

06.2

$P-i-n$ -структуры на основе высокоомного геттерированного арсенида галлия для детекторов α -частиц

© А.Т. Гореленок, А.А. Томасов, Н.М. Шмидт, Э.А. Ильичев,
В.М. Лантратов, Ю.М. Задиранов, П.Н. Брунков, О.В. Титкова,
Н.А. Калюжный, С.А. Минтаров, В.Н. Мдивани, В.В. Кацоев,
Л.В. Кацоев, С.С. Шмелев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
Федеральное государственное унитарное предприятие
Научно-исследовательский институт физических проблем
им. Ф.В. Лукина, Москва
E-mail: algor@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 25 мая 2006 г.

Показана возможность создания $p-i-n$ -детекторов для регистрации α -частиц на основе высокоомного ($n \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$) арсенида галлия, полученного геттерированием лантаноидами низкоомного ($n \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) арсенида галлия.

PACS: 29.40.Wk, 73.40.Kp

Последнее десятилетие наиболее активно в исследовательских центрах разных стран ведутся работы по созданию детекторов ионизирующих излучений на основе высокоомного арсенида галлия.

Результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований свойств этого материала убедительно показали [1], что реализация детекторов на нем позволит расширить область применения полупроводниковых детекторов, в частности для регистрации высокоэнергетических потоков излучений и повышения скорости регистрации. Опубликованные результаты исследований детекторов, полученных на высокоомном объемном [1,2] и эпитаксиальном арсениде галлия [1,3–5] показали, что к настоящему времени реализовать потенциальные возможности материала в полной мере не удалось и одной из причин могут быть эффекты самокомпенсации, довольно типичные для высокоомного арсенида галлия. Эти эффекты во многом определяются технологией получения материала.

В данной работе приводятся результаты исследования первых образцов детекторов α -частиц на основе p - i - n -структур, реализованных на высокоомном арсениде галлия, полученном оригинальным методом геттерирования [6–8]. Достоинством метода являются максимально упрощенная технология и использование дешевого исходного материала. Термообработка в атмосфере чистого водорода по специальной программе при 800°C в течение 3 h пластин толщиной $500\ \mu\text{m}$ нелегированного ($n \sim 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$) с подвижностью $(1-1.5) \cdot 10^3\ \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ арсенида галлия (этот материал содержал глубокий уровень EL2), покрытого слоем лантаноида и вольфрама, позволила получить высокоомный арсенид галлия с концентрацией носителей $(1-2) \cdot 10^{12}\ \text{cm}^{-3}$ (компенсированный или n -типа). В качестве лантаноида наносился слой иттербия толщиной $500\ \text{\AA}$ и слой вольфрама толщиной $300\ \text{\AA}$ методом магнетронного плазменного нанесения. После термообработки с помощью плазменного травления на той же установке иттербий и вольфрам удалялись. Затем с помощью химического травления в $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (5:3:2) поверхность обеих сторон доводилась до зеркального состояния, пригодного для последующих процессов эпитаксиального наращивания и фотолитографии. Финишная толщина пластин составляла $400-450\ \mu\text{m}$.

Исследования глубоких уровней в геттерированном материале методом релаксационной оптоэлектронной спектроскопии [9] позволили обнаружить донорные уровни ловушек с энергией $E_t = 0.2\ \text{eV}$, с концентрацией $N_t \cong (1 \cdot 10^{12} - 5 \cdot 10^{13})\ \text{cm}^{-3}$, сечением захвата на них $S_t \sim 10^{-16}\ \text{cm}^2$, а на лучших образцах с $E_t = 0.34\ \text{eV}$ и $N_t = (4-5) \cdot 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$ до $S_t \sim 10^{-21}\ \text{cm}^2$. Полученные значения параметров собственных дефектов свидетельствуют об эффективности геттерирования и более благоприятных параметрах по сравнению с параметрами, наблюдаемыми на объемном высокоомном материале [1,2] и эпитаксиальном [1–3]. В этих материалах по данным работ [1–3] наблюдается глубокий двойной донорный уровень с энергией $E_c - 0.78\ \text{eV}$ с $N_t \sim (10^{15} - 10^{16})\ \text{cm}^{-3}$, образованный собственным дефектом (As_{Ga} , EL2). Исследование спектров DLTS на готовых детекторах на основе GaAs с $N_t \sim 10^{12}\ \text{cm}^{-3}$ не представлялось возможным из-за высокого последовательного сопротивления.

Формирование p - n -перехода осуществлялось методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении. В качестве источника галлия использовался триметилгаллий, а в качестве источника мышьяка арсин. Источником легирующей примеси для p^+ -слоя служил

диэтилцинк, а для n^+ -слоя — силан. Водород использовался в качестве газа носителя. Слои p^+ - и n^+ -GaAs толщиной порядка полмикрона наращивались последовательно на обе стороны высокоомных пластин: p^+ -слой выращивался при температуре роста 600°C , n^+ -слой выращивался при 700°C .

На рис. 1 представлен профиль распределения дырок в $p^+ - i$ -переходе, полученный методом электрохимического вольт-фарадного профилирования [10]. $P - i - n$ -детекторы представляли собой мезаструктуры, которые создавались методами фотолитографической техники. Диаметр мезаструктуры составлял 2.5 mm , глубина травления мезы составляла $100\text{ }\mu\text{m}$. Мезаструктуры получали химическим травлением в серно-кислотном травителе $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ (5 : 3 : 2). В качестве маски при

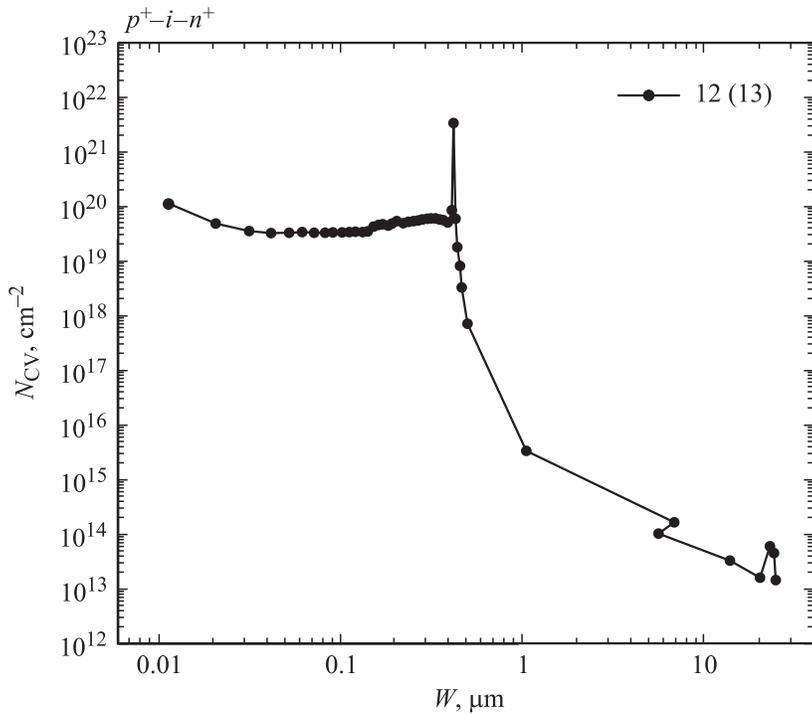


Рис. 1. Электрохимический вольт-фарадный профиль типичного $p^+ - i$ -перехода.

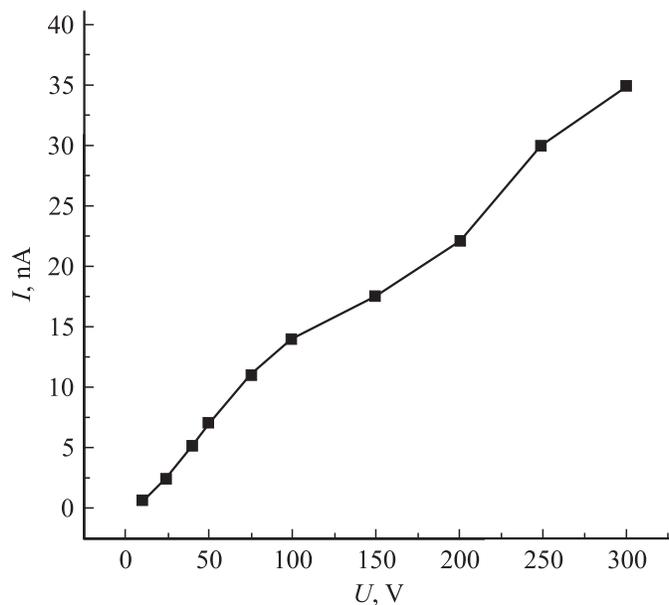


Рис. 2. Типичная обратная ветвь вольт-амперной характеристики детектора с p^+i-n -переходом на основе высокоомного геттерированного арсенида галлия при 300 К.

травлении использовался фоторезист. Омические контакты к n -области создавались вакуумным нанесением слоя сплава $Au + 12\% Ge$, а к p -типу слоя сплава $Au + 12\% Zn$ с последующим вжиганием при температуре $450^\circ C$ в течение трех минут. На рис. 2 представлена типичная обратная ветвь вольт-амперной характеристики такого детектора. Значения плотности тока при напряжении (100–300) В находятся на уровне лучших зарубежных аналогов [11], что на порядок меньше, чем на объемном материале при смещении 100 В [2] и делает возможным использование таких структур в качестве детекторов α -частиц. На рис. 3 представлен типичный энергетический спектр α -частиц $p-i-n$ -детектора на основе высокоомного геттерированного арсенида галлия. Спектр снимался на структуре толщиной $400 \mu m$, при напряжении смещения 300 В и величине протекающего тока $3.5 \cdot 10^{-8}$ А. Приведенные данные показывают, что исследованные структуры позволяют уверенно

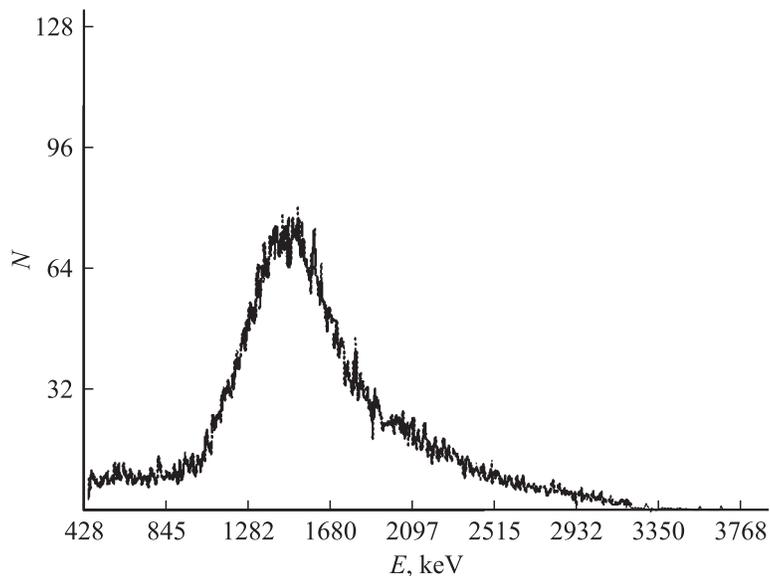


Рис. 3. Типичный энергетический спектр α -частиц, полученный с помощью $p-i-n$ -детектора на основе высокоомного геттерированного арсенида галлия: $E_{\alpha} = 5.5 \text{ MeV}$, $V = 300 \text{ V}$, $d = 400 \mu\text{m}$, $I = 4.3 \cdot 10^{-8} \text{ A}$.

регистрировать α -частицы в широком диапазоне энергий. Собственные энергетические шумы структуры (энергетические шумы генератора точной амплитуды) в рабочем режиме составляли не более 20–50 keV в зависимости от напряжения смещения, что позволяет даже на данной стадии совершенства структуры регистрировать частицы с энергией менее 50 keV. Длительность фронта нарастания зарядового импульса, созданного α -частицей, менее 100 ns (ограничивается предусилителем), что указывает на возможность регистрации потоков частиц в счетном режиме с интенсивностью более 10^6 s^{-1} . При выборе соответствующего предусилителя возможно значительное увеличение скорости регистрации. Одними из причин относительно невысоких значений эффективности собирания заряда ($\sim 30\%$, на рис. 3 27%) являются не оптимальная толщина структуры и не в полной мере оптимизированная технология получения материала и структуры, что также приводит

к асимметричному виду энергетического спектра (затянутый правый край спектра, возможно, связанный с недостаточной однородностью материала) при облучении α -частицами с энергией 5.5 MeV.

Дальнейшее совершенствование технологии создания p-i-n-структур, оптимизация толщины и процесса геттерирования материала дадут возможность существенно улучшить характеристики детекторов и в конечном счете получить дешевые GaAs детекторы для разных областей науки и техники.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность профессору О.А. Матвееву за полезные обсуждения и А.В. Каманину за термообработку структур, покрытых лантаноидами.

Список литературы

- [1] Беспалов В.А., Воронцов А.В., Горбацевич А.А., Егоркин В.И., Жигальский Г.П., Ильичев Э.А., Кулаков А.В., Налбандов Б.Г., Пантуев В.С., Распутный В.Н., Свешиников Ю.Н., Шмелев С.С. // ЖТФ. 2004. Т. 7. В. 3. С. 28–36.
- [2] Вербицкая Е.М., Еремин В.К., Иванов А.М., Строкан Н.Б., Васильев В.И., Гаврин В.Н., Веретенкин Е.П., Козлова Ю.П., Куликов В.Б., Марков А.В., Поляков А.Я. // ФТП. 2004. Т. 38. В. 4. С. 490–497.
- [3] Ботнарюк В.Н., Жиляев Ю.В., Иванов А.М., Строкан Н.Б., Федоров Л.М. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 7. С. 8–15.
- [4] Ахмадулина Р.А., Дворянкин В.Ф., Дворянкина Г.Г., Дикаев Ю.М., Ермаков М.Г., Ермакова О.Н., Крикунов А.И., Кудряшов А.А., Петров А.Г., Телегин А.А. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 2. В. 1. С. 34–38.
- [5] Залетин В.М., Протасов И.И., Матвеев О.А., Скороходов П.И., Хусаинов А.Х. // Атомная энергия. 1975. Т. 39. В. 1. С. 68–76.
- [6] Власенко Л.С., Гореленок А.Т., Емцев В.В., Каманин А.В., Полоскин Д.С., Шмидт Н.М. // ФТП. 2001. Т. 35. В. 2. С. 184–187.
- [7] Гореленок А.Т., Каманин А.В., Шмидт Н.М. // ФТП. 2003. Т. 37. В. 8. С. 922–927.
- [8] Gorelenok A.T., Andrievskii V.F., Shmidt N.M., Vasil'ev V.I. // J. Phys. Condens. Matter. 2002. V. 4. P. 13 105–13 109.
- [9] Ильичев Э.А. // ЖТФ. 1998. Т. 68. В. 5. С. 141–143.
- [10] Брунков П.Н., Усов С.О., Мусихин Ю.Г., Жуков А.Е., Цырлин Г.Э., Устинов В.М., Конников С.Г., Расулова Г.К. // ФТП. 2004. Т. 38. В. 4. С. 469–472.
- [11] Buttari C.M. // Nucl. Inst. Meth. Phys. Rev. A. 1977. V. 395. P. 1.