

99-187



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

99-187

P13-99-187

В.Ф.Кушнирук, Э.Бялковский¹, Е.Сарнецкий²,
Е.Носсаржевска², Ю.Г.Соболев

ДЕТЕКТОРЫ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
НА ОСНОВЕ ВЫСОКООМНЫХ
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

¹Институт ядерной физики им. Г.Неводничанского, Краков, Польша

²Институт технологии электронных материалов, Варшава, Польша

1999

Введение

Разработка новых типов полупроводниковых детекторов или новых их модификаций позволяет либо достичь более высоких эксплуатационных параметров, либо получить приборы, обладающие качественно новыми свойствами. Достижение более высоких параметров или новых свойств не только существенно расширяет область применения таких детекторов, но и создает возможность оптимально использовать особенности различных детекторов в экспериментах по регистрации ядерных излучений или продуктов ядерных взаимодействий. Например, применение планарной технологии [1] позволило существенно снизить обратные токи детекторов, повысить их надежность и создать разнообразные микростриповые структуры с малыми зазорами между детектирующими элементами. Применение эпитаксиальных слоев кремния для изготовления на их основе детекторов позволило создать самые тонкие ΔE -детекторы с высокой однородностью рабочего слоя [2], а также интегральные ΔE -E и ΔE_1 - ΔE_2 детектирующие структуры [3,4]. Применение эпитаксиальных слоев кремния с низким удельным сопротивлением для изготовления детекторов осколков деления [5] позволило достичь спектрометрического режима регистрации осколков при низких напряжениях смещения V_b , в том числе и при $V_b=0$ В. В настоящей работе описаны методика изготовления и результаты исследования характеристик первых образцов детекторов тяжелых заряженных частиц на основе высокоомных эпитаксиальных слоев кремния.

Приготовление эпитаксиальных кремниевых пластин

Кремниевые эпитаксиальные n - n^+ -структуры были изготовлены в Институте технологии электронных материалов, Варшава. Эпитаксиальные слои выращивались с помощью метода парофазной эпитаксии. Процесс роста осуществлялся в стандартном GEMINI-1 эпитаксиальном реакторе с высокочастотным нагревом. В качестве источника кремния служило соединение SiCl_4 , а в качестве источника легирующей примеси использовано соединение PH_3 . Процесс осуществлялся в потоке водорода при общем давлении около 1.2 атм. Высокоомные эпитаксиальные слои n -Si толщиной 100 мкм, легированные фосфором, выращивались на низкоомных легированных сурьмой монокристаллических кремниевых подложках.

Возможности метода иллюстрирует рис.1, на котором показан профиль удельного

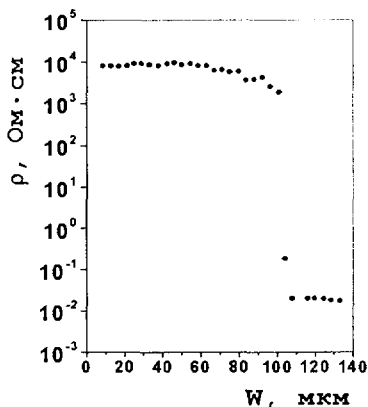


Рис.1. Профиль удельного сопротивления эпитаксиальной пластины

сопротивления эпитаксиальной кремниевой пластины, полученный на основе измерения профиля сопротивления растекания с помощью измерительной системы SR-94 (SR-94 Spreading Resistance System). Максимальное значение удельного сопротивления достигает 10 кОм·см. На интервале от 0 до 80 мкм среднее значение удельного сопротивления составляет 8.2 кОм·см при максимальном отклонении от среднего значения $\approx 20\%$, что свидетельствует о достаточно

высокой однородности удельного сопротивления по толщине эпитаксиального слоя. Снижение удельного сопротивления на участке от 80 до 100 мкм обусловлено автолегированием из низкоомной подложки в процессе выращивания эпитаксиального слоя.

Методика изготовления детекторов

Для изготовления детекторов использовалась пластина кремния *n*-типа проводимости со следующими параметрами:

- ориентация пластины $\langle 111 \rangle$, кристаллическая плоскость $\langle 111 \rangle$ дезориентирована на 3° по отношению к плоскости $\langle 110 \rangle$;
- диаметр пластины – 76 мм;
- толщина эпитаксиального слоя – (100 ± 2) мкм;
- удельное сопротивление эпитаксиального слоя – 1.2 кОм·см;
- толщина подложки ≈ 650 мкм;
- удельное сопротивление подложки – 0.07 Ом·см.

Для очистки поверхности кремния применялась следующая последовательность химических обработок:

- 1) выдержка в течение 15 минут в растворе $H_2SO_4:H_2O_2$ с соотношением

компонентов 5:1,

- 2) выдержка в течение 1 минуты в растворе $\text{NF}:\text{H}_2\text{O}$ (1:10),
- 3) выдержка в течение 10 минут в растворе $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2$ (1:4:1),
- 4) выдержка в течение 1 минуты в растворе $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ (1:10).

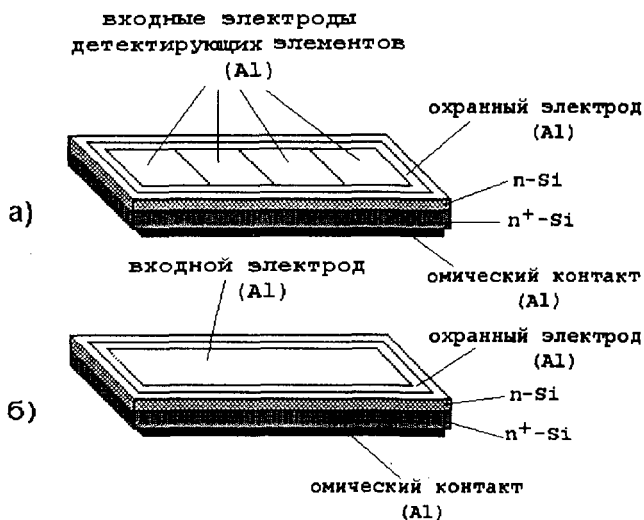


Рис.2. Схематическое изображение детектирующих структур

После каждой химической обработки пластина промывалась в потоке деионизированной воды. Металлические электроды наносились методом термического испарения в вакууме при давлении $5 \cdot 10^{-6}$ мм. рт. ст. сразу после финишной промывки в деионизированной воде. На лицевую поверхность наносился слой Pd толщиной 750 Å, а затем слой Al толщиной 300 Å. На n^+ -слой в качестве омического контакта наносился слой Al(2%Si) толщиной 1 мкм. Затем пластина кремния с нанесенными металлическими слоями подвергалась термической обработке в течение 30 минут при температуре 450° С в потоке сухого аргона. При термической обработке палладий взаимодействует с кремнием, что приводит к образованию слоя соединения Pd₂Si [6]. Появление в результате термической обработки слоя Pd₂Si в контакте с эпитаксиальным слоем n -Si приводит к образованию гетероперехода Pd₂Si-Si с высотой потенциального барьера ≈ 0.75 В [7,8], что обеспечивает хорошие выпрямляющие свойства такого перехода.

Отметим, что осуществленная нами методика получения перехода и металлизации лицевого электрода создает некоторые преимущества детекторам с гетеропереходом Pd₂Si-Si по сравнению с поверхностно-барьерными детекторами на основе *n*-Si. В последнем случае лицевой выпрямляющий контакт представляет собой тонкий слой золота, имеющий малую адгезию с кремнием, вследствие чего он может легко повреждаться. В нашем случае лицевой электрод представляет собой слой Al, который помимо высокой проводимости имеет и высокую прочность, что позволяет в случае загрязнения поверхности детектора производить ее очистку. Такой контакт также позволяет осуществлять соединения между электродами детекторов и их электрическими выводами с помощью термокомпрессии или ультразвуковой пайки. Кроме того, структуру на основе гетероперехода Pd₂Si-Si можно подвергать термическому отжигу для удаления радиационных дефектов, возникающих при облучении детектора.

Было изготовлено две детектирующие структуры. Схематическое изображение детектирующих структур, исследованных в данной работе, приведено на рис.2. Одна из них представляет собой детектирующий элемент с размером рабочей поверхности 10x50 мм², вторая имеет четыре детектирующих элемента с размером рабочей поверхности каждого элемента 10x10 мм².

Исследования характеристик детекторов

На рис.3а показана вольт-фарадная характеристика детектора с размером рабо-

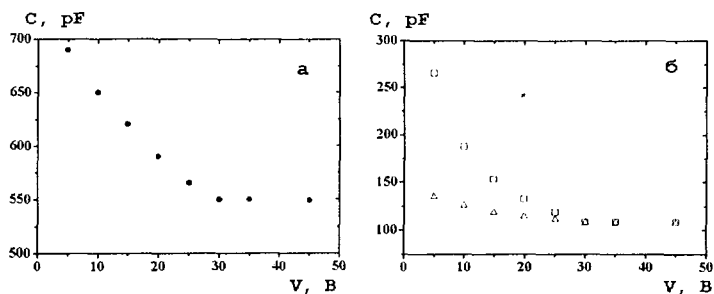


Рис.3 Вольт-фарадные характеристики детекторов с размером рабочей поверхности $10 \times 50 \text{ мм}^2$ (а) и $10 \times 10 \text{ мм}^2$ (б)

чей поверхности $10 \times 50 \text{ мм}^2$, а на рис.3б вольт-фарадная характеристика одного из четырех детектирующих элементов с размером рабочей поверхности 10×10

мм². Из этих рисунков видно, что вольт-фарадные характеристики детекторов выходят на плато при напряжении $V \approx 30$ В, которое и является напряжением полного обеднения эпитаксиального слоя V_d . На рис.3б кроме измеренных значений емкости (открытые треугольники) приведены и расчетные значения емкости (открытые квадраты) для кремниевого детектора на основе структуры металл-полупроводник, соответствующей поверхностно-барьерному детектору, или для детектора с p - n -переходом с резко асимметричным ступенчатым распределением легирующей примеси в n - и p -областях перехода. Расчет выполнен при условии, что удельное сопротивление кремния равно удельному сопротивлению эпитаксиального слоя $\rho = 1.2$ кОм·см, а рабочая поверхность детектора имеет те же размеры, что у детектора на основе эпитаксиальной структуры.

Сравнение расчетных значений емкости с измеренными показывает, что в области напряжений $V < V_d$ наблюдается превышение расчетных значений емкости над измеренными, а при $V \geq V_d$ они полностью совпадают. Отметим, что при малых напряжениях расхождение между расчетными и измеренными значениями емкости весьма существенно. Например, при $V = 5$ В отношение расчетного значения к измеренному составляет фактор 1.9, при 10 В - 1.5, при 15 В - 1.3. Меньшие значения емкости эпитаксиального детектора на участке напряжений $V \leq V_d$ обусловлены той особенностью эпитаксиальной структуры, что на n - n' -границе раздела существует область пространственного заряда, емкость которой включена последовательно с емкостью области пространственного заряда, расположенной вблизи лицевой поверхности детектора.

Существенно меньшие значения емкости эпитаксиальных детекторов при малых напряжениях обеспечивают таким детекторам некоторое преимущество над поверхностно-барьерными детекторами и детекторами с p - n -переходом. Это преимущество заключается в том, что система эпитаксиальный детектор-усилитель при одинаковых размерах рабочего слоя детекторов будет иметь меньшие по сравнению с другими детекторами шумы, поскольку шумы самой системы регистрации практически линейно растут с ростом емкости детектора.

На рис.4 показана обратная ветвь типичной вольт-амперной характеристики одного детектирующего элемента, снятая при комнатной температуре. Стрелка на

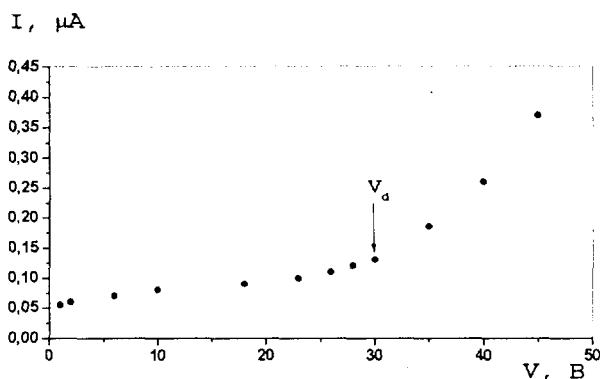


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика детектирующего элемента с размером рабочей поверхности $10 \times 10 \text{ мкм}^2$

рис.4 указывает на напряжение полного обеднения эпитаксиального слоя V_d , определенное из вольт-фарадной характеристики детектора. Из рис.4 видно, что на участке напряжений $V < V_d$ наблюдается плавное увеличение обратного тока детектора с ростом обратного напряжения. Рост напряжения в 30 раз (от 1 до 30 В) приводит лишь к трехкратному возрастанию тока (от $\approx 0,05 \text{ мкА}$ до $\approx 0,15 \text{ мкА}$). Наклоны начальных участков зависимостей $\log I - f(\log V)$ составляют $k \approx 0,2$ вместо значения $k = 0,5$, характерного для объемного генерационного тока. Это свидетельствует о довольно-таки большом вкладе тока поверхностной утечки, слабо зависящего от приложенного к детектору напряжения. В области напряжений $V \geq V_d$ наблюдается более резкое возрастание обратного тока с увеличением напряжения, что, по-видимому, связано как с увеличением вклада тока поверхностной утечки с ростом напряжения, так и с включением в область пространственного заряда $n-n^+$ -границы раздела, имеющей структурные дефекты кристаллической решетки.

Если принять, что весь обратный ток детектора в области напряжений $V < V_d$ определяется генерационным током области пространственного заряда детектора, то из измеренных значений обратного тока можно получить нижнюю оценку времени жизни неравновесных носителей тока. Величина объемного генерационного

тока в предположении, что рекомбинационный уровень расположен вблизи середины запрещенной зоны полупроводника, определяется формулой

$$I_g = (qn/2\tau_0)wS, \quad (1)$$

где q – элементарный электрический заряд, $n_i = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ – концентрация носителей тока в кремнии с собственной проводимостью при комнатной температуре, τ_0 – время жизни неравновесных носителей, w – толщина области пространственного заряда, S – площадь рабочей поверхности. В соответствии с формулой (1) из значений обратного тока в области $V < V_d$, приведенных на рис.4, получаем нижнюю оценку $\tau_0 \approx 100$ мкс. Принимая во внимание тот факт, что в полном обратном токе детектора имеется существенная составляющая тока поверхностной утечки, можно заключить, что $\tau_0 > 100$ мкс. Полученный результат свидетельствует о высоком качестве эпитаксиальной структуры, использованной для изготовления детекторов.

Спектрометрические характеристики детекторов исследовались с помощью

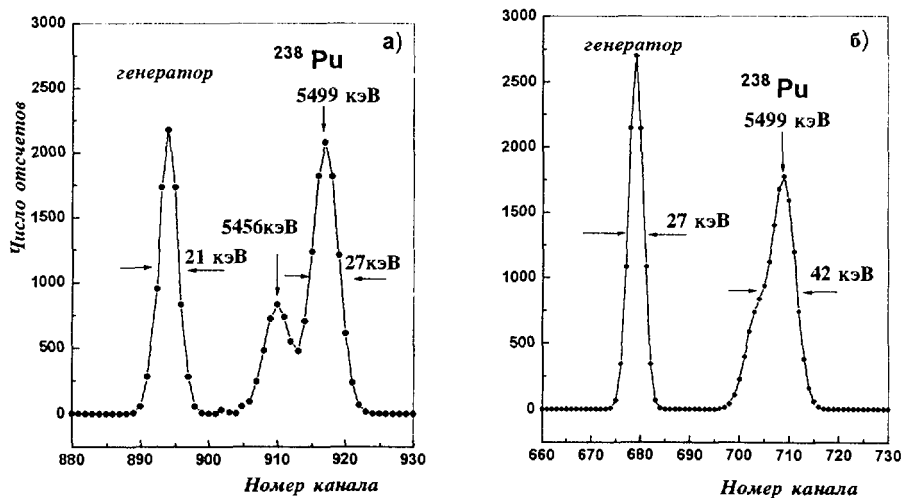


Рис.5. Энергетические спектры α -частиц ^{238}Pu .

- а) - детектирующий элемент с размером рабочей поверхности $10 \times 10 \text{ мм}^2$,
 б) - детектирующий элемент с размером рабочей поверхности $10 \times 50 \text{ мм}^2$

стандартного спектрометрического тракта, включающего в себя предварительный усилитель, усилитель-формирователь и амплитудно-цифровой преобразователь.

Стабильность тракта и изменение его коэффициента преобразования заряд-амплитуда контролировали с помощью генератора стабильной амплитуды.

На рис.5 показаны энергетические спектры α -частиц ^{238}Pu для двух детектирующих элементов. Спектры получены при напряжении смещения, равном 30 В. Из рисунка видно, что энергетическое разрешение, определенное как полная ширина линии на половине высоты распределения α -частиц, составляет 27 кэВ для детектора малой площади и 42 кэВ для детектора большей площади. Собственное энергетическое разрешение определяется формулой

$$R_{\text{соб}} = (R_{\text{изм}}^2 - R_{\text{ген}}^2)^{1/2}, \quad (2)$$

где $R_{\text{изм}}$ - измеренное значение разрешения для распределения α -частиц, $R_{\text{ген}}$ -

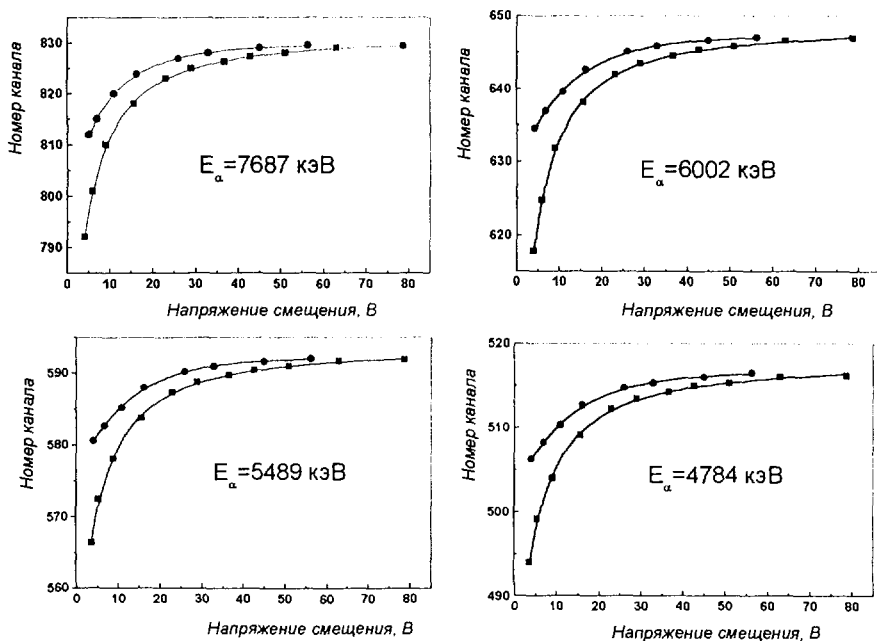


Рис.6. Зависимости амплитуд сигналов от напряжения смещения

разрешение генераторного пика. Полученные значения собственного разрешения составляют 13.5 кэВ и 32 кэВ для детектирующего элемента малой и большой площади соответственно. Существенное различие полученных значений собственного разрешения связано, по-видимому, с большей неоднородностью свойств эпитаксиального слоя элемента большей площади. Полученное значение

$R_{\text{собр}}=13.5$ кЭВ показывает, что на основе высокоомных эпитаксиальных структур можно создавать детекторы тяжелых заряженных частиц с высокими спектрометрическими свойствами.

На рис.6 показаны зависимости амплитуд сигналов (номеров каналов) от напряжения смещения для двух детекторов, полученные при их облучении α -частицами от источника ^{226}Ra . Верхние кривые соответствуют эпитаксиальному детектору, а нижние – поверхностно-барьерному детектору на основе $n\text{-Si}$ с удельным сопротивлением, равным удельному сопротивлению эпитаксиального слоя. Из этого рисунка видно, что в области малых напряжений смещения при всех значениях энергии α -частиц амплитуды сигналов от эпитаксиального детектора существенно превышают амплитуды сигналов от поверхностно-барьерного детектора. Такое поведение амплитудных зависимостей связано, по-видимому, с наличием в эпитаксиальной структуре области электрического поля на границе раздела между эпитаксиальным слоем и подложкой. Аналогичное поведение амплитудных зависимостей наблюдалось нами при регистрации осколков деления эпитаксиальными детекторами на основе низкоомных эпитаксиальных слоев кремния [5].

Заключение

Основные результаты, полученные в данной работе, сводятся к следующему:

1. Разработана методика изготовления детекторов тяжелых заряженных частиц на основе высокоомных эпитаксиальных слоев $n\text{-Si}$. Особенностью методики изготовления детекторов является создание выпрямляющей структуры на основе гетероперехода $\text{Pd}_2\text{Si-Si}$ и использование тонкого слоя Al в качестве входного электрода детекторов, что обеспечивает высокую механическую прочность такого электрода.

2. Измерения профиля удельного сопротивления эпитаксиального слоя и оценка времени жизни неравновесных носителей по измеренным значениям обратного тока детекторов показали, что эпитаксиальные слои $n\text{-Si}$ имеют высокую однородность удельного сопротивления ($\Delta\rho_{\text{max}} \approx 20\%$ на интервале толщины от 0 до 80 мкм) и высокое время жизни ($\tau_0 > 100$ мкс). Такие параметры эпитаксиальных слоев обеспечивают возможность создания детекторов тяжелых заряженных частиц с высокими спектрометрическими свойствами.

3. Показано, что в области напряжений смещения ниже напряжения истощения детекторы на основе высокоомных эпитаксиальных слоев кремния имеют существенно меньшие значения емкости по сравнению с поверхностно-барьерными детекторами и детекторами с $p-n$ -переходом. Эта особенность эпитаксиальных детекторов, которая обусловлена наличием протяженной (≈ 10 мкм) области пространственного заряда на $(n\text{-Si})-(n^+\text{-Si})$ границе раздела эпитаксиальной структуры, обеспечивает эпитаксиальным детекторам некоторые преимущества, поскольку шумы электронной системы практически пропорциональны емкости детектора.

4. Полученное значение собственного разрешения $R_{\text{соб}} \approx 13.5$ кэВ подтверждает вывод п.2 о высокой перспективности использования высокоомных эпитаксиальных слоев кремния для создания на их основе детекторов тяжелых заряженных частиц с высокими спектрометрическими характеристиками.

Авторы благодарят профессора Ю.Э. Пенионжкевича за постоянное внимание к работам по полупроводниковым детекторам ядерных излучений.

Литература

1. Kemmer J., Burger P., Henck R. et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. NS-29, 1982, p. 733.
2. Osada S., Husimi K., Fuchi Y. et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. NS-25, 1978, p. 371.
3. Kim C., Kim K., Kikuchi K. et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. NS-27, 1980, p. 258.
4. Kim Y., Kim C., Husimi K. et al. Nucl. Instr. Meth., vol. A266, 1984, p. 125.
5. Кушнирук В.Ф., Бялковский Э., Кузнецов И.В. и др. Приборы и техника эксперимента, 1997, № 1, с. 62.
6. Saltich J. "Ohmic Contact to Semiconductors", (ed. Schwartz B.), Electrochemical Society, New York, 1969, pp. 187-199.
7. Kircher C.J. Solid State Electronics, vol. 14, 1971, p. 507.
8. Andrews J.V., Phillips J.C. Phys. Rev. Lett., vol. 35, 1975, p. 56.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 июня 1999 года.