

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНАРНЫХ ДИОДОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

© П. И. Дидык, А. А. Басовский, А. А. Жуков, В. А. Харитонов

АО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем»,
111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53

Экспериментально исследованы электрические характеристики планарных диодов с резким p-n переходом в широком диапазоне температур, полученных на эпитаксиальных структурах с различными удельными сопротивлениями и толщиной базы, определены численные зависимости напряжения пробоя и прямого напряжения диодов при изменении температуры.

Ключевые слова: планарный диод, напряжение пробоя диодов, прямое напряжение диодов, развязывающие и шунтирующие диоды, диапазон температур работы диодов

Сведения об авторах: Дидык Павел Игоревич, к.т.н., felix.zorge@gmail.com; Басовский Андрей Андреевич, к.т.н., abas36@mail.ru; Жуков Андрей Александрович, д.т.н., and_zhukov@mail.ru; Харитонов Владимир Анатольевич, scorpio4111@yandex.ru

ELECTRICAL PARAMETERS OF PLANAR DIODES IN WIDE TEMPERATURE RANGE

P. I. Didyk, A. A. Basovskiy, A. A. Zhukov, V. A. Kharitonov

JSC «Russian Space Systems», 111250, Moscow, Aviamotornaya street, 53

Electrical parameters of planar diodes with sharp p-n-junction were investigated experimentally in wide temperature range. Diodes were fabricated on epitaxial structures with various resistivity and base thickness. Numerical dependence of diodes breakdown voltage and forward voltage at various temperatures were obtained.

Keywords: planar diode, diode breakdown voltage, diode forward voltage, isolation and bypass diodes, diode operating temperature range

Data of authors: Didyk Pavel Igorevich, Ph.D., felix.zorge@gmail.com; Basovskiy Andrey Andreevich, Ph.D., abas36@mail.ru; Zhukov Andrey Aleksandrovich, Sc.D., and_zhukov@mail.ru; Kharitonov Vladimir Anatolyevich, scorpio4111@yandex.ru

Введение

К приборам космического назначения предъявляются жёсткие требования стойкости к внешним воздействиям. Широкий рабочий диапазон температур от 93 до 398 К, при котором должны сохраняться параметры планарных диодов, является одним из влияющих факторов как на физические параметры (механическая прочность, внутреннее напряжение и т.п.), так и на электриче-

ские (напряжение пробоя, ток утечки, падение напряжения в прямом включении) [1]. Известно, что с повышением температуры возрастает напряжение пробоя в планарных диодах [2]. Носители заряда с высокой энергией, проходя через обеднённый слой под действием поля, теряют часть энергии при столкновении с оптическими фононами. Длина свободного пробега электронов между столкновениями падает с повышением

температуры и, поэтому, чем выше температура, тем больше носители заряда отдают энергии кристаллической решётке и, соответственно, увеличивается напряжение пробоя. Известно, что выходное напряжение фотопреобразователей, которые генерируют ток в солнечных батареях космических аппаратов (СБ КА), увеличивается при снижении температуры, а напряжение пробоя диодов уменьшается [2]. Увеличение пробивных напряжений требует использования более высокоомного материала базы диода, но чем выше удельное сопротивление базы, тем ниже радиационная стойкость. Известны расчётные температурные зависимости нормализованного напряжения лавинного пробоя на основе модифицированной теории Бараффа [2, 3], но экспериментальные зависимости в литературе не представлены. В связи с этим экспериментальная работа по определению электрических характеристик планарных диодов в широком диапазоне температур является актуальной.

Объекты исследования

Объектами исследования являются бескорпусные кремниевые планарные развя-

зывающие и шунтирующие диоды, предназначенные для СБ КА. Исследуемые диоды были сформированы методами тонкоплёночной технологии на эпитаксиальных структурах с различными удельными сопротивлениями и толщиной базы с резким р-п переходом (табл. 1).

Шунтирующий диод СБ КА состоит из (рис.1): эпитаксиального слоя (1) на кремниевой монокристаллической подложке (2); диэлектрической изоляции (3), р⁺ области (4); омического контакта к р⁺ области на лицевой стороне подложки (5), металлизации лицевой (6) и тыльной сторон (7) подложки; коммутационных шин лицевой (8) и тыльной сторон (9).

Конструкция развязывающих диодов СБ КА представляет собой кристалл с припаянными через прокладки-компенсаторы верхней и нижней коммутационными шинами. Кристалл состоит из следующих составных частей (рис. 2): эпитаксиальный слой (1) на кремниевой монокристаллической подложке; диффузионный слой р⁺ (2); диффузионный слой n⁺⁺ (3, 4); диэлектрическая изоляция SiO₂ (5); поликремний (6); нитрид кремния Si₃N₄ (7); диэлектрическая

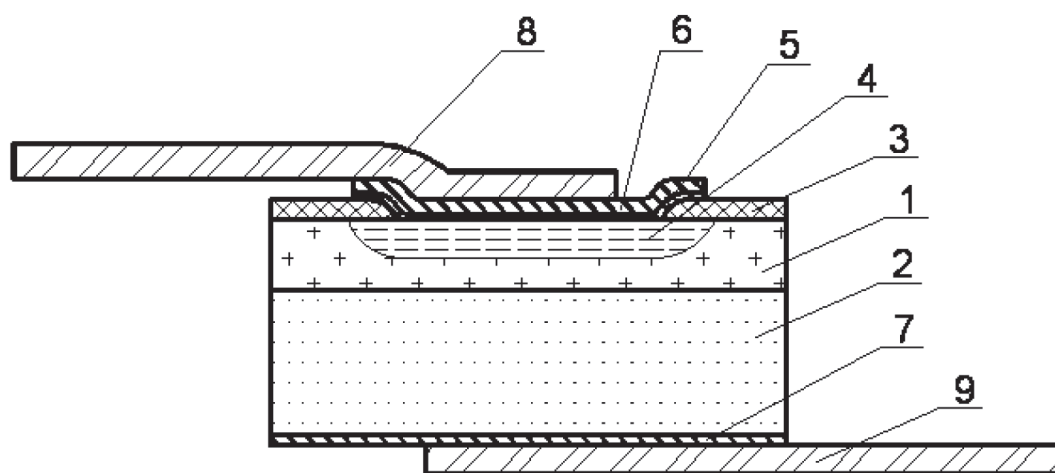


Рис. 1

Послойная структура шунтирующего диода СБ КА: 1 – эпитаксиальный слой; 2 – кремниевая подложка; 3 – диэлектрическая изоляция; 4 – р⁺ область; 5 – омический контакт к р⁺ области; 6, 7 – металлизация; 8, 9 – коммутирующая шина

Таблица 1

Типы эпитаксиальных структур для диодов

№	Тип диода	Наименование эпитаксиальной структуры	Удельное сопротивление базы ρ , Ом·см	Толщина базы, мкм	Концентрация примеси, см ⁻³
1	Шунтирующий	30КЭФ7,5/380КЭМ0,005(111)	7,5	20	6·10 ¹⁴
2	Развязывающий	60КЭФ30/380ЭКЭС0,01(111)	30	50	1,5·10 ¹⁴
3	Развязывающий	80КЭФ40/380ЭКЭС0,01(111)	40	70	1·10 ¹⁴

изоляция SiO₂ (8); омический контакт из алюминия к p⁺ области на лицевой стороне подложки (9); металлизация лицевой стороны подложки (10); металлизация тыльной стороны подложки (11).

Методы исследования

Исследования проводили на установке, обеспечивающей изменение температуры в диапазоне от 93 до 398 К (рис. 3) [4].

Диоды помещали в контейнер и плавно опускали в камеру холода посредством механизма перемещения, значение темпера-

туры в которой составило 93 ± 2 К, и фиксировали значения напряжения пробоя и прямого напряжения диодов при варьируемой температуре. Затем из камеры холода диоды перемещались в камеру тепла, значение температуры в которой составляло 398 ± 2 К, и фиксировали значения напряжения пробоя и прямого напряжения диодов при определённой температуре. После окончания цикла диоды выдерживали при комнатной температуре в промежуточной камере до достижения теплового равновесия.

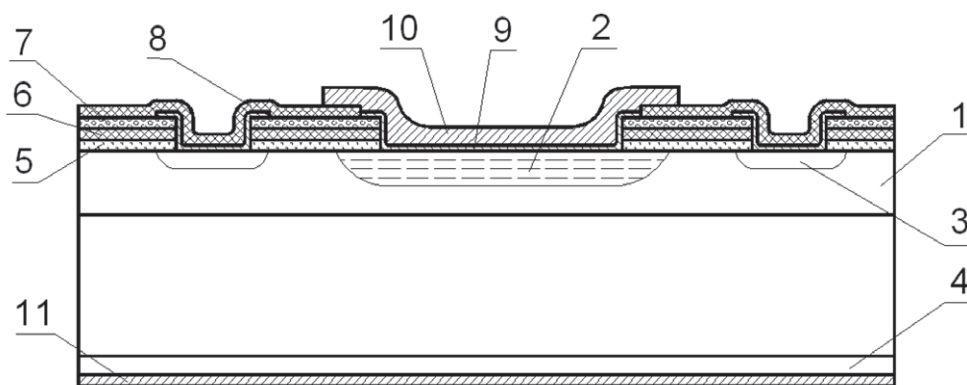


Рис. 2

Послойная структура развязывающего диода СБ КА:

- 1 – эпитаксиальная структура;
- 2 – диффузионный слой p⁺; 3, 4 – диффузионный слой n⁺;
- 5 – SiO₂ термический; 6 – поликремний; 7 – Si₃N₄; 8 – SiO₂ пиролитический;
- 9 – алюминий; 10, 11 – металлизация

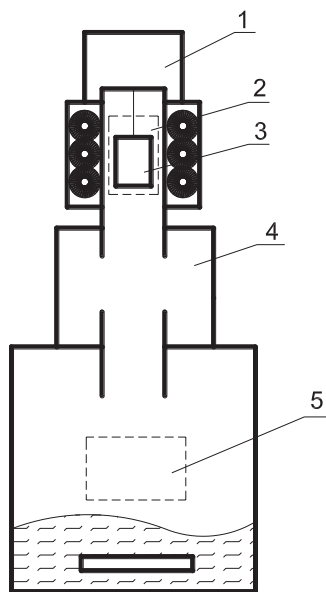


Рис. 3

Структурная схема установки проведения испытаний: 1 – механизм перемещения контейнера; 2 – камера тепла; 3 – контейнер; 4 – промежуточная камера; 5 – камера холода

Результаты исследования

В результате получены температурные зависимости напряжения пробоя (табл. 2) и прямого напряжения диодов (ток 2 А) (табл. 3), сформированных на различных эпитаксиальных структурах с различным удельным сопротивлением и толщиной базы.

Исходя из полученных данных при применении структур с различным удельным сопротивлением ρ эпитаксиального слоя следует, что крутизна возрастания напря-

жения пробоя диодов в диапазоне температур от 93 до 398 К увеличивается при увеличении сопротивления ρ . Это соответствует известным данным [2]. На рис. 4 и 5 показано отношение напряжения пробоя диодов $U_{обр}$ при изменении температуры к напряжению $U_{обр}^{295}$ при температуре 295 К.

Различный характер кривых отношения напряжения пробоя диодов в диапазоне температур 295÷398 К на различных эпитаксиальных структурах объясняется тем, что развязывающие диоды – это диоды с

Таблица 2

Напряжение пробоя диодов при варьируемой температуре

Температура, ± 5 К	93	123	173	198	295	373	383	393	398	
Напряжение пробоя $U_{обр}$, ± 3 В	1 (шунтирующий)	199	208	222	225	235	245	250	260	265
	2 (развязывающий)	600	620	670	700	770	825	830	840	845
	3 (развязывающий)	670	700	745	780	990	1050	1065	1080	1090

Таблица 3

Прямое напряжение диодов (ток 2 А) при варьируемой температуре

Температура, ± 5 К	93	123	173	198	295	373	383	393	398	
Прямое напряжение	1 (шунтирующий)	1,07	1,05	1,0	0,96	0,8	0,7	0,67	0,65	0,64
	2 (развязывающий)	1,03	0,95	0,9	0,896	0,8	0,72	0,7	0,696	0,695
	3 (развязывающий)	1,08	1,0	0,96	0,94	0,84	0,756	0,74	0,73	0,73

поликремневой полевой обкладкой, а шунтирующие низковольтные диоды – это диоды с охранным кольцом. В диодах с полевой обкладкой изменение температуры менее влияет на напряжение пробоя, так как обеднённая область имеет другую форму.

На рис. 6 показано отношение прямого напряжения диодов $U_{пр}$ при варьируемой температуре к напряжению $U_{пр}^{295}$ при температуре 295 К.

Выводы

Таким образом, экспериментально исследованы электрические характеристики трёх типов планарных диодов с резким р-п переходом в широком диапазоне температур, полученных на эпитаксиальных структурах с различными удельными сопротивлениями и толщиной базы. Исходя из результатов исследований определены численные зависимости напряжения пробоя и прямого напряжения диодов при

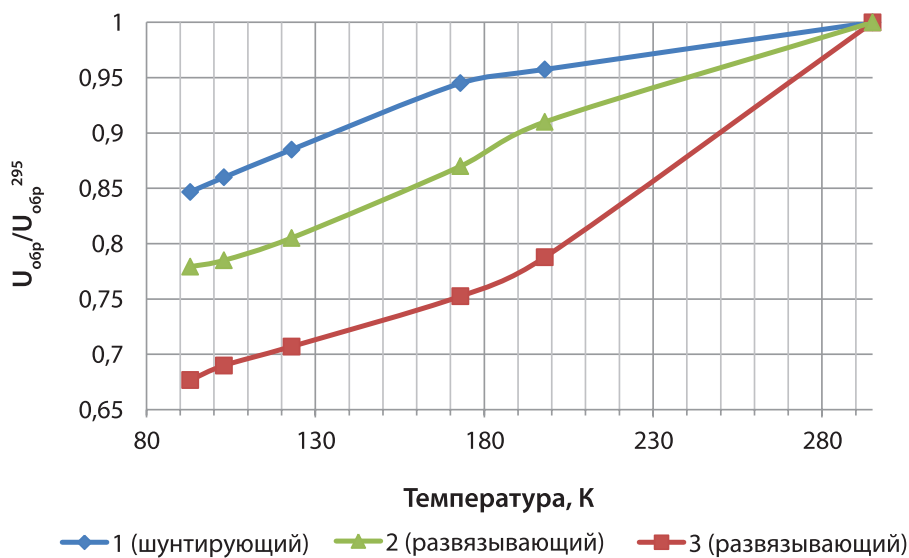


Рис. 4

Отношение напряжения пробоя диодов в диапазоне температур 93 ÷ 295 К (в соответствии с табл. 2)

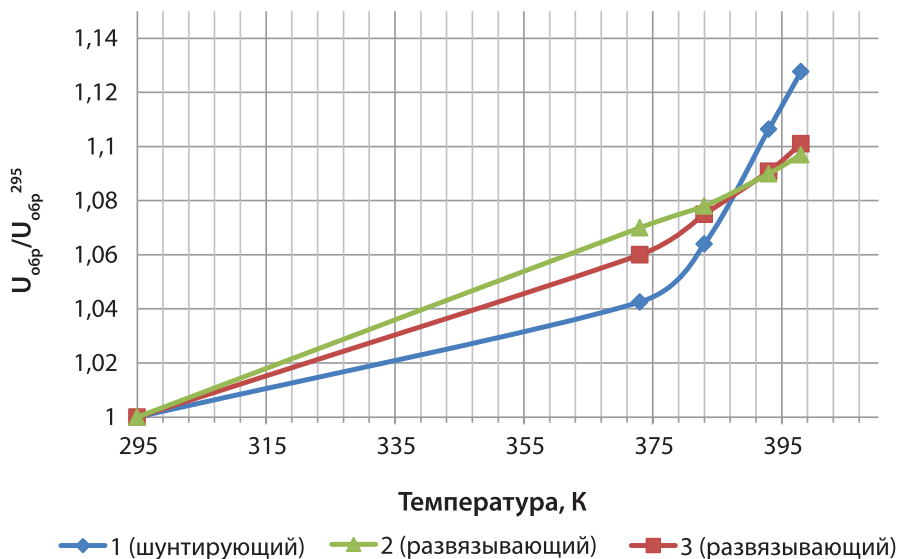


Рис. 5

Отношение напряжения пробоя диодов в диапазоне температур 295 ÷ 398 К (в соответствии с табл. 2)

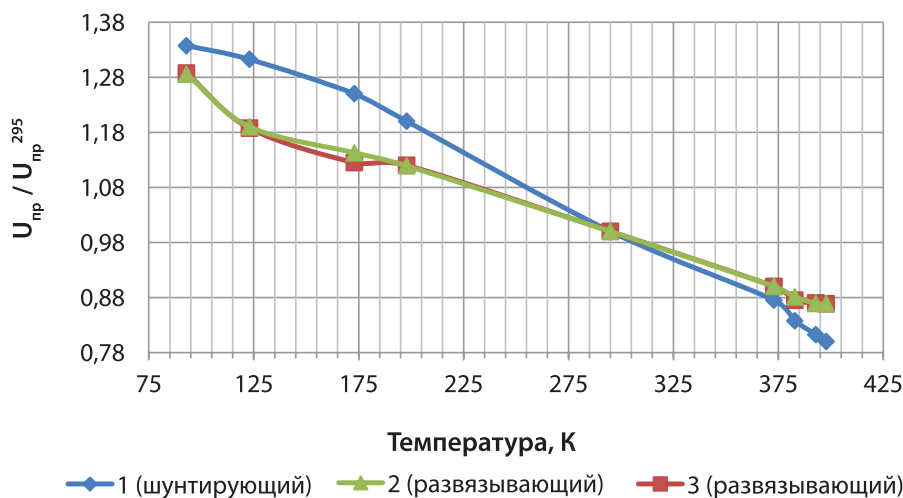


Рис. 6

Отношение прямого напряжения диодов при варьируемой температуре (в соответствии с табл. 3)

изменении температуры. Определено, что при повышении удельного сопротивления ρ эпитаксиального слоя подложек возрастает разность напряжения пробоя диодов ΔU в диапазоне температур от 93 К до 398 К, что соответствует известным данным [2]. В диодах с поликремниевой полевой обкладкой влияние изменения температуры

на напряжение пробоя менее заметно по сравнению с диодами с охранным кольцом.

Литература

1. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей: Пер. с англ. / Г. Раушенбах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с., ил.
2. Sze S. M. Physics of semiconductor devices. Third

- edition / S. M. Sze, Kwok K. Ng. – Hoboken, New Jersey, Canada: John Wiley & Sons, Inc., 2007. – 815 p. – ISBN 13: 978-0-471-14323-9.
3. B. Jayant Baliga. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. – New York, USA: Springer Science, 2008. – 1069 p. – ISBN 978-0-387-47313-0.
 4. Дидык П. И., Семёнов В. Л., Басовский А. А., Жуков А. А. Установка термодублирования в диапазоне температур 83-473 К // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 3. – С. 226-228.
 1. Rauschenbach H. *Spravochnik po proektirovaniyu solnechnykh batarey* = Solar cell array design handbook. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983, 360 p.
 2. Sze S. M. Physics of semiconductor devices. Third edition / S. M. Sze, Kwok K. Ng. – Hoboken, New Jersey, Canada: John Wiley & Sons, Inc., 2007. – 815 p. – ISBN 13: 978-0-471-14323-9.
 3. B. Jayant Baliga. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. – New York, USA: Springer Science, 2008. – 1069 p. – ISBN 978-0-387-47313-0.
 4. Didyk P. I., Semenov V. L., Basovskiy A. A., Zhukov A. A. Installation of thermal cycling in the temperature range 83-473 K. *Izvestiya vyshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Higher Education Institutes News. Instrument Engineering], 2015, T. 58, № 3, pp. 226-228.

References

1. Rauschenbach H. *Spravochnik po proektirovaniyu solnechnykh batarey* = Solar cell array design