политехнический институт»
- Глушеченко Эдуард Николаевич*, канд. техн. наук, начальник отдела, Научно-производственное предприятие «Сатурн», г. Киев
- Данилов Владимир Васильевич*, докт. техн. наук, заведующий кафедрой, Донецкий национальный университет
- Дружинин Анатолий Александрович*, докт. техн. наук, профессор, Национальный университет «Львовская политехника»
- Евтух Анатолий Анатольевич*, докт. физ.-мат. наук, заведующий отделом, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев
- Ключник Николай Тимофеевич*, канд. техн. наук, начальник отдела, ЦНИТИ «Техномаш-ВОС», г. Москва
- Козловский Сергей Иванович*, докт. физ.-мат. наук, заведующий отделом, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев
- Марьянчук Павел Дмитриевич*, докт. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой, Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича
- Николаенко Юрий Егорович*, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НТУУ «Киевский политехнический институт»
- Панов Леонид Иванович*, канд. техн. наук, профессор, Одесский национальный политехнический университет
- Перевертайло Владимир Леонтьевич*, канд. физ.-мат. наук, зам. директора по научной работе, НИИ микроприборов НТК «ИМК» НАНУ, г. Киев
- Проценко Иван Ефимович*, докт. физ.-мат. наук, профессор, Сумский государственный университет
- Спирин Владимир Георгиевич*, докт. техн. наук, Арзамасский политехнический институт, филиал Нижегородского технического университета им. Р. Е. Алексеева
- Томашик Василий Николаевич*, докт. хим. наук, ученый секретарь, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев
- Старжинский Николай Григорьевич*, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, г. Харьков
- Шинкаренко Владимир Викторович*, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев



тел./факс +38(057) 758-70-30,
758-70-29, 758-72-30

www.expos.com.ua

16-я специализированная выставка 8—10 октября 2013 г.



**Контрольно-измерительные
приборы**



**Электроника. Информатика.
Связь**



**Энергетика. Электротехника.
Энергосбережение**

**ПВЦ «Радмир Экспохолл»
(г. Харьков ул. Академика Павлова, 271)**

*Номер готовили
Арзамас, Днепропетровск, Донецк,
Киев, Львов, Москва, Одесса, Сумы,
Харьков, Черновцы*



Пишите
Подписывайтесь
Читайте