

ISSN - 1561-5405

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

Том 21

№ 3

2016

май - июнь



Известия высших учебных заведений ЭЛЕКТРОНИКА

Том 21 № 3
2016 май–июнь

Научно-технический журнал

Издается с 1996 г.

Выходит 6 раз в год

Учредители:

Министерство
образования и науки
Российской Федерации

Национальный
исследовательский
университет «МИЭТ»

Главный редактор

Чаплыгин Ю.А., чл.-корр. РАН,
д.т.н., проф.

Зам. главного редактора

Гаврилов С.А., д.т.н., проф.

Редакционная коллегия:

Бархоткин В.А., д.т.н., проф.

Бахтин А.А., канд. т. н., доц.

Быков Д.В., д.т.н., проф.

Горбачевич А.А., чл.-корр. РАН,
д.ф.-м.н., проф.

Грибов Б.Г., чл.-корр. РАН,
д.х.н., проф.

Казённов Г.Г., д.т.н., проф.

Кополёв Б.Г., д.т.н., проф.

Коркишко Ю.Н., д.ф.-м.н., проф.

Королёв М.А., д.т.н., проф.

Красников Г.Я., акад. РАН,
д.т.н., проф.

Кубарев Ю.В., д.ф.-м.н., проф.

Лабунюв В.А., акад. НАН
Беларуси, д.т.н., проф.

Максимов И.А., PhD, проф.

Лундского университета
(Швеция)

Меликян В.Ш., чл.-корр. НАН Армении,
д.т.н., проф.

Неволин В.К., д.ф.-м.н., проф.

Неволин В.Н., д.ф.-м.н., проф.

Петросяц К.О., д.т.н., проф.

Руденко А.А., канд.т.н., доц.

Сазонов А.Ю., PhD, проф.
Университета Ватерлоо
(Канада)

Сауров А.Н., чл.-корр. РАН, д.т.н., проф.

Селищев С.В., д.ф.-м.н., проф.

Сигов А.С., акад. РАН,

д.ф.-м.н., проф.

Таиров Ю.М., д.т.н., проф.

Телец В.А., д.т.н., проф.

Тимошенко С.П., д.т.н., проф.

Тихонов А.Н., д.т.н., проф.

Усанов Д.А., д.ф.-м.н., проф.

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы электронной техники

Умбетова К.Б., Искаков Р.М., Коробова Н.Е.,
Кравцова В.Д. Особенности синтеза электропроводных
материалов на основе металлизированных полиимидов
как элементов солнечных батарей и микросистемной
техники 201

Технология микро- и нанoeлектроники

Соколов Е.М., Федотов С.Д., Стаценко В.Н.,
Тимошенко С.П., Емельянов А.В. Исследование
структурных свойств кремния на сапфире в процессе
гидридно-хлоридной газофазной гетероэпитаксии 208

Рябышенков А.С. Системный анализ функционирова-
ния чистых помещений для микроэлектроники..... 218

Микроэлектронные приборы и системы

Русанов А.В., Осыкин А.А., Балашов Ю.С. Исследова-
ние интегрального МОП-транзистора для микро мощных
интегральных схем..... 224

Нанотехнология

Морозов Р.А., Никитина А.В., Ромашкин А.В.,
Неволин В.К., Суетина И.А. Атомно-силовая микро-
скопия клеток фибробластов, культивированных на кол-
лаген-хитозановом каркасе 230

Заведующая редакцией
С.Г. Зверева

Редактор
А.В. Тихонова

Научный редактор
С.Г. Зверева

Корректор
И.В. Проскурякова

Верстка
А.Ю. Рыжков
С.Ю. Рыжков

Адрес редакции: 124498,
г. Москва, г. Зеленоград,
пл. Шокина, д. 1, МИЭТ
Тел.: 8-499-734-6205
E-mail: magazine@miec.ru
http://www.miet.ru

Подписано в печать 3.06.2016.
Формат бумаги 60×84 1/8.
Цифровая печать.
Объем 11,63 усл.печ.л.,
10,4 уч.-изд.л.
Заказ № 47.

Отпечатано
в типографии ИПК МИЭТ
124498, г. Москва, г. Зеленоград,
пл. Шокина, д. 1, МИЭТ

Свидетельство о регистрации
№ 014134
выдано Комитетом РФ по печати
12.10.95.

Включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Включен в Российский индекс научного цитирования и в Рейтинг Science Index.

Включен в Russian Science Citation Index на базе Web of Science.

Информационные технологии

Тихомиров А.В., Омелянчук Е.В., Семенова А.Ю., Михайлов В.Ю. Повышение пропускной способности радиолинии космос – Земля с использованием частотного разнесения каналов 235

Шишкевич А.А. Оценка числа абонентов информационно-управляющей вычислительной системы с использованием ЛВС EtherCAT из условия обеспечения требуемой наработки на отказ системы..... 240

Зароченцев С.Г., Ковалев В.И., Пастухов А.А., Прокофьев А.А. Использование нейронных сетей для построения прогностических моделей процессов в энергетических установках и их агрегатах..... 247

Интегральные радиоэлектронные устройства

Лялин К.С., Максимовская А.И., Орешкин В.И., Меркулова Ж.В., Чистюхин В.В. Влияние способа получения квадратурных компонент сигнала на характеристики антенной решетки с цифровым формированием луча 254

Тимошенко В.П., Ефимов А.Г. Применение кремнийгерманиевой технологии для создания активных СВЧ-блоков АФАР..... 261

Методы и техника измерений

Белов А.Г., Денисов И.А., Каневский В.Е., Пашкова Н.В., Лысенко А.П. Определение концентрации свободных носителей заряда в твердых растворах $Cd_xHg_{1-x}Te$ по спектрам отражения в дальней инфракрасной области..... 270

Базаев Н.А., Пржиялговская А.В., Руденко П.А. Особенности использования микросхемы AD5933 в качестве измерителя импеданса при проектировании малогабаритных систем..... 279

Краткие сообщения

Александрова А.Б., Харитонов И.А. Исследование влияния электронного облучения на импульсную электрическую прочность диодов..... 286

Сергеев В.А., Ходаков А.М., Молгачев А.А. Моделирование теплового поражения СВЧ-диода мощным импульсом электромагнитного излучения 289

Памяти Орликовского Александра Александровича..... 293

Юбилей

Неволину Владимиру Кирилловичу – 75 лет 295

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ BRIEF REPORTS

УДК 621.382.2

Исследование влияния электронного облучения на импульсную электрическую прочность диодов

А.Б. Александрова, И.А. Харитонов

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Study of Electron Irradiation Effect on Electrical Impulse

A.V. Aleksandrova, I.A. Kharitonov

National Research University Higher School of Economics

Исследовано влияние электронного облучения на параметры полупроводниковых диодов при прохождении одиночного импульса тока. Приведены результаты расчетов и экспериментальных исследований влияния электронного облучения на импульсную электрическую прочность. Показано, что при увеличении длительности импульса уменьшение амплитуды импульса тока, необходимого для достижения критической температуры, происходит за счет увеличения теплового сопротивления.

Ключевые слова: диод; импульс тока; импульсная электрическая прочность; критическая температура; электронное облучение; тепловое сопротивление.

The effect of electron irradiation on parameters of semiconductor diodes with a single current pulse passage has been studied. The results of the calculations and experimental studies of the electron irradiation effect on the electrical impulse strength have been presented. It has been shown that with the pulse width increase the decrease of the pulse amplitude value of the current, required to reach the critical temperature, occurs due to the thermal resistance increase.

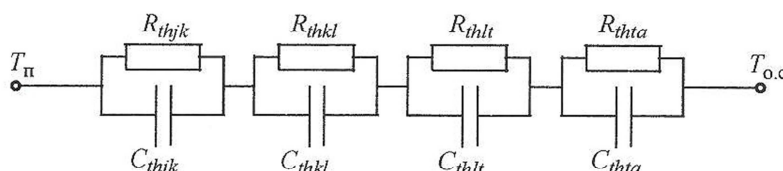
Keywords: diode; current pulse; pulse strength; the critical temperature; thermal resistance; electron irradiation; thermal resistance.

При эксплуатации электронного оборудования в электрических сетях могут возникать электрические перегрузки, вызванные грозowymi разрядами или коммутационными процессами. При прохождении одиночного импульса тока $T_{\text{имп}}$ (ОИТ) через $p-n$ -переход выделяется импульсная мощность в его локализованной области, которая приводит к перегреву $p-n$ -перехода. В результате температура в $p-n$ -переходе достигает критической $T_{\text{кр}}$ и может произойти плавление кремния и, как следствие, разрушение структуры диода. Значение импульсной мощности $P_{\text{имп}}$ при этих процессах определяется напряжением пробоя $U_{\text{проб}}$, ОИТ и сопротивлением базы R_6 диода. Экспериментальное определение температуры $p-n$ -перехода в момент прохождения ОИТ является сложным и дорогостоящим. Поэтому для оценки перегрева используются методы моделирования тепловых процессов. Электронное облучение (ЭО) применяется при произ-

© А.Б. Александрова, И.А. Харитонов, 2016

водстве полупроводниковых приборов для уменьшения времени жизни носителей. После воздействия ЭО изменяется напряжение пробоя и сопротивление базы. Поэтому исследование изменения импульсной электрической прочности после ЭО представляет научный и практический интерес.

Согласно работам [1–3] тепловую модель диода можно представить как тепловое сопротивление R_{thja} от p - n -перехода до окружающей среды, которое можно разложить на составляющие (рисунок). Для учета емкостных составляющих используют переходное тепловое сопротивление $Z(t)$, рассчитываемое для многослойной структуры диода с помощью схемы Фостера [2]. Для расчета тепловых сопротивлений R_{thi} применяется методика, представленная в работе [4].



Тепловая модель диода: R_{thjk} – тепловое сопротивление p - n -переход – кристалл; R_{thkl} – тепловое сопротивление кристалл – алюминий; R_{thlt} – тепловое сопротивление алюминий – теплоотвод; R_{thta} – тепловое сопротивление теплоотвод – окружающая среда; C_{thjk} – тепловая емкость p - n -переход – кристалл; C_{thkl} – тепловая емкость кристалл – алюминий; C_{thlt} – тепловая емкость алюминий – теплоотвод; C_{thta} – тепловая емкость теплоотвод – окружающая среда; T_p , $T_{o.c}$ – температура p - n -перехода и окружающей среды соответственно

Напряжение пробоя $U_{проб}$ пропорционально градиенту концентрации примеси в степени 0,4 [5]. При воздействии ЭО с флюенсом $\Phi = 10^{16}$ см⁻² увеличение $U_{проб}$ составило 2 В. Изменение эффективной концентрации N_6 типозадающей примеси в базе диода от интегрального потока Φ [6] приводит к уменьшению сопротивления базы R_6 .

Оценка увеличения напряжения лавинного пробоя в кремнии в зависимости от температуры проведена в работе [7]. При прохождении ОИТ выделение тепловой энергии в области p - n -перехода приводит к увеличению напряжения пробоя. Для температур от 450 до 500 °С отношение $U_{проб}/U_{проб300}$ составляет не более 1,3.

Значение переходного теплового сопротивления $Z(t)$ для длительности импульса 2 мс составляет 0,045 К/Вт, для длительности импульса 5 мс – 0,055 К/Вт. Критическая температура $T_{кр}$ за время прохождения рассчитывается по формуле

$$T_{кр} = Z(t)I_{имп}(U_{проб} + I_{имп}R_6) + T_{o.c}.$$

Значение $T_{кр}$, приводящее к выходу диода из строя, принимаем равным 570°С. Расчет значений ОИТ, необходимых для достижения $T_{кр}$, дал следующие результаты: для длительности импульса 2 мс ОИТ достигает значения 53 А, для длительности импульса 5 мс ОИТ равен 45 А. Для диодов после ЭО с флюенсом $\Phi = 10^{16}$ см⁻²: для длительности импульса 2 мс ОИТ составляет 48 А, а для длительности импульса 5 мс – 45 А.

Для экспериментального исследования выбраны диоды с кремниевой p^+n-n^+ -структурой, облученные электронами с энергией $E_e = 10$ МэВ, и флюенсом $\Phi = 10^{16}$ см⁻². Исследование на воздействие ОИТ проводилось до и после ЭО (выборка 40 штук) для длительности импульса 2 и 5 мс. На диоды подавались ОИТ с увеличивающейся амплитудой до выхода диода из строя. Результаты расчетов и усредненные результаты измерений основных параметров диодов приведены в таблице.

Из таблицы видно, что результаты измерений подтверждают результаты расчетов. Для больших длительностей импульса значение теплового сопротивления больше, поэтому при достижении $T_{кр}$ требуется меньшая амплитуда ОИТ. Отношения амплитуды ОИТ и импульсной мощности до и после ЭО составляют $I_{имп0}/I_{имп} \approx 1,15$ и $P_{имп0}/P_{имп} \approx 1,2$.

Значения основных параметров диодов при прохождении ОИТ

Длительность импульса, мс	$Z(t)$, К/Вт	Условия измерения	Расчет		Эксперимент	
			R_{Σ} , Ом	$I_{\text{имп}}$, А	$I_{\text{имп}}$, А	$P_{\text{имп}}$, кВт
2	0,045	До облучения	0,33	54	53	12
		После облучения	0,20	45	48	10
5	0,055	До облучения	0,33	47	45	10
		После облучения	0,20	45	43	9

Таким образом, при увеличении длительности импульса уменьшение амплитуды ОИТ, необходимого для достижения критической температуры, происходит за счет увеличения теплового сопротивления. Облучение электронами с энергией $E_e = 10 \text{ МэВ}$ и флюенсом $\Phi = 10^{16} \text{ см}^{-2}$ уменьшает значения ОИТ и импульсной мощности менее чем на 20%. ЭО не ухудшает импульсную электрическую прочность диодов и может использоваться при производстве диодов.

Литература

1. **Ванин В.И.** Зависимость импульсной электрической прочности полупроводниковых приборов от длительности и формы одиночного импульса напряжения, воздействующего на них//ВАНТ: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2009. – № 2. – С. 23–27.
2. **Вяхирев В.** Измерение тепловых характеристик полупроводников электронных компонентов//Технология электронной промышленности. Сер. Микроэлектроника. – 2013. – № 3. – С. 90–92.
3. **Hensler A., Herold C., Lutz J., Thoben M.** Thermal impedance monitoring during power cycling tests // PCIM Europe (Nuremberg, Germany, 2011). – Nuremberg, 2011.
4. Влияние перегрева p - n -перехода на деградацию мощных импульсных кремниевых лавинно-пролетных диодов / **А.Е. Беляев, В.В. Басанец, Н.С. Болтовец и др.** // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45. – Вып. 2. – С. 256–262.
5. **Коришунов Ф.П., Марченко И.Г., Жданович Н.Е.** Отжиг радиационных дефектов в электронно-облучаемых Mo/n - Si -структурах Шоттки // Материалы 9-й междунар. конф. «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, 2011). – Минск, 2011.
6. **Вологдин Э.Н., Лысенко А.П.** Интегральные радиационные изменения параметров полупроводниковых материалов: учеб. пособие. – М.: МИЭМ, 1998. – 89 с.
7. **Лысенко А.П.** Пробой p - n -перехода и способы повышения пробивного напряжения: учеб. пособие. – М.: МИЭМ, 2011. – 62 с.

Поступило
после доработки 16 декабря 2015 г.

Александрова Анастасия Борисовна – аспирант департамента электронной инженерии НИУ ВШЭ МИЭМ. *Область научных интересов:* физика полупроводников и полупроводниковых приборов. **E-mail:** frog_x@mail.ru

Харитонов Игорь Анатольевич – кандидат технических наук, профессор департамента электронной инженерии НИУ ВШЭ МИЭМ. *Область научных интересов:* моделирование полупроводниковых приборов.