

06;07;08

Управление процессами фотоэлектрического преобразования в гетероструктурах GaAs/AlGaAs с помощью пьезоэлектрических полей акустических колебаний

© В.В. Курилюк, О.А. Коротченков

Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко,
036680 Киев, Украина
e-mail: kuryluk@univ.kiev.ua, olegk@univ.kiev.ua

(Поступило в Редакцию 30 июля 2008 г.)

Контроль и управление транспортными и рекомбинационными процессами с участием носителей заряда в низкоразмерных гетероструктурах является важной задачей прикладной физики, актуальность которой связана как с необходимостью повышения эффективности работы существующих приборов опто- и наноэлектроники на их основе, так и с возможностью создания новых устройств.

Изучается возможность управления процессами фотоэлектрического преобразования в гетероструктурах с квантовыми ямами GaAs при помощи пьезоэлектрических полей, генерированных акустическими колебаниями. Исследования спектральных зависимостей конденсаторной фотоЭДС гетероструктур свидетельствуют, что при изменении пространственной конфигурации пьезоэлектрических полей, которая определяется частотой колебаний в структуре, возможна реализация управления процессами разделения носителей заряда как в плоскости квантовых ям, так и в перпендикулярном направлении.

PACS: 78.67.De, 73.50.Pz

Введение

Фотоэлектрические преобразователи на основе полупроводниковых гетероструктур с квантовыми ямами обладают рядом преимуществ по сравнению с аналогами, построенными на объемных материалах. В частности использование низкоразмерных структур позволило улучшить рабочие характеристики солнечных элементов [1]. Активно ведутся разработки детекторов на базе гетероструктур с асимметричными квантовыми ямами, благодаря чему открывается возможность перестройки длины волны регистрируемого излучения путем изменения заселенности квантовых ям внешним электрическим полем [2].

Эффективность фотоэлектрического преобразования в полупроводниковых низкоразмерных гетероструктурах во многом определяется транспортными и рекомбинационными свойствами, а также процессами пространственного разделения носителей заряда встроенным электрическим полем структуры. Частичный контроль указанных параметров реализуется при выращивании структур путем подбора числа периодов, состава материала барьерных слоев и др. [3–4]. Альтернативным методом управления свойствами гетероструктур с квантовыми ямами и поведением носителей заряда в них является использование внешних воздействий, в частности, акустических волн и сопровождающих их полей [5–7].

Установлено, что взаимодействие носителей заряда с пьезоэлектрическими полями, которыми сопровождаются акустические волны в гетероструктурах на базе полярных полупроводников, может существенно увеличивать время жизни электронно-дырочных пар, транспортную длину [5,6]. Следует отметить, что большин-

ство исследований поведения носителей заряда в полупроводниковых структурах при воздействии пьезополей выполнялись с использованием бегущих, в частности поверхностных акустических волн. В последнее время сообщалось о возможности управления свойствами гетероструктур посредством возбуждения в них объемных стоячих акустических волн [8–10]. Такой подход позволяет генерировать в структурах электрические и упругие поля большей амплитуды и заранее известной пространственной конфигурации, что открывает путь к целенаправленному управлению оптическими и фотоэлектрическими свойствами гетероструктур.

В настоящей работе сообщается о возможности управления процессами фотоэлектрического преобразования в полупроводниковых гетероструктурах GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами при помощи пьезоэлектрических полей, генерированных резонансными акустическими колебаниями указанных структур.

Образцы и методика исследований

В работе исследовались гетероструктуры GaAs/Al_{0.5}Ga_{0.5}As, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Образцы включали подложку *n*⁺-типа (001) GaAs, буферный слой GaAs:Si ($1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) толщиной 100 nm и 20 периодов квантовых ям GaAs толщиной 10 nm, разделенных барьерными слоями Al_{0.5}Ga_{0.5}As такой же толщины. Сверху структуры покрывались слоем GaAs толщиной 30 nm, легированного Be с концентрацией $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Поперечные размеры структур составляли примерно $4 \times 4 \text{ mm}$.

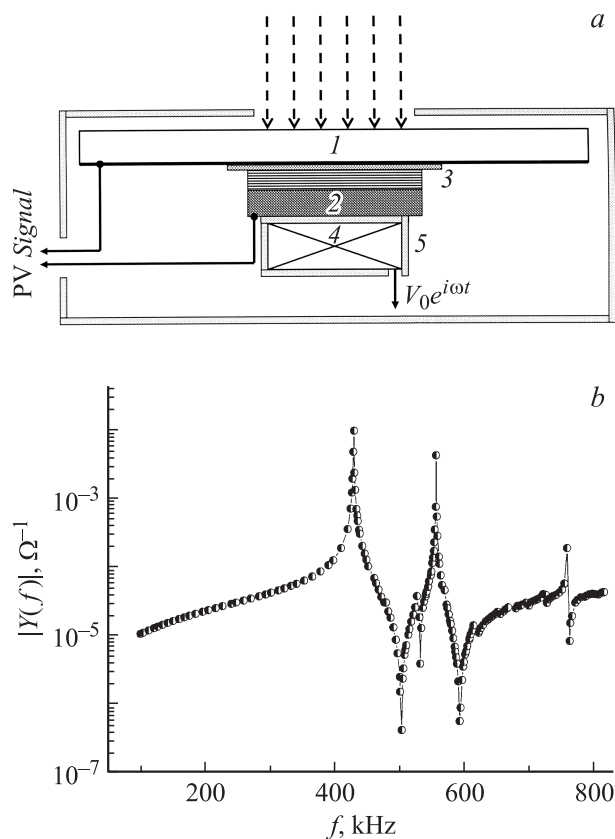


Рис. 1. *a* — схема ячейки для регистрации спектров конденсаторной фотоЭДС в гетероструктурах GaAs/AlGaAs под действием акустических колебаний: 1 — прозрачный электрод, 2 — гетероструктура с квантовыми ямами, 3 — слюда, 4 — пьезопреобразователь, 5 — металлический экран; *b* — фрагмент частотной зависимости модуля полной проводимости системы пьезопреобразователь—гетероструктура.

Экспериментально исследовалось влияние пьезоэлектрических полей, генерированных резонансными акустическими колебаниями, на спектры конденсаторной фотоЭДС гетероструктур. Схема измерительной ячейки для регистрации спектральных зависимостей фотоЭДС показана на рис. 1, *a*. Образец освещался модулированным светом с частотой модуляции ~ 1 kHz, регистрация сигнала проводилась при комнатной температуре по стандартной методике с синхронным детектированием. Колебания возбуждались с помощью цилиндрического пьезокерамического преобразователя, жестко приклеенного к гетероструктуре со стороны подложки. Исследования проводились на резонансных частотах колебаний системы пьезопреобразователь—гетероструктура, которые экспериментально определялись из частотной зависимости модуля полной проводимости системы (рис. 1, *b*). Измерения на каждой резонансной частоте выполнялись при нескольких значениях амплитуды возбуждающего напряжения $V_0 e^{i\omega t}$, подаваемого на электроды преобразователя. Диапазон исследуемых частот $\omega/2\pi$ составлял 0.3–2 МГц.

Теоретически расчет пьезоэлектрических полей в гетероструктуре, которыми сопровождаются ее акустические колебания, производился по методике, описанной ранее в работе [10].

Результаты и их обсуждение

Спектры конденсаторной фотоЭДС исследуемых гетероструктур представлены на рис. 2. Ступенчатый характер спектральных зависимостей обусловлен возбуждением переходов между электронными и дырочными уровнями в квантовых ямах GaAs, энергетические расстояния между которыми показаны стрелками на рис. 2, *a*.

Полученные в работе данные свидетельствуют о том, что под действием акустических колебаний происходит изменение сигнала фотоЭДС гетероструктур, характер которого зависит от частоты ω и амплитуды V_0 возбуждающего напряжения. Например, для $\omega/2\pi = 430.5$ kHz наблюдается увеличение сигнала в спектре фотоЭДС относительно исходного спектра при $V_0 = 0$ (рис. 2, *a*). Наоборот, на частоте

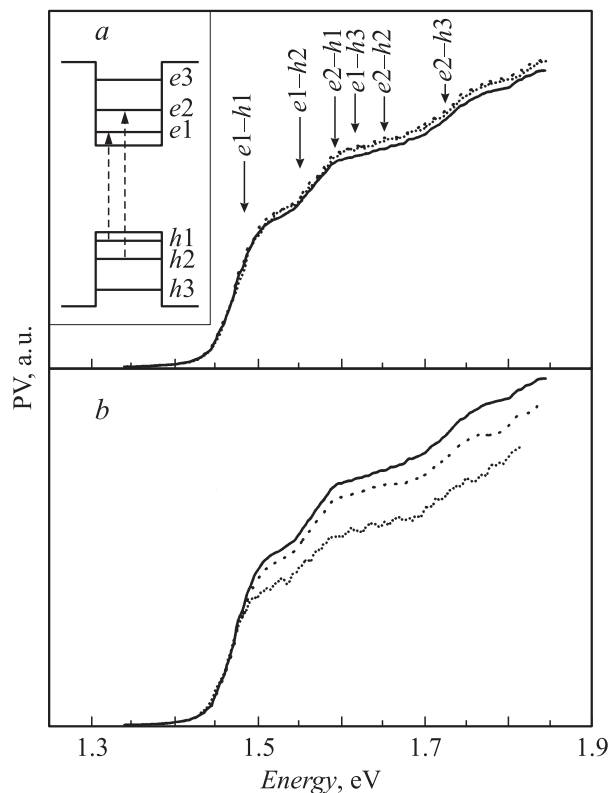


Рис. 2. Спектры конденсаторной фотоЭДС гетероструктур GaAs/Al_{0.5}Ga_{0.5}As под действием акустических колебаний на частоте 430.5 (*a*) и 557.1 kHz (*b*) при различных значениях амплитуды V_0 (сплошная кривая — 0, штриховая — 10, пунктир — 20 В) возбуждающего напряжения, подаваемого на электроды пьезопреобразователя. На вставке рис. 2, *a* — схема энергетических уровней электронов и дырок в квантовых ямах исследуемых структур.

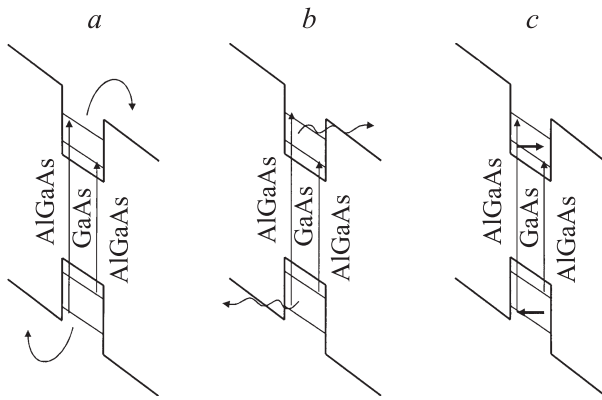


Рис. 3. Возможные механизмы пространственного разделения носителей заряда и генерации фотоЭДС в гетероструктуре: *a* — надбарьерная эмиссия и разделение носителей, *b* — туннелирование и разделение носителей, *c* — разделение носителей внутри квантовой ямы.

$\omega/2\pi = 557.1$ kHz с увеличением амплитуды V_0 возбуждающего напряжения, а следовательно и амплитуды акустических колебаний в структуре, сигнал фотоЭДС уменьшается (рис. 2, *b*).

Генерация фотоЭДС в структурах с квантовыми ямами происходит вследствие пространственного разделения носителей заряда встроенным электрическим полем гетероструктуры тремя основными путями [11]:

- надбарьерная эмиссия носителей из квантовых ям;
- туннелирование носителей заряда с дальнейшим их разделением;
- разделение электронов и дырок в пределах одной квантовой ямы (соответственно рис. 3, *a-c*).

По-видимому, наблюдаемые в экспериментах изменения сигнала фотоЭДС связаны с двумя факторами:

- тепловым действием ультразвуковых колебаний;
- влиянием сопровождающих колебаний пьезоэлектрических полей на процессы разделения заряда указанными механизмами.

Влиянием деформационного взаимодействия в исследуемом диапазоне частот для полупроводников типа GaAs можно пренебречь [12].

Как известно [13], тепловое влияние проявляется в размывании ступенек в спектрах фотоЭДС, что проявляется в наших экспериментах при увеличении амплитуды колебаний структуры (рис. 2). Однако поскольку мощность возбуждаемых в образцах акустических колебаний в случаях, представленных на рис. 2, *a, b*, одного порядка (~ 0.6 W/cm²), то обнаруженная зависимость изменения сигнала фотоЭДС от частоты не сводится к тепловому действию ультразвука и может быть связана с действием пьезоэлектрических полей.

В результате проведенных нами расчетов пьезоэлектрических полей в гетероструктурах было установлено, что изменение резонансной частоты колебаний приводит к изменению соотношений между нормальной E_n и тангенциальными E_τ (относительно плоскости кванто-

вых ям) компонентами вектора электрического поля. В частности, на частоте $\omega/2\pi = 430.5$ kHz расчет дает в максимуме $E_n : E_\tau = 1.7 : 0.6$ kV/cm, тогда как для $\omega/2\pi = 557.1$ kHz имеем $E_n : E_\tau = 0.34 : 0.38$ kV/cm.

Следовательно, можно предположить, что включение переменного электрического поля с доминирующими тангенциальными составляющими приводит к дрейфу фотогенерированных носителей заряда в плоскости квантовых ям с частотой возбуждающего сигнала. При этом в областях максимумов и минимумов электрического потенциала формируются пространственно разделенные электронные и дырочные „сгустки“ [8]. Как следствие уменьшается роль механизма пространственного разделения в пределах квантовой ямы и усредненный за период колебаний сигнал фотоЭДС падает, что и наблюдалось в наших экспериментах на частоте 557.1 kHz (см. рис. 2, *b*).

Увеличение фотоЭДС гетероструктур при $\omega/2\pi = 430.5$ kHz, с учетом преобладания на данной частоте колебаний нормальной E_n составляющей пьезополя, можно объяснить возрастанием роли процессов туннелирования и надбарьерной эмиссии носителей. Вследствие изгиба энергетических зон под действием электрического поля, которое является суммой встроенного и пьезоэлектрического полей, снижается высота потенциальных барьеров для носителей заряда и увеличивается их эмиссия за пределы квантовых ям. Стимулированное нормальной составляющей пьезополя пространственное разделение фотовозбужденных электронов и дырок и приводит к наблюдаемому в экспериментах возрастанию сигнала фотоЭДС (см. рис. 2, *a*).

Заключение

Таким образом, в работе показана возможность управления фотоэлектрическими свойствами полупроводниковых гетероструктур с квантовыми ямами при помощи пьезоэлектрических полей, генерированных резонансными акустическими колебаниями структур. Соответствующим выбором частоты колебаний, а следовательно и пространственной конфигурации пьезоэлектрических полей в структуре, возможен контроль процессов пространственного разделения носителей заряда в плоскости квантовых ям и в перпендикулярном направлении с соответствующим изменением спектров конденсаторной фотоЭДС.

Список литературы

- [1] *Torchynska T.V., Polupan G.P.* // Semiconductor Physics. Quantum Electronics & Optoelectronics. 2002. Vol. 5. N 1. P. 63–70.
- [2] *Majumdar A., Choi K.K., Reno J.L., Rokhinson L.P., Tsui D.C.* // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 80. N 5. P. 707–709.
- [3] *Bushnell D.B., Tibbits T.N.D., Barnham K.W.J. et al.* // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 97. N 12. P. 124 908–124 912.

- [4] *Nejad S.M., Olyaei S., Pourmahyabadi M.* // Am. J. Appl. Sci. 2008. Vol. 5. N 8. P. 1071–1078.
- [5] *Roche C., Zimmermann S., Wixforth A.* et al. // Phys. Rev. Lett. 1997. Vol. 78. N 21. P. 4099–4102.
- [6] *Roche C., Govorov A., Wixforth A.* et al. // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 57. N 11. P. R6850–6853.
- [7] *Гуляев Д.В., Журавлев К.С.* // ФТП. 2007. Т. 41. Вып. 2. С. 211–216.
- [8] *Nadtochiy A.B., Korotchenkov O.A., Grimmeiss H.G.* // Phys. Rev. B. 2003. Vol. 67. N 12. P. 125 301-1–125 301-5.
- [9] *Korotchenkov O.A., Gantarero A.* // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 75. N 8. P. 085 320-1–085 320-5.
- [10] *Korotchenkov O.A., Polovina O.I., Kurylyuk V.V.* // IEEE T. Ultrason. Ferr. 2007. Vol. 54. N 12. P. 2529–2534.
- [11] *Datta S., Arora B.M., Kumar S.* // Phys. Rev. B. 2000. Vol. 66. N 20. P. 13 604–13 611.
- [12] *Курилюк В.В., Половина А.И., Коротченко О.А.* Укр. физ. журн. Т. 53. № 6. С. 579–585.
- [13] *Dimitras Gh., Riechert H.* // Phys. Rev. B. 2002. Vol. 66. N 20. P. 205 324-1–0205 324-8.