

УДК 621.315.5

## Влияние примеси железа на генерационные токи кремниевых фотодиодов

С.С. Демидов, Е.А. Климанов, Т.Г. Колесникова, А.А. Смирнов

*В работе рассмотрены основные источники металлических примесей, ухудшающих темновые токи кремниевых фотодиодов. С использованием методов спектрального, нейтронно-активационного анализа (НАА) и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) показано, что основным источником примеси переходных элементов, прежде всего железа, является газовая атмосфера реактора, которая загрязняется из аппаратуры для проведения термодиффузионных процессов. Также установлено, что концентрационные профили межузельного железа, полученные методом ЭПР, и термодоноров в кремнии р-типа близки, что свидетельствует об основной роли  $Fe_i^0$  в образовании последних. Применение двухстенных реакторов, операций геттерирования примесей и медленного охлаждения образцов после высокотемпературных операций позволяет существенно снизить темновые токи фотодиодов.*

PACS: 42.79.Ag, 72.20.Jv,

Ключевые слова: примеси металлов, термообработка, кремниевый фотодиод, темновой ток

### Введение

Кремниевые фотодиоды различных типов широко используются в самой различной оптико-электронной аппаратуре [1]. Поэтому в целом ряде работ рассматриваются факторы, влияющие на темновые токи фотодиодов, которые в значительной степени определяют их пороговую чувствительность [2–6]. При этом большое число публикаций посвящено исследованию влияния примесей металлов переходных групп на параметры различных кремниевых приборов, в том числе кремниевых диодов, солнечных элементов и интегральных схем [7–9].

Целью данной работы является выяснение основных источников загрязнений кремниевых образцов примесями металлов во время термодиффузионных процессов и их влияние на генерационные токи кремниевых фотодиодов.

---

Демидов Станислав Стефанович, старший научный сотрудник<sup>1</sup>

Климанов Евгений Алексеевич, главный научный сотрудник<sup>1</sup>, доцент<sup>2</sup>

Колесникова Татьяна Григорьевна, зам. декана<sup>2</sup>

Смирнов Александр Александрович, начальник отдела<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111396, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2

Тел.: (499) 374–81–30. E-mail: orion@orion-ig.ru

<sup>2</sup>МГТУ Московский институт радиоэлектроники и автоматики (МГТУ МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78

Статья поступила в редакцию 30 ноября 2013 г.

© Демидов С.С., Климанов У.А., Колесникова Т.Г., Смирнов А.А., 2014

### Экспериментальные результаты

Для выяснения возможных источников загрязнений проводился полуколичественный спектральный анализ содержания различных элементов в образцах кремния, технологических газах, технологической оснастке (кварцевые реакторы, кассеты) и источниках диффузанта.

Для этого газ в течение, приблизительно, 20 часов пропускался через спектрально-чистый угольный порошок, который затем анализировался. Изменение концентрации примесей в оснастке определялось с помощью сравнения исходных образцов оснастки с использовавшимися при проведении термических процессов.

Проведенный анализ показал отсутствие примесей металлов в газах (азот, аргон, кислород) в пределах чувствительности метода.

Результаты анализа оснастки и источников диффузанта, приведенные в табл. 1, показывают значительное увеличение концентраций Си, Fe и Zn после проведения термических процессов. Следовательно, указанные примеси содержатся в атмосфере реактора и могут проникать в кварцевую оснастку и кремниевые образцы.

Однако чувствительность данного метода недостаточна для определения уровня загрязнения данными примесями кремниевых образцов. Чтобы судить об их уровне загрязнений проводился нейтронно-активационный анализ (НАА) образцов до и после высокотемпературной термообработки (ВТО) в режимах, применяемых при изготовлении фотодиодов. В качестве образцов использовались бездислокационный кремний

(плотность дислокаций  $N_d < 10 \text{ см}^{-2}$ )  $p$ -типа с концентрацией бора  $\leq 10^{12} \text{ см}^{-3}$  (удельное сопротивление  $\rho \geq 10 \text{ кОм}\cdot\text{см}$ ) и кремний  $n$ -типа марки КЭФ-20 ( $\rho \approx 20 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ). Результаты (в порядке убывания концентраций), приведенные в табл. 2

(кроме примесей, концентрация которых была ниже  $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ), показывают наиболее сильное возрастание концентраций следующих элементов (выделены шрифтом): Co, Zn, Ni, Cr, Fe.

Таблица 1.

*Содержание примесей в технологической оснастке до и после термических операций.*

	Содержание примесей (вес.%)							
	Cu	Fe	Zn	Al	Hg	Mn	Cr	Ca
Исходная кварцевая кассета	$10^{-5}$	-	-	$10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	-	-	$10^{-3}$
Кварцевая кассета после проведения нескольких процессов	$10^{-5}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	-	-	$10^{-3}$
Исходный кварцевый реактор	$4 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$	-	$10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	-	-	$10^{-3}$
Кварцевый реактор после проведения процессов	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$	-	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	-	-	$10^{-3}$
Порошок борного ангидрида ( $\text{B}_2\text{O}_3$ )	-	-	-	-	-	-	-	-
Боросиликатное стекло на кварцевой кассете	-	$10^{-3}$	-	$10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	-	-	-
Чувствительность метода	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3}$

Таблица 2

*Концентрации примесей ( $\text{см}^{-3}$ ) в исходных и термообработанных (ВТО) при  $1150^\circ\text{C}$  образцах кремния (Si).*

Тип образца	Концентрация примесей, $\text{см}^{-3}$							
	Na	Rb	Cs	Cl	Cr	Fe	Co	Tb
Si до ВТО	$2 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{13}$	$9 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{12}$
Si после ВТО	$4 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{14}$	$7 \cdot 10^{12}$
	Ni	Cu	Zn	Ag	Hg	La	Nd	
Si до ВТО	$5 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{13}$	
Si после ВТО	$2 \cdot 10^{15}$	$6 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{13}$	$6 \cdot 10^{13}$	

<sup>1</sup>Данные ЭПР предоставлены сотрудником Института полупроводников АН Украины Кустовым В.Е.

Помимо данных о средних концентрациях примесей в образцах, полученных с помощью НАА методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), в них определялась средняя концентрация примеси межузельного железа ( $\text{Fe}_i^0$ ) после различных ВТО. Кроме этого, с помощью измерения концентрации  $\text{Fe}_i^0$  на шайбах, вырезанных из центральной части термообработанных слитков вдоль их оси, определялись концентрационные профили железа после ВТО (чувствительность метода  $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ). На шайбах, вырезанных из слитков  $p$ -типа перпендикулярно их оси, определялись концентрационные профили термодоноров по измерениям удельного сопротивления, а также методом спада фотопроводимости профили генерационно-рекомбинационных центров (ГРЦ), ответственных за изменения времени жизни.

### Обсуждение результатов

Источником загрязнения образцов металлами могут быть как атмосфера реактора, так и при-

месь на поверхности образцов. Для выяснения основного источника примесей были определены профили распределения электрически активных центров  $N_{md}(x)$  (термодоноров в кремнии  $p$ -типа) по диаметру нескольких слитков кремния  $p$ -типа с концентрацией бора  $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , прошедших ВТО в среде кислорода (рис. 1). Приведенные данные получены из результатов измерений удельного сопротивления  $\rho$  по диаметру слитков в предположении, что изменения  $\rho$  в результате ВТО связаны с диффузией железа, образующего донорный уровень  $E_{td} = (E_v + 0,4) \text{ эВ}$  [9], и используя выражение:

$$N_{td} = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_D}{kT}\right) \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1\right), \quad (1)$$

где  $n_i$  — собственная концентрация носителей в кремнии при комнатной температуре,  $(E_i - E_D)$  — разность уровней середины запрещенной зоны и термодоноров,  $\rho_0$ ,  $\rho$  и  $\rho_m$  — удельное сопротивление исходное, после ВТО и максимальное в кремнии ( $205 \text{ кОм}\cdot\text{см}$ ), соответственно.

Концентрационные профили ГРЦ  $E_t(x)$  определялись по изменениям времени жизни по диаметру тех же образцов, используя соотношение для центров донорного типа ( $\sigma_n > \sigma_p$ ) при  $E_t = (E_v + 0,4) \text{ эВ}$  и  $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ :

$$E_t = \frac{1}{\sigma_n v_n \tau} [1 + \exp(\frac{E_f - E_t}{kT})], \quad (2)$$

где  $\sigma_n$ ,  $v_n$  — сечение захвата и тепловая скорость электронов,  $(E_f - E_t)$  — разность уровней Ферми и ГРЦ.

Проведенное сравнение  $N_{td}(x)$  и  $E_t(x)$  при  $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$  выявило близость указанных концентрационных профилей, что свидетельствует об одинаковой природе ТД и ГРЦ.

Анализ показывает, что кривая распределения  $N_{md}$  после ВТО при  $1150^\circ\text{C}$  в кислороде (рис. 1) наилучшим образом описывается решением уравнения диффузии для постоянного потока частиц на поверхности образцов  $F$  [10]:

$$N(x, t) = 2 \frac{F}{D} \left[ \left( \frac{Dt}{\pi} \right)^{1/2} \exp\left( \frac{-x^2}{4Dt} \right)^{1/2} - \frac{x}{2\Phi^* \left( \frac{x}{\sqrt{Dt}} \right)} \right], \quad (3)$$

где  $\Phi^*$  — интеграл ошибок, при потоке частиц  $F \sim 10^{10}$  атомов/с.см<sup>2</sup> и коэффициенте диффузии частиц  $D \sim 5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$  при  $1150^\circ\text{C}$ .

Данный результат свидетельствует о загрязнении образцов прежде всего из атмосферы реактора, что находится в согласии с результатами работ [11, 12]. Свидетельством в пользу данного утверждения являются также данные электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), указывающие на диффузионный профиль распределения межузельных атомов железа  $Fe_i^0$  в образцах кремния после ВТО. Так, на рис. 2 показаны распределения атомов железа в слитках кремния, подвергнутых термообработкам в различных режимах, полученные методом ЭПР. Приведенные графики распределения железа  $Fe_i^0$  по глубине образцов указывают на проникновение данной примеси

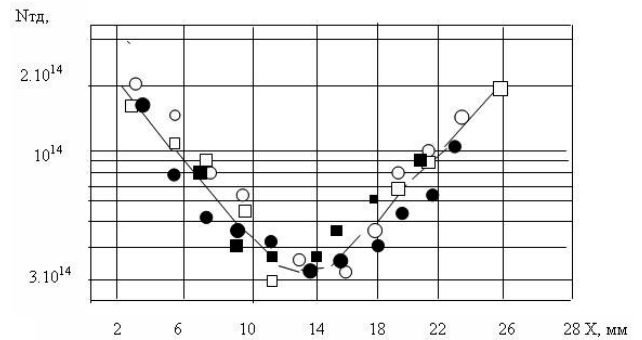


Рис. 1. Распределение термодоноров в p-Si после ВТО в кислороде при  $1150^\circ\text{C}$  в течение 15 минут.

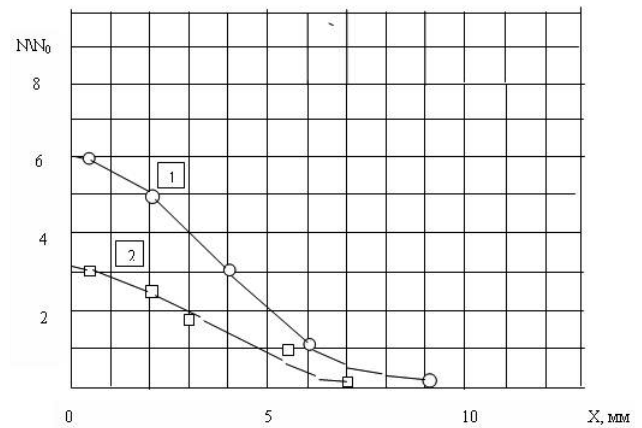


Рис. 2. Профили распределения межузельного железа  $Fe_i^0$  в кремнии после ВТО в течение различного времени: 1 — ВТО при  $1150^\circ\text{C}$  в атмосфере азота, 180 мин. 2 — ВТО при  $1150^\circ\text{C}$  в атмосфере кислорода, 150 мин.

на расстояния, значительно превышающие толщины образцов, используемых для изготовления фотодиодов.

Полученные результаты также свидетельствуют о влиянии вида ВТО на концентрацию  $Fe_i^0$  в образцах, что подтверждается данными ЭПР по влиянию термической обработки кремниевых пластин в различных газовых средах (азот, кислород, кислород с добавкой хлора) на содержание в них атомов железа (см. табл. 3).

Таблица 3

№ образца	Температура ТО, °C	Время ВТО, мин.	Газовая среда	Концентрация железа, см <sup>-3</sup>
1.	1150	120	азот	$1,8 \cdot 10^{14}$
2.	1150	120	азот	$1,6 \cdot 10^{14}$
3.	1150	120	кислород	$2,6 \cdot 10^{14}$
4.	1150	120	кислород	$2,0 \cdot 10^{14}$
5.	1150	120	кислород+хлор	$1,0 \cdot 10^{13}$
6.	1150	120	кислород+хлор	$3,0 \cdot 10^{13}$
7.	1150+1000	40	кислород+диффузия фосфора	$2,6 \cdot 10^{13}$
8.	1150+1050	40	кислород+диффузия фосфора	$3,0 \cdot 10^{13}$

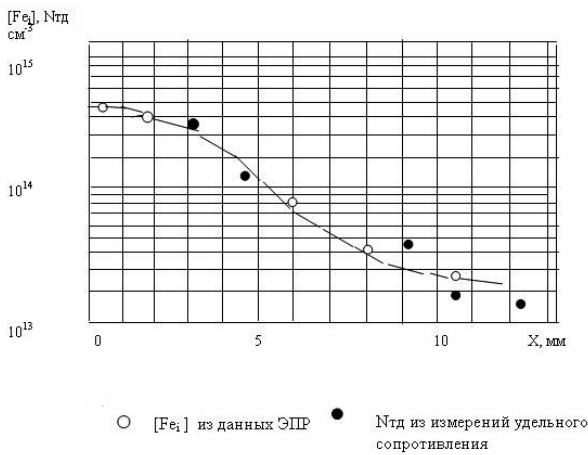


Рис. 3. Сравнение распределений концентраций  $Fe^0$  и термодоноров, полученных из данных ЭПР и измерений удельного сопротивления соответственно.

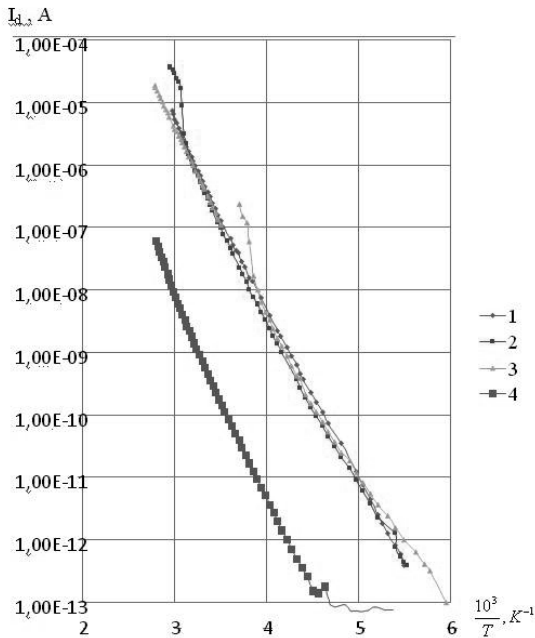


Рис. 4. Температурные зависимости темновых токов кремниевых фотодиодов (ФД). 1, 2, 3 —  $p-i-n$  ФД из различных партий (площадь  $160 \text{ мм}^2$ , кремний  $p$ -типа с уд. сопротивлением  $10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ), 4 —  $p^+-n$  ФД (площадь  $4 \text{ мм}^2$ , кремний  $n$  — типа с уд. сопротивлением  $20 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ )

Из приведенных данных видно, что концентрация железа в зависимости от газовой среды убывает в следующем ряду: кислород > азот > аргон > кислород + хлор. При этом концентрация  $Fe_1^0$  несколько возрастает (в 1,5–2,0 раза) при увеличении скорости охлаждения с 4 К/с до 200 К/с, что также совпадает с зависимостью  $N_{\text{тд}}$  от скорости охлаждения после ВТО.

Влияние добавки хлора на снижение концентрации атомов металлов на границе раздела кремний—диоксид кремния за счет образования летучих соединений хорошо известно [14, 15]. Отсюда можно заключить, что аналогичный механизм справедлив и для примеси железа. Рез-

кое снижение концентрации железа наблюдается и при использовании метода геттерирования примесей с помощью сильнолегированного слоя фосфора [16] (образцы 7, 8).

Сравнение профилей распределения термодоноров (ТД) и межузельного железа  $Fe_1^0$  (рис. 3) подтверждает вывод об основной роли последнего в образовании ТД [17, 18], влияние которых на темновой ток  $I_d$  кремниевых  $p-i-n$ -фотодиодов (ФД) установлено в работе [19] и связано с их высокой активностью как генерационно-рекомбинационных центров (ГРЦ) [7–9].

Важно отметить, что данный вывод справедлив для ФД, изготовленных из кремния различных марок и типа проводимости, что подтверждается близкими значениями энергии активации ( $\Delta E \sim 0,6-0,65$  эВ) температурных зависимостей темновых токов (рис. 4) для ФД, изготовленных из кремния  $p$ -типа с удельным сопротивлением  $10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , полученного методом зонной плавки (FZ—Si), и кремния  $n$ -типа с удельным сопротивлением  $20 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , полученного методом Чохральского (Cz—Si).

Приведенные значения энергии активации  $\Delta E$  при положении уровня  $E_t$  в нижней половине запрещенной зоны соответствуют энергетическому зазору между краем зоны проводимости и уровнем  $E_t$  в соответствии с соотношением, получаемым из известного выражения для генерационного тока в теории Са-Нойс-Шокли:

$$I_d = q(\sigma_n v_n N_t) \sqrt{N_c N_v} \exp\left[-\left(\frac{E_c - E_t}{kT}\right)\right]. \quad (4)$$

Таким образом, положение уровня ГРЦ, ответственных за темновой ток, согласуется с положением уровня термодоноров  $E_{\text{тд}} = (E_v + 0,4)$  эВ, так как сумма их энергий активации близка к ширине запрещенной зоны кремния.

Из полученных результатов следует, что основным источником примесей переходных элементов в образцах, прежде всего, железа является газовая атмосфера реактора, которая загрязняется из аппаратуры для проведения термодиффузионных процессов, о чем свидетельствует загрязнение не только образцов, но и оснастки (реактор, касеты). Наиболее вероятным источником примесей является спираль нагревателя диффузионной печи, на что указывает состав примесей (Co, Zn, Ni, Cr, Fe). Поэтому для снижения уровня загрязнений в образцах при проведении высокотемпературных процессов целесообразно применение двухстенных кварцевых реакторов [20] и хлорсодержащей атмосферы для защиты от диффузии железа и других переходных элементов, операций геттерирования для снижения концентрации примесей, проникших в образцы (табл. 3) и медлен-

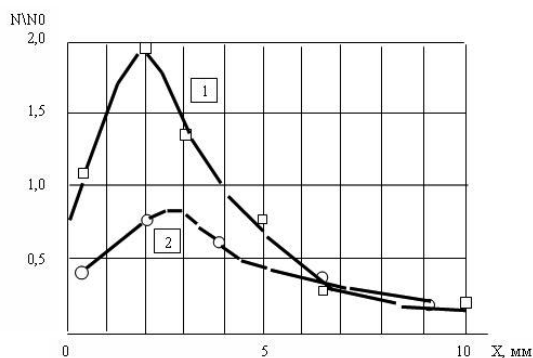


Рис. 5. Распределения  $Fe^0$  по оси слитков, прошедших следующие термообработки: 1 — ВТО при  $1150^{\circ}C$  в атмосфере кислорода с добавкой хлора, 2 — ВТО при  $1150^{\circ}C$  в атмосфере кислорода с последующим геттерированием  $n+$ -слоем фосфора.  $N_0 = 1.10^{14} \text{ см}^{-3}$

ного охлаждения образцов после ВТО для перевода примесей в менее активное состояние в составе примесных преципитатов [21].

Данный вывод иллюстрируется рис. 5, где показаны распределения атомов железа  $Fe^0$  в слитках, прошедших ВТО с использованием хлорсодержащей атмосферы и геттерирования диффузионным слоем фосфора, демонстрирующие снижение концентрации  $Fe^0$  в приповерхностных областях.

На рис. 6 показаны распределения темновых токов кремниевых  $p-i-n$ -фотодиодов, содержащих различные концентрации примеси железа в области пространственного заряда образцов ( $i$ -область). Снижение концентрации примеси достигалось применением операции геттерирования сильнолегированным слоем фосфора.

### Заключение

Полученные с использованием методов спектрального, нейтронно-активационного анализа и электронного парамагнитного резонанса результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Основным источником примеси переходных элементов, прежде всего, железа, диффундирующих в кремний при ВТО, является газовая атмосфера реактора, которая загрязняется из аппаратуры для проведения термодиффузионных процессов.

2. Межузельные атомы железа  $Fe^0$  образуют ГРЦ в кремнии, приводящие к увеличению генерационного и, соответственно, темнового тока в ФД, изготовленных из кремния различных марок, и снижению выхода годных фотодиодов.

3. Использование в технологическом цикле операций геттерирования с помощью диффузионного слоя фосфора, хлорсодержащей газовой атмосферы в сочетании с медленным охлаждением образцов, а также применение двухстенных кварцевых реакторов приводит к значительному

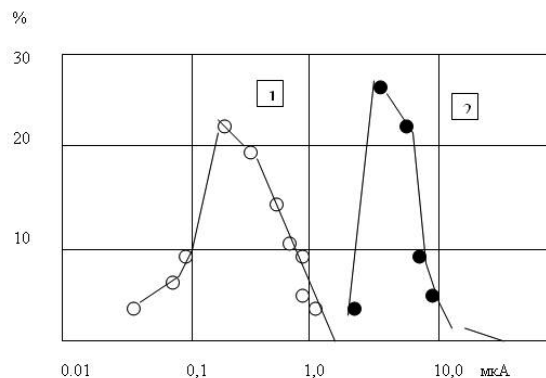


Рис. 6. Распределение темновых токов фотодиодов, содержащих различные концентрации переходных металлов. 1- геттерирование, 2- без геттерирования.

снижению концентрации железа и увеличению выхода годных фотодиодов.

### Литература

1. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. — М.: Физматкнига. 2005.
2. Климанов Е.А., Кульманов А.В., Лисейкин В.П., Юнгерман В.М. // Радиотехника и электроника. 1976. Т. XXI. № 9. С. 1967
3. Добровольский Ю.Г., Ащеулов А.А. // Технология и конструирование электронной аппаратуры. 2011. № 3. С. 278.
4. Астахов В.П., Гиндин Д.А., Карпов В.В., Сорокин К.В. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 79
5. Астахов В.П., Лихачев Г.М. // Прикладная физика. 2012. № 4. С. 83.
6. Астахов В.П. и др. // Прикладная физика. 2003. № 5. С. 106.
7. Istratov A.A., Hieslmair H., Weber E.R. // Applied Physics A. 2000. V. 70. No. 5. P. 489
8. Macdonald D., Geerlings L.J. // Applied Physics Letters. 2004. V. 85. No.18. P. 4061
9. Istratov A.A., Hieslmair H., Weber E.R. // Applied Physics A. 1999. V. 69. P. 13
10. Карлслю Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. — М.: «Наука». 1964.
11. Shmidt P.F. and Pearce C.W. // Journal of Electrochemical Society. 1981. No. 3. P. 630
12. Shmidt P.F. // Solid State Technology. 1983. No. 6. P. 147.
14. Rosen R.S. and Robinson P.H. // Journal of Electrochemical society. 1972. V. 119. No. 6.
15. Золотарев В.И., Кандыба П.Е., Пережогин Г.А. // Электронная техника. Сер. 3. 1976. Вып.1. С. 68
16. Seidel T.E., Meek R.L., Cullis A.G. // J. Applied Physics. 1975. V. 46. No.2. P. 600
17. Weber E., Riotte H.G. // J. Applied Physics. 1978. V. 33. No. 5. P. 433
18. Воронков В.В., Воронкова Г.И., Головина В.Н., и др. // ФТП. 1982. Т. 16. № 5. С. 892.

19. Берман Л.С., Власов С.И., Климанов Е.А., Фа-  
мицкий В.И. // ФТП. 1980. Т. 14. № 2. С. 396.

20. Климанов Е.А., Кulyманов А.В., Лисейкин В.П.  
Влияние термообработок на электрофизические свой-  
ства осочистого кремния р-типа с удельным сопро-

тивлением более 10 кОм.см. В сб. ВИМИ «Военная  
техника и экономика». Сер. Общетеchnическая. 1977.  
№ 7.

21. Buonassisi T., Heuer M., Istratov A.A., et al., // Acta  
Materialia. 2007. V. 55. P. 6119

## Influence of iron impurities on generation currents of the silicon photodiodes

S. S. Demidov<sup>1</sup>, E. A. Klimanov<sup>1,2</sup>, T. G. Kolesnilova<sup>2</sup>, and A. A. Smirnov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Orion R&P Association

46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>Moscow Institute of Radio Electronics and Automatics (MIREA)

78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

Received November 30, 2013

***This article presents data about sources metal impurities, which is a reason large dark current in silicon photodiodes. In order to establish the transition metal impurities source neutron activation analysis (NAA) and electron paramagnetic resonance EPR were carried out in present study. It is established, that diffusion furnace heater is the source transition metal impurities, especially iron, in reactor gas ambient and consequently silicon samples after heat treatment. It is demonstrated, that concentrations profiles iron and thermodonors in p-silicon are similar. Impurities gettering, chlorine contain ambient and slow cooling samples after heat treatment are the tool for reduction photodiodes dark current***

PACS: 42.79.Ag, 72.20.Jv,

Keywords: metal impurities, thermal treatment, silicon photodiode, dark current.

### References

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Physical Base*. (Fizmatkniga, Moscow, 2005) [in Russian].

2. E. A. Klimanov, A. V. Kulymanov, et al., *J. Commun. Technol. Electron.* **21**, 1967 (1976).

3. Yu. G. Dobrovolskii and A. A. Ashcheulov, *Technol. Konstr. Elektron. Appar.*, No. 3, 278 (2011).

4. V. P. Astakhov, D. A. Gendin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 79 (1999).

5. V. P. Astakhov and G. M. Likhachev, *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 83 (2012).

6. V. P. Astakhov et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 106 (2003).

7. A. A. Istratov, H. Hieslmair and E. R. Weber, *Applied Physics A*, **70**, 489 (2000).

8. D. Macdonald and L. J. Geerlings, *Applied Physics Letters*, **85**, 4061 (2004).

9. A.A. Istratov, H.Hieslmair, and E.R.Weber, *Applied Physics A*, **69**, 13 (1999).

10. H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids* (Oxford, Clarendon Press, 1962; Nauka, Moscow, 1964).

11. P. F. Shmidt and C. W. Pearce, *Journal of Electrochemical Society*, No. 3, 630 (1981).

12. P. F. Shmidt, *Solid State Technology*, No. 6, 147 (1983).

14. R. S. Rosen and P. H. Robinson, *Journal of Electrochemical Society* **119**, No. 6, 45 (1972).

15. V. I. Zolotarev, P. E. Kandyba, and G. A. Perezhogin, *Elektron. Tekhn. Ser. 3*, No. 1, 68 (1976).

16. T. E. Seidel, R. L. Meek, and A. G. Cullis, *J. Appl. Phys.* **46**, 600 (1975).

17. E. Weber, and H. G. Riotte, *J. Appl. Phys.* **49**, 433 (1978).

18. V. V. Voronkov, G. I. Voronkova, V. N. Golovina, et al., *Semiconductors* **16**, 892 (1982).

19. L. S. Berman, S. I. Vlasov, E. A. Klimanov, et al., *Semiconductors* **14**, 396 (1980).

20. E. A. Klimanov, A. V. Kulymanov, et al., in *Collected Articles «Defense technology and Economics»*. Ser. Basic Engineering, No. 7 (VIMI, Moscow, 1977).

21. T. Buonassisi, M. Heuer, A. A. Istratov, et al., *Acta Materialia* **55**, 6119 (2007).