

06

Исследование распределения электрического поля в детекторных структурах на GaAs методом Кельвин-зонд-микроскопии

© М.Д. Вилисова, В.П. Гермогенов, О.Ж. Казтаев,
В.А. Новиков, И.В. Пономарев, А.Н. Титков

ГОУ ВПО Томский государственный университет
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: spti@sibmail.com

Поступило в Редакцию 13 ноября 2009 г.

Представлены результаты исследования с помощью метода Кельвин-зонд-микроскопии распределения электрического поля в детекторных $p^+-\pi-n-n^+$ -структурах на основе GaAs. Установлено наличие двух максимумов в распределении напряженности электрического поля в объеме активного слоя структур в области $p^+-\pi$ - и $\pi-n$ -переходов. Падение напряжения на $\pi-n$ -переходе расширяет область сбора неравновесных дырок в детекторах, что увеличивает эффективность сбора заряда при поглощении гамма-квантов с энергией 59.5 keV.

Кельвин-зонд-микроскопия (KPFM) является одним из методов сканирующей зондовой микроскопии. Данный метод находит применение для исследования распределения встроенных [1] и внешних потенциалов в приборных микро- и наноструктурах [2-4]. Информация о распределении потенциала в многослойных приборных структурах позволяет рассчитать профиль напряженности электрического поля и проводить более детальный анализ приборных характеристик структур. В настоящей работе метод KPFM был использован для исследования эпитаксиальных детекторных $p^+-\pi-n-n^+$ -структур из GaAs, в которых π -слой создавался путем высокотемпературной диффузии хрома. Данные структуры могут быть использованы для создания детекторов рентгеновского и гамма-излучений с энергиями квантов от 10 до 60 keV [5]. Ранее было показано, что в таких структурах при определенных режимах диффузии хрома наблюдается сбор заряда

не только электронов, но и дырок при поглощении гамма-квантов с энергией 59.5 keV [6]. Для выяснения причин наблюдаемого эффекта в работе изучалось распределение электрического поля в объеме структур.

Эпитаксиальные структуры были выращены методом газовой эпитаксии в системе Ga–AsCl₃–H₂ на сильнолегированной n^+ -подложке ($n^+ = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) и состояли из буферного слоя, с градиентным понижением уровня легирования, активного n -слоя с концентрацией электронов $n = 2.8 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ и верхнего p^+ -слоя, легированного цинком ($p^+ = 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Толщины слоев составляли 5, 50 и 2 μm соответственно. Для создания в n -слое высокоомной π -области проводилась компенсация доноров примесью хрома путем диффузии Cr через p^+ -слой.

Исследования проводились методом KPFM на атомно-силовом микроскопе (AFM) „Ntegra Prima“ (пр-во NT-MDT) при комнатных условиях. Использовались зонды на основе кремния, легированного бором, покрытые карбидом вольфрама W₂C (тип зонда — NSG/W2C, пр-во NT-MDT). Для получения профиля электрического поля в структуре измерялось распределение контактной разности потенциалов (CPD) между зондом AFM и подлежащей поверхностью поперечного скола структуры. При этом шаг по координате x в распределении CPD составлял 105 nm. Измерение профилей CPD проводилось для заземленной структуры и структуры с приложенным запорным напряжением $U_{bias} = 0 \div -7 \text{ V}$. Дифференцирование разности полученных профилей позволяло находить распределение электрического поля в объеме структур [7].

На рис. 1 представлен профиль CPD в отсутствие внешнего смещения ($U_{bias} = 0 \text{ V}$). Вертикальными линиями отмечены границы слоев структуры, выявленные с помощью химического травления скола структуры. Видно, что вдоль подложки n^+ -GaAs наблюдалось постоянное значение CPD. При переходе от подложки к буферному слою происходило увеличение CPD (примерно на 0.05 V). В активном слое величина CPD стабилизировалась, а затем по мере приближения к p^+ -области начинала спадать.

Уменьшение величины CPD означает понижение уровня Ферми в данной области структуры [8]. Это снижение может быть связано с компенсацией донорной примеси в n -слое атомами хрома. Глубина проникновения атомов Cr при использованном режиме диффузии, по

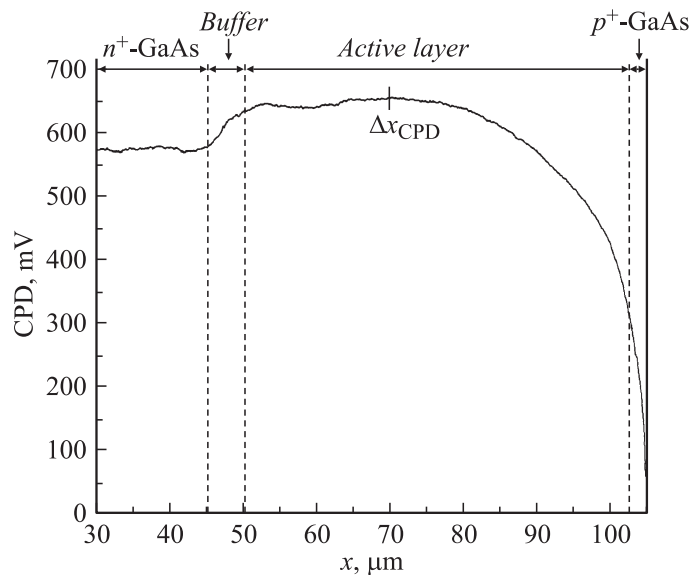


Рис. 1. Профиль контактной разности потенциалов на поперечном срезе эпитаксиально-диффузионной структуры при $U_{bias} = 0$ V.

нашим оценкам, составляет $\sim 30 \mu\text{m}$ [9]. Эта величина близка к толщине области наибольшего изменения CPD в n -слое $\Delta x_{CPD} = 32 \mu\text{m}$ при $U_{bias} = 0$ V (рис. 1).

Рассмотрение профиля диффузии Cr в n -слое позволяет предположить наличие двух переходов: $n-\pi$ - в средней части активного слоя и $\pi-p^+$ -вблизи поверхности. Эти переходы удалось выявить при проведении исследования распределения падения внешнего напряжения $\Delta\varphi(x)$ в объеме структуры, приложенного в заперном направлении. Профиль падения напряжения $\Delta\varphi(x)$ определялся как разность профилей CPD при обратном напряжении и без него: $\Delta\varphi(U_{bias} < 0 \text{ V}) = \text{CPD}(U_{bias} < 0 \text{ V}) - \text{CPD}(U_{bias} = 0 \text{ V})$. На рис. 2, а представлены типичные профили $\Delta\varphi(x)$ в исследованных структурах при различных значениях обратного напряжения $|U_{bias}|$. Как видно из рисунка, с увеличением $|U_{bias}|$ отчетливо наблюдаются две области резкого изменения $\Delta\varphi(x)$ в объеме структуры. Одна из этих областей,

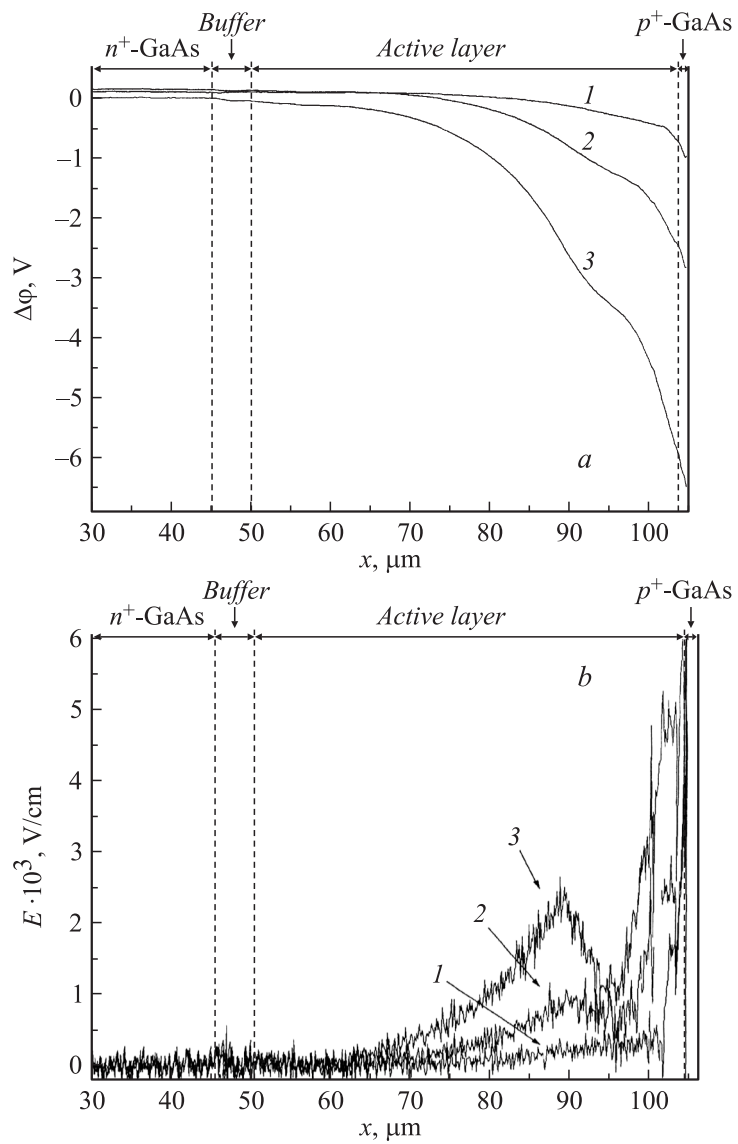


Рис. 2. Профили потенциала (а) и напряженности электрического поля (б) в объеме структуры при различных обратных смещениях $|U_{bias}|$, V: 1 — 1, 2 — 3, 3 — 7.

ближе к поверхности диода, может соответствовать $\pi-p^+$ -переходу, а вторая $n-\pi$ -переходу.

Существование указанных переходов проявилось наиболее четко в наличии двух максимумов в распределении напряженности электрического поля E (рис. 2, *b*). Распределение напряженности электрического поля определялось путем дифференцирования профиля $\Delta\varphi(x)$ при фиксированном значении U_{bias} :

$$E(x) = - \left. \frac{d\Delta\varphi(x)}{dx} \right|_{U_{bias}=\text{const}}.$$

Первый максимум напряженности электрического поля E_1 совпадает с положением $\pi-p^+$ -перехода, а второй E_2 — с $n-\pi$ -переходом. Следует отметить, что при увеличении $|U_{bias}|$ максимум напряженности электрического поля E_2 проявляется сильнее и увеличивается по амплитуде. При этом область электрического поля в исследованной структуре распространяется на большую толщину активного эпитаксиального слоя.

Последний факт позволяет объяснить появление пика событий на амплитудном гамма-спектре (АС) исследованных структур с увеличением обратного смещения при поглощении квантов с энергией 59.5 keV от радиоактивного источника ^{241}Am (рис. 3). Измерение АС проводилось с использованием стандартной блок-схемы: зарядовый предварительный усилитель—усилитель—амплитудный анализатор. Постоянная времени формирования полосы пропускания усилителя составляла 0.25 μs . Существование вышеуказанного пика событий на АС свидетельствует о вкладе в собирание заряда не только электронов, но и дырок. Действительно, согласно теореме Рамо—Шокли [10,11] собранный заряд электронов зависит от места поглощения гамма-кванта. В эпитаксиальном слое толщиной $d = 50 \mu\text{m}$ гамма-кванты с энергией 59.5 keV поглощаются практически равномерно. Таким образом, в отсутствие собирания дырок АС от гамма-квантов с энергией 59.5 keV будет выглядеть как горизонтальная линия от нуля до 59.5 keV [5]. Конфигурация профиля электрического поля с двумя максимумами напряженности приводит к тому, что при увеличении $|U_{bias}|$ возрастает дрейфовая длина неравновесных дырок в области поля E_2 (вследствие увеличения дрейфовой скорости). При этом увеличивается заряд, наводимый ими на электродах детектора.

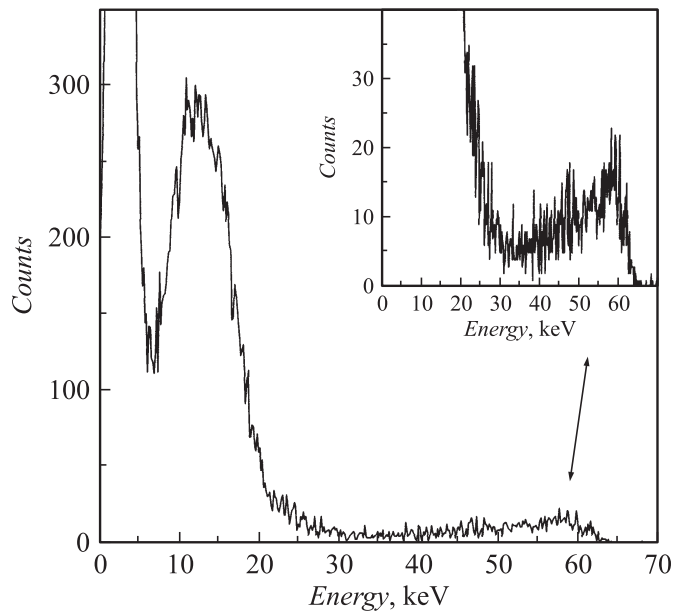


Рис. 3. Амплитудный гамма-спектр исследованных структур от источника ^{241}Am при $|U_{bias}| = 11\text{ V}$. На вставке приведен пик событий от гамма-квантов с энергией 59.5 keV в увеличенном масштабе.

Таким образом, установлено, что электрическое поле в активной области детекторных $p^+ - \pi - n - n^+$ -структур на основе GaAs спадает в ее толще не монотонно, а имеет дополнительный максимум напряженности вблизи $\pi - n$ -перехода. Наличие этого максимума приводит к собиранию в активной области детекторных структур не только неравновесных электронов, но и дырок от гамма-квантов с энергией 59.5 keV .

Следует отметить, что наблюдаемое распределение напряженности электрического поля является характерным для использованной технологии получения детекторных $p^+ - \pi - n - n^+$ -структур на основе эпитаксиального GaAs.

Авторы выражают благодарность инженерам Е.П. Друговой и В.А. Чубико за предоставленные эпитаксиальные структуры.

Работа была поддержана проектом РФФИ (№ 09-02-90724-моб_ст.) и проектом N 27 программы фундаментальных исследований президиума РАН „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“.

Список литературы

- [1] *Jiang C.-S., Moutihno H.R., Friedman D.J., Geisz J.F., Al-Jassim M.M.* // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 93. P. 10035–10040.
- [2] *Анкудинов А.В., Тутков А.Н., Laiho R., Козлов В.А.* // ФТП. 2002. Т. 36. В. 9. С. 1138–1143.
- [3] *Doukkali A., Ledain S., Guasch C., Bonnet J.* // Appl. Surf. Sci. 2004. V. 235. P. 507–512.
- [4] *Katzer K.I.-D., Mertin W., Bacher G.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 103522–103522-3.
- [5] *Айзенштат Г.И., Вилисова М.Д., Другова Е.П., Лелеков М.А., Пономарев И.В., Пороховниченко Л.П., Толбанов О.П., Чубирко В.А.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 8. С. 46–49.
- [6] *Вилисова М.Д., Гермогенов В.П., Другова Е.П., Пономарев И.В., Пороховниченко Л.П., Толбанов О.П., Чубиков В.А.* // Материалы девятой конференции „Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III–V“. Томск, 2006. С. 485.
- [7] *Robin F., Jacobs H., Homan O., Stemmer A., Bachtold W.* // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. P. 2907–2909.
- [8] *Kikukawa A., Hosaka S., Imura R.* // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. P. 3510–3512.
- [9] *Вилисова М.Д., Другова Е.П., Пономарев И.В., Чубирко В.А.* // ФТП. 2008. Т. 42. В. 2. С. 239–242.
- [10] *Ramo S.* // J. Appl. Phys. 1938. V. 9. P. 635.
- [11] *Trammel R., Walter J.F.* // Nucl. Instr. and Meth. 1969. V. 76. P. 317.