

КИНЕТИКА НАКОПЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПРОВОДЯЩЕЙ МАТРИЦЕ n-Si, ОБЛУЧЕННОГО БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ РЕАКТОРА

А. П. Долголенко, П. Г. Литовченко, М. Д. Варенцов, В. Ф. Ластовецкий

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Исследован высокоомный нейтронно-легированный n-Si, выращенный методом бестигельной зонной плавки в атмосфере аргона после облучения быстрыми нейтронами реактора. Рассчитаны температурные зависимости эффективной концентрации носителей после различных доз облучения. Расчет выполнен в модельном приближении Госсика с учетом перезарядки дефектов как в проводящей матрице n-Si, так и в областях пространственного заряда кластеров. Показано, что с увеличением дозы облучения средний радиус кластеров дефектов растет. Скорость введения дивакансий в проводящую матрицу этого n-Si в пять раз ниже, чем в кремнии, выращенном методом бестигельной зонной плавки в вакууме. При нейтронно-трансмутационном легировании кремния до концентрации носителей около 10^{14} см^{-3} повторное облучение быстрыми нейтронами реактора показало, что скорость введения дивакансий уменьшилась примерно еще в два раза. Можно предположить, что в нейтронно-легированном кремнии после восстановительного отжига остаются центры рекомбинации дивакансий.

Проблемам повышения радиационной стойкости высокоомного n-Si, используемого для создания полупроводниковых детекторов ядерного излучения, всегда уделялось особое внимание. Наши ранние исследования показали, что нейтронно-легированный n-Si (NTD), предварительно полученный методом бестигельной зонной плавки в атмосфере аргона, обладает повышенной радиационной стойкостью.

Цель работы - выяснить причины повышения радиационной стойкости n-Si (NTD), облученного быстрыми нейтронами реактора, исследуя кинетику накопления радиационных дефектов и их стабильность в процессе отжига.

Нейтронно-легированный n-Si, полученный методом бестигельной зонной плавки в атмосфере аргона, облучался на горизонтальном канале различными дозами быстрых нейтронов реактора ВВР-М при комнатной температуре. Измерения проводимости и постоянной Холла были выполнены методом Ван дер Пау на квадратных образцах n-Si размером $10 \times 10 \times 1 \text{ мм}^3$ компенсационным способом. Контакты создавались втиранием Al на шлифованную поверхность кремния.

Температурные зависимости эффективной концентрации носителей были рассчитаны после различных доз облучения быстрыми нейтронами реактора, чтобы установить особенности повышенной радиационной стойкости. Как известно, облучение быстрыми нейтронами приводит к образованию, наряду с кластерами дефектов, простых дефектов типа А-, Е-центров и дивакансий не только в проводящей матрице, но и в областях пространственного заряда кластеров [1]. Эффективную концентрацию носителей, согласно [2], можно записать

$$n_{эф} = n(1 - f), \quad (1)$$

где n - концентрация носителей в проводящей матрице n-Si; f - доля объема, занятая кластерами.

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

$$f = 1 - \exp \left[- \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 \sum R_1 \Phi}{N_2 \cdot q^2} \cdot \left(\mu - kT \ln \frac{N_c(T)}{N_2} \right) \right], \quad (2)$$

где R_1 - средний радиус области скопления дефектов кластера; $\mu = 0,51$ эВ - положение уровня Ферми в кластере относительно дна зоны проводимости; $N_c(T)$ - эффективная плотность состояний в зоне проводимости; N_2 - концентрация экранирующих центров в кластерах 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

$$n(T) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{N_a}{\lambda} + n_{11} \right) \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{4 \cdot \left(N_d - \frac{N_a}{\lambda} \right) \cdot n_{11}}{\left(n_{11} + \frac{N_a}{\lambda} \right)^2}} - 1 \right), \quad (3)$$

где $n_{11} = gN_c(T) \exp\left(-\frac{E_a}{\lambda kT}\right)$; $g = 2$ - фактор вырождения акцепторного уровня; N_d , N_a - концентрации доноров и акцепторов соответственно.

Если акцепторный уровень локализован в проводящей матрице, то $\lambda = 1$, а в случае его присутствия в области пространственного заряда кластера - $\lambda = 1,5$. Как показано в работе [1], значение $\lambda = 1,5$ сохраняется во всем интервале исследованных доз облучения кремния. Предполагается, что $\lambda = 1,5$ 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 можно определить, если учесть суммарную концентрацию носителей $n_o(T)$, $n_1(T)$, $n_2(T)$, которые будут поставляться в зону проводимости при ионизации акцепторных уровней (А-центров и уровней дивакансий) при изменении температуры (T)

$$n(T) = n_o(T) + n_1(T) + n_2(T) - 2N_d + N_a. \quad (4)$$

Концентрация экранирующих центров в области пространственного заряда кластера дефектов аналогично равна

$$N_2(T) = N_{20}(T) + N_{21}(T) + N_{22}(T) - 2N_d + \frac{N_a}{\lambda}. \quad (5)$$

Здесь N_a - концентрация второго акцепторного уровня.

Согласно уравнениям (1) – (5), были вычислены температурные зависимости эффективной концентрации электронов в n-Si (NTD) при различных дозах облучения быстрыми нейтронами реактора. Результаты расчета в виде линий и экспериментальные значения в виде точек показаны на рис. 1 - 3.

Параметры радиационных дефектов представлены в табл. 1, а их скорости удаления носителей - в табл. 2. Из табл. 1 видно, что с увеличением дозы облучения средний радиус (R_1) кластеров дефектов растет, изменяясь от 36 до 92 Å. После дозы облучения больше 10^{13} н⁰ · см⁻² положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости в кластерах и в проводящей матрице выравнивается, принимая значение (E_c - 0,51 эВ) при комнатной температуре. При понижении температуры уровень Ферми движется к середине запрещен-

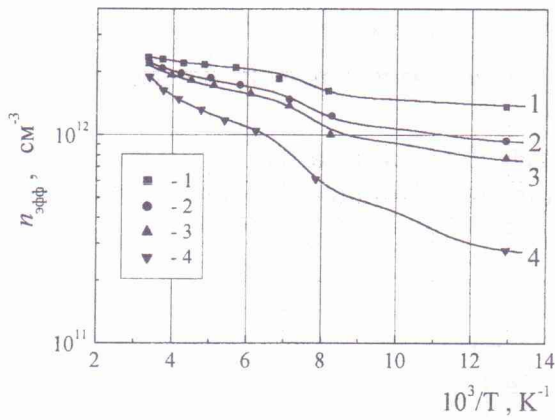


Рис. 1. Температурная зависимость эффективной концентрации электронов после облучения быстрыми нейтронами реактора n-Si (NTD) дозами: 1 - $3,67 \cdot 10^{11}$; 2 - $4,67 \cdot 10^{11}$; 3 - $5,40 \cdot 10^{11}$; 4 - $7,33 \cdot 10^{11} \text{ н}^0 \cdot \text{см}^{-2}$; — - теория; • - эксперимент.

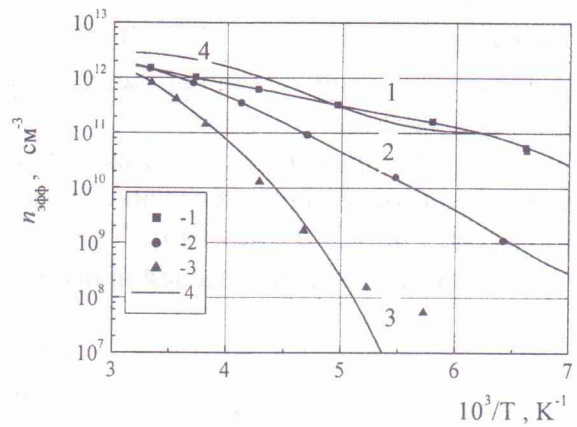


Рис. 2. Температурная зависимость эффективной концентрации электронов после облучения быстрыми нейтронами реактора n-Si (NTD) дозами: 1 - $1,33 \cdot 10^{12}$; 2 - $2,0 \cdot 10^{12}$; 3 - $3,0 \cdot 10^{12} \text{ н}^0 \cdot \text{см}^{-2}$; 4 - концентрация электронов в проводящей матрице n-Si, флюенс $2 \cdot 10^{12} \text{ н}^0 \cdot \text{см}^{-2}$; — - теория; • - эксперимент.

ной зоны, как в случае собственного кремния. Поэтому можно предположить, что кластеры дефектов утратили внешнюю область пространственного заряда. Температурная зависимость концентрации носителей описывается наклоном ($E_c - 0,62 \text{ эВ}$) после дозы облучения $1,33 \cdot 10^{13} \text{ н}^0 \cdot \text{см}^{-2}$ (см. рис. 3). Известно, что концентрация дефектов в кластерах порядка плотности состояний в зоне проводимости. Поэтому предполагается, что при понижении температуры электроны проводимости рекомбинируют с дырками на дефектах кластера. Поскольку основными дефектами в кластере являются дивакансии, то наблюдаемый наклон ($E_c - 0,62 \text{ эВ}$), возможно, принадлежит акцепторному уровню дивакансии ($E_v + 0,51 \text{ эВ}$), предсказанному Винецким [4].

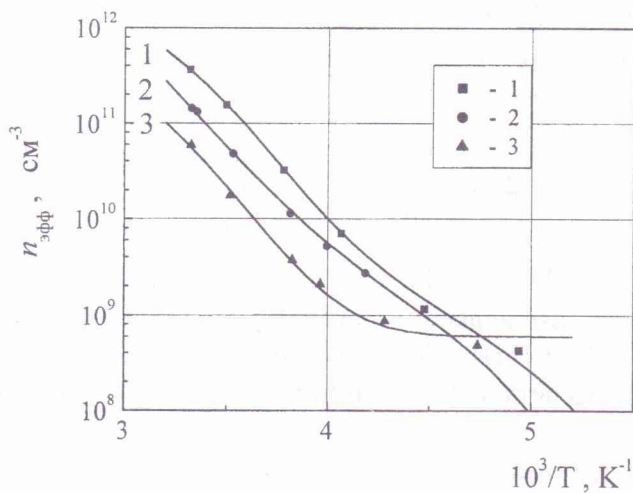


Рис. 3. Температурная зависимость эффективной концентрации электронов после облучения быстрыми нейтронами реактора n-Si (NTD) дозами: 1 - $4,00 \cdot 10^{12}$; 2 - $6,67 \cdot 10^{12}$; 3 - $1,33 \cdot 10^{13} \text{ н}^0 \cdot \text{см}^{-2}$; — - теория; • - эксперимент.

Концентрация углерода и кислорода в образцах кремния не превышала 10^{16} см^{-3} . В то же время скорость введения дивакансий быстрыми нейтронами реактора в проводящую матрицу кремния в пять раз ниже, чем в Si (FZ). Скорость введения уровня ($E_c - 0,39 \text{ эВ}$), который относят к четырехвакансионному дефекту (V_4) такая же, как и в Si (Cz) [2], а скорость введения А-центров примерно в 1,5 раза выше, чем в Si (FZ).

Исследование n-Si, нейтронно-легированного до концентрации $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$, при повторном облучении быстрыми нейтронами реактора показало, что скорость введения дивакансий в проводящую матрицу кремния уменьшилась примерно еще в два раза.

Таблица 1. Вычисленная концентрация (N_a) и энергия уровней (E_a) радиационных дефектов в проводящей матрице n-Si (NTD), облученного различными дозами быстрых нейтронов реактора (Φ); N_b - концентрация экранирующих центров вне нарушенной области кластеров дефектов со средним радиусом R_1

$\Phi, \text{н}^\circ \cdot \text{см}^{-2}$	$n_0, \text{см}^{-3}$	$N_b, \text{см}^{-3}$	$N_a, \text{см}^{-3}$	$E_c - E_a, \text{эВ}$	$R_1, \text{Å}$
$3,67 \cdot 10^{11}$	$2,67 \cdot 10^{12}$	$2,52 \cdot 10^{12}$	$6,0 \cdot 10^{11}$	0,18	36
$4,67 \cdot 10^{11}$	$2,68 \cdot 10^{12}$	$2,52 \cdot 10^{12}$	$7,0 \cdot 10^{11}$	0,18	57
$5,4 \cdot 10^{11}$	$2,64 \cdot 10^{12}$	$2,51 \cdot 10^{12}$	$7,95 \cdot 10^{11}$	0,18	58
$7,33 \cdot 10^{11}$	$2,51 \cdot 10^{12}$	$2,33 \cdot 10^{12}$	$1,08 \cdot 10^{12}$	0,19	64
$1,33 \cdot 10^{12}$	$2,35 \cdot 10^{12}$	$2,05 \cdot 10^{12}$	$1,0 \cdot 10^{12}$	0,315	60
		$1,05 \cdot 10^{12}$	$3,0 \cdot 10^{11}$	0,261	
		$7,5 \cdot 10^{11}$	$1,9 \cdot 10^{12}$	0,204	
$2,0 \cdot 10^{12}$	$3,07 \cdot 10^{12}$	$2,57 \cdot 10^{12}$	$2,47 \cdot 10^{12}$	0,36	76
$3,0 \cdot 10^{12}$	$3,07 \cdot 10^{12}$	$2,32 \cdot 10^{12}$	$1,8 \cdot 10^{12}$	0,405	86
		$5,2 \cdot 10^{11}$	$0,9 \cdot 10^{12}$	0,39	
$4,0 \cdot 10^{12}$	$2,38 \cdot 10^{12}$	$1,48 \cdot 10^{12}$	$1,2 \cdot 10^{12}$	0,39	92
$6,67 \cdot 10^{12}$	$2,51 \cdot 10^{12}$	$2,44 \cdot 10^{12}$	$1,75 \cdot 10^{12}$	0,43	92
$1,33 \cdot 10^{13}$	$2,79 \cdot 10^{12}$	$2,79 \cdot 10^{12}$	$2,78 \cdot 10^{12}$	0,62	-

Таблица 2. Скорость удаления носителей (V) радиационными дефектами в проводящей матрице n-Si (NTD), облученного быстрыми нейтронами реактора

$E_c - E_a, \text{эВ}$	$V, \text{см}^{-1}$	Литературные данные
0,18	1,54	VO_i (A-центр); C_iC_s
0,19	1,47	
0,315	0,75	
0,261	0,23	$\text{V}_2^=$
0,204	1,42	
0,36	1,23	V_2O
0,39	0,3	E170 (V_4)
0,405	0,6	
0,43	0,26	V_2^-
0,47	$5,1 \cdot 10^{-3}$	PV (E-центр)
0,62	0,15	

Итак, повышенная радиационная стойкость n-Si (NTD) проявилась в уменьшении скорости введения дивакансий, что в свою очередь повлияло на средний радиус скопления дефектов в кластерах при малых дозах облучения быстрыми нейтронами реактора.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
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. Vinetskii V.L. On the Statistics of Conductivity in Si Containing Divacancies // Phys. Stat. Sol. - 1970. - Vol. 41. - P. k93 - k97.

**КІНЕТИКА ЗРОСТАННЯ ДЕФЕКТІВ У МАТРИЦІ ПРОВІДНОСТІ n-Si,
ОПРОМІНЕНОГО ШВИДКИМИ НЕЙТРОНАМИ РЕАКТОРА**

О. П. Долголенко, П. Г. Литовченко, М. Д. Варенцов, В. Ф. Ластовецкий

Досліджувався високоомний нейтронно-легований n-Si, отриманий методом безтигельної зонної плавки в атмосфері аргону після опромінення швидкими нейтронами реактора. Знайдено температурні залежності ефективної концентрації носіїв після різних доз опромінення. Розрахунок виконано в модельному наближенні Госсіка з урахуванням перезарядки дефектів у матриці провідності n-Si, а також в областях просторового заряду кластерів. Показано, що із зростанням дози опромінення середній радіус кластерів дефектів збільшується. Швидкість введення дивакансій в матрицю провідності цього n-Si в п'ять разів менша, ніж у кремнії, отриманому методом безтигельної зонної плавки у вакуумі. При нейтронно-трансмутаційному легуванні такого кремнію до концентрації носіїв $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ повторне опромінення швидкими нейтронами реактора показало, що швидкість введення дивакансій зменшилася приблизно ще в два рази. Можна припустити, що в нейтронно-легованому кремнії після відновлювального відпалу залишаються центри рекомбінації дивакансій.

**KINETICS OF DEFECTS ACCUMULATION IN CONDUCTING MATRIX OF n-Si,
IRRADIATED BY FAST-PILE NEUTRONS FLUENCE**

A. P. Dolgolenko, P. G. Litovchenko, M. D. Varentsov, V. F. Lastovetsky

High-resistivity neutron-transmutation-doped n-Si (NTD) have been grown by a method of a floating-zone melting in the atmosphere of argon after irradiation with different doses of fast-pile neutrons is investigated. The temperature dependences of effective concentration of carriers after irradiation are calculated. The calculation was carried out 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. It is shown that the average radius of defect clusters increases with irradiation dose growth. The introduction rate of divacancies in the conducting matrix of n-Si (NTD) is five times less than in n-Si (FZ). During the repeated transmutation doping of such silicon to concentration of carriers $\sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, the repeated irradiation by fast-pile neutrons has shown that the introduction rate of divacancies has decreased approximately for two times. It is possible to assume that in neutron-transmutation-doped n-Si after recovery annealing recombination centres of divacancies are remained.

Поступила в редакцію 22.02.02,
после доработки – 18.09.02.