

УДК 621.382

ВЛИЯНИЕ γ -ОБЛУЧЕНИЯ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ p - i - n -ФОТОДИОДОВ

Горбачук Н.И.¹, Ластовский С.Б.², Оджаев В.Б.¹, Петлицкий А.Н.³, Просолович В.С.¹, Ковальчук Н.С.³, Филипеня В.А.³, Черный В.В.⁴, Шестовский Д.В.³, Янковский Ю.Н.¹

¹Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

²Научно-практический центр по материаловедению НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

³Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

⁴Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Простота конструкции, низкая стоимость и возможность изготовления прибора с оптимальными характеристиками обуславливают применение p - i - n фотодиодов в аппаратуре космического назначения в качестве навигационных и сенсорных детекторов оптического и ИК диапазона, в системах LIDAR [1], а также в оптических межспутниковых каналах связи [2], где они подвержены воздействию солнечной радиации. В работе исследовано влияние γ -излучения на электрофизические параметры p - i - n фотодиодов на основе кремния с вертикальной структурой и охранным кольцом.

Приборы изготавливались на пластинах кремния p -типа проводимости ориентации (100) с $\rho = 1000$ Ом·см, выращенных методом бестигельной зонной плавки. Область p^+ -типа анода (изотипный переход) создавалась имплантацией ионов B^+ во всю поверхность непланарной стороны пластины, области катода n^+ -типа и охранного кольца – диффузией P из газовой фазы в планарную сторону пластины. Облучение γ -квантами производилось от источника ^{60}Co дозой 10^{15} квант/см². Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) производились в диапазоне температур -30 – 70 °С с шагом 10 °С. Время жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) определялось из переходных характеристик p - i - n фотодиода при комнатной температуре согласно методике [5]. Определение локальных дефектов в приповерхностной фоточувствительной области производилось с помощью растрового электронного микроскопа «НІТАСНІ» типа S-4800 (РЭМ) согласно методике [6] в сканирующем режиме и в режиме наведенного тока с энергиями пучка 20 и 30 кэВ соответственно.

На рисунке 1 приведены ВАХ темновых токов фоточувствительной области и охранного кольца исходного фотодиода до и после воздействия на образец γ -излучения. Для p - n перехода на основе кремния при 20 °С основной вклад в обратный ток вносит дрейфовая составляющая и токи утечки по поверхности [3]. Следует отметить, что на ВАХ диода при обратном смещении наблюдаются ступеньки вблизи $V_1^{bend} = 25$ В и $V_2^{bend} = 70$ В. Это обусловлено, вероятно, терми-

ческой генерацией носителей заряда с глубоких уровней. Данный факт так же позволяет сделать предположение о неоднородном распределении технологических примесей с глубокими уровнями по объему кристалла.

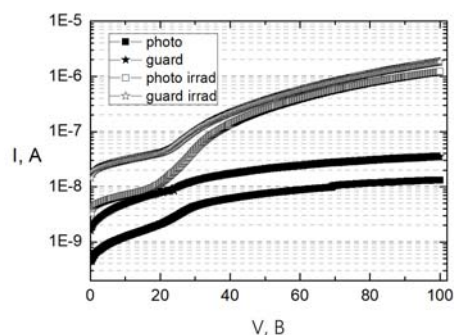


Рисунок 1 – Обратные ВАХ фоточувствительной области (photo) и охранного кольца (guard) исходного фотодиода и после воздействия γ -излучения (photo irradiad, guard irradiad) при температуре 20 °С

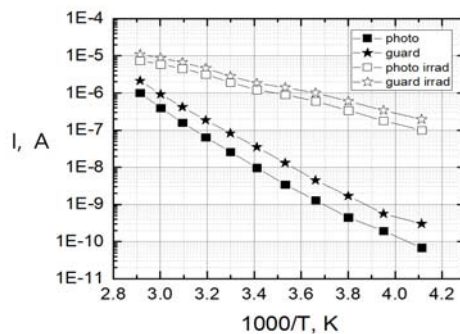


Рисунок 2 – Температурная зависимость тока при обратном смещении -100 В фоточувствительной области (photo) и охранного кольца (guard) исходного p - i - n фотодиода и после воздействия γ -излучения (photo irradiad, guard irradiad)

На рисунке 2 приведены зависимости темновых токов от обратной температуры. Определенное по наклону температурной зависимости положение глубоких уровней в запрещенной зоне дало значения для фоточувствительной области – $E_v+0,38$ эВ, для охранного кольца – $E_v+0,4$ эВ. Согласно [4] уровень $E_v+0,38$ эВ соответствует глубоким уровням атомов железа, находящихся в

междуузельном положении, попадающих в материал при проведении длительных (более 1 часа) диффузионных процессов при температурах 1 100–1 200 °С из атмосферы реактора и формирующих глубокие рекомбинационные уровни.

На всех изображениях РЭМ (рисунок 3) в фоточувствительных областях фотодиода не наблюдалось контрастов, свидетельствующих о наличии размерных дефектов, являющихся рекомбинационными центрами локальных дефектов вблизи металлургической границы p - n перехода. Значения времени жизни ННЗ (τ_c) для фоточувствительной области и охранного кольца необлученного p - i - n фотодиода составили 38,6 мкс и 32,23 мкс соответственно.

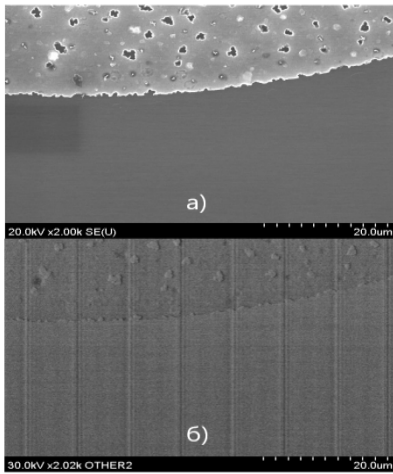


Рисунок 3 – Изображения приповерхностной фоточувствительной области p - i - n фотодиода полученные РЭМ в режиме сканирования (а) и в режиме наведенного тока (б)

Расчетные значения темновых токов при $V = -100$ В составили $I_{\text{dark}}^{\text{photo}} = 93$ нА, $I_{\text{dark}}^{\text{guard}} = 130$ нА, что примерно в 5 раз больше экспериментальных значений. Это обусловлено тем, что измерение τ_c производилось по переходным процессам в локальной области потенциального барьера при обратном смещении не более 4 В. Однако, в фотодиодном режиме τ_c определяется, преимущественно, объемным временем жизни в i -области, которое в используемом кремнии составляет сотни микросекунд.

После облучения p - i - n фотодиода наблюдается увеличение темнового тока (рисунок 1). Это связано с увеличением составляющей тока утечки, обусловленного генерацией носителей заряда с глубоких уровней радиационных дефектов. Так же возможно образование инверсионного канала между охранным кольцом и фоточувствительной областью из-за наличия пострадиационных заряженных центров как на границе раздела Si-SiO₂ так и в прилегающих к ней областях. Из анализа температурной зависимости темнового тока положение глубоких уровней в

запрещенной зоне после облучения составило $E_v + 0,27$ эВ, что свидетельствует о том, что преобладающими радиационными дефектами являются дивакансии [5]. После воздействия γ -квантов меняется наклон обратной ветви ВАХ вследствие дополнительного вклада процессов генерации ННЗ с глубоких уровней радиационных дефектов. Степенная зависимость $J \sim V^n$ характерна для обратной ветви ВАХ p - n -перехода, в ОПЗ которого преобладает генерация электронно-дырочных пар [3]. Показатель $n > 1$ указывает на высокую концентрацию рекомбинационно-генерационных центров (в нашем случае увеличение концентрации радиационных дефектов). Для исходного образца p - i - n фотодиода в результате аппроксимации обратной ветви ВАХ функцией $I = k \cdot V^n$ в диапазоне $V = 50$ – 100 В значения наклона составили $n_{\text{photo}} \approx n_{\text{guard}} \approx 0,5$, для облученного фотодиода $n_{\text{photo}}^{\text{irrad}} = 2,25$; $n_{\text{guard}}^{\text{irrad}} = 2,32$.

Следует отметить, что наличие ступенек на обратной ВАХ p - i - n фотодиода свидетельствует о том, что зависимость обратного тока нельзя описать одной экспонентой. Для аппроксимации целесообразно применить функцию с двумя слагаемыми вида:

$$I(V) = I_{s1} \exp(qV/n_1 k_B T) + I_{s2} \exp(qV/n_2 k_B T)$$

где первое слагаемое превалирует в области, где существенна рекомбинация, а второе – в области высоких напряжений, где основной вклад вносит генерация.

Установлено, что воздействие γ -излучения на p - i - n фотодиод приводит к росту величины обратного тока и наклона ВАХ. Показано, что темновой ток не облученного фотодиода обусловлен генерацией носителей заряда с глубоких уровней неконтролируемых примесей атомов железа. Как для исходных, так и для облученных образцов наблюдается отклонение формы обратной ветви ВАХ от идеальной, что связано с неравномерным распределением как легирующих, так и технологических примесей.

Литература

1. Pereira do Carmo J. Imaging lidars for space applications / J. Pereira do Carmo [and etc.] // Novel Optical Systems Design and Optimization XI. – 2008. – Vol. 7061. – P. 70610J-01–70610J-12.
2. De Carlo P.M. Intersatellite link for earth observation satellites constellation / P.M. De Carlo [and etc.] // SPACEOPS, Roma, Italy. – 2006. – P. 19–23.
3. Sze S.M. Semiconductor Devices: Physics and Technology / S.M. Sze, Lee M.K. – Pub. 3. – John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited, 2012. – 582 p.
4. Schroder, D.K. Semiconductor material and device characterization / D.K. Schroder. – John Wiley & Sons, 2006. – 781 p.
5. Вопросы радиационной технологии полупроводников / Под ред. Л.С. Смирнова. – Новосибирск: Изд-во «Наука», Сибирское отделение, 1980. – 296 с.