

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ БАРЬЕРНОЙ ЁМКОСТИ p-i-n-ФОТОДИОДОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ $\gamma$ -КВАНТАМИ $^{60}\text{Co}$

С.Б. Ластовский<sup>1)</sup>, В.Б. Оджаев<sup>2)</sup>, А.Н. Петлицкий<sup>3)</sup>, В.С. Просолович<sup>2)</sup>, Е.В. Точилин<sup>1)</sup>,  
Д.В. Шестовский<sup>3)</sup>, В.Ю. Явид<sup>2)</sup>, Ю.Н. Янковский<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,  
ул. П. Бровки 19, Минск 220072, Беларусь, lastov@ifftp.bas-net.by

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, Минск 220030,  
Беларусь, odzaev@bsu.by, prosolovich@bsu.by, Yavid@bsu.by, yankouski@bsu.by

<sup>3)</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», ул. Казинца 121А,  
Минск 220108, Беларусь, petan@tut.by, DShestovski@integral.by

Исследовано влияние  $\gamma$ -излучения  $^{60}\text{Co}$  на изменение барьерной ёмкости ( $C_b$ ) p-i-n-фотодиодов на основе кремния. Приборы изготавливались на пластинах p-Si ориентации (100) с  $\rho = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , выращенных методом бестигельной зонной плавки. Область p<sup>+</sup>-типа создавалась имплантацией ионов В<sup>+</sup> в непланарную сторону пластины, области n<sup>+</sup>-типа – диффузией Р в планарную сторону пластины. Облучение  $\gamma$ -квантами производилось от источника  $^{60}\text{Co}$  дозами до  $1,5 \cdot 10^{15}$  квант/см<sup>2</sup>. Установлено, что в результате воздействия облучения  $\gamma$ -квантами при напряжении внешнего смещения  $V_{обр} \leq 1$  В происходит увеличение  $C_b$  по сравнению с необлученными образцами. В то же время при  $V_{обр}$  в диапазоне от 1 В до 20 В величина  $C_b$  после облучения снизилась по сравнению с исходной. Это обусловлено изменением в результате облучения размеров области обеднения: при напряжениях смещения менее 1 В она уменьшилась, а при  $V_{обр}$  свыше 1 В – возросла. Наблюдаемый эффект связан с изменением величины контактной разности потенциалов.

**Ключевые слова:** p-i-n-фотодиод; барьерная ёмкость; облучение  $\gamma$ -квантами; генерационно-рекомбинационные процессы.

## PECULIARITIES OF CHANGING THE BARRIER CAPACITY OF p-i-n-PHOTODIODES UNDER IRRADIATION WITH $^{60}\text{Co}$ $\gamma$ -QUANTA

S.B. Lastovskii<sup>1)</sup>, V.B. Odzaev<sup>2)</sup>, A.N. Pyatlitski<sup>3)</sup>, V.S. Prosolovich<sup>2)</sup>, E.V. Tochilin<sup>1)</sup>,  
D.V. Shestovsky<sup>3)</sup>, V.Yu. Yavid<sup>2)</sup>, Y.N. Yankovsky<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Scientific-Practical Materials Research Centre, National Academy of Sciences of Belarus,  
19 P. Brovki Str., 220072 Minsk, Belarus, lastov@ifftp.bas-net.by;

<sup>2)</sup>Belarusian State University,

4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus,

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

<sup>3)</sup>JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company,

121A Kazintsa Str., 220108 Minsk, Belarus, petan@tut.by, DShestovski@integral.by

The effect of gamma-radiation  $^{60}\text{Co}$  on the change in the barrier capacity ( $C_b$ ) of p-i-n photodiodes based on Si is investigated. The devices were manufactured on plates of p-Si orientation (100) with  $\rho = 1000 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$ , grown by the method of non-melting zone melting. The p<sup>+</sup>-type region was created by implantation of В<sup>+</sup> ions into the non-planar side of the plate, the n<sup>+</sup>-type region was created by diffusion of P into the planar side of the plate.  $\gamma$ -quanta irradiation was carried out from a  $^{60}\text{Co}$  source in doses up to  $1.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . A noticeable temperature dependence of the barrier capacitance (at a frequency of 1 kHz) is observed only at bias voltages not exceeding the contact potential difference ( $V_{bi} \leq 1 \text{ V}$ ). It has been established that as a result of exposure to gamma-quanta at an external bias voltage  $V_R \leq 1 \text{ V}$ , the barrier capacity increases compared to non-irradiated samples. At the same time, at  $V_R$  in the range from 1 V to 20 V, the value of the barrier capacity after irradiation decreased compared to the initial one. This is due to the change in the size of the depletion region as a result of irradiation: at bias voltages of less than 1 V, it decreased, and at  $V_R$  of more than 1 V, it increased. The observed effect is associated with a change in the magnitude of the contact potential difference due to the compensation of the main dopant in the base of the diode due to the generation of radiation defects.

**Keywords:** p-i-n-photodiode; barrier capacity; gamma-ray irradiation; generation-recombination processes.

## Введение

Использование  $p-i-n$ -фотодиодов в космическом пространстве в оптических межспутниковых каналах связи обуславливает воздействие на них различных видов высокоэнергетических частиц, присутствующих в солнечной радиации. Ранее было показано [1], что воздействие  $\gamma$ -излучения на  $p-i-n$ -фотодиоды приводит к росту величины обратного тока и наклона его вольт-амперной характеристики. Однако, окончательно не выяснен вопрос влияния технологических (фоновых) примесей на электрофизические параметры  $p-i-n$ -фотодиода при воздействии на них  $\gamma$ -квантов. В работе исследовано влияние  $\gamma$ -излучения на изменение барьерной ёмкости ( $C_b$ )  $p-i-n$ -фотодиодов на основе кремния.

## Основная часть

Приборы изготавливались на пластинах  $p$ -Si ориентации (100) с  $\rho = 1000$  Ом·см, выращенных методом бестигельной зонной плавки. Область  $p^+$ -типа создавалась имплантацией ионов  $B^+$  во всю поверхность непланарной стороны пластины, области катода  $n^+$ -типа – диффузией Р из газовой фазы в планарную сторону пластины. Измерения вольт-фарядных характеристик производились на измерителе параметров полупроводниковых приборов *Agilent B1500A* с зондовой станцией *Cascade Summit 11000B-AP* в диапазоне температур  $-30...70$  °С с шагом 10 °С. Облучение  $\gamma$ -квантами производилось от источника  $^{60}\text{Co}$  дозами до  $1.5 \cdot 10^{15}$  квант/см<sup>2</sup>.

Установлено, что барьерная ёмкость приборов, измеренная до проведения облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ , уменьшается с увеличением обратного напряжения ( $V_{обр}$ ), её зависимость от приложенного обратного смещения имеет вид  $1/C^2 \sim V_{обр}$ , характерный для резкого асимметричного  $p-n$ -перехода [2]. Исследования показали, что заметная температурная зависимость  $C_b$  (на частоте  $f = 1$  кГц) наблюдается только при напряжениях смещения, не превышающих контактную разность потенциалов

( $V_{bi} \leq 1$  В). При напряжениях смещения  $V_{обр} \leq V_{bi}$  зависимость от толщины обедненного слоя ( $W$ ) от температуры определяется температурной зависимостью контактной разности потенциалов ( $V_{bi}$ ). Проведенное согласно [4] моделирование показало, что при увеличении температуры  $V_{bi}$  и  $W$  уменьшаются, а барьерная ёмкость увеличивается. Это обусловлено изменением степени заполнения глубоких уровней в области обеднения при изменении температуры. При этом выполняется соотношение  $1/C^2 \sim W^2 \sim V_{bi}$  (рис. 1).

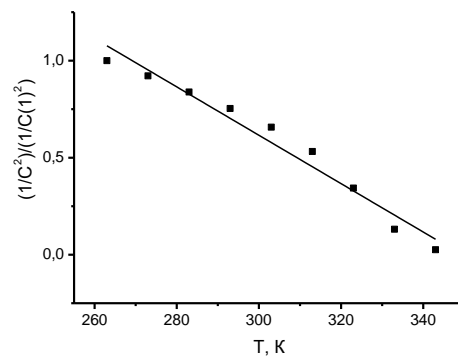


Рис. 1. Температурная зависимость относительной величины обратного квадрата барьерной ёмкости  $p-i-n$ -фотодиода. Сплошная линия – расчет

Зависимость  $C_b$  от  $V_{обр}$   $p-i-n$ -фотодиодов после облучения не изменила свой характер. Однако, как видно из представленного на рис. 2 относительного изменения барьерной ёмкости, в результате воздействия облучения  $\gamma$ -квантами при напряжении внешнего смещения  $V_{обр} \leq 1$  В происходит увеличение  $C_b$  по сравнению с необлученными образцами. В то же время при  $V_{обр}$  в диапазоне от 1 В до 20 В величина  $C_b$  после облучения снизилась по сравнению с исходной. Поскольку размеры области пространственного заряда  $p-n$ -перехода обратно пропорциональны его барьерной ёмкости ( $W \sim 1/C_b$ ) [2], то, как видно из рис. 3, область обеднения в результате облучения изменила свою толщину. Причем для различных прикладываемых обратных напряжений эти относительные изменения так же, как и барьерная ёмкость, имеют различный характер. При напряжениях смещения менее 1 В

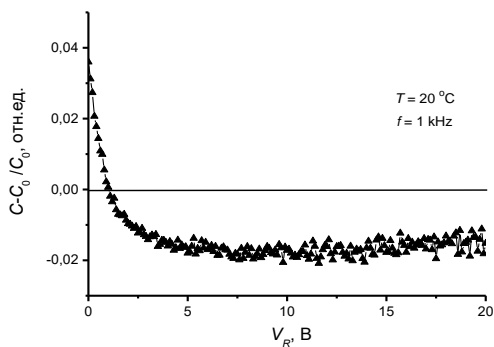


Рис. 2. Зависимость относительного изменения  $C_6$   $p$ - $i$ - $n$ -фотодиода от приложенного обратного напряжения после облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  дозой  $10^{15}$  квант/см $^2$

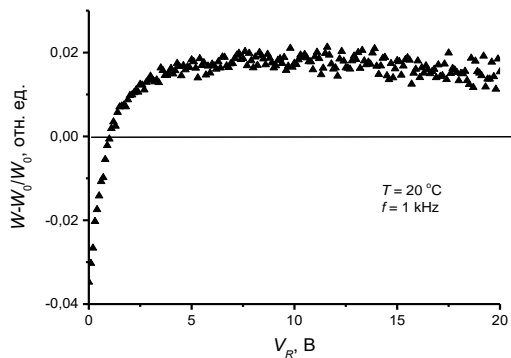


Рис. 3. Зависимость относительного изменения области обеднения  $p$ - $i$ - $n$  фотодиода от приложенного обратного напряжения после облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  дозой  $10^{15}$  квант/см $^2$

она уменьшилась, а при  $V_{\text{обр}}$  свыше 1 В – возросла. Для объяснения наблюдаемых изменений  $C_6$  и  $W$  в результате  $\gamma$ -облучения был проведен анализ поведения  $V_{bi}$  в соответствии с [2].

Установлено, что возрастание обратного тока  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов в результате облучения  $\gamma$ -квантами, наблюдаемое ранее в [1], не может быть связано с компенсацией  $i$ -области и увеличением размеров  $W$  (при использованной дозе облучения концентрация основных носителей заряда снизилась только на  $3.1 \cdot 10^{11}$  см $^{-3}$ , т.е. имеет место очень малое изменение концен-

трации свободных носителей заряда).  $V_{bi}$  в результате облучения уменьшилась на 0.0592 эВ, т.е. произошла компенсация основной легирующей примеси в базе диода вследствие генерации радиационных дефектов. Это привело к уменьшению  $W$  при  $V_{\text{обр}} < V_{bi}$  и, как следствие, увеличению  $C_6$  после облучения. При  $V_{\text{обр}} > V_{bi}$  вследствие компенсации радиационными дефектами  $i$ -области  $W$  обеднения увеличилась, а  $C_6$  соответственно уменьшилась. Основной причиной наблюдаемых эффектов является образование генерационно-рекомбинационных центров радиационного происхождения вследствие конденсации первичных радиационных дефектов на технологических остаточных дефектах структуры. Данные технологические дефекты распределены неравномерно по объему базы  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов как в исходных, так и в облученных приборах.

### Заключение

Установлено, что изменения барьерной ёмкости  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов при облучении  $\gamma$ -квантами определяются, прежде всего, величиной контактной разности потенциалов. При напряжении внешнего смещения  $V_{\text{обр}} \leq 1$  В происходит увеличение  $C_6$ , при  $V_{\text{обр}}$  в диапазоне от 1 В до 20 В величина  $C_6$  после облучения снизилась по сравнению с исходной.

### Библиографические ссылки

1. Горбачук Н.И., Ластовский С.Б., Оджаев В.Б., Петлицкий А.Н., Просолович В.С., Ковальчук Н.С. и др. Влияние  $\gamma$ -облучения на вольт-амперные характеристики  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов. Материалы 13-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2020», Минск (18-20 ноября 2020 г.). Минск: БНТУ; 2020: 325-326.
2. Sze S.M., Lee M.K. Semiconductor Devices: Physics and Technology. John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited. 2012. 582 p.