

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ P-I-N-ФОТОДИОДОВ С ГЕТТЕРОМ, СОЗДАННЫМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ БОРА

В.Б. Оджаев¹⁾, А.Н. Петлицкий²⁾, В.С. Просолович¹⁾,
Д.В. Шестовский²⁾, В.Ю. Явид¹⁾, Ю.Н. Янковский¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь,

odzaev@bsu.by, prosolovich@bsu.by, Yavid@bsu.by, yankouski@bsu.by

²⁾ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца 121А, Минск 220108, Беларусь, APetlitsky@integral.by, DShestovski@integral.by

Исследованы вольт-амперные характеристики *p-i-n*-фотодиодов, содержащих геттер, сформированный имплантацией ионов бора на обратной стороне кремниевой пластины. Параллельно исследовались контрольные образцы, прошедшие все этапы технологического процесса изготовления приборов за исключением ионной имплантации бора для создания геттера. Показано, что формирование геттера посредством имплантации B^+ в обратную сторону пластины с энергией 60 кэВ и дозой $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ с последующими преципитирующим отжигом при 850 °С, 30 мин. и диффузионным отжигом при 1150 °С, 240 мин позволяет увеличить напряжение лавинного пробоя *p-i-n*-фотодиодов и снизить величину обратного темнового тока в ~ 3 раза. Это обусловлено геттерированием технологических примесей, создающих глубокие генерационно-рекомбинационные центры и определяющие величину обратного темнового тока *p-i-n*-фотодиодов. Повышение температуры диффузионного отжига до 1200 °С приводит как в исследуемых, так и контрольных образцах к формированию широкой предпробойной области с плавно нарастающей величиной обратного тока вследствие распада микродефектов, сопровождающимся освобождением технологических примесей О и С. Емкости сформированного таким образом геттера недостаточно для их инактивации.

Ключевые слова: *p-i-n*-фотодиод; генерационно-рекомбинационные процессы; геттерирующий примеси; ионная имплантация; термообработка.

ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF PIN PHOTODIODES WITH A GETTER CREATED BY ION IMPLANTATION OF BORON

V.B. Odzaev¹⁾, A.N. Pyatlitskiy²⁾, V.S. Prosolovich¹⁾,
D.V. Shestovsky³⁾, V.Yu. Yavid²⁾, Y.N. Yankovsky²⁾

¹⁾Belarusian State University, 4 Nezavisimosty Ave., 220030 Minsk, Belarus,
odzaev@bsu.by, prosolovich@bsu.by, Yavid@bsu.by, yankouski@bsu.by

²⁾JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company,
121A Kazintsa Str., 220108 Minsk, Belarus, APetlitsky@integral.by, DShestovski@integral.by

The volt-ampere characteristics of *p-i-n* photodiodes with containing a getter formed by implantation of boron ions on the reverse side of the plate are studied. *P-i-n* photodiodes were manufactured on silicon wafers of *p*-type conductivity orientation (100) with a resistivity of 1000 ohms · cm, grown by the method of sigel-free zone melting. The getter was formed by ion implantation of B^+ with an energy of 60 keV into the nonplanar side of the plates. Boron was implanted in doses $5 \cdot 10^{15}$ – $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, precipitation heat treatment was carried out at 850 °C, 30 minutes, diffusion distillation – at 1150 °C or 1200 °C for 240 minutes. In parallel, control samples were studied that had passed all stages of the technological process of manufacturing devices, with the exception of ion implantation of boron to create a getter. It is shown that the formation of a getter by implantation of B^+ in the reverse side of the plate at a dose of $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ followed by precipitating annealing at 850 °C. With diffusion annealing at 1150 °C, it allows to increase the avalanche breakdown voltage of *p-i-n* photodiodes and reduce the value of the reverse dark current by ~ 3 times. This is due to the gettering of technological impurities that create deep generation-recombination centers that determine the magnitude of the reverse current of the *p-i-n* photodiodes. An increase in the temperature of diffusion annealing to 1200 °C leads, both in the studied and control samples, to the formation of a wide pre-trial area with a smoothly increasing reverse current due to the decomposition of microdefects, accompanied by the release of technological impurities O and C. The capacity of the getter formed in this way is insufficient for their inactivation.

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

Введение

P-i-n-фотодиоды, изготовленные на основе кремния, выращенного по методу бестигельной зонной плавки, активно применяются в аппаратуре космического назначения в качестве навигационных и сенсорных детекторов, в системах определения расстояния с помощью светового луча (LIDAR) [1]. Эффективность их работы в значительной степени определяется величиной темнового тока при обратном смещении ($I_{обр}$), который зависит, в первую очередь от времени жизни неосновных носителей заряда [2]. Для повышения времени жизни носителей заряда применяются различные методы геттерирования технологических примесей, позволяющие создать в рабочей области кремниевой подложки чистую зону. Целью работы являлось исследование воздействия геттерирующих центров, созданных ионной имплантацией (ИИ) B^+ , на электрофизические параметры *p-i-n*-фотодиодов.

Результаты и их обсуждение

P-i-n-фотодиоды изготавливались на пластинах Si *p*-типа проводимости ориентации (100) $\rho=1000$ Ом·см, выращенного методом бестигельной зонной плавки (БЗП). Области *p*⁺-типа анода (изотипный переход) и *n*⁺-типа катода создавалась ИИ B^+ и P^+ , соответственно, в планарную сторону пластины. Формирование геттера производилось посредством ИИ B^+ с энергией (E) 60 кэВ в непланарную сторону пластины с последующими преципитирующим и диффузионным отжигами в атмосфере азота в индукционной печи. Бор имплантировался дозами (D) $5 \cdot 10^{15}$ – $1 \cdot 10^{16}$ см⁻², преципитирующая термообработка (ТО) осуществлялась при 850 °C $t=30$ мин., диффузионная разгонка – при 1150 °C или 1200 °C, $t=240$ минут.

Параллельно исследовались контрольные образцы приборов, подвергавшиеся тем же технологическим операциям за исключением ИИ примесей в непланарную

сторону пластины для формирования геттера. Регистрация вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводилась на измерителе параметров полупроводниковых приборов *Agilent B1500A* с зондовой станцией *Cascade Summit 11000B-AP*. Темновые ВАХ *p-i-n*-фотодиодов осуществлялись в диапазоне обратных смещений 0–30 В с шагом 0.25 В и темпом 0.3 мс/В при 20 °C.

Как видно из рис. 1 при ИИ B^+ $D=5 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16}$ см⁻² при диффузионном отжиге 1150 °C ВАХ *p-i-n*-фотодиодов имеют стандартный вид.

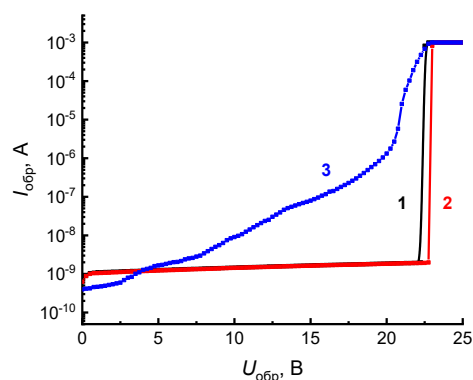


Рис. 1. ВАХ *p-i-n*-фотодиодов с геттером, созданным ИИ B^+ $E=60$ кэВ, преципитирующий отжиг 850 °C, 30 мин. Дозы ИИ, см⁻²: 1– $5 \cdot 10^{15}$, 2, 3– $1 \cdot 10^{16}$. Диффузионный отжиг, °C: 1, 2 – 1150, 3 – 1200

Величина $I_{обр}$ составляет $\sim 10^{-9}$ А. При этом применение дозы ИИ бора $1 \cdot 10^{16}$ см⁻² позволяет повысить напряжение лавинного пробоя ($U_{пр}$), обусловленного ударной ионизацией, до 23 В по сравнению с $D=5 \cdot 10^{15}$ см⁻² (21.5 В). Следует отметить, что формирование геттерирующих центров ИИ B^+ в тыльную сторону пластины позволяет также незначительно повысить $U_{пр}$ (от 22.5 до 23.0 В) и снизить $I_{обр}$ от $3 \cdot 10^{-9}$ А до $1 \cdot 10^{-9}$ А по сравнению с контрольными образцами (рис. 2). Это свидетельствует о том, что формирование геттера на обратной стороне снижает концентрацию генерационно-активных примесно-дефектных центров в объеме пластин Si. Однако повышение температуры диффузионной ТО до 1200 °C для дозы ИИ B^+ $1 \cdot 10^{16}$ см⁻² приводит к существен-

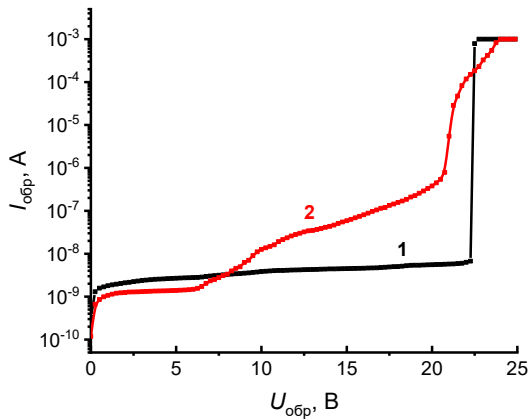


Рис. 2. ВАХ контрольных образцов $p-i-n$ -фотодиодов. Имитация диффузионного отжига, °C: 1 –1150, 2 –1200

ному изменению ВАХ и $U_{пр}$ снижается до 20.5 В, пробой становится достаточно плавным, и появляется предпробойный участок от примерно 5 В, сопровождающийся существенным увеличением $I_{обр}$ от $1 \cdot 10^{-9}$ до $3 \cdot 10^{-6}$ А. Следует отметить, что практически аналогичная закономерность наблюдается и для контрольных образцов (рис. 2): после проведения ТО при 1200 °C, имитирующей диффузионную разгонку, $U_{пр}$ снижается от 22.5 до 21.0 В, и появляется предпробойный участок от ~ 7 В, где ток плавно увеличивается от $3 \cdot 10^{-9}$ до $6 \cdot 10^{-7}$ А. Это свидетельствует о существенном вкладе в величину $I_{обр}$ генерационных процессов, связанных с глубокими энергетическими уровнями в области обеднения. Этот эффект может быть обусловлен рядом причин. Во-первых, при увеличении ТО увеличиваются коэффициенты диффузии технологических примесей (Fe, Cu, Au и др.), создающих глубокие генерационно-рекомбинационные уровни в запрещенной зоне. Это приводит к существенному снижению времени жизни неосновных носителей заряда и, как следствие, увеличению $I_{обр}$ $p-i-n$ -фотодиодов. Во-вторых, при выращивании Si по методу БЗП формируются скопления микродефектов, в состав которых входят технологические примеси O и C [3]. ТО при 1200 °C как в образцах с геттером, так и в контрольных, вероятно, происходит трансформация микродефектов с

выделением из них примесных атомов кислорода и углерода, которые формируют генерационно-активные центры, приводящие к снижению $U_{пр}$ и возрастанию $I_{обр}$ в предпробойной области. Емкости геттера, после ИИ бора $D=1 \cdot 10^{16}$ см⁻² явно недостаточно для пассивации указанных выше процессов. Следует отметить, что при диффузионной ТО при 1150 °C трансформации микродефектов с выделением примесных атомов не происходит, и емкости сформированного геттера достаточно для нейтрализации технологических примесей, попавших в кристаллы при изготовлении приборов.

Заключение

Показано, что формирование геттера посредством ИИ В⁺ в обратную сторону пластины ($E=60$ кэВ, $D=1 \cdot 10^{16}$ см⁻²) с последующими преципитирующей ТО при 850 °C, 30 мин и диффузионной ТО 1150 °C, 240 мин позволяет увеличить $U_{пр}$ $p-i-n$ -фотодиодов и снизить величину $I_{обр}$ в ~ 3 раза. Это обусловлено пассивацией технологических примесей, создающих глубокие генерационно-рекомбинационные центры. Повышение температуры диффузионного отжига до 1200 °C приводит к формированию широкой предпробойной области с плавно нарастающей величиной обратного тока вследствие распада микродефектов, сопровождающимся освобождением технологических примесей O и C, Емкости сформированного таким образом геттера недостаточно для их инактивации.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ, договор № Ф25УЗБ-067 от 05.03.2025.

Библиографические ссылки

1. De Carlo P.M., Roberto L., Marano G., L'Abbate M., Oricchio D., Venditti P. Intersatellite link for earth observation satellites constellation. *SPACEOPS, Roma, Italy*. 2006:19-23.
2. Sze S.M., Lee M.K. Semiconductor Devices: Physics and Technology. Pub. 3. *John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited* 2012. 582 p.
3. Мильвидский М.Г., Освенский В.Б. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников. М.: Металлургия; 1984. 256 с.