

УДК 519.2:537.226;534.538

М.Д. ВИЛИСОВА*, В.П. ГЕРМОГЕНОВ**, И.В. ПОНОМАРЕВ**, А.В. ТЯЖЕВ*

ДЕТЕКТОРЫ ГАММА-КВАНТОВ НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ GaAs:S,Cr¹

Проведено исследование структур на основе компенсированных хромом эпитаксиальных слоев GaAs в качестве детекторов γ -квантов с энергией 59,5 кэВ. Установлено влияние распределения напряженности электрического поля в активной области структур на их амплитудные γ -спектры.

Ключевые слова: арсенид галлия, детектор, гамма-кванты.

Для увеличения толщины активной области детекторов барьерного типа на основе GaAs требуется материал с низкой концентрацией носителей заряда. Последнее достигается за счет выращивания слоев из особо чистых компонентов [1] или геттерирования фоновых примесей лантаноидами [2]. В данной работе исследовались структуры для детекторов γ -квантов с пониженной концентрацией носителей в активной области, полученной компенсацией остаточных примесей атомами хрома [3].

Экспериментальные структуры были выращены методом газовой эпитаксии в системе Ga-AsCl₃-H₂ на сильнолегированной n^+ -подложке ($n^+ = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) и состояли из буферного слоя с плавным понижением уровня легирования, активного n -слоя, легированного серой ($n = 2,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) и верхнего p^+ -слоя, легированного цинком ($p^+ = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Толщины слоев составляли 5, 50 и 2 мкм соответственно. Для понижения концентрации носителей заряда в эпитаксиальном n -слое проводилась компенсация доноров акцепторной примесью Cr путем диффузии через p^+ -слой. В результате проведения диффузии при различных режимах (изменялись температура и время) были получены структуры различных типов. В одних структурах в эпитаксиальном n -слое формировалась область с пониженной относительно исходной концентрацией электронов n^- , и структуры имели строение $p^+ - n^- - n - n^+$ (I тип). В структурах II типа возникала π -область, толщина которой не превышала толщины n -слоя ($d_\pi < 30 \text{ мкм}$), и они имели строение $p^+ - \pi - n^- - n^+$. В структурах III типа высокоомная π -область занимала всю толщину n -слоя, и они имели строение $p^+ - \pi - n^+$.

В работе проводилось исследование амплитудных спектров (АС) от радиоактивного изотопа Am²⁴¹. Для измерения АС использовалась стандартная блок-схема: зарядовый предварительный усилитель – усилитель – амплитудный анализатор. АС измерялись при подаче обратного напряжения $U_{обр} = 21 \text{ В}$. Облучение γ -квантами проводилось со стороны p^+ -слоя структур.

АС от γ -квантов с энергией E_γ исследованных структур представлены на рис. 1. Видно, что на АС структур I и II типов (рис. 1, а, б) присутствует пик событий при номерах канала АЦП 340 и 250 соответственно. На АС структур III типа вместо пика присутствует «полочка» событий в диапазоне номеров канала АЦП от 150 до 400 (рис. 1, в).

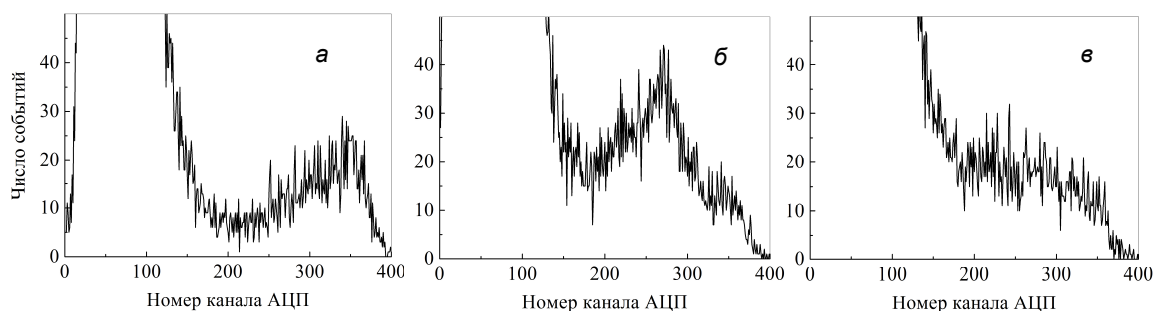


Рис. 1. Амплитудные спектры от квантов с $E_\gamma = 59,5 \text{ кэВ}$ структур I (а), II (б) и III (в) типов при $U_{обр} = 21 \text{ В}$

¹ Работа выполнена в рамках ФЦП, ГК № 16.523.11.3009, ГК П886.

Причинами такого поведения АС может быть влияние распределения напряженности электрического поля в активной области экспериментальных структур. В работе [4] было установлено, что распределение напряженности электрического поля $E(x)$ в детекторных структурах на основе эпитаксиальных слоев GaAs:S,Cr является неравномерным и зависит от режима диффузии атомов хрома. В структурах I типа активной областью является ОПЗ p^+-n^- -перехода и распределение $E(x)$ имеет один пик напряженности E_1 . В структурах II и III типа активной является π -область. В структурах II типа наблюдаются два пика напряженности электрического поля. Один пик E_1 располагается на $p^+-\pi$ -переходе, а второй E_2 – на $\pi-n^-$ -переходе. При малой толщине π -области $p^+-\pi$ - и $\pi-n^-$ -переходы располагались близко друг к другу. В результате профиль напряженности электрического поля представлял два смыкающихся пика. В структурах III типа имеются два пика (E_1 на $p^+-\pi$ - и E_2 на $\pi-n^-$ - переходах), разделенных π -областью с низкой напряженностью поля.

Как известно, в слое GaAs толщиной 50 мкм поглощаются лишь 3 % потока квантов с $E_\gamma = 59,5$ кэВ, причем поглощение является равномерным по всей толщине слоя. В данном случае влияние профиля напряженности электрического поля $E(x)$ на собирание неравновесного заряда становится определяющим. Для объяснения экспериментальных АС от γ -квантов с энергией $E_\gamma = 59,5$ кэВ был проведен модельный расчет с учетом неравномерного распределения $E(x)$, установленного в работе [4]. Амплитудный спектр был рассчитан на основании выражения [5]

$$\frac{dN}{dE} = \int_0^W \frac{k \cdot \exp^{-k \cdot x}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma(1 - \exp^{-k \cdot W})}} \cdot \exp\left(\frac{-(E - E_\gamma \cdot \eta(x))^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) dx,$$

где W – толщина активной области, k – коэффициент поглощения γ -излучения с энергией E_γ ; $\eta(x)$ – эффективность собирания заряда в зависимости от точки генерации неравновесного заряда; dN/dE – число событий; σ – среднеквадратичное отклонение собранного заряда. В качестве выражения для $\eta(x)$ использовалась известная формула Хехта [5]. В выражении для $\eta(x)$ учитывалась зависимость дрейфовой длины электронов и дырок от распределения напряженности электрического поля в активной области структур. Расчеты проводились при следующих параметрах: $k = 10,75 \text{ см}^{-1}$, $E_\gamma = 59,5$ кэВ, $\sigma = 3$ кэВ. Толщина активной области в структурах I и II типов составляла $W = 30$ мкм, а в структурах III типа – $W = 50$ мкм. Время жизни электронов τ_n для всех типов структур считалось одинаковым и составило $\tau_n = 4 \cdot 10^{-8}$ с [6]. Для согласования расчетных и экспериментальных АС варьировалось время жизни дырок τ_p . В результате наилучшее согласование экспериментальных и расчетных АС было достигнуто при временах жизни дырок для структур I и II типов $\tau_p = 1 \cdot 10^{-10}$ с, а для структур III типа – $\tau_p = 1 \cdot 10^{-12}$ с. Расчетные АС представлены на рис. 2.

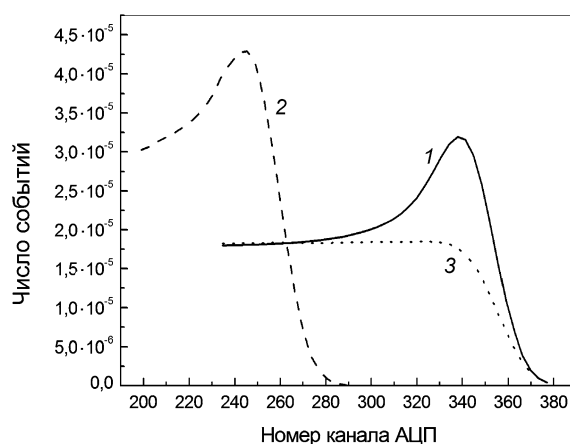


Рис. 2. Расчетные амплитудные спектры от γ -квантов с энергией $E_\gamma = 59,5$ кэВ для структур различных типов: кр. 1 – I; кр. 2 – II; кр. 3 – III

Анализ результатов расчета АС экспериментальных структур показал следующее: формирование дополнительного максимума электрического поля в глубине эпитаксиального слоя при переходе от структур I типа к структурам II типа приводит к уменьшению номера канала АЦП пика событий от квантов с $E_\gamma = 59,5$ кэВ. Отсутствие пика событий в структурах III типа, вероятно, связано с захватом дырок на глубокие акцепторные уровни Cr [6], что приводит к малому времени

жизни дырок $\tau_p = 1 \cdot 10^{-12}$ с. В результате, дрейфовая длина дырок является малой по отношению к толщине активной области W , что обуславливает крайне низкий вклад дырок в эффективность собирания неравновесного заряда.

Таким образом, в детекторных структурах на основе эпитаксиальных слоев GaAs:S,Cr увеличение толщины π -области приводит к ухудшению амплитудных спектров при регистрации γ -квантов с энергией $E_\gamma = 59,5$ кэВ. Причиной этого является неоднородное распределение напряженности электрического поля и малое время жизни неравновесных дырок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Залетин В. М. // Атомная энергия. – 2004. – Т. 97. – № 5 – С. 362–370.
2. Гореленок А. Т., Томасов А. А., Шмидт Н. М. и др. // ПЖТФ. – 2006. – Т. 32. – № 9. – С. 64–69.
3. Вилисова М. Д., Другова Е. П., Пономарев И. В. и др. // ФТП. – 2008. – Т. 42. – № 2. – С. 239–242.
4. Вилисова М. Д., Гермогенов В. П., Казтаев О. Ж. и др. // ПЖТФ. – 2010. – Т. 36. – № 9. – С. 95–101.
5. Trammell R. and Walter F. J. // Nucl. Instr. Meth. – 1969. – V. A76. – P. 317–321.
6. Айзенштат Г. И., Вилисова М. Д., Другова Е. П. и др. // ЖТФ. – 2006. – Т. 76. – № 8. – С. 46–49.

*Сибирский физико-технический институт им. акад. В.Д. Кузнецова
Национального исследовательского Томского государственного университета,
г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 15.06.12.

**Национальный исследовательский
Томский государственный университет, г. Томск, Россия
E-mail: spti@sibmail.com