

© 2011 А. П. Долголенко

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев***ДИФФУЗНОЕ И ДРЕЙФОВОЕ ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В N-ТИПЕ КРЕМНИЯ, ОБЛУЧЕННОГО БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ РЕАКТОРА**

Рассмотрена область температур диффузного и дрейфового движения электронов в n-Si, выращенном методом Чохральского, после облучения быстрыми нейтронами реактора. Описаны температурные зависимости концентрации носителей в проводящей матрице и в объеме образцов и рассчитаны дрейфовые барьеры, определяющие их удельное сопротивление. В рамках уточненной модели эффективной среды описана температурная зависимость удельного сопротивления n-Si ( $\rho_0 = 40 \Omega \cdot \text{см}$ ) после облучения быстрыми нейтронами реактора. Подтверждено, что рассеяние носителей на заряженных дефектах и кластерах при учете дрейфовых барьеров определяют температурную зависимость подвижности электронов в n-Si с введенными кластерами дефектов. Уточнена поправка Херринга подвижности электронов при их диффузном движении в n-типе кремния, облученного быстрыми нейтронами реактора. Дано определение средней концентрации носителей в образце, определяемой из измерений эдс Холла.

*Ключевые слова:* кремний, быстрые нейтроны, кинетические коэффициенты.

**Введение**

Кластеры дефектов, созданные в полупроводниках быстрыми нейтронами реактора, характеризуются высокой концентрацией дефектов, значительной протяженностью их пространственного заряда и вследствие этого они сильно влияют на кинетические коэффициенты, в частности на подвижность носителей в кремнии, изменяя проводимость образцов. Строгий подход был сформулирован в работах [1, 2] к вычислению кинетических коэффициентов в таких неоднородных полупроводниках. Описанию температурной зависимости подвижности электронов в кремнии посвящены работы [3 - 5]. Рассматривая кластеры дефектов как полностью непрозрачные для электронов включения Л. Р. Вейсберг [3] ввел эффективный радиус кластеров в сечение рассеяния. Он показал, что подвижность электронов пропорциональна  $T^{-1/2}$ . В работе [5] получены выражения для холловской и омической подвижности как функция среднеквадратичного отклонения потенциала от среднего значения в области температур диффузного движения электронов. Авторы [6] в борновском приближении доказали задачу по рассеянию носителей на кластерах дефектов до аналитического выражения. Они показали, что подвижность электронов в n-Si пропорциональна  $T^{3/2}$ . Ранее в работах [7], а также [8] рассматривалось рассеяние носителей полем заряженных примесных ионов. Экспериментальное определение показателя степени из температурной зависимости подвижности показало, что его значение значительно больше 3/2 и подвижность электронов в n-Si экспоненциально зависит от температуры. Такое поведение подвижности А. Я. Шик [9] объяснил перекрытием

областей пространственных зарядов кластеров дефектов и образованием дрейфовых барьеров. Искривление изоэнергетических зон в областях пространственного заряда кластеров дефектов приводит к изменению температурной области перезарядки уровней точечных дефектов. Это позволило в рамках модели [10] определить концентрацию носителей в проводящей матрице n-Si после различных доз облучения быстрыми нейтронами реактора [11].

**Экспериментальные результаты**

В работе исследовались образцы n-Si с удельным сопротивлением  $\sim 40 \Omega \cdot \text{см}$ , выращенные методом Чохральского после облучения различными флюенсами быстрых нейтронов реактора. Облучение проводилось на горизонтальном канале реактора ВВР-М при комнатной температуре при потоке  $5 \cdot 10^8 \text{ n}^0/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ . Поток быстрых нейтронов с точностью  $\sim 10\%$  был определен пороговым детектором  $^{32}\text{S}$  (пороговая энергия  $E = 0,95 \text{ МэВ}$ ) и приведен к энергии нейтронов, начиная с  $\sim 100 \text{ кэВ}$ , согласно теоретическому спектру нейтронов. Измерения проводимости и коэффициента Холла были выполнены стандартным компенсационным методом с точностью  $\sim 1$  и  $\sim 3\%$  соответственно.

Экспериментальные результаты представлены на рис. 1 - 4. На рис. 1 и 2 представлена температурная зависимость удельного сопротивления ( $\rho$ ) n-Si, облученного различными дозами быстрых нейтронов реактора. Расчет выполнен в рамках теории эффективной среды с учетом дрейфовых барьеров в проводящей матрице образцов и перезарядки дефектов в областях пространственного заряда кластеров дефектов. На рис. 3 представ-

лены температурные зависимости дрейфовых барьеров ( $E_V$ ) в проводящей матрице образцов, рассчитанные в приближении, что  $\langle n \rangle / n$  отношение зависит только от флюенса. На рис. 4 представлена температурная зависимость экспериментально определяемой подвижности электронов в n-Si, облученном различными дозами быстрых нейтронов реактора. Расчет дрейфовой подвижности при температуре  $T < 150$  К велся с учетом рассеяния на кластерах и точечных де-

фектах и температурной зависимости дрейфовых барьеров. В области температур ( $T > 150$  К) диффузного движения электронов в проводящей матрице учитывалось изменение их подвижности, обусловленное диффузным движением, как в области “озер”, так и в области пространственного заряда. Также вводилась поправка в дрейфовую подвижность электронов, вызванная поляризацией кластеров в электрическом поле.

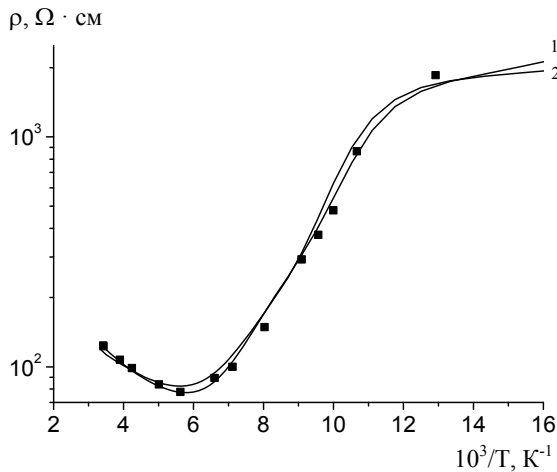


Рис. 1. Температурная зависимость удельного сопротивления образцов n-Si ( $n_0 = 1,205 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , Cz), облученных флюенсом  $3,3 \cdot 10^{13} \text{ н}^0 \cdot \text{см}^{-2}$  быстрых нейтронов реактора. Дрейфовый барьер: 1 -  $E_V(T)$  (рис. 3, кр. 1); 2 -  $E_V(T) = 0$ .

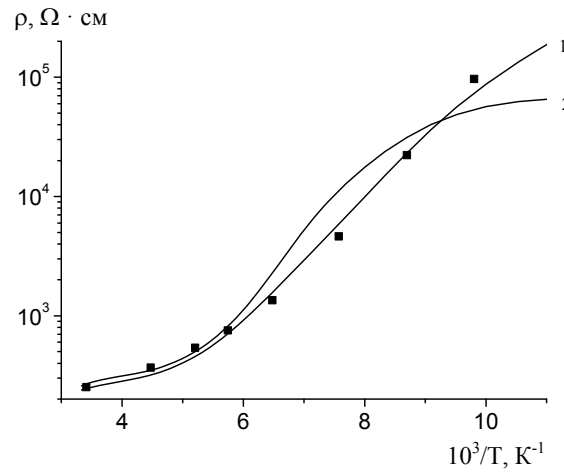


Рис. 2. Температурная зависимость удельного сопротивления образцов n-Si ( $n_0 = 1,205 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , Cz), облученного флюенсом  $4,51 \cdot 10^{13} \text{ н}^0 \cdot \text{см}^{-2}$  быстрых нейтронов. Проводимость (кластеров): 1 -  $\sigma_1 = 5 \cdot 10^{-3} \exp(-E_a/2kT)$ , где  $E_a = 0,11$  эВ; 2 -  $\sigma_1 = 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ .

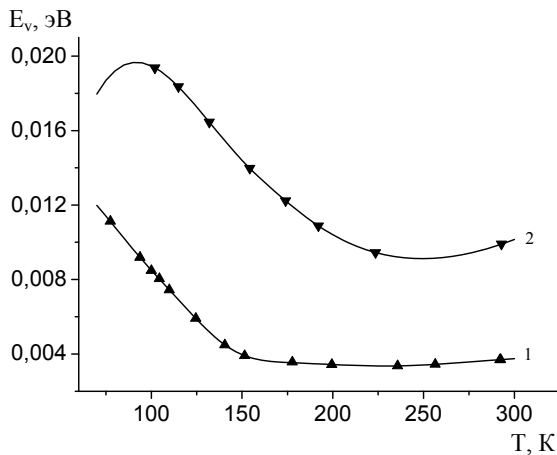


Рис. 3. Температурные зависимости дрейфовых барьеров в проводящей матрице n-Si ( $n_0 = 1,205 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , Cz), облученного быстрыми нейтронами реактора: 1 -  $3,3 \cdot 10^{13} \text{ н}^0 \cdot \text{см}^{-2}$ ,  $\langle n \rangle / n = 0,89568$ ; 2 -  $4,51 \cdot 10^{13} \text{ н}^0 \cdot \text{см}^{-2}$ ,  $\langle n \rangle / n = 0,74396$ .

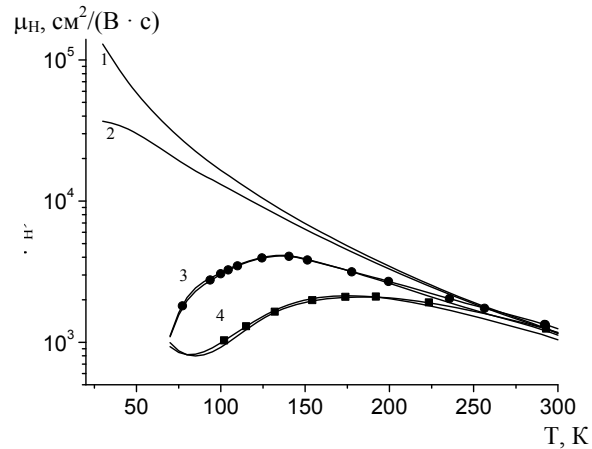


Рис. 4. Температурные зависимости холловской подвижности ( $\mu_H$ ) электронов при дрейфовом и диффузном их движении в n-Si ( $n_0 = 1,205 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , Cz), облученном быстрыми нейтронами реактора флюенсом: 3 -  $3,3 \cdot 10^{13}$ ; 4 -  $4,51 \cdot 10^{13} \text{ н}^0 \cdot \text{см}^{-2}$ . Подвижность, обусловленная фоновым рассеянием электронов в n-Si (1); дрейфовая подвижность электронов в образце до облучения (2); подвижность ( $\mu_H$ ) носителей в образце после облучения (3 и 4); (•) – экспериментальные данные.

### Кинетические коэффициенты. Экспериментальное определение

Несомненно, определение кинетических коэффициентов полупроводников, облученных высокоэнергетическими ядерными частицами, представляет интерес фундаментальной физики твердого тела. Кластеры дефектов, созданные быстрыми нейтронами реактора в объеме полупроводника, не только геометрически блокируют носители тока, что приводит к их диффузному движению [2], но из-за их перекрытия создаются дрейфовые барьеры, тормозящие движение электронов с энергией меньше уровня протекания в электрическом поле [12].

Удельная проводимость проводящей матрицы n-Si после облучения связана с концентрацией носителей ( $n_{ef}$ ) на уровне протекания даже при постоянной концентрации электронов в зоне проводимости и с подвижностью ( $\mu_d$ ) носителей тока с учетом рассеяния на кластерах [6] и заряженных точечных дефектах [7, 8] соотношением  $\sigma = q\mu_d n_{ef}$

$$n_{ef} = n \cdot \exp\left(-\frac{E_V}{kT}\right),$$

где  $n$  - концентрация электронов в проводящей матрице образца после облучения;  $E_V$  - средняя величина дрейфовых барьеров;  $q$  - заряд электрона.

Будем рассматривать область температур ( $T < 150$  K), когда длина свободного пробега электрона в проводящей матрице больше протяженности областей пространственного заряда кластеров дефектов и можно говорить о преимущественном рассеянии на кластерах дефектов. Считается, что коэффициент Холла ( $R$ ) определяется средней по образцу концентрацией  $\langle n \rangle$  носителей:

$$R = \frac{A_0}{q \langle n \rangle},$$

где  $A_0$  - холл-фактор, определяемый с учетом рассеяния на кластерах и точечных дефектах.

Электроны в проводящей матрице движутся под действием приложенного электрического поля не только в областях пространственных зарядов кластеров дефектов, но и в области "озер", где они отсутствуют. Следовательно, среднюю концентрацию носителей в образце можно определить как

$$\langle n \rangle = nF + (1 - F)n_{ef},$$

где  $F$  - доля объема "озер".

Тогда холловская подвижность ( $\mu_H$ ) при  $T < 150$  K равна

$$\mu_H = A_0 \mu_d \cdot \exp\left(-\frac{E_V}{kT}\right) \frac{n}{\langle n \rangle}. \quad (1)$$

Казалось, если в образце дрейфовые барьеры отсутствуют, то величины  $\langle n \rangle$  и  $\mu_H$  определяют в первом приближении просто среднюю концентрацию и подвижность электронов проводящей матрицы. В действительности эффективный объем, непроницаемый для носителей, и, следовательно, сфера на которой происходит рассеяние основных носителей, определяется радиусом [13]

$$r_c = r_2 \frac{1 + 23y^2}{1 + 35y^2}; \quad y = \frac{L_D}{r_2},$$

где  $L_D$  - длина Дебая в области "озер";  $r_2$  - радиус протяженности пространственного заряда кластеров дефектов.

Это значит, что в ~70 % объема кластеров проникают основные носители тока.

Рассмотрим также область температур ( $T > 150$  K), когда длина свободного пробега электрона в образце меньше протяженности пространственного заряда областей кластеров дефектов. В электрическом поле электроны будут двигаться диффузно, огибая недоступные области пространственного заряда. Тогда холловская подвижность при  $T > 150$  K равна [2]

$$\mu_H = \sigma_{ef} R_{ef} (1 - \delta),$$

где  $\delta$  - поправка, обусловленная диффузным движением электрона.

В области температур диффузного движения электронов кластеры дефектов можно рассматривать как диэлектрические включения в проводящей матрице. Тогда, используя выражение для кинетических коэффициентов из теории эффективной среды [14], проводимость ( $\sigma_{ef}$ ) в направлении электрического поля после облучения быстрыми нейтронами равна [15]

$$\sigma_{ef} = \sigma \frac{(1 - L_x)(1 - f)}{1 - L_x(1 - f)} = \sigma \frac{1 - f}{1 + Bf},$$

где  $L_x = 1,2 \cdot \psi^{1,3}$  - коэффициент деполяризации кластеров дефектов с потенциальным барьером  $\psi$  в электрическом поле;  $f$  - доля объема диэлектрических включений (кластеров);  $\sigma$  - проводимость образца в области "озер";  $B = \frac{L_x}{1 - L_x}$  - па-

раметр.

Коэффициент Холла после облучения быстрыми нейтронами

$$R_{ef} = R \cdot (1 - f)^{-1},$$

где  $R^{-1} \text{ см}^{-3}$  - средняя концентрация электронов в области “озер”.

Тогда холловская подвижность ( $\mu_H$ ) при  $T > 150 \text{ К}$  равна

$$\mu_H = A_1 \mu_d \exp\left(-\frac{E_V}{kT}\right) \cdot \frac{(1 - \delta) n}{1 + Bf \langle n \rangle}, \quad (2)$$

где  $\mu_d$  - дрейфовая подвижность носителей до облучения;  $A_1$  - холл-фактор в образце до облучения с учетом диффузного движения электронов [5].

Согласно [1] изменение подвижности носителей равно  $\delta = \varepsilon/3$ , где  $\varepsilon$  - среднеквадратичное отклонение концентрации основных носителей от среднего значения  $\langle n \rangle$ . В приближении эффективной среды изменение подвижности носителей определяется чисто геометрически. Но в электрическом поле электрон в образце движется не только в областях пространственного заряда кластеров дефектов, но и в области “озер”. Поэтому изменение подвижности можно определить согласно теории умножения вероятностей. Тогда

$$\delta = \frac{f \cdot F}{3}. \quad (3)$$

Таким образом, дрейфовая подвижность в полупроводнике после облучения быстрыми нейтронами изменяется не только за счет диффузного движения электронов, но и за счет поляризации кластеров дефектов в электрическом поле.

### Описание экспериментальных зависимостей

Теория эффективной среды [14] описывает экспериментально измеренную температурную зависимость проводимости образца как двухфазную систему: проводящая матрица и кластеры дефектов эффективного среднестатистического радиуса с помощью параметра  $X = \sigma_1/\sigma$  - отношение проводимостей этих фаз. Проводимость в проводящей матрице кремния и в кластерах в первом приближении равна

$$\sigma = qn\mu_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_V}{kT}\right); \quad \sigma_1 = const,$$

где  $\mu_0$  - дрейфовая подвижность электронов до облучения.

Концентрацию электронов в проводящей матрице можно определить в рамках уточненной

модели [10, 11]. Величина дрейфового барьера из рис. 1 и 2 определялась при комнатной температуре, эффективный радиус кластеров дефектов - в области температур эффективной максимальной проводимости, а проводимость кластеров подбиралась при низких температурах. Температурные зависимости дрейфовых барьеров (см. рис. 3) были вычислены в приближении, что  $\langle n \rangle/n$  есть только слабая функция дозы облучения быстрыми нейтронами реактора и не зависит от температуры измерения. В области температур  $T > 150 \text{ К}$  вычисление проводилось согласно выражениям (2) и (3), а при  $T < 150 \text{ К}$  согласно выражению (1). При больших дозах облучения (см. рис. 2) приближение, что  $\sigma_1 = const$ , уже себя не оправдывает, а экспериментально измеряемая проводимость ведет себя активационным образом. Тогда предположим, что проводимость кластеров равна

$$\sigma_1(T) = D \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{2kT}\right). \quad (4)$$

После дозы облучения  $\Phi = 4,51 \cdot 10^{13} \text{ н}^0 \cdot \text{см}^{-2}$  лучшее описание  $\rho_1(T) = \sigma_1(T)^{-1}$  получено при  $D = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ,  $E_a = 0,17/\lambda \text{ эВ}$ , где  $\lambda = 1,5$ . Таким образом, перезарядка А-центров ( $E_c = 0,17 \text{ эВ}$ ) в областях пространственного заряда кластеров дефектов привела к активационному поведению проводимости n-Si. Искривление изоэнергетических зон в областях пространственного заряда кластеров обусловило смещение области перезарядки А-центров в область более низких температур. И для этого “виртуального” уровня не существует компенсирующих дефектов. Таким образом, в теории эффективной среды надо учитывать не только дрейфовые барьеры в проводящей матрицы, но и изменение проводимости кластеров за счет перезарядки радиационных дефектов в областях пространственного заряда кластеров дефектов. Температурные зависимости холловских подвижностей, полученных как произведение  $\sigma \cdot R$ , были описаны, используя  $E_V(T)$  (см. рис. 3) согласно выражениям (1) и (2), и представлены на рис. 4. Следует отметить, что выражение (1) лучше описывает  $\mu_H(T)$  в области температур  $T < 150 \text{ К}$ , а выражение (2) - в области температур  $T > 150 \text{ К}$ . Определение дрейфовой подвижности велось согласно “mixed scattering” выражению, полученному в работе [16], но уже с учетом рассеяния на кластерах дефектов [6]. Важно знать истинную температурную зависимость подвижности и в случае расчетов транспортных свойств двухразмерных электронных систем в кремнии не только до облучения [17], но и после облучения нейтронами. Таким обра-

зом, при описании температурной зависимости экспериментально определяемой холловской подвижности надо учитывать дрейфовые барьеры, а в области низких температур еще рассеяние на кластерах и заряженных точечных дефектах.

### Выводы

Определены дрейфовые барьеры в проводящей матрице электронного типа кремния ( $n_0 = 1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ), выращенного методом Чохральского, после облучения быстрыми нейтронами реактора в приближении, что отношение средней концентрации электронов в образце к локальной не зависит от температуры измерения.

Описаны температурные зависимости подвижности электронов и удельного сопротивления в n-Si после облучения различными флюенсами быстрых нейтронов реактора образцов кремния в рамках уточненной теории эффективной среды.

Показано, что изменение подвижности электронов в области температур их диффузного движения определяется геометрическим фактором и поляризацией кластеров в электрическом поле. В области температур дрейфового движения подвижность электронов определяется не только рассеянием на кластерах, но и среднестатистическими дрейфовыми барьерами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Herring Conyers*. Effect of Random Inhomogeneities on Electrical and Galvanomagnetic Measurements // *J. Appl. Phys.* - 1960. - Vol. 31, No. 11. - P. 1939 - 1953.
2. *Пекар С. И.* Теория подвижности, эффекта Холла и магнесопротивления в электронных полупроводниках с заряженными дефектами // *Физика твердого тела.* - 1966. - Т. 8, вып. 4. - С. 1115 - 1121.
3. *Weisberg Leonard R.* Anomalous Mobility Effect in some Semiconductors and Insulators // *Appl. Phys.* - 1962. - Vol. 33. - P. 1817 - 1821.
4. *Flanagan T. M.* Carrier scattering from defects in neutron bombarded semiconductors // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* - 1968. - NS-15, No. 4 - 5. - P. 42 - 45.
5. *Шпинар Л. И., Ясковец И. И.* К теории проводимости и эффекта Холла в неоднородных полупроводниках // *Физика твердого тела.* - 1984. - Т. 26, вып. 6. - С. 1725 - 1730.
6. *Джандиери М. Ш., Церцвадзе А. А.* Изучение подвижности носителей заряда в полупроводниках с разупорядоченными областями // *Физика и техника полупроводников.* - 1971. - Т. 5, вып. 7. - С. 1445 - 1453.
7. *Conwell E. M., Weisskopf V. F.* Theory of Impurity Scattering in Semiconductors // *Phys. Rev.* - 1950. - Vol. 77. - P. 388 - 395.
8. *Brooks H.* // *Phys. Rev.* - 1951. - Vol. 83. - P. 879.
9. *Шук А. Я.* Эффект Холла и подвижности электронов в неоднородных полупроводниках // *Письма ЖЭТФ.* - 1974. - Т. 20, вып. 1. - С. 14 - 16.
10. *Gossick B. R.* Disordered Regions in Semiconductors Bombarded by Fast Neutrons // *J. Appl. Phys.* - 1959. - Vol. 30, No. 8. - P. 1214 - 1218.
11. *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.
12. *Шкловский И., Эфрос А. Л.* // Примесная зона и проводимость компенсированных полупроводников // *ЖЭТФ.* - 1971. - Т. 60, вып. 1. - С. 867 - 878.
13. *Садиков В. П.* Электрические свойства кремния, облученного частицами высокой энергии: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. - К., 1973. - 10 с.
14. *Morrel H. Cohen, Joshua Jortner.* Effective medium theory for the Hall Effect in disordered materials // *Phys. Rev. Lett.* - 1973. - Vol. 30, No. 15. - P. 696 - 698.
15. *Копплева Р.Ф., Литвинов В.Л., Ухин Н.А.* Особенности радиационного повреждения полупроводников частицами высоких энергий. - М.: Атомиздат, 1971. - С. 70.
16. *Long Donald, Myers John.* Ionized-Impurity Scattering Mobility of Electrons in Silicon // *Phys. Rev.* - 1959. - Vol. 115, No. 5. - P. 1107 - 1118
17. *Hwang E.H., Sarma S. Das.* Transport properties of two - dimensional electron systems on silicon // *Phys. Rev. B.* - 2007. - Vol. 75. - P. 073301 - 4.

О. П. Долголенко

### ДИФУЗНИЙ І ДРЕЙФОВИЙ РУХ ЕЛЕКТРОНІВ У N-ТИПІ КРЕМНІЮ, ОПРОМІНЕНОМУ ШВИДКИМИ НЕЙТРОНАМИ РЕАКТОРА

Розглянуто межі температур дифузного і дрейфового руху електронів у n-Si, вирощеному методом Чохральського, після опромінення швидкими нейтронами реактора. Розраховано температурно залежну концентрацію носіїв у провідній матриці й у всьому зразку і дрейфові бар'єри, що визначають їхній питомий опір. У рамках уточненої моделі ефективного середовища описано температурну залежність питомого опору n-Si ( $\rho_0 = 40 \Omega \times \text{см}$ ) після опромінення швидкими нейтронами реактора. Показано, що врахування дрейфових бар'єрів і перезарядження дефектів в областях просторового заряду кластерів дефектів точніше описує температурну залежність питомого опору. Підтверджено, що розсіювання носіїв на заряджених дефектах і кластерах при обліку дрейфових бар'єрів визначають температурну залежність рухливості електронів у n-Si з уведеними кластерами дефектів. Уточнено поправку Херрінга для рухливості електронів при їхньому дифузійному русі в n-типі крем-

нію, опроміненого швидкими нейтронами реактора. Дано визначення середньої концентрації носіїв у зразку, обумовленої з вимірювань едс Холла.

*Ключові слова:* кремній, швидкі нейтрони, кінетичні коефіцієнти.

**A. P. Dolgolenko**

**DIFFUSE AND DRIFT MOVEMENT OF ELECTRONS IN N-TYPE SILICON,  
IRRADIATED BY REACTOR FAST NEUTRONS**

The area of temperatures of diffuse and drift movement electrons in n-Si, grown up by Czochralski method after irradiation by the reactor fast neutrons is considered. Temperature dependencies of carrier concentrations in the conducting matrix and in volume of samples are described and the drift barriers determining their specific resistance are calculated. Within the limits of the specified model of the effective environment temperature dependence of specific resistance n-Si ( $\rho_0 = 40 \Omega \cdot \text{cm}$ ) after irradiation is described by reactor fast neutrons. It is shown that the account of drift barriers and defects recharges in the space-charge areas of defect clusters describes temperature dependence of specific resistance more precisely. It is confirmed that scattering of carriers on the charged defects and clusters taking into account the drift barriers defines the temperature dependence of mobility electrons in n-Si with introduced defects clusters. C. Herring amendment for mobility of electrons is specified at their diffuse movement in n-type silicon irradiated by reactor fast neutrons. Average concentration of carriers in the sample determined from Hall effect measurements is given.

*Keywords:* silicon, fast neutron, kinetically coefficients.

Поступила в редакцію 01.02.11,  
после доработки - 10.03.11.