

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
АКАДЕМИЯ ПРОБЛЕМ КАЧЕСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ КОСМОНАВТИКИ имени К. Э. ЦИОЛКОВСКОГО
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ» РАН
(ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР РАН имени А. А. ДОРОДНИЦЫНА)
АО «УПКБ "ДЕТАЛЬ"», АО «РАДИОЗАВОД»,
АО «ФНПЦ «ПО "СТАРТ" имени М. В. ПРОЦЕНКО», АО «НИИЭМП»
АО «ПНИЭИ», АО «НИИФИ», АО «НПП "РУБИН"»
ЕВРАЗИЙСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени Л. Н. ГУМИЛЕВА
ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



ТРУДЫ
МЕЖДУНАРОДНОГО СИМПОЗИУМА
НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО

*Посвящается 300-летию
Российской академии наук*

Том 2

ПЕНЗА 2024

Труды Международного симпозиума НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО. – 2024. – Т. 2. – 503 с.

Представлены доклады XXIX Международного симпозиума «Надежность и качество», посвященного 300-летию Российской академии наук, проходившего с 27 мая по 1 июня 2024 г. в г. Пензе.

Рассмотрены актуальные проблемы теории и практики повышения надежности и качества; эффективности внедрения инновационных и информационных технологий в фундаментальные научные и прикладные исследования, образовательные и коммуникативные системы и среды, экономику и юриспруденцию; методов и средств анализа и прогнозирования показателей надежности и качества приборов, устройств и систем, а также анализа непараметрических моделей и оценки остаточного ресурса изделий двойного назначения; ресурсосбережения; проектирования интеллектуальных экспертных и диагностических систем, систем управления и связи, интерактивных, телекоммуникационных сетей и сервисных систем; экологического мониторинга и контроля состояния окружающей среды и биологических объектов; исследования физико-технологических процессов в науке, технике и технологиях для повышения качества выпускаемых изделий радиопромышленности, приборостроения, аэрокосмического и топливно-энергетического комплексов, электроники и вычислительной техники и др.

Издание предназначено для студентов, аспирантов, ученых и научных сотрудников, заинтересованных в исследовании надежности и качества эффективных комплексных систем.

УДК 621.396.6:621.315.616.97:658:562

Оргкомитет благодарит за поддержку в организации и проведении Международного симпозиума и издании настоящих трудов Министерство науки и высшего образования РФ, Правительство Пензенской области, Академию проблем качества РФ, Российскую академию космонавтики имени К. Э. Циолковского, Российскую инженерную академию, ФИЦ ИУ РАН (Вычислительный центр РАН имени А. А. Дородницына), АО «УПКБ “ДЕТАЛЬ”», АО «НИИФИ», АО «ПНИЭИ», АО «НПП “РУБИН”», АО «РАДИОЗАВОД», АО «ППО “ЭЛЕКТРОПРИБОР”», АО «ФНПЦ «ПО “СТАРТ” имени М. В. Проценко», АО «НИКИРЭТ», ООО «Экспериментальная мастерская “НаукаСофт”», Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Пензенский государственный университет.

Издание зарегистрировано в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ) с 2005 г.

Редакционная коллегия:

Юрков Н. К. – главный редактор;

Трусов В. А. – ответственный секретарь;

**Гуляков А. Д., Майстер В. А., Северцев Н. А., Сыдыков Е. Б., Абрамов О. В.,
Артамонов Д. В., Безродный Б. Ф., Бецов А. В., Васин С. М., Дивеев А. И., Иофин А. А.,
Каиштанов В. А., Кемалов Б. К., Острейковский В. А., Пиганов М. Н.,
Роберт И. В., Романенко Ю. А., Савченко В. П., Садыхов Г. С., Увайсов С. У.,
Халютин С. П., Шайко-Шайковский А. Г., Шахнов В. А., Якимов А. Н.**

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ЛАВИННОГО ПРОБОЯ В КРЕМНИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ В БАЗЕ ДИОДНЫХ СТРУКТУР

Аннотация. При проведении расчётов и проектирования различных полупроводниковых компонентов на базе диодной структуры обязательным является определение предельных параметров, к которым относится максимально допустимое обратное напряжение. Во многих случаях это значение определяется напряжением лавинного пробоя, которое зависит от ряда факторов. К таким факторам относятся температура и концентрация легирующей примеси в базовой области структуры. Поскольку параметры структуры необходимо оптимизировать для выполнения всех заданных требований технического задания на проектирование, обязательно возникнет необходимость в проведении повторных расчётов напряжения лавинного пробоя при любых изменениях профилей распределения примеси в базе для различных температурных режимов работы диодной структуры. Для упрощения и ускорения инженерных расчётов в данной работе приведена методика определения напряжения лавинного пробоя, позволяющая одновременно учитывать влияние изменения концентрации базовой примеси и температуры для диодных структур на основе монокристаллического кремния.

Ключевые слова: лавинное умножение, напряжение лавинного пробоя, кремний, база диода, температурный коэффициент напряжения пробоя

Golovyashkin¹ A.N., Rogulin² M.N.

^{1,2} Penza State University, Penza, Russia

¹ angpenza@yandex.ru

² max.rogulin@mail.ru

METHOD FOR DETERMINING AVALANCHE BREAKDOWN VOLTAGE IN SILICON DEPENDING ON TEMPERATURE AND DOPANT CONCENTRATION IN THE BASE OF DIODE STRUCTURES

Annotation. When performing calculations and designing various semiconductor components based on a diode structure, it is mandatory to determine the limit parameters, which include the maximum allowable reverse voltage. In many cases, this value is determined by the avalanche breakdown voltage, which depends on a number of factors. Such factors include the temperature and concentration of the dopant in the base region of the structure. Since the parameters of the structure must be optimized to meet all the specified requirements of the design specification, it will definitely be necessary to re-calculate the avalanche voltage with any changes in the impurity distribution profiles in the base for different temperature modes of operation of the diode structure. To simplify and accelerate engineering calculations, this paper presents a method for determining the avalanche breakdown voltage, which allows simultaneously taking into account the influence of changes in the concentration of the base impurity and temperature for diode structures based on monocrystalline silicon.

Keywords: avalanche multiplication, avalanche breakdown voltage, silicon, diode base, temperature coefficient of breakdown voltage

Введение. Лавинный пробой возникает в результате ударной ионизации при взаимодействии подвижных носителей заряда с нейтральными атомами, где непосредственное резкое увеличение тока обусловлено лавинным размножением носителей заряда под действием сильного электрического поля. Лавинное умножение возникает, когда свободный носитель заряда на длине свободного пробега приобретает энергию, достаточную для ударной ионизации. Образующиеся при ионизации свободные электроны и дырки также начинают ускоряться и образовывать другие пары свободных носителей, тем самым процесс приобретает характер лавины.

Напряжение лавинного пробоя является одним из важнейших параметров большинства полупроводниковых компонентов, поэтому важно знать, как изменится напряжения при воздействии на компонент той или иной температуры [1].

Методика расчета. В работе использована зависимость напряжения лавинного пробоя в кремнии от температуры при различных концентрациях в базе диодной структуры, которая представлена на рис. 1 [2].

Для точного описания влияния температуры был произведен расчет температурного коэффициента. В начале необходимо рассчитать напряжения пробоя при температуре 300 К при различных концентрациях легирующей примеси N . Для этого при $N=10^{16}$ см³ использовано выражение (1), при $N=10^{15}$ см³ и $N=10^{14}$ см³ использовано выражение (2) [3]:

$$U_{np,p} = U_{0,p} \cdot \left(\frac{N_0}{N}\right)^{y_s} \quad (1)$$

где $U_{0,p} = 59,3$ (55,9) В и $y_s = 0,63$ (0,638)

$$N = N_1 \cdot \frac{U_p}{U_{np}} \left(\ln \frac{U_{np}}{U_p}\right)^{-\frac{2}{m}} \quad (2)$$

где $U_p = 1,861$ (1,843) В и $N_1 = 3,54 \cdot 10^{18}$ (3,21 · 10¹⁸) см⁻³ $m=1$

Результаты расчёта представлены в табл. 1.

Напряжение пробоя при различных концентрациях
легирующей примеси и температуре 300 К

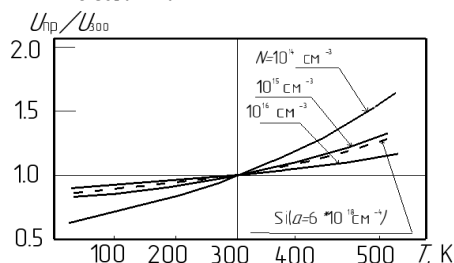
Таблица 1

Концентрация примесей, см ⁻³	Напряжение пробоя, В
10 ¹⁶	55,9
10 ¹⁵	267
10 ¹⁴	1470

Далее по формуле (3) был произведен расчет температурного коэффициента:

$$TKU_{пр} = \frac{1}{U_0} \cdot \frac{dU}{dT} \quad (3)$$

В первом случае примем для U_0 примем равной значениям, которые получились при расчетах по формулам (1) и (2). После проведения расчетов получились значения, которые представлены в табл. 2.



Сплошная линия - резкий p-n переход, пунктирная - плавный p-n переход

Рисунок 1 - Зависимость напряжения лавинного пробоя ($U_{пр}$) к напряжению пробоя при 300 К (U_{300}) для различных температур (T)

Таблица 2
Рассчитанные температурные коэффициенты при различных концентрациях при 300 К

ΔU , В	T , К	ΔT , К	N , см ⁻³	$TKU_{пр} \cdot 10^{-3}$, 1/К
876	500	200	10 ¹⁴	2,187
376	400	100	10 ¹⁴	1,875
376	200	100	10 ¹⁴	1,875
626	100	200	10 ¹⁴	1,562
125	500	200	10 ¹⁵	1,25
62,5	400	100	10 ¹⁵	1,25
46,875	200	100	10 ¹⁵	0,9375
78,125	100	200	10 ¹⁵	0,7812
10	500	200	10 ¹⁶	0,625
5	400	100	10 ¹⁶	0,625
5	200	100	10 ¹⁶	0,625
7,5	100	200	10 ¹⁶	0,468

Далее произведем расчеты напряжений при температурах 100 К и 500 К и различных концентрациях используя ранее рассчитанные значения при температуре 300 К при различных концентрациях и рис. 1.

Для $N=10^{14}$ см⁻³:

$$U_{100} = 1470 \cdot 0.6875 = 1011В$$

$$U_{500} = 1470 \cdot 1.4375 = 2113В$$

Для $N=10^{15}$ см⁻³:

$$U_{100} = 267 \cdot 0.8125 = 216.983В$$

$$U_{500} = 267 \cdot 1.25 = 333.75В$$

Для $N=10^{16}$ см⁻³:

$$U_{100} = 55.9 \cdot 0.875 = 48.913В$$

$$U_{500} = 55.9 \cdot 1.125 = 62.887В$$

Аналогично как проводились расчеты температурного коэффициента при температуре 300 К, были произведены расчеты для температур 100 К и 500 К используя новые значения напряжений. После расчетов получились результаты, которые представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3

Рассчитанные температурные коэффициенты при различных концентрациях при 100 К

ΔU , В	T , К	ΔT , К	N_0 см ⁻³	$TKU_{пр} \cdot 10^{-3}$, 1/К
1500	500	400	10 ¹⁴	2,727
1000	400	300	10 ¹⁴	2,424
625	300	200	10 ¹⁴	2,273
250	200	100	10 ¹⁴	1,818
203,125	500	400	10 ¹⁵	1,25
140,625	400	300	10 ¹⁵	1,154
78,125	300	200	10 ¹⁵	0,961
31,25	200	100	10 ¹⁵	0,769
17,5	500	400	10 ¹⁶	0,625
12,5	400	300	10 ¹⁶	0,595
7,5	300	200	10 ¹⁶	0,535
2,5	200	100	10 ¹⁶	0,357

Таблица 4

Рассчитанные температурные коэффициенты при различных концентрациях при 500 К

ΔU , В	T , К	ΔT , К	N_0 см ⁻³	$TKU_{пр} \cdot 10^{-3}$, 1/К
500	100	400	10 ¹⁴	1,739
875	200	300	10 ¹⁴	1,522
1250	300	200	10 ¹⁴	1,449
1500	400	100	10 ¹⁴	1,304
62,5	100	400	10 ¹⁵	1
125	200	300	10 ¹⁵	1
171,875	300	200	10 ¹⁵	0,917
203,125	400	100	10 ¹⁵	0,813
5	100	400	10 ¹⁶	0,556
10	200	300	10 ¹⁶	0,556
15	300	200	10 ¹⁶	0,556
17,5	400	100	10 ¹⁶	0,486

Закключение. Таким образом, представленная методика расчета лавинного пробоя диодных структур позволяет учитывать одновременное влияние и температуры, и концентрации легирующей примеси базовой области. Кроме того, из полученных результатов можно сделать вывод о том, что уменьшение уровня легирования базы увеличивает степень влияние температуры. Это можно объяснить тем, что при уменьшении концентрации ионизированной примеси в базе увеличивается влияние решеточного рассеивания свободных носителей заряда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984
2. Шашкина А.С., Кривошейкин А.В., Скворцов Н.Н., Воротков М.В. Лавинный пробой p-n-перехода в задачах радиотехники // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 5. С. 864-871. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-864-871
3. Кюрегян А. С. Напряжение лавинного пробоя p-n-переходов на основе Si, Ge, SiC, GaAs, GaP и InP при комнатной температуре // Физика и техника полупроводников. - 1989. - Т. 23. - №. 10. - С. 1819-1827.