

Оптические свойства пористого наноразмерного GaAs

© А.И. Белогорохов[¶], С.А. Гаврилов*, И.А. Белогорохов⁺, А.А. Тихомиров*

ФГУП „Гиредмет“,
119017 Москва, Россия

* Московский государственный институт электронной техники (технический университет),
103498 Москва, Россия

⁺ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

(Получена 30 марта 2004 г. Принята к печати 3 июня 2004 г.)

Исследованы оптические свойства слоев пористого GaAs, полученных методом электрохимического травления монокристаллических пластин GaAs(100) *n*- и *p*-типа проводимости. Показано, что форма нанокристаллов, их средний диаметр и поверхностные состояния зависят от типа проводимости исходного кристалла. Обнаружено смещение пиков, соответствующих основным оптическим фононам, в низкочастотную область спектров комбинационного рассеяния света. Значения частот колебаний поверхностных фононов, полученные из спектров комбинационного рассеяния света и спектров отражения в инфракрасном диапазоне длин волн, совпадают. При переходе от объемного GaAs к его пористой модификации изменяются формы спектральных зависимостей коэффициента отражения в области фононного резонанса, что обусловлено появлением дополнительных осцилляторов, связанных с пространственно ограниченными решеточными колебаниями в нанокристаллах GaAs. Методом атомно-силовой микроскопии проведено исследование морфологии поверхности образцов пористого GaAs, полученных на подложках *n*-типа проводимости. Наблюдался наноразмерный рельеф поверхности. Оценки значений среднего диаметра нанокристаллов GaAs, сделанные по результатам комбинационного рассеяния света, инфракрасной спектроскопии, фотолюминесценции и атомно-силовой микроскопии, хорошо согласуются друг с другом.

1. Введение

Структуры GaAs пониженной размерности, такие, например, как квантовые нити и квантовые точки, привлекают к себе все более пристальный интерес и как объекты фундаментальных исследований [1,2], и как перспективные материалы для создания на их основе приборов с новыми эксплуатационными возможностями, которые невозможно получить, используя традиционные полупроводниковые материалы [3]. Например, использование пористого GaAs (*por*-GaAs) в качестве материала подложки при выращивании эпитаксиальных слоев GaN методом молекулярно-лучевой эпитаксии позволило получить сплошные слои кубической модификации GaN [4]. Методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений получены монокристаллические слои GaAs, AlGaAs и InGaAs на подложках *por*-GaAs [5].

Представляется весьма перспективным получать различные пористые полупроводниковые материалы с помощью метода электрохимического травления. Данный способ достаточно прост и его внедрение не требует больших затрат. В случае положительного результата появится возможность расширить спектральный диапазон люминесцентной электроники, а также создать новые типы светодиодов. Кроме того, использование пористых материалов в качестве промежуточных слоев позволит получить новые типы гетеропереходов. Попытки, предпринятые в этом направлении показали, что данная проблема может быть успешно решена [4,6,7].

В настоящее время вопросу получения наноразмерного пористого GaAs посвящено не много работ [2,5,8]. Сведения, представленные в них, порой противоречивы и практически отсутствует информация о динамике решетки нанокристаллов (НК), формирующих слой пористого GaAs.

2. Образцы и методика эксперимента

Пористые структуры GaAs были получены на подложках монокристаллического арсенида галлия с ориентацией (100), легированных цинком (*p*-тип проводимости, $N_{Zn} \approx (1-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) либо кремнием (*n*-тип проводимости, $N_{Si} \approx 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$) с помощью метода электрохимического травления. Состав электролита был следующим: HF:H₂O:HNO₃=39:59:2. В ряде случаев добавлялась разбавленная соляная кислота. Процесс электрохимического травления проводился в темноте в течение 5–15 мин при прохождении через электролит постоянного тока плотностью 20–25 мА/см².

Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) были получены в геометрии обратного рассеяния при первичном воздействии с помощью Ar⁺-лазера на длинах волн 488 и 514.5 нм. В состав установки входил двойной монохроматор Jobin-Yvon T64000 и охлаждаемый до 77.3 К GaAs-фотоумножитель. Для исследования микроструктуры образцов использовался металлографический микроскоп Olympus. В этом случае лазерный луч фокусировался на образце в пятно диаметром 3 мкм. Соответственно возрастала и плотность мощности лазерного воздействия на исследуемый кристалл. Для

[¶] E-mail: belog@mig.phys.msu.ru

того чтобы избежать каких-либо необратимых тепловых воздействий на образец или его деградации, варьировалась мощность накачки Ar⁺-лазера от 1 до 100 мВт. Совмещенная с микроскопом CCD-камера позволяла на мониторе визуально наблюдать за состоянием поверхности объекта в процессе получения спектров КРС. Такая методика проведения измерений известна как micro-Raman.

Оптические спектры в инфракрасном диапазоне длин волн (FTIR) при комнатной температуре регистрировались с помощью фурье-спектрометра IFS-113v (Bruker, Germany) в частотном диапазоне $\omega = 10\text{--}700\text{ см}^{-1}$ со спектральным разрешением не хуже 0.2 см^{-1} . Обработка полученных спектральных зависимостей коэффициента отражения $R(\omega)$ проводилась с использованием комбинированного подхода, включающего в себя соотношения Крамерса–Кронига и дисперсионный анализ [9], а также генетический алгоритм.

Исследование микроструктуры и морфологии поверхности нанокристаллов проводилось с использованием электронного сканирующего микроскопа JEOL 840A с системой элементного анализа LINK. Топографию поверхности изучали на атомно-силовом микроскопе Solver P47 фирмы NT-MDT Corp.

3. Комбинационное рассеяние света

При интерпретации спектров КРС образцов *por*-GaAs крайне важно иметь информацию о химическом составе поверхности нанокристаллов. На основании результатов исследований, полученных с помощью метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS), был сделан вывод о том, что в исследованных образцах отношение Ga:As составляло ~ 1 , т.е. сохранялась стехиометрия материала. Кроме того, на поверхности присутствовал хлор, но его количество не превышало 3 ат%. В результате реакции электрохимического травления на поверхности НК GaAs могут образовываться химические соединения типа Ga₂O₃, GaCl₃, AsCl₃, As₂O₃. Комплексный анализ данных XPS, лазерного масс-анализа и морфологии поверхности (согласно результатам, полученным с помощью метода растровой электронной микроскопии) позволил сделать вывод о том, что из всего набора перечисленных соединений на поверхности некоторых исследованных образцов *por*-GaAs могли присутствовать кристаллиты As₂O₃, имеющие алмазоподобную форму.

В спектрах КРС ряда образцов, изготовленных на подложках *n*-типа проводимости, наблюдались интенсивные узкие пики, расположенные почти эквидистантно. Для примера на рис. 1 показаны спектры КРС трех образцов пористого *n*-GaAs. Присутствующие в спектрах пики 3 и 4 соответствуют частотам поперечного (ω_{TO}) и продольного (ω_{LO}) оптических фононов GaAs, которые активны в спектрах КРС как кристаллической, так и пористой модификации арсенида галлия. В первом

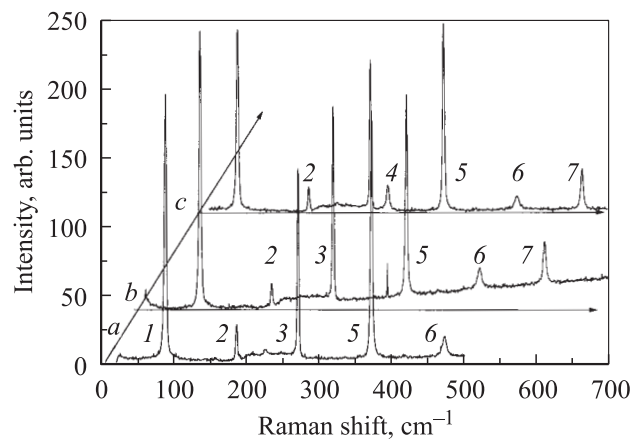


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния света образцов пористого *n*-GaAs. Номера образцов: *a* — 2, *b* — 4-2, *c* — 4.

случае эти моды колебаний должны располагаться на частотах 268.5 см^{-1} (TO) и 292.3 см^{-1} (LO). В случае *por*-GaAs фоновые линии КРС уширены и сдвинуты в низкочастотную область спектра по сравнению со случаем кристаллического материала. Авторы работы [1] исследовали спектры КРС химических соединений As₂O₃ и Ga₂O₃ с той целью, чтобы идентифицировать оставшиеся пики под номерами 1, 2, 5–7. Ими было замечено, что As₂O₃ и Ga₂O₃ не проявляли фотолуминесцентных свойств, а в спектрах КРС первого из них наблюдались интенсивные пики на частотах 85, 183, 268, 369, 414, 471 и 560 см^{-1} . Во втором случае (Ga₂O₃) имели место пики на частотах 201, 418 и 769 см^{-1} . Как видно на рис. 1, в нашем случае в спектрах ряда образцов пористого GaAs *n*-типа наблюдаются резонансные колебания, отвечающие материалу As₂O₃. Следов Ga₂O₃ обнаружено не было. Из того же рисунка можно видеть, что в спектре образца 4-2 наблюдается рост интенсивности фонового излучения на частотах, больших 200 см^{-1} . Этот эффект связан с появившимся сигналом фотолуминесценции (ФЛ) с этом образце. Так как никаких дополнительных пиков в данном случае не возникло, что свидетельствует о том, что физико-химическое состояние поверхности нанокристаллов осталось прежним, можно сделать вывод о решающей роли, которую играют эффекты размерного квантования в процессе появления сигнала ФЛ в видимом диапазоне длин волн в этом образце. При его изготовлении значение плотности тока было на 20% выше, чем при изготовлении образца 4. Если далее увеличивать ток, проходящий через образец в процессе реакции электрохимического травления, то быстро наступает режим электрополировки, что в свою очередь приводит к резкому уменьшению толщины пористой пленки и к полному ее исчезновению.

Для образцов *p*-типа, как показывают данные XPS, спектрометрического и РЭМ анализа, не наблюдается формирования на поверхности пор кристаллитов As₂O₃, как это было в случае некоторых образцов пористого

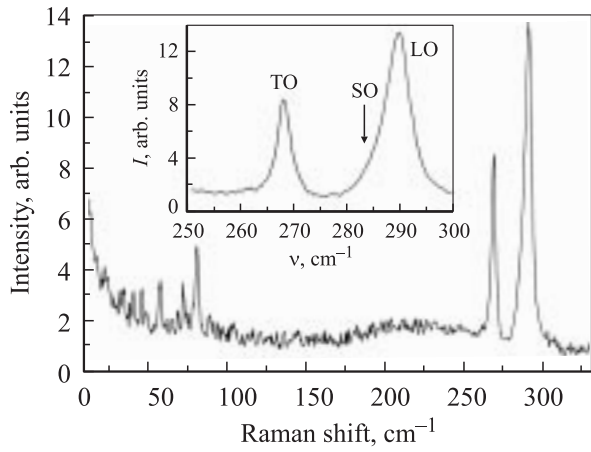


Рис. 2. Спектр комбинационного рассеяния света образца *por*-GaAs(Si). На вставке — область спектра, в которой проявляются ТО и LO-фононы. Стрелкой обозначено положение поверхностной оптической (SO) фононной моды.

n-GaAs. В то же время суммарное количество атомов кислорода, участвующих в формировании оксидных связей на поверхности нанокристаллов, оказалось почти равным. Следует подчеркнуть, что интенсивность ФЛ в образцах пористого *p*-GaAs существенно ниже, чем в образцах пористого *n*-GaAs, а положение самого пика ФЛ сдвинуто в красную область спектра. Структура пористого слоя *p*-GaAs менее однородная, размеры НК составляют от 10 нм до десятых долей микрона. В случае *n*-GaAs размеры нанокристаллов меньше, а также существенно меньше дисперсия значений их среднего диаметра, который определялся по положению максимума пика ФЛ (E_{\max}), для чего использовался подход, изложенный в работе [2]. Максимум ФЛ в образцах *por*-GaAs *n*-типа располагался при энергиях 1.85–2.52 эВ, что соответствует размерам НК от 5 до 8 нм. Наряду с этим подобные оценки были сделаны и по величине сдвига основных оптических фононов в спектрах КРС *por*-GaAs, а также с помощью методов атомно-силовой микроскопии (AFM). Так, например, из рис. 2, на котором приведен спектр КРС *por*-GaAs *n*-типа, свободного от As₂O₃, можно видеть, что пик, соответствующий рассеянию квантов света на продольных оптических фононах в *por*-GaAs, смещен на $\Delta\omega \approx 1.6 \text{ см}^{-1}$ в низкочастотную область спектра по сравнению со случаем объемного арсенида галлия. Зная величину $\Delta\omega$, можно оценить средний диаметр нанокристаллов, образующий слой *n-por*-GaAs в этом образце. В результате получено значение диаметра НК $d \approx 5.9 \text{ нм}$, что согласуется с оценкой, сделанной для того же образца по результатам ФЛ ($d \approx 6.3 \text{ нм}$, $E_{\max} = 2.12 \text{ эВ}$).

В спектрах КРС образцов *por*-GaAs наряду с оптическими фононами, локализованными в объеме НК, были обнаружены поверхностные оптические (SO) фононные моды. Для того чтобы оценить значения частот SO-фононных мод, был проведен расчет в рамках подхода,

изложенного в работе [10]. В частности, использовались следующие соотношения для нахождения искомых частот:

$$\omega_{\text{SO}}^2 = \omega_{\text{TO}}^2 + \omega_p^2 \frac{\epsilon_\infty}{\epsilon_\infty + \eta_m(r)}, \quad (1)$$

$$\eta_m(r) = -\frac{I'_m(r)K_m(r)}{I_m(r)K'_m(r)}. \quad (2)$$

Здесь r — радиус нанокристалла, $I_m(r)$ — цилиндрическая функция, ω_p — плазменная частота, ϵ_∞ — высокочастотная диэлектрическая проницаемость. Для образца *por*-GaAs, спектр КРС которого представлен на рис. 2, значение частоты поверхностной фононной моды оказалось равным $\omega_{\text{SO}} = 284 \text{ см}^{-1}$ (SO-мода отмечена на вставке стрелкой). Эта величина получена с помощью процедуры разложения LO-пика на составляющие его гауссианы. Для расчета использовались следующие значения параметров материала GaAs: $\epsilon_\infty = 11.2$, $\omega_{\text{TO}} = 268.5 \text{ см}^{-1}$ [11], $d \approx 6 \text{ нм}$. Теоретическая оценка для ω_{SO} практически совпадает с найденным значением.

4. Инфракрасная спектроскопия

Информация о топологии образцов *por*-GaAs может быть получена из анализа структуры FTIR спектров. Для этого можно воспользоваться выражением для тензора диэлектрической проницаемости композиционного материала [12]. При этом необходимо рассмотреть два возможных варианта. В первом случае это будут протяженные в одном направлении нанокристаллы GaAs радиуса r , окруженные вакуумом. Тогда для тензора диэлектрической проницаемости будет справедливо следующее выражение:

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \frac{\epsilon + 1 + C(\epsilon - 1)}{\epsilon + 1 - C(\epsilon + 1)}, \quad (3)$$

ϵ — низкочастотная диэлектрическая проницаемость. Во втором случае, когда пористый слой состоит из пор радиуса r , пронизывающих кристаллическую матрицу GaAs, подобное соотношение запишется как

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \epsilon \frac{2 + C(\epsilon - 1)}{2 - C(\epsilon + 1)}. \quad (4)$$

И в том и в другом случае

$$\epsilon_{zz} = 1 + C(\epsilon - 1). \quad (5)$$

Константа $C = \pi R^2 N$ определяет долю кристаллического GaAs в объеме пористого слоя (так называемый фактор заполнения). Частотную зависимость тензора диэлектрической функции ϵ можно выразить следующим образом:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty \left(\frac{\omega^2 - \omega_{\text{LO}}^2}{\omega^2 - \omega_{\text{TO}}^2} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right). \quad (6)$$

Результаты расчета, выполненного согласно (3)–(6), а также экспериментальный спектр отражения $R(\omega)$ для одного из образцов пористого GaAs приведены на рис. 3. Из сопоставления приведенных данных можно сделать

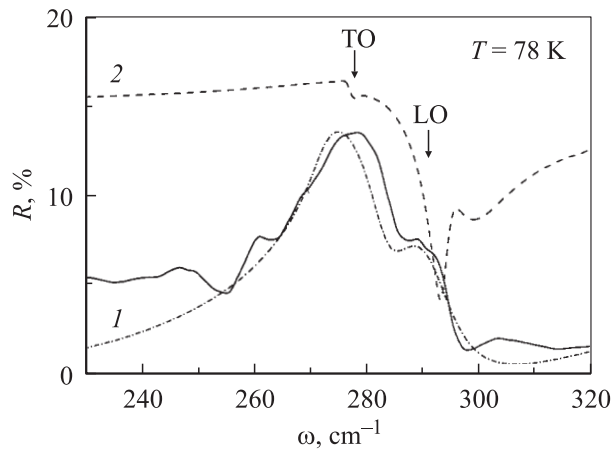


Рис. 3. Спектр отражения *por*-GaAs в области решеточных колебаний (сплошная линия), полученный при $T = 78$ К. Спектральные зависимости 1, 2 соответствуют результатам расчета для случая квантовых нитей (1) и протяженных пор (2).

вывод о том, что пористый слой в основном состоит из нанокристаллов GaAs. Для данного образца фактор заполнения, пропорциональный его пористости, оказался равным $C = 0.75$. Необходимо отметить, что в основу расчета была заложена цилиндрическая геометрия НК, правомерность которой в данном случае не очевидна. Как правило, для GaAs в процессе травления характерно образование на его поверхности кристаллитов пирамидальной формы. Тем не менее, как видно рис. 3, имеет место удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных.

Из рис. 3 также можно видеть, что зависимость $R(\omega)$ имеет сложную форму, адекватно воспроизвести которую удастся, если принять во внимание эффекты локализации оптических фононов в объеме НК GaAs. Кроме того, используя подход, изложенный в работе [13], можно попытаться оценить размеры НК, формирующих слой *por*-GaAs. В результате проведенных расчетов получилось значение среднего диаметра НК, равное 6.2 нм, что хорошо совпадает с оценкой ($d \approx 5.9$ нм), полученной из спектров КРС в этом образце и $d \approx 6.3$ нм по данным ФЛ. Более того, значение частоты SO-фонона, полученное из спектра ИК отражения, $\omega_{SO} = 283.7$ см⁻¹, вполне соответствует этой величине, оцененной из экспериментов по комбинационному рассеянию света ($\omega_{SO} = 284.0$ см⁻¹). В дополнение к этому, воспользовавшись результатами теоретико-группового расчета, проведенного недавно авторами работы [14] для НК GaAs, можно, зная частоты пространственно ограниченных оптических фононных мод, оценить средний радиус нанокристаллов. Здесь тем не менее имеет место определенная трудность, связанная с тем, что максимальная частота колебательной моды, полученная в [14] в рамках модели поля эмпирических валентных сил (empirical valence force field model), оказалась равной 305 см⁻¹, что выше частоты LO-фонона в арсениде галлия (в точке Г

зоны Бриллюэна). Авторы указанной работы исходили из предположения, что колебательные моды объемного материала $|n, \mathbf{k}\rangle$ с $\mathbf{k} \neq 0$ определяют вибрационные свойства НК GaAs, и они по энергии ниже фононных мод центра зоны Бриллюэна Г. В частности, для 6 направлений $\langle 100 \rangle$ линейная комбинация LO-состояний $|\Delta_1, \mathbf{k}\rangle$ дает одно состояние A_1 , одно дважды вырожденное E и одно трижды вырожденное состояние T_2 [14]:

$$6|\Delta_1, \mathbf{k}\rangle \Rightarrow A_1 + E + T_2. \quad (7)$$

Подобно этому для ТО-колебаний по направлениям $\langle 100 \rangle$ получено [14]:

$$6|\Delta_3 + \Delta_4, \mathbf{k}_\Delta\rangle \Rightarrow 2T_1 + 2T_2, \quad (8)$$

а по направлениям $\langle 111 \rangle$ справедливы следующие соотношения:

$$4|\Lambda_1, \mathbf{k}_\Lambda\rangle \Rightarrow A_1 + T_2 \quad (\text{LO}), \quad (9)$$

$$4|\Lambda_3, \mathbf{k}_\Lambda\rangle \Rightarrow E + T_1 + T_2 \quad (\text{TO}). \quad (10)$$

Из приведенных уравнений следует, что колебание типа A_1 подвержено влиянию со стороны только объемных LO-фононных мод. Аналогично этому T_1 управляется объемными поперечными оптическим фононами. Поэтому эффект размерного квантования будет существенным образом сказываться на изменении частоты колебания A_1 и менее всего — для T_1 . Промежуточный случай имеет место для колебания типа T_2 . Недостатки данной модели проявляются при рассмотрении вибрационных свойств поверхностных атомов. Предполагается, что атомы, формирующие поверхность НК GaAs, имеют такой же заряд, как и атомы в его объеме. В итоге получается, что НК можно считать электрически нейтральным. Следует отметить, что подобный вопрос относится к числу спорных, так как общее количество анионов в НК не обязательно должно совпадать с общим количеством катионов, и, как следствие этого, общий заряд на поверхности НК может быть отличным от нуля. Вполне вероятно, что именно это допущение и явилось причиной завышения значения теоретически рассчитанной частоты моды A_1 по сравнению с частотой объемного LO-фонона в GaAs. Тем не менее можно экстраполировать значения частот колебаний, представленных в [14], и попытаться оценить средний размер нанокристаллов, формирующих пористый слой GaAs, спектр которого показан на рис. 3, в рамках обсуждаемой модели. Ближе всего экспериментальные и теоретические данные располагаются друг к другу для значения диаметра НК $d \approx 62$ Å, что следует из

Экспериментальные и теоретические [14] значения частот колебательных мод в образце *por*-GaAs, спектр которого представлен на рис. 3. Значения частот даны в см⁻¹

	A_1	A_2	E	T_1	T_2
Данные работы [14], $r = 31$ Å	289.3	275.3	285.1	282.3	287.0
Экспериментальные результаты	288.8	275.1	280.8	278.1	283.5

сравнения результатов, представленных в таблице. Если принять во внимание тот факт, что пришлось провести экстраполяцию результатов, полученных в [14], совпадение можно считать вполне удовлетворительным. Необходимо подчеркнуть тем не менее, что реально в экспериментальном оптическом спектре присутствует большее число колебаний, чем предсказывается в работе [14]. Здесь следует вспомнить о том, что некоторые из мод типа E , T_1 и T_2 двукратно или трехкратно вырождены. Снятие вырождения может иметь место по нескольким причинам, в том числе и геометрического характера: при переходе от сферической геометрии, например, к цилиндрической. В квантовой нити снимается вырождение с двух поперечных колебаний, которое имеет место в объемных изотропных полупроводниках [11]. Нанокристалл, имеющий размер 8 нм, состоит из 11855 атомов [14], из которых может быть сформирована та или иная геометрическая форма самого НК. Поэтому в нашем случае можно ожидать, что колебательные свойства *por*-GaAs могут быть описаны в рамках формализма протяженных в одном направлении нанокристаллов GaAs. Частично это подтверждается как результатами работы [14], так и данными, представленными на рис. 3 и рассчитанными в соответствии с уравнениями (3)–(6). Кроме того, в работе [6] наблюдалась „столбчатая“ структура слоя *por*-GaAs. Здесь уместно добавить, что попытка описать реальную структуру спектра отражения образцов пористого GaAs с помощью подхода, в основу которого заложена треугольная геометрия в сечении квантовой нити [15], не принесла желаемых результатов.

При уменьшении среднего радиуса нанокристаллов, составляющих пористый слой GaAs, происходит дальнейшая трансформация спектра отражения, заключающаяся в том, что частоты колебаний, соответствующих пространственно ограниченными фононным модам, смещаются к частоте поперечного оптического фонона. При этом отражательная способность материала в данной области волновых чисел уменьшается. Все сказанное проиллюстрировано на рис. 4.

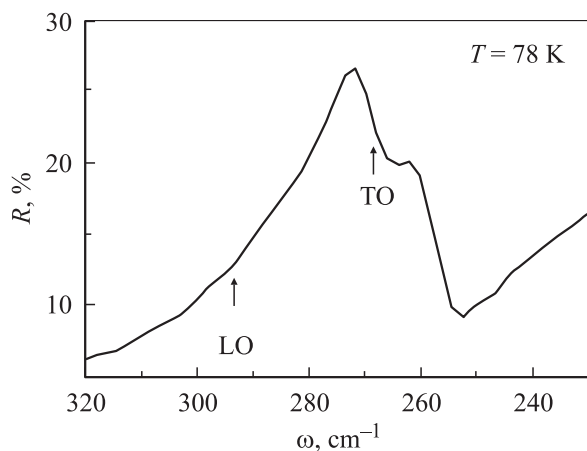


Рис. 4. Спектр отражения $R(\omega)$ образца *por*-GaAs ($r \approx 25\text{--}27 \text{ \AA}$).

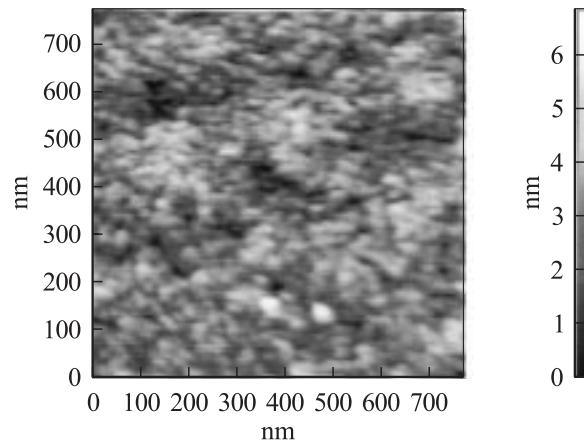


Рис. 5. Изображение рельефа поверхности образца пористого GaAs *n*-типа, полученное с помощью AFM-сканирования.

5. Результаты AFM-анализа

В качестве примера на рис. 5 представлены результаты AFM-анализа поверхности слоя *por*-GaAs, полученного с использованием тех же технологических режимов, что и образец, спектры КРС и FTIR которого демонстрировались на рис. 2 и 3. Из рис. 5 можно видеть картину упорядоченного расположения НК GaAs, средний диаметр которых составляет 6.7 нм. Отсутствуют НК пирамидальной формы, появление которых следует ожидать, если проводить химическое травление поверхности кристаллического арсенида галлия [16]. Следовательно, сделанные выше, при обсуждении результатов FTIR-спектроскопии, предположения о том, что НК GaAs имеют форму, отличную от пирамидальной, получили экспериментальное подтверждение. Подобный факт может быть следствием того, что процесс электрохимического травления происходит по иному сценарию. Полученное значение $d \approx 6.7 \text{ нм}$ удовлетворительно согласуется как с результатами спектроскопии КРС и FTIR, так и с данными ФЛ.

6. Заключение

В работе дано описание процесса получения слоев пористого GaAs с помощью метода электрохимического травления и представлены результаты исследований их оптических и структурных свойств. Показано, что морфология слоя *por*-GaAs, поверхностные состояния и размер нанокристаллов, составляющих пористый слой, существенным образом зависят от типа проводимости исходного монокристаллического GaAs. В инфракрасных оптических спектрах и спектрах КРС обнаружено как смещение пиков основных оптических фононов, так и появление колебательных мод, локализованных в объеме НК, а также поверхностных фононов. Дано объяснение сложной структуры FTIR-спектров *por*-GaAs. Показано, что в образцах *por*-GaAs *n*-типа проводимости появле-

ние сигнала ФЛ в видимой области спектра обусловлено квантово-размерными эффектами. С помощью методов AFM и XPS были проведены исследования морфологии *por*-GaAs и химического состава нанокристаллов. Было установлено, что сохраняется стехиометрия состава НК, а также имеет место равномерный нанорельеф поверхностей *por*-GaAs, полученных на подложках арсенида галлия *n*-типа проводимости, что может быть важным при их дальнейшем использовании в качестве материала подложки для получения эпитаксиальных слоев GaAs с улучшенными структурными свойствами. По результатам спектроскопии КРС можно контролировать присутствие на поверхности НК окислов As₂O₃ и Ga₂O₃. Значения среднего диаметра нанокристаллов GaAs, формирующих слой *por*-GaAs, полученные по результатам спектроскопии КРС, FTIR, ФЛ и AFM, хорошо согласуются друг с другом.

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ (№ 03-02-16938, № 02-03-32223) и „Интеграция“ (И-0964).

Список литературы

- [1] D.J. Lockwood, P. Schmuki, H.J. Labbe, J.W. Fraser. *Physica E*, **4**, 102 (1999).
- [2] Н.С. Аверкиев, Л.П. Казакова, Э.А. Лебедев, Ю.В. Рудь, А.Н. Смирнов, Н.Н. Смирнова. *ФТП*, **34** (6), 757 (2000).
- [3] Д.Н. Горячев, О.М. Сресели. *ФТП*, **31** (11), 1383 (1997).
- [4] В.В. Мамутин, В.П. Улин, В.В. Третьяков, С.В. Иванов, С.Г. Конников, П.С. Копьев. *Письма ЖТФ*, **25** (1), 3 (1999).
- [5] Ю.Н. Бузынин, С.А. Гусев, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, А.В. Мурель, О.И. Хрыкин, В.И. Шашакин. *Письма ЖТФ*, **26** (7), 64 (2000).
- [6] А.И. Белогорохов, В.А. Караванский, А.Н. Образцов, В.Ю. Тимошенко. *Письма ЖЭТФ*, **60** (4), 262 (1994).
- [7] A.I. Belogorokhov, Yu.A. Pusep, L.I. Belogorokhova. *J. Phys.: Condens. Matter*, **12**, 3897 (2000).
- [8] Ю.Н. Бузынин, С.А. Гусев, Ю.Н. Дроздов, А.В. Мурель. *ЖТФ*, **70** (5), 128 (2000).
- [9] Е.А. Виноградов, И.И. Хаммадов. *Спектроскопия объемных и поверхностных фононов кристаллов* (Ташкент, Фан, 1989).
- [10] R. Enderlein. *Phys. Rev. B*, **47**, 2162 (1993).
- [11] Ж. Панков. *Оптические процессы в полупроводниках* (М., Мир, 1973).
- [12] A.V. Ghainer, G.I. Surdutovich. *Phys. Rev. A*, **50**, 714 (1994).
- [13] А.И. Белогорохов, Л.И. Белогорохова. *ФТТ*, **43** (9), 1693 (2001).
- [14] S.-F. Ren, Z.-Q. Gu, D. Lu. *Sol. St. Commun.*, **113**, 273 (2000).
- [15] M.A. Stroschio, K.W. Kim, M.A. Littlejohn, H. Chuang. *Phys. Rev. B*, **42** (2), 1488 (1990).
- [16] *Травление полупроводников*, пер. с англ. под ред. С.Н. Горина (М., Мир, 1965).

Редактор Т.А. Полянская

Optical properties of a nanosized porous GaAs

A.I. Belogorokhov, S.A. Gavrilov*, I.A. Belogorokhov⁺, A.A. Tikhomirov*

Institute of Rare Metals,
119017 Moscow, Russia

* Moscow Institute of Electronic Engineering,
103498 Moscow, Russia

⁺ M.V. Lomonosov Moscow State University,
119899 Moscow, Russia

Abstract Optical properties of a porous GaAs obtained electrochemically on *n*- and *p*-type GaAs(100) plates have been studied. The GaAs wafer doping type considerably affect nanocrystal shape, nanocrystal average diameter and chemical surface states. Low-frequency Raman shift of the peaks, conditioned by the main optical phonons, in the Raman spectra of the porous GaAs was observed. The values of the frequencies of surface phonons obtained from the Raman spectra and the infrared reflectivity spectra well coincide. Comparing the reflectivity spectra of a porous GaAs with the ones of a GaAs crystal, the changes in the spectral dependences of the reflectance within the phonon resonance region may be seen. The surface morphology of porous GaAs prepared on the substrate of an *n*-type GaAs has been studied using the atomic-force microscopy. A nanosized contour of the porous GaAs surface was watched. Estimations of the size of nanocrystals in a porous GaAs both by the Raman and infrared spectroscopy as well as the photoluminescence and atomic-force microscopy agree well.