

Н. Л. ДУДАР, В. С. СЯКЕРСКИЙ, Н. Н. КОРЫТКО

Республика Беларусь, г. Минск, НПО «Интеграл»
E-mail: office@bms.by

Дата поступления в редакцию
28.07 2008 г. — 14.04 2009 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ
(НПО «Физика-Солнце», г. Ташкент)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЕВОГО СТАБИЛИТРОНА С НАПРЯЖЕНИЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ 6,5 В

Предложена технология изготовления кремниевого стабилизатора. Определены удельное сопротивление подложки, режим диффузии фосфора в подложку, обеспечивающие требуемые значения напряжения стабилизации в заданном диапазоне температуры.

Стабилизаторы [1], именуемые также опорными диодами, находят широкое применение как в дискретном исполнении, так и в составе интегральных схем различного назначения. Основные достоинства стабилизатора в том, что, по сравнению с обычными диодами, он имеет достаточно низкое регламентированное напряжение пробоя (при обратном включении) и может поддерживать уровень этого напряжения постоянным при значительном изменении величины обратного тока. Электрический пробой $p-n$ -перехода стабилизатора является обратимым. В основе работы стабилизатора лежат туннельный [2, 3] и лавинный [4] механизмы пробоя $p-n$ -перехода.

На сегодняшний день моделирование полупроводниковых структур занимает важное место при разработке и оптимизации технологии изготовления новых изделий электронной техники. С помощью моделирования можно оптимизировать режимы операций технологического маршрута, конструкцию и параметры электрических характеристик проектируемого элемента ИС или дискретного прибора, а также снизить затраты на изготовление экспериментальных образцов.

В данной работе приводятся результаты моделирования оригинального техпроцесса изготовления и электрических характеристик стабилизаторов с напряжением стабилизации $U_{ст} = 6,5 \pm 0,5$ В при токе около 5 мА с активной площадью $p-n$ -перехода 125×125 мкм. Расчет параметров обратной ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) стабилизатора проводился для условий его работы при нормальной, а также при пониженной (-55°C) и повышенной ($+150^\circ\text{C}$) температуре. Моделирование стабилизатора выполнялось с использованием программного пакета компании Synopsys [5] — одного из ведущих на мировом рынке распространителей программных средств, предназначенных для моделирования технологии/прибора/схемы. Моделирование технологиче-

ского маршрута осуществлялось при помощи программы двумерного физического моделирования технологии TSuprem4, а расчет электрических характеристик исследуемого прибора проводился в среде Medici.

Выбор и оптимизация конструкции стабилизатора

Для реализации стабилизатора с напряжением стабилизации $U_{ст} = 6,5 \pm 0,5$ В при токе 5 мА была выбрана его конструкция, полученная путем диффузионного легирования фосфором кремниевой подложки p -типа. Перед созданием $p-n$ -перехода по его периметру было сформировано охранное кольцо n^+ -типа также путем диффузионного легирования подложки фосфором и его последующей разгонки в течение достаточно длительного времени (≈ 100 мин) в стандартной среде, используемой в производстве. Наличие охранного кольца предотвращает пробой структуры по периметру перехода, пробой происходит в плоской части $p-n$ -перехода. Во внутренней части охранного кольца диффузионным легированием фосфора формируют область n -типа с целью получения $p-n$ -перехода стабилизатора.

Оптимизация конструкции стабилизатора заключалась в выборе оптимальной конструкции охранных колец и глубины $p-n$ -перехода. Расчеты были проведены для подложек трех типов КДБ (кремний, легированный бором, дырочного типа проводимости) с удельным сопротивлением $\rho_v = 0,003; 0,004$ и $0,005$ Ом·см при комнатной температуре и в условиях пониженной и повышенной температуры. Глубина области охранного кольца для подложки КДБ0,003 составила ≈ 2 мкм, а глубина залегания $p-n$ -перехода — $\approx 0,31$ мкм.

Выбор и оптимизация технологического маршрута изготовления стабилизатора

Технологический маршрут формирования структуры исследуемого кремниевого стабилизатора включает следующие операции:

- 1) формирование охранных колец n^+ -типа посредством диффузионного легирования подложки p -типа фосфором и его последующей разгонки;
- 2) формирование $p-n$ -перехода тем же способом;
- 3) формирование межслойного окисла и вытравливание в нем контактных окон;
- 4) напыление металла для формирования контактов к областям n -типа.

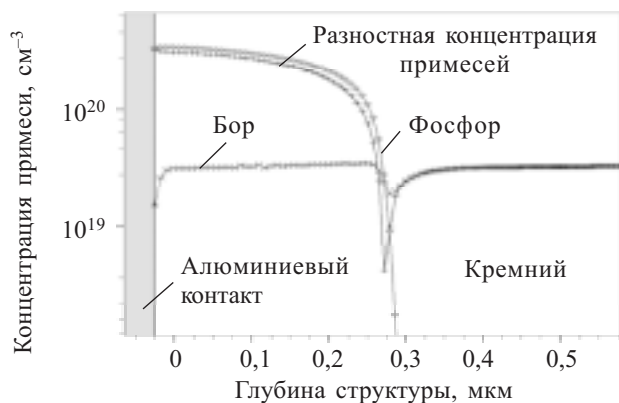


Рис. 1. Распределение концентрации примесей по структуре стабилитрона, полученное в результате моделирования диффузионного легирования фосфором подложки КДБ0,003

Полученные в результате моделирования технологического маршрута изготовления стабилитрона одномерные распределения концентрации примесей в плоскости поперечного сечения области $p-n$ -перехода приведены на **рис. 1**. В данной работе необходимо было получить такие параметры технологического процесса изготовления, которые обеспечили бы требуемые значения напряжения стабилизации ($6,5 \pm 0,5$ В) в диапазоне температуры -55 — $+150^\circ\text{C}$. Проведены расчеты напряжения стабилизации для различных режимов формирования активной области стабилитрона. Для получения требуемых значений $U_{ст}$ был выбран оптимальный режим формирования $p-n$ -перехода. Критериями оптимальности режима в данной работе являлись возможность применения стандартной, используемой в производстве, операции диффузионного легирования фосфором из неограниченного источника и получение требуемых значений $U_{ст}$. Вместо операций ионного легирования и последующей разгонки примеси (диффузия из ограниченного источника примеси) по причине большей дешевизны были выбраны операции диффузионного легирования. Как показали расчеты, для обеспечения требуемых значений напряжения стабилизации рекомендуется использовать подложку с удельным сопротивлением $\rho_v = 0,003$ Ом·см, длительность операции диффузионного легирования фосфором при формировании $p-n$ -перехода должна составлять около 25 мин. В качестве металла для формирования контакта к области n -типа стабилитрона был выбран алюминий, который является наиболее дешевым и широко используемым в электронике металлом, обладает хорошими электро- и теплопроводностью.

Результаты расчетов конструктивных параметров и значений напряжения стабилизации стабилитрона

Основную сложность при выполнении данной работы представляло получение с высокой точностью требуемых значений электрических параметров стабилитрона. Более того, описание процесса диффузионного легирования из неограниченного источника с помощью имеющихся программных средств затруднено из-за отсутствия в них точных моделей такой

Расчетные значения $U_{ст}$ при токе 5 мА и $R_{диф}$ стабилитронов при различной температуре окружающей среды

Тип подложки	-55°C	+27°C	+150°C
	$U_{ст}, \text{В}$		
КДБ0,003	6,22	6,17	6,09
КДБ0,004	5,9	5,88	5,86
КДБ0,005	5,76	5,77	5,81
$R_{диф}, \text{Ом}$			
КДБ0,003	48	60,8	73,6
КДБ0,004	48	50	80
КДБ0,005	32	32	32

операции. В настоящей работе был применен следующий метод диффузионного легирования: сначала в задание на моделирование было введено нанесение фосфоросодержащего оксида кремния на поверхность кремниевой пластины; затем была введена разгонка фосфора из фосфоросодержащего окисла в кремний. Результаты расчетов напряжений стабилизации $U_{ст}$ при токе 5 мА и дифференциального сопротивления $R_{диф}$ ($R_{диф\max} = 450$ Ом) обратной ветви вольт-амперной характеристики прибора с площадью активной области $p-n$ -перехода 125×125 мкм для различных типов подложки и температуры окружающей среды представлены в **таблице**. Конструктивные параметры исследуемого стабилитрона, полученные в результате расчетов для подложки КДБ0,003, могут быть определены из **рис. 1** с помощью графика зависимости разностной концентрации примесей от глубины структуры. Глубина залегания $p-n$ -перехода определяется в точке, где разностная концентрация примесей минимальна (**рис. 1**). На **рис. 2** приведены графики обратной ветви ВАХ исследуемого прибора, полученные в результате моделирования с учетом ρ_v подложки в условиях комнатной температуры.

Как видно из таблицы, в условиях нормальной температуры окружающей среды оптимальные значения напряжения стабилизации получены на подложке с

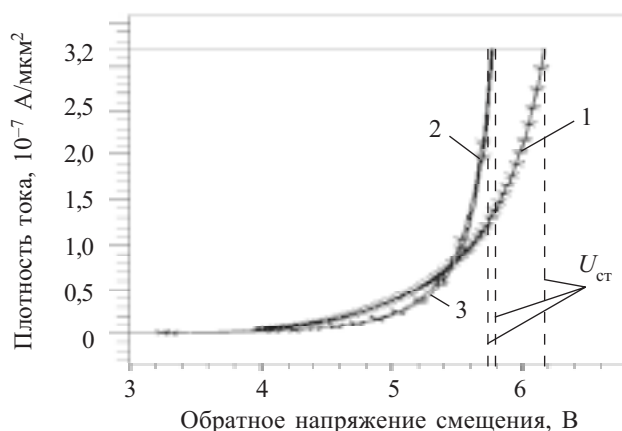


Рис. 2. Обратные ветви ВАХ стабилитрона в структурах, полученных в результате диффузионного легирования фосфором подложки типа КДБ0,003 (1); КДБ0,004 (2); КДБ0,005 (3) при комнатной температуре

удельным сопротивлением 0,003 Ом·см. Для такой подложки значение $U_{ст}$ находится в пределах требований даже в условиях крайних температур (-55°C и $+150^{\circ}\text{C}$). Стабилитроны, изготовленные на подложках с удельным сопротивлением 0,004 и 0,005 Ом·см, имеют напряжение стабилизации, находящееся за пределами требуемого диапазона значений.

Для получения приборов с напряжением стабилизации $U_{ст}=6,5\pm 0,5$ В были выбраны подложки КДБ0,003. Расчеты показали (см. таблицу), что у таких стабилитронов напряжение стабилизации очень слабо зависит от температуры, а следовательно, они могут использоваться для устройств с широким температурным диапазоном применения.

Из таблицы следует, что полученные в расчетах значения дифференциального сопротивления стабилитрона на подложках трех типов удовлетворяют требованиям во всем заданном диапазоне температуры.

На рис. 1 приведены распределение концентрации примеси бора в подложке p -типа с удельным сопротивлением 0,003 Ом·см; распределение концентрации примеси фосфора, полученное в результате диффузионного легирования последнего в подложку; разностное распределение концентрации примесей бора и фосфора по глубине структуры. Из рис. 1 можно определить глубину залегания p - n -перехода, при которой напряжение стабилизации будет составлять 6,17 В (см. таблицу). Глубина p - n -перехода, полученного в результате моделирования диффузионного легирования фосфором подложки p -типа с $\rho_v=0,003$ Ом·см, в соответствии с принятым на НПО «Интеграл» стандартным режимом, составила 0,31 мкм.

Как показали расчеты, напряжение стабилизации существенно зависит от глубины залегания p - n -перехода и от значения поверхностного сопротивления R_s области n -типа, полученной в результате диффузионного легирования фосфором при формировании p - n -перехода.

По результатам моделирования установлено, что при использовании сильнолегированных подложек, удельное сопротивление которых составляет менее 0,01 Ом·см, напряжение стабилизации может понижаться с ростом сопротивления подложки, что противоречит данным различных публикаций. Такой эффект может быть объяснен тем, что пробивное напряжение стабилитрона с напряжением стабилизации ≤ 7 В очень сильно зависит от поверхностного сопротивления области n -типа, которое, в свою очередь, определяется разностной концентрацией диффундирующей примеси и примеси в подложке. В случаях, когда степень легирования подложки очень высока ($\rho_v \leq 0,01$ Ом·см), значения концентрации указанных типов примесей могут оказаться близкими, а разностная концентрация примесей, которая и определяет R_s , понижается с уменьшением сопротивления подложки, т. е. с ростом концентрации примеси в подложке. Уменьшение разностной концентрации при-

месей, которое происходит с уменьшением сопротивления подложки, приводит к росту сопротивления области n -типа p - n -перехода, а следовательно, и к росту напряжения стабилизации $U_{ст}$. Данные, приведенные в таблице и на рис. 2, подтверждают сделанное предположение.

Расчет конструктивных параметров и электрических параметров ВАХ исследуемого прибора проводился с использованием программного комплекса TSuprem4 и программного модуля Medici, в которых, с целью сокращения затрат машинного времени, осуществлялось моделирование структуры площадью 1 мкм². На рис. 2 приведены обратные ветви ВАХ стабилитрона площадью 1 мкм². В работе было сделано допущение, что ток через поверхность структуры с такой площадью можно считать плотностью тока исследуемого прибора с активной площадью 125×125 мкм. Такое допущение было сделано, исходя из определения плотности тока, принятого в физике, т. е. значение тока $3,2 \cdot 10^{-7}$ А через поверхность прибора площадью 1×1 мкм соответствует значению тока 5 мА через поверхность прибора площадью 125×125 мкм, поэтому напряжение стабилизации определялось при плотности тока стабилизации $3,2 \cdot 10^{-7}$ А/мкм².

Из приведенных результатов следует, что оптимальными конструктивными параметрами и параметрами техпроцесса изготовления исследуемого стабилитрона с напряжением стабилизации $U_{ст}=6,5\pm 0,5$ В являются следующие:

- 1) удельное сопротивление подложки p -типа $\rho_v=0,003$ Ом·см;
- 2) наличие охранных колец n^+ -типа по периметру p - n -перехода;
- 3) длительность диффузионного легирования фосфором подложки при формировании активной области структуры составляет около 25 мин, при этом расчетная глубина p - n -перехода — около 0,31 мкм.

При указанных выше значениях конструктивных и технологических параметров было получено оптимальное расчетное значение напряжения стабилизации исследуемого стабилитрона в заданном диапазоне температуры.

Полученные результаты и описанные методические приближения будут использоваться в процессе производства рассматриваемого прибора.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Тугов Н. М., Глебов Б. А., Чарыков Н. А. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов / Под ред. В. А. Лабунцова. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Мир, 1984.
3. Sah C. T. Fundamentals of solid-state electronics / World Scientific, 1991.
4. Streetman B. G., Banerjee S. Solid state electronic devices. — New Jersey: Prentice Hall, 2000.
5. <http://www.synopsys.com>