

К вопросу о стабилизации электрофизических свойств в компенсированном кремнии при облучении γ -квантами ^{60}Co

© М.С. Юнусов[¶], М. Каримов, М.А. Джалелов

Институт ядерной физики академии наук Республики Узбекистан,
702132 Ташкент, Улугбек, Узбекистан

(Получена 27 мая 1999 г. Принята к печати 2 августа 2000 г.)

Исследуется изменение концентрации носителей заряда в компенсированном кремнии (полученном предварительным облучением) под воздействием облучения γ -квантами. Обнаружено, что скорость удаления носителей заряда в компенсированном кремнии меньше, чем в контрольном образце. Обсуждается новый механизм, обуславливающий радиационную стабильность электрофизических свойств компенсированного кремния.

В кремнии дефекты, создающие глубокие энергетические уровни (ГЭУ), являются одним из способов формирования необходимого комплекса электрофизических и фотоэлектрических свойств облучаемого материала. Показано существенное влияние наличия примесей на радиационную стабильность параметров дефектов, создающих ГЭУ в кремнии. Этот факт в большинстве опубликованных работ [1–6] объясняется одновременной реализацией двух механизмов под действием радиации: переходом части электрически неактивных атомов примеси в электрически активное состояние (канал 1) и усилением ухода первичных радиационных дефектов: вакансий (V) и собственных междоузельных атомов (I) на дополнительные стоки (канал 2) в легированном материале (в качестве таких стоков выступают границы раздела между примесными микровключениями и матрицей).

Следует отметить, что уменьшение концентрации радиационных компенсирующих центров (в результате реализации 1 и 2 каналов) и одновременное увеличение концентрации компенсирующих примесных центров (в результате реализации 1-го канала) в процессе облучения не является самой главной причиной уменьшения скорости удаления носителей в легированном кремнии с ГЭУ. Использование этой идеи в решении проблемы радиационной стабильности (по проводимости) легированного материала нуждается в своем доказательстве, так как механизма повышения радиационной стабильности материала с ГЭУ пока остается не до конца выясненным. Причиной этого является недостаточная изученность поведения примесей в кремнии с ГЭУ после термодиффузии в зависимости от скорости охлаждения, повторной термообработки и воздействия проникающей радиации. Отметим, что любой из вышеуказанных факторов приводит к изменению подвижности и концентрации носителей заряда (степени компенсации), а также к изменению условий их рекомбинации. Это вызывает значительные изменения объемно-градиентных явлений, обусловленных неравномерным распределением основных и технологических примесей в компенсированном кремнии [7,8]. Каждый

микроучасток в зависимости от степени компенсации имеет положительный или отрицательный потенциал относительно соседнего, т.е. в объеме кристалла создается случайный электрический потенциал, который существенно влияет на явления переноса носителей заряда. Однако, несмотря на это, отсутствуют целенаправленные исследования по изучению роли градиента концентрации носителей заряда и микронеоднородности по проводимости в радиационной стабильности электрофизических свойств компенсированного материала с ГЭУ.

Цель работы — выявление процессов, приводящих к радиационной стабильности электрофизических свойств компенсированного материала.

Компенсированный кремний с ГЭУ получался путем облучения двумя видами радиации, отличающимися особенностью дефектов, генерируемых ими в материале, в частности нейтронами атомного реактора (образцы типа 1) и γ -квантами ^{60}Co (образцы типа 2), т.е. компенсированный кремний получался путем компенсации радиационными центрами. Тем самым в образцах типа 2 исключались оба канала воздействия радиации (для реализации 1 и 2 каналов в образцах отсутствует скопление примесных атомов, создающих ГЭУ). В образцах типа 1 исключался 1-й канал и был оставлен 2-й канал (в образцах для реализации 2-го канала имеются области разупорядочения).

В качестве исходного материала использовался $n\text{-Si(P)}$ с $\rho \approx 3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, выращенный методом Чохральского с плотностью дислокаций $\sim 10^4 \text{ см}^{-2}$. Различная степень микронеоднородности по проводимости осуществлялась путем изменения степени компенсации примеси и изменения проводимости кремния, облучением быстрыми нейтронами (образцы типа 1) и γ -квантами (образцы типа 2). При этом степень компенсации $K = N_{\text{RD}}/n$ (где N_{RD} — концентрация компенсирующих радиационных центров, n — средняя концентрация основных носителей) для образцов типа 1 и 2 составляла $K = 0.2 \div 0.9$. Параметры образцов приведены в таблице. Расчет размеров (r) и амплитуды флуктуации (Δ_0) в зависимости от концентрации радиационных центров в кремнии про-

[¶] E-mail: yunusov@suninp.tashkent.su

Параметры образцов типа 1 и 2 при $T = 300$ К

Тип образцов	Удельное сопротивление, ρ , Ом · см	Подвижность носителей заряда, μ , см ² /В · с	Концентрация носителей заряда, n , см ⁻³	Степень компенсации, K	Относительный разброс значений концентрации носителей заряда, δ , %	Амплитуда флуктуации, Δ_0 , эВ	Размер флуктуации, r , 10^{-5} см
Исходный образец (до предварительного облучения)	2.8	1500	$1.5 \cdot 10^{15}$		13		
Образец типа 1 (нейтронное облучение)*	4.6	1500	$8.5 \cdot 10^{14}$	0.43	23	0.0053	0.97
	12	1390	$3.7 \cdot 10^{14}$	0.75	54	0.022	2.00
	32	1150	$1.7 \cdot 10^{14}$	0.87	117	0.031	3.54
Образец типа 2 (γ -облучение)	3.7	1400	$1.2 \cdot 10^{15}$	0.2	16	0.0060	0.59
	8.5	1270	$5.8 \cdot 10^{14}$	0.61	35	0.016	1.40
	16	1000	$3.9 \cdot 10^{14}$	0.74	51	0.021	1.94
	33	900	$2.1 \cdot 10^{14}$	0.85	95	0.029	3.08

Примечание. *При расчете амплитуды и размера флуктуации, а также разброса концентрации в образцах типа 1 не учтено влияние областей разупорядочения.

водился по известным формулам [9]:

$$r = (N_{RD})^{1/3} / n^{2/3}, \quad \Delta_0 = (e^2 \chi) (N_{RD})^{2/3} / n^{1/3},$$

где e — заряд электрона, χ — диэлектрическая проницаемость. Разброс величины концентрации носителей между высокоомной (n^{\max}) и низкоомной (n^{\min}) областями рассчитывался также по известным формулам [10]:

$$\delta = 2(n^{\max} - n^{\min}) / (n^{\max} + n^{\min}).$$

Как видно из таблицы, на основе кремния n -типа с одинаковыми исходными параметрами путем облучения (нейтронами и γ -квантами) получены частично компенсированные образцы (типа 1 и 2) с различными степенями микронеоднородности по проводимости. С ростом концентрации радиационных центров повышается разброс концентрации носителей заряда δ , амплитуда Δ_0 и размер r флуктуаций, а также понижается подвижность носителей заряда μ .

Для сравнения параллельно исследовались контрольные (предварительно не облученные) образцы кремния с близкой проводимостью n -Si(P) (образцы типа 3).

Начальная (10%-ая) скорость удаления носителей заряда ($\Delta n / \Phi$) при γ -облучении с мощностью дозы ~ 2000 Р/с исследовалась методом измерения коэффициента Холла и удельного сопротивления.

На рис. 1 приведены зависимости начальной скорости удаления носителей в γ -облученном кремнии от начальной концентрации носителей (до γ -облучения). Полученные экспериментальные результаты удовлетворительно описываются следующими зависимостями для образцов:

$$\text{типа 1} \quad \Delta n / \Phi = 3 \cdot 10^{-20} n, \quad (1)$$

$$\text{типа 2} \quad \Delta n / \Phi = 5 \cdot 10^{-15} n^{0.66}, \quad (2)$$

$$\text{типа 3} \quad \Delta n / \Phi = 4.2 \cdot 10^{-11} n^{0.4}, \quad (3)$$

где n — начальная концентрация электронов (при $T = 300$ К).

При использовании выражений (1)–(3) необходимо учитывать то, что они справедливы в интервале концентрации $10^{14} \div 2 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Следует отметить, что полученные результаты в образцах типа 3 практически совпадают с данными [11].

Как видно из рис. 1, начальная скорость удаления носителей $\Delta n / \Phi$ при одинаковой концентрации носителей заряда в образцах типа 1 значительно ниже, чем в образцах типа 2, и это объясняется усилением ухода первичных радиационных дефектов на стоки (области разупорядочения) [12–14]. Также видно, что величина $\Delta n / \Phi$ значительно ниже в компенсированных образцах (прямые 1 и 2), чем в контрольном кремнии (прямая 3),

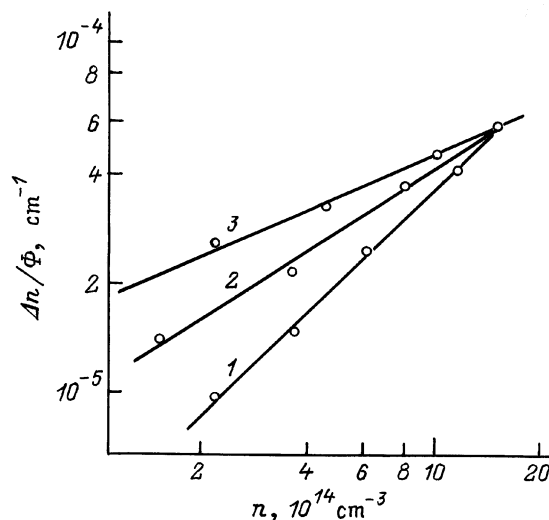


Рис. 1. Зависимости начальной скорости удаления носителей заряда при облучении γ -квантами ^{60}Co от начальной концентрации носителей в образцах компенсированного кремния, полученных облучением быстрыми нейтронами (1), γ -квантами (2) и в контрольном кремнии (3).

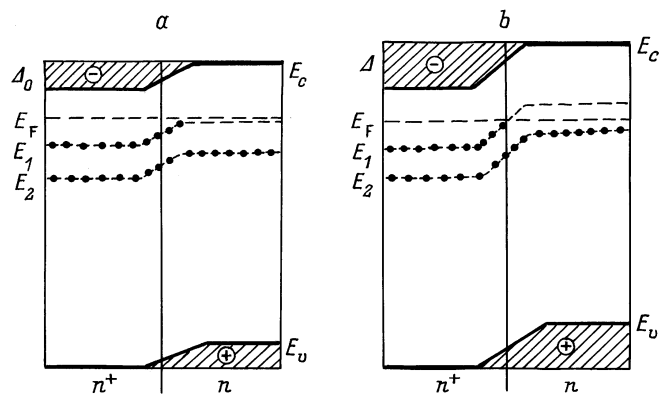


Рис. 2. Модели неоднородных n^+ - и n -областей, образующихся в n -Si(P), компенсированном радиационными центрами до (а) и после повторного γ -облучения (b). $E_1 = E_c - 0.34$ эВ, $E_2 = E_c - 0.44$ эВ.

причем $\Delta n/\Phi$ падает с возрастанием степени компенсации в образцах типов 1 и 2. Для объяснения этого факта предлагается барьерная модель (рис. 2). Суть этой модели заключается в следующем.

При современной технологии выращивания кристаллов кремния из-за неравномерного распределения основных легирующих примесей фосфора (или бора) и технологических примесей кислорода в объеме кристалла образуются низкоомные (n^+) и высокоомные (n) области проводимости. Даже при равномерном распределении концентрации компенсирующих радиационных дефектов при облучении таких кристаллов (в виду исходного неравномерного распределения примесей, в данном случае фосфора) происходит неравномерная компенсация электрически активных примесей в образце. Причем с ростом степени компенсации, как указано выше (см. таблицу), возрастает амплитуда разброса концентрации носителей заряда между этими областями. Наличие контактов между n^+ - и n -областями приводит к возникновению потенциального барьера (Δ_0). Считалось, во-первых, что при компенсации примесей в кремнии (типа 1 и 2) образуются центры с $E_c - 0.18$ эВ (А-центры), $E_c - 0.23$ эВ (дивакансии), $E_c - 0.34$ эВ и $E_c - 0.44$ эВ (Е-центры) [15]; во-вторых, уровень Ферми в n^+ -области находится между уровнями $E_c - 0.34$ эВ и $E_c - 0.44$ эВ, т.е. энергетические уровни А-центра и дивакансии находятся над уровнем Ферми, и поэтому эти уровни полностью ионизованы, что касается центров с $E_c - 0.34$ эВ и $E_c - 0.44$ эВ, то ввиду их расположения относительно уровня Ферми они заполнены электронами. В n -области уровень $E_c - 0.34$ эВ частично ионизован, а центр с $E_c - 0.44$ эВ заполнен электронами (рис. 2, а).

При γ -облучении (на начальных этапах) n -области кристалла (типа 1 и 2) становятся более высокоомными, а n^+ -области, практически не чувствуя компенсацию носителей, остаются такими же низкоомными как и до облучения, т.е. благодаря существенному различию степени компенсации примесей в n^+ - и n -областях в ком-

пенсированном кремнии растет высота потенциального барьера между ними $\Delta_0 \rightarrow \Delta$ (в нашем случае А-центры и дивакансии не участвуют в удалении носителей, поскольку положение уровня Ферми $E_F > E_c - 0.23$ эВ) (рис. 2). Рост высоты барьера $\Delta_0 \rightarrow \Delta$ приводит к росту концентрации ионизованных центров $E_c - 0.34$ эВ в n -области (соответственно к уменьшению степени заполнения). Освободившиеся (в результате ионизации центров $E_c - 0.34$ эВ в n -областях) электроны захватываются глубокими радиационными дефектами $E_c - 0.44$ эВ. Концентрация носителей заряда в зоне проводимости неоднородного (компенсированного) материала остается практически неизменной с ростом дозы облучения до тех пор, пока концентрация освободившихся электронов (в результате ионизации уровня $E_c - 0.34$ эВ в n -областях) не сравняется с концентрацией радиационных дефектов, образующихся, в данном случае, в процессе облучения γ -квантами, т.е. пока не происходит существенное изменение положения уровня Ферми в низкоомной n^+ -области, поскольку в таком неоднородном материале в основном токопроводящей является именно n^+ -область [16].

Таким образом, снижение скорости удаления носителей заряда под действием γ -квантов можно объяснить в основном радиационным усилением флуктуационных барьеров между низко- и высокоомной областями и усилением ухода части образующихся дефектов типа V и I на стоки в компенсированном кремнии с глубокими уровнями.

Список литературы

- [1] Е.Ф. Уваров, М.В. Чукичев. В сб.: *Радиационная физика неметаллических кристаллов* (Минск, Наука и техника, 1970) с. 81.
- [2] М.К. Бахадырханов, С.З. Зайнабиддинов, А.Т. Тешабаев. *ФТП*, **11**, 285 (1977).
- [3] М.К. Бахадырханов, Ф.М. Талипов. *ФТП*, **16**, 574 (1982).
- [4] С.З. Зайнабиддинов, Э.Э. Рубинов. *Нейтронно-трансмутационное легирование кремния* (Ташкент, Фан, 1983).
- [5] К.П. Абдурахманов, Р.Ф. Витман, Х.С. Далиев, А.А. Лебедев, Ш.Б. Утамурадова. *ФТП*, **19**, 1617 (1985).
- [6] С.З. Зайнабиддинов, Х.С. Далиев. *Дефектообразование в кремнии* (Ташкент, Изд-во Ташк. гос. ун-та, 1993).
- [7] И.Д. Конозенко, А.К. Семенюк, В.И. Хиврич. *Радиационные эффекты в кремнии* (Киев, Наук. думка, 1974) с. 199.
- [8] В.Л. Винецкий, Г.А. Холодарь. *Радиационная физика полупроводников* (Киев, Наук. думка, 1979) с. 336.
- [9] Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. *Электронные свойства легированных полупроводников* (М., Наука, 1979).
- [10] Дж. Миз, П. Глэррон. В кн.: *Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников*, под ред. Дж. Миза (М., Мир, 1982) с. 239.
- [11] E. Sonder, L.C. Templeon. *J. Appl. Phys.*, **36**, 1811 (1965).
- [12] В.В. Болотов, А.В. Васильев, В.П. Кожевников, С.А. Смагулова, Л.С. Смирнов. *ФТП*, **12**, 1104 (1978).
- [13] *Легирование полупроводников методом ядерных реакций*, под ред. Л.С. Смирнова (Новосибирск, Наука, 1981) с. 181.

- [14] А.В. Васильев, С.А. Смагулова, С.С. Шаймеев. ФТП, **16**, 140 (1982).
[15] А.В. Васильев, С.А. Смагулова, С.С. Шаймеев. ФТП, **16**, 1983 (1982).
[16] М.К. Шейнкман, А.Я. Шик. ФТП, **10**, 209 (1976).

Редактор Т.А. Полянская

**About the radiation stability
of electrophysical properties
in a compensated silicon under γ -rays
 ^{60}Co irradiation**

M.S. Yunusov, M. Karimov, M.A. Zhalelov

Institute of Nuclear Physics,
Academy of Sciences of Uzbekistan
702132 Tashkent, Ulugbek, Uzbekistan

Abstract Change in the concentration of the carrier removal rate in a compensated silicon under the γ -ray irradiation is investigated. It has been found that the carrier removal rate in the compensated silicon is lower than that of control samples. A new mechanism resulting in the radiation stability of electrophysical properties of the compensated silicon is discussed.