

Пьезоэффект в структурах с нитевидными нанокристаллами GaAs

© И.П. Сошников^{+*}¶, Дм.Е. Афанасьев*, В.А. Петров⁺, Г.Э. Цырлин^{+*‡}, А.Д. Буравлев⁺,
Ю.Б. Самсоненко^{+*‡}, А. Хребтов*, Е.М. Танклевская*, И.А. Селезнев[#]

⁺ Санкт-Петербургский академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий
Российской академии наук,
195220 Санкт-Петербург, Россия

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

‡ Институт аналитического приборостроения Российской академии наук,
190103 Санкт-Петербург, Россия

• Санкт-Петербургский государственный университет (физический факультет),
198504 Санкт-Петербург, Россия

ОАО «Океанприбор»,

197376 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 17 февраля 2011 г. Принята к печати 25 февраля 2011 г.)

Обнаружен аномальный пьезоэлектрический эффект в нитевидных нанокристаллах GaAs (коэффициент пьезоэлектрического преобразования $d_{33} \approx 26$ пКл/Н). Полученный результат может объясняться преимущественным содержанием в нитевидных нанокристаллах GaAs фазы с кристаллической структурой типа вюрцита и увеличением усилия при давлении на контактный слой.

Структуры с пьезоэлектрическими свойствами представляют большой интерес для приложений в различных микро- и нанoeлектромеханических системах (MEMS) [1–8]. Обычно пьезоэлектрические свойства, подходящие для практических применений, проявляют материалы с полярной кристаллической структурой, в частности соединения II–VI и III–V со структурой типа вюрцита [3–8]. В то же время материалы III–V GaAs, InAs с решеткой типа сфалерита (кубическая) имеют довольно низкие значения коэффициентов пьезообразования [9–12]. В [13–15] была обнаружена возможность формирования нитевидных нанокристаллов (ННК) материалов III–V (не нитридных) в гексагональной фазе (вюрцит и политипы). На примере соединений II–VI [10–12, 16] известно, что изменение кристаллической структуры может приводить к существенному изменению пьезоэлектрических свойств объекта. Поэтому в работе проводятся предварительные исследования пьезоэлектрического эффекта в нитевидных нанокристаллах GaAs.

В качестве подложек для образцов использовались пластины GaAs (111)В *n*- и *p*-типа проводимости с легированием до уровней $\sim 10^{18}$ см⁻³. Нитевидные нанокристаллы GaAs выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в соответствии с методикой, разработанной ранее [15, 17, 18]. Характерные размеры ННК составляли ~ 25 нм в диаметре и ~ 2000 нм в длину, плотность $\sim 10^8$ см⁻². Исследование поверхностной структуры образцов проводилось методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) на электронном микроскопе SUPRA25 C.Zeiss. Пример РЭМ-изображения поперечного сечения образца с ННК GaAs приведен на рис. 1, а.

Поверх ННК методом центрифугирования наносилось полимерное покрытие ПММА. Характерная толщина

слоя полимера варьировалась изменением вязкости исходного раствора полимера и составляла ~ 1000 нм. Планарные слои на сателлитных образцах обладали следующими свойствами: толщина от 50 до 1500 нм (в зависимости от вязкости подготовленного раствора), коэффициент преломления $n \approx 1.5$, диэлектрическая проницаемость $\epsilon \approx 3$ [19], пробойное напряжение 20 В и выше. Измерения толщины и коэффициента преломления слоя ПММА на сателлитных образцах осуществлялись методами РЭМ и эллипсометрии.

На рис. 1, б представлено РЭМ-изображение поперечного сечения образца после нанесения слоя полимера. Можно видеть, что в пространстве между ННК формируется слой полимера. Следует особо отметить, что при высоких значениях аспектного соотношения высоты ННК к среднему расстоянию между ними ($a > 1$) формирование слоя полимера возможно только при низких величинах вязкости и толщина слоя соответствует высоте ННК. Указанный эффект обусловлен капиллярными явлениями.

Формирование контактов проводилось на установке Auto500 Voc Edwards с источниками металлов электронно-лучевого и резистивного типов. Предварительно для удаления паразитного полимера образцы обрабатывались в плазме аргона при напряжении ~ 0.5 кВ в течение 5–10 мин. При напылении металлов обеспечивалась температура образцов $\sim 150^\circ\text{C}$. Последовательность и толщины напыляемых слоев были выбраны следующие: Ge/Ni/Au — 2/1/500 нм. После напыления из пластины вырезались образцы площадью от 1 до 10 мм², что обеспечивает электрическую емкость структуры $C = 30\text{--}1000$ пФ ($C \approx 26S$ пФ, где S — площадь в мм²).

Измерения пьезоэлектрического эффекта проводились на специальном стенде, оборудованном источником звука, столиком для образцов и осциллографом. Особо отметим, что источник звука и система регистрации

¶ E-mail: ipsosh@beam.ioffe.ru

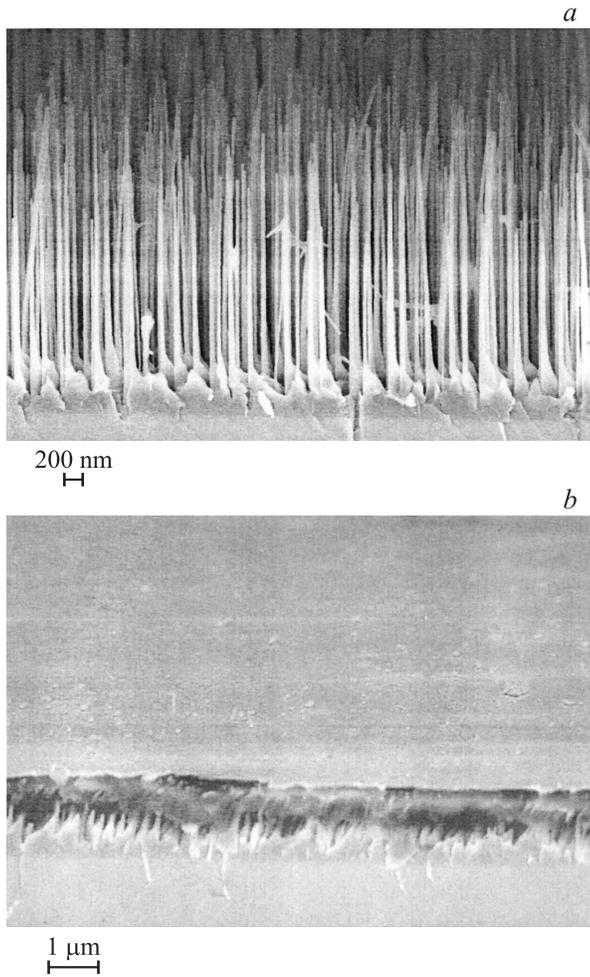


Рис. 1. РЭМ-изображение поперечного сечения образца с ННК GaAs, выращенными на подложке GaAs (111)В, легированной кремнием до уровня $n \approx 10^{18} \text{ см}^{-2}$, до (а) и после (б) нанесения изолирующего (ПММА) и контактного (Ge/Ni/Au) слоев.

были организованы независимыми. Предварительно параметры источника звука были калиброваны с помощью стандартного шумомера.

На рис. 2 приведены осциллограмма напряжения и фурье-спектр, зарегистрированные на образце при возбуждении монохроматическим звуковым сигналом. Можно видеть, что спектр сигнала содержит только частоту, соответствующую возбуждающей. Амплитуда напряжения на пьезопреобразователе составляет $\sim (1-2) \text{ мВ}$ при мощности возбуждения не более 65 дБ, что соответствует чувствительности $s \approx 1 \cdot 10^{-3} \text{ В/Па}$. Оценка модуля пьезоэлектрического преобразования дает величину $d_{33} \approx 26 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/Н}$, что существенно отличается от табличных значений $d_{33} = 0$, $d_{14} = 2.7 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/Н}$ [10,11]. Указанное различие может объясняться двумя факторами:

- используемый материал в виде ННК содержит преимущественно гексагональную (вюрцитную) фазу;
- давящее усилие увеличивается в результате передачи через контактный слой металла на ННК.

Измеренные зависимости амплитуды сигнала на пьезопреобразователе от мощности возбуждающего звука в области до 65 дБ имеют линейный характер в диапазоне от 1000 до 18 000 Гц. Амплитудно-частотная характери-

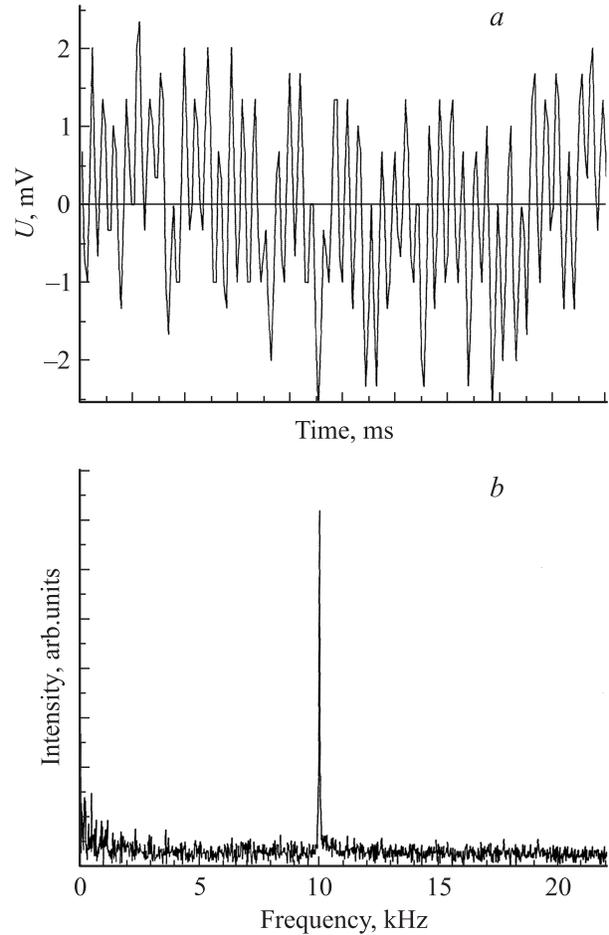


Рис. 2. Напряжение U на образце (а) и его фурье-образ (б) при возбуждении звуком интенсивностью 60 дБ и частотой 10 кГц.

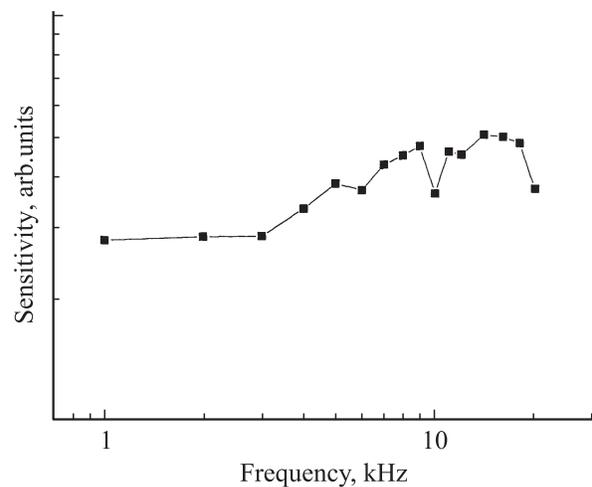


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика напряжения на образце.

стика сигнала пьезопреобразователя приведена на рис. 3. Полученная характеристика свидетельствует о слабой частотной зависимости пьезоэффекта в исследованном диапазоне, что, по-видимому, объясняется отсутствием резонансов в созданных структурах при указанных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (контракты № 02.740.11.0383, 16.740.11.0019, 14.740.11.0592 и 13.G25.31.0054), РФФИ и программами FP7 SOBONA, FUNPROB.

Авторы признательны В.Г. Дубровскому и В.М. Устинову за оказанную поддержку исследований.

Список литературы

- [1] S.C. Masmanidis, R.B. Karabalin, I. De Vlaminck, G. Borghs, M.R. Freeman, M.L. Roukes. *Science*, **317**, 780 (2007).
- [2] J.G. Gualtieri, J.A. Kosinski, A. Ballato. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **41**, 53 (1994).
- [3] H. Tong, B.L. Wang, Z.C. Ou-Yang. *Thin Sol. Films*, **516**, 2708 (2008).
- [4] S.N. Cha, J.-S. Seo, S.M. Kim, H.J. Kim, Y.J. Park, S.-W. Kim, J.M. Kim. *Adv. Mater.*, **22**, 4726 (2010).
- [5] Z.L. Wang. *Appl. Phys. A*, **88**, 7 (2007).
- [6] Z.L. Wang. *J. Phys. Chem. Lett.*, **1**, 1388 (2010).
- [7] M.B. Kanoun, S. Goumri-Said, A.E. Merad, G. Merad, J. Cibert, H. Aourag. *Semicond. Sci. Technol.*, **19**, 1220 (2004).
- [8] X. Wang, K. Kim, Y. Wang, M. Stadermann, A. Noy, A.V. Hamza, J. Yang, D.J. Sirbully. *Nano Lett.*, **10**, 4901 (2010).
- [9] Y.M. Niquet. *Phys. Rev. B*, **74**, 155 304 (2006).
- [10] Landolt-Börnstein. *Group III Condensed Matter Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology*, v. 41A1b: *Group IV Elements. IV–VI and III–V Compounds. Part b — Electronic, Transport, Optical and Other Properties*, ed. by O. Madelung, U. Rössler, M. Schulz [chapter: DOI 10.1007/10832182_206].
- [11] G. Arlt, P. Quadflieg. *Phys. Status Solidi B*, **25**, 323 (1968).
- [12] K. Huebner. *Phys. Status Solidi B*, **57**, 627 (1973).
- [13] K. Hiruma, M. Yazawa, K. Haraguchi, K. Ogawa, T. Katsuyama, M. Koguchi, H. Kakibayashi. *J. Appl. Phys.*, **74** (5), 3162 (1993).
- [14] B.J. Ohlsson, M.T. Bjork, M.H. Magnusson, K. Deppert, L. Samuelson, L.R. Wallenberg. *Appl. Phys. Lett.*, **79** (20), 3335 (2001).
- [15] И.П. Сошников, Г.Э. Цырлин, А.А. Тонких, Ю.Б. Самсоненко, В.Г. Дубровский, В.М. Устинов, О.М. Горбенко, D. Litvinov, D. Gerthsen. *ФТТ*, **47** (12), 2121 (2005). [*Phys. Solid State*, **47** (12), 2213 (2005)].
- [16] Landolt-Börnstein. *Group III Condensed Matter Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology*, v. 41B: *II–VI and I–VII Compounds; Semimagnetic Compounds*, ed. by O. Madelung, U. Rössler, M. Schulz [chapter: DOI 10.1007/10681719_1; book: DOI 10.1007/b71137].
- [17] V.G. Dubrovskii, G.E. Cirlin, I.P. Soshnikov, A.A. Tonkikh, Yu.B. Samsonenko, V.M. Ustinov, N.V. Sibirev. *Phys. Rev. B*, **71**, 205 325 (2005).
- [18] Г.Э. Цырлин, В.Г. Дубровский, Н.В. Сибирев, И.П. Сошников, Ю.Б. Самсоненко, А.А. Тонких, В.М. Устинов. *ФТП*, **39** (5), 587 (2005) [*Semiconductors*, **39** (5), 557 (2005)].
- [19] P.K.C. Pillai, P. Khurana, A. Tripathi. *J. Mater. Sci. Lett.*, **5** (6), 629 (1986).

Редактор Л.В. Шаронова

Piezoelectric effect in GaAs nanowires

I.P. Soshnikov^{+,*}, Dm.E. Afanas'ev^{*,}, V.A. Petrov^{+,}, G.E. Cirlin^{+,*‡}, A.D. Bouravlev^{+,*}, Yu.B. Samsonenko^{+,*‡}, A. Khrebtov^{*}, E.M. Tanklevskaya^{*}, I.A. Seleznev[#]

⁺ St. Petersburg Academic University — Nanotechnology Research and Education Centre, Russian Academy of Sciences, 195220 St. Petersburg, Russia

^{*} Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

[‡] Institute for Analytical Instrumentation, Russian Academy of Sciences, 190103 St. Petersburg, Russia

[•] St. Petersburg State University (Physical Department), 198504 St. Petersburg, Russia

[#] Oceanpribor corp., 197376 St. Petersburg, Russia

Abstract Anomalous piezoelectric effect in GaAs nanowires is discovered (piezoelectric coefficient $d_{33} \approx 26$ pC/N). The result can be explained by predominantly content of hexagonal (wurtzite, polytypes) phases in the nanowires and increasing in force by a contact layer.