

07;08

Влияние центра EL2 на фотоотклик ансамбля радиальных нитевидных нанокристаллов GaAs/AlGaAs

© Н.Р. Григорьева¹, И.В. Штром^{1,2}, Р.В. Григорьев¹, И.П. Сошников^{2,3,4}, Р.Р. Резник⁵, Ю.Б. Самсоненко², Н.В. Сибирев^{1,5}, Г.Э. Цырлин^{3,6}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия

⁶ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина)

E-mail: n.r.grigorieva@spbu.ru, igorstrom@mail.ru

Поступило в Редакцию 7 мая 2019 г.

В окончательной редакции 7 мая 2019 г.

Принято к публикации 13 мая 2019 г.

Изучена роль EL2-центров в формировании фотоотклика ансамбля радиальных нитевидных нанокристаллов GaAs/Al_xGa_{1-x}As ($x = 0.3$) *n*-типа, выращенных с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии на кремниевой подложке *p*-типа. Обнаружено значительное уменьшение времени восстановления фотоотклика нитевидных нанокристаллов по сравнению с таковым для объемного кристалла при переходе EL2-центра из нефотоактивного в основное состояние.

Ключевые слова: молекулярно-пучковая эпитаксия, полупроводники, нитевидные нанокристаллы, фотоэлектрические свойства, дефекты, арсенид галлия, кремний.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.16.48155.17870

К настоящему времени достигнуты заметные успехи в развитии технологий, позволяющих воспроизводимо выращивать гетероструктурированные нитевидные нанокристаллы (ННК) соединений A₃B₅. Уникальные физические свойства полупроводниковых ННК являются основой для развития перспективных технических устройств, например одноэлектронных диодов и транзисторов, электронных детекторов, фотоприемников, излучающих оптоэлектронных устройств и солнечных элементов [1–5]. Создание таких и им подобных устройств требует систематических исследований оптоэлектронных свойств ННК. Значительный интерес вызывают также исследования фотоэлектрических свойств ННК [6–8]. Тем не менее изучению фотоэлектрических свойств ННК на основе арсенида галлия посвящено неоправданно мало работ.

На оптические и фотоэлектрические свойства объемного GaAs сильное влияние оказывает дефект EL2 — глубокий центр, являющийся двойным донором. Однако, несмотря на то что изучению структурных особенностей дефектов EL2 в GaAs и участия EL2 в электронных и оптических процессах уделялось заметное внимание, многие вопросы природы и поведения дефектов EL2 пока еще остаются предметом дискуссий. Отсутствует также информация о природе и поведении дефектов EL2 в структурах с ННК. Вместе с тем весьма высокое качество кристаллической структуры ННК создает новые необычные условия для образования и взаимодействия точечных дефектов и их комплексов.

Исследованный в настоящей работе массив GaAs/Al_xGa_{1-x}As ($x \approx 0.3$) радиальных ННК *n*-типа был выращен методом молекулярно-пучковой эпитаксии на кремниевой подложке *p*-типа с ориентацией $\langle 111 \rangle$ [8]. В результате был сформирован массив радиальных ННК из GaAs, покрытых слоем Al_{0.3}Ga_{0.7}As. Диаметр сердцевин GaAs изменялся в диапазоне от 20 до 30 nm, а толщина оболочки Al_{0.3}Ga_{0.7}As изменялась в пределах от 30 до 40 nm. Постростовый этап формирования массива подробно представлен в нашей предыдущей работе [8]. Процедура создания массивов ННК наглядно демонстрирует, как возникает одна из главных фотоэлектрических особенностей этих объектов: в системе ННК–подложка формируется гетеропереход. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) массива ННК была исследована нами в [8]. ВАХ массива ННК подобна ВАХ стандартного диода и в целом указывает на наличие хорошо сформированного гетероперехода в области контакта массив ННК–подложка.

Изучение фотоотклика структуры ННК проводилось в двух режимах (рис. 1): в режиме холостого хода (ХХ) и в режиме короткого замыкания (КЗ). В режиме ХХ (рис. 1, *a*) высота потенциального барьера гетероперехода существенно понижена, и ток создается главным образом основными носителями: в GaAs — электронами, в Si — дырками. Этот ток весьма мал, а по обе стороны барьера скапливается заряд соответствующих основных носителей, который определяет величину фотоэдс. В режиме КЗ (рис. 1, *b*) высота потенциального барьера гетероперехода максимальна, и ток создается

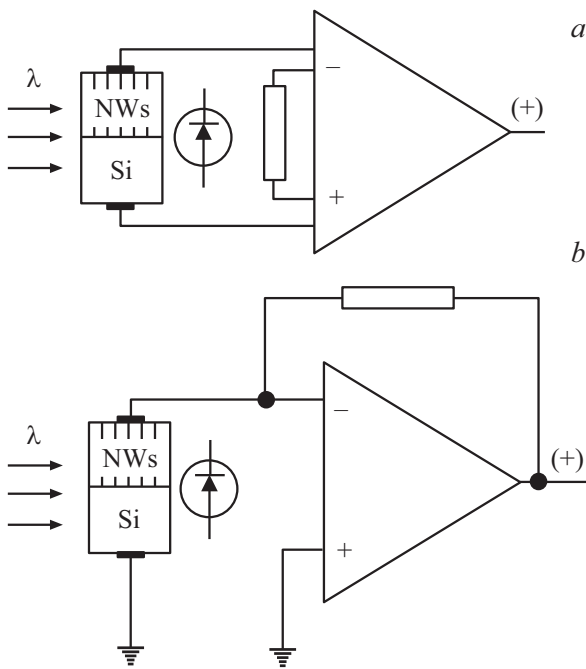


Рис. 1. Схемы регистрации фотоотклика: фотоэда в режиме холостого хода (a) и фототока в режиме короткого замыкания (b).

неосновными носителями: в GaAs — дырками, в Si — электронами. Таким образом, при исследовании влияния рекомбинационных центров, создаваемых различными дефектами кристаллической структуры, на величину фотоотклика обеспечивалась возможность раздельного учета электронного и дырочного вкладов как для GaAs, так и для Si.

Фотоэлектрические свойства массива ННК изучались при температуре 77 К. Фотовозбуждение образца проводилось с помощью монохроматора МДР-2 при использовании галогенной лампы 100 W. Обратная линейная дисперсия прибора составляла 4 nm/mm, ширины входной и выходной щелей монохроматора были равны 0.2 mm. Для дополнительной подсветки использовался монохроматор ЗМР-3 с галогенной лампой 40 W. Ширины входной и выходной щелей этого монохроматора составляли 0.1 mm.

Спектры фототока короткого замыкания и фотоэда исследуемого массива ННК приведены на рис. 2. Можно видеть, что изучаемая структура обнаруживает широкую полосу fotocувствительности. Высокая fotocувствительность наблюдалась нами до значения энергии возбуждения 2.75 eV. Вид полученных спектров приводит к заключению, что большую роль в формировании фотоэлектрических свойств образца играют энергетические уровни различных дефектов структуры и интерфейсные энергетические состояния. Энергии связи этих дефектов лежат в области от 0.006 до 0.75 eV, в результате чего наблюдается значительное уширение полос в спектрах фотоотклика и их сложная форма.

Обращает на себя внимание различное поведение спектров фотоотклика ансамбля ННК в спектральной области 1.18 eV. В спектре фотоэда (рис. 2, штриховая линия — режим ХХ), который формируется основными носителями заряда, наблюдается минимум. В спектре же фототока, сформированного неосновными носителями заряда, такой минимум отсутствует (рис. 2, сплошная кривая — режим КЗ). При этом необходимо отметить, что облучение с энергией фотона 1.18 eV вызывает в объемном GaAs переход дефекта EL2 в метастабильное состояние [9,10], после чего EL2-центр теряет свои оптические, электрические и магнитные свойства, наблюдается эффект фотогашения.

Эффект фотогашения, связанный с переходом центра EL2 в метастабильное нефотоактивное состояние (EL2*), наблюдается и в ансамбле ННК. На рис. 3, a представлены спектры, зарегистрированные в режиме ХХ при применении дополнительного возбуждения образца светом с энергией 1.18 eV и без него. Видно, что подсветка сильно уменьшает фотоотклик в целом, при этом исчезает минимум при $E = 1.18$ eV. В отличие от режима ХХ в режиме КЗ, когда фотоотклик формируется неосновными носителями, а именно электронами в Si и дырками в GaAs, в областях спектра, соотносящихся с Si и GaAs, эффект гашения фотоотклика при подсветке не наблюдается (рис. 3, b). Напротив, наблюдается значительное возрастание фотоотклика, связанное с аддитивной добавкой фототока за счет действия дополнительной подсветки. В этом случае фототок ННК GaAs обеспечивается дырками акцепторных центров. При этом в области спектра,

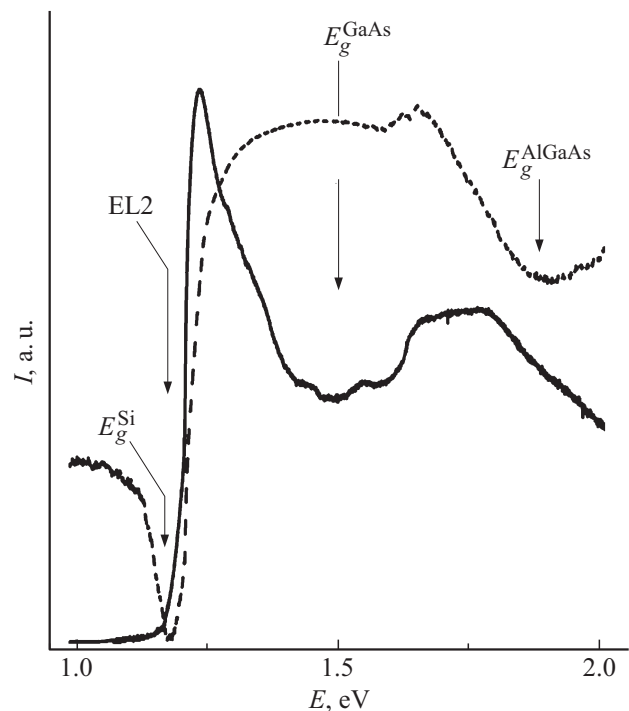


Рис. 2. Фотоэлектрические спектры массива ННК GaAs/Al_xGa_{1-x}As ($T = 77$ K): фотоэда (штриховая кривая) и фототок (сплошная кривая).

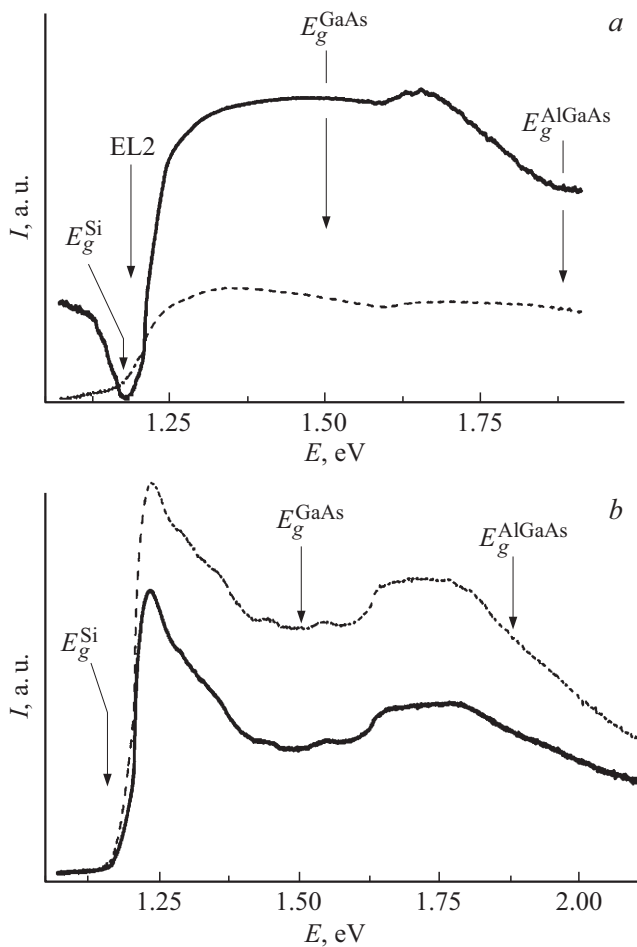


Рис. 3. Фотоотклик массива ННК GaAs/Al_xGa_{1-x}As ($T = 77$ К). *a* — спектры фотоэдс, *b* — спектры фототока. Сплошная кривая — спектр без подсветки, штриховая кривая — спектр с подсветкой светом с энергией кванта 1.18 eV.

общей для GaAs и Al_xGa_{1-x}As, в режиме КЗ также наблюдается увеличение фотоотклика.

Можно видеть, что и в случае объемного GaAs, и в случае ННК GaAs имеет место большое влияние EL2-центров на фотоэлектрические свойства. Однако обнаруживаются и кардинальные различия между поведением EL2-центров в объемных полупроводниках и в ННК. Анализ кинетики восстановления сигнала фотоэдс массива ННК при $T = 77$ К после выключения гасящей подсветки показал, что процесс восстановления характеризуется тремя временами: $t_1 = 0.090 \pm 0.005$ s, $t_2 = 1.00 \pm 0.05$ s и $t_3 = 4.0 \pm 0.2$ min. Малые времена процесса восстановления фотоотклика резко отличают ансамбль ННК от 3D-объекта. Наши наблюдения также показали, что при низкой температуре в массиве ННК фотоотклик восстанавливает свою величину после фотогашения за очень короткое время (порядка минут) и в случае последующей выдержки образца в темноте. В объемном же GaAs восстановление из метастабильного состояния в темноте при низкой температуре может происходить за время порядка многих часов [9,10].

Формирование минимума в спектре фотоэдс массива ННК в диапазоне энергий 1.04–1.35 eV, соответствующих спектральному интервалу линии поглощения света комплексом EL2 в GaAs [11], можно связать с кинетикой процессов фотогашения и восстановления фотоотклика при переходах соответственно из нормального состояния EL2⁰ в метастабильное EL2* и обратно.

Как указано в [9,10], переход EL2 в метастабильное состояние в объемном арсениде галлия происходит в два этапа. Первый этап перехода в метастабильное состояние — внутрицентровое возбуждение дефекта EL2. Второй этап перехода — структурная релаксация локальных напряжений, возникающих после изменения зарядового состояния комплекса. В макрокристалле при переходе центра EL2 из нормального состояния в метастабильное процесс фотогашения сопровождается локальным структурным фазовым переходом [9], после чего восстановление нормального состояния центра EL2 требует преодоления существенного потенциального барьера [10]. ННК обладают кристаллической структурой высокого качества, в них практически отсутствуют дислокации, вокруг которых в объемном кристалле происходит сегрегация EL2-центров [12], поэтому условия образования и поведения EL2-центров иные. Вероятнее всего, в материале ННК GaAs не происходит характерного для объемного кристалла GaAs локального структурного фазового перехода, который может быть обусловлен местным напряжением решетки, фиксирующим преобразование EL2 из нормального состояния в метастабильное.

Таким образом, можно предположить, что нефотоактивное, „метастабильное“ состояние EL2-центров в массиве легированных кремнием ННК GaAs/AlGaAs носит динамический характер. Поэтому EL2-центр в ННК при прекращении возбуждения образца излучением с энергией 1.18 eV быстро восстанавливает свое зарядовое состояние при наличии избыточных электронов в зоне проводимости, а наведенная перезарядкой деформация исчезает. В итоге EL2-центр переходит в свое основное состояние, при котором восстанавливаются его электрические и оптические свойства.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-72-10047).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Дубровский В.Г., Цырлин Г.Э., Устинов В.М. // ФТП. 2009. Т. 43. В. 12. С. 1585–1628. DOI: 10.1134/S106378260912001X
- [2] Xiang J., Lu W., Hu Y., Wu Y., Yan H., Lieber C.M. // Nature. 2006. V. 441. N 7092. P. 489–493. DOI: 10.1038/nature04796

- [3] Stern E., Klemic J.F., Routenberg D.A., Wyrembak P.N., Turner-Evans D.B., Hamilton A.D., LaVan D.A., Fahmy T.M., Reed M.A. // *Nature*. 2007. V. 445. N 7127. P. 519–522. DOI: 10.1038/nature05498
- [4] Klauk H. // *Nature*. 2008. V. 451. N 7178. P. 533–534. DOI: 10.1038/451533a
- [5] Novotny C.J., Yu E.T., Yu P.K.L. // *Nano Lett.* 2008. V. 8. N 3. P. 775–779. DOI: 10.1021/nl072372c
- [6] Алексеев П.А., Дунаевский М.С., Марычев М.О., Нежданов А.В., Лерса М., Grützmacher D., Тутков А.Н. // *Вестн. ННГУ им. Н.И. Лобачевского*. 2013. Т. 2. В. 2. С. 22–27.
- [7] Li Q.H., Gao T., Wang Y.G., Wang T.H. // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 86. N 12. P. 123117. DOI: 10.1063/1.1883711
- [8] Григорьев Р.В., Штром И.В., Григорьева Н.Р., Новиков Б.В., Сошников И.П., Самсоненко Ю.Б., Хребтов А.И., Буравлев А.Д., Цырлин Г.Э. // *Письма в ЖТФ*. 2015. Т. 41. В. 9. С. 71–79. DOI: 10.1134/S1063785015050077
- [9] Kabiraj D., Ghosh S. // *Appl. Phys. Lett.* 2004. V. 84. N 10. P. 1713–1715. DOI: 10.1063/1.1667617
- [10] Fukuyama A., Sakai K., Ikari T., Akashi Y., Suemitsu M. // *Physica B*. 2004. V. 348. N 1–4. P. 1–5. DOI: 10.1016/j.physb.2004.02.007
- [11] Жуков А.В. // *Изв. вузов. Электроника*. 2016. Т. 21. В. 1. С. 21–27. DOI: 10.1134/S1063782616130145
- [12] Matsuki H., Miyazawa H., Murakami K., Yamamoto T. // *J. Appl. Phys.* 1988. V. 63. N 8. P. 3394–3396. DOI: 10.1063/1.340794