

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ
НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

Е.Г. Емец, Я.А. Бутько, А.В. Головацкий

Научный руководитель: к.т.н. В.А. Варлачев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: emecevgeniy@tpu.ru

**USING OF SINGLECRYSTALLINE SILICON FOR DETECTION OF NUCLEAR REACTOR'S
NEUTRON FLUX**

E.G. Emets, Ya.A. Butko, A.V. Golovatskiy

Scientific Supervisor: Dr. V.A. Varlachev

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: emecevgeniy@tpu.ru

Annotation. *The article studies the relationship between neutron fluence and change the electrical conductivity. Relations, with which can calculate the fluence irradiated samples as with fast neutrons as with thermal ones during irradiation, were found analytically. It has been shown that one and the same washer of singlecrystalline silicon can comprise information about the fluence of fast and thermal neutrons.*

Постоянный контроль за флюенсом нейтронов реакторного спектра необходим при решении многих фундаментальных и прикладных задач. Среди всех существующих методов контроля нет универсальных, пригодных для проведения любого эксперимента на нейтронах реактора. Например, в области радиационных технологий, а также при работе на ядерно-энергетических установках и ускорителях часто требуется осуществлять контроль за плотностью потока нейтронов $10^6 - 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ или за их флюенсом $10^{10} - 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Такой диапазон плотностей потока нейтронов плохо поддается контролю широко распространенными методами (ионизационные камеры, пропорциональные счетчики, сцинтилляторы, ядерные эмульсии, активационные детекторы) или из-за трудоемкости процесса или сложности оборудования. Поэтому время от времени делаются попытки применения более простых, дешевых и оперативных методов контроля.

Нами предложены детекторы тепловых и быстрых нейтронов на основе простых полупроводниковых монокристаллов, в частности, монокристаллического кремния. Принцип действия первых из них основан на следующем. Например, при облучении кремния за счет реакции радиационного захвата образуется изотоп кремний-31, который при последующем β -распаде (период полураспада -2,62 часа) превращается в фосфор-31. Эта легирующая примесь в монокристаллах кремния n-типа увеличивает удельную электрическую проводимость (у.э.п.), а в монокристаллах p-типа – уменьшает. Изменение у.э.п. монокристалла до и после облучения и было положено в основу методов измерения интегрального потока тепловых нейтронов в относительных единицах [1,2]. Рассмотрим влияние быстрых нейтронов на электрофизические параметры монокристаллического кремния.

Пусть в исходном кремнии р-типа концентрация акцепторов есть N_A , а доноров – N_D . Если температура такова, что все ядра примесей ионизованы, то из условия электронейтральности

$$p - n = N_A - N_D, \quad (1)$$

где p, n – концентрация дырок и электронов соответственно. Кроме того,

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (2)$$

где n_i – концентрация собственных электронов или дырок полупроводника. Тогда

$$p^2 - (N_A - N_D) \cdot p = n_i^2, \quad (3)$$

$$p = \frac{1}{2}[(N_A - N_D) + \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4n_i^2}] \quad (4)$$

При облучении быстрыми нейтронами в кремнии наряду с другими типами дефектов образуются и сложные дефекты как донорного, так и акцепторного характеров, являющиеся следствием взаимодействия вакансий и междоузельных атомов между собой и с атомами исходных химических примесей. При этом введение сложных компенсирующих центров приводит к компенсации основной легирующей примеси [3]. Примем за N концентрацию такой компенсирующей примеси, тогда $N = k_1 \Phi$, где Φ – флюенс быстрых нейтронов, k_1 – коэффициент пропорциональности. При полной компенсации атомов акцепторов

$$N_A - N_D = k_1 \Phi_c \quad (5)$$

С учетом этого выражение (4) приобретает вид

$$p_0 = \frac{1}{2}[k_1 \Phi_c + \sqrt{(k_1 \Phi_c)^2 + 4n_i^2}] , \quad (6)$$

где p_0 – исходная концентрация дырок. Отсюда

$$k_1 \Phi_c = (p_0^2 - n_i^2) / p_0 \quad (7)$$

Так как $\rho = 1/(e\mu_p p + e\mu_n n)$, то с учетом выражения (2)

$$\rho(p) = \frac{p}{e\mu_p(p^2 + bn_i^2)}, \quad (8)$$

где μ_p и μ_n подвижности дырок и электронов, $b = \mu_n/\mu_p$. Из выражения (8) найдем зависимость исходной концентрации дырок (p_0) от исходного у.э.с. (ρ_0):

$$p_0 = \frac{1 + \sqrt{1 - 4e^2 \mu_p^2 \rho_0^2 b n_i^2}}{2e\mu_p \rho_0} \quad (9)$$

Подставив выражение (9) в (7), получим зависимость флюенса Φ_c от исходного у.э.с. :

$$k_1 \Phi_c = \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha_1 \rho_0^2}}{\beta_1 \rho_0} - \frac{\gamma_1 \rho_0}{1 + \sqrt{1 - \alpha_1 \rho_0^2}}, \quad (10)$$

где $\alpha_1 = 4e^2 \mu_n \mu_p n_i^2$; $\beta_1 = 2e\mu_p$; $\gamma_1 = 2e\mu_p n_i^2$.

При флюенсе нейтронов $\Phi < \Phi_c$ условие электронейтральности имеет вид

$$p - n = N_A - N_D - k_1 \Phi. \quad (11)$$

И тогда после преобразований получим [4]

$$k_1\Phi = \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha_1\rho_0^2}}{\beta_1\rho_0} - \frac{\gamma_1\rho_0}{1 + \sqrt{1 - \alpha_1\rho_0^2}} - \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha_1\rho^2}}{\beta_1\rho} + \frac{\gamma_1\rho}{1 + \sqrt{1 - \alpha_1\rho^2}}, \quad (12)$$

где $\alpha_1 = 4e^2\mu_n\mu_p n_i^2$; $\beta_1 = 2e\mu_p$; $\gamma_1 = 2e\mu_p n_i^2$. Если $\sqrt{1 - \alpha_1\rho_0^2}$ и $\sqrt{1 - \alpha_1\rho^2}$ принять равными по 1 и пренебречь вторым и четвертым членами в правой части выражения (16), то

$$\Phi = \chi_1\left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho}\right) = \chi_1(\sigma_0 - \sigma), \quad (13)$$

где $\chi_1 = 1/(k_1e\mu_p)$; σ_0, σ удельные электропроводности кремния до и после облучения соответственно. При этом разница в расчете по выражениям (16) и (17) не превысит 0,2%. Для кремния n-типа можно получить такое же выражение для флюенса быстрых нейтронов из условия электронейтральности $n - p = N_D - N_A - k_2\Phi$, только вместо χ_1 будет величина $\chi_2 = 1/(k_2e\mu_n)$.

Возможность осуществления предлагаемых способов измерения нейтронных потоков подтверждается данными экспериментов, проведенных на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т. С помощью существующей с 1984 г. технологии нейтронно-трансмутационного легирования кремния были изготовлены шайбы монокристаллического кремния. Измерения удельного электрического сопротивления (у.э.с.) на торцах шайб проводилось 4-зондовым методом по 15 точкам с погрешностью 2%. Измерения выполнялись после облучения до отжига радиационных дефектов для определения флюенса быстрых нейтронов и после отжига радиационных дефектов для определения флюенса тепловых нейтронов. Контроль флюенса тепловых нейтронов проводили с помощью штатных камер деления КТВ-4. Эксперимент показал, что существует линейная зависимость между изменением проводимости и флюенсом тепловых нейтронов. Это позволяет осуществить калибровку детектора. Даже при единственном облучении шайбы с любым исходным у.э.с. Калибровка остается постоянной для измеряемого спектра нейтронов и не зависит от исходного у.э.с. Каждый кристалл можно использовать многократно, и в отличие от активационных детекторов физическая информация в монокристаллах кремния может сохраняться бесконечно долго, что позволяет в любой момент времени перепроверить полученный результат измерения. Достоинством этого метода является то, что одна и та же шайба содержит информацию как о флюенсе быстрых нейтронов, так, после отжига, и о флюенсе тепловых.

Работы выполнены на базе УНУ ИРТ-Т при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (RFMEFI59114X0001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варлачев В.А., Солодовников Е.С. Детектор тепловых нейтронов на основе монокристаллического кремния // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 3. – С. 35-37.
2. Варлачев В.А., Емец Е.Г., Солодовников Е.С. Получение высокоомного кремния путем нейтронно-трансмутационного легирования // Изв. вузов. Физика. – 2009. - № 11/2. – С.409-412.
3. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники/ Под ред. Е. А. Ладыгина. – М.; Сов. Радио, 1980.-224 с.
4. Варлачев В.А., Емец Е.Г., Солодовников Е.С. Влияние быстрых нейтронов на проводимость простых полупроводников // 9-ая Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 20-22 сентября 2011 г., Минск, Беларусь, С. 107-109.