

Фотоэлектроника

УДК 621.352

О влиянии поверхностных и контактных явлений на характеристики фотодиодов на *n*-кремнии

В. П. Астахов, И. А. Болесов, Д. А. Гиндин,
В. В. Карпов, К. В. Сорокин
ОАО «Московский завод «Сапфир»», Москва, Россия

*Исследовано влияние на параметры двухплощадочных фотодиодов на основе кремния *n*-типа проводимости, работающих в фотовольтаическом режиме при встречно-параллельном включении, таких приемов, как создание закороченного на базу охранного кольца (ОК) — дополнительного *p-n*-перехода, расположенного на расстоянии меньше диффузионной длины носителей заряда, и облучение периферии *p-n*-перехода ионами азота, рассмотрено также влияние полевого электрода. Показано, что определяющее влияние на прямую ветвь вольт-амперной характеристики (ВАХ) оказывает правильный подбор и соблюдение режимов вжигания алюминиевых контактов; улучшение прямой ВАХ (по прямым падениям, β , однородности и воспроизводимости результатов) обеспечивает применение топологии с закороченным ОК. Применение полевого электрода (ПЭ) при подаче отрицательного смещения на него позволяет уменьшить в 35 раз темновые токи при $U_{обр} = 100$ В.*

При производстве двухплощадочных двухкристалльных фотодиодов для работы в фотовольтаическом режиме при встречно-параллельном включении на основе кремния *n*-типа проводимости основной задачей является достижение идентичности прямых ветвей ВАХ обоих кристаллов, составляющих фотодиод. При существующей в настоящее время технологии необходима индивидуальная подборка кристаллов по величинам прямых падений напряжения и фотоЭДС, что требует значительных затрат времени. Поэтому желательно довести технологию до такого уровня, чтобы она заведомо обеспечивала идентичность параметров отдельных кристаллов, в связи с чем необходимо провести анализ процессов, влияющих на характеристики фотодиодов.

Среди факторов, оказывающих влияние на прямую ветвь ВАХ фотодиодов, следует отметить, прежде всего, состояние поверхности вблизи планарного *p-n*-перехода, а также переходные контактные соприкосновения.

Существует несколько приемов, позволяющих нейтрализовать негативное влияние отмеченных факторов и, следовательно, улучшить параметры фотодиодов. К ним, в первую очередь, относится топологический прием — создание вокруг основного *p-n*-перехода закороченного дополнительного *p-n*-перехода (охранного кольца) на расстоянии, менее чем диффузионная длина неосновных носителей заряда в базе [1], облучение периферии *p-n*-перехода различными ионами [2], подлечивание и вжигание металлизации в контактных областях.

В работе поставлена задача исследовать характер влияния поверхности, а также качества омического контакта в различных топологических вариантах диодных структур на прямую и обратную ветви ВАХ *p⁺-n*-переходов, изготавливаемых в условиях производства ОАО «МЗ «Сапфир»».

Методика эксперимента

Объектом исследования являлись p^+nn^+ -диодные структуры с площадью основного p - n -перехода $1,9 \times 1,55 \text{ мм}^2$, полученные по серийной диффузионной технологии: загонка бора ($T = 970 \text{ }^\circ\text{C}$ в атмосфере азота, $t = 45 \text{ мин}$); разгонка бора ($T = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$ в атмосфере сухой—влажный—сухой кислород в течение 30—60—30 мин, соответственно); геттерирование—подлегирование диффузией фосфора в тыльную сторону ($T = 950 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = 30 \text{ мин}$) на кристаллах кремния n -типа проводимости ($\rho_{\text{исх}} = 90\text{--}100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) в трех топологических вариантах (рис. 1).

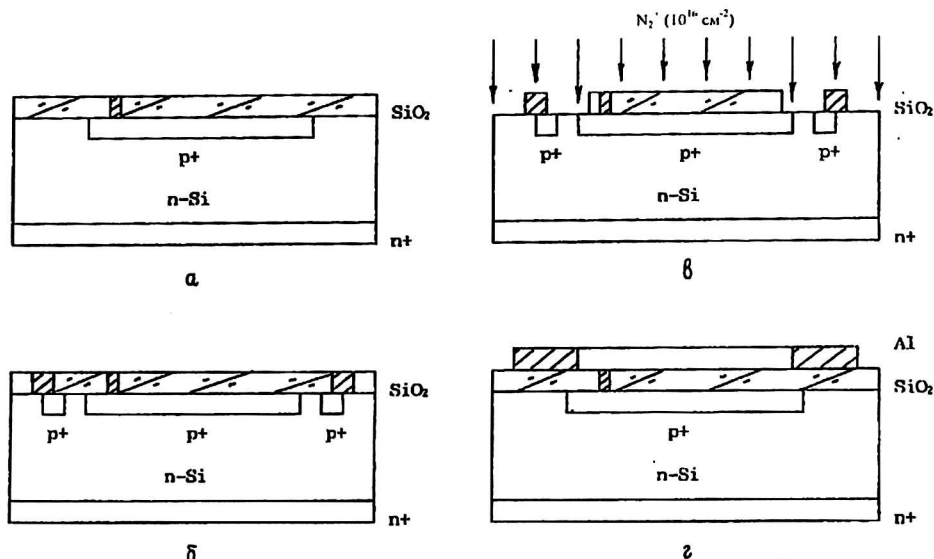


Рис. 1. Топология исследуемых образцов:

a — серийных; *б* — с ОК необлученные; *в* — с ОК облученные; *г* — с ПЭ

1. Топология серийных приборов — планарный p^+ - n -переход с защитной окисной пленкой толщиной $0,6 \text{ мкм}$, контакты — алюминий, толщиной 1 мкм после вакуумного напыления при $T_{\text{н}} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ и вжигания при $T_{\text{в}} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ (см. рис 1, *a*).

2. Топология, характерным элементом которой является дополнительный короткозамкнутый p^+ - n -переход (охранное кольцо), шириной $0,04 \text{ мм}$, отстоящий от границы основного p^+ - n -перехода (фоточувствительной площадки) на $0,08 \text{ мм}$. Контакты — алюминий, толщиной 1 мкм , напыленный и вожженный в тех же условиях, что и в первом случае (см. рис. 1, *б*). На структурах данного типа производились также облучение периферии p^+ - n -перехода ионами N_2^+ с энергией $E = 100 \text{ кэВ}$ и дозой $\Phi = 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и последующий отжиг в вакууме при $T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 ч.

3. Структуры с ПЭ (см. рис. 1, *г*). Контакты к p^+ - и n^+ -областям, а также ПЭ — алюминий толщиной 1 мкм создавались одновременно напылением при $T_{\text{н}} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ без вжигания. На данных структурах проводился последующий вакуумный отжиг при температурах 300 и $400 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 15 мин на каждой стадии.

Изготовление исходных приборных структур и обработка периферии p^+ - n -переходов сопровождалась измерением темновых прямых и обратных ветвей ВАХ. На структурах третьего типа исследовалось влияние потенциала на полевом электроде на ВАХ. Измерения проводились по схеме, представленной на рис. 2.

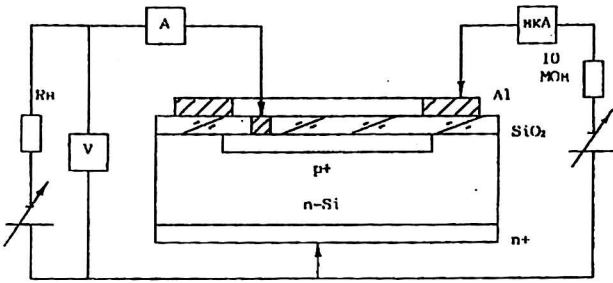


Рис. 2. Схема измерения ВАХ с ПЭ

Экспериментальные результаты

На рис. 3 представлены прямые ветви ВАХ исследуемых образцов. Структуры с ПЭ измерялись без его подключения. Как видно из представленных данных структуры с ОК имеют наименьшие значения прямого падения напряжения (рис. 4) и значение коэффициента неидеальности β (1,2 в отличие от 1,3 у структур без ОК) в зависимости вида $j = j_0 \exp(eU/\beta kT)$, что свидетельствует о приближении прямой ветви ВАХ к "идеальной", соответствующей теории Шокли—Нойса—Саа. Кроме того, такие структуры обладают значительно более однородным распределением значений прямых падений при токе 50 мА по кристаллам (рис. 5), что особенно важно для данного типа приборов.

Рис. 3. Прямые ветви ВАХ:

- 1 — серийные;
- 2 — с ОК необлученные;
- 2' — с ОК облученные;
- 3 — с ПЭ

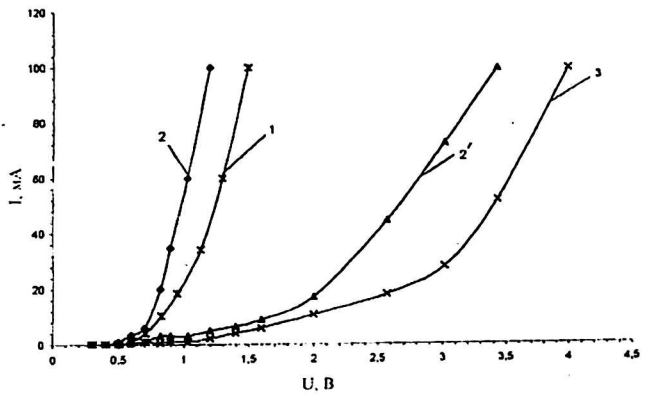
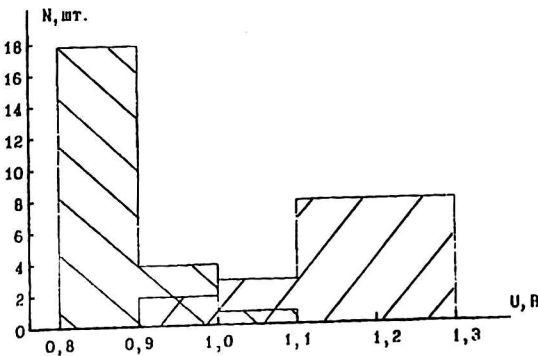


Рис. 4. Гистограммы величин падений напряжения при прямом токе $I_{пр} = 50$ мА:

- структуры без ОК;
- структуры с ОК



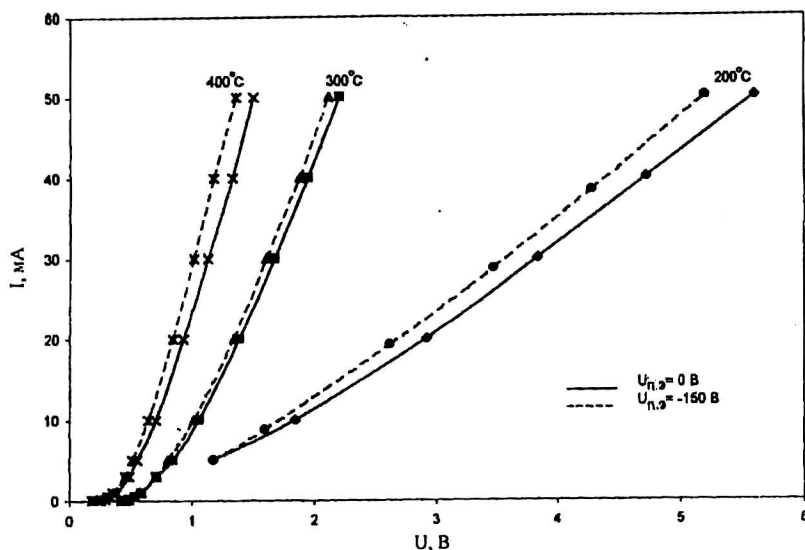


Рис. 5. Прямые ветви ВАХ структур с ПЭ до и после вжигания Al

Облучение структур с ОК предназначалось для улучшения их ВАХ, так как известно, что имплантация ионов N_2^+ с высокими дозами в периферию планарных $p^+ - n$ -переходов приводит к уменьшению влияния поверхностных каналов, образованных встроенным зарядом [2]. Однако в данном случае имплантация привела к серьезному ухудшению прямой ветви ВАХ ($\beta = 1,8$), что может быть объяснено глубоким проникновением радиационных дефектов по всей площади $p - n$ -перехода через маску из SiO_2 при высокодозовой имплантации. Дефекты достигают области металлургической границы и формируют там компенсированный высокоомный слой с низким временем жизни носителей заряда, который и увеличивает прямые падения.

Прямые ветви ВАХ образцов с ПЭ свидетельствуют о низком качестве контактов без вжигания алюминия ($\beta = 1,8$).

Изменение прямых ветвей ВАХ под воздействием потенциала на ПЭ и отжига демонстрируют данные табл. 1 и рис. 6. Как видно из этих данных, ПЭ оказывает небольшое положительное влияние на прямую ветвь ВАХ при приложении отрицательного потенциала. Механизмом такого влияния является, скорее всего, нейтрализация канала на поверхности p^+ -области, которая может оказаться слаболегированной из-за сегрегации бора на границе $Si - SiO_2$ при разгонке. Ухудшение ВАХ при приложении положительного потенциала не наблюдается, так как в этом случае инверсионный канал не образуется.

Таблица 1

Значения $U_{проб}(\beta)$ при $I_{пр} = 10$ мА для структур с ПЭ до и после вжигания алюминия

Режим вжигания	$U_{п,з}, В$						
	-200	-150	-100	0	100	150	200
200 °С	1,75 (1,6)	1,8 (1,8)	1,82 (1,9)	1,85 (1,95)	1,85 (1,95)	1,85 (1,95)	1,85 (1,95)
300 °С 15 мин	1,02 (1,3)	1,02 (1,3)	1,05 (1,35)	1,06 (1,4)	1,06 (1,4)	1,06 (1,4)	1,06 (1,4)
400 °С 15 мин	0,65 (1,15)	0,65 (1,15)	0,69 (1,17)	0,71 (1,2)	0,71 (1,2)	0,71 (1,2)	0,71 (1,2)

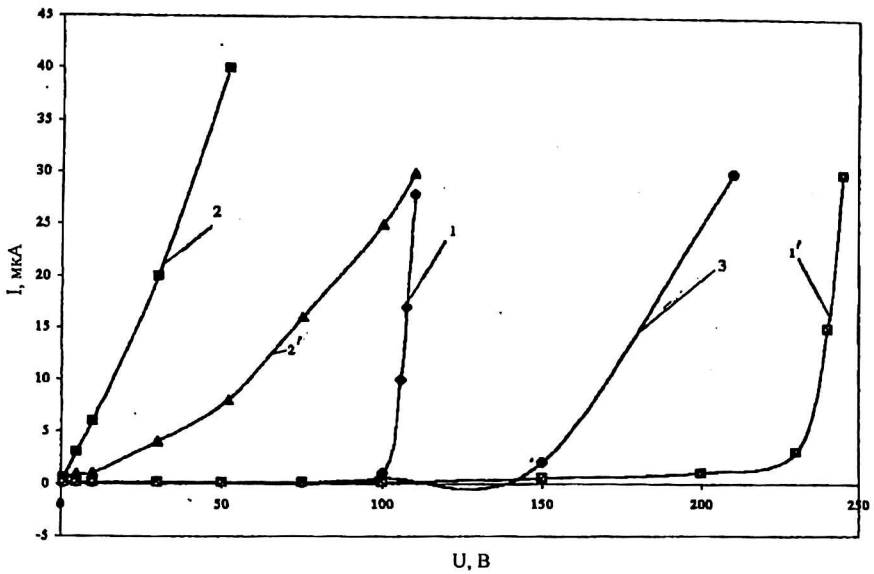


Рис. 6. Обратные ветви ВАХ:

1 — серийные до электротренировки; 1' — серийные после электротренировки;
2 — с ОК необлученные; 2' — с ОК облученные; 3 — с ПЭ

Отжиг приводит к значительному уменьшению прямых падений, гораздо большим, чем воздействия напряжения на ПЭ, что свидетельствует об определяющем влиянии контактного сопротивления на прямые падения. При этом β изменяется от 1,95 до 1,2 (без подключения ПЭ).

На рис. 7 представлены обратные ветви ВАХ исследуемых образцов. Из этих данных следует, что структуры с ОК имеют худшие обратные ветви ВАХ, чем структуры без ОК (показатель степени n в аппроксимационной зависимости $I \sim U^n$ составляет 0,8 и 0,45, соответственно), что свидетельствует о наличии утечки в случае ОК. Облучение в данном случае привело к улучшению обратной ветви ВАХ, что связано с образованием слоя с компенсированной проводимостью, играющего роль ОК.

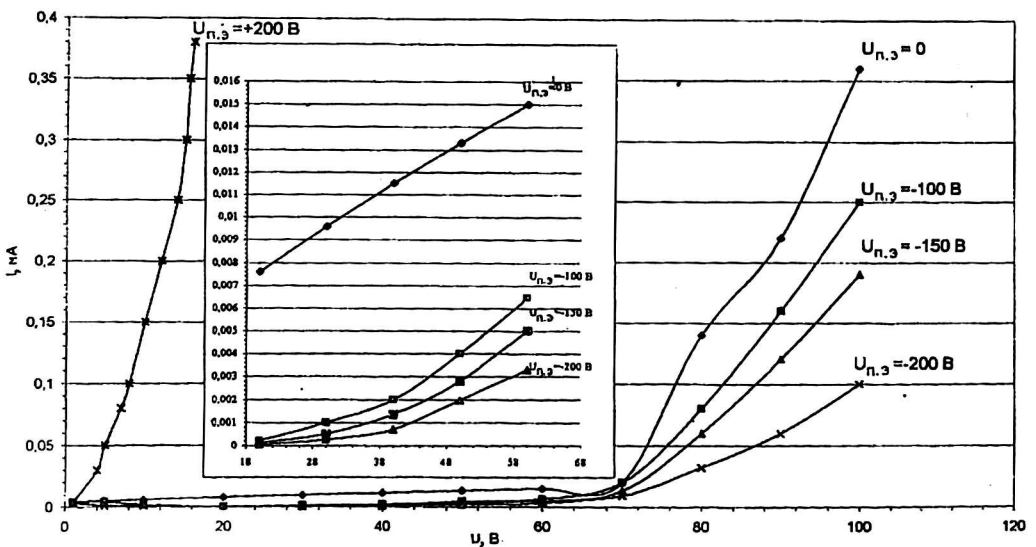


Рис. 7. Зависимость обратного тока при $U_{обр} = 100$ В от напряжения на ПЭ

Обратные ветви ВАХ структур с ПЭ имеют несколько большие значения n (0,55), чем структуры без ОК, но большие пробивные напряжения.

На структурах без ОК наблюдается процесс электротренировки (ЭТ) — увеличение $U_{\text{проб}}$ при увеличении обратного напряжения. Увеличение $U_{\text{проб}}$ в результате электротренировки составляет 150 В (от 100 до 250 В). При этом величины токов на всем участке до напряжения "загиба" не изменяются, как и величина $n = 0,45$. Наблюдения за стабильностью результата электротренировки показали, что напряжение пробоя не уменьшается после ЭТ в течение первых трех часов, а при более длительной выдержке снижается со скоростью 20 В в неделю и так вплоть до исходного значения.

На рис. 8 представлена зависимость обратного тока структур с ПЭ при $U_{\text{обр}} = 100$ В от потенциала на ПЭ, которая имеет классический вид, что свидетельствует о наличии положительного встроенного заряда на границе Si—SiO₂. Следует отметить, что приложение положительного потенциала к ПЭ приводит к резкому повышению темнового тока, а уменьшение темного тока наблюдается при приложении довольно большого отрицательного потенциала (-100 В, -150 В), что связано с большой толщиной окисла. При этом обратный ток площадки уменьшается от 1,1 до 0,03 мкА, т. е. в 35 раз.

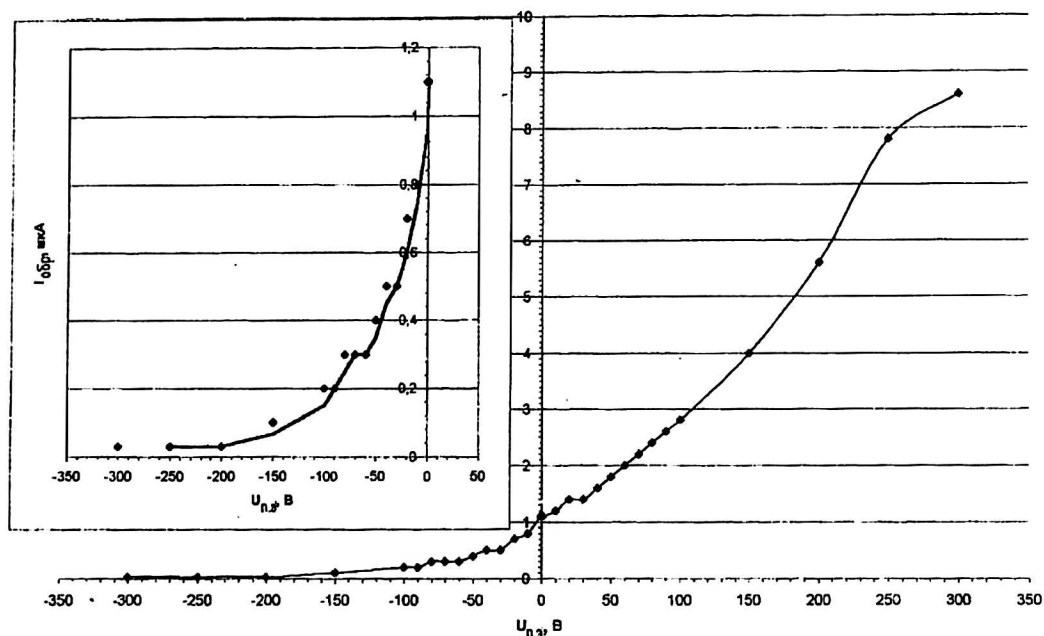


Рис. 8. Влияние напряжения на ПЭ на обратную ветвь ВАХ

Изменение обратных ветвей ВАХ (см. рис. 8) в зависимости от $U_{\text{пэ}}$ представлено данными табл. 2.

Как видно из представленных данных, приложение положительного потенциала резко ухудшает обратную ветвь ВАХ, а приложение отрицательного потенциала, компенсирующего встроенный заряд, улучшает обратную ветвь ВАХ, снижая уровень темновых токов исследуемой структуры и приближая n к 0,5. На значение n отжиг не оказывает заметного влияния, наблюдается только снижение напряжения пробоя. Влияние потенциала ПЭ на обратную ветвь ВАХ при отжиге не изменяется и имеет классический вид, как и до отжига.

Т а б л и ц а 2

Значения $I_{обр}$, мА (n) при $U_{обр} = 100$ В для структур с ПЭ до и после вжигания алюминия

Режим вжигания	$U_{п.э.}$, В						
	-200	-150	-100	0	100	150	200
200°C	0,04 (0,51)	0,11 (0,51)	0,25 (0,51)	1,36 (0,54)	- (0,72)	- (0,84)	- (0,98)
300°C 15 мин	0,03 (0,54)	0,10 (0,54)	0,20 (0,55)	1,28 (0,59)	- (0,70)	- (0,84)	- (0,98)
400°C 15 мин	8,93 (0,54)	9,56 (0,54)	10,12 (0,55)	13,0 (0,59)	- (0,70)	- (0,84)	- (0,98)

Обсуждение результатов

Полученные в данной работе результаты убеждают нас прежде всего в том, что прямые ветви ВАХ исследуемых структур определяются в первую очередь качеством контакта, а периферия $p-n$ -перехода оказывает лишь слабое отрицательное воздействие. Тем не менее, небольшое улучшение прямой ветви ВАХ даже при хорошем качестве омического контакта можно получить за счет применения топологии с ОК. Этот результат хорошо укладывается в представление о том, что закороченное ОК является областью с бесконечной скоростью поверхностной рекомбинации, и если оно расположено на меньшем удалении от $p-n$ -перехода, чем диффузионная длина носителей заряда (н.з.), то оно является эффективным стоком избыточных н.з., генерируемых в области пространственного заряда (ОПЗ), уменьшая обратный темновой ток и увеличивая прямой ток за счет появления диффузионного потока инжектированных дырок к ОК. При этом уменьшается отличие прямых ВАХ p^+-n -переходов, расположенных на разных участках поверхности пластины. В то же время обратные ветви ВАХ в этом случае характеризуются пониженным пробивным напряжением, обусловленным ограниченной шириной ОПЗ вдоль поверхности (80 мкм) и, в отличие от результатов работы [1, 2], избыточными утечками.

Изменение полярности напряжения и его величины на полевом электроде компенсирует или увеличивает влияние встроенного поверхностного заряда (обычно положительного), изменяя таким образом его влияние на ВАХ. Полученные результаты свидетельствуют о том, что решающее влияние на прямые ветви ВАХ оказывают контактные явления (за счет отжига уменьшение β составляет 30 %), в то время как изменение потенциала на ПЭ и, следовательно, изменение состояния поверхности на периферии $p-n$ -перехода улучшает β максимум на 10 %, в основном за счет отрицательного влияния канала на поверхности p^+ -области, для ликвидации которого можно рекомендовать подлегирование поверхности p^+ -области имплантацией ионов бора через пленку SiO_2 .

Уменьшение пробивного напряжения и увеличение обратных токов при температуре вжигания 400 °С в структурах с ПЭ объясняется диффузией алюминия в пленку SiO_2 и уменьшением за счет этого эффективной толщины диэлектрика над границей p^+-n -перехода и увеличением утечки через такой диэлектрик.

Результаты по электротренировке интерпретируются следующим образом. При приложении большого обратного напряжения к p - n -переходу вблизи поверхности полупроводника возникает сильное электрическое поле. Это поле проникает в диэлектрик и заставляет свободные электроны p^+ -области преодолеть потенциальный барьер на границе с пленкой SiO_2 и перейти в нее. В пленке свободные электроны захватываются на ловушки, на которых они могут существовать длительное время (часы, сутки). Ловушки расположены и над p^+ - и над n -областью и захваченные на них электроны компенсируют влияние встроенного положительного заряда, "спрямляя" энергетические зоны и приводя за счет этого к уменьшению влияния утечек. При этом темновой ток уменьшается, а пробивное напряжение возрастает. Эффект электротренировки следует учитывать при измерениях и, возможно, использовать в некоторых устройствах с такими фотодиодами. Например, за счет электротренировки можно кратковременно уменьшить темновые токи, а значит и шумы фотодиодов и за счет этого улучшить пороговые характеристики. В дальнейшем следует определить пути увеличения срока действия электротренировки — возможно созданием ловушечных уровней в диэлектрике ионной имплантацией (например, за счет подачи обратного напряжения при имплантации или только за счет имплантации).

Выводы

1. Применение топологии с закороченным ОК улучшает прямую ВАХ (по прямым падениям, β , однородности и воспроизводимости). Эта топология рекомендуется для применения в серийных приборах. При этом, по-видимому, требуется оптимизировать расстояние от границ фоточувствительной площадки до ОК и режимы окисления для улучшения обратной ветви ВАХ.

2. Применение ПЭ при подаче отрицательного смещения на него позволяет уменьшить в 35 раз токи утечки при $U_{\text{обр}} = 100$ В.

3. В случае получения p^+ - n -перехода с пробивным напряжением, близким к 100 В, это напряжение может быть увеличено до 250 В за счет электротренировки при подаче обратного напряжения. Улучшение обратных ВАХ за счет электротренировки действует в течение 3 ч.

4. Для снижения прямых падений и, возможно, улучшения обратных ветвей ВАХ, целесообразно опробовать подлегирование поверхности p^+ -области имплантацией бора через пленку SiO_2 .

Литература

1. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпов В. В. О влиянии дополнительного планарного короткозамкнутого p - n -перехода, расположенного вблизи основного // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 6. С. 72—76.

2. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпов В. В., Сорокин К. В. О возможности применения ионной имплантации при производстве pin -фотодиодов на кремнии // Прикладная физика. 1999. № 6. С. 94—104.

About influence of surface and contact effects on volt-ampere characteristics photodiodes on *n*-type silicon

V. P. Astakhov, I. A. Bolesov, D. A. Gindin, V. V. Karpov,
K. V. Sorokin.

Joint Stock Company «Moscow Plant "Sapphire"», Moscow, Russia

*At manufacturing of two-ground photodiodes on *n*-type silicon, function in photovoltaic regime at contrary-parallel insertion, the main task is identical straight branches of volt-ampere characteristics for both crystals of photodiodes. Among factors, which may influence on the straight branch bear in mind space and contact phenomenon. In this work it is studied an influence to photodiodes parameters of such ways as ring additional short circuit *p*–*n*-junction, *p*–*n*-junction periphery irradiation with ions N_2^+ . Besides that it is studied an influence of tension on field electrode to VAC. For concrete conditions it is shown, that decisive influence to forward VAC render the contact Al-Si. Improvement action to it render application ring additional Decisive influence to forward VAC render the tension of field electrode. At negative tension on it the reverse level may be falled in 35 time.*