

06

## **Взаимодействие оптического излучения с массивом нитевидных кристаллов GaAs**

© О.А. Неучева, А.А. Евстапов, Ю.Б. Самсоненко, Г.Э. Цырлин

Институт аналитического приборостроения РАН, С.-Петербург  
Санкт-Петербургский физико-технологический  
Научно-образовательный центр РАН  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
E-mail: evstra@iai.rssi.ru, an evs@mail.ru (Dr. Anatoly Evstrapov)

Поступило в Редакцию 12 апреля 2007 г.

Исследованы спектральные зависимости отражательной способности образцов легированных кристаллических наноструктур из GaAs, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии с различными структурными характеристиками. Показано, что характер спектральных зависимостей отражательной способности наноструктур определяется формой нанокристаллов: наноструктуры с каплевидной и остроугольной вершинами по-разному взаимодействуют с электромагнитным излучением. Выявлено спектрально-селективное воздействие лазерного излучения на массив наноструктур, приводящее к изменению их высоты и „спеканию“ вершущек, меняя отражательную способность образца. Этот эффект может применяться при создании локальных микроструктур с заданными характеристиками в массиве нанокристаллов.

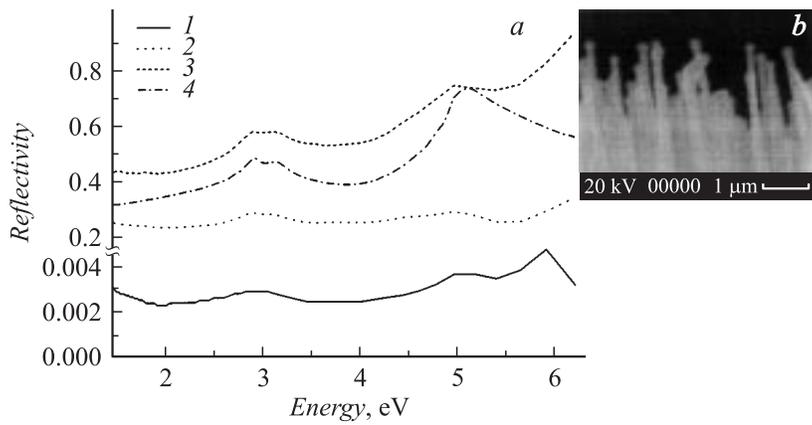
PACS: 78.67.-n

Полупроводниковые кристаллические наноструктуры — нитевидные нанокристаллы (ННК) привлекают внимание исследователей в связи с широкой возможностью их применения в различных сферах деятельности человека. В настоящее время ННК используются в качестве зондов для атомно-силовой микроскопии; при создании аналитических систем, сенсоров и наночипов для обнаружения биологических веществ [1–3]. На основе массива ННК GaN разработан прибор для обнаружения молекул метана в окружающем газе [4]. Возможность интеграции НК в микрофлюидные чипы позволяет получить новые multifunctionальные устройства для аналитического приборостроения и микросинтеза. В связи с вышеупомянутым актуальным является всестороннее исследование свойств создаваемых наноструктур. На текущий момент только

несколько работ посвящено изучению отражательных свойств ННК, а именно GaN [5] и Zn/ZnO [6]. В данной работе приведены результаты исследований спектральных зависимостей отражательной способности массивов ННК из GaAs с различными структурными характеристиками и воздействия лазерного излучения на ННК.

Объектами исследования являлись образцы легированных ННК из GaAs, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на легированных подложках GaAs (111)В [7,8], отличающиеся структурными особенностями (высотой, плотностью, формой острия). GaAs буферный слой и ННК GaAs в процессе МПЭ легировались кремнием с концентрацией электронов  $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  (буферный слой) и  $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  (ННК) для создания проводимости *n*-типа. Диаметр нанокристаллов варьировался от 50 до 80 nm в зависимости от технологических параметров и высоты ННК. Измерения спектров отражения проводились при помощи спектрофотометра Hitachi U-3410. Результаты воздействия видимого лазерного излучения на массив ННК регистрировались методом конфокальной лазерной микроскопии (Leica TCS SL), сканирующей электронной микроскопии (CamScan S4-90FE) и акустооптической спектроскопии (АОС-01).

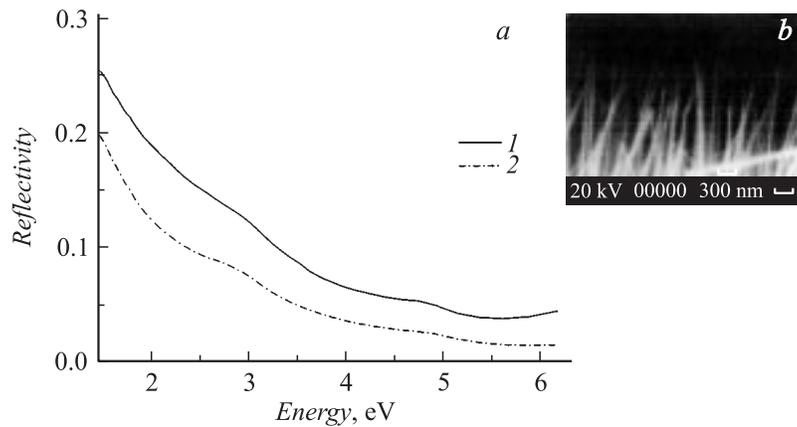
При измерении отражательной способности образцов ННК было получено несколько характерных групп зависимостей. Для первой группы спектральных зависимостей отражательной способности ННК характерно уменьшение отражения с увеличением высоты нановискеров (рис. 1, *a*): максимумы отражения соответствуют длинам волн 250 и 420 nm, т.е. отвечают минимумам поглощения арсенида галлия. Зависимости получены для образцов разной высоты с каплевидной вершиной (рис. 1, *b*). Из полученных результатов следует, что: а) легирование подложки приводит к увеличению отражательной способности по сравнению с отражением исходного материала [9]; б) спектральные зависимости имеют сходный характер с зависимостью отражения подложки; в) образование ННК и увеличение их высоты приводит к трансформациям пиков отражения в областях 2.9–3.1 и 5.2 eV. Для второй группы зависимостей характерно монотонное убывание отражательной способности к коротковолновой области (рис. 2, *a*). Такие зависимости присущи образцам НК, имеющим остроигольчатую форму вершины (рис. 2, *b*). Можно предположить, что разный характер зависимостей отражательной способности определяется различающимися процессами взаимодействия электромагнитного излучения с остроигольчатыми и каплевидными вершинами. Анализ спектральных зависимостей также



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента отражения образцов с каплевидной вершиной НВ (*a*) с разной высотой структур (*1* — 15 000 nm, *2* — 370 nm, *3* — подложка без НВ, *4* — GaAs) и СЭМ-изображение НВ с каплевидной вершиной (*b*).

свидетельствует о том, что в процессе поглощения фотонов нанокристаллами GaAs происходят запрещенные переходы электронов из валентной зоны в зону проводимости.

Образцы с ННК в первом приближении могут быть представлены системой одинаковых цилиндрических наноструктур на однородной подложке. Так как характерный размер нанокристаллов меньше длины волны, то массив ННК можно рассматривать как однородную оптическую среду, обладающую эффективным показателем преломления, отличным от показателей преломления веществ, образующих структуру. Можно определить эффективный показатель преломления исследуемых образцов, используя интегральные соотношения Крамерса–Кронига [9]. Для длин волн 800 и 500 nm показатель преломления подложки 5.83 и 6.15 соответственно. При небольших высотах ННК с каплевидной вершиной ( $\sim 370$  nm) значение эффективного показателя преломления существенно снижается — до 3.29 и 1.69 соответственно. С увеличением высоты нанокристаллов наблюдается тенденция уменьшения показателя преломления как для ННК с каплевидной вершиной, так и для ННК с остроугольной вершиной. Значение показателя преломления может быть использовано для определения характеристик структуры



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента отражения образцов с остроугольчатыми вершинами НВ (*a*) и разной высотой (1 — 1600 nm, 2 — 2400 nm) и СЭМ-изображение НВ с остроугольчатой вершиной (*b*).

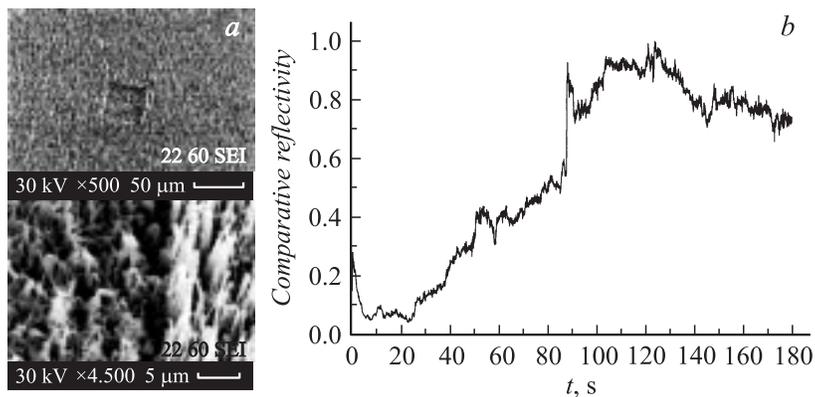
исследуемого слоя. Подходящей для данного случая является модель Бругемана [10] для эффективной среды, где среда рассматривается как суперпозиция составляющих ее компонентов:

$$\eta \frac{n_{\text{пор}}^2 - n_0^2}{n_{\text{пор}}^2 + 2n_0^2} + (1 - \eta) \frac{n_{\text{гл}}^2 - n_0^2}{n_{\text{гл}}^2 + 2n_0^2} = 0,$$

где  $\eta$  — пористость (или параметр, связанный с плотностью ННК),  $n_{\text{пор}}$  — показатель преломления материала пор (воздуха),  $n_0$  — эффективный показатель преломления среды,  $n_{\text{гл}}$  — показатель преломления основного материала.

Полагая, что на длине волны 500 nm показатель преломления воздуха равен единице, а арсенида галлия — 4.221 [9], и определив эффективный показатель преломления среды, можно оценить плотность наноструктур. Для образцов с остроугольчатыми ННЛ высотой 1600 nm плотность структур составила 0.62, а для каплевидных ННК с высотой 370 nm — 0.73.

В результате экспериментальных исследований образцов ННК методами конфокальной лазерной микроскопии было выявлено, что лазерное излучение на длине волн 488 и 633 nm с плотностью мощности



**Рис. 3.** Зона воздействия лазерного излучения (размер  $47 \times 47 \mu\text{m}$ ) на нановисеры (*a*), изменение отражательной способности образца массива НВ (высотой  $1300 \text{ nm}$ ) при воздействии лазерного излучения (*b*).

$100 \text{ mW/mm}^2$  приводит к изменению структуры ННК даже при очень малом времени воздействия (порядка нескольких секунд). Это изменение регистрировалось на конфокальном сканирующем лазерном микроскопе в виде изменения отражательных свойств площадки поверхности, подвергшейся облучению. Последующие исследования показали, что изменение структуры ННК носит спектрально-селективный характер: при облучении ННК излучением с мощностью того же порядка на длинах волн  $476$  и  $543 \text{ nm}$  видимого воздействия на структуры не наблюдалось. Изображения площадок поверхности, полученные методом электронной микроскопии (рис. 3, *a*), свидетельствуют, что в процессе воздействия лазерного излучения на ННК происходит „слипание“ вершущек наноструктур и частичное их разрушение.

Также были проведены исследования по изучению изменения отражательной способности ННК структур под воздействием лазерного излучения разной мощности. Использовался лазер с длиной волны излучения  $473 \text{ nm}$  и регулируемой мощностью до  $20 \text{ mW}$ . На рис. 3, *b* приведена зависимость изменения относительной отражательной способности образца с остроугольчатыми ННК высотой  $1300 \text{ nm}$  при плотности мощности излучения  $23.3 \text{ mW/mm}^2$ . Воздействие лазерного излучения приводит к изменению высоты ННК и „спеканию“ вершущек

наноструктур, что увеличивает отражательную способность образца. При очень мощном или длительном воздействии наноструктуры могут быть окончательно разрушены и сформирован слой, имеющий высокую отражательную способность (близкую к отражательной способности подложки). Этот процесс может быть использован при формировании каналов, дорожек и площадок в массиве ННК для решения различного рода задач, в том числе при создании сенсоров на основе ННК.

Таким образом, при анализе измерений отражательной способности образцов легированных кристаллических наноструктур из GaAs, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии с различными структурными характеристиками, получено, что характер спектральных зависимостей отражательной способности наноструктур также определяется формой нанокристаллов. Предполагается, что наноструктуры с каплевидной и остроугольной вершиной по-разному взаимодействуют с электромагнитным излучением. Выявлено спектрально-селективное воздействие лазерного излучения с плотностью мощностью  $100 \text{ mW/mm}^2$  на массив ННК, что приводит к изменению высоты ННК и „спеканию“ вершечек наноструктур, изменяя отражательную способность образца. Этот процесс может применяться при формировании заданных топологий или микроструктур в массиве НК для наносенсорных систем или наноаналитических устройств.

Исследования проведены в рамках работ по грантам РФФИ 05-02-08090 офи\_а и 05-02-16495-а, научных программ РАН „Квантовая микрофизика“ и „Квантовые наноструктуры“, программы SANDiE и Государственного контракта с Министерством науки и образования № 02.513.11.3042.

Авторы выражают признательность В. Бусову и С. Трошкову за проведение электронно-микроскопических исследований.

## Список литературы

- [1] *Xin Yu, Sang Nyon Kim, Fotios Papadimitrakopoulos, James F.* // Mol. BioSyst. 2005. V. 1. P. 70–78.
- [2] *Patolsky F., Lieber C.M.* // Materials Today. April 2005. P. 20–28.
- [3] *Patolsky F., Zheng G., Hayden O., Lakadamyali M., Zhuang X., Lieber Ch.* // Proceedings on National Academy of Science. 2004. V. 101. N 39. P. 14 017–14 022.

- [4] *Dobrokhotov V., McIlroy D.N., Norton M.G.* et al. // *J. Appl. Phys.* 2006. V. 99. P. 104302.
- [5] *Meijers R., Richter T., Calarco R., Stoica T., Boehm H.-P., Mapso M., Luth H.* // *Journal of crystal growth.* 2006. V. 289. N 1. P. 381–386.
- [6] *Wu R.* // *Materials Science and Engineering.* 2006. V. 328. N 1–2. P. 196–200.
- [7] *Цырлин Г.Э., Дубровский В.Г., Сибирев Н.В., Сошников И.П., Самсоненко Ю.Б., Тонких А.А., Устинов В.М.* // *ФТП.* 2005. Т. 39. В. 5. С. 587–594.
- [8] *Тонких А.А., Цырлин Г.Э., Самсоненко Ю.Б., Сошников И.П., Устинов В.М.* // *ФТП.* 2004. Т. 38. В. 10. С. 1256–1260.
- [9] *Гавриленко В.И., Грехов А.М., Корбутяк Д.В., Литовченко В.Г.* Оптические свойства полупроводников. Справочник. Киев: Наук. думка, 1987. 608 с.
- [10] *Ovechko V.S., Dmytruk A.M., Fursenko O.V., Lepeshkina T.P.* // *Vacuum.* 2001. V. 61. P. 123–128.