Формирование внутренних геттеров ионной имплантацией бора при изготовлении *p-i-n*-фотодиодов на основе кремниевых пластин

В. С. Просолович[a,*], В. Б. Оджаев[a], А. Н. Петлицкий[b], Д. В. Шестовский[b], В. Ю. Явид[a], Ю. Н. Янковский[a]

[a]*Белорусский государственный университет, г. Минск, 220030, Беларусь*
[b]*Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», г. Минск, 220108, Беларусь*
[*]*e-mail: prosolovich@bsu.by*

Поступила в редакцию 30.06.2026
После доработки 28.08.2026
Принята к публикации 11.09.2026

Исследованы вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики *p-i-n*-фотодиодов, содержащих геттеры, сформированные имплантацией ионов бора, на обратной стороне кремниевой пластины. Параллельно исследовались контрольные образцы, прошедшие все этапы технологического процесса изготовления приборов за исключением имплантации примесей в непланарную сторону пластины. Установлено, что формирование в *p-i-n*-фотодиодах геттера имплантацией B^+ с энергией 60 кэВ дозами 5×10^{15} см$^{-2}$ – 1×10^{16} см$^{-2}$ в обратную сторону пластины с последующими преципитирующим отжигом при T = 850 °С, 30 мин и диффузионным отжигом при T = 1150 °С, 240 мин позволяет снизить величину обратного темнового тока *p-i-n*-фотодиодов примерно в 2,5 раза, а также увеличить напряжение лавинного пробоя с 22,5 В до 23,5 В. Показано, что повышение температуры диффузионного отжига до 1200 °С при создании геттера ионной имплантацией бора приводит к формированию на вольт-амперных характеристиках широкой предпробойной области с плавно нарастающей величиной обратного тока. Емкости сформированного таким образом геттера недостаточно для инактивации технологических примесей.

Ключевые слова: *p-i-n*-фотодиод, генерационно-рекомбинационные процессы, геттерирование, ионная имплантация, термообработка

УДК 621.382.2

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность работы *p-i-n*-фотодиодов, применяемых в аппаратуре космического назначения в качестве навигационных и сенсорных детекторов, а также в системах определения расстояния с помощью светового луча (*LIDAR*) [1, 2], в значительной степени обусловливается величиной темнового тока при обратном смещении, который зависит, в первую очередь, от такой характеристики материала как время жизни неосновных носителей заряда [3]. Данный параметр определяется, прежде всего, эффективностью протекания генерационно-рекомбинационных процессов на дефектах структуры кристаллической решетки. Генерационными центрами являются различные технологические (фоновые) примеси и другие структурные дефекты (например, дислокации, микродефекты, вакансионные скопления и скопления междоузельных атомов, дефектно-примесные комплексы). Поскольку в процессе производства изделий микроэлектроники при высокотемпературных обработках источником загрязнений кристаллов примесями переходных металлов является прежде всего производственное оборудование, то целесообразным является введение в технологический процесс операций, предусматривающих проведение очистки рабочих зон кремниевых пластин. Для повышения времени жизни носителей заряда применяются различные методы геттерирования технологических примесей, позволяющие создать в рабочей области кремниевой подложки «чистую» зону [4]. Геттерирование примесных атомов металлов позволяет не только повысить время жизни неравновесных носителей заряда, но также обеспечивает стабильность электрических и рекомбинационных параметров материала, который многократно подвергается термообработкам в технологическом процессе изготовления фотоприемников [5–7]. Физический механизм действия центров геттерирования технологических (фоновых) примесей основывается на

формировании внутри монокристалла полей упругих напряжений, которые вынуждают технологические примеси мигрировать к центрам геттерирования [4]. В работе проведен анализ изменения электрофизических параметров *p-i-n*-фотодиодов на основе кремния с профилированным *p-i-n*-переходом и охранным кольцом в зависимости от режимов формирования внутренних геттеров посредством ионной имплантации бора в тыльную сторону кремниевой пластины.

МЕТОДИКИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ И ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные образцы *p-i-n*-фотодиодов с профилированным *p-i-n*-переходом изготавливались на пластинах кремния *p*-типа проводимости ориентации (100) с удельным сопротивлением 1000 Ом·см, выращенного по методу бестигельной зонной плавки. На рис. 1 представлено схематическое изображение структуры фотодиода [8]. На поверхности кремниевой подложки *1* *p*-типа проводимости были сформированы две совмещенные области *2* и *3* *n*-типа проводимости. Слаболегированная мелкозалегающая область *2*, созданная ионной имплантацией (ИИ) мышьяка, совмещена с областью *3*, созданной имплантацией фосфора, представляющей из себя сетку локальных областей. В местах контакта области *2* и локальных областей *3* с подложкой *1* образуется общая область пространственного заряда (ОПЗ) *p-n*-перехода *4*. По периферии области *2* изготавливалось охранное кольцо *n*-типа проводимости, внешние края которого выходят на подложку *1* и закрыты пассивирующим диэлектриком. Области p^+-типа анода (изотипный переход), сформированного вокруг охранного кольца, и n^+-типа катода создавались имплантацией соответственно бора и фосфора в планарную сторону пластины. Область *3* представляет из себя сетку глубоко сформированных локальных областей, расположенных друг от друга на расстоянии, меньшем диффузионной длины неосновных носителей заряда в подложке, а поверх этих областей расположен просветляющий диэлектрик.

Сущность использования данной конструкции *p-i-n*-фотодиода состоит в следующем. Подавляющая часть излучения с рабочей длиной волны света при попадании на фотодиод поглощается в основном в участках подложки *1* между локальными областями *3*. Сетка из локальных областей *3* выполняет одновременно несколько функций. С одной стороны, она уменьшает последовательное сопротивление слаболегированного мелкозалегающего слоя первой области *2* и тем самым снижает постоянную времени RC фотодиода. С другой стороны, глубоко сформированные локальные области (*3*) улучшают в длинноволновой области спектра условия собирания неосновных носителей заряда, генерируемых светом в подложке *1* вблизи локальных областей *3*.

Участки между локальными областями *3* состоят из подложки *1* на основе высокоомного кремния *p*-типа проводимости ориентации (100) с удельным сопротивлением ρ = 1000 Ом·см, выращенного методом бестигельной зонной плавки, и частично области пространственного заряда *p-n*-перехода *4*. Глубина области пространственного заряда *p-n*-перехода *4* зависит от удельного сопротивления подложки *1* и рабочего напряжения на *p-n*-переходе. Неосновные носители заряда, генерируемые в подложке *1*, в зависимости от точки генерации в подложке вследствие миграции под действием диффузии попадают либо в область *2*, либо в участки локальных областей *3* и создают фототок. При этом неосновные носители заряда, генерируемые светом вблизи локальных областей *3*, достигают их раньше, чем области *2*. Это приводит к снижению рекомбинационных потерь и увеличению квантового выхода фотодиода.

Формирование геттера производилось посредством ионной имплантации B^+ с энергией 60 кэВ в непланарную сторону пластины с последующими преципитирующим и диффузионным отжигами в атмосфере азота в индукционной печи. Бор имплантировался дозами 5×10^{15}–1×10^{16} см$^{-2}$, преципитирующая термообработка осуществлялась при T = 850 °C длительностью (t) 30 мин, диффузионная разгонка – при T = 1150 °C или 1200 °C в течение 240 мин. Параллельно исследовались контрольные образцы приборов, подвергавшиеся тем же технологическим операциям за исключением имплантации примесей в непланарную сторону пластины для формирования геттера. Регистрация темновых вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик (далее соответственно ВФХ и ВАХ) *p-i-n*-фотодиодов проводилась на измерителе параметров полупроводниковых приборов *Agilent B*1500*A* с зондовой станцией *Cascade Summit* 11000*B-AP* в диапазоне обратных смещений 0–30 В с шагом 0,25 В и темпом 0,3 мс/В в интервале температур 20–125 °C.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее было установлено [9], что вольт-амперные характеристики как контрольных *p-i-n*-

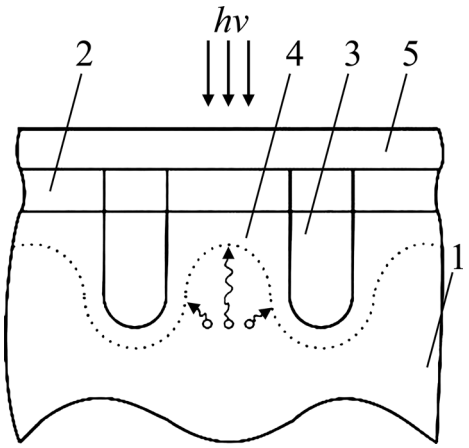


Рис. 1. Схематическое изображение структуры исследуемых *p-i-n*-фотодиодов [8]: *1* – подложка монокристаллического кремния *p*-типа проводимости; *2* – слаболегированная мелкозалегающая область *n*-типа проводимости, созданная ионной имплантацией (ИИ) мышьяка; *3* – область *n*-типа, созданная ИИ фосфора и представляющая из себя сетку локальных областей; *4* – область пространственного заряда (ОПЗ) *p-n*-перехода; *5* – просветляющее покрытие.

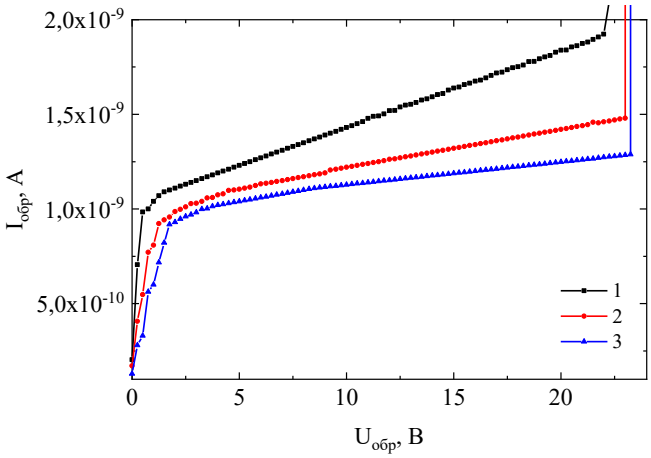


Рис. 2. Типичные обратные вольт-амперные характеристики *p-i-n*-фотодиодов, измеренные при $T_{изм}$ = 20 °C. *1* – контрольный образец; *2* – доза ИИ бора $5{,}0\times10^{15}$ см$^{-2}$; *3* – доза ИИ бора $1{,}0\times10^{16}$ см$^{-2}$. Диффузионная разгонка при T = 1150 °C длительностью t = 240 мин.

фотодиодов, так и приборов, изготовленных при формировании внутренних геттеров имплантацией B^+ дозами 5×10^{15} см$^{-2}$ и 1×10^{16} см$^{-2}$ и последующем диффузионном отжиге при T = 1150 °C, имеют вид типичный для большинства диодов. При $T_{изм}$ = 20 °C величина обратного темнового тока ($I_{обр}$) при 2,5 В для дозы ИИ 5×10^{15} см$^{-2}$ составляет ~ $8{,}5\times10^{-10}$ А. Причем при увеличении дозы имплантации бора величина обратного тока уменьшается. Следует отметить, что для контрольных образцов при тех же условиях измерений величина $I_{обр}$ выше и составляет ~ $1{,}2\times10^{-9}$ А (рис. 2). Кроме того, в диапазоне от 2,5 до 20 В при увеличении обратного смещения значение $I_{обр}$ для *p-i-n*-фотодиодов, содержащих геттеры, также изменяется существенно меньше (рис. 2).

Величина темнового тока фотодиода при обратном смещении ($I_{обр}$) определяется суммой диффузионного ($I_{диф}$), туннельного ($I_{тун}$) и генерационного токов ($I_{ген}$) [3]:

$$I_{обр} = I_{дифф} + I_{тун} + I_{ген}. \qquad (1)$$

Диффузионный ток возникает вследствие наличия градиента концентрации носителей заряда разных типов вблизи потенциального барьера [3]. Туннельная составляющая обратного тока обусловлена эффектом туннелирования – носители заряда могут пересекать потенциальный барьер области обеднения *p-n*-перехода, если он достаточно узок. Генерационные токи Шокли-Рида-Холла обусловлены тепловой генерацией носителей с ловушек, расположенных в запрещенной зоне полупроводника [10]. Наличие глубоких уровней внутри запрещенной зоны (глубокими в Si считаются уровни, находящиеся между двумя демаркационными уровнями во второй трети запрещенной зоны) повышает вероятность процессов генерации носителей заряда [11]. Ток Шокли-Рида-Холла в области обеднения обычно оказывает гораздо большее влияние на ВАХ, чем в квазинейтральной области, ввиду более низкой концентрации основных носителей заряда [10]. В качестве ловушек, как правило, выступают структурные дефекты (локальные центры,

дислокации, микродефекты и т.д.), которые образуются как в процессе выращивания Si, так и при технологической обработке в ходе изготовления приборов.

Вольт-амперные характеристики идеального *p-n*-перехода описываются формулой Шокли, а плотность тока через переход определяется выражением [12]:

$$J = J_p + J_n = J_s\left(e^{qU/k_BT} - 1\right), \qquad (2)$$

где J_p – плотность тока дырок через *p-n*-переход; J_n – плотность тока электронов через *p-n*-переход; J_s – плотность диффузионного тока через *p-n*-переход (ток насыщения); q – заряд электрона; U – напряжение, подаваемое на контакты диода; k_B – постоянная Больцмана; T – температура кремния. Ток насыщения, который не зависит от величины приложенного к *p-n*-переходу смещения, описывается следующим выражением [12]

$$J_s = \frac{qD_p p_{no}}{L_p} + \frac{qD_n n_{po}}{L_n}, \qquad (3)$$

где D_p – коэффициент диффузии дырок; p_{n0} – равновесная концентрация дырок в полупроводнике *n*-типа; L_p – диффузионная длина дырок; D_n – коэффициент диффузии электронов; n_{p0} – равновесная концентрация электронов в полупроводнике *p*-типа; L_n – диффузионная длина электронов. Если туннельным током можно пренебречь, то полный обратный ток для резкого перехода можно приблизительно представить суммой диффузионного тока в нейтральной области (первое слагаемое) и генерационного тока в обедненной области (второе слагаемое) [3]:

$$I_{\text{обр}} = q\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}\frac{n_i^2}{N_D} + \frac{qn_iW}{\tau_e}, \qquad (4)$$

где n_i – концентрация собственных носителей заряда; N_D – концентрация электронов в *n*-области; τ_p и τ_e – времена жизни неравновесных дырок и электронов соответственно; W – область пространственного
заряда.

Плотность тока, обусловленного генерацией в обедненной области, определяется следующими выражениями:

$$J_{gen} = \int_0^W q|U|dx \approx q|U|W = \frac{qn_iW}{\tau_e}, \qquad (5)$$

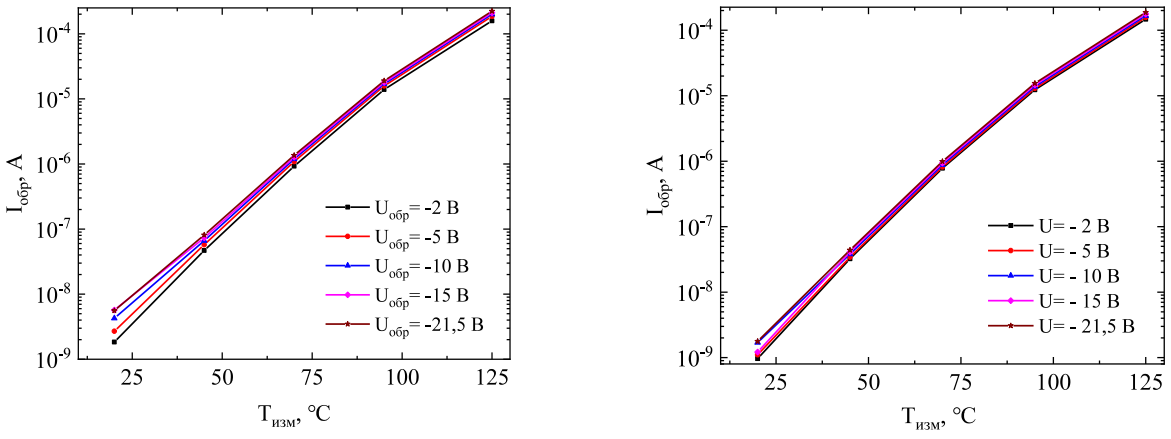
$$J_{gen} \sim \frac{1}{\tau_e}; J_{gen} \sim W \sim \left(V_{bi} + U\right)^{\frac{1}{2}}. \qquad (6)$$

Было установлено, что вольт-амперные характеристики *p-i-n*-фотодиодов, изготовленных с использованием температуры диффузионного отжига T = 1150 °C, и контрольных приборов имеют степенную зависимость от приложенного обратного смещения. Как следует из (5), при заданной температуре плотность генерационного тока пропорциональна ширине обедненного слоя W, которая в свою очередь зависит от приложенного обратного смещения $U_{\text{обр}}$, и времени жизни неравновесных носителей заряда τ_e [3].

Для обратной ветви ВАХ *p-n*-перехода, в области пространственного заряда которого преобладает генерация электронно-дырочных пар, присуща степенная зависимостью тока от напряжения $I_{\text{обр}} \sim U^n$ [3]. В рассматриваемом случае для контрольных образцов зависимость имеет сублинейный характер $n \sim 0{,}5$. Такая зависимость характерна для резкого асимметричного *p-n*-перехода, для которого рост $I_{\text{обр}}$ с напряжением связан с ростом W по степенному закону с n = 0,5, что следует из измерения вольт-фарадных характеристик. В полупроводниках с низкой концентрацией собственных носителей заряда n_i (таких, как Si) и большой концентрацией генерационно-рекомбинационных центров (низкое значение эффективного времени жизни неравновесных носителей заряда) при комнатной температуре преобладает генерационный ток. Таким образом, для контрольных образцов при температуре измерений 20 °C основной вклад в обратный ток вносит дрейфовая составляющая (4), обусловленная генерационно-рекомбинационными процессами в области обеднения [3].

Для *p-i-n*-фотодиодов, в которых сформированы геттеры ИИ бора с последующим диффузионным отжигом при T = 1150 °C, также наблюдается степенная зависимость $I_{\text{обр}} \sim U^n$, однако показатель степени $n \sim 0{,}15$–$0{,}25$. Это свидетельствует о том, что в уравнении (4) для обратного тока преобладает диффузионный член, который не зависит от приложенного обратного смещения. Таким образом можно заключить, что формирование геттерирующих центров имплантацией ионов бора в обратную сторону пластины способствует удалению глубоких генерационно-рекомбинационных центров из базовой области *p-i-n*-фотодиодов, что приводит к уменьшению величины обратного темнового тока вследствие увеличения времени жизни неравновесных носителей заряда. При этом применение дозы имплантации бора 1×10^{16} см$^{-2}$ позволяет более существенно произвести геттерирование глубоких центров, которые, как правило, обусловлены наличием технологических примесей переходных металлов [5].

На рис. 3а,б представлены температурные зависимости обратного темнового тока ($I_{\text{обр}}$)



(а) (б)

Рис. 3. Температурные зависимости обратного тока при различных обратных смещениях контрольных образцов *p-i-n*-фотодиодов (а) и *p-i-n*-фотодиодов с геттером, созданным ИИ B^+ (б) с энергией E= 60 кэВ, преципитирующий отжиг 850 °C, t = 30 мин, доза ИИ – 5×10^{15} см$^{-2}$, диффузионный отжиг – T = 1150 °C.

контрольных образцов (рис. 3а) и приборов, в которых были сформированы геттерирующие центры ионной имплантацией бора (рис. 3б). Как видно из рис. 3, температурные зависимости $I_{обр}$ для образцов с геттерирующими центрами, созданными ионной имплантацией бора дозой 5×10^{15} см$^{-2}$ с температурой диффузионного отжига T = 1150 °C, и контрольных образцов практически идентичны. Определенные из данных зависимостей энергии активации проводимости (ΔE) составили для вышеуказанных образцов ~ 1,10–1,15 эВ. Это соответствует ширине запрещенной зоны кремния. Небольшое уменьшение энергии активации проводимости при температурах измерения более 90 °C обусловлено уменьшением ширины запрещенной зоны кремния при повышении температуры. Следует отметить, что практически такие же температурные зависимости $I_{обр}$ наблюдалась и для приборов, в которых геттерирующие центры формировались ионной имплантацией бора дозой 1×10^{16} см$^{-2}$ с температурой диффузионного отжига T = 1150 °C. Данное обстоятельство позволяет заключить, что при указанных режимах формирования геттеров в *p-i-n*-фотодиодах величина $I_{обр}$ определяется диффузионными процессами переноса носителей заряда в области *p-n*-перехода, то есть концентрация глубоких генерационно-рекомбинационных центров достаточно мала. При этом меньшие значения $I_{обр}$ в образцах, в которых формировались геттерирующие центры ионной имплантацией бора, свидетельствуют об уменьшении влияния в них технологических (фоновых) примесей на величину времени жизни неравновесных носителей заряда и, как следствие, на величину $I_{обр}$ вследствие геттерирующего действия включений примеси бора.

Формирование геттерирующих центров имплантацией ионов бора дозой 1×10^{16} см$^{-2}$ позволило также повысить напряжение лавинного пробоя, обусловленного ударной ионизацией, до 23,5 В по сравнению с дозой имплантации 5×10^{15} см$^{-2}$ (23,2 В) и контрольными образцами (22,5 В). Пробой в *p-i-n*-фотодиодах носит лавинный характер и является следствием ударной ионизации атомов кристалла [13]. Носители заряда, попавшие в область пространственного заряда *p-n*-перехода, под действием сильного электрического поля приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации атомов. Образовавшиеся носители заряда сами принимают участие в дальнейшей ионизации. Процесс нарастания тока носит лавинный характер. Скорость нарастания тока зависит от коэффициентов ионизации электронов и дырок, то есть от числа электронно-дырочных пар, образуемых носителем заряда на 1 см пути при данной напряженности электрического поля.

Напряжение пробоя $U_{пр}$ несимметричного *p-n*-перехода определяется выражением [3]

$$U_{пр} = \frac{E_m W}{2} = \frac{\varepsilon_s E_m^2}{2q}\left(N_B\right)^{-1}, \qquad (7)$$

где E_m – максимальное значение электрического поля; ε_s – диэлектрическая проницаемость полупроводника; N_B – концентрация ионизированной примеси в слаболегированной области.

Если генерационно-рекомбинационные центры, обусловленные технологическими примесями, распределены неоднородно по объему полупроводника, то величина электрического поля, необходимая для проявления эффекта пробоя в различных местах области обеднения также будет различной: меньше в областях с большей концентрацией генерационно-рекомбинационных центров, и больше для областей, содержащих малое количество скоплений генерационных центров, то есть в более «чистых» областях.

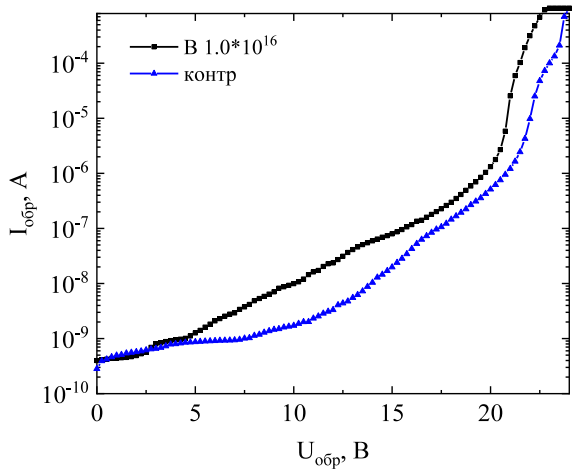
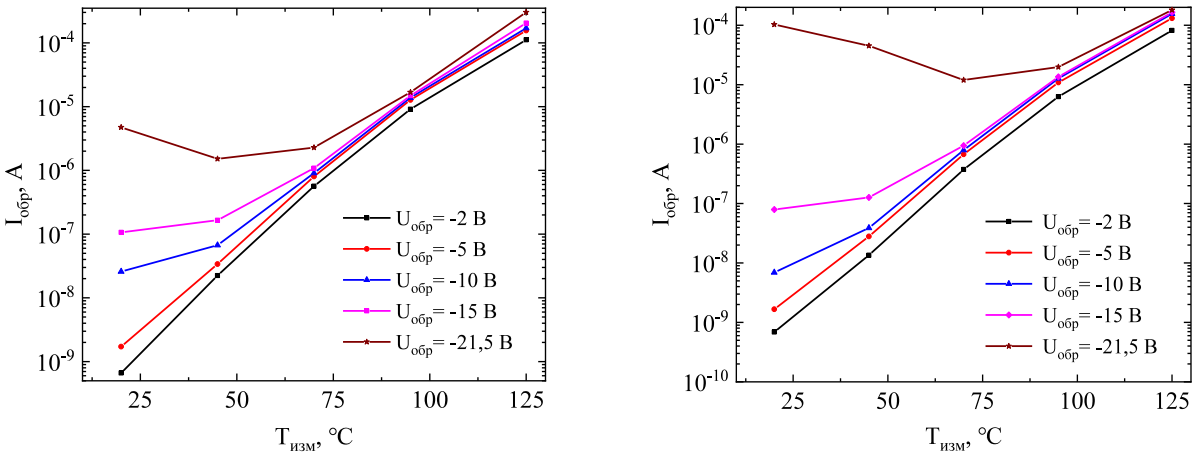


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики контрольных образцов *p-i-n*-фотодиодов и *p-i-n*-фотодиодов с геттером, созданным ионной имплантацией бора с энергией E= 60 кэВ и дозой 1×10^{16} см$^{-2}$, преципитирующий отжиг при T = 850 °С, t = 30 мин. Температура диффузионного отжига – T = 1200 °С. $T_{изм}$ = 20 °С.

Таким образом, увеличение напряжения пробоя для образцов, содержащих геттерирующие центры, сформированные в результате имплантации ионов бора в обратную сторону пластин свидетельствует о том, что формирование геттера на обратной стороне пластины при преципитирующей термообработке при T = 850 °С длительностью 30 мин и диффузионной разгонке при T = 1150 °С в течение 240 мин позволяет снизить концентрацию генерационно-активных примесно-дефектных центров в объеме кремниевых пластин.

Повышение температуры диффузионного отжига до T = 1200 °С для дозы имплантации бора 1×10^{16} см$^{-2}$ приводит к существенному изменению вольт-амперной характеристики (рис. 4). Напряжение пробоя снижается до 20,5 В, пробой становится достаточно плавным, и на ВАХ появляется предпробойный участок начиная от ~ 5 В, сопровождающийся существенным увеличением обратного темнового тока от 1×10^{-9} А до 3×10^{-6} А. Следует отметить, что практически аналогичная закономерность наблюдается и для контрольных образцов (рис. 4): после проведения термообработки при T = 1200 °С, имитирующей диффузионную разгонку примеси бора, напряжение пробоя снижается от 22,5 В до 21,0 В, и появляется предпробойный участок начиная от ~ 7 В, где ток плавно увеличивается от 3×10^{-9} А до 6×10^{-7} А. Это свидетельствует о существенном вкладе в величину $I_{обр}$ генерационных процессов, связанных с глубокими энергетическими уровнями, расположенными в области обеднения. При напряжениях смещения свыше 5 В обратный ток также возрастает с ростом величины обратного смещения по степенному закону $I_{обр} \sim U^n$, однако показатель степени n становится больше 0,5 ($n \sim 2$). При этом согласно измерениям вольт-фарадных характеристик изменение размеров области пространственного заряда (W) от приложенного обратного смещения происходит с показателем степени $n \sim 0{,}5$. Следовательно, такая суперлинейная зависимость $I_{обр}$ обусловлена не изменением размеров ОПЗ, а высокой концентрацией рекомбинационно-генерационных центров и их неоднородным распределением по объему кристалла [3]. Ранее качественно подобные ВАХ наблюдались нами при исследовании диодов генераторов шума, сформированных на сильнолегированных подложках монокристаллического кремния (ρ = 0,005 Ом·см) [14], и *p-i-n*-фотодиодов с вертикальной структурой [15]. Наличие ступенек на вольт-амперных характеристиках было связано с неоднородным распределением примесей и посттехнологических структурных дефектов по объему подложки.

Температурные зависимости $I_{обр}$ как для образцов с геттерирующими центрами, созданными ионной имплантацией бора дозой 1×10^{16} см$^{-2}$, так и для контрольных образцов, при увеличении температуры диффузионного отжига до 1200 °С существенно изменяются (рис. 5а,б). Вид кривых свидетельствует о существенном вкладе в величину $I_{обр}$ генерационных процессов в области обеднения, связанных с глубокими энергетическими уровнями. Причем, при обратных смещениях не превышающих 5 В характер температурных зависимостей существенно не изменяется: величина $I_{обр}$ по-прежнему определяется диффузионными процессами переноса носителей заряда в области *p-n*-перехода. Однако при увеличении обратного смещения вследствие проявления эффекта Пула-Френкеля [16] определяющими становятся процессы генерации носителей заряда с глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне (ΔE_i = 0,40–0,50 эВ) в области обеднения. Такими центрами, как сказано ранее, могут быть атомы



(а) (б)

Рис. 5. Температурные зависимости $I_{обр}$ при различных обратных смещениях контрольных образцов *p-i-n*-фотодиодов (а) и *p-i-n*-фотодиодов с геттером, созданным ионной имплантацией бора (б) с энергией E = 60 кэВ и дозой 1×10^{16} см$^{-2}$, преципитирующий отжиг при T = 850 °С, t = 30 мин. Температура диффузионного отжига – T = 1200 °С.

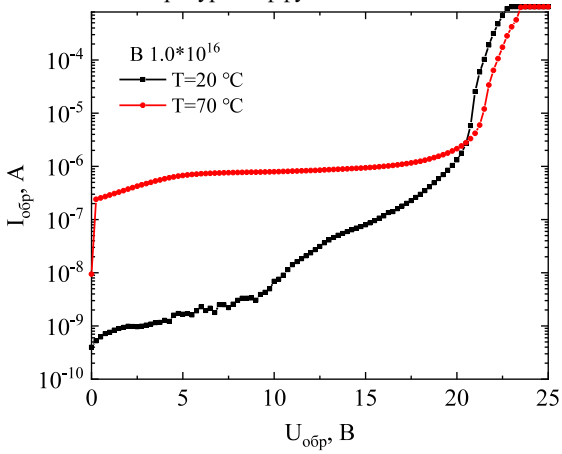


Рис. 6. Обратные темновые вольт-амперные характеристики контрольных образцов и *p-i-n*-фотодиодов с геттером, созданным ионной имплантацией бора с энергией E = 60 кэВ и дозой 1×10^{16} см$^{-2}$, преципитирующий отжиг при T = 850 °С, t = 30 мин, температура диффузионного отжига – T = 1200 °С. $T_{изм}$ = 20 °С.

технологических примесей (Fe, Cu, Au и др.), создающих глубокие генерационно-рекомбинационные уровни в запрещенной зоне, коэффициенты диффузии которых значительно возрастают при увеличении температуры термообработки. Это приводит к существенному снижению времени жизни неосновных носителей заряда и, как следствие, увеличению $I_{обр}$ *p-i-n*-фотодиодов. Следует отметить, что при повышении температуры измерений увеличивается не только величина обратного тока, но происходит и приближение вида вольт-амперной характеристики к «классическому» виду (рис. 6). При этом зависимость по-прежнему остается степенной ($I_{обр} \sim U^n$), а показатель степени $n \sim 0{,}55$–$0{,}60$. Такое поведение ВАХ характерно также и для контрольных образцов, подвергнутых имитирующей термообработке при T = 1200 °С и обусловлено тем, что в высокоомной подложке (удельное сопротивление ~ 1000 Ом·см), на которой формировались *p-i-n*-фотодиоды, существенное влияние начинает оказывать термическая генерация собственных носителей заряда, то есть материал начинает приближаться к условиям собственной проводимости и влияние глубоких энергетических уровней вследствие смещения уровня Ферми становится менее заметным.

Изменение вида ВАХ при температурах диффузионного отжига 1200 °С после проведения ИИ бора может быть обусловлено рядом причин. Во-первых, при увеличении температуры отжига повышаются коэффициенты диффузии технологических примесей (Fe, Cu, Au и др.), проникающих в материал из технологический оснастки при высоких температурах и создающих глубокие генерационно-рекомбинационные уровни в запрещенной зоне. Это приводит к существенному снижению времени жизни неосновных носителей заряда и, как следствие, увеличению значения $I_{обр}$ *p-i-n*-фотодиодов. Во-вторых, при выращивании монокристаллического кремния по методу бестигельной зонной плавки формируются скопления микродефектов, в состав которых входят технологические примеси кислорода и углерода

[17, 18]. При температуре отжига 1200 °С как в образцах со сформированным геттером, так и в контрольных, вероятно, происходит трансформация микродефектов с выделением из них большого количества примесных атомов кислорода и углерода, которые сами формируют генерационно-активные центры, приводящие к снижению величины напряжения лавинного пробоя и возрастанию $I_{обр}$ в достаточно широкой предпробойной области. Емкости геттера, сформированного при имплантации бора дозой 1×10^{16} см$^{-2}$, в данном случае явно недостаточно для пассивации указанных выше процессов. Следует отметить, что при температуре диффузионного отжига Т=1150°С существенной трансформации микродефектов с выделением примесных атомов кислорода и углерода не происходит, и емкости сформированного геттера достаточно для дезактивации технологических примесей, как попавших в кристаллы при высокотемпературных технологических операциях изготовления приборов, так и при выращивании монокристаллов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что формирование в *p-i-n*-фотодиодах геттера посредством имплантации B^+ в обратную сторону пластины с энергией 60 кэВ дозами 5×10^{15} см$^{-2}$ – 1×10^{16} см$^{-2}$ с последующими преципитирующим отжигом при T = 850 °С длительностью 30 мин и диффузионным отжигом при T = 1150 °С в течение 240 мин позволяет снизить величину $I_{обр}$ *p-i-n*-фотодиодов примерно в 2,5 раза. Формирование внутренних геттеров ионной имплантацией бора в процессе изготовления *p-i-n*-фотодиодов дает также возможность увеличить напряжение лавинного пробоя по сравнению с контрольными образцами с 22,5 до 23,5 В. Это обусловлено пассивацией технологических примесей, создающих глубокие генерационно-рекомбинационные центры.

Показано, что при создании геттера ионной имплантацией бора повышение температуры диффузионного отжига до T = 1200 °С приводит к формированию на ВАХ широкой предпробойной области с плавно нарастающей величиной обратного тока, обусловленной распадом посттехнологических микродефектов, сопровождающимся освобождением технологических примесей кислорода и углерода. Емкости сформированного таким образом геттера недостаточно для их инактивации. Энергетическое положение глубоких генерационно-рекомбинационных центров, определяющих формирование ступенчатого характера и предпробойных участков вольт-амперных характеристик, составляет (0,40–0,50) эВ, что соответствует технологическим примесям меди и железа, попадающим в материал из технологической оснастки при высокотемпературных операциях при изготовлении *p-i-n*-фотодиодов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, договор № Ф25УЗБ-067 от 05.03.2025.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них конфликт интересов отсутствует.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pereira do Carmo, J., Moebius, B., Pfennigbauer, M., Bond, R., et al., Imaging lidars for space applications, *Nov. Opt.l Syst. Des. Optimiz. XI*, 2008, v. 7061, art. ID 70610J-01.
2. De Carlo, P.M., Roberto, L., Marano, G., L'Abbate, M., Oricchio, D., et al., Intersatellite link for earth observation satellites constellation. *SPACEOPS*, Roma, Italy. 2006, p.19.
3. Sze, S.M., and Lee, M.-K., *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. 3rd ed. Hoboken, N. J: Wiley, 2012, 592 p.
4. Челядинский, А.Р., Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии. *Успехи физических наук*. 2003, т. 173, № 8, с.813.
5. Красников, Г.Я., *Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов*. М: Акционерное общество Рекламно-издательский центр «ТЕХНОСФЕРА», 2011. 800 с.
6. *Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии*. Под ред. А.С. Турцевича. В 3 т. Минск: Интегралполиграф, 2013. 704 с.
7. Лебедев, А.И., *Физика полупроводниковых приборов*. М.: Изд-во ФИЗМАТЛИТ, 2008. 294 с.
8. Блынский, В.И., Голуб, Е.С., Лемешевская, А.М., Цымбал, В.С., *Фотодиод.* Респ. Беларусь. Пат. 7483 U, 2011. Афіцыйны бюлетэнь. Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. № 4. с. 225.
9. Оджаев, В.Б., Петлицкий, А.Н., Просолович, В.С., Шестовский, Д.В., и др., P-i-n-фотодиоды с геттерами, созданными ионной имплантацией основных легирующих примесей. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки*. 2025, №1(44), с.50.
10. Sah, C.T., Noyce, R.N., and Shockley, W., Carrier generation and recombination in p-n junctions and p-n junction characteristics. *Proc. IRE*. 1957, v. 45, № 9, p. 1228.
11. Seebauer, E.G., and Kratzer, M.C., Charged semiconductor defects: structure, thermodynamics and

diffusion. *Springer Science & Business Media*. 2008, 312 p.

12. Shockley, W., The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors. *Bell Syst. Tech. J.* 1949, v.28, № 3, p.435.
13. Грехов, И.В., Сережкин, Ю.Н., *Лавинный пробой p-n-перехода в полупроводниках.* Л.: Энергия. 1980, 152 с.
14. Буслюк, В.В., Нерода, И.Ю., Петлицкий, А.Н., Просолович, В.С., и др., Электрофизические параметры генераторных диодов для создания широкополосного шума. *Журнал Белорус. гос. ун-та. Физика,* 2017, № 1, с. 95.
15. Ковальчук, Н.С., Ластовский, С.Б., Оджаев, В.Б., Петлицкий, А.Н., и др., Влияние структурных дефектов на электрофизические параметры p-i-n-фотодиодов. *Микроэлектроника,* 2023, т.52, № 4, с. 307.
16. Тагиев, Б.Г., Тагиев, О.Б., Джаббаров, Р.Б., Абушов, С.А., и др, Эффект Пула-Френкеля и спектроскопия локальных уровней в полупроводниках. *Институт физики НАН Азербайджана Серия физико-математических и технических наук,* 2003, т.1, № 5, с. 78.
17. Мильвидский, М.Г., Освенский, В.Б., *Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников*. М.: Металлургия, 1984. 256 с.
18. Таланин, В.И., Таланин, И.Е., Применение диффузионной модели образования ростовых микродефектов для описания дефектообразования в термообработанных монокристаллах кремния, *ФТТ,* 2013, т. 55, № 2, с. 247.

Summary

The current-voltage and capacitance-voltage characteristics of *p-i-n* photodiodes containing getters formed by boron ion implantation on the back side of a silicon wafer were studied. Control samples underwent all stages of the device-fabrication process except impurity implantation into the non-planar side of the wafer. Formation of a getter in *p-i-n* photodiodes by B^+ implantation into the back side of the wafer at an energy of 60 keV and doses of 5×10^{15} and 1×10^{16} cm^{-2}, followed by precipitation annealing at T = 850 °C for 30 min and diffusion annealing at T = 1150 °C for 240 min, reduces the reverse dark current by approximately 2.5 times and increases the avalanche-breakdown voltage from 22.5 to 23.5 V. Increasing the diffusion-annealing temperature to 1200 °C during formation of the boron-implantation getter produces a broad pre-breakdown region with a gradually increasing reverse current in the current-voltage characteristic. The capacity of the getter formed under these conditions is insufficient to inactivate technological impurities.

Keywords: *p-i-n* photodiode; generation-recombination processes; gettering; ion implantation; heat treatment