

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.315.592

А.В. Ермачихин, В.Г. Литвинов, Н.Б. Рыбин, Ю.В. Воробьев**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИСМУТА НА ШУМОВЫЕ СВОЙСТВА МИКРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЯ $(\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5)_{1-x}\text{Bi}_x$**

Исследовано влияние легирующей примеси Bi на электрофизические свойства аморфных тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$: вольт-амперные характеристики, зависимости величины спектральной плотности мощности низкочастотного шума от содержания Bi, зависимости величины спектральной плотности мощности низкочастотного шума от температуры.

Ключевые слова: спектроскопия низкочастотного шума, халькогенидные стеклообразные полупроводники, спектральная плотность мощности, легирование, фазовое состояние.

Введение. Материалы на основе Ge-Sb-Te интенсивно изучаются, поскольку являются основой для создания устройств фазовой памяти. Принято считать, что для большинства материалов их свойства в аморфной фазе во многом схожи со свойствами кристалла [1]. Однако для материалов системы Ge-Sb-Te это не так, в них расположение атомов в аморфном состоянии существенно отличается от кристаллической фазы, что приводит к значительному различию в удельном сопротивлении и большому оптическому контрасту. Эти уникальные свойства лежат в основе практических применений Ge-Sb-Te в качестве активной области элементов оптической и электрической памяти [1].

Материал $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST225) относится к халькогенидным стеклообразным полупроводникам (ХСП), представляет собой сплав теллура с полуметаллами германием и сурьмой, может находиться в двух фазовых состояниях: аморфном и кристаллическом. Резистивные структуры на основе GST225 имеют вольт-амперную характеристику (ВАХ) с участком отрицательного дифференциального сопротивления [2, 3]. В настоящее время система Ge-Sb-Te является перспективной для создания наноразмерных ячеек элементов энергонезависимой памяти, работающей на обратимых фазовых переходах «аморфное \leftrightarrow кристаллическое состояние».

Для совершенствования технологии изготовления элементов фазовой памяти и получения ячеек с улучшенными характеристиками необ-

ходимо иметь материал с управляемыми электрическими и оптическими свойствами. Одним из распространённых методов управления электрическими свойствами полупроводниковых материалов является легирование различными химическими элементами. Однако для ХСП легирование как метод, распространённый в технологии кристаллических полупроводников, не является эффективным для управления электрической проводимостью, что связано с большой плотностью локализованных состояний в щели подвижности, «закрепляющих» уровень Ферми вблизи середины щели подвижности [4]. Тем не менее, в работах [5, 6] было показано, что введение добавки висмута в GST225 влияет на электрофизические свойства материала.

Изменение фазы материала GST225 и уровня его легирования Bi должно влиять на концентрацию свободных носителей заряда, дрейфовую подвижность и электрическую проводимость и, следовательно, на генерацию низкочастотного шума. Шумы в электронных элементах ограничивают динамический диапазон рабочих сигналов, поэтому изучение особенностей спектра низкочастотного шума в структурах $(\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5)_{1-x}\text{Bi}_x$ представляет практический интерес. Кроме этого, известно, что флуктуации и шумы содержат ценную информацию о динамическом поведении любой системы [7].

Цель данной работы – изучение влияния содержания Bi на шумовые свойства аморфных и кристаллических пленок $(\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5)_{1-x}\text{Bi}_x$.

Описание аппаратно-программного комплекса спектроскопии низкочастотного шума.

Для измерения спектральной плотности мощности (СПМ) низкочастотного (НЧ) шума был сконструирован аппаратно-программный комплекс [8], содержащий малошумящий усилитель [9], схему смещения напряжения с гальваническим источником питания и плату сбора данных NI PCIe 6361 с NI BNC 2120 (рисунок 1). Питание усилителя и подача напряжения смещения на образец происходит от гальванических источников питания для снижения влияния помех и наводок из электрической сети.

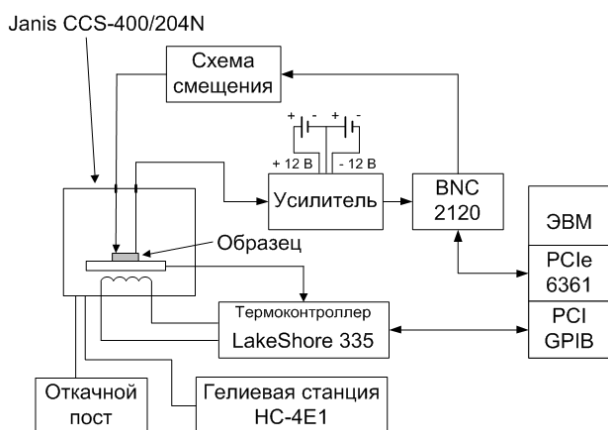


Рисунок 1 – Схема аппаратно-программного комплекса спектроскопии НЧ шума

Со схемы смещения подается напряжение на образец, постоянное напряжение с шумами, генерируемыми в образце, подается на вход предварительного малошумящего усилителя и через плату сбора данных NI PCIe 6361 с NI BNC 2120 заводится в ЭВМ, где и происходит обработка и хранение полученных данных.

Установка величины постоянного напряжения смещения на образце происходит путем коммутации гальванических элементов по команде с ЭВМ через блок разъемов и коммутации NI BNC2120.

На рисунке 2 приведен спектр собственных шумов усилителя и измерительного канала при двух напряжениях на входе усилителя. Очевидно, что собственные шумы установки не зависят от источника напряжения смещения, подключаемого к образцу. Шум от гальванических элементов много меньше шума установки. Пики СПМ на частотах 50, 100 Гц и более высоких гармониках обусловлены неизбежными паразитными наводками от сети переменного тока.

Как правило, шумовые параметры полупроводниковых элементов и структур измеряются в стационарных условиях, т.е. при установившемся значении тока через структуру и при постоянной температуре. Поэтому алгоритмы управле-

ния измерительной установкой должны содержать временные паузы, необходимые для полной релаксации переходных процессов, вызванных, например, изменением напряжения смещения на образце, его температуры. Длительность таких пауз необходимо увеличивать для приближения к условиям стационарности, однако при этом увеличивается время эксперимента. Поэтому продолжительность паузы выбирается с учетом времени установления стационарного тока через структуру и времени измерений. Длительность паузы подбирается экспериментально с помощью серии предварительных экспериментов для конкретного образца и связана с его динамическим электрическим сопротивлением. На практике чем выше это сопротивление, тем продолжительнее должны быть паузы и время эксперимента.

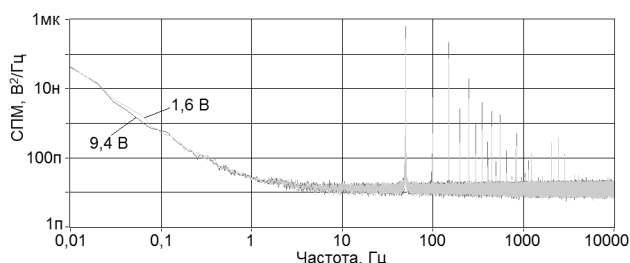


Рисунок 2 – Собственные шумы усилителя

Параметры аппаратно-программного комплекса сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Параметры аппаратно-программного комплекса

Параметр	Диапазон	Шаг изменения параметра
Напряжение смещения	1,5-49,5 В	1,5 и 9 В
Частотный диапазон	0,01 Гц – 10 кГц	0,01, 0,1 и 1 Гц
Температурный диапазон	7-500 К	1-100 К
Входное сопротивление усилителя	1-200 МОм	-

Алгоритм исследования вольт-шумовой характеристики состоит из следующих этапов. На исследуемый образец подается напряжение смещения, после этого выдерживается пауза, необходимая для выхода усилителя на линейный режим работы. Затем производится запись нескольких реализаций шумового сигнала и их анализ. Длительность реализации определяется минимальной частотой измеряемого шумового сигнала и частотой дискретизации АЦП платы сбора данных. Такой алгоритм позволяет наблюдать изменение СПМ непрерывно в режиме ре-

ального времени, благодаря чему оператор имеет возможность прервать эксперимент в любой момент или ввести коррективы в ход эксперимента, что позволяет сократить общее время эксперимента.

Алгоритм проведения эксперимента показан на рисунке 3.

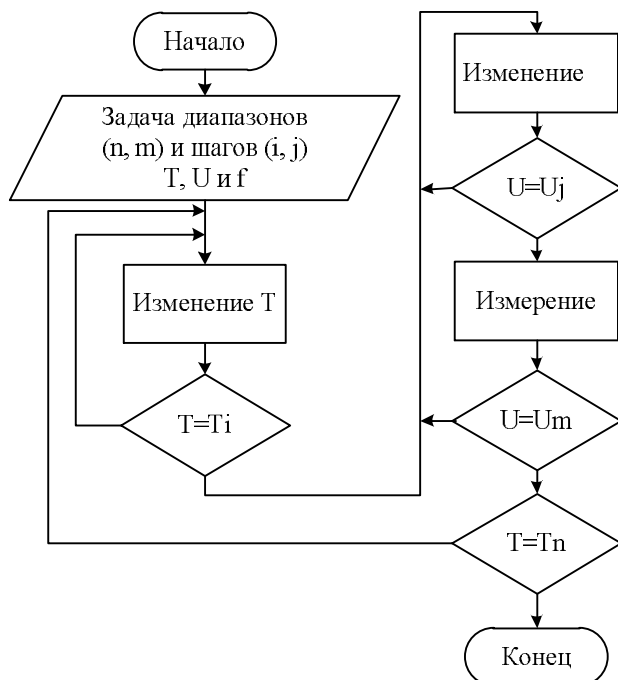


Рисунок 3 – Алгоритм измерения СПМ НЧ шума

Эксперимент. Для исследования шумовых свойств материала $(\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5)_{1-x}\text{Bi}_x$ использовались тонкие пленки состава GST225 с различным содержанием Bi (0, 1, 3 масс. %), осаждённых методом взрывного вакуумно-термического испарения синтезированного материала [10]. Остаточное давление в камере составляло $2,5 \cdot 10^{-3}$ Па, максимальная температура испарителя равнялась 630°C , температура Si подложки не превышала 50°C . Толщины пленок варьировались в диапазоне 50-80 нм и измерялись с помощью атомно-силового микроскопа NT-MDT SolverPro по изменению вертикальной координаты положения острия зонда. Структура образцов в виде тонкопленочных резисторов представлена на рисунке 4. Расстояние между Al контактами составляло 7 мкм. Согласно данным рентгеновской дифракции (Rigaku D/MAX, $\text{Cu } K_\alpha \lambda=0,15481 \text{ нм}$) на дифрактограммах осажденных пленок наблюдалось аморфное гало, что свидетельствует об изначальной аморфной структуре материала пленки [11].

Температурные зависимости удельного сопротивления и электропроводности тонких пленок GST225 с различным содержанием Bi описаны в [12]. В данной работе далее будут пред-

ставлены величины СПМ НЧ шума для пленок $(\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5)_{1-x}\text{Bi}_x$ в аморфной и кристаллической фазе. Состав Ge-Sb-Te дополнительно контролировался с помощью рентгеновского энергодисперсионного анализатора в составе растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL JSM-6610LV. РЭМ-изображение и спектр состава пленки показаны на рисунках 5 и 6 соответственно.

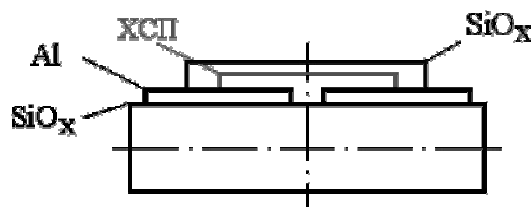


Рисунок 4 – Схематическое изображение планарной структуры образца [12]

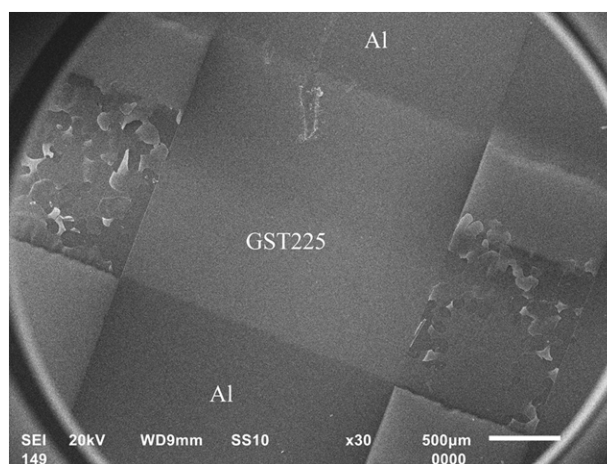


Рисунок 5 – РЭМ-изображение поверхности пленки GST225

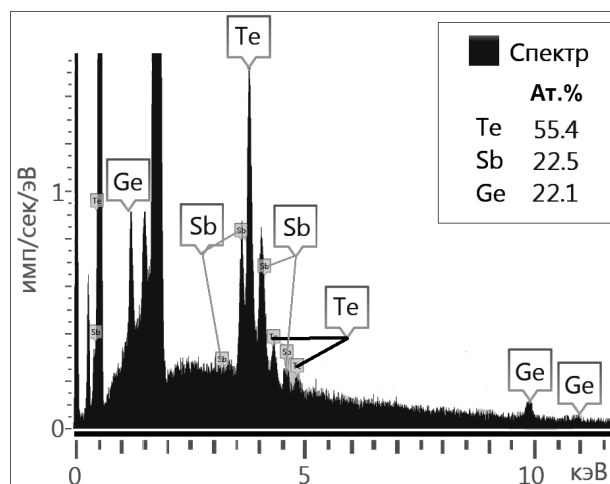


Рисунок 6 – Рентгеновский энергодисперсионный спектр пленки GST225

На рентгеновском энергодисперсионном спектре присутствуют паразитные линии от Si (материал подложки и пленки SiO_x), O (пленка SiO_x , загрязнение поверхности окислами) и Al (сигнал от Al контактов). Если убрать Si, O, Al,

то получается соотношение между содержанием Ge, Sb и Te, близкое к 2:2:5.

На рисунке 7 показаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) $(\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5)_{1-x}\text{Bi}_x$ в фазе аморфного (сплошная линия) и кристаллического состояния (штриховая линия). Изменение аморфной структуры пленки GST на кристаллическую осуществлялся линейным нагревом (неизотермические условия) при подаче постоянного напряжения на образец (10 В) [12].

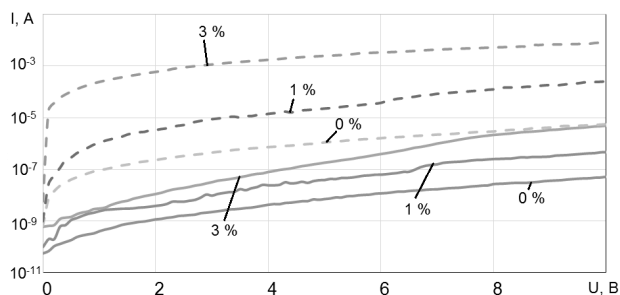


Рисунок 7 – ВАХ образцов $(\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5)_{1-x}\text{Bi}_x$ с содержанием Bi 0, 1 и 3 %

Как видно из рисунка 8, при плавном нагреве и постоянном напряжении смещения 10 В в образцах с разным масс. % содержания висмута резкое изменение тока начиналось при разных температурах. Резкое изменение тока связано с изменением структуры пленки GST [13, 14].

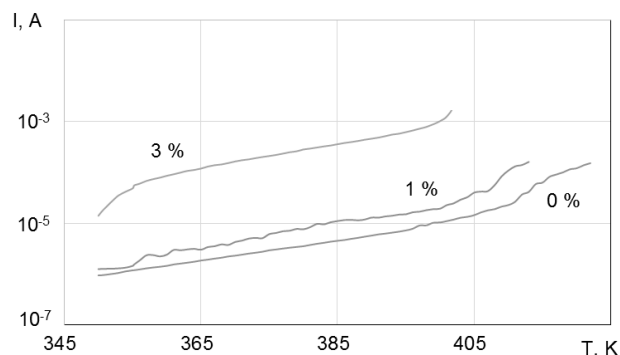


Рисунок 8 – Зависимость тока от температуры до момента резкого изменения тока в образцах $(\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5)_{1-x}\text{Bi}_x$ с содержанием Bi 0, 1 и 3 %

Проведены измерения СПМ ($S(f)$) НЧ шума образцов GST225 с различным содержанием Bi при комнатной температуре. Из рисунка 9 видно, что наибольшее значение СПМ имеет образец с 3 масс. % содержания Bi, а образец с 1 масс. % Bi имеет значения СПМ меньше, чем образец, не содержащий Bi.

Различие в уровне СПМ не связано только с различием плотности протекающего тока в разных образцах, поскольку из рисунка 7 следует, что увеличение содержания Bi приводит к увеличению тока при заданном напряжении (напряженности электрического поля в пленке).

Однако из рисунка 9 следует, что введение 1 масс. % Bi приводит к уменьшению уровня СПМ до определенной величины напряженности электрического поля в пленке.

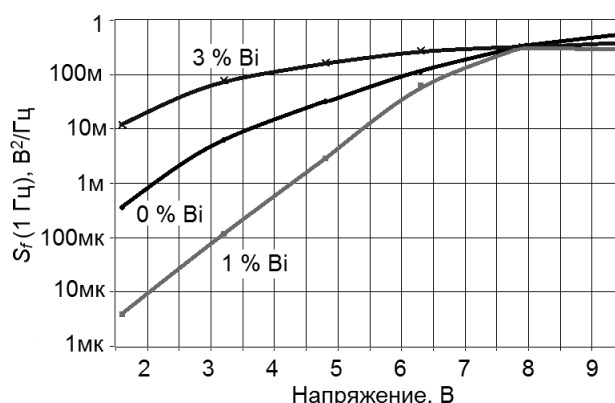
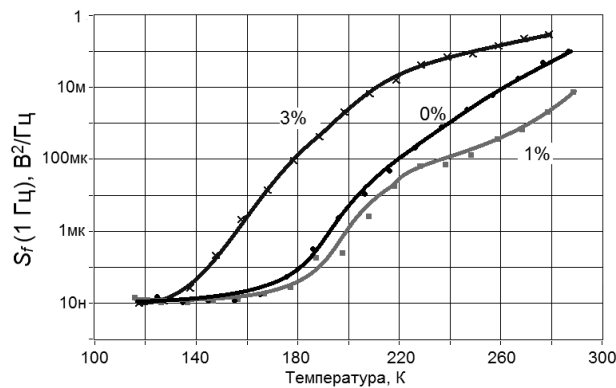
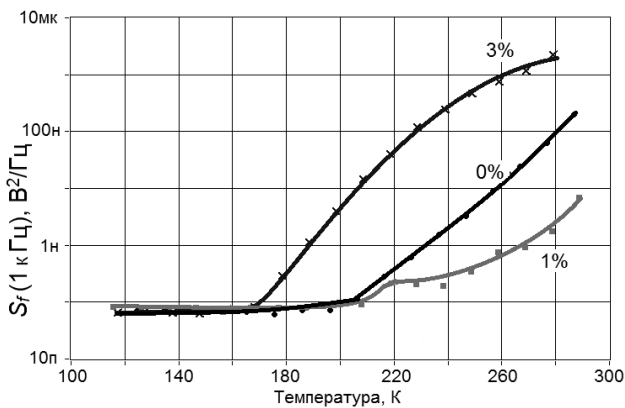


Рисунок 9 – СПМ шума при 1 Гц

Также были проведены измерения СПМ шума при различной температуре при напряжении на образцах, равном 10 В. С увеличением напряжения на образце разница между значениями СПМ в разных образцах практически исчезает (рисунки 9). На рисунке 10 показаны зависимости величины СПМ от температуры. Из этих зависимостей следует, что различие между СПМ начинается лишь с некоторой температуры, величины которой указаны в таблице 2.



а



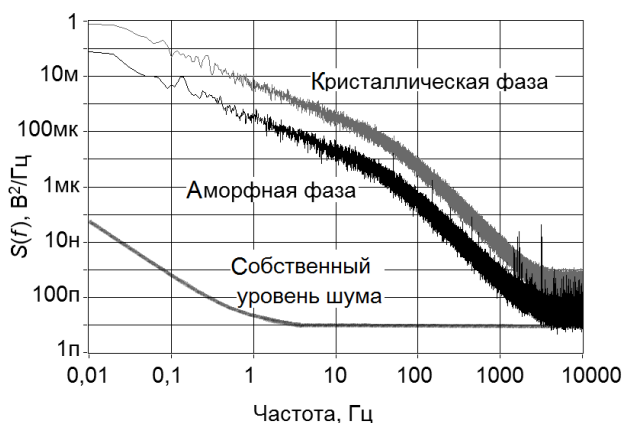
б

Рисунок 10 – СПМ шума в образцах $(\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5)_{1-x}\text{Bi}_x$ с содержанием Bi 0, 1 и 3 % при: а – 1 Гц, б – 1 кГц

Таблица 2 – Значения температуры при равной СПМ шума для разных образцов

Температура, до которой образцы имеют одинаковое значение СПМ, К	Частота, Гц			
	1	10	100	1000
Образцы с 0, 1 и 3 масс. % Bi	126	136	146	167
Образцы с 0 и 1 масс. % Bi	167	177	177	218

При изменении структуры пленок GST из аморфной в кристаллическую происходило увеличение СПМ шума в 10-100 раз в зависимости от образца (рисунок 11).

**Рисунок 11 – СПМ образца в различных фазовых состояниях (0 масс. % Bi)**

Выводы. Введение Bi до 1 масс. % в аморфные пленки на основе $(\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5)_{1-x}\text{Bi}_x$ приводит к уменьшению значений спектральной плотности мощности низкочастотного шума в 50-100 раз, а введение Bi более 1 масс. % приводит к увеличению значений спектральной плотности мощности низкочастотного шума в 10-15 раз по сравнению с величиной СПМ в аморфных пленках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ в диапазоне частот 10^{-2} - 10^2 Гц при напряженности электрического поля менее $5 \cdot 10^5$ В/м.

Обнаружено увеличение спектральной плотности мощности низкочастотного шума в 10-100 раз в микроструктурах на основе тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ с содержанием Bi 0, 1 и 3 масс. % при изменении структуры материала пленки из аморфного состояния в кристаллическое. Увеличение СПМ шума после изменения структуры материала пленок из аморфной в кристаллическую можно объяснить тем, что изменение структуры идет не по всему образцу, а только местами, и кристаллизуется не все пространство пленки между Al электродами, а ее отдельные области.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ

(уникальный идентификатор прикладных научных исследований **RFMEFI57414X0006**) с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМкп) при ФГБОУ ВПО «РГРТУ» в НОЦ неупорядоченных и наноструктурированных материалов и устройств на их основе.

Авторы благодарят в.н.с., д.н.н. Козюхина С.А., профессора, д.т.н. Шерченкова А.А. и Лазаренко П.И. за предоставленные образцы $(\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5)_{1-x}\text{Bi}_x$.

Библиографический список

1. Богословский Н.А., Цэндин К.Д. Физика эффектов переключения и памяти в халькогенидных стеклообразных полупроводниках // ФТП. – 2012. – Т. 46. – Вып. 5. – С. 577-608.
2. Ovshinsky S.R. Reversible electrical switching phenomena in disordered structures // Phys. Rev. Lett. – 1968. – Vol. 21. – No. 20. – P. 1450-1453.
3. Adler D., Shur M.S., Silver M., and Ovshinsky S.R. Threshold switching in chalcogenide-glass thin films // J. Appl. Phys. – 1980. – Vol. 51. – No. 6. – P. 3289-3309.
4. N. F. Mott, E. A. Davis. Electron Processes in Non-Crystalline Materials. – Oxford: Clarendon Press, 1979. – 590 p.
5. Lee C.M. et al. Optical Properties of $\text{Ge}_{40}\text{Sb}_{10}\text{Te}_{50}\text{B}_x$ ($x = 0-2$) Films // Japanese Journal of Applied Physics. Part 1. – 1999. – Vol. 38. – P. 6379-6384.
6. Wang K. et al. Influence of Bi doping upon the phase change characteristics of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ // Journal of Applied Physics. – 2004. – Vol. 96. – P. 5557-5562.
7. Разуменко Д.В. Низкочастотные шумы электронных компонентов как инструмент для диагностики внутренних дефектов // Компоненты и технологии. – 2008. – № 9. – С. 168-174.
8. Ермачихин А.В., Рыбин Н.Б., Литвинов В.Г., Рыбина Н.В. Программа для автоматизированного комплекса спектроскопии НЧ шумов / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2014617224. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15 июля 2014 г.
9. Ермачихин А.В., Кострюков С.А., Литвинов В.Г. Усовершенствование входного усилителя измерительно-аналитического комплекса спектроскопии низкочастотного шума // Труды VI всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур». – Т. III. Рязань, 2013. – С. 51-54.
10. Kozuyukhin S., Sherchenkov A., Babich A., Lazarenko P., Nguyen H.Ph., Prikhodko O. Peculiarities of Bi doping of Ge-Sb-Te thin films for PCM devices // Canadian Journal of Physics. – 2014. – Vol. 92. – № (7/8). – P. 684-689.
11. Kozuyukhin S. et al. Structural changes in doped $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films studied by Raman spectroscopy // Physics Procedia. – 2013. – Vol. 44. – P. 82 – 90.

12. Лазаренко П.И., Козюхин С.А., Шерченков А.А., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В., Нгуен Х.Ф., Редичев Е.Н. Электрофизические свойства аморфных тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, легированных Bi // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 4-3 (46). С. 83-87.

13. Wong H.-S. P. et al. Phase change memory //

Proceedings of the IEEE. – 2010. – Vol. 98. – № 12. – P. 2201-2227.

14. Sherchenkov A.A., Kozyukhin S.A., Gorshkova E.V. Transformations in phase-change memory material during thermal cycling // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. – 2009. – Vol. 11. – No 1. – P. 26-33.

УДК 537.523

А.Н. Власов, М.В. Дубков, М.А. Буробин, А.Б. Маношкин, С.В. Жимолоскин

МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ «ИНГИР-МЕГА-15» ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПИКОВОГО ТОКА ДО 400 кА

Обоснована цель модернизации установки «ИНГИР-Мега-15», и приведены расчёты, показывающие техническую реализуемость повышения её пикового тока от 35 кА до 400 кА. Представлены результаты испытаний установки в тестовом режиме, показавшие её работоспособность и возможность использования для формирования долгоживущих плазмоидов и детонационного напыления тонких плёнок.

Ключевые слова: установка «ИНГИР-Мега-15», ток 400 кА, плазмоид, тонкие плёнки.

Введение. Субмиллисекундный диапазон (от 0,05 мс до 0,5 мс) мощных токовых импульсов с амплитудой от единиц кА до сотен кА представляет значительный интерес для экспериментальной физики и плазменных технологий. В частности, установки с такими параметрами позволяют проводить работы, связанные с электрическим взрывом металла [1], моделировать разряд линейной молнии [2], а также получать импульсные магнитные поля с индукцией вплоть до 13 Тл. Такие поля способны инициировать мощные индукционные разряды [3] и получать плазмоиды. Термином «плазмоид» здесь и далее обозначается плазменный сгусток, существующий без подпитки извне.

Характерной особенностью субмиллисекундных экспериментальных установок является возможность пропускания через нагрузку весьма значительного заряда (вплоть до сотен Кл), что является довольно серьёзной технической проблемой. Созданная экспериментальная установка «ИНГИР-Мега-15» [4], [5] обеспечивала генерацию одиночных субмиллисекундных импульсов с длительностью импульсов до 0,5 мс и пиковым током до 35 кА. Это позволило получить ряд экспериментальных результатов по созданию импульсных магнитных полей и получению долгоживущих плазмоидов [6], однако при этом возник ряд трудностей, связанных с особенностью прочностных характеристик индуктивных накопителей энергии [7]. Преодоление возник-

ших трудностей оказалось невозможным при пиковых токах, обеспечиваемых установкой «ИНГИР-Мега-15», как будет показано далее.

Цель работы – обосновать параметры модернизации установки «ИНГИР-Мега-15», оценить их техническую реализуемость и рассмотреть возможность использования установки для детонационного напыления тонких плёнок.

Теоретические исследования. Как было упомянуто выше, одним из важнейших направлений исследований с использованием установки ИНГИР-Мега-15 были эксперименты по формированию долгоживущих плазмоидов методом электрического взрыва тороидально установленных медных спиралей, показанных далее на рисунке 1. В этом случае в тороидальном объёме несколько кубических сантиметров создавалось импульсное магнитное поле, типичное значение индукции которого достигало уровня 3 Тл. Иногда в процессе электрического взрыва образовывались плазмоиды (вероятность порядка 5 %), типичное время жизни которых составляло 0,5 с, наилучший результат – 1,6 с [7]. Дальнейшие попытки улучшить результат оказались безуспешными. Эти проблемы, как будет показано далее, связаны с недостаточной амплитудой тока, обеспечиваемой имеющейся экспериментальной установкой.

Время жизни плазмоида с тороидальным токовым слоем, формирующегося при электрическом взрыве тороидально установленных про-

волоочных спиралей, определяется пиковым током индуктора (взрывающихся спиралей) согласно выводам работы [8] и может быть оценено по формуле:

$$\tau_{(c)} \approx 1,3 \cdot 10^{-7} \cdot I_{(кА)}^3, \quad (1)$$

где $\tau_{(c)}$ – прогнозируемое время жизни плазмоида, выраженное в секундах, $I_{(кА)}$ – пиковый ток (в ампер-витках) взрывающихся спиралей, выраженный в килоамперах.

Обратная по отношению к (1) формула имеет вид:

$$I_{(кА)} = \sqrt[3]{7,8 \cdot 10^6 \cdot \tau_{(c)}}, \quad (2)$$

эту формулу удобно использовать в случае, если нужно задать пиковый ток индуктора (в ампер-витках) и разрядный ток экспериментальной установки исходя из прогноза времени жизни для формируемого плазмоида (см. таблицу).

Результаты вычислений по формулам (1) и (2)

Пиковый ток (ампер-витки), кА	Прогнозируемое время жизни плазмоида, с
50	0,016
100	0,13
150	0,44
200	1,04
250	2,03
300	3,5
350	5,6
400	8,3
450	12
500	16
1000	130

Уверенно наблюдаемые плазмоиды (со временем жизни более 3 с), как видно из таблицы 1, могут быть сформированы при пиковых токах порядка 300 кА и более. В то же время в экспериментах, рассмотренных далее, когда использовались параллельно включенные 4 спирали по 8 витков каждая, обрыв спиралей возникал при токах порядка 20 кА. Количество кило-ампер-витков составляло примерно 160 кА. Такому току согласно формуле (1) соответствует время жизни плазмоида на уровне 0,5 с. При этом увеличение амплитуды импульса тока через спирали приводило к преждевременному их обрыву и образованию невзорвавшихся фрагментов проволоки из нескольких витков (показанных далее), препятствующих формированию долгоживущего плазменного сгустка.

Поскольку величина пикового тока в многовитковых спиралях оказалось ограниченной, то наиболее просматриваемым выходом из создав-

шегося положения является использование в дальнейшем одновитковых спиралей, в которых преждевременный обрыв секций не является критичным. Действительно, в этом случае, если преждевременно обрывается любой из витков, то разрядный ток в контуре экспериментальной установки устремляется в соседние витки, ускоряя их нагрев и тем самым синхронизируя электрический взрыв металла соседних витков. Однако в этом случае для обеспечения времени жизни плазмоида порядка 8 с экспериментальная установка должна обеспечивать пиковый ток на уровне 400 кА.

Указанный параметр – пиковый ток 400 кА – был принят в качестве основной цели проводимой модернизации экспериментальной установки «ИНГИР-Мега-15».

В качестве второго целевого параметра принята длительность импульса тока – до 0,5 мс (та же, что и была ранее).

Для расчётов ёмкости конденсаторной батареи воспользуемся общеизвестной формулой

$$\delta U = \frac{1}{C} \int_0^{\tau} I dt, \quad (3)$$

где δU – допустимое изменение напряжения на конденсаторной батарее, C – её ёмкость, τ – длительность импульса.

Далее, аппроксимируя импульс формой треугольника с амплитудой I_{\max} , запишем

$$I = I_{\max} t / \tau, \quad (4)$$

и, подставив (4) в (3), после преобразований получим

$$C = I_{\max} \tau / (2\delta U). \quad (5)$$

Для нашего случая допустимое изменение напряжения на конденсаторной батарее составляет $\delta U = 100$ В (при начальном напряжении 450 В), тогда согласно (5) имеем: $C = 400 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} / (2 \cdot 100) \approx 1$ Ф.

Экспериментальные исследования. При модернизации установки объём её взрывной камеры существенно увеличен (примерно в 2 раза) до размеров 0,6 x 0,8 x 1,1 м³, что позволяет снизить ударные нагрузки на стенки камеры. По конструктивным соображениям ёмкость конденсаторной батареи модернизированной установки принята равной 1,12 Ф. Для осуществления коммутации основного разрядного контура с конденсаторной батареей (1,12 Ф, 450 В) были использованы параллельно соединённые быстродействующие тиристоры типа ТБ261-160-10 в количестве 112 шт. с пиковым током 4 кА каждый [9]. Синхронизация работы тиристоров была обеспечена ферритовой линией, время задержки которой превышает время включения тиристоров.

Для улучшения эксплуатационных характеристик установки «ИНГИР-Мега-15» в процессе модернизации были введены дополнительные опции:

1) введена дополнительная конденсаторная батарея ёмкостью 4 Ф с напряжением 100 В, от которой в нагрузку подаётся предварительный импульс энергии с целью экономии энергии основного импульса при электрическом взрыве металла;

2) в зоне распространения света при электрическом взрыве проводников установлен фотодиод, позволяющей по оптическому сигналу чётко (с точностью до единиц мкс) фиксировать момент электрического взрыва медных спиралей на фоне диаграмм изменения тока и напряжения на спиральных, что позволяет подбирать наилучшие режимы для работы установки. К примеру, если электровзрыв спиралей происходит на фазе спада тока, то это свидетельствует о недостаточности начального прогрева спиралей. Желательно, чтобы электровзрыв происходил на максимуме кривой зависимости тока от времени;

3) в разрядном контуре при использовании электрически взрывающегося металлического проводника предусмотрено использование реле, нормально замкнутые контакты которого шунтируют электрически взрывающийся проводник в течение заданного промежутка времени (от долей до нескольких миллисекунд). Это способствует улучшению процесса ввода энергии в индукционный разряд на фазе спада индукции магнитного поля.

К настоящему времени эксперименты проводились в тестовом режиме. В частности, было подтверждено, что при электрическом взрыве тороидально установленных многовитковых медных спиралей в подавляющем большинстве случаев (95 % – неудачные эксперименты) образуются невзорвавшиеся фрагменты. При удачных экспериментах, когда плазмоиды образуются [7], невзорвавшиеся фрагменты отсутствуют. Кроме того, после удачных экспериментов по электрическому взрыву тороидально установленных медных спиралей (рисунок 1) было замечено, что после таких электрических взрывов на текстолитовом основании образуется прочная тонкая плёнка (рисунок 2). Аналогичные по виду плёнки образуются при детонационном напылении [10]. В нашем случае в процессе детонационного напыления участвует импульсный индукционный разряд, сопровождающий электрический взрыв спиралей. В этом случае ожидается получение особо качественных покрытий за счёт высоких температур в плазме импульсного индукционного разряда (порядка 10000 К) с учётом

тех пиковых токов, которые обеспечивает модернизированная экспериментальная установка «ИНГИР-Мега-15».

Следует отметить, что показанные на рисунке 1 спирали (4 шт. по 8 витков провода диаметром 0,67 мм) установлены вплотную друг к другу и соседние спирали имеют противоположные направления намоток (правые и левые). Электрически спирали соединены параллельно, и именно такое конструкционное выполнение позволяет получать внутри спиралей сильное импульсное тороидальное магнитное поле, формирующее мощный индукционный разряд с плотной плазмой. После запуска модернизированной установки на полную мощность (с пиковым током до 400 кА) появится возможность использования одновитковых спиралей, а для технологических целей окажется возможным использование диафрагмы из фольги вместо набора провололок, что может существенно повысить производительность процесса детонационного напыления тонких плёнок при использовании индукционного разряда с плотной плазмой.

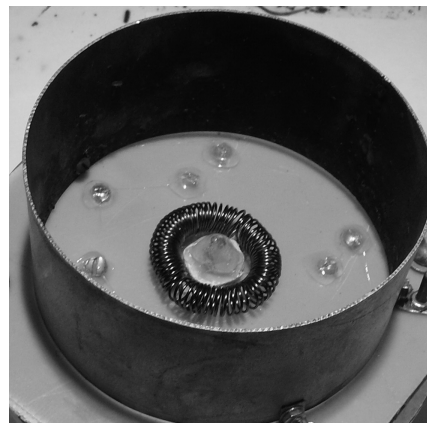


Рисунок 1 – Тороидально установленные медные спирали, закрепленные на текстолитовом основании внутри патрубков



Рисунок 2 – Прочная тонкая плёнка на текстолитовом основании после электрического взрыва спиралей

Выводы. Таким образом, поставленная цель модернизации установки «ИНГИР-Мега-15» – доведение её пикового тока до 400 кА – обоснована и, как показали проведенные теоретические оценки, достижима. При таких пиковых токах ожидается получение долгоживущих плазмодов со временем жизни порядка единиц и десятков секунд. Проведенные предварительные испытания подтвердили работоспособность установки. В процессе экспериментов обнаружена возможность напыления прочных тонких плёнок, а именно возможность детонационного напыления при действии импульсного индукционного разряда с плотной плазмой. Этот процесс может представить интерес для технологий, связанных с нанесением тонких плёнок, в том числе для решения задач электронной техники.

Работа была поддержана Министерством образования и науки РФ, государственный контракт № 14.518.11.7002 от 19 июля 2012 г.

Библиографический список

1. Мартынюк М.М. Фазовые переходы при импульсном нагреве: монография. - М.: Изд-во РУДН, 1999. - 332 с.
2. Александров Г.Н. Главная стадия молнии: механизм и выходные характеристики // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 12. С. 101-105.
3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. - Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009. - 736 с.
4. Власов А.Н., Дубков М.В., Брыков А.В., Малютин А.Е., Маношкин А.Б. Проведение исследований индукционного разряда при быстром спаде сильного магнитного поля в горячей плазме с использованием установки типа «ИНГИР-Мега», имеющей индуктивный накопитель для генерирования индукционного разряда при накачке мегаваттными импульсами // Отчет о НИР (промеж.): 28-12 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; рук. Власов А.Н. - Рязань. - 2013. № ГР 01201272674. Инв. № 02201450296.
5. Власов А.Н., Дубков М.В., Буробин М.А., Маношкин А.Б., Николаев А.В. и др. (всего 10 человек). Проведение исследований индукционного разряда при быстром спаде сильного магнитного поля в горячей плазме с использованием установки типа «ИНГИР-Мега», имеющей индуктивный накопитель для генерирования индукционного разряда при накачке мегаваттными импульсами // Отчет о НИР (заключ.): 28-12 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; рук. Власов А.Н. - Рязань. - 2013. № ГР 01201272674. Инв. № 02201450296.
6. Власов А.Н., Дубков М.В., Буробин М.А., Жимолоскин С.В., Маношкин А.Б. Экспериментальная установка «ИНГИР-МЕГА-15» для получения и исследований индукционного разряда // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 1 (43). С. 90-94.
7. Власов А.Н., Жимолоскин С.В., Маношкин А.Б., Николаев А.В., Панин В.В., Поташевский С.С. Об особенностях индуктивных накопителей энергии в экспериментальной установке "ИНГИР-Мега-15" // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 2 (44). С. 101-106.
8. Власов А.Н. Индукционный разряд для получения долгоживущих плазмодов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 39-2. С. 108-121.
9. Григорьев О.П., Замятин В.Я., Кондратьев Б.В., Пожидаев С.Л. Тиристоры: справочник. - М.: Радио и связь, 1990. - 272 с.
10. Ульяницкий В.Ю., Штерцер А.А., Злобин С.Б., Матренин В.И., Щипанов И.В. и др. (всего 12 чел). Детонационное напыление – для решения задач водородной энергетики // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (АЭЭ). 2006. № 9 (41). С. 108-113.

УДК 621.311.1:621.548:551.556.3

В.С. Литвинова, С.М. Милуков

РАЗРАБОТКА НИЗКОБОРОТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА НА НЕОДИМОВЫХ МАГНИТАХ ДЛЯ МАЛОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

Проведен расчет низкооборотного электрического генератора на неодимовых магнитах мощностью 800 Вт. Генератор предназначен для построения ветровой энергетической установки, которая может быть использована совместно с электрическими преобразователями энергии солнца для бытовых нужд.

Ключевые слова: малая ветроэнергетика, генератор, магнитостатика.

Введение. В настоящее время большое внимание уделяется использованию различных видов возобновляемых источников энергии, которые уменьшают загрязнение окружающей среды, а для некоторых стран могут обеспечить независимость от рынка углеводородного топлива.

Накоплен большой опыт эксплуатации мощных ветроэлектрических установок (ВЭУ) в местах, обладающих большими ресурсами ветровой энергии. Использование ветровой энергетики пока развивается на дотационной основе. Существуют обоснованные перспективы того, что с развитием технологии и массового производства ветроэлектрических станций стоимость получаемой электроэнергии снизится и ВЭУ смогут конкурировать экономически с традиционными способами получения электрической энергии. В настоящее время 1 МВт мощности ветрогенератора стоит около 1 млн евро [1].

Мощные ветроэлектрические станции, как правило, подключаются к действующим энергосистемам, поэтому неравномерность выработки ими электроэнергии компенсируется тепловыми электростанциями и гидроэлектростанциями, включенными в данную энергосистему. Актуально развитие малой ветроэнергетики, к которой относятся установки мощностью менее 100 кВт.

С использованием автономных ветроэлектрических установок малой мощности возникают дополнительные сложности, связанные с необходимостью обеспечения стабильного электроснабжения. Эта проблема решается путем организации электроснабжения потребителей от энергетических комплексов, состоящих из ветрогенераторов, солнечных панелей, дизельных генераторов и электрических аккумуляторов. Это приводит к повышению стоимости электроэнергии. Лидерами в области производства ветроэнергетических установок являются Китай (более 12 МВт установок, произведенных в 2010 г.), Дания (более 5,8 МВт установок), США (более 3,8 МВт установок) [2]. В России выпускаются единичные образцы ветроэлектрических установок, которые эксплуатируются, как правило, в исследовательских целях.

Дизельные электростанции имеют высокий КПД при работе только на постоянную нагрузку. Поэтому мощность дизельного генератора выбирается на 10-15 % больше мощности нагрузки, а избыток генерируемой энергии направляется на зарядку аккумулятора. После того как аккумулятор полностью заряжается, дизельный генератор отключается и потребитель получает электроэнергию от аккумулятора. Целесообразность такого решения зависит от многих факторов и оп-

ределяется спецификой энергопотребления, исходя из запасов солнечной и ветровой энергии, капитальных затрат на монтаж электроустановки и эксплуатационных расходов. Перспективно использование таких гибридных энергетических комплексов для питания объектов, территориально удаленных от стационарных источников электроснабжения, в частности, – станций сотовой связи. В настоящее время уже реализованы такие экспериментальные энергетические комплексы мощностью от 100 до 3000 Вт, имеющиеся в свободной продаже.

Серьезным недостатком рассмотренных конструкций, снижающим их экономические показатели, является то, что они спроектированы и изготовлены как отдельные устройства многоцелевого назначения без учета особенностей потребителей. Более узкая постановка задачи – проектирование ВЭУ только для питания станций сотовой связи с использованием самой вышки для установки ветрогенератора – позволит заметно снизить капитальные затраты и сделать ее экономически оправданной. Задача обеспечения сотовой связью большой территории нашей страны решается путем увеличения количества вышек сотовой связи, которые могут быть значительно удалены от линий электропередач. Это делает актуальной задачу создания автономной энергетической установки.

Для генераторов, работающих от ветровой и водяной энергии, характерны низкие обороты вращения. Ветровая энергия дорогая, поэтому для генераторов требуются высокий КПД и минимальное обслуживание. Традиционные генераторы с внешним возбуждением мало пригодны для построения ВЭУ из-за высоких требований к частоте оборотов, поэтому для таких целей используются генераторы с постоянными магнитами.

Целью работы является разработка опытной модели генератора мощностью 800 Вт при низкой скорости вращения (до 240 об/мин). Возможная область применения таких генераторов – экологически чистые источники энергии, которые расположены в районах, удаленных от линий электропередач.

Выбор конструкции генератора. В [3] представлены основные схемы генераторов с постоянными магнитами. Генераторы традиционных конструкций (совпадающие с электродвигателями) предполагают изготовление магнитопроводов сложной формы и сложной обмотки. Затраты на технологическую оснастку в этом случае оправданы только при серийном производстве. Для небольших партий генераторов более подходящими являются конструкции с про-

стой формой обмоток и сердечника.

Для высокооборотных генераторов предпочтительна форма без стального сердечника. Для небольшой скорости вращения 240 об/мин были исследованы возможности двух конструкций: с сердечником и без сердечника. Конструкция без магнитного сердечника требует очень большого увеличения диаметра генератора. Поэтому в работе исследовалась конструкция с катушками на магнитном сердечнике, которая схематично показана на рисунке 1.

Точный расчет генератора, который включает в себя расчет магнитной системы, напряжения, которое наводится в обмотках, и влияние токов на магнитную систему необходимо проводить с учетом трехмерной конструкции генератора. Такой расчет достаточно трудоемок. Кроме того, для его реализации необходимо иметь дорогостоящие программы. В данной работе был проведен оценочный расчет магнитной системы в двумерном приближении с помощью программы FEMM 4.2 [4].

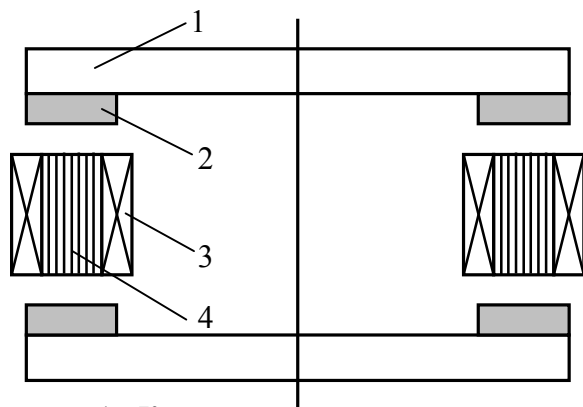


Рисунок 1 – Конструкция генератора в разрезе:
1 – магнитопровод; 2 – магниты; 3 – катушки;
4 – сердечник

Двумерный расчетный эквивалент реальной магнитной системы показан на рисунке 2. Один период системы состоит из четырех пар магнитов, установленных на магнитопроводе, и трех магнитных сердечников из трансформаторной стали, на которые наматываются катушки. Магнитная система движется вдоль линейки магнитных сердечников. Такая конструкция обеспечивает получение трехфазной системы напряжений на обмотках.

Поскольку целью расчетов было нахождение максимального значения индукции в сердечниках, то расчет проводился только для одного положения сердечников относительно магнитной системы, при котором магнитный поток в одной из катушек максимален. Симметрия системы позволяет для этого положения значительно сократить расчетную область, которая на рисунке 2 выделена пунктиром.

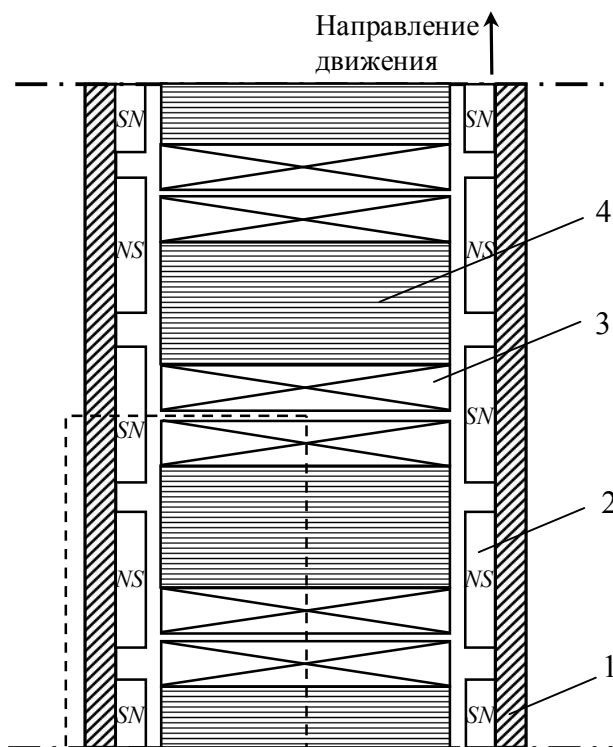


Рисунок 2 – Двумерный расчетный эквивалент реальной магнитной системы генератора:
1 – магнитопровод; 2 – магниты; 3 – катушки;
4 – сердечник

Исследование влияния толщины магнитопровода на магнитное поле в сердечнике показало, что при толщине магнитопровода, равной толщине магнита, магнитопровод практически не ослабляет поле в сердечнике.

На рисунке 3 представлен качественный вид распределения линий магнитного поля для эквивалента магнитной системы генератора, который получен с помощью программы FEMM 4.2. В качестве магнитного материала был выбран NdFeB (марка магнита 42SH), рассчитанный на максимальную температуру 150°C.

В кольцевом магнитопроводе максимальное значение индукции – 1,8 Тл, в магните – 0,81 Тл, в сердечнике – 0,58 Тл. Расчет напряжения, наводимого в катушке, проводился из предположения о синусоидальной форме изменения магнитного потока в катушке (последующие испытания подтвердили правильность этого допущения) по соотношению:

$$U_{m\phi} = 2\pi \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{N_m}{2} \cdot B_m \cdot S \cdot W \cdot K,$$

где $U_{m\phi}$ – амплитуда фазного напряжения, n – скорость вращения об/мин, N_m – число пар магнитов, B_m – максимальное значение индукции в сердечнике катушки, S – площадь сердечника, W – число витков катушки, K – число катушек в одной фазе.

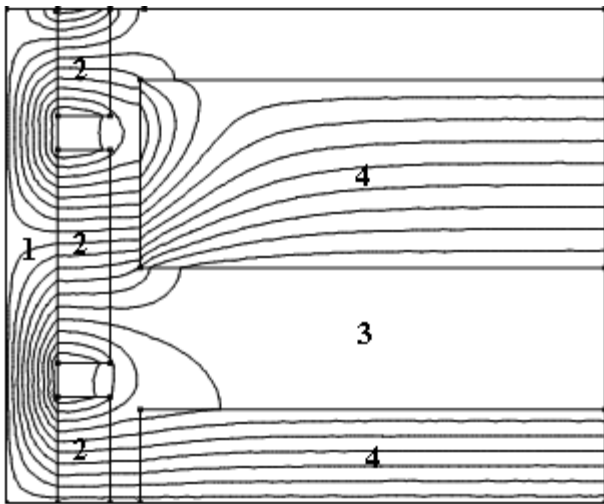


Рисунок 3 – Качественное распределение линий индукции магнитного поля для эквивалента магнитной системы генератора

- 1 – кольцевой магнитопровод; 2 – магниты;
3 – воздушный промежуток;
4 – магнитный сердечник катушки

По результатам пробных расчетов были выбраны следующие основные параметры конструкции: $N_m=20$, $S=1000 \text{ мм}^2$, $W=220$, $K=5$. По выбранным параметрам были рассчитаны размеры деталей генератора. При выбранных значениях параметров $U_{mf} = 159 \text{ В}$. Очевидно, что это значение будет несколько завышено, поскольку при расчете магнитного поля не учитывалась реальная трехмерность магнитной системы.

Важным показателем генератора является постоянство момента торможения на валу при постоянстве нагрузки. Обычно это достигается подбором формы полюсных наконечников магнитопровода.

Пульсация напряжения на выходе трехфазного выпрямителя составляет 13 %. При постоянной резистивной нагрузке колебания мощности в нагрузке составят 26 %. Такими же будут и колебания тормозного момента генератора.

Магнитный сердечник катушки, изготовленный из пластин прямоугольной формы, хорош из технологических соображений, но может приводить к «залипанию» ротора. К этому же могут привести неточности в изготовлении деталей и неточности сборки. Залипание появляется, если пульсации момента торможения сопоставимы с пульсациями, вызванными характером нагрузки.

В рассматриваемом случае предполагается подключение генератора к трехфазному выпрямителю с активной нагрузкой, и нагрузка на валу будет изменяться синхронно с напряжением на выходе выпрямителя. По приближенной оценке необходимо обеспечить условие $M_{зал} < 0,26 \cdot M_{max}$, где $M_{зал}$ – момент залипания, а M_{max} – тормозной

момент при максимальной нагрузке в момент максимума напряжения. При более точных расчетах должно учитываться влияние индуктивности обмоток, которые дополнительно сглаживают пульсации напряжения на нагрузке.

Результаты испытаний. По результатам расчетов был изготовлен генератор, внешний вид которого представлен на рисунке 4. Диаметр генератора 270 мм, высота 210 мм, масса 34 кг.

Во время испытаний ротор генератора приводился во вращение асинхронным электродвигателем через клиноременную передачу.

Линейное напряжение при соединении обмоток по схеме "звезда" составило 110 В. Внутреннее сопротивление генератора, измеренное после выпрямителя при соединении "треугольник", составило 3 Ома. Тепловая постоянная времени генератора 30 мин. При перегреве относительно окружающего воздуха 45 °С постоянная мощность генератора 800 Вт, КПД до 85–90 %.

Измеренный момент залипания составил 3,7 Н·м. Это значение является моментом трогания генератора. Момент торможения, найденный из выражения $M_{max} = P_{max}/\omega$, составил 31,8 Н·м. Таким образом, неравномерность момента торможения, вызванного залипанием, будет примерно в 2 раза меньше, чем неравномерность момента торможения, вызванная характером нагрузки.



Рисунок 4 – Внешний вид генератора мощностью 800 Вт и скоростью вращения 240 об/мин

Основные результаты работы. Разработана конструкция низкооборотного (до 240 об/мин) генератора мощностью 800 Вт, отличающаяся простой формой пластин сердечника, что особенно важно при изготовлении небольших партий генераторов. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования генераторов на другие параметры путем

масштабирования как в большую, так и в меньшую сторону.

Произведен расчет параметров электрического генератора с вращающейся магнитной системой и катушками на стальных сердечниках.

Изготовлен опытный образец генератора, экспериментально определены его основные параметры (максимальная выходная мощность, фазное напряжение, КПД), которые соответствуют теоретическим величинам.

Сравнительно малые габариты, масса и стоимость генератора делают перспективным его применение для удаленных от линий электропередач потребителей, например, вышек сотовой связи.

УДК 658.5.011

Д.С. Ворунчев, М.В. Покровская

БЕССВИНЦОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: РИСКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ РОССИЙСКОГО РЫНКА ЭЛЕКТРОНИКИ

Рассмотрены аспекты бессвинцовой технологии, отмечены перспективы и риски для отечественного рынка электроники. Дана комплексная оценка этой проблемы, подведены промежуточные итоги, получены результаты отказа от применения свинца в мировой электронной промышленности. Проведены теоретические и экспериментальные исследования по вопросам надежности электронных модулей выполненных по бессвинцовой, традиционной свинцовой и смешанной технологиям монтажа. Доказана целесообразность применения классической свинцовой технологии монтажа и возможных вариантов решения проблем смешанной комплектации.

Ключевые слова: бессвинцовые технологии, безопасность и риски.

Введение. С 1 июля 2006 года вступили в силу европейские директивы – RoHS и WEEE, которые призваны ограничить использование свинца в производстве и утилизацию любых электроприборов. Под запрет не попадают области, где надежность является определяющим показателем (медицина, ВПК, аэрокосмический комплекс). Производство в Европе осуществило переход к бессвинцовым технологиям и исключило из своего производства свинец. При этом переход для многих производственных предприятий Европы длился по 2 года и более. Замена свинца на бессвинцовые сплавы – это не только повышение температуры пайки на 30-40 °С. Процесс перехода на бессвинцовую технологию очень сложный, он не только коснется изменений в повышении температуры пайки, но и повлечет за собой замену паяльных материалов, оборудования, обработку технологических режимов.

Библиографический список

1. Lacey S. Wind Turbine Prices Remain Low [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2010/08/wind-turbine-prices-remain-low?cmpid=rss>.
2. Tildy Bayar World Wind Market: Record Installations, But Growth Rates Still Falling [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2011/08/world-wind-market-record-installations-but-growth-rates-still-falling?cmpid=rss>.
3. Мухин И.А. Лаборатория независимых исследований [электронный ресурс]. Режим доступа: http://imlab.narod.ru/Energy/Gen_18_19/Gen_18_19.htm
4. D. Meeker Finite Element Method Magnetics Version 4.2 User's Manual. 2010. 158 p.

решаемый, кроме свинца, это является основной проблемой реализации директивы.

По некоторым оценкам в России более 90 % продукции производится с применением свинцовых припоев, однако некоторые крупные компании, ориентированные на крупносерийные производства, работают по бессвинцовой технологии, используя припои SAC с температурой плавления +217...220 °С. SAC – аббревиатура, составленная из первых букв металлов, входящих в сплав: SnAgCu (олово, серебро, медь).

Российское законодательство не ограничивает использование свинца в производстве электроники. Более того, основная доля радиоэлектронного комплекса России направлена на выпуск продукции военного и двойного назначения, что является областью исключения директивы. Малая доля отечественной продукции поставляется на европейский рынок, где действуют ограничения. Однако нашей стране остаться в стороне от европейской бессвинцовой директивы, которую в том числе поддержали большинство мировых производителей электроники, не получится. Основная доля современной электронной компонентной базы (ЭКБ) остается импортного производства. Зарубежные производители в основном сконцентрированы на выпуске компонентов под бессвинцовую технологию, о чем говорят многочисленные надписи на упаковках радиоэлементов. Отечественные предприятия, выпускающие ответственные аппаратуры, не намеренные переходить на бессвинцовые технологии, оказались в еще более сложной ситуации. Российские предприятия по-прежнему вынуждены активно использовать импортную элементную базу, которая все больше производится под бессвинцовую пайку. Все это приводит к неизбежности использовать смешенную технологию монтажа, когда элементы имеют покрытия под бессвинцовую пайку, а монтаж осуществляется свинцовыми припоями. Это приводит к еще большим проблемам, так как для достижения максимальной надежности рекомендуется использование либо полностью свинцовой технологии, либо полностью бессвинцовой. Для производства продукции гражданского сектора, в котором показатель надежности не имеет определяющее значение, использование бессвинцовых технологий не несет никаких проблем, кроме современного оснащения производства.

Ввиду особой важности проблемы, стоящей перед радиоэлектронным комплексом, в том числе продукцией военного назначения, к надежности и качеству которой предъявляются повышенные требования, с 2007 года на ряде

отечественных предприятий развернулись масштабные исследования проблемы бессвинцовой технологии. Среди предприятий ОАО “Авангард”, которое проводит исследования в области бессвинцовой и смешанной пайки, 22 ЦНИИ МО, Гильдия профессиональных технологов приборостроения проводит работу по обобщению опыта ведущих приборостроительных предприятий и выработке соответствующих рекомендаций. Исследования проводятся и в ряде других крупных предприятий страны, в том числе по вопросам необходимой для изготовителей спецаппаратуры нормативно-технической базы [1].

В последние годы европейская директива получила новый виток своего развития, и с 01.01.2013 года вступила в силу ее обновленная редакция, которая получила названия RoHS 2. Обновленная редакция сокращает область исключения, устанавливает переходный период до 2019 года, в процессе которого область исключений еще больше будет ограничена. Также важным нововведением является то, что для всей продукции, попадающей под действие директивы, производитель обязан декларировать соответствие директиве, а продукция должна быть маркирована знаком CE. Еще одна сторона обновленной директивы – это то, что после окончания переходного периода фактически становится невозможным ремонт старой техники, для которой нет вариантов замены компонентов. Кабели и другие комплектующие, необходимые для ремонта или продления срока эксплуатации устройств, могут продолжать распространяться на рынках ЕС до даты окончания переходного периода [2].

Целью работы являются систематизация и комплексная оценка имеющегося опыта по исследованию бессвинцовых технологий в электронной промышленности, подведение промежуточного результата по переходу на бессвинцовые технологии, прогнозирование дальнейшего развития и поиска концепции менеджмента рисков бессвинцовой технологии в электронной промышленности.

Теоретические исследования. Основные мировые производители электроники: США, Китай, Япония, Германия, Южная Корея, Тайвань. На эти страны приходится основной объем производства электронной промышленности. Именно они формируют основу мировой электроники. Анализ географии европейской бессвинцовой директивы показывает, что она имеет более широкое распространение. Кроме стран Евросоюза, аналогичную позицию на законодательном уровне поддержали Китай и штат Калифорния в

США. Еще ряд стран находятся в ожидании принятия соответствующего законодательства. Это Япония, Южная Корея, а также штаты в США: Вашингтон, Монтана, Миннесота, Иллинойс, Мэн. Таким образом, бессвинцовое законодательство в настоящий момент охватило большинство мировых производителей электроники, за исключением большинства штатов США и Тайваня [3].

Переход к бессвинцовой технологии связан с изменением техпроцесса. На сегодняшний день имеется большое количество публикаций по данной теме как в отечественных, так и в зарубежных изданиях. Тема бессвинцовой технологии служит поводом для новых исследований и обсуждений. Но, к сожалению, до сих пор нет единого мнения на данный счет, а множество публикаций порой имеют противоречивый характер, а ряд авторов расходятся во мнениях и оценках. Рассмотрим изменение техпроцесса при бессвинцовой пайке более подробно.

Влияние на оборудование. На первых этапах перехода к бессвинцовой технологии использование традиционного оборудования для бессвинцовой пайки волной вскрыло ряд недостатков. Из-за используемых материалов сокращался срок службы, происходила коррозия элементов и деталей оборудования. Типичный пример – повреждение незащищенного канала подачи припоя из нержавеющей стали. Повреждение ванны припоя очень критично с точки зрения безопасности, может повлечь за собой высокие промышленные риски и привести к травмам работников. Повреждение других деталей может повлечь за собой простой оборудования или потерю производственного времени. На рисунке 1 приведен элемент оборудования для волновой пайки, выполненный из незащищенной нержавеющей стали, который эксплуатировался в течение 6 месяцев по бессвинцовой технологии. На данный момент производители оборудования предлагают решения этой проблемы. Использование более дорогих материалов в производстве оборудования для пайки волной, что в итоге отражается на конечной стоимости данного оборудования. Другой вариант – модернизация старого оборудования, нанесение защитных покрытий. Более старое оборудование с деталями из нержавеющей стали без покрытия не должно использоваться с бессвинцовыми припоями. Такая критичная деталь, как ванна припоя, должна быть изготовлена из титана или серого литейного чугуна. Улучшение современных бессвинцовых припоев и введение антикоррозионных покрытий в настоящее время привело к снижению быстрого износа деталей оборудования для пай-

ки волной. Например, нанесение покрытия Melonite® позволяет повысить устойчивость к коррозии некоторых материалов.

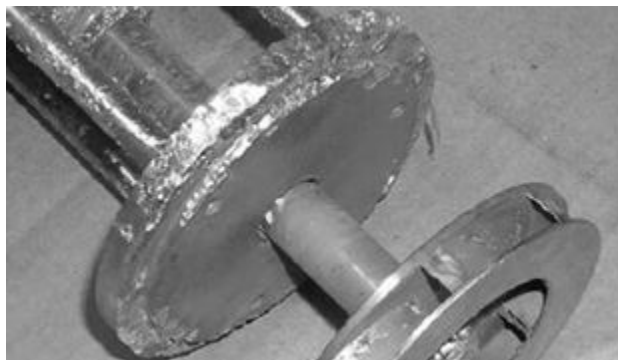


Рисунок 1 – Незащищенная нержавеющая сталь

Выбор базовых материалов. В настоящее время производство электроники общего назначения по бессвинцовому процессу адаптировано под применение припоев SAC с более высокой температурой плавления. Например, такой припой, как Sn95,5/Ag3,9/Cu0,7, имеет температуру плавления 217 °С, что на 34 °С выше Sn62/Pb38. Кроме того, большинство бессвинцовых припоев имеют меньшую текучесть (смачиваемость), чем оловянно-свинцовые. Данное обстоятельство требует повышения температуры еще на 20 °С. Поэтому недостатком данного бессвинцового процесса является высокая температура плавления. При пайке, максимальная температура термопрофиля должна быть от +235 до +260 °С. Таким образом, изменение режима пайки в сторону увеличения температуры может приводить к серьезным проблемам при использовании некоторых традиционных материалов оснований печатных плат, а также при использовании температурно-чувствительных компонентов.

При использовании более высокой температуры пайки в бессвинцовом процессе значительно возрастают требования к базовым материалам. При неправильном выборе материалов возникают такие дефекты, как деламинация, разрыв металлизации отверстий, подъем контактной площадки. Так как печатная плата состоит из различных разнородных материалов, например, таких как медь, стеклоткань, эпоксидная смола, они имеют значительно различающиеся термические коэффициенты линейного расширения (ТКЛР). Армирование стекловолокном позволяет улучшить размерную стабильность, но только вдоль плоскости листа материала. В направлении, перпендикулярном к плоскости армирования, ТКЛР остается предельно большим (по оси Z). Поэтому при несоответствии базового материала увеличенной температуре пайки происходят термомеханические напряжения, приводя-

щие к растяжению металлизации вдоль оси отверстия, деформации материала вдоль оси Z. На рисунке 2 изображена деформация материала основания, а на рисунке 3 – разрыв металлизации отверстия.

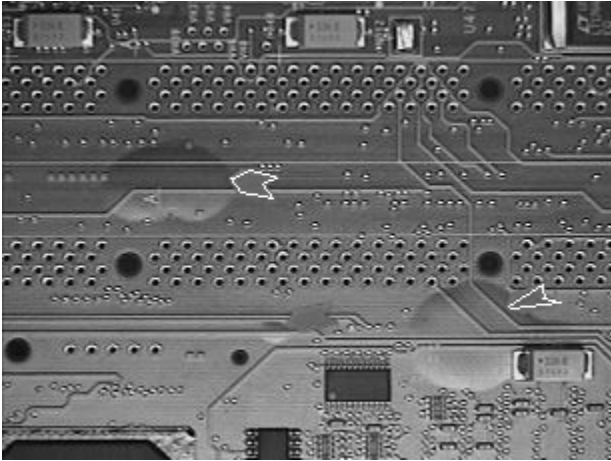


Рисунок 2 – Несовместимость материала основания повышенной температуры пайки

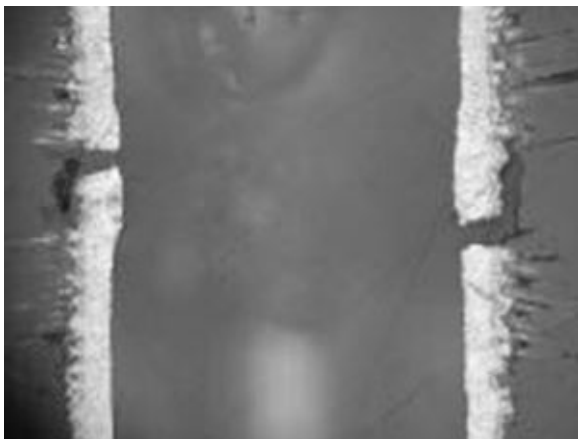


Рисунок 3 – Разрыв металлизации отверстия

При выборе базового материала для бессвинцового процесса с применением припоев, имеющих повышенную температуру пайки, необходимо учитывать следующие параметры:

- T_g – температура стеклования. Характеризует температуру, при которой происходит переход базового материала в “мягкое” состояние;
- T_{260}/T_{288} – время до деляминации. Характеризует время до начала деляминации при соответствующей температуре;
- T_d – температура разрушения. Характеризует температуру, при которой вес базового материала уменьшается на 5 %;
- CTE_z – коэффициент теплового расширения по оси Z. Выше температуры T_g возрастает и значение CTE_z в 4 – 5 раз по сравнению со значением ниже температуры T_g .

Необходимо также учитывать, что на рынке доступны и другие бессвинцовые припои с низ-

кой температурой плавления, близкой к припоям олово-свинец или еще ниже (SnZn, SnBi, Indium® и т.д.).

Выбор припоев. Бессвинцовые припои можно выделить в основные пять групп.

SnCu – эвтектические медьсодержащие припои. Создавались для пайки волной припоя. Среди недостатков – худшие механические свойства, высокая температура плавления.

SnAg – серебросодержащие припои, применяются много лет. Хорошие механические свойства, хорошо паяются. Температура расплавления 221 °С. Высокая надежность.

SnAgCu – широко распространенная группа припоев. Соотношение компонентов является предметом постоянных дискуссий. Преимуществом данного припоя является более низкая температура расплавления – 217 °С.

SnAgBi – низкая температура плавления 200 – 210 °С, высокая надежность пайки. Имеет тенденцию к образованию перемычек, что вызывает необходимость добавлять специальные примеси в состав.

SnZnBi – имеет температуру плавления, близкую к свинецсодержащим припоям, но имеет ряд проблем, связанных с химической активностью.

При выборе бессвинцового припоя необходимо учитывать его важные свойства, а также класс электроники, в которой планируется его применение. К основным характеристикам припоя при пайке относят такие свойства, как температура плавления, смачиваемость, текучесть, агрессивность к меди и оборудованию, стабильность в расплавленном состоянии. К характеристикам припоя, влияющим на надежность, относят: прочность, пластичность, ударную вязкость, стабильность и тип микроструктуры, скорость роста интерметаллидов.

Смешанная технология монтажа. Организациям радиоэлектронной промышленности приходится сталкиваться с импортной компонентной базой с бессвинцовыми выводами, так как ведущие компании переключились на выпуск компонентной базы с бессвинцовыми покрытиями выводов. При этом накоплены складские запасы свинцовосодержащих компонентов. Присутствие тех и других компонентов в печатном узле в едином процессе пайки ставит вопрос о совместимости и надежности. Взаимодействие бессвинцового покрытия выводов со свинцовым припоем может вызывать изменения в образовании паяного соединения. Основная причина этого явления заключается в уменьшении скорости образования интерметаллического соединения. Это приводит к неполному смачиванию выводов компонентов и образованию пустот.

Основные проблемы смешанной комплектации [1]:

1) необходимо учитывать фактор бессвинцовой пайки на этапе разработки;

2) имеют место проблемы в закупках комплектации, отсутствует необходимая информация по покрытию выводов;

3) сложности и ограничения в закупках электронной компонентной базы категории military.

Для снижения недопустимых рисков смешанной комплектации рекомендуется использовать компоненты с полной обратной совместимостью, перелуживать компоненты или применять специальные паяльные пасты. Для решения проблем смешанной комплектации необходимо наличие полной и достоверной информации о компонентах и их покрытиях от поставщиков. Необходимо наличие на предприятиях, выпускающих ответственную аппаратуру, оборудования и приспособлений для возможности проведения анализа. Тем не менее, сегодня невозможно объективно избежать смешанной комплектации, в том числе в производстве специальной аппаратуры. Однако сегодня существуют методы для решения проблем смешанной комплектации, которые обеспечивают достаточный уровень надежности паяных соединений. Также существуют организационные проблемы для получения разрешения на применение бессвинцовой зарубежной компонентной базы в военной технике. Остается низким уровень конструкторских разработок, в которых необходимо учитывать передовой мировой опыт обеспечения заданной надежности аппаратуры в процессе проектирования. Из-за отсутствия необходимой отечественной нормативно-технической документации при проектировании электронных модулей игнорируются особенности обеспечения заданной долговечности паяных соединений, подробно изложенные в международных стандартах IPC.

Риски и перспективы для российского рынка электроники. Отечественная электроника в большей степени ориентирована на продукцию специального назначения. Для вооружения и военной техники одними из ключевых показателей качества являются надежность, срок эксплуатации 20 – 40 лет. Применение в ответственной электронике бессвинцовой технологии на сегодняшний день недопустимо [4]. Значительная часть электронной компонентной базы остается импортного производства, часто с выводами под бессвинцовую технологию. Для того, чтобы избежать применения смешанной технологии в ответственной аппаратуре, бессвинцовые компоненты перелуживают. Шариковые выводы

корпусов BGA подвергают реболлингу – процессу, при котором бессвинцовые выводы заменяются оловянно-свинцовыми. Данный процесс имеет несколько циклов теплового воздействия, которым подвергается компонент. Данные подходы имеют определенные риски, а также лишают гарантии от производителя компонентов.

Развернувшиеся с 2007 года на ряде ответственных предприятий отрасли исследования бессвинцовой технологии принесли результаты. Так, ОАО “Авангард” опубликовал результаты исследований [5]. Было установлено, что бессвинцовые покрытия выводов иностранной электронной компонентной базы полностью совместимы с оловянно-свинцовым припоем, в процессе пайки они хорошо смачиваются и образуют высококачественные паяные соединения. Для этого необходима полная оптимизация параметров дозированного нанесения припойной пасты и температурно-временных режимов пайки. При этом качество паяных соединений, выполненных с применением оловянно-свинцовых припоев, выше, чем качество бессвинцовых паяных соединений. Таким образом, монтаж компонентов с бессвинцовым покрытием выводов при условии их удовлетворительной паяемости оловянно-свинцовыми припоями по традиционной технологии является предпочтительнее, чем по бессвинцовой технологии. Проведенные металлографические исследования шлифов паяных соединений, образованных оловянно-свинцовым припоем между облуженными припоем ПОС-61 контактными площадками печатной платы и выводами поверхностно-монтируемых ЭРИ с покрытием Sn100 (бессвинцовое) и Sn85Pb15 (свинцовосодержащее), показали практически идентичные микроструктуры паяных соединений. В обоих случаях в паяных соединениях формируются тонкие слои односторонних интерметаллидов. С учетом идентичности микроструктур паяных соединений сделан вывод, что при условиях корректного проектирования электронных модулей долговечность паяных соединений ЭРИ, на выводах которых было “бессвинцовое” покрытие, должны быть на уровне долговечности оловянно-свинцового паяного соединения, что подтвердили проведенные ОАО “Авангард” укоренные сравнительные испытания паяных соединений различных конструкций. В том числе данный вывод подтвержден проведенными испытаниями на термоциклические воздействия в диапазоне температур от -65 до +125 °С, 6 000 циклов. В результате определены факторы, влияющие на надежность паяных соединений. Первичными параметрами для паяного соединения поверхностного монтажа, влияющими на надеж-

ность, являются конструктивные параметры, выбираемые при проектировании. К ним относятся физический размер компонента, тип соединения, высота и площадь паяного соединения, жесткость вывода, несовпадение ТКЛР компонента и подложки, циклический диапазон температуры. Вторичными параметрами для паяного соединения, влияющими на надежность, являются состав припоя, структура зернистости и форма паяного соединения. Сложнее обстоят дела при пайке оловянно-свинцовыми припоями бессвинцовых шариковых выводов корпуса BGA. Полученные структуры существенно отличаются от традиционной структуры оловянно-свинцового паяного соединения и BGA. По технологии “реболлинг” заменяют бессвинцовые шариковые выводы на оловянно-свинцовые. В результате “доработанной” BGA появляется возможность сформировать традиционное оловянно-свинцовое паяное соединение. Однако ряд производителей BGA не рекомендуют проводить процесс замены шариковых выводов из-за возможности повреждения контактных площадок и маски корпуса BGA в результате механического воздействия и двух циклов теплового воздействия. Реболлинг – дорогой и трудоемкий процесс, требующий высокой квалификации персонала. После реболлинга невозможно предъявить рекламации, а для большинства элементов предусмотрено не более трех перепаек. ОАО “Авангард” предложило решение данной проблемы, для чего была разработана подготовительная операция “преобразование”. На способ преобразования и состав, преобразующей припойной пасты, специалистами компании подана заявка на патент. Данная подготовительная операция преобразования бессвинцовых шариковых выводов BGA в эвтектический состав производится за один цикл теплового воздействия, исключает механические воздействия и сохраняет работоспособность микросхемы. Позволяет в процессе последующего поверхностного монтажа микросхем с преобразованными шариковыми выводами на печатную плату формировать качественные и надежные паяные соединения.

Экспериментальные исследования. С помощью металлографического микровизора μ Vizo-MET-221 с линейным увеличением от 50 до 4000 крат были исследованы несколько печатных узлов устройств. Модуль 1 – бессвинцовая пайка, бытовая электроника, срок эксплуатации – 3 года. Модуль 2 – классическая технология свинцовой пайки, вычислительная техника, срок эксплуатации – 10 лет. Исследование проводилось методом “работа в темном поле”. Метод применяется для наблюдения малококонтраст-

ных элементов объектов, для обнаружения дефектов, невидимых в “светлом поле”, для определения и классификации типа включений, например закиси меди, а также для определения наличия царапин и других дефектов. Метод воспроизводит ярко светящиеся контуры и структуры элементов объектов на темном фоне. Полученные изображения паяных соединений первого модуля (бессвинцовая пайка) приведены на рисунках 4 – 6. Изображение паяного соединения второго модуля (свинцовая пайка) приведено на рисунке 7.

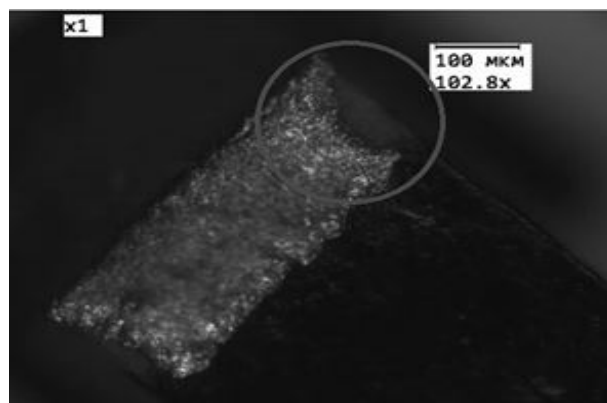


Рисунок 4 – Модуль 1. Нарушение слоя металлизации вывода чип-компонента

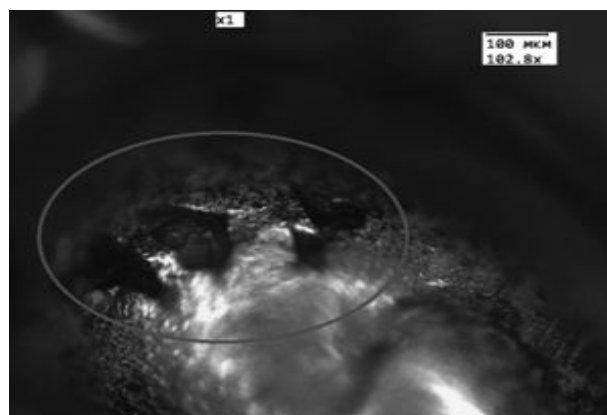


Рисунок 5 – Модуль 1. Коррозия монтажной пайки

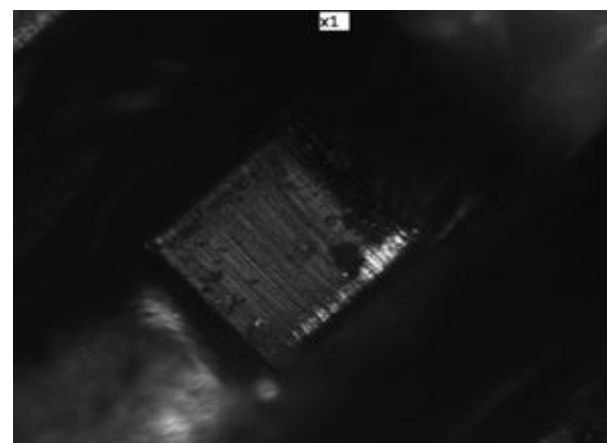


Рисунок 6 – Модуль 1. Коррозия выводов планарной микросхемы

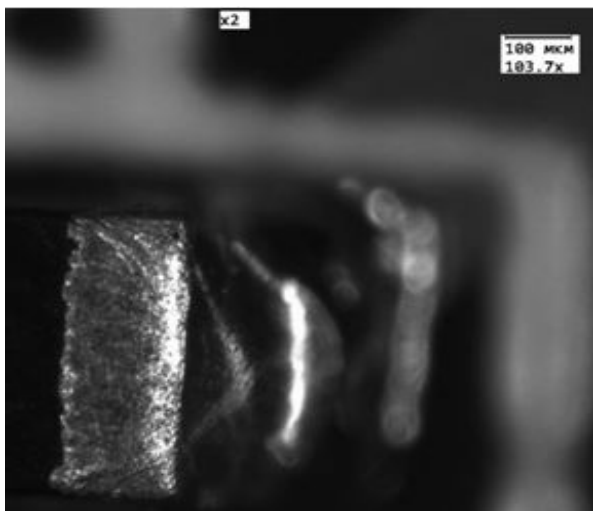


Рисунок 7 – Модуль 2. Галтель припоя правильной формы, без следов коррозии и повреждений. Слой металлизации чип-компонента без повреждений

Выводы. Результаты проведенного исследования показали, что бессвинцовая технология может без проблем применяться для бытовой аппаратуры, для которой надежность и долгий период эксплуатации не являются ключевыми показателями качества. Три года эксплуатации изделия привели к серьезным дефектам мест пайки, но не к полному отказу устройства, что приемлемо для бытовой аппаратуры. Применение бессвинцовой и смешанной технологии для устройств военного, двойного или аэрокосмического назначения является неприемлемым, так как необходимый ресурс по надежности сроком в 20 – 40 лет не будет достигнут. В данном случае необходимо применение традиционных способов монтажа, сокращение компонентов с бессвинцовыми выводами и использование компонентов с полной обратной совместимостью, перелуживание компонентов, использование специальных материалов и современного оборудования, решение вопросов импортозамещения элементной базы. Необходимо повышение уровня конструкторских разработок, освоение процесса расчета и прогнозирования надежности

и качества паяных соединений, распространение рекомендаций международных стандартов IPC. Однако комплекс рисков, связанных с бессвинцовой технологией и импортной электронно-компонентной базой с бессвинцовыми выводами, остается весьма важной научной задачей, требует комплексного управления рисками, прогнозирования качества и надежности на этапах создания, применения и утилизации радиоэлектронного средства. Растет необходимость создания комплексной системы управления безопасностью и рисками на предприятиях радиоэлектронной отрасли, включающей в себя все этапы жизненного цикла изделия. Это может быть реализовано на базе типовой интегрированной системы менеджмента, соответствующей международным стандартам на несколько систем менеджмента на основе подхода управления рисками [6]. С учетом изменений в новых редакциях стандартов на все системы менеджмента, включающие теперь в себя обязательный раздел по риск-менеджменту, данный подход является целесообразным. Выпуск новых редакций международных стандартов на системы менеджмента ожидается в конце 2015 года.

Библиографический список

1. *Медведев А.М., Новиков А.* Форум по бессвинцовым технологиям пайки // Технологии в электронной промышленности. 2007. – № 4. – С. 48 - 54.
2. *Рентюк В.* RoSH-директива: защита экологии или рынков? // Технологии в электронной промышленности. 2013. – №5. – С. 12 - 16.
3. *Kostic A.D., Ph.D.* Lead-free Electronics Reliability – An Update. The Aerospace Corporation, August 2011.
4. *Horan G.* Why do we care about Pb-free Electronics? SW&AEH Conference, August 20, 2009.
5. *Ивин В.Д.* Бессвинцовые тучи SMT // ЭКС-ПЕРТ+. 2014. – №2. – С. 39 - 44.
6. *Воруничев Д.С.* Интегрированная система менеджмента предприятия радиоэлектронного комплекса / Д.С. Воруничев // Организатор производства. 2012. – №2 (53). – С. 59 - 61.

УДК: 621.315

*Т.А. Холомина, А.Р. Семенов***ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ РЕЛАКСАЦИИ ЗАРЯДА
В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ**

Проведен анализ существующих теоретических моделей описания релаксационных процессов в полупроводниках и полупроводниковых барьерных структурах. Сформулированы критерии, позволяющие применять модели переноса неравновесных носителей заряда в релаксационных либо рекомбинационных полупроводниках. Показано, что ОПЗ полупроводниковой барьерной структуры при обратном смещении можно считать релаксационным полупроводником, в котором время релаксации носителей заряда определяется временем пролета при сохранении базой, где электрическое поле отсутствует, свойств рекомбинационного полупроводника.

Ключевые слова: электропроводность, максвелловская релаксация, рекомбинация, время релаксации, длина экранирования, длина дрейфа, длина баллистичности.

Введение. Особенности релаксационных процессов заряда в полупроводниках и барьерных структурах на их основе представляют значительный интерес, поскольку определяют частотные свойства полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Согласно представлениям авторов [1-4], полупроводники подразделяются на релаксационные и рекомбинационные в зависимости от того, превышает или нет время жизни носителей заряда τ_0 , определяющее диффузионную длину неосновных носителей, время диэлектрической релаксации τ_d основных неравновесных носителей заряда.

Полупроводники, для которых $\tau_0 > \tau_d$, называют рекомбинационными; к ним относятся, например, широко используемые низкоомные германий и кремний. Полупроводники, для которых $\tau_0 < \tau_d$, являются релаксационными; примерами таких веществ могут служить некоторые высокоомные полупроводники. Среди них — органические полупроводники (например, антрацен) и неупорядоченные (аморфные) полупроводники (например, халькогенидные стекла), характеризующиеся малым временем жизни неосновных неравновесных носителей заряда.

Целью работы является анализ возможностей учета влияния особенностей процессов изменения концентрации носителей заряда на характеристики релаксационных и рекомбинационных полупроводников, а также барьерных структур на их основе.

Электропроводность, определяемая временем жизни неосновных неравновесных носителей заряда. Перед обсуждением характеристик релаксационного режима рассмотрим ряд аспектов теории неравновесной проводимости в обычных рекомбинационных полупроводниках в неравновесных условиях, когда определяющим фактором является время жизни неосновных носителей.

Условие $\tau_0 > \tau_d$ не всегда удается четко определить, однако в большинстве случаев предполагается, что при его соблюдении в обычных полупроводниках выполняется условие электронейтральности [5]. Под этим подразумевается, что диэлектрическая релаксация протекает столь быстро по сравнению с другими зависящими от времени процессами, что ее можно считать мгновенной. Время диэлектрической релаксации, или так называемое максвелловское время, определяется как

$$\tau_m = \tau_d = \varepsilon\varepsilon_0/\sigma = \varepsilon\varepsilon_0\rho, \quad (1)$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость, определяющая степень кулоновского взаимодействия зарядов внутри полупроводника (т.е. диэлектрической среды), ε_0 — электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, σ — электропроводность, являющаяся мерой концентрации и подвижности имеющихся свободных носителей заряда, ρ — удельное электрическое сопротивление.

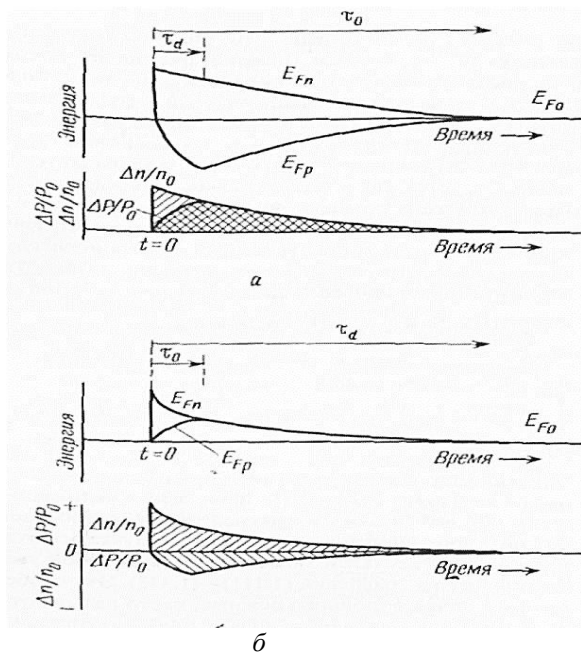
Очевидно, что чем больше τ_d (τ_m), тем больше времени требуется для релаксации возникше-

го объемного заряда. Для обычных полупроводников τ_d имеет порядок $10^{-14} - 10^{-12}$ с, а τ_0 , как правило, превышает 10^{-9} с. Инжекция в полупроводник неосновных носителей (электронов) с концентрацией Δn приводит к такому изменению положения квазиуровня Ферми E_{Fn} , для которого

$$n = n_0 + \Delta n = N_c \exp[-(E_c - E_{Fn})/kT], \quad (2)$$

где n_0 — равновесная концентрация электронов, N_c — эффективная плотность состояний в зоне проводимости, E_c — энергия, соответствующая дну зоны проводимости полупроводника, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

После инжекции будет наблюдаться очень быстрая реакция основных носителей (дырок), которые стремятся нейтрализовать этот избыток электронов Δn и сохранить нейтральность (см. рисунок). Процессы релаксации и рекомбинации возвращают систему к равновесию.



Изменение квазиуровней Ферми E_{Fn} и E_{Fp} и относительных концентраций носителей зарядов после кратковременной инжекции избытка неосновных носителей (электронов) Δn : а — рекомбинационный режим: $\tau_0 > \tau_d$; б — релаксационный режим: $\tau_0 < \tau_d$ [1]

Поле, создаваемое избытком заряда неосновных носителей тока — $q\Delta n$, будет притягивать из ближайшего окружения такое количество основных носителей Δp , которое полностью нейтрализует избыточный заряд. Характеристическим временем этого процесса и является время релаксации τ_d . По завершении этого процесса релаксации полупроводник вновь находится в нейтральном состоянии. Достижение равновесного состояния происходит в результате реком-

бинации, позволяющей за какое-то время снизить Δn до уровня, при котором восстанавливается равновесие по закону действующих масс.

Характеристическим временем этого процесса является время жизни неосновных носителей τ_0 . При равновесии квазиуровни E_{Fn} и E_{Fp} совпадают, образуя единый уровень Ферми E_{F0} , который определяет равновесные концентрации электронов и дырок n_0 и p_0 . В неравновесной системе для нейтрализации Δn локальное значение Δp должно возрастать, при этом E_{Fp} входит в уравнение, аналогичное (2):

$$p = p_0 + \Delta p = N_v \exp[-(E_{Fp} - E_v)/kT], \quad (3)$$

где N_v — эффективная плотность состояний в валентной зоне, E_v — энергия, соответствующая потолку валентной зоны полупроводника.

Время нарастания Δp и ΔE_{Fp} при заданном Δn равно времени релаксации τ_d . В результате рекомбинации Δn и Δp убывают во времени, а E_{Fn} и E_{Fp} в течение времени τ_0 возвращаются к единому равновесному уровню E_{F0} , как показано на рисунке, часть а.

В сильном электрическом поле, при котором приращение дрейфовой скорости носителя заряда на длине свободного пробега сопоставимо с тепловой скоростью при соответствующей температуре, используют понятие длины дрейфа для неосновных носителей заряда: $L_E = \mu_n \tau_n E$, где μ_n и τ_n — подвижность и время жизни неосновных носителей заряда, E — напряженность электрического поля. Согласно нашим расчетам, величина L_E может достигать 10^{-2} м.

Электропроводность, определяемая временем диэлектрической релаксации. При условии $\tau_0 < \tau_d$, соответствующем релаксационному режиму, проводимость σ должна быть очень низкой. Поэтому соотношение (1) может выполняться в веществах с малой подвижностью носителей и (или) низкой концентрацией подвижных носителей заряда.

Например, полупроводник с сопротивлением 10^8 Ом·см характеризуется временем релаксации порядка 10^{-4} с, что, как правило, превышает время жизни неосновных носителей, значение которого для веществ с высоким сопротивлением обычно меньше 10^{-8} с. Согласно этой классификации, легированные золотом кремний и германий могут превратиться в релаксационные полупроводники при очень низких температурах, когда τ_0 становится меньше, чем τ_d .

В рекомбинационном режиме условие нейтральности достигается задолго до того, как исчезает избыток носителей Δn , тогда как в релаксационном режиме имеет место обратная ситуация. После инжекции в релаксационный полу-

проводник избыточной концентрации Δn неосновных носителей в течение промежутка времени τ_0 , равного времени их жизни, в результате понижения локальной концентрации основных носителей происходит быстрое восстановление термодинамически равновесного состояния и выполнения закона действующих масс. Таким образом, в момент завершения этого процесса произведение pn подчиняется уравнению

$$pn = (n_0 + \Delta n)(p_0 + \Delta p) = n_i^2 = p_0 n_0, \quad (4)$$

откуда

$$\Delta p = -p_0 \Delta n / (n_0 + \Delta n). \quad (5)$$

Если уровень инжекции настолько высок, что $\Delta n > n_0$, то

$$\Delta p \rightarrow -p_0. \quad (6)$$

Это означает, что в таком предельном случае все подвижные основные носители могут исчезнуть. В условиях рекомбинационного режима инжекция неосновных носителей будет способствовать снижению сопротивления полупроводника, в то время как в случае релаксационного режима инжекция неосновных носителей может повлечь за собой увеличение его сопротивления, как следует из уравнений (4)—(6).

Таблица 1 – Сравнение параметров и характеристик рекомбинационных и релаксационных полупроводников

Свойство	Тип полупроводника	
	Рекомбинационный	Релаксационный
τ_0, τ_d	$\tau_0 > \tau_d$	$\tau_0 < \tau_d$
I - V -характеристики контакта при прямом смещении	$I \propto V^n$ или $I \propto \exp(qV/nkT)$ при $n \leq 1$ (суперлинейная зависимость)	$I \propto V^n$ при $n < 1$ или $n = 1/2$ (сублинейная зависимость)
E_{Fn} и E_{Fp} (после инжекции носителей)	$E_{Fn} \neq E_{Fp}$ Локальная нейтральность (отсутствии локального объемного заряда), локальное нарушение равновесия	$E_{Fn} = E_{Fp}$ Образование локального объемного заряда (эффект объемного заряда), локальное равновесие
Область вблизи контакта, инжектирующего неосновные носители	Возрастание концентрации основных носителей (убывание сопротивления)	Уменьшение концентрации основных носителей (повышение сопротивления)
Общие свойства	Низкое сопротивление, высокая подвижность и узкая запрещенная зона (например, для обычных полупроводников Si и Ge)	Высокое сопротивление, низкая подвижность и широкая запрещенная зона (например, для органических и аморфных полупроводников при низких температурах)
Перенос заряда (электронные, фотоэлектрические и гальвано-магнитные свойства)	Исследованы подробно	Исследованы недостаточно

Полевые домены (или локальные возмущения потенциала), возникающие при импульсной инжекции неосновных носителей, могут перемещаться под влиянием приложенного электрического поля. В релаксационном режиме эти флук-

туации будут двигаться в том же направлении, что и основные носители, потому что избыток неосновных носителей быстро убывает в результате рекомбинационного процесса, а концентрация основных носителей медленно изменяется в

Эту особенность инжекции, характерную для релаксационного режима, часто называют «рекомбинационной инжекцией объемного заряда» [4]. Обычно слой, обедненный основными носителями, располагается непосредственно у контакта, инжектирующего неосновные носители, следуя за узким рекомбинационным фронтом (рисунок, часть б). Именно этот слой, обедненный основными носителями, ответствен за сублинейную зависимость тока от напряжения ($I \propto V^{1/2}$), так как повышение напряжения увеличивает объемный заряд в обедненном слое, приводя тем самым к возрастанию дифференциального сопротивления, а в некоторых случаях даже создавая область отрицательного дифференциального сопротивления [1]. По истечении промежутка времени τ_0 концентрация объемного заряда медленно понижается и система достигает равновесия (рисунок, часть б).

В таблице 1 приведены основные различия в электрических характеристиках рекомбинационных и релаксационных полупроводников, а из таблицы 2 следует, насколько похожи свойства релаксационных органических полупроводников и релаксационных неупорядоченных полупроводников.

туации будут двигаться в том же направлении, что и основные носители, потому что избыток неосновных носителей быстро убывает в результате рекомбинационного процесса, а концентрация основных носителей медленно изменяется в

направлении, соответствующем состоянию нейтральности. В условиях рекомбинационного режима нейтральные локальные возмущения кон-

центрации носителей будут перемещаться в том же направлении, что и неосновные носители.

Таблица 2 – Свойства релаксационных органических полупроводников и релаксационных аморфных полупроводников [1]

Свойство	Тип полупроводника	
	Органический	Аморфный
Типичные примеры материалов	Антрацен, тетрацен	As ₂ Se ₃ , GeTe, халькогенидные стекла
Энергия активации проводимости	$\sigma = \sigma'_0 \exp\left(\frac{\Delta E_0}{2kT}\right) \times \exp\left(-\frac{\Delta E_0}{2kT}\right)$	$\sigma = \sigma'_0 \times \exp\left(-\frac{\Delta E_0}{2kT}\right)$
Проводимость в переменном поле $\sigma(\omega) \propto \omega^n$	$n \leq 1$	$0,7 < n < 1,0$
Механизм переноса носителей заряда	Перескоковый механизм, лимитируемый медленными фононами; перескоковый механизм, лимитируемый медленными электронами	Перескоковый механизм; проводимость следует зависимости $\sigma \propto T^{-4}$
Холловская подвижность	Низкая и нормальная	Низкая и нормальная
Дрейфовая подвижность, см ² /(В·с)	≤ 1	≤ 1
Механизмы переключения и памяти	Шнурование тока	Шнурование тока
Поглощение света и порог фотопроводимости	Зависят от энергетических уровней экситонов и ловушек	Зависят от распределения локализованных состояний

Особенности процессов релаксации заряда в полупроводниковых барьерных структурах.

Ряд теоретических и экспериментальных работ, посвященных изучению релаксационных процессов в физических барьерных слоях, основан на теории релаксации заряда, разработанной Шокли и Ридом, которая отличается рядом допущений, искажающих физический смысл явления [6]. В частности, в ОПЗ полностью отсутствуют процессы генерации и рекомбинации носителей (на которых базируются теоретические выкладки авторов) вследствие наличия сильного электрического поля, обеспечивающего преобладание дрейфа носителей заряда над другими процессами.

Особенности подхода к описанию процессов релаксации заряда в полупроводниках и полупроводниковых барьерных структурах, предложенного в работах Р. Браже и др. [7], основаны на моделировании процессов распространения, усиления и генерации нелинейных электрогидродинамических волн свободных носителей заряда и исследовании возможностей их применения в электронных устройствах обработки сигналов.

Авторами модели [7] показано, что в слоях из слаболегированных примесных полупроводников [толщиной меньше баллистической длины

$L_\sigma = \tau_{cn}(2\hbar\omega_0/m^*)^{1/2}$], но больше, чем дебаевская длина экранирования свободных носителей заряда] при наличии градиента их концентрации внешнее поле возбуждает волны носителей с частотами, превышающими частоту максвелловской релаксации, но меньшими, чем диффузионная частота носителей заряда. Здесь $\tau_{cn} = 10^{-13} - 10^{-12}$ с – время спонтанного излучения оптических фононов; ω_0 – их предельная частота; \hbar – постоянная Планка; m^* – эффективная масса носителя. Наши расчеты показали, что длина баллистичности L_σ составляет $10^{-3} - 10^{-2}$ м, т.е. практически совпадает с длиной дрейфа L_E , но значительно превышает дебаевскую длину экранирования.

Такие и более жесткие с точки зрения практического отсутствия свободных носителей заряда условия реализуются в ОПЗ физических барьерных структур.

Активационно-дрейфовая модель, разработанная и обоснованная П.Т.Орешкиным с соавторами [8-10], основана на рассмотрении двух совместных статистических событий – эмиссии с глубоких уровней (ГУ) и дрейфа в поле области пространственного заряда (ОПЗ) носителей заряда полупроводниковой барьерной структуры (барьеров Шоттки и несимметричных p-n-переходов) при обратном смещении. Соответственно произведение вероятностей этих со-

бытий дает общую вероятность активационно-дрейфового явления [8-10].

Описанные представления позволяют учесть не только активационный, но и дрейфовый компонент процесса релаксации в отличие от ранее предложенных механизмов. В [10] приведены аргументированные доказательства и экспериментальные результаты, подтверждающие развиваемую модель. При этом в ОПЗ, где свободные носители заряда практически отсутствуют, процессы захвата не определяют физический механизм процесса, а характерные длины релаксационных процессов превышают значение дебаевской длины экранирования.

Таким образом, ОПЗ барьерной структуры при обратном смещении можно считать релаксационным полупроводником, в котором время релаксации носителей заряда определяется временем пролета, при сохранении базой, где электрическое поле отсутствует, свойств рекомбинационного полупроводника.

Одним из основных предметов дискуссии во время апробации модели являлся вопрос о соотношении времени активации носителя заряда с ГУ в ОПЗ обратной смещенной барьерной структуры и времени пролета в базу. Ряд авторов полагал, что временем пролета носителей заряда в ОПЗ можно пренебречь по сравнению со временем активации, однако экспериментальные результаты, как наши, так и сторонних авторов, подтвердили, что время пролета носителей в ОПЗ определяется максвелловским временем релаксации и время пролета может быть сопоставимо с общим временем релаксации [10,11].

В соответствии с представлениями теории релаксации заряда в высокоомных материалах (или областях приборов) [2-4] указанное представляется справедливым.

Заключение. В работе предложен новый подход к систематизации релаксационных процессов в полупроводниках и барьерных структурах. Проведен анализ теоретических моделей, позволяющих определить параметры и характеристики, а также особенности процессов изменения концентрации неравновесных носителей заряда в релаксационных, рекомбинационных полупроводниках и барьерных структурах на их основе.

Рассмотрены механизмы процессов электропроводности, определяемой временем жизни неосновных неравновесных носителей заряда либо временем диэлектрической релаксации. Выполнен расчет характерных длин релаксации

для рекомбинационных (диффузионной длины и длины дрейфа), а также релаксационных (дебаевской длины и длины баллистичности) полупроводников.

В дальнейшем представляется перспективным описание процессов в ОПЗ барьерных структур с точки зрения распространения, усиления и генерации нелинейных электрогидродинамических волн свободных носителей заряда и исследования возможностей их применения.

Результаты исследований позволяют заключить, что активационно-дрейфовый механизм переноса носителей заряда относится к наиболее общим физическим процессам и дальнейшей задачей является теоретическое и экспериментальное обоснование возможностей применения приведенных выше представлений к описанию и практическому применению других релаксационных процессов в барьерных структурах.

Библиографический список

1. Као К., Хуанг В. Перенос электронов в твердых телах. В 2-х частях. Ч.1: пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 352 с.
2. Haegel N.M. Relaxation semiconductors: in theory and in practice // Appl.Phys. 1991. – A53. – P. 1-7.
3. Manificier J.C. and Ardebili R. Bulk and contact effects in p+-SI-n+ semi-insulating GaAs structures // J. Appl. Phys. 1995. – Vol.77. – P.3174-3185.
4. Numerical analysis of Charge Transport in Semi-insulating GaAs with Two Contacts / K. Zdansky, B.K. Jones, J. Santana and T. Sloan // J. Appl. Phys. 1996. – Vol.79. – P. 3611-3618.
5. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. – М.: Высшая школа, 1977. – 448 с.
6. Shockley W. Electrons, holes and traps // Proc. IRE. 1958. – Vol. 46. P. 973-990.
7. Бражес Р.А., Новикова Т.А. Взаимодействие контактных электрогидродинамических волн в полупроводниках с токами // ЖТФ. 1999. – Т.69. – Вып.8. – С.32-39.
8. Oreshkin P.T. Barrier layers as resonators on deep centers // Phys. stat. sol. (a). 1991. – Vol. 123. – №2. – P. 483-491.
9. Орешкин П.Т. Барьерные слои как резонаторы на глубоких центрах // Известия вузов СССР. Физика. 1990. – № 11. – С. 21-25.
10. Холомина Т.А. Физический механизм нестационарной спектроскопии глубоких уровней и генерации низкочастотного шума в барьерных слоях // Изв. вузов. Электроника. 1998. – № 2. – С. 22-26.
11. Холомина Т.А. Особенности процессов генерации НЧ-шума в полупроводниковых барьерных структурах // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 39-2. С. 117 – 121.