

ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКООМНОГО n-Si, ПОЛУЧЕННОГО РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ, ОТ ФЛЮЕНСА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ РЕАКТОРА

А. П. Долголенко, П. Г. Литовченко, А. П. Литовченко, В.Ф. Ластовецкий

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Образцы n-Si с удельным сопротивлением $\sim 2,5 \cdot 10^3$ Ом · см, выращенные методом бестигельной зонной плавки в вакууме (FZ), в атмосфере аргона (Ar) и полученные методом нейтронного трансмутационного легирования (NTD), исследованы до и после облучения быстрыми нейтронами реактора при комнатной температуре. Показано, что радиационная стойкость n-Si определяется, в первую очередь, скоростью введения кластеров дефектов, а уже затем - скоростью введения дефектов в проводящую матрицу n-Si. Эффективная концентрация носителей рассчитана в модельном приближении Госсика с учетом перезарядки дефектов как в проводящей матрице n-Si, так и в областях пространственного заряда кластеров. Температурная зависимость эффективной концентрации носителей в образцах n-Si промоделирована введением только двух акцепторных уровней дефектов ($E_c - 0,43$ эВ) и ($E_c - 0,315$ эВ), независимо от дозы облучения. Исследования показали, что повышенной радиационной стойкостью обладает нейтронно-легированный n-Si, выращенный методом бестигельной зонной плавки в атмосфере аргона.

Полупроводниковые детекторы, создаваемые на основе высокоомного кремния, длительное время должны работать в полях ядерного излучения. Поэтому проблема получения материала, обладающего повышенной радиационной стойкостью, всегда актуальна. Вопросы радиационной стойкости полупроводниковых материалов и приборов на их основе всегда были в центре внимания исследователей. Это позволило выявить влияние примесей, таких как бор, кислород, углерод, олово, германий и других, на радиационную стойкость кремния, наблюдать повышенную радиационную стойкость нейтронно-легированного кремния [1].

Цель работы - исследовать радиационную стойкость кремния n-типа, выращенного различными методами, и, основываясь на теоретическом описании изменений электрических коэффициентов n-Si при облучении быстрыми нейтронами реактора, наметить пути ее повышения.

Образцы n-Si с удельным сопротивлением $\sim 2,5 \cdot 10^3$ Ом · см, выращенные методом бестигельной зонной плавки в вакууме (FZ), в атмосфере аргона (Ar) и полученные методом нейтронно-трансмутационного легирования (NTD), исследованы до и после облучения быстрыми нейтронами реактора при комнатной температуре. Измерения проводимости и постоянной Холла были выполнены методом Ван дер Пау на квадратных образцах n-Si размером $10 \times 10 \times 1$ мм³ компенсационным способом. Контакты создавались втиранием алюминия на шлифованную поверхность кремния.

На рис. 1 представлена дозовая зависимость подвижности носителей заряда, измеренная при комнатной температуре. Видно, что она с увеличением дозы облучения быстрыми нейтронами изменяется во всех образцах n-Si независимо от метода выращивания, а после флюенса $\sim 10^{13}$ н · см⁻² начинает резко уменьшаться. Такое поведение подвижности электронов свидетельствует о том, что радиационная стойкость n-Si определяется, в первую очередь, скоростью введения кластеров дефектов и, в меньшей степени, скоростью введения дивакансий в проводящую матрицу n-Si. На рис. 2 представлена дозовая зависимость эффективной концентрации носителей, описанная в рамках модели Госсика. Такой расчет оказался возможным только до флюенса быстрых нейтронов $\sim 10^{13}$ н · см⁻², так как размеры кластеров дефектов, созданных ядерными частицами в n-Si являются определяющими. После этой дозы облучения положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости в кластерах и в проводящей матрице выравнивается, принимая значение ($E_c - 0,528$ эВ) в

n-Si (FZ), ($E_c - 0,523$ эВ) в n-Si (Ar) и ($E_c - 0,511$ эВ) в n-Si (NTD). При еще больших дозах облучения при расчете коэффициента Холла уже следует учитывать концентрацию дырок, так как предельное положение уровня Ферми, обусловленное дивакансиями, равно ($E_v + 0,39$ эВ). В этой области доз облучения начинается перезарядка кластеров дефектов, когда вновь создаваемые дивакансии отдают дырки, которые тут же захватываются в кластеры.

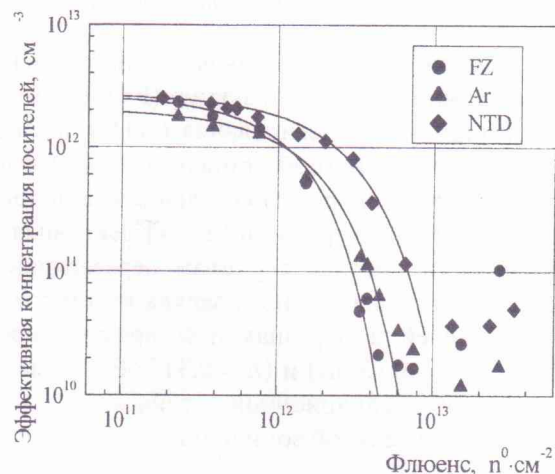
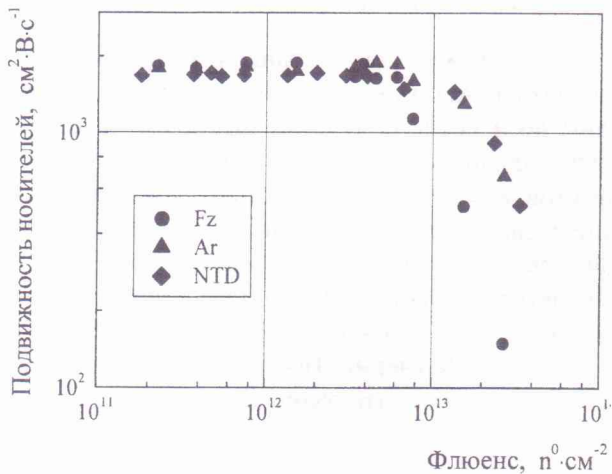


Рис. 1. Зависимость эффективной подвижности электронов от флюенса быстрых нейтронов реактора при комнатной температуре в

● - n-Si(FZ), ▲ - n-Si(Ar), ◆ - n-Si(NTD)

Средняя концентрация носителей (\bar{n}_0) в n-Si: (FZ) - $2,65 \cdot 10^{12}$; (Ar) - $2,04 \cdot 10^{12}$; (NTD) - $2,69 \cdot 10^{12}$ см⁻³.

Рис. 2. Зависимость эффективной концентрации электронов от флюенса быстрых нейтронов реактора при комнатной температуре в

● - n-Si(FZ), ▲ - n-Si(Ar), ◆ - n-Si(NTD)

Эффективная концентрация носителей, согласно работе [2], в зависимости от дозы облучения (Φ) равна

$$n_{эф}(\Phi) = n(\Phi) \cdot (1 - f(\Phi)), \tag{1}$$

где $n(\Phi)$ - концентрация носителей в проводящей матрице n-Si; $f(\Phi)$ - доля объема, занятого кластерами.

Исходя из модели Госсика для объема и согласно работе [3], получим

$$f(\Phi) = 1 - \exp \left[- \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 \sum R_1 \Phi}{N(\Phi) \cdot q^2} \cdot \left(\mu - kT \ln \frac{N_c(T)}{N(\Phi)} \right) \right], \tag{2}$$

где R_1 - средний радиус области скопления дефектов кластера; μ - положение уровня Ферми в кластере относительно дна зоны проводимости; $N_c(T)$ - эффективная плотность состояний в зоне проводимости; $N(\Phi)$ - концентрация экранирующих центров в кластере дефектов.

В предположении, что каждый рассеянный быстрый нейтрон создает кластер дефектов, макроскопическое сечение введения кластеров дефектов (Σ) при облучении n-Si в ВВР-М реакторе $\Sigma = 0,15$ см⁻¹ [3].

В общем случае примесной проводимости [4]

$$n(\Phi) = \left\{ \left[\frac{1}{2} \left(n_{11} - \left(N_d(\Phi) - \frac{N_a(\Phi)}{\lambda} \right) \right) \right]^2 + n_{11} \cdot N_d(\Phi) \right\}^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} \left(n_{11} - \left(N_d(\Phi) - \frac{N_a(\Phi)}{\lambda} \right) \right), \quad (3)$$

$$n_{11} = gN_c(T) \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{\lambda T k}\right); N_d(\Phi) = n_o - v_i \Phi; N_a(\Phi) = v_j \Phi.$$

Здесь $g = 2$ - фактор вырождения акцепторного уровня; $N_d(\Phi)$, $N_a(\Phi)$ - концентрации доноров и акцепторов соответственно; n_o - концентрация носителей в образце до облучения; v_i - скорость удаления носителей из зоны проводимости i -дефектом.

Если акцепторный уровень локализован в проводящей матрице, то $\lambda = 1$, а в случае его нахождения в области пространственного заряда кластера - $\lambda = 1,5$. Как показано в работе [4], значение $\lambda = 1,5$ сохраняется во всем интервале исследованных доз облучения кремния. Предполагается, что $\lambda = 1,5$ также сохраняет свое значение и для высокоомного n -Si, облученного быстрыми нейтронами. Определенное значение λ обусловлено наличием потенциальных барьеров, окружающих кластеры дефектов.

Концентрацию носителей в проводящей матрице образца n -Si можно определить, если учесть суммарную концентрацию носителей $n_1(\Phi)$ и $n_2(\Phi)$, которые будут поставляться в зону проводимости при ионизации акцепторных уровней дефектов: ($E_c - 0,43$ эВ) и ($E_c - 0,315$ эВ):

$$n(\Phi) = n_1(\Phi) + n_2(\Phi) - N_a(\Phi). \quad (4)$$

Концентрация экранирующих центров в области пространственного заряда кластера аналогично равна

$$N(\Phi) = N_{20}(\Phi) + N_{21}(\Phi) - N_a(\Phi) / \lambda. \quad (5)$$

Для расчета дозовой зависимости эффективной концентрации носителей в образце n -Si температурная зависимость концентрации носителей в проводящей матрице n -Si промоделирована постоянной скоростью введения уровня ($E_c - 0,43$ эВ) - отрицательно заряженной дивакансии (скорость введения v_i) и другого глубокого уровня ($E_c - 0,315$ эВ) (скорость введения v_j).

Используемые уровни радиационных дефектов не описывают температурную зависимость концентрации носителей в проводящей матрице, что отчетливо видно на рис. 3. Тем не менее вычисленная концентрация носителей (кривая 2) и промоделированная температурная зависимость концентрации носителей в проводящей матрице (кривая 1) мало отличаются друг от друга при комнатной температуре.

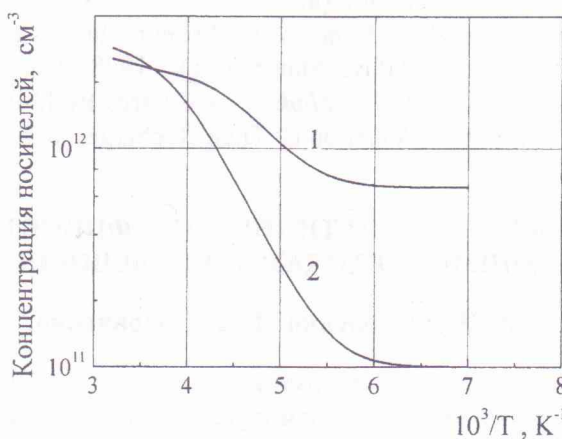


Рис. 3. Концентрация носителей в проводящей матрице n -Si (NTD), облученного быстрыми нейтронами реактора дозой $2 \cdot 10^{12} \text{ н}^0 \cdot \text{см}^{-2}$: 1 - модельный расчет; 2 - расчет на основе экспериментальных данных согласно уравнениям (4) и (5).

Основные расчетные параметры представлены в таблице. Из рис. 2 и таблицы видно, что повышенной радиационной стойкостью обладает нейтронно-легированный n-Si, выращенный методом бестигельной зонной плавки в атмосфере аргона.

Скорости введения радиационных дефектов ν_i ($E_c - 0,43$ эВ) и ν_j ($E_c - 0,315$ эВ), а также параметры кластеров дефектов: R_1 - средний радиус скопления дефектов и μ - положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости в кластере в n-Si (FZ, Ar, NTD) со средней концентрацией носителей (\bar{n}_o) до облучения

Образец Si	\bar{T} , К	\bar{n}_o , см ⁻³	ν_i , см ⁻¹ ($E_c - 0,43$ эВ)	ν_j , см ⁻¹ ($E_c - 0,315$ эВ)	μ , эВ	R_1 , А
FZ	294,4	$2,65 \cdot 10^{12}$	1,16	0,66	0,528	92
Ar	294,4	$2,04 \cdot 10^{12}$	0,46	0,66	0,523	76
NTD	298,5	$2,69 \cdot 10^{12}$	0,26	0,79	0,511	76

Быстрые нейтроны реактора в этом материале создают кластеры дефектов с меньшим средним размером области скопления дефектов и почти в два раза меньшей скоростью введения дивакансий в проводящую матрицу образцов по сравнению с кремнием, выращенным в атмосфере аргона. Известно, что при выращивании кремния в атмосфере аргона существует возможность его вхождения в решетку кремния, а восстановительный отжиг нейтронно-легированного n-Si приводит к образованию дислокационных петель. Тогда присутствие атомов аргона и дислокационных петель в решетке кремния создает деформационные поля, которые, по-видимому, способствуют рекомбинации дивакансий и межузельных атомов кремния.

По мнению авторов, одним из путей повышения радиационной стойкости кремния является создание центров рекомбинации вакансий и межузельных атомов по типу дислокационных петель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колковский И.И., Лугаков Л.Ф., Шуша В.В. Рекомбинационные свойства радиационных дефектов в Si(NTD) // ФТП. - 1986. - Т. 20, вып. 5. - С. 964 - 967.
2. Dolgolenko A.P. Variation of Carrier Removal Rate with Irradiation Dose in Fast-Pile Neutron Irradiated n-Si // Phys. Stat. Sol. (a). - 2000. - Vol. 179. - P. 179 - 188.
3. Dolgolenko A.P., Fishchuk I.I. Defekt Clusters and Simple Defect Build-Up Kinetics in Fast-Neutron Irradiated n-Si // Phys. Stat. Sol. (a). - 1978.- Vol. 50. - P. 751 - 755.
4. Dolgolenko A.P., Fishchuk I.I. A-Centres Build-up Kinetics in the Conductive Matrix of Pulled n-Type Silicon with Calculation of Their Recharges at Defect Clusters // Phys. Stat. Sol. (a). - 1981.- Vol. 67. - P. 407 - 411.

ЗАЛЕЖНІСТЬ КІНЕТИЧНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ ВИСОКООМНОГО n-Si, ОТРИМАНОГО РІЗНИМИ МЕТОДАМИ, ВІД ФЛЮЕНСУ ШВИДКИХ НЕЙТРОНІВ РЕАКТОРА

А. П. Долголенко, П. Г. Литовченко, А. П. Литовченко, В. Ф. Ластовецкий

Зразки n-Si з питомим опором $\sim 2,5 \cdot 10^3$ Ом · см, отримані методом безтигельної зонної плавки у вакуумі (FZ), в атмосфері аргону (Ar) та одержані методом нейтронного трансмутаційного легування (NTD), досліджувалися до і після опромінення швидкими нейтронами реактора при кімнатній температурі. Радіаційна стійкість n-Si визначається, у першу чергу, швидкістю введення кластерів дефектів, а потім уже швидкістю введення дефектів у матрицю провідності n-Si. Виміряна при кімнатній температурі ефективна концентрація носіїв розрахована в модельному наближенні Госсіка з урахуванням перезарядки дефектів у матриці провідності n-Si, а також в областях просторового заряду кластерів. Для розрахунку дозової залежності ефективної концентрації носіїв у зразках n-Si хід температурної кривої концентрації носіїв у матриці провідності n-Si промодельовано

з постійною швидкістю введення двох акцепторних рівнів дефектів ($E_c - 0,43$ eV) та ($E_c - 0,315$ eV). Дослідження показали, що підвищену радіаційну стійкість має нейтронно-легований n-Si, отриманий методом безтигельної зонної плавки в атмосфері аргону.

THE DEPENDENCE OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF HIGH-RESISTANCE n-SI, GROWN BY VARIOUS METHODS ON FAST-PILE NEUTRONS FLUENCE

O. P. Dolgolenko, P. G. Litovchenko, O. P. Litovchenko, V. F. Lastovetsky

Silicon n-type samples with resistivity $\sim 2.5 \cdot 10^3$ Ohm \cdot cm grown by the method of the floating-zone (FZ) in vacuum, in argon atmosphere (Ar) received by the method of transmutation doping (NTD) are investigated at room temperature before and after irradiation by fast-pile neutrons. Our experimental studies has shown that the radiation hardness of n-type silicon is determined in the first place by the introduction rate of the defect clusters and then already by the introduction rate of point defects in conducting matrix of n-Si. The effective concentration of carriers, measured at room temperature, is determined in the framework of Gossick's model taking into account the recharges of defects both in conducting matrix of n-Si and in the space-charge region of defect clusters. The temperature dependence of the concentration of carriers in conducting matrix of n-Si is simulated with constant introduction rate of two acceptor levels at ($E_c - 0,43$ eV) and ($E_c - 0,315$ eV) under the calculating of the dependence dose of effective concentration of carriers. Our research has shown that neutron-transmutation-doped n-Si, grown by the method of a floating-zone in argon atmosphere possess the increased radiation hardness.

Поступила в редакцію 22.02.02,
после доработки – 17.09.02.