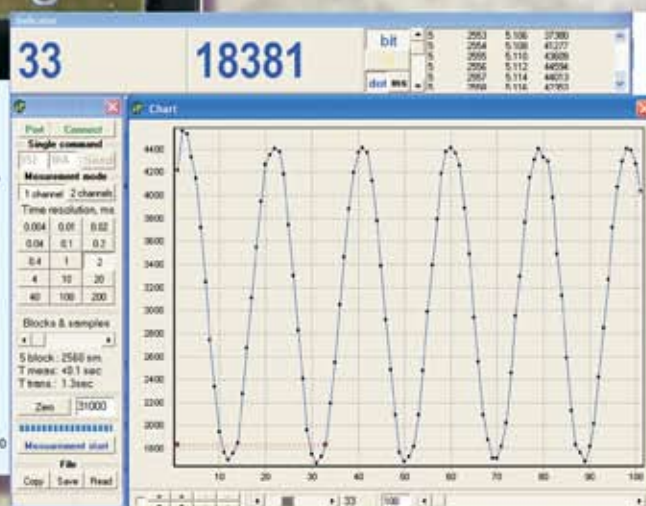
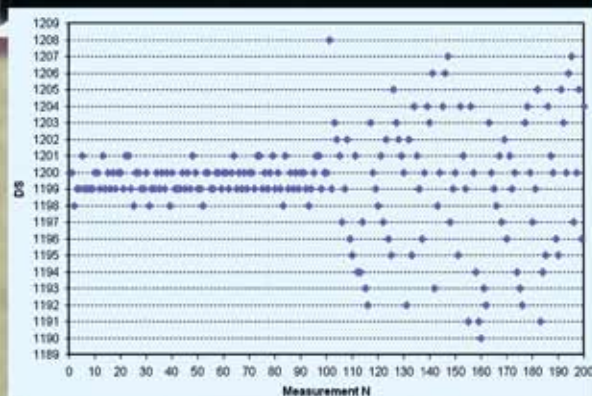


ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

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. Корецкая.

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. Ащеулов (г. Черновцы)
Д.т.н. В. В. Баранов (г. Минск)
К.т.н. Э. Н. Глушеченко,
зам. гл. редактора (г. Киев)
Д.т.н. В. В. Данилов (г. Донецк)
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. Шпотюк (г. Львов)

УЧРЕДИТЕЛИ

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

Одобрено к печати Ученым советом
ОНПУ
(Протокол № 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-

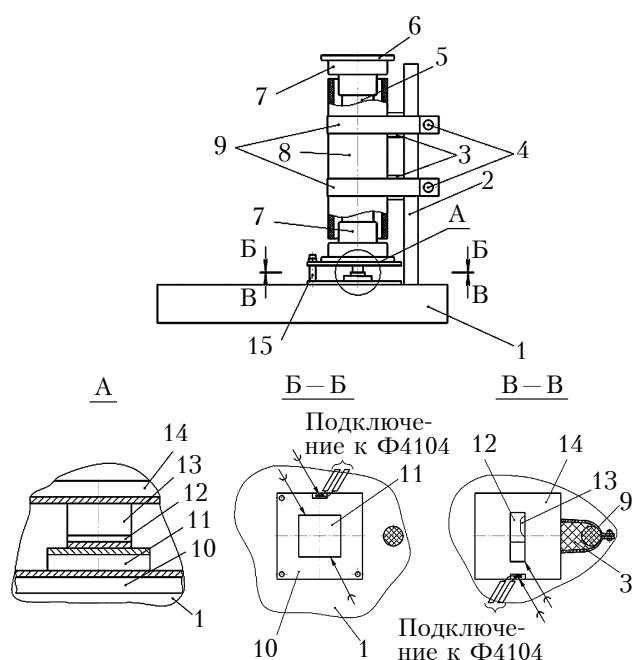


Рис. 1. Испытательная установка:
1 — основание; 2 — штатив; 3 — упор; 4 — винтовой зажим; 5 — внутренняя труба; 6 — подставка для грузов; 7 — пустотелые насадки; 8 — внешняя труба; 9 — хомут; 10 — нижняя, неподвижная ПП со слоем фольги; 11 — жесткая ПП с испытуемым покрытием; 12 — гибкая ПП с испытуемым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

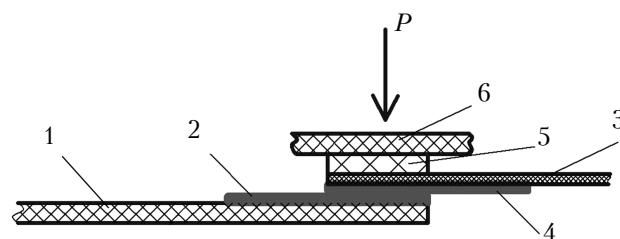


Рис. 2. Схема контактирования:
1 — жесткая ПП с контактом 2; 3 — гибкая ПП с контактом 4; 5 — эластомерная прокладка; 6 — жесткая пластина

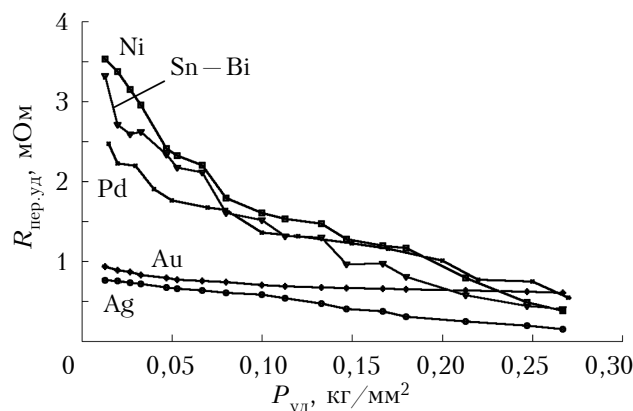


Рис. 3. Типичные зависимости переходного контактного сопротивления от давления для различных покрытий

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.

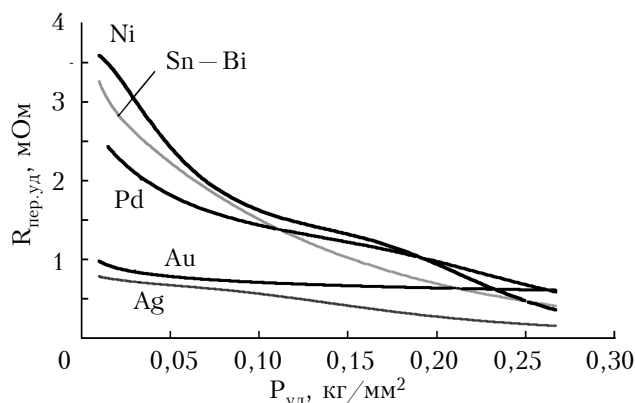


Рис. 4. Расчетные зависимости переходного контактного сопротивления от давления для различных покрытий

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.

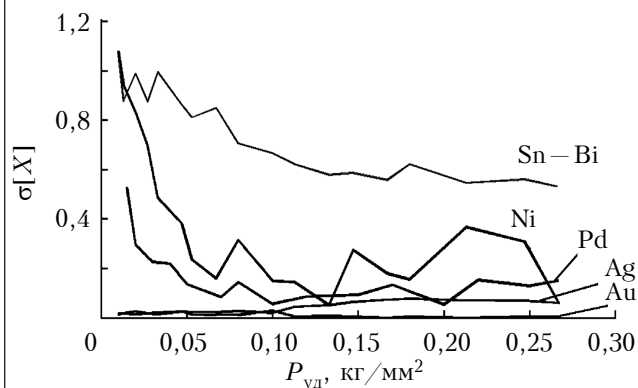


Рис. 5. Зависимость среднеквадратического отклонения значений $R_{пер.уд}$ от давления для различных покрытий

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 konstruirovaniye 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: Vyshcha 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-висмут, 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

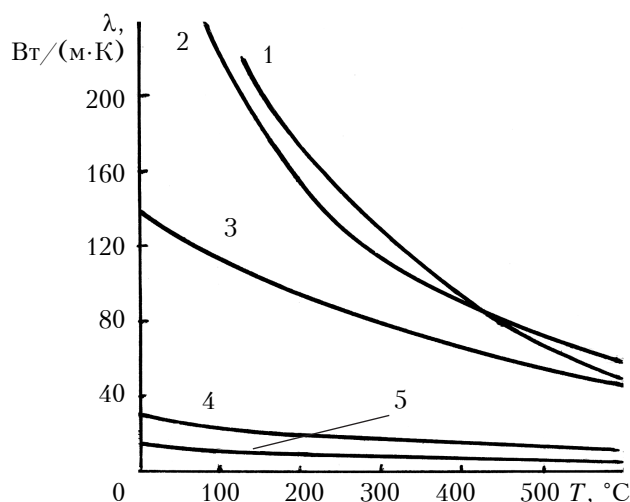


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности для различных материалов: 1 — оксид бериллия (ВБ-100-1); 2 — нитрид алюминия повышенной чистоты; 3 — нитрид алюминия НИТАЛ-17; 4, 5 — корундовая керамика (4 — поликор (ВК-100); 5 — 22ХС(ВК-94-1))

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

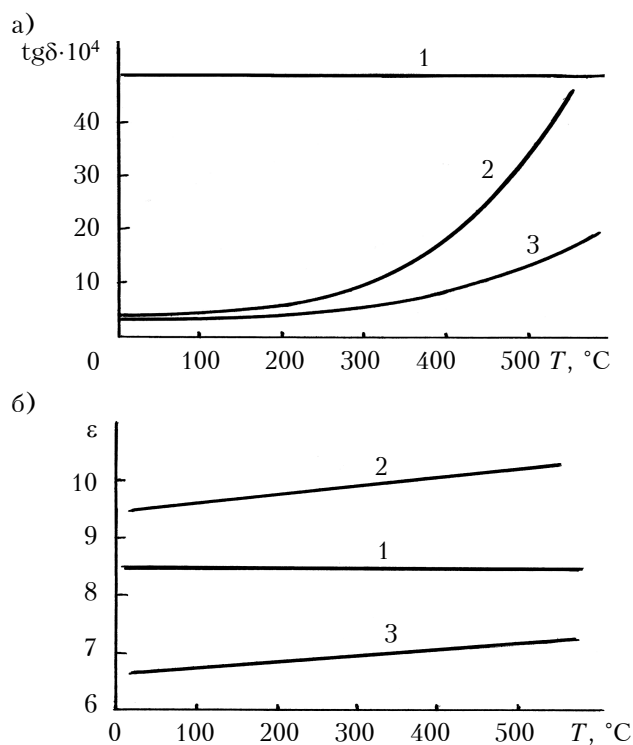


Рис. 2. Температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь (а) и диэлектрической проницаемости (б) на частоте 5,5 ГГц для различных материалов:

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°С. 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

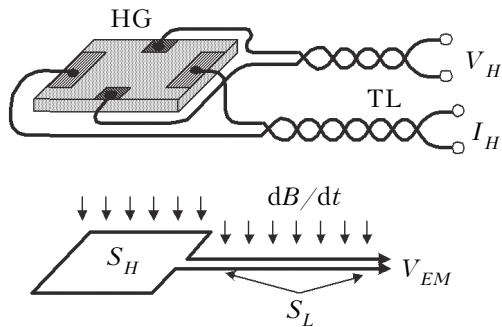


Рис. 1. Наведение электромагнитной помехи в контуре сенсора Холла

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

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

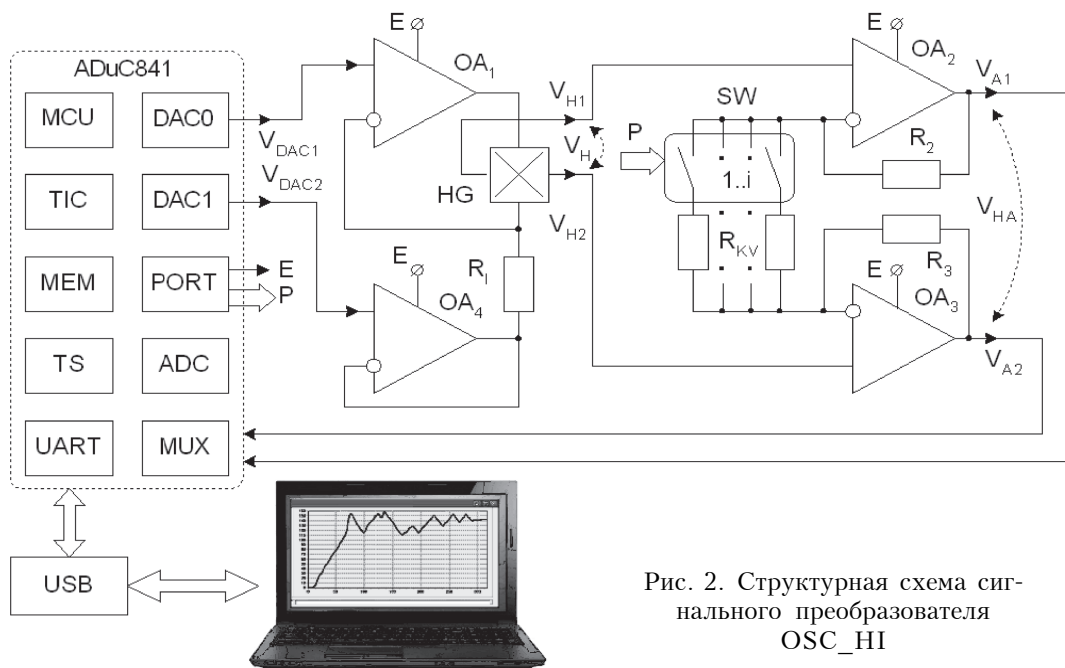


Рис. 2. Структурная схема сигнального преобразователя OSC_HI

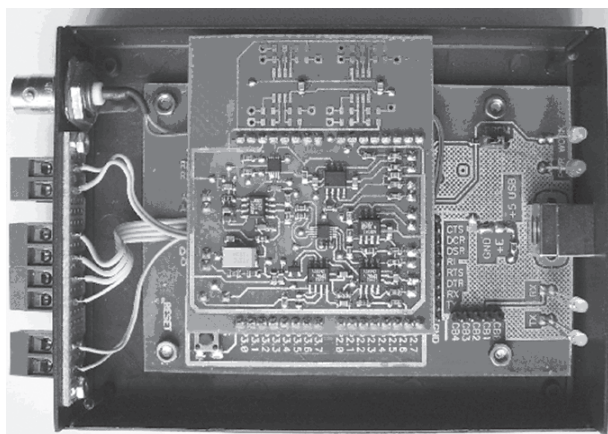


Рис. 3. Фотография сигнального преобразователя OSC_HI

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, выводы 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-

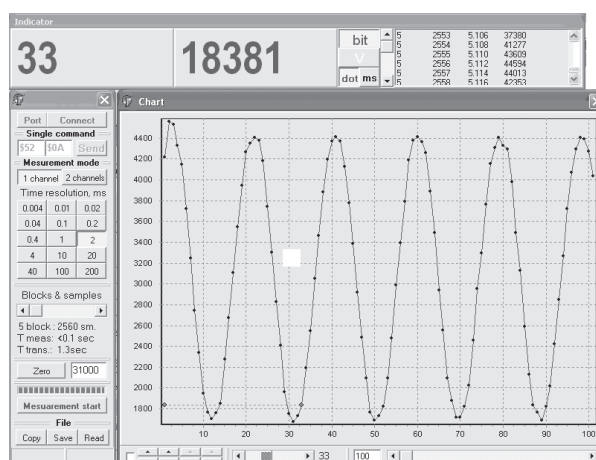


Рис. 4. Вид окон программного обеспечения OSC_HI

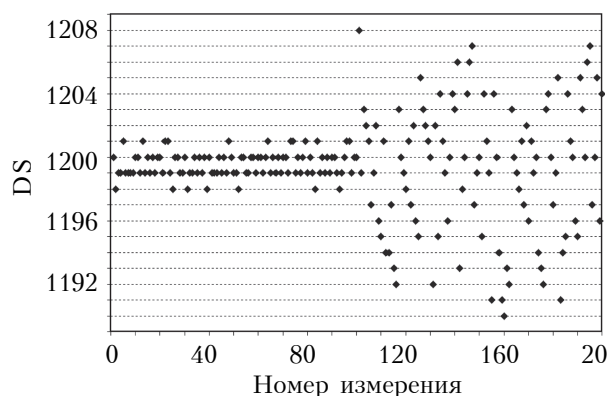


Рис. 5. Пример типичных результатов сигнального преобразования без ЭМ-помехи (измерения от 1 до 100) и с ЭМ-помехой (от 101 до 200)

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-

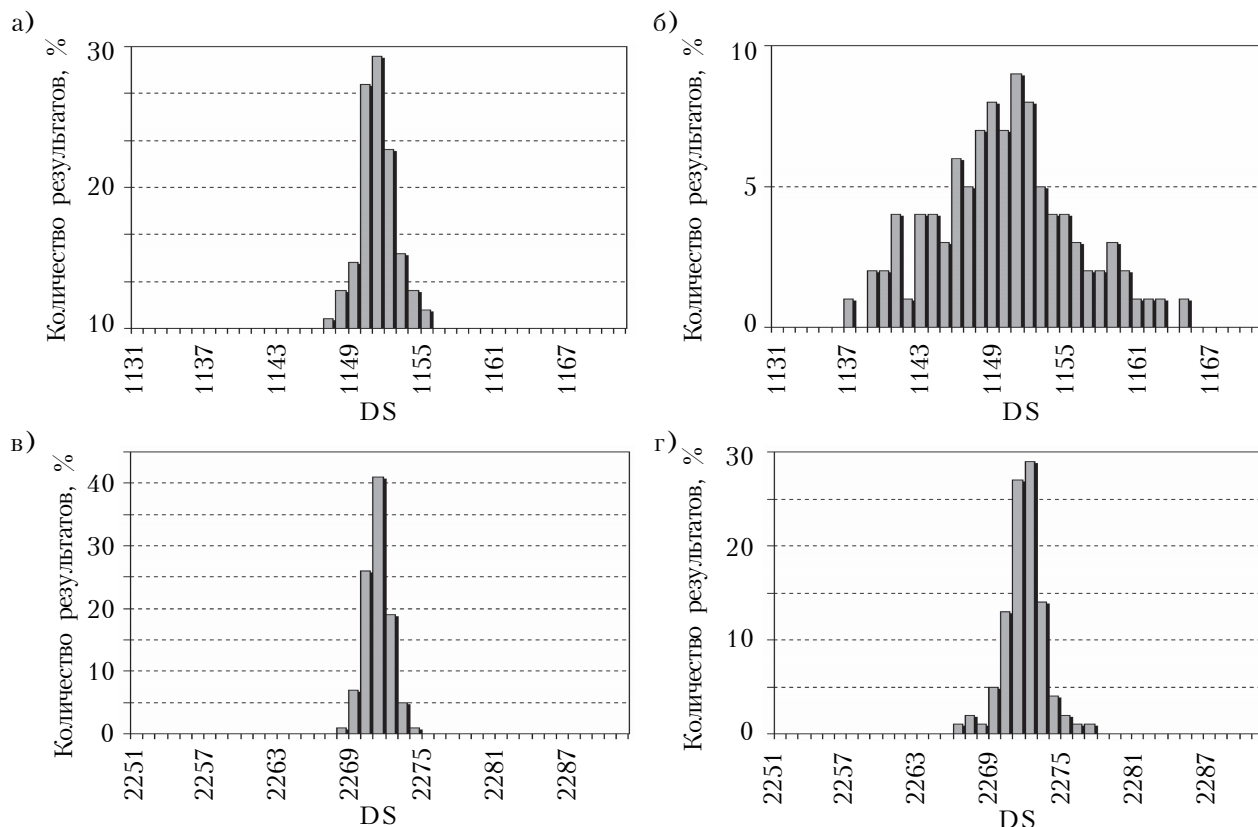


Рис. 6. Гистограммы распределения результатов аналого-цифрового преобразования сигналов от сенсора Холла при $I_H = 1$ мА без помехи (а, в) и с ЭМ-помехой (б, г) в режиме Direct (а, б) и в режиме Bidirect (в, г)

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;

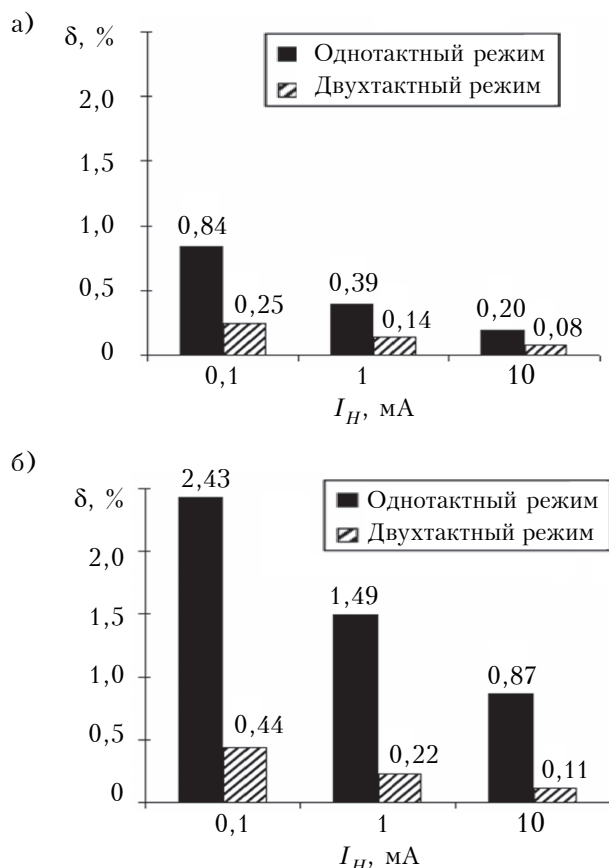


Рис. 7. Относительная ошибка сигнального преобразования без помехи (а) и с ЭМ-помехой (б) при разных режимах измерения

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., Potencki 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.

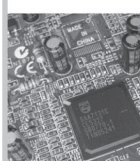
Готра З. Ю., Голяка Р. Л., Ільканич В. Ю., Марусенкова Т. А., Бойко О. В. **Підвищення електромагнітної завадостійкості сигнальних перетворювачів на сенсорах Холла.**

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**
XIII международная специализированная промышленная выставка

**30 октября-01 ноября
2013
Петербургский СКК**

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.