ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ БАРЬЕРНОЙ ЁМКОСТИ p-i-n-ФОТОДИОДОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ γ-КВАНТАМИ ^{60}Co

С.Б. Ластовский[1)], В.Б. Оджаев[2)], А.Н. Петлицкий[3)], В.С. Просолович[2)], Е.В.Точилин[1)], Д.В. Шестовский[3)], В.Ю. Явид[2)], Ю.Н. Янковский[2)]
[1)]*Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки 19, Минск 220072, Беларусь, lastov@ifttp.bas-net.by*
[2)]*Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, odzaev@bsu.by, prosolovich@bsu.by, Yavid@bsu.by, yankouski@bsu.by*
[3)]*ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», ул Казинца 121А, Минск 220108, Беларусь, petan@tut.by, DShestovski@integral.by*

Исследовано влияние γ-излучения ^{60}Co на изменение барьерной ёмкости ($C_б$) *p-i-n*-фотодиодов на основе кремния. Приборы изготавливались на пластинах p-Si ориентации (100) с ρ = 1000 Ом·см, выращенных методом бестигельной зонной плавки. Область p^+-типа создавалась имплантацией ионов B^+ в непланарную сторону пластины, области n^+-типа – диффузией P в планарную сторону пластины. Облучение γ-квантами производилось от источника ^{60}Co дозами до $1{,}5\cdot10^{15}$ квант/см^2. Установлено, что в результате воздействия облучения γ-квантами при напряжении внешнего смещения $V_{обр}\leq1$ В происходит увеличение $C_б$ по сравнению с необлученными образцами. В то же время при $V_{обр}$ в диапазоне от 1 В до 20 В величина $C_б$ 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 емкость; облучение γ-квантами; генерационно-рекомбинационные процессы.

PECULIARITIES OF CHANGING THE BARRIER CAPACITY OF p-i-n-PHOTODIODES UNDER IRRADIATION WITH ^{60}Co γ-QUANTA

S.B. Lastovskii[1)], V.B. Odzaev[2)], A.N. Pyatlitski[3)], V.S. Prosolovich[2)], E.V.Tochilin[1)], D.V. Shestovsky [3)], V.Yu. Yavid [2)], Y.N. Yankovsky[2)]
[1)]*Scientific-Practical Materials Research Centre, National Academy of Sciences of Belarus, 19 P. Brovki Str., 220072 Minsk, Belarus, lastov@ifttp.bas-net.by;*
[2)]*Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, odzaev@bsu.by, prosolovich@bsu.by, Yavid@bsu.by, yankouski@bsu.by*
[3)]*JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company, 121A Kazintsa Str., 220108 Minsk, Belarus, petan@tut.by, DShestovski@integral.by*

The effect of gamma-radiation ^{60}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 p = 1000 Ohm·cm, grown by the method of non-melting zone melting. The p^+-type region was created by implantation of B^+ ions into the non-planar side of the plate, the n^+–type region was created by diffusion of P into the planar side of the plate. γ-quanta irradiation was carried out from a ^{60}Co source in doses up to $1.5\cdot10^{15}$ 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 ($V_{bi} \leq 1$ V). It has been established that as a result of exposure to gamma-quanta at an external bias voltage $V_R \leq 1$ 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 γ-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 γ-квантов. В работе исследовано влияние γ - излучения на изменение барьерной ёмкости ($C_б$) *p-i-n*-фотодиодов на основе кремния.

Основная часть

Приборы изготавливались на пластинах *p*-Si ориентации (100) с ρ = 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 P из газовой фазы в планарную сторону пластины. Измерения вольт-фарадных характеристик производились на измерителе параметров полупроводниковых приборов *Agilent B1500A* с зондовой станцией *Cascade Summit 11000B-AP* в диапазоне температур -30…70 °C с шагом 10 °C. Облучение γ-квантами производилось от источника ^{60}Co дозами до $1.5\cdot10^{15}$ квант/см^2.

Установлено, что барьерная емкость приборов, измеренная до проведения облучения γ-квантами ^{60}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 ассиметричного *p-n*-перехода [2]. Исследования показали, что заметная температурная зависимость $C_б$ (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).

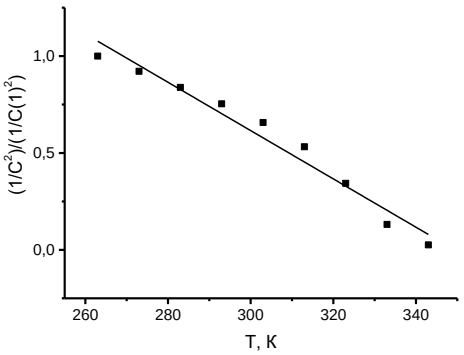

Рис. 1. Температурная зависимость относительной величины обратного квадрата барьерной ёмкости *p-i-n*-фотодиода. Сплошная линия – расчет

Зависимость $C_б$ от $V_{обр}$ *p-i-n*-фотодиодов после облучения не изменила свой характер. Однако, как видно из представленного на рис. 2 относительного изменения барьерной емкости, в результате воздействия облучения γ-квантами при напряжении внешнего смещения $V_{обр} \leq 1$ В происходит увеличение $C_б$ по сравнению с необлученными образцами. В то же время при $V_{обр}$ в диапазоне от 1 В до 20 В величина $C_б$ после облучения снизилась по сравнению с исходной. Поскольку размеры области пространственного заряда *p-n*-перехода обратно пропорциональны его барьерной ёмкости ($W \sim 1/C_б$) [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

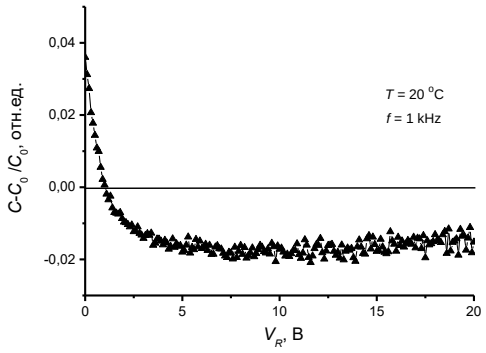

Рис. 2. Зависимость относительного изменения $C_б$ *p*-*i*-*n*-фотодиода от приложенного обратного напряжения после облучения γ-квантами ^{60}Co дозой 10^{15} квант/см^2

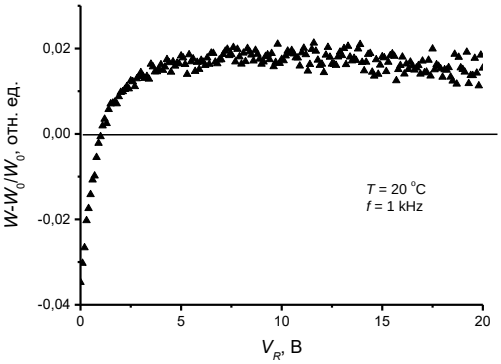

Рис. 3. Зависимость относительного изменения области обеднения *p*-*i*-*n* фотодиода от приложенного обратного напряжения после облучения γ-квантами ^{60}Co дозой 10^{15} квант/см^2

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

Установлено, что возрастание обратного тока *p*-*i*-*n*-фотодиодов в результате облучения γ-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 концентрации 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 $V_{обр}<V_{bi}$ и, как следствие, увеличению $C_б$ после облучения. При $V_{обр}>V_{bi}$ вследствие компенсации радиационными дефектами *i*-области W обеднения увеличилась, а $C_б$ 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 γ-квантами определяются, прежде всего, величиной контактной разности потенциалов. При напряжении внешнего смещения $V_{обр}\leq 1$ В происходит увеличение $C_б$, при $V_{обр}$ в диапазоне от 1 В до 20 В величина $C_б$ 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 γ-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.