

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Н.И. Маслов*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина*

*E-mail: nikolai.maslov@kipt.kharkov.ua*

Образование стабильных дефектов в облучаемых материалах зависит не только от концентрации первичных радиационных повреждений, но и от распределения их в объеме материала. Распределение первичных радиационных повреждений в объеме вещества определяется энергией первично выбитых атомов (ПВА). В зависимости от величины полученной энергии  $T$ , первично выбитый атом может образовать либо изолированную пару Френкеля (устойчивую или неустойчивую), либо каскадную область смещений. В кремнии при развитии каскада смещений от ПВА с энергией  $\geq 10$  кэВ образуется крупное стабильное структурное нарушение, называемое область разупорядочения. Область разупорядочения оказывает существенное влияние на электрофизические параметры полупроводников. Приводятся результаты исследований воздействия на кремний электронов и фотонов в широком интервале энергий и метод определения доли повреждений, входящих в каскадные области смещений.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Кремниевые планарные детекторы, применяющиеся в настоящее время во всех областях физического эксперимента и прикладных исследованиях [1-3], используются, в основном, при комнатных температурах. При регистрации частиц кремниевые детекторы изменяют свои характеристики, повреждаются. Процессы повреждения в материале детектора близки к процессам повреждения полупроводникового материала, облучаемого при комнатных температурах [3]. Поэтому данные по радиационному повреждению полупроводникового материала, полученные при комнатных температурах, могут быть использованы для прогнозирования повреждения планарных детекторов в аналогичных условиях.

Образование дефектов в кремнии сопровождается образованием дополнительных энергетических уровней в энергетической запрещенной зоне полупроводника. Глубокие уровни вблизи центра 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. По этой причине время жизни неравновесных носителей заряда ( $\tau_{\text{инз}}$ ) у полупроводников является наиболее чувствительным электрофизическим параметром к облучению. В то же время,  $\tau_{\text{инз}}$  является наиболее важным электрофизическим параметром, характеризующим как качество и состояние полупроводников, так и полупроводниковых приборов [4].

В связи с этим, исследованию  $\tau_{\text{инз}}$  и исследованию константы радиационного повреждения кремния по времени жизни неравновесных носителей заряда ( $K_r$ ) [4-8] уделялось и уделяется огромное внимание. Накоплено большое количество данных исследований  $\tau_{\text{инз}}$  и  $K_r$ , которые могут быть исполь-

зованы не только в физике радиационных повреждений полупроводников, но и для прогнозирования качества и радиационной стойкости полупроводниковых детекторов.

## 2. ОБРАЗОВАНИЕ КАСКАДНЫХ ОБЛАСТЕЙ СМЕЩЕНИЙ

Концентрация смещенных атомов при облучении является основным параметром радиационного повреждения полупроводникового материала.

Однако, образование стабильных дефектов в облучаемых материалах зависит не только от концентрации смещенных атомов, но и от распределения их в объеме материала. Распределение смещений в объеме материала определяется энергетическим спектром первично выбитых излучением атомов (энергией первично выбитых атомов). В зависимости от величины полученной энергии  $T$ , первично выбитый атом может образовать либо изолированную пару Френкеля (устойчивую или неустойчивую), либо каскадную область смещений (КОС) [9].

В металлах при энергиях ПВА  $\geq 10$  кэВ в развитии каскадов наблюдаются характерные особенности. В центральной области каскада появляется область, обогащенная вакансиями ("обедненная зона"), укрупняются вакансионные кластеры, каскады разветвляются на отдельные подкаскады (субкаскады) [9]. Каскадные области повреждений оказывают существенное влияние на весь дальнейший ход радиационного повреждения, являясь, например, зародышами пор, ускоряя диффузионные процессы структурно-фазовых превращений. Это приводит к существенному изменению комплекса физико-механических и электрофизических свойств облучаемых материалов.

В кремнии при развитии каскада смещений от ПВА с энергией  $\geq 10$  кэВ образуется крупное стабильное структурное нарушение, называемое область разупорядочения (ОР) [10]. ОР состоит из ядра с большой концентрацией дивакансий и оболочки

из комплексов моновакансий с примесными атомами [11]. ОР оказывает существенное влияние на электрофизические параметры облученных полупроводников и полупроводниковых приборов. После облучения высокоэнергетическими частицами наблюдается частичное восстановление параметров полупроводников и полупроводниковых детекторов, которое объясняется перестройкой ОР.

Поэтому, при моделирующем облучении материалов и приборов для прогнозирования их поведения в специальных радиационных полях (радиационные поля в районе точки взаимодействия встречных пучков суперколлайдерных экспериментов, реакторное излучение, космическое излучение и др.) необходимо знать вклад в дефектообразование от высокоэнергетических ПВА, создающих в материале ОР.

Если состав, энергетический спектр и сечения взаимодействия заряженных частиц с атомами и ядрами вещества известны, то относительный вклад высокоэнергетических ПВА можно рассчитать. Если же параметры неизвестны, расчёты возможны лишь после экспериментального определения энергетического спектра излучения, например, методом пороговых детекторов. Такие измерения требуют длительного облучения и не всегда возможны.

С использованием электронной микроскопии можно наблюдать возникновение и эволюцию КОП. Однако, выделить непосредственно вклад от высокоэнергетических ПВА невозможно.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОНСТАНТЫ РАДИАЦИОННОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И РАДИАЦИОННОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ДЕТЕКТОРОВ

В полупроводниках ОР окружены слоем пространственного заряда [10]. Наличие слоя пространственного заряда вокруг ОР изменяет сечение захвата неравновесных носителей заряда на уровни дефектов, входящих в состав областей разупорядочения. Более того, при экспериментальных исследованиях было замечено, что изменение электрофизических свойств при облучении, вызванное областями разупорядочения, более ярко выражено в полупроводнике р-типа по сравнению с полупроводником n-типа.

С целью количественного определения влияния на эффективность радиационного повреждения смещений, создаваемых ПВА с энергией выше порога образования ОР, были проведены детальные исследования  $K_\tau$  при облучении Si р- и n-типов ускоренными электронами,  $\gamma$ -квантами тормозного спектра и нейтронами.

Время жизни неравновесных носителей заряда  $\tau_{\text{ннз}}$  для определения  $K_\tau$  измерялось двумя способами: по времени спада импульса неравновесной проводимости, возбуждаемого импульсным пучком ионизирующего излучения ([5-7], Рис.1), и с использованием специального бесконтактного устройства, в котором импульс неравновесной проводимости возбуждался дополнительным светодиодом [12].



Рис.1. Импульс неравновесной проводимости в полупроводнике (нижняя осциллограмма) при воздействии на полупроводник импульсного пучка ускоренных электронов (верхняя осциллограмма)

На Рис.2 показано изменение  $\tau_{\text{ннз}}$  при облучении кремния пучком ускоренных электронов.

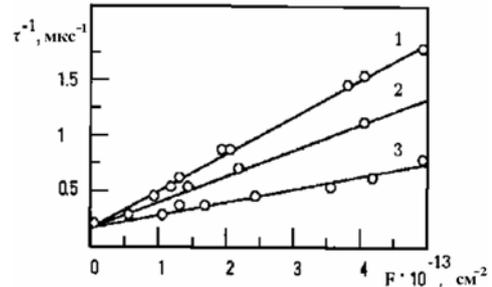


Рис.2. Изменение  $\tau_{\text{ннз}}$  при облучении кремния пучком электронов: 1 - ускоренные электроны с энергией 120 МэВ, 2 - 30 МэВ и 3 - 5 МэВ

Видно, что  $\tau_{\text{ннз}}$  обратно пропорционально интегральной плотности потока ускоренных электронов. По углу наклона линейной зависимости  $1/\tau_{\text{ннз}}$  от интегральной плотности потока ускоренных электронов определяется константа радиационного повреждения кремния по времени жизни неравновесных носителей заряда ( $K_\tau$ ):

$$K_\tau = \frac{1}{F} (\tau^{-1} - \tau_0^{-1}), \quad (1)$$

где F – интегральная плотность потока ускоренных электронов.

На Рис.3 представлены изменения тока утечки кремниевых планарных детекторов при облучении ускоренными электронами с энергией 20 МэВ [3].

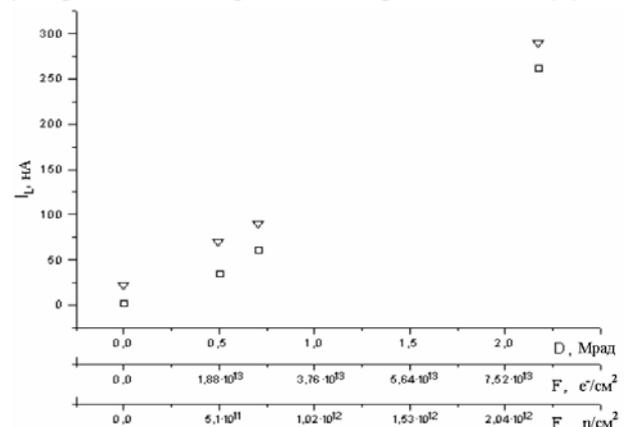


Рис.3. Зависимость изменения токов утечки кремниевых планарных детекторов при облучении ускоренными электронами с энергией 20 МэВ:  $\square$  - планарный детектор с однослойной изоляцией  $\text{SiO}_2$ ;  $\nabla$  - планарный детектор с дополнительной изоляцией  $\text{Si}_3\text{N}_4$

Для токов утечки кремниевых планарных де-

тектора при облучении наблюдается также линейная зависимость от интегральной плотности потока ускоренных электронов, как и для изменения  $1/\tau_{\text{НЗ}}$ . Объясняется это тем, что прирост тока утечки кремниевого планарного детектора [3]

$$\Delta I_D = \frac{q \cdot n_i V}{2F} (\tau^{-1} - \tau_0^{-1}) \quad (2)$$

пропорционален изменению  $1/\tau_{\text{НЗ}}$  так же, как и для радиационной константы  $K_r$ . В (2)  $q$  – заряд электрона,  $n_i$  – собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике,  $V$  – рабочий объем полупроводникового детектора,  $\tau_0$  и  $\tau$  – времена жизни НЗ до и после облучения детектора.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ОБЛАСТЕЙ РАЗУПОРЯДОЧЕНИЯ В КРЕМНИИ

Для определения возможности количественного измерения вклада в общее количество смещений, создаваемых ПВА с энергией выше порога образования ОР, были проведены детальные исследования  $K_r$  при облучении кремния р- и n-типов. Образцы кремния р- и n-типов, расположенные вплотную друг к другу, одновременно облучались электронами в интервале энергий  $8 \leq E_0 \leq 1000$  МэВ  $\gamma$ -квантами тормозного спектра с максимальной энергией в спектре излучения  $E_{\gamma}^{\text{max}} = 250$  МэВ и нейтронами с энергией 14 МэВ.

На Рис.4 изображены зависимости  $K_r$  от энергии ускоренных электронов для кремния р- и n-типов.

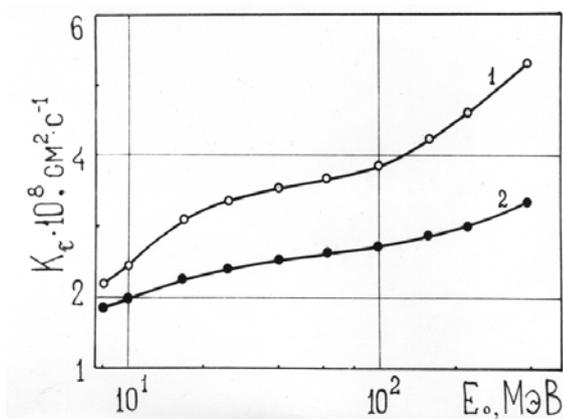


Рис. 4. Зависимость  $K_r$  от энергии ускоренных электронов: 1- кремний р-типа, 2 - кремний n-типа

Видно, что с увеличением энергии электронов  $K_r$  изменяется быстрее в кремнии р-типа.

На Рис.5 изображены рассчитанные относительные вклады в сечение дефектообразования от ПВА с энергией выше порога смещения атома  $E_d$  при облучении ускоренными электронами и  $\gamma$ -квантами тормозного спектра.

Пунктирная линия отсекает относительный вклад ПВА с энергией выше порога образования ОР. С увеличением энергии воздействующих электронов вклад высокоэнергетических ПВА увеличивается. При облучении кремния электронами с энергией 10 МэВ все смещения создаются ПВА ниже порога образования ОР.

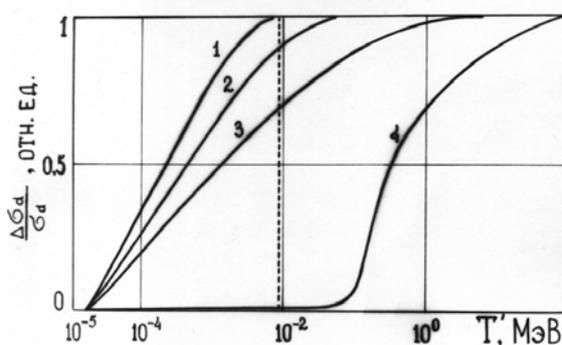


Рис.5. Относительный вклад в сечение дефектообразования от ПВА с энергиями от  $E_d$  до  $T^1$ . 1-3 – облучение электронами с энергиями соответственно 10, 25 и 250 МэВ; 4 – облучение  $\gamma$ -квантами тормозного спектра с  $E_{\gamma}^{\text{max}} \approx 250$  МэВ

На Рис.6 представлена зависимость отношения радиационных констант  $d_x = K_r^p / K_r^n$  для кремния р-типа и кремния n-типа от относительного вклада ПВА с энергиями выше порога образования областей разупорядочения  $W$ .

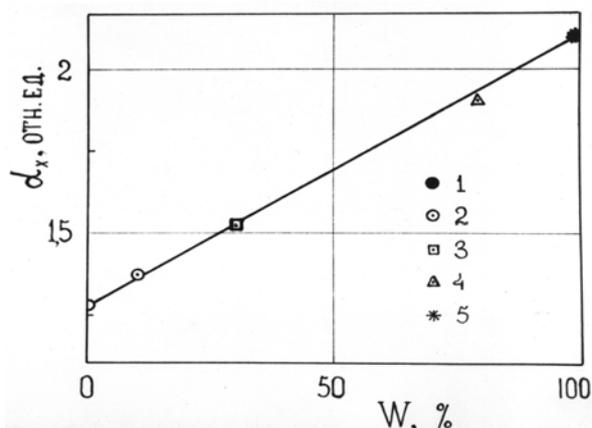


Рис.6. Зависимость отношения эффективности радиационного повреждения кремния р-типа к эффективности радиационного повреждения кремния n-типа ( $d_x = K_r^p / K_r^n$ ) от относительного вклада ПВА с энергиями выше порога образования областей разупорядочения  $W$ . 1-3 – облучение электронами с энергиями соответственно 10, 25 и 250 МэВ; 4 – облучение нейтронами с энергией 14 МэВ; 5 – облучение гамма-квантами тормозного спектра с  $E_{\gamma}^{\text{max}} \approx 250$  МэВ

Из рисунка видно, что величина  $d_x$  связана с вкладом  $W$  линейной зависимостью. Используя линейную зависимость, можно получить формулу для определения относительного вклада ПВА, создающих в кремнии ОР

$$W = (d_x - d_1)(d_2 - d_1), \quad (3)$$

где  $d_x = K_r^p / K_r^n \equiv \Delta\tau_p^{-1} / \Delta\tau_n^{-1}$  – отношение эффективностей радиационного повреждения кремния р- и n-типов излучением с неизвестными параметрами;  $d_1$  – калибровочный коэффициент, равный отношению  $\Delta\tau_p^{-1} / \Delta\tau_n^{-1}$ , когда все ПВА, возникающие в кремнии при облучении, имеют энергию ниже порога образования ОР;  $d_2$  – калибровочный коэффициент, равный отношению  $\Delta\tau_p^{-1} / \Delta\tau_n^{-1}$ , когда все ПВА, возни-

кающие в кремнии при облучении, имеют энергию выше порога образования ОР.

Величины  $d_1$  и  $d_2$  можно получить, облучая кремний р- и n-типов соответственно электронами с энергией  $\leq 10$  МэВ и гамма-квантами тормозного спектра с  $E_{\gamma}^{\max} \geq 250$  МэВ.

Если использовать кремний р- и n-типов с удельным сопротивлением порядка 10 ом·см, то  $d_1=1,28$  и  $d_2=2,08$  и формула (3) принимает вид  $W=1,6(d_x/1,28-1)=1,25(d_x-1,28)$ .

Облучению электронами с энергиями 25 и 250 МэВ соответствует вклад  $W \approx 10\%$  и  $30\%$ . При облучении же кремния гамма-квантами с  $E_{\gamma}^{\max} \approx 250$  МэВ практически все смещения создаются ПВА с энергией  $T$  более 8 кэВ. Для нейтронов  $W \approx 75\%$ . Формула (3) может использоваться для определения в кремнии и кремниевых планарных детекторах доли повреждений, входящих в каскадные области разупорядочения, при облучении излучением с неизвестными параметрами.

Излучением с неизвестными параметрами при облучении кремния и полупроводниковых детекторов на ускорителях электронов чаще всего бывает электронно-фотонный ливень, развивающийся в элементах ускорителя или в элементах детектора, например, в сцинтилляторе детектирующей системы сцинтиллятор-фотодиод. На Рис.7 представлены результаты измерений радиационного воздействия электронно-фотонного ливня на кремний при энергии первичных электронов 500 МэВ.

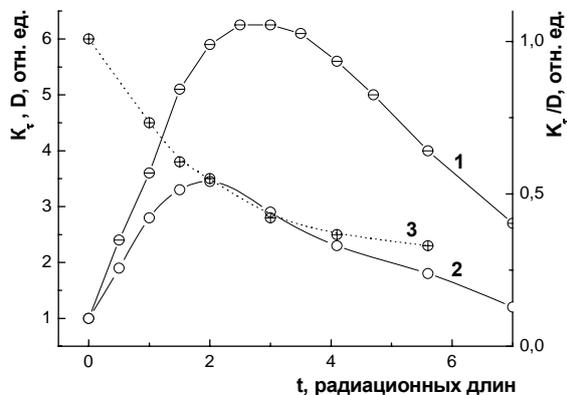


Рис.7. Радиационное воздействие электронно-фотонного ливня на кремний, расположенный за экраном из тяжелого материала. 1 - изменение поглощенной дозы  $D$  при развитии электронно-фотонного ливня; 2 - зависимость эффективности радиационного повреждения кремния ( $K_t$ ) электронами с энергией 500 МэВ от толщины экрана из тяжелого сцинтиллятора; 3 - зависимость изменения отношения  $K_t/D$  при развитии электронно-фотонного ливня

Измерения проводились при размерах первичного пучка электронов  $\sim 10$  мм. Из Рис.7 видно, что при развитии электронно-фотонного ливня поглощенная доза  $D$  и радиационная константа  $K_t$  сначала увеличиваются в результате увеличения плотности потока воздействующих частиц, затем, после достижения максимума, начинается спад. Отношение  $K_t/D$

при развитии электронно-фотонного ливня в исследованном диапазоне радиационных длин  $t$  уменьшается, вероятно, в следствии уменьшения энергии частиц электронно-фотонного ливня.

Таким образом, из Рис.7 видно, что при развитии электронно-фотонного ливня условия облучения кремния изменяются и поэтому необходимо знать не только изменение  $K_t$ , но и изменение доли повреждений, входящих в каскадные области разупорядочения.

## ВЫВОДЫ

Основным фактором радиационного повреждения является концентрация первичных радиационных повреждений, которая определяется интегральной плотностью потока воздействующих на материал частиц. Но образование стабильных дефектов в облучаемых материалах зависит не только от концентрации первичных радиационных повреждений, но и от распределения их в объеме материала. Распределение первичных радиационных повреждений в объеме вещества определяется энергией первично выбитых атомов. В зависимости от величины полученной энергии, первично выбитый атом может образовать либо изолированную пару Френкеля, либо каскадную область смещений – область разупорядочения. Область разупорядочения оказывает существенное влияние на электрофизические параметры полупроводников и детекторов. По этой причине необходимо знать не только концентрацию первичных радиационных повреждений, но и долю повреждений входящих в каскадные области смещений. Для определения доли повреждений, входящих в каскадные области смещений, проведены экспериментальные исследования воздействия на кремний р- и n-типов электронов и фотонов в широком интервале энергий. Предложен метод определения доли повреждений, входящих в каскадные области смещений, основанный на одновременном измерении констант радиационного повреждения кремниевых образцов р- и n-типов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Fabio Sauli. High-rate, position-sensitive radiation detectors: recent developments and application in particle physics, medicine and technology // *CERN-PRE/94-150*, 24 August 1994.
2. J. Schukraft, H. Gutbrot, G.L. Bocek, et al. ALICE Technical Proposal / *CERN/LHC 95-71, LHCC/P3*, 15 Decemder 1995.
3. N. Maslov, V. Kulibaba, S. Potin, et al. Radiation tolerance of single-sided microstrip detector with Si 3N4 insulator // *Nuclear Physics B*. 1999, v.78, p.689-694.
4. A.S. Grove. *Physics and Technics of Semiconductor Devices*, New York, Wiley, 1967, Ch. 6, p.176-177.
5. А.П. Антипенко, И.А. Гришаев, В.И. Касилов и др. Измерение эффективности радиационного повреждения полупроводников импульсным пучком электронов // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1975, в.1(2), с.86.

6. Н.И. Маслов, Г.Д. Пугачёв, М.И. Хейфец. Эффективность радиационного воздействия электронов с энергией 8...1000 МэВ на кремний // *ФТП*. 1982, в.3, с.513-516.
7. Н.И. Маслов, Г.Д. Пугачёв, М.И. Хейфец и др. Воздействие гамма-квантов тормозного спектра с максимальной энергией 8...1500 МэВ на кремний // *ФТП*. 1984, в.4, с.585-588.
8. Н.В. Кузнецов, Г.Г. Соловьев. *Радиационная стойкость кремния*. М.: «Энергоатомиздат», 1989, с.95.
9. А.Н. Орлов, Ю.В. Трушин. Современные представления о структуре и эволюции радиационных каскадов в твердых телах // *Моделирование на ЭВМ дефектов в кристаллах*. Л.: ФТИ АН СССР, 1979, с.8-39.
10. Н.А. Ухин. Модель разупорядоченных областей в кремнии, создаваемых быстрыми нейтронами // *ФТП*. 1972, т.6, в.5, с.931-934.
11. В.И. Кузнецов, П.Ф. Лугаков. Влияние условий облучения и примесного состава кремния на параметры областей скопления дефектов // *ФТП*. 1983, в.10, с.1902-1904.
12. P. Kuijjer, A. Kaplij, V. Kulibaba, N. Maslov, et al. Control complex for a double-sided microstrip detector production and tests // *ВАНТ. Серия «Ядерно-физические исследования»*, 2000, №2(36), с.41-45.

*Статья поступила в редакцию 27.11.2009 г.*

## DEFINITION OF THE RADIATION DEMAGING FACTORS OF ACCELERATED ELECTRONS AND BREMSSTRAHLUNG ON SEMICONDUCTOR MATERIALS

*N.I. Maslov*

The formation of stable defects in irradiated materials depends not only on a concentration of primary radiation damages, but also from distribution them in a material volume. The distribution of primary radiation damages in a material volume is determined by energy of primary displaced atoms (PDA). Depending on value of the obtained energy T, PDA can create or insulated Frankel pair (steady or unstable), or cascade area of displacements. In silicon at development of the displacements cascade from PDA with energy  $\geq 10$  кэВ the large stable structural damaging is created called as disorder area. The disorder area renders essential influencing on physical properties of semiconductors. In the given activity the researches of silicon damaging by electrons and photons in a wide energy rang are presented and the method of definition of a damages percentage which are included in of cascade area of displacement was proposed.

## ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТОРІВ РАДІАЦІЙНОГО ВПЛИВУ ПРИСКОРЕНИХ ЕЛЕКТРОНІВ І ГАЛЬМОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

*М.І. Маслов*

Утворення стабільних дефектів в матеріалах, що опромінюють, залежить не тільки від концентрації первинних радіаційних ушкоджень, але й від розподілу їх в обсязі матеріалу. Розподіл первинних радіаційних ушкоджень в обсязі речовини визначається енергією первинно вибитих атомів (ПВА). Залежно від величини отриманої енергії T, первинно вибитий атом може утворити або ізольовану пару Френкеля (стійку або нестійку), або каскадну зону зсувів. У кремнії при розвитку каскаду зсувів від ПВА з енергією  $\geq 10$  кеВ утворюється велике стабільне структурне порушення, що називають зоною розупорядкування. Зона розупорядкування має значний вплив на електрофізичні параметри напівпровідників. Приводяться результати досліджень впливу на кремній електронів і фотонів у широкому інтервалі енергій та запропонований метод визначення частки ушкоджень, що входять у каскадні зони зсувів.