

P13-2001-281

В. В. Голиков, И. А. Голутвин, Н. И. Замятин,
Е. Н. Кулагин, А. Е. Черемухин

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ИНВЕРСИИ n -ТИПА ПРОВОДИМОСТИ КРЕМНИЯ
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ**

Введение

На создаваемых в настоящее время в ЦЕРН, Швейцария, экспериментальных установках CMS и ATLAS будут широко применяться кремниевые стриповые детекторы. Общая чувствительная площадь различных детекторных систем этих установок, содержащих стриповые кремниевые детекторы, изготовленные из высокоомного кремния, превышает 300 м^2 /1, 2/. Высокоомный кремний n-типа с удельным сопротивлением $1 \div 5 \text{ кОм}\cdot\text{см}$ под воздействием сильных адронных радиационных полей изменяет начальный p-тип проводимости /3/. Значение флюенса адронов, при котором происходит изменение проводимости n-типа на p-тип, называется точкой инверсии. Прохождение точки инверсии обычно рассчитывается по эмпирическим формулам. Экспериментальное прямое измерение точки инверсии является важной задачей для прогнозирования поведения детекторов в радиационных полях.

Сущность предлагаемого метода определения точки инверсии типа проводимости состоит в измерении ёмкости детектора непосредственно в процессе облучения быстрыми нейтронами при небольшом постоянном обратном смещении детектора. Напряжение обратного смещения, подаваемое на детектор, составляет величину порядка нескольких процентов от напряжения полного обеднения. Малая величина смещения выбирается исходя из того, чтобы, во-первых, избежать полного обеднения детектора, во-вторых, избежать саморазогрева детектора. При условии постоянного обратного смещения электрическая ёмкость C_d детектора пропорциональна квадратному корню величины эффективной концентрации N_{eff} носителей заряда:

$$C_d = S \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 q}{2(U_d + \varphi_k)}} N_{\text{eff}}, \quad (1)$$

где

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – электрическая постоянная;

$\varepsilon = 11,9$ – диэлектрическая проницаемость кремния;

$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ – заряд электрона;

U_d – напряжение обратного смещения, прикладываемое к детектору;

$\varphi_k \approx 0,6 \text{ В}$ – встроенный потенциал p-n –перехода;

S – площадь p-n –перехода.

$$N_{\text{eff}} = (|N_D \cdot e^{-c\Phi} - N_A - b \cdot \Phi|) \text{ см}^{-3}, \quad (2)$$

где

N_D – концентрация доноров и акцепторов N_A соответственно;

$c = 5 \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2}$; $b = 0,01 \text{ см}^{-1}$; Φ – флюенс быстрых нейтронов, см^{-2} /4/.

Радиационные повреждения в объёме кристалла кремния, вызванные быстрыми нейтронами, приводят к изменению величины эффективной концентрации носителей заряда вследствие компенсации доноров и создания акцепторных глубоких уровней /3/. Остальные величины, входящие в соотношение (1), в процессе облучения остаются постоянными либо изменяются весьма незначительно (площадь перехода, встроенный потенциал). Вследствие этого наименьшему значению ёмкости детектора будет соответствовать минимальное значение эффективной концентрации, что происходит в момент прохождения инверсии типа проводимости кристалла кремния из n-типа в p-тип.

Параметры образцов детекторов до облучения

Для облучения были отобраны 7 образцов кремниевых детекторов, изготовленных из кремния n-типа с различным удельным сопротивлением. Высоколегированные p+- и n+-области детекторов изготавливались методом имплантации или диффузии, и их толщина не превышает 1 микрона. Концентрация легирующих примесей бора и фосфора в p+- и n+-областях детекторов имеет величину $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Напряжение полного обеднения детекторов определялось посредством вольт-фарадных характеристик (ВФХ), измеренных на частоте 1000 Гц с помощью цифрового моста типа Е7-8. Электрическая схема измерений приведена на рис. 1. На рис. 2 в качестве примера приведены ВФХ некоторых образцов детекторов. Величина эффективной концентрации свободных носителей заряда и удельного сопротивления исходного кремния вычислялась из вольт-фарадных характеристик. Параметры образцов детекторов до облучения представлены в табл. 1.

Сокращение ЗТМК в названии соответствует исходному кристаллу кремния типа БЗП (бестигельной зонной плавки), производимому Запорожским титано-магниевым комбинатом.

Таблица 1

Параметры образцов	Наименование образцов детекторов						
	W1	W2	SP1	SP2	T1C2	T2C1	W3
Размеры P+ -области, мм ²	9,8×9,8	9,8×9,8	10×10	10×10	9,8×9,8	9,8×9,8	19,3×19,3
Толщина, мкм	378	380	401	409	305	305	400
Исходный кремний	Wacker	Wacker	ЗТМК	ЗТМК	Topsil	Topsil	Wacker
Кол-во охранных колец	4	4	0	0	4	4	1
Ориентация кристалла	<111>	<111>	<111>	<111>	<111>	<111>	<111>
Напряжение полного обеднения, В	98	100	220	300	73	67	65
Ёмкость обеднённого детектора, пФ	33	33	31	30	38	38	104
Исходное удельное сопротивление, кОм×см	4,3	4,3	2,2	1,7	3,8	4,1	7,3
Эфф. концентрация носителей заряда, см ⁻³	9×10^{11}	9×10^{11}	$1,8 \times 10^{12}$	$2,4 \times 10^{12}$	10^{12}	$9,5 \times 10^{11}$	$5,3 \times 10^{11}$

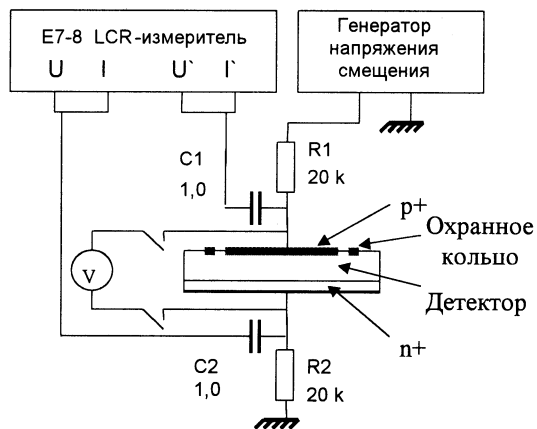


Рис. 1

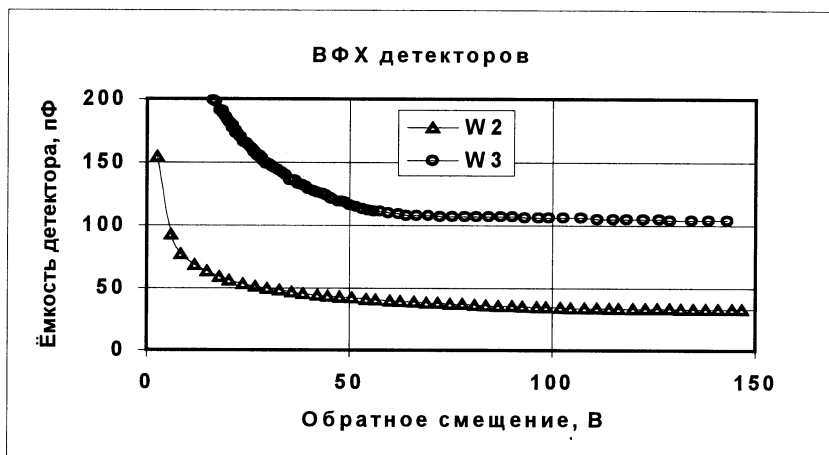


Рис. 2

Облучательная установка с быстрыми нейтронами

Подробное описание использованной в данном эксперименте облучательной установки на реакторе ИБР-2 приведено в работе /5/. Перед образцами детекторов был установлен дозиметр-свидетель, являющийся интегральным монитором мощности реактора ИБР-2. В качестве нейтронного дозиметра использовалась тарированная навеска никеля с последующим измерением наведённой активности изотопа Co^{58} , образующегося в результате

реакции $Ni^{58} (n,p) Co^{58}$. Для измерения энергетического спектра $\Phi(E)$ и абсолютной величины потока быстрых нейтронов в интервале энергий 0,1÷1,1 МэВ использовался стандартный метод активации пороговых детекторов с последующим восстановлением исходного энергетического распределения нейтронов /5/. В данном эксперименте поток быстрых нейтронов с $E > 0,1$ МэВ составлял величину $\Phi(0,1 \div 1,1 \text{ МэВ}) = (4,6 \pm 0,5) \times 10^9$ нейтронов/($cm^2 \cdot c$), при этом неоднородность потока в месте расположения образцов детекторов была лучше $\pm 5\%$. Для удобства сравнения результатов, полученных на различных облучательных установках (источниках нейтронов), измеренный поток быстрых нейтронов был приведён к эффективному потоку нейтронов с энергией 1 МэВ:

$$\Phi(1 \text{ МэВ}) = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \Phi(E) \frac{D(E)}{D(1 \text{ МэВ})} dE,$$

где $D(E)$ – нейтронный керма-фактор для атомных смещений в исследуемом материале, $D(1 \text{ МэВ})$ – значение $D(E)$ при энергии нейтронов $E = 1 \text{ МэВ}$. С использованием значения керма-фактора для смещений в кремнии из работы /6/ был определён эффективный поток нейтронов $\Phi(1 \text{ МэВ}, Si) = (3,7 \pm 0,4) \times 10^9$ нейтронов/($cm^2 \cdot c$).

Для измерения мощности дозы от сопутствующей гамма-составляющей в смешанном поле гамма-нейтронного излучения были использованы термолюминесцентные детекторы TLD-700. В условиях данного облучения мощность γ -дозы составляла (20 ± 2) крад/ч.

Экспериментальные результаты измерения точки инверсии типа проводимости

Электрическая схема для измерения ёмкости детекторов и подачи обратного смещения в процессе облучения аналогична приведённой на рис. 1. Подключение образцов детекторов в схему производилось через ленточный кабель из скрученных пар длиной 30 метров, что определялось условиями доступа в зону облучения в экспериментальном зале реактора ИБР-2. Предварительно измеренная ёмкость кабеля вычиталась из измеряемой величины ёмкости кабель плюс детектор. Наличие резисторов $R1$ и $R2$ в схеме и их величины выбраны из необходимости обеспечить режим работы цифрового моста E7-8 без систематической погрешности, вызванной большой величиной проводимости в эквивалентной схеме параллельного соединения ёмкость-резистор. Суммарное падение напряжения на этих резисторах, вызванное токами детектора вследствие генерации носителей заряда в обеднённом объёме, не превышает 150 мВ для флюенса нейтронов $\Phi = 5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Точность измерения ёмкости детекторов составляла ± 1 пФ. Напряжение смещения контролировалось высокоомным

вольтметром. Частота синусоидального напряжения, подаваемого на детекторы, выбрана равной 1000 Гц [7], максимальная амплитуда не превышала 1 В.

Исторически образец W3 облучался в 1996 г. первым. Напряжение обратного смещения для образца W3 было выбрано равным 15 В. При таком напряжении смещения объем обеднённой области до начала облучения составляет примерно половину объема детектора. На рис. 3 приведена зависимость ёмкости детектора W3 от величины эффективного флюенса быстрых нейтронов. Наблюдаемое плато величины измеренной ёмкости соответствует состоянию полного обеднения образца W3. Температура окружающей среды во время облучения равнялась 15 °С.

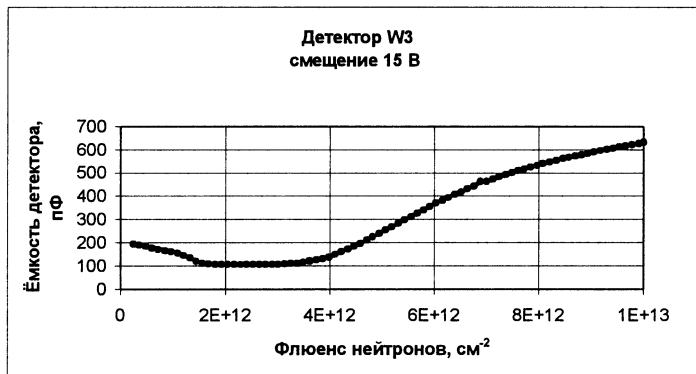


Рис. 3

В сеансе облучения быстрыми нейтронами в 2000 г. на детекторы W1, W2, SP1, SP2, T1C2, T2C1 подавалось напряжение обратного смещения величиной 4,4 В. Облучение производилось при температуре окружающей среды 17 °С. Зависимость ёмкости указанных детекторов от величины эффективного флюенса быстрых нейтронов приведена на рис. 4 и рис. 5. Для всех образцов детекторов наблюдается минимум ёмкости в зависимости от флюенса быстрых нейтронов, положение минимума зависит от величины начального удельного сопротивления кремния, из которого изготовлен детектор – для более низкоомных образцов положение минимума ёмкости сдвинуто в сторону большего значения флюенса, что соответствует соотношению (2). В момент прохождения точки инверсии при указанном смещении ($U = 4,4$ В) не достигается полного обеднения детекторов. Эффектом самоотжига [4, 7] на определение момента прохождения точки инверсии можно пренебречь в условиях данного эксперимента, поскольку время облучения для достижения момента инверсии составляет величину приблизительно 10 минут.

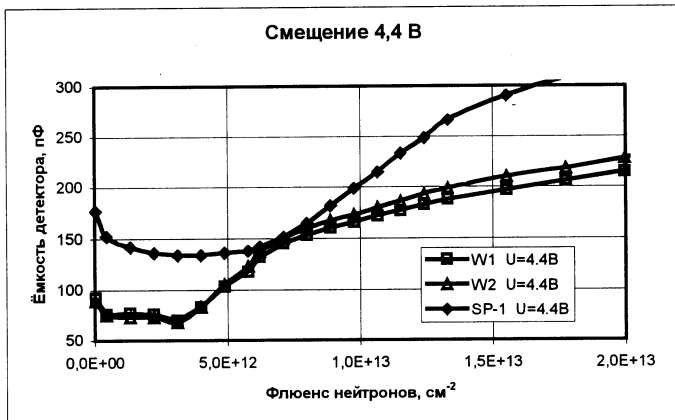


Рис. 4

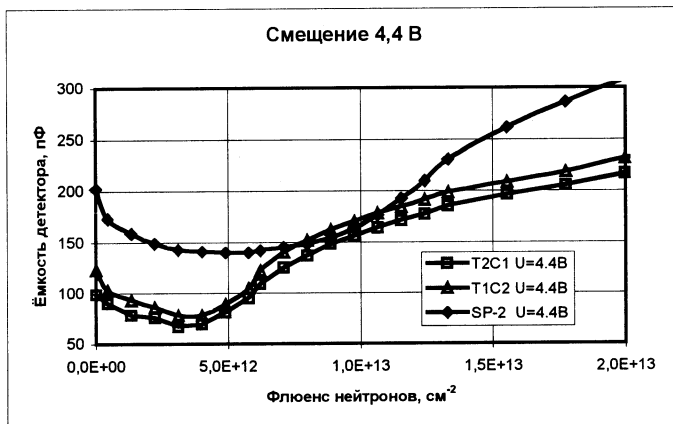


Рис. 5

Выводы

Предложен экспериментальный метод определения точки инверсии объёмной проводимости высокоомного кремния p-типа при облучении быстрыми нейтронами. Метод экспериментально проверен на нескольких образцах кремниевых детекторов, изготовленных из исходного кремния с различным удельным сопротивлением и различными производителями. Метод может найти применение для мониторинга момента прохождения инверсии типа

проводимости для кремниевых детекторов, применяемых в условиях сильных радиационных полей, и в материаловедческих исследованиях.

Литература

1. CMS. The Compact Muon Solenoid. Technical Proposal. CERN/LHCC 94-39, LHCC/P1, 15 December 1994.
2. ATLAS Technical Proposal, CERN/LHCC 94-43, LHCC/P2, 15 December 1994.
3. Golutvin I.A. et al Radiation Hardness of Silicon Detectors for Collider Experiments, JINR Preprint E14-95-97, Dubna, 1995.
4. F.Lemeilleur et al., preprint CERN/ECP 91-21.
5. A.P. Cheplakov, V.V. Golikov et al. Nucl. Instr. and Meth. A411 (1998) 330-336.
6. A.M. Ougouag, J.G. Williams et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. NS-37, no. 6.
7. R. Wunstorf et. al., Results on Radiation Hardness of Silicon Detectors up to Neutron Fluences of 10^{15} n/cm². NIM, A315(1992), 149-155.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 декабря 2001 года.

Экспериментальный метод определения инверсии n -типа проводимости кремния при облучении быстрыми нейтронами

На создаваемых в ЦЕРН экспериментальных установках CMS и ATLAS предусмотрено широкомасштабное применение кремниевых стриповых детекторов. Детекторы изготавливаются из высокоомного кремния n -типа проводимости. Радиационные повреждения в объеме кристалла кремния, вызванные адронами высокой энергии, приводят к изменению величины эффективной концентрации носителей заряда. В большинстве случаев под действием радиации происходит инверсия n -типа объемной проводимости в p -тип.

Предложен и экспериментально проверен метод определения инверсии n -типа объемной проводимости кремния при облучении быстрыми нейтронами. Сущность метода состоит в измерении емкости кремниевого детектора в процессе облучения. Напряжение постоянного обратного смещения, подаваемое на детектор, выбирается значительно меньше напряжения полного обеднения. При этом условии электрическая емкость C_d детектора пропорциональна квадратному корню от величины эффективной концентрации носителей заряда N_{eff} : $C_d \sim \sqrt{N_{\text{eff}}}$. Минимальное значение емкости детектора указывает соответственно на минимальное значение концентрации, что соответствует инверсии типа проводимости кристалла кремния из n -типа в p -тип.

Работа выполнена в Лаборатории физики частиц ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2001

Перевод авторов

An Experimental Method of Observation of the Silicon n -Type Bulk Conductivity Inversion under Fast Neutron Irradiation

A large scale application of silicon strip detectors is foreseen for the CMS and ATLAS experiments at CERN. High-resistivity n -type silicon is traditionally used for the detectors production. Damages in the silicon crystal bulk, caused by high-energy hadrons irradiation, affect the effective concentration of charge carriers. A bulk conductivity type inversion from n -type into p -type will take place in most cases under the influence of irradiation.

A method of observation of the silicon bulk conductivity type inversion is proposed and experimentally tested with fast neutron irradiation. A main point of the method is an electrical capacity measurement of silicon detector under irradiation. Reverse bias supplied on the detector during irradiation is chosen much less than its full depletion voltage. Under this condition the electrical capacity C_d of the detector is proportional to the square root value of charge carriers effective concentration N_{eff} : $C_d \sim \sqrt{N_{\text{eff}}}$. A minimum value of the detector capacity corresponds to a minimum value of the charge carriers effective concentration, that conforms to a conductivity type conversion from n -type into p -type.

The investigation has been performed at the Laboratory of Particle Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2001

Редактор М. И. Зарубина. Макет Н. А. Киселевой

**Подписано в печать 30.01.2002
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. л. 0,88
Тираж 315. Заказ 53087. Цена 88 к.**

**Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области**