

ОСОБЕННОСТИ РАДИАЦИОННОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Н.И.Маслов, И.М.Неклюдов

ИНЦ ХФТИ, г. Харьков, Украина, <nikolai.maslov@kipt.kharkov.ua>

В роботі розглянуті процеси пошкодження кремнію та кремнієвих детекторів, особливості радіаційних пошкоджень кремнію та кремнієвих детекторів в умовах розвитку електронно-фотонної зливи. Отримані експериментальні результати по ефективності радіаційного пошкодження кремнію електронно-фотонною зливою від первинних електронів з енергією 220, 500 та 1000 МеВ. Досліджені особливості дефектоутворення у детекторі. Розглянут ефект радіаційного пошкодження, включаючи змінення (зменшення) ефективної концентрації легируючої домішки та зміненні типу проводимості матеріалу детектора в разі опромінення. Показано, що ефективність утворення дефектів у детекторі може відрізнятися від утворення дефектів у кремнію з ідентичними параметрами.

В работе рассмотрены процессы повреждения кремния и кремниевых детекторов, особенности радиационных повреждений кремния и кремниевых детекторов в условиях развития электронно-фотонного ливня. Получены экспериментальные результаты по эффективности радиационного повреждения кремния электронно-фотонным ливнем от первичных электронов с энергией 220, 500 и 1000 МэВ. Исследованы особенности дефектообразования в детекторе. Рассмотрен эффект радиационного повреждения кремниевых детекторов, заключающийся в изменении (уменьшении) эффективной концентрации легирующей примеси и в изменении типа проводимости материала детектора в результате облучения. Показано, что эффективность образования дефектов решётки в объеме материала детектора может отличаться от образования дефектов решётки в кремнии с идентичными параметрами.

Damaging processes of silicon and silicon detectors, radiation damaging peculiarity of silicon and silicon detectors by conditions of electromagnetic showers development are considered in the work. Experimental results of silicon radiation damaging efficiency by electromagnetic showers, which are developed from initial electrons with energy 220, 500 and 1000 MeV are presented. Peculiarity of damages creation in detector was studied. It was shown, that radiation damaging efficiency in the bulk detector material may be different then radiation damaging efficiency in initial silicon with identical characteristics.

1. ВВЕДЕНИЕ

При прохождении высокоэнергетических электронов или γ -квантов через вещество сцинтиллятора, в результате последовательного излучения γ -квантов и конверсии их в электрон-позитронные пары развивается электронно-фотонный ливень. Радиационное воздействие электронно-фотонного ливня на детекторы реализуется, например, при регистрации высокоэнергетических частиц детектирующими системами типа сцинтиллятор – фотодиод либо вольфрам-кремниевыми калори-метрами [1]. Ливневый процесс приводит к изменению числа, спектра и состава частиц первичного излучения [2,3], что должно приводить к изменению эффективности радиационного повреждения вещества сцинтиллятора и кремниевого детектора по сравнению с эффективностью радиационного повреждения первичными электронами. В настоящей работе рассматриваются особенности повреждения кремния n-типа электронно-фотонным ливнем и особенности повреждения кремниевых детекторов по сравнению с повреждением полупроводникового материала детектора.

2. РАДИАЦИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ КРЕМНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ФОТОННЫМ ЛИВНЕМ

Основным процессом дефектообразования у полупроводников с узкой энергетической запрещен-

ной зоной и сравнительно большой пороговой энергией дефектообразования (кремний, германий) является объёмный механизм повреждения кристаллической структуры кремния в результате смещения атомов. Подпороговые механизмы образования дефектов, связанные с возбуждением электронной подсистемы, незначительны. При энергии воздействующих частиц, приближающейся к порогу дефектообразования, сечение последнего за счет возбуждения электронной подсистемы на два порядка меньше, чем сечение за счет упругого смещения атомов [4].

Образования дефектов в кремнии сопровождается образованием дополнительных энергетических уровней в энергетической запрещенной зоне полупроводника. Глубокие уровни вблизи центра энергетической запрещенной зоны (генерационно-рекомбинационные уровни) обладают большим сечением захвата неравновесных носителей заряда. Так сечение прямой рекомбинации (зона проводимости – валентная зона) на два порядка меньше, чем сечение рекомбинации через глубокий уровень. Поэтому, время жизни неравновесных носителей заряда у полупроводников является наиболее чувствительным электрофизическим параметром к облучению. В тоже время, время жизни неравновесных носителей заряда ($\tau_{\text{ннз}}$) является наиболее важным электрофизическим параметром, характеризующим как качество и состояние полупроводников, так и качество и

состояние полупроводниковых приборов. В связи с этим, исследованию $\tau_{\text{ннз}}$ и исследованию константы радиационного повреждения кремния по времени жизни неравновесных носителей заряда (K_{τ}) уделялось и уделяется огромное внимание. Накоплено большое количество данных исследований $\tau_{\text{ннз}}$ и K_{τ} , которое может быть использовано не только в физике радиационных повреждений полупроводников, но и для прогнозирования качества и радиационной стойкости полупроводниковых детекторов.

2.1. ОСОБЕННОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ КРЕМНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ФОТОННЫМ ЛИВНЕМ, РАЗВИВАЮЩИМСЯ В КОНВЕРТОРЕ С НЕОГРАНИЧЕННЫМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ РАЗМЕРАМИ

Кремниевые детекторы [1] используются, в основном, при комнатных температурах. Поэтому большое количество данных по радиационному повреждению кремния, полученных также при комнатных температурах, могут быть использованы для прогнозирования повреждения детекторов в аналогичных условиях. Радиационное повреждение кремния электронно-фотонным ливнем в данной работе исследовалось на различных глубинах проникновения в вещество конвертора электронов с начальной энергией 220, 500 и 1000 МэВ. При исследованиях радиационных повреждений измерялись поглощенная доза излучения и изменение концентрации генерационно-рекомбинационных центров в кремнии в результате воздействия электронно-фотонного ливня. Схема облучения показана на рис. 1.

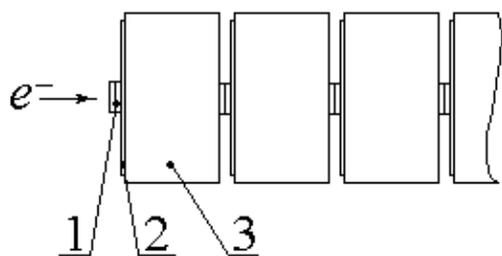


Рис. 1. Схема облучения образцов кремния (1) и дозиметрических пленок (2), расположенных до и после конверторов (3)

Образцы кремния располагались до и за конверторами, изготовленными из сцинтилляторов с малым и большим удельным сопротивлением. Поглощенная доза (D) в образце кремния, расположенном до конвертора, определялась с использованием известных ионизационных потерь энергии и измеренных интегральных плотностей потоков электронов. Распределение поглощенной дозы в радиальном направлении и по глубине развития электронно-фотонного ливня определялись с помощью цветных дозиметрических пленок. Изменение концентрации генерационно-рекомбинационных центров в кремнии в результате воздействия электронно-фотонного ливня определялось методом измерения константы

радиационного повреждения кремния K_{τ} по времени жизни неравновесных носителей заряда [5,6].

На рис. 2 и 3 представлены результаты измерений эффективности радиационного повреждения электронами с энергией 500 и 1000 МэВ кремния, расположенного за легкими и тяжелыми конверторами.

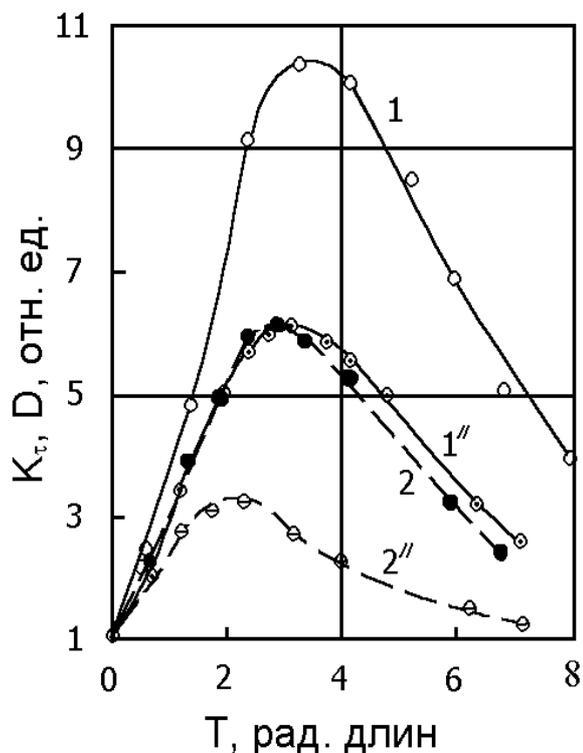


Рис. 2. Радиационное воздействие на кремний электронно-фотонного ливня, развивающегося в тяжелом конверторе ($\rho = 11,34 \text{ г/см}^3$, рад. длина = 1,77 см). Кривые 1 и 1'' — поглощенная доза излучения D , кривые 2 и 2'' — константа радиационного повреждения кремния K_{τ} в относительных единицах. Энергия первичных электронов 1000 МэВ (кривые 1 и 2) и 500 МэВ (кривые 1'' и 2'')

Видно, что развитие электронно-фотонного ливня приводит к значительному изменению эффективности радиационного повреждения и изменению поглощенной дозы в кремнии. Увеличение эффективности радиационного повреждения кремния и поглощенной дозы излучения в нем при увеличении толщины конвертора с неограниченными поперечными размерами зависит от материала конвертора и энергии первичных электронов. Например, при энергии электронов 1000 МэВ в максимуме развития ливня в тяжелом конверторе поглощенная доза увеличивается в десять раз, а K_{τ} увеличивается в шесть раз. Максимальное увеличение K_{τ} происходит при меньших толщинах конвертора, чем максимальное увеличение D . Это можно объяснить тем, что в радиационное повреждение кремния K_{τ} основной вклад вносят более высокоэнергетические частицы.

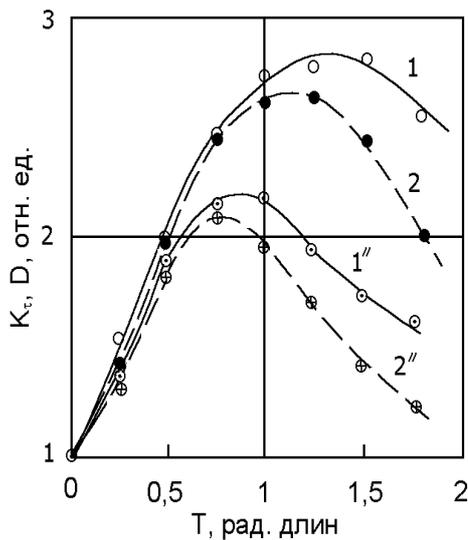


Рис.3. Радиационное воздействие на кремний электронно-фотонного ливня, развивающегося в легком конверторе ($\rho = 2,69 \text{ г/см}^3$, рад. длина = 1,77 см). Кривые 1 и 1'' – поглощенная доза излучения, кривые 2 и 2'' – константа радиационного повреждения кремния K_p , относительные единицы. Энергия первичных электронов 1000 МэВ (кривые 1 и 2) и 500 МэВ (кривые 1'' и 2'')

2.2. ОСОБЕННОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ КРЕМНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ФОТОННЫМ ЛИВНЕМ, РАЗВИВАЮЩИМСЯ В КОНВЕРТОРЕ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ РАЗМЕРАМИ

При энергии электронов 220 МэВ исследовалось развитие электронно-фотонного ливня в узком конверторе и в конверторе с неограниченными поперечными размерами. На рис.4 показана схема эксперимента.

Узкая сборка образцов (1) с поперечными размерами (с) облучается пучком электронов (2) с поперечным размером (f), превышающим поперечные размеры образца. На нижней части рисунка показана та же сборка образцов с дополнительными боковыми конверторами-рассеивателями (см.рис.4, сечение 3).

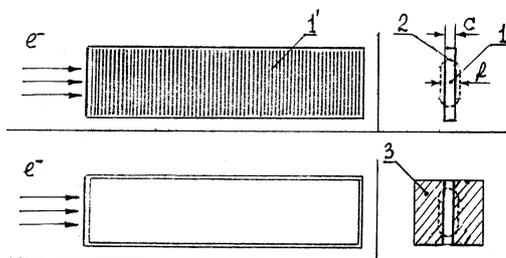


Рис.4. Схема эксперимента. Верхний рисунок- сборка образцов (1) с поперечными размерами (с) меньшими, чем поперечные размеры пучка электронов (f). Нижний рисунок – сборка образцов, включающая боковые конверторы-рассеиватели (3)

На рис.5 показано изменение поглощенной дозы по глубине узкой сборки образцов (D^0 , зависимость 2) и изменение поглощенной дозы по глубине сборки образцов с дополнительными боковыми конверторами-рассеивателями (D^K , зависимость 1).

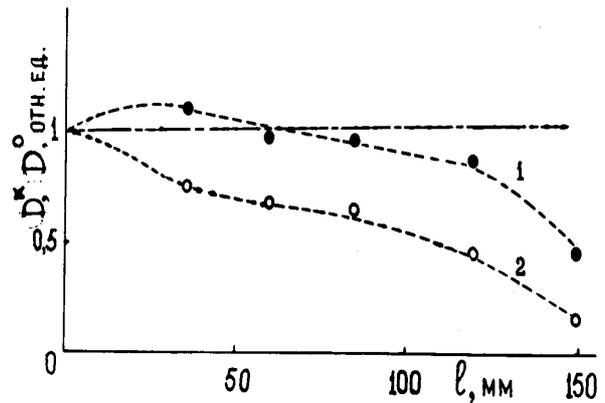


Рис.5. Изменение поглощенной дозы в конверторе из железа ($\rho = 7,87 \text{ г/см}^3$, рад. длина = 1,77 см) с неограниченными (1) и ограниченными (2) поперечными размерами

Из рис.5 видно, что поглощенная доза для неограниченного по поперечным размерам конвертора (с дополнительными боковыми конверторами-рассеивателями) больше во всем диапазоне толщин конвертора. Это объясняется тем, что в случае ограниченного по поперечным размерам конвертора, часть частиц выходит за его пределы и не участвует в процессе формирования электронно-фотонного ливня.

На рис.6 показано изменение отношения поглощенных доз D^K/D^0 по длине сборок. Видно, что с увеличением глубины проникновения ливня отношение поглощенных доз D^K/D^0 увеличивается.

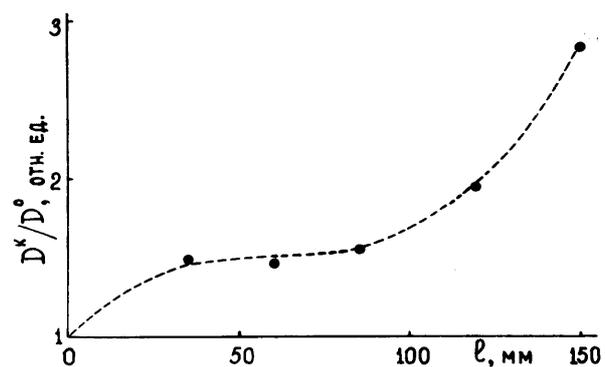


Рис.6. Отношения поглощенных доз D^K/D^0 по длине сборки

На рис.7 и 8 представлены результаты измерения однородности поглощенной дозы по сечению узкой сборки и сборки с дополнительными боковыми конверторами-рассеивателями.

Видно, что в случае применения боковых конверторов-рассеивателей однородность облучения повышается.

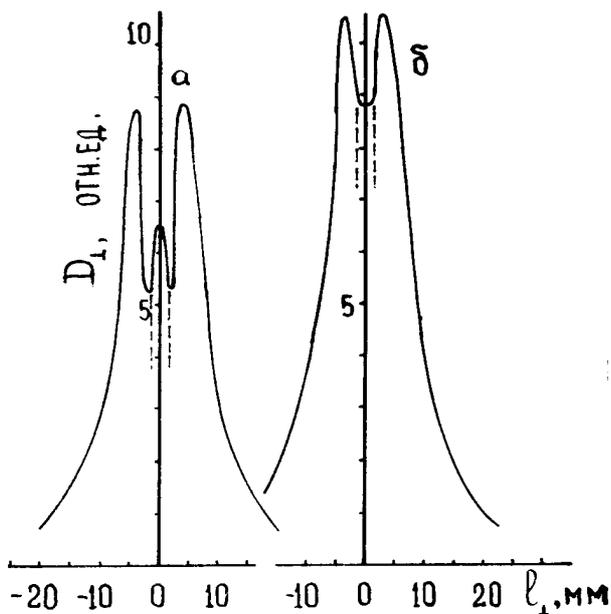


Рис.7. Изменение поглощенных доз в поперечном направлении для узкой сборки (а) и для сборки с дополнительными боковыми конвертерами-рассеивателями (б). Пунктирными линиями обозначены поперечные размеры сборки

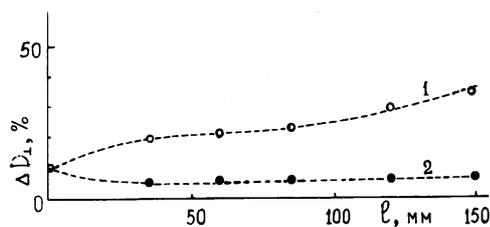


Рис.8. Неоднородность поглощенной дозы в поперечном направлении в узкой сборке (1) и в сборке с дополнительными боковыми конвертерами-рассеивателями (2) на различных расстояниях от начала сборки

Однородность облучения узкой сборки с применением боковых конвертеров-рассеивателей повышается как по сечению, так и вдоль сборки.

3. РАДИАЦИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

При регистрации частиц, в результате воздействия их на объем материала и поверхность детектора, характеристики детектора изменяются. Основным механизмом повреждения ППД является объемный механизм повреждения кристаллической структуры. В результате образования дефектов решетки возникают генерационно-рекомбинационные центры, ускоряющие рекомбинацию носителей заряда и уменьшающие время жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ), которое определяет наиболее важный параметр ППД – ток утечки.

Нормированное изменение тока утечки при облучении детекторов [6,7]:

$$\Delta j = 0.5q_n W A \cdot \Delta \tau^{-1} / D, \quad (1)$$

где: q – заряд электрона; n – собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике; A и W – активная площадь и глубина обеднения полупроводникового детектора; $\Delta \tau^{-1}$ – изменение времени жизни ННЗ после облучения дозой D аналогично радиационной константе полупроводникового материала K_τ [5, 6]

$$K_\tau = \Delta \tau^{-1} / D. \quad (2)$$

В работе [8] рассмотрены эффективности воздействия излучений на токи утечки КД, полученные из измерений константы повреждения детекторного кремния по времени жизни неравновесных носителей заряда. В настоящей работе рассматриваются особенности повреждения кремниевых детекторов по сравнению с повреждением образца кремния с характеристиками, идентичными характеристикам детекторного кремния.

3.1. ИЗМЕНЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В МАТЕРИАЛЕ ДЕТЕКТОРА

В результате образования дефектов решетки в объеме материала детектора возникают рекомбинационные центры, ускоряющие рекомбинацию носителей заряда и уменьшающие время жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ). Одновременное исследование радиационного повреждения кремниевых детекторов и кремния показывает, что эффективность образования дефектов решетки в объеме материала детектора может отличаться от образования дефектов решетки в кремнии с аналогичными параметрами. Это надо учитывать при прогнозировании радиационной стойкости детекторов.

На рис.9 показаны результаты одновременного исследования радиационного повреждения кремниевых детектора и кремния с идентичными параметрами. Линиями 2 и 3 показаны изменения времени жизни неосновных носителей заряда в кремниевом детекторе и кремнии.

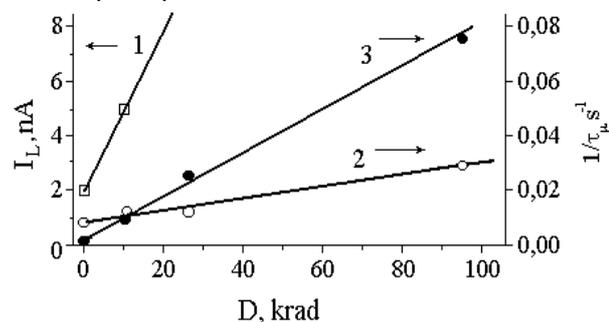


Рис.9. Ток утечки (1), обратное время жизни (2) в кремниевом детекторе и обратное время жизни (3) в образце кремния в зависимости от дозы. Облучение электронами с энергией 20 Мэв

Видно, что время жизни неосновных носителей заряда в кремниевом детекторе изменяется медленнее, чем в кремнии с идентичными параметрами. Вероятно, уменьшение эффективности радиационного повреждения кремниевых детекторов по

сравнению с кремнием можно объяснить гетерирующими свойствами имплантированных слоев на поверхности кремниевого детектора. Дополнительными стоками радиационных дефектов могут быть дефекты, образующиеся в объеме кремния при термических обработках в процессе производства детектора.

3.2. ИНВЕРСИЯ N-ТИПА КРЕМНИЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ДЕТЕКТОРОВ

Образование генерационно-рекомбинационных центров и увеличение вследствие этого токов утечки (соотношение 1) является основным эффектом радиационного повреждения кремниевых детекторов. Еще один эффект радиационного повреждения Si-детекторов обнаружен около десяти лет назад и интенсивно исследуется в последние годы [9,10]. При облучении детекторов наряду с образованием генерационно-рекомбинационных уровней в запрещенной зоне кремния образуются также мелкие уровни -доноры и акцепторы (рис.10) и, поскольку концентрация акцепторо-подобных состояний преобладает, n-тип кремния инвертируется в p-тип.

Эффект радиационного повреждения заключается в изменении (уменьшении) эффективной концентрации легирующей примеси и в изменении типа проводимости материала детектора при определенной дозе облучения. В этом случае работоспособность детектора теряется, если конструкция детектора не предусматривает инверсию типа проводимости, и в любом случае, напряжение полного обеднения значительно увеличивается после инверсии типа проводимости.

Изменение (уменьшение) концентрации основных носителей заряда исследуется много лет наряду с K_T при исследованиях радиационной эффективности различных видов излучений [11] (рис.10).

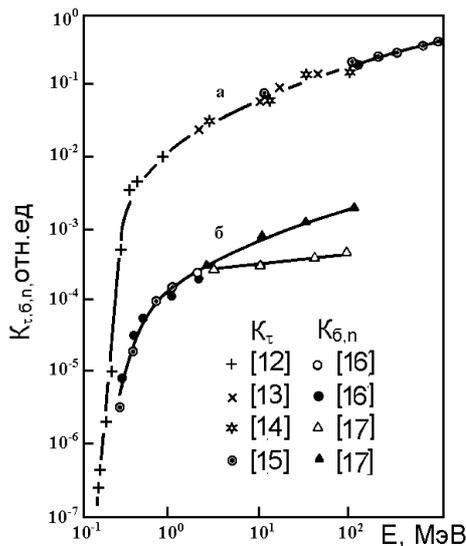


Рис.10. Изменение K_T (а), проводимости и концентрации основных носителей заряда в кремнии n-типа при облучении ускоренными электронами

Зависимость концентрации основных носителей заряда в полупроводнике от флюенса частиц на начальном участке облучения аппроксимируют линейной функцией

$$\eta(D) = \eta_0 - K_\eta D, \quad (3)$$

где η_0 - концентрация основных носителей заряда в полупроводнике до облучения, $\eta(D)$ - концентрация основных носителей заряда в полупроводнике после облучения, D - доза или флюенс частиц. Коэффициент K_η из выражения 3 называют скоростью удаления основных носителей заряда. Изменение концентрации основных носителей заряда в полупроводнике при облучении наблюдается в широком интервале начальных концентраций основных носителей заряда [11] (рис.11).

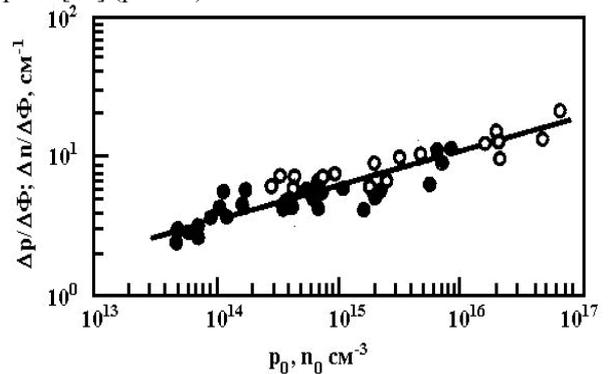


Рис.11. Зависимость изменение удельного сопротивления и концентрации основных носителей заряда в кремнии n-типа при облучении от начальных параметров кремния

Однако эффект радиационного повреждения кремниевых детекторов, связанный с уменьшением эффективной концентрации легирующей примеси и с изменением типа проводимости полупроводникового материала детектора, приобрел актуальность в последнее десятилетие, когда начали широко применяться детекторы на основе высокоомного кремния. Изменение величины и типа проводимости материала детектора исследуется, как правило, с помощью емкостных (C-V) измерений [7,9]. На рис.12 показаны результаты измерений емкости детектора в зависимости от напряжения обеднения.

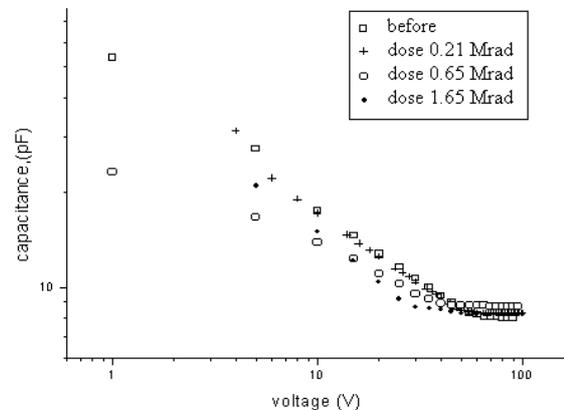


Рис.12. Объемная емкость в зависимости от напряжения обеднения V для различных доз облучения

Напряжение полного обеднения детектора определяется по точке пересечения прямых сильной и слабой зависимостей емкости в логарифмической

системе координат (рис.12). На рис.13 показано изменение напряжения полного обеднения детектора при его облучении. Доза облучения, при которой происходит инверсия типа проводимости материала детектора, зависит от величины удельного сопротивления кремния, от типа и энергии воздействующих частиц.

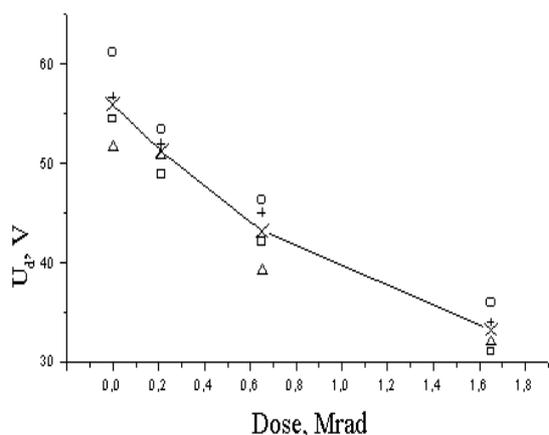


Рис.13. Напряжение полного обеднения для различных доз облучения. O, Δ, +— данные для 4 различных детекторов. Облучение 20 МэВ электронами

В результате инверсии типа проводимости кремния диодная и омическая стороны детектора меняются местами. Это, как правило, приводит к потере работоспособности детектора односторонней конструкции. Если детектор выполнен по двусторонней конструкции, на омической (до инверсии типа проводимости) стороне имеет специальную систему защитных колец, то после инверсии типа проводимости он сохраняет работоспособность до тех пор, пока увеличение шумов не превысит величину заряда от регистрируемой частицы.

ВЫВОДЫ

Исследовано радиационное воздействие на кремний и кремниевые детекторы электронно-фотонных ливней, образующихся от электронов с начальной энергией 220, 500 и 1000 МэВ.

Показано, что развитие электронно-фотонного ливня приводит к значительному изменению поглощенной дозы и эффективности радиационного повреждения кремния.

Показано, что изменение эффективности радиационного повреждения кремния и поглощенной дозы излучения в нем при увеличении толщины конвертора с неограниченными поперечными размерами зависит от материала, размеров конвертора и энергии первичных электронов. Одновременное исследование радиационного повреждения кремниевых детекторов и кремния показывает, что эффективность образования дефектов решетки в объеме материала детектора отличается от образования дефектов решетки в кремнии с идентичными параметрами. Это надо учитывать при прогнозировании радиационной стойкости детекторов.

Рассмотрен эффект радиационного повреждения кремниевых детекторов, заключающийся в измене-

нии (уменьшении) эффективной концентрации легирующей примеси и в изменении типа проводимости материала детектора в результате облучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Barate et al. // *Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res.* 1985. A (235), p.235.
2. Д.Ритсон. *Экспериментальные методы в физике высоких энергий*. М.: «Наука», 1964, с.588.
3. Hans-Hellmut Nagel. Electron-Proton-Kaskaden in Blei // *Zeitschrift fur Physic.* 1965, N186, p.319–346.
4. В.Л.Винецкий, Г.А.Холодарь. *Радиационная физика полупроводников*. Киев, “Наукова думка”, 1979, 332 с.
5. N.I.Maslov, G.D.Pugachev, M.I.Heifets. Radiation damaging efficiency of silicon by 3-1000 MeV electrons // *Physics and Technics of Semiconductors.* 1982, v.16, N3, p.513–515.
6. A.S.Grove. *Physics and Technics of Semiconductor Devices.* New York, Wiley, 1967, Ch. 6, p.176.
7. N.Maslov, V.Kulibaba, S.Potin, A.Starodubtsev, P.Kuijjer, A.P.de Haas, V.Perevertailo. Radiation tolerance of single-sided microstrip detector with Si₃N₄ insulator // *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*. 1999, v.78, p.689–694.
8. N.I.Maslov. Radiation damaging efficiency of silicon detectors by electrons, neutrons and brems-strahlung. VANT, ser. // *Radisation damaging physics and radiation materials.* 1998, v.1(67)–2(68), p.46–48.
9. D.Pitzl, N.Cartiglia, B.Hubbard et al. Type inversion in silicon detectors // *Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res.* 1992, A(311), p.98–104.
10. E.Fretwurst, N.Claussen, N.Croituru et al. Radiation hardness of silicon detectors for future colliders // *Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res.* 1994, A (339), p.357-364.
11. Н.В.Кузнецов, Г.Г.Соловьев. *Радиационная стойкость кремния*. М.:«Энергоатомиздат», 1989, 95 с.
12. H.Flicker, J.J.Loferski, J.Scot-Monsk. Radiation Defect Introduction Rates in n-and p-Type Si in Vicinity of the Radiation Damage Threshold // *Rhys, Rev.* 1962, v.128, N 6. p.2557–2563.
13. Г.М.Иванов. Об энергетической зависимости поврежденных монокристаллов кремния при бомбардировке протонами и электронами // *Второй Всесоюзный симпозиум по взаимодействию атомных частиц с твердым телом*. М.: Изд-во МГУ, 1972, с.308–311.
14. П.Ф.Лугаков, С.В.Мишук, В.В.Ноздрина, В.Д.Ткачев. Рекомбинация носителей тока в n-кремнии, облученном быстрыми электронами // *Радиационные дефекты в полупроводниках*. Минск: Изд-во БГУ, 1972, с.85–86.
15. Н.И.Маслов, Г.Д.Пугачев, М.И.Хейфец. Эффективность радиационного воздействия электронов с энергией 3...1000 МэВ на кремний // *Физика и техника полупроводников.* 1982, т.16. вып.3. с.513–516.
16. I.V.Haddad, P.C.Bundury Energy Dependence of Anisotropy of Defect Production in Electron Irradiated Diamond-Type Crystals. I. Experimental Measurements on n-and p-Type Silicon // *Phyl. Mag.* 1966, v.14, N130, p.829–840.

17. И.Д.Козлов, Т.А.Логвиненко, П.Ф.Лугаков, В.Д.Ткачев. Изменение концентрации носителей тока в кремнии при облучении быстрыми электронами // *Физика и техника полупроводников*. 1974, т.8, вып.8, с.1431–143.