

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

3184/82

13-82-180

12/7-82

М.Г.Горнов, Ю.Б.Гуров, М.А.Мороховец,  
К.Н.Неймарк, Б.П.Осипенко, В.Г.Сандуковский

ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ  
ИЗ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ФОСФОРОМ  
В ПОТОКЕ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ

Направлено в журнал "Приборы и техника эксперимента"

1982

## 1. ВВЕДЕНИЕ

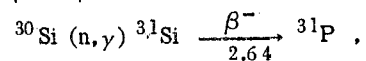
В качестве приборов в ядерно-физических экспериментах, в том числе в исследованиях с регистрацией частиц высоких энергий /1/, широко применяются спектрометры на основе полупроводниковых детекторов /ППД/. Несмотря на то, что эти спектрометры обладают целым рядом достоинств, сдерживающим факторов в развитии полупроводниковой спектрометрии частиц высоких энергий являются технологические трудности получения монокристаллов большого объема с необходимыми для изготовления ППД электрофизическими параметрами.

Выбор кремния в качестве материала ППД обусловлен возможностью работы кремниевых детекторов /в отличие от германиевых/ при комнатной температуре, что особенно важно для спектрометров сложной конфигурации, в частности, для многослойных полупроводниковых телескопов /2/.

Монокристаллы кремния с хорошей структурой и наиболее низким содержанием примесей в настоящее время получают методом бестигельной зонной плавки /3/. Метод позволяет с высокой воспроизводимостью получать монокристаллы p-типа проводимости диаметром 50 ÷ 60 мм с удельным сопротивлением 10 кОм·см и временем жизни неосновных носителей заряда /н.н.з./  $\geq 1$  мс.

Однако в технологии изготовления поверхностно-барьерных детекторов /ПБД/ используется преимущественно кремний n-типа проводимости /4/. Получение монокристаллов n-кремния с диаметром 50 мм и удельным сопротивлением  $\geq 1$  кОм·см связано с трудностями в обеспечении требуемой точности дозирования и однородности распределения донорной примеси. Поэтому в настоящее время, применяя метод отбора, можно получить лишь отдельные фактически случайные кристаллы, пригодные для больших ПБД.

В настоящей работе излагается один из возможных способов решения проблемы изготовления больших ПБД методом перекомпенсации кремния p-типа в n-тип с помощью ядерной реакции



протекающей в потоке тепловых нейтронов /5,6/.

Вследствие малого сечения реакции / $\approx 0,11$  б/ и равномерного распределения изотопа  $^{30}\text{Si}$  в объеме кристалла легирующая примесь - фосфор, являющийся типичным донором, также распределя-

ется равномерно. При наличии источника тепловых нейтронов, позволяющего с хорошей точностью дозировать степень облучения образцов, можно получать кремний с различной /заданной/ степенью компенсации /6/. Радиационные дефекты, возникающие в кристаллах в результате облучения, убираются путем отжига при различных температурных режимах, зависящих в случае материала с низким содержанием примесей в основном от энергетического спектра и величины интегрального потока нейтронов /5,6/.

## 2. ЛЕГИРОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ

Для получения кремния n-типа проводимости с помощью легирования в потоке тепловых нейтронов в качестве исходного материала использовались монокристаллы кремния p-типа, выращенные методом бестигельной зонной плавки.

Удельное сопротивление ( $\rho$ ) исходного кремния измерялось 4-зондовым методом и уточнялось по вольт-емкостным характеристикам после создания на контрольных образцах поверхностных барьеров путем напыления алюминия на неокисленную поверхность. Геометрические размеры и удельные сопротивления отобранных для облучения образцов представлены в таблице. Время жизни н.н.з. определялось методом переходных характеристик /7/.

Облучение кристаллов кремния проводилось в вертикальном экспериментальном канале /ВЭК/ тепловой колонны исследовательского реактора /ИРТ/ МИФИ /12/. Параметры потока нейтронов в данном ВЭК являются одними из лучших для этой цели: малая примесь быстрых нейтронов /кадмиевое отношение, измеренное по золоту, 1:500/, довольно широкая область плато /10 ÷ 15 см/ практически постоянного /с точностью 2%/ по высоте канала потока нейтронов. Эти параметры являются наиболее существенными при легировании, так как для равномерного введения фосфора необходимо

Таблица

№ образца	$\rho$ -исходное p-тип /кОм·см/	Интегральный поток /н/см <sup>2</sup> /	$\rho$ -после облучения и отжига n-тип /кОм·см/	$\Delta E_{\alpha}$ $E_{\alpha}=5,5\text{МэВ}$ /кэВ/	Геометрические размеры образца
1	8	$4,3 \cdot 10^{16}$	0,8	18	$\phi=44\text{мм}, W=1\text{мм}$
2	30	$4,3 \cdot 10^{16}$	0,7	20	$\phi=28\text{мм}, W=1\text{мм}$
3	35	$1,2 \cdot 10^{16}$	4,0	20	$\phi=26\text{мм}, W=1\text{мм}$
4	2,7	$3,1 \cdot 10^{16}$	130	23	$\phi=20\text{мм}, W=1\text{мм}$

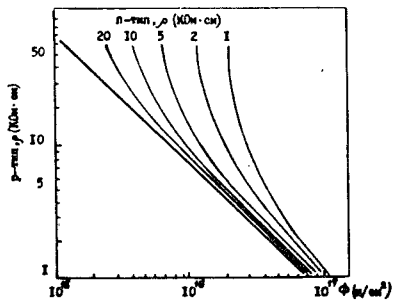


Рис.1. Зависимость потока нейтронов, необходимого для перекомпенсации, от удельного сопротивления исходного кремния.

обеспечить равномерность потока нейтронов через объем кристалла и свести к минимуму радиационные нарушения, вызываемые в кристалле быстрыми нейтронами.

Интенсивность потока нейтронов составляла  $\sim 2 \cdot 10^{11}$  /см<sup>2</sup>·с, время облучения кристаллов -  $\sim 10$  часов. Сравнительно малая интенсивность потока оказалась очень удобной, так как позволяла дозировать интегральный поток с большой точностью.

Расчет времени облучения проводился по формуле из работы<sup>8/</sup>:

$$N_p = 1,7 \cdot 10^{-4} \phi t,$$

где  $N_p$  - концентрация атомов введенного фосфора;  $\phi$  - поток тепловых нейтронов;  $t$  - время облучения.

Для удобства определения зависимости интегрального потока нейтронов от удельного сопротивления исходного материала были построены расчетные кривые, представленные на рис.1. Кривые рассчитаны для различных значений ожидаемого удельного сопротивления кремния п-типа: 1; 2; 5; 10; 20 кОм·см.

Отжиг радиационных дефектов в облученных образцах проводился на воздухе при температурах от 500°C до 900°C в течение одного, двух и трех часов. Результаты измерений удельного сопротивления образцов, отожженных в разных режимах, показывают, что достаточно полный отжиг радиационных нарушений с хорошей воспроизводимостью значений  $\rho$  происходит при температурах 600-800°C в течение 1-2 часов, что согласуется с данными работ<sup>5,9/</sup>.

Параметры облученных и отожженных образцов кремния измерялись по описанным выше методикам. Изготовление ПБД проводилось по обычной для кремния п-типа технологии<sup>4/</sup>.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице вместе с исходными значениями представлены величины удельных сопротивлений облученного кремния после отжига, а также энергетические разрешения изготовленных ПБД для  $\alpha$ -частиц <sup>238</sup>Pu. Полученные значения удельных сопротивлений близки к ожидаемым, а величины разрешений составляют  $\sim 20$  кэВ.

Как результат, имеющий самостоятельное значение, следует отметить получение образца с удельным сопротивлением  $\approx 130$  кОм·см,

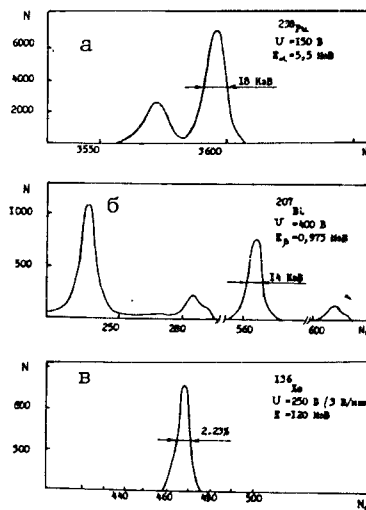


Рис.2. Спектры  $\alpha$ -частиц, электронов внутренней конверсии и тяжелых ионов, полученные с помощью поверхностно-барьерных детекторов из нейтронно-легированного кремния.

пригодного для изготовления ПБД с большой толщиной чувствительной области.

Изготовленные из нейтронно-легированного кремния ПБД использовались для традиционной спектрометрии  $\alpha$ -частиц, спектрометрии частиц относительно высоких энергий, в том числе электронов, измерения энергий тяжелых ионов. На рис.2 представлены некоторые спектры, демонстрирующие возможности ПБД из нейтронно-легированного кремния.

монстрирующие возможности ПБД из нейтронно-легированного кремния.

На рис.2 а - спектр  $\alpha$ -частиц <sup>238</sup>Pu, полученный с помощью ПБД, изготовленного из образца №1/10/; на рис. 2б - спектр электронов внутренней конверсии <sup>207</sup>Bi, полученный с помощью ПБД, изготовленного из образца №4. Линии, соответствующие конверсии на К- и L-оболочках, отчетливо выделены. Диаметр чувствительной области ПБД равен 10 мм, ширина чувствительной области и, соответственно, эффективность регистрации ограничивалась толщиной исходного образца  $\sim 1$  мм.

На рис.2в представлен спектр ионов <sup>136</sup>Xe с энергией 120 МэВ, измеренный с помощью ПБД, изготовленного из образца №2 /собственное разрешение пучка ионов  $\approx 0,3\%$ . Сравнительно низкое удельное сопротивление и высокая однородность / $\sim 1\%$ / образца позволили получить значительную напряженность поля и достаточно высокое энергетическое разрешение.

Измерения времени жизни н.н.з. показали, что время жизни у контрольных /не облученных/ и облученных образцов уменьшилось после отжига примерно в два раза. Условия отжига облученных и контрольных образцов были одинаковыми. Причем у облученных образцов наблюдалось более существенное уменьшение времени жизни н.н.з. По-видимому, для получения лучших результатов по времени жизни следует соблюдать условия отжига, близкие по стерильности к условиям выращивания кристаллов<sup>11/</sup>.

#### 4. ВЫВОДЫ

Результаты работы показывают, что нейтронно-легированный кремний  $n$ -типа проводимости, полученный из исходных монокристаллов  $p$ -типа, выращенный методом бестигельной зонной плавки, может служить материалом для изготовления поверхностно-барьерных  $\text{Si}(\text{Au})$ -детекторов заряженных частиц с параметрами, близкими к уровню лучших промышленных образцов ПБД из кремния  $n$ -типа.

При этом высокая однородность нейтронно-легированного кремния достигается при большой степени компенсации, то есть при получении относительно низкоомного кремния  $n$ -типа. В случае получения высокоомных образцов с удельным сопротивлением, которое сравнимо либо выше исходного, качество ПБД в сильной степени зависит от однородности исходных монокристаллов.

В заключение мы хотели бы выразить благодарность О.М.Гребенниковой за помощь при выполнении работы. Авторы благодарят также Л.А.Мионову и В.Г.Жукову за изготовление ПБД и подготовку материала к облучению.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ewan G.T. Nucl.Inst.Meth., 1979, vol.162, p. 75.
2. Горнов М.Г. и др. ОИЯИ, 13-12921, Дубна, 1979.
3. Сахаров Б.А. и др. Технология полупроводниковых материалов. Металлургиздат, М., 1969.
4. Акимов Ю.К. и др. Полупроводниковые детекторы ядерных частиц и их применение. Атомиздат, М., 1967.
5. Воронов И.Н. и др. Цветные металлы, 1980, 10, с. 100.
6. Смирнов Л.С. и др. Легирование полупроводников методом ядерных реакций. "Наука", Новосибирск, 1981.
7. Ковтанюк Н.Ф., Концевой Ю.А. Измерения параметров полупроводниковых материалов. "Металлургия", М., 1970, с. 211.
8. Tanenbaum M., Mills A.D.J. Electrochemical Society, 1961, 103, p. 170.
9. Yonng R.T. et al. J.Appl.Phys., 1978, 49, No.9, p. 475.
10. Горнов М.Г. и др. ОИЯИ, 13-12567, Дубна, 1979.
11. Malmros O. In: Neutron Transmutation Doping in Semiconductors. Plenum Press, N.-Y.-London, 1979, p. 249.
12. Гончаров В.В. и др. Труды II Международной конференции ООН по применению атомной энергии в мирных целях. Доклад №2185, Атомиздат, М., 1959, с. 255.

Рукопись поступила в издательский отдел  
9 марта 1982 года.

Горнов М.Г. и др. Поверхностно-барьерные детекторы 13-82-180 из кремния, легированного фосфатом в потоке тепловых нейтронов

Исследована возможность получения поверхностно-барьерных детекторов из кремния, легированного фосфором в потоке тепловых нейтронов. В качестве исходного материала использовались монокристаллы  $p$ -типа. Облучения проводились в тепловой колонне реактора с малой примесью быстрых нейтронов. Отжиг радиационных дефектов выполнялся на воздухе, достижение стабильных значений удельного сопротивления происходило при  $600-800^\circ\text{C}$  через 1-2 часа. Показано, что детекторы из данного материала могут быть использованы для спектрометрии  $\alpha$ -частиц, электронов, тяжелых ионов, при этом параметры ПБД соответствуют лучшим коммерческим образцам.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Gornov M.G. et al. Surface-Barrier Detectors Made 13-82-180 of Silicon Alloyed by Phosphorus in the Thermal Neutron Flux

A possibility to fabricate surface-barrier detectors of silicon alloyed by phosphorus in the thermal neutron flux is investigated. The monocrystals of  $p$ -type are used as a starting material. Radiation has been performed in the reactor thermal column with a small admixture of fast neutrons. Annealing of the radiation defects has been made in atmosphere. Stable value of resistivity have been achieved at  $600-800^\circ\text{C}$  in 1-2 hours. It is shown that the detectors made of this material can be used for  $\alpha$ -particle, electron and heavy ion spectrometry, the parameters of semiconductor detectors corresponding to the best commercial detectors.

The investigation has been performed at the Laboratory of the Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute

Перевод О.С.Виноградовой.