

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 538.958

СПЕКТРОСКОПИЯ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НАНОПРОВОЛОК GaAs

© И. В. Калачев^{1,2}, И. А. Милёхин^{1,2}, Е. А. Емельянов²,
В. В. Преображенский², В. С. Тумашев², А. Г. Милёхин²,
А. В. Латышев²

¹Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1,

²Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Лаврентьева, 13
E-mail: milekhin@isp.nsc.ru

Представлены экспериментальные данные по изучению фононных и оптических свойств нанопроволок GaAs ориентации (111), расположенных на золотой подложке с помощью методов спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) и фотолюминесценции (ФЛ). Структурные параметры нанопроволок были определены методами атомно-силовой (АСМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). В спектрах микроКРС и микроФЛ отдельной нанопроволоки GaAs наблюдаются моды оптических фононов GaAs и их обертонов, вплоть до третьего порядка, и полоса экситонной фотолюминесценции. В спектрах микроФЛ проявляется анизотропия интенсивности ФЛ в нанопроволоках, причём максимальный/минимальный сигнал наблюдается при направлении вектора поляризации вдоль/поперёк проволоки. Выполнено картирование наноФЛ отдельной нанопроволоки GaAs с пространственным разрешением 20 нм, что существенно меньше дифракционного предела. При переходе к нанометровым масштабам обнаружено плазмонное усиление сигнала ближнепольной экситонной наноФЛ, обусловленное металлизированной АСМ-иглой.

Ключевые слова: фотолюминесценция, комбинационное рассеяние света, ближнепольная оптическая спектроскопия, наноструктуры, нанопроволоки, фононы, локализованный плазмонный резонанс.

DOI: 10.15372/AUT20230601

EDN: WAPEAU

Введение. В последнее время в электронной промышленности существуют тенденции по уменьшению размеров комплектующих электронных приборов. В связи с этим в науке и технике растёт интерес к изучению физических свойств наноструктур и структур пониженной размерности. Одним из видов таких наноструктур являются нанопроволоки. Нанопроволоки — квазиодномерные структуры, длина которых значительно превосходит поперечные размеры, как следствие, имеющие свойства, отличные от объёмного материала. Характерные диаметры нанопроволок варьируются в диапазоне 10–200 нм [1]. Благодаря большому отношению поперечных размеров нанопроволок к их длине, свойства нанопроволок проявляют сильную анизотропию [2]. Эти свойства в последнее время вызывают интерес у инженеров и учёных по целому ряду причин. Во-первых, они применяются в фундаментальной науке, где могут служить в качестве образцов для изучения явлений в нанометровом масштабе [3]. Во-вторых, для нанoeлектроники и нанофотоники подобные структуры имеют значительный потенциал применения при производстве лазеров [4], солнечных элементов [5], наносенсоров [6], светоизлучающих диодов [7] и др.

Один из материалов, наиболее часто используемый для роста нанопроволок, — GaAs является прямозонным полупроводником класса $A^{III}B^V$ с шириной запрещённой зоны $E_g = 1,424$ эВ в объёмном материале при нормальных условиях. Поскольку электронные свойства нанопроволок GaAs могут существенно отличаться от объёмного GaAs из-за пространственного ограничения движения носителей заряда в двух направлениях и, как следствие, квантования электронного спектра, необходимость детального изучения физических свойств нанопроволок GaAs является важной задачей.

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) является широко используемым неразрушающим методом химического анализа материалов, так как позволяет получить как качественную, так и количественную информацию о колебательных свойствах исследуемого вещества. Информация о фоновом спектре исключительно важна, в том числе и для практических приложений, поскольку фононы определяют каналы релаксации носителей заряда и, в конечном счёте, эффективность устройств фотоники.

Несмотря на все преимущества, недостатком традиционной оптической спектроскопии, включая КРС и ФЛ (фотолюминесценцию), является тот факт, что чувствительность этих методов недостаточна при анализе одиночных структур нанометровых размеров, таких как нанопроволоки. Это связано не только с необходимостью работать с малыми количествами аналита, дающего слабые по интенсивности сигналы КРС и ФЛ [8], но и с ограничением в пространственном разрешении, накладываемым дифракционным пределом [9]. Для преодоления этого ограничения были разработаны методики, позволяющие, с одной стороны, усилить отклик сигнала КРС и ФЛ, а с другой — выполнить картирование сигнала КРС и/или ФЛ с пространственным разрешением ниже дифракционного предела. Эти методы используют явление локализованного поверхностного плазмонного резонанса (ЛППР). Благодаря явлению ЛППР, при применении плазмонных материалов из металлов (Ag, Au, Cu) можно получить значительное усиление интенсивности сигналов КРС и ФЛ. В частности, методика наноКРС, или КРС, усиленного металлизированным зондом атомно-силового микроскопа (Tip-Enhanced Raman Scattering – TERS), позволяет получить гигантское усиление сигнала КРС (коэффициент усиления 10^{14}) [10]. Суть метода заключается в нанесении металлического покрытия на острие зонда атомно-силовой микроскопии (АСМ). При этом на острие зонда формируется металлический нанокластер. При облучении зонда лазером и выполнении условий существования плазмонного резонанса в нанокластере формируется локализованный поверхностный плазмон. Плазмон, в свою очередь, является источником вторичного дипольного излучения нанометровых размеров, что позволяет преодолеть ограничение на пространственное разрешение, связанное с дифракционным пределом.

Другим важным инструментом для анализа оптических и электронных свойств материалов является спектроскопия фотолюминесценции.

Явление ФЛ в полупроводниках и других материалах изучено достаточно подробно [11]. Экситонная ФЛ представляет особый интерес при анализе электронной структуры полупроводниковых материалов, позволяя исследовать механизмы и типы излучательной рекомбинации.

Ансамбли эпитаксиальных нанопроволок GaAs имеют дисперсию размеров и формы, отдельные нанопроволоки существенно отличаются друг от друга в ансамбле. Такая неоднородность вызывает уширение оптического отклика от ансамбля, а оптические измерения отдельной нанопроволоки оказываются ограниченными дифракционным пределом. Ближнеполюсная оптическая спектроскопия снимает это ограничение, давая возможность изучать локальные характеристики энергетической структуры отдельных нанопроволок GaAs с высоким пространственным разрешением [12, 13]. Интенсивный сигнал в видимом спектральном диапазоне был продемонстрирован методом апертурной ближнеполюсной

ФЛ при изучении микрокристаллических структур на основе GaAs при анодном окислении [14]. Однако апертурный метод, хотя и достигает высокого пространственного разрешения (50–100 нм), но не позволяет выполнять оптическое картирование отдельных наноструктур с высокой точностью.

Метод ФЛ, усиленной металлизированным зондом атомно-силового микроскопа (Tip Enhanced Photoluminescence), или наноФЛ, является безапертурным вариантом ближнепольной оптической спектроскопии и даёт возможность добиться пространственного разрешения ниже 10 нм [15]. Эффективность этого метода была показана для характеристики 0D-, 1D- и 2D-наноструктур [15]. Как и в случае наноКРС, идея метода заключается в том, что плазмонный зонд микроскопа движется в непосредственной близости от поверхности образца в поле лазерного излучения, сфокусированного на острие зонда. На этом острие формируется область локально усиленного электромагнитного поля [16], которая является источником усиленного сигнала для методов плазмон-усиленной ближнепольной спектроскопии, включая наноФЛ и наноКРС [15, 17].

Целью данной работы является исследование нанопроволок GaAs ориентации (111) методами КРС и ФЛ на микро- и наномасштабе.

Экспериментальная часть. Нанопроволоки GaAs были выращены на подложках Si ориентаций (001) и (111) методом молекулярно-лучевой эпитаксии [18] при осаждении из газовой фазы мышьяка и галлия. Предварительно в ростовой установке были подобраны условия для диффузии атомов галлия на поверхность кремния, где они собирались в капли. Эти капли выступают в роли поглотителя атомов мышьяка, которые, осаждаясь на них, диффундируют к поверхности Si—Ga и встраиваются в кристалл, таким образом обеспечивая рост нанопроволоки.

Геометрические и структурные параметры нанопроволок были определены методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Изображения, полученные методом СЭМ, представлены на рис. 1.

Рост нанопроволок на подложках (001) происходил под углом 35° к поверхности, а на подложках (111) — перпендикулярно поверхности подложки. Это указывает на то, что в обоих случаях преимущественный рост происходит в направлении (111). Сами нанопроволоки имеют в разрезе, перпендикулярном направлению роста, гексагональное сечение (рис. 1, *b*). Боковые грани нанопроволок принадлежат семейству кристаллографических плоскостей $\langle 110 \rangle$.

После роста нанопроволоки были перенесены механическим путём на подложку кремния, покрытую слоем золота толщиной 100 нм. Разница в диэлектрической проницаемости

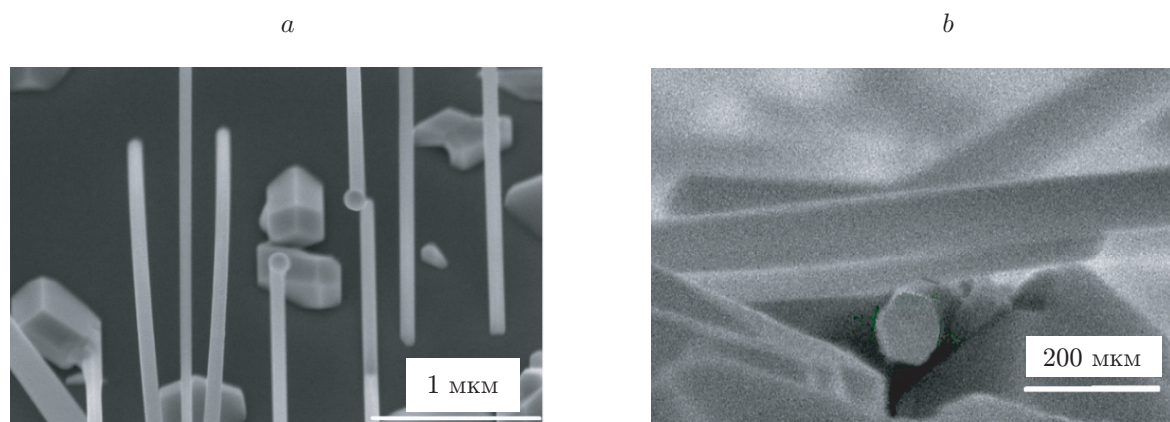


Рис. 1. СЭМ-изображения нанопроволок GaAs: *a* — вид образца сверху, *b* — вид в профиль, демонстрирующий гексагональное сечение нанопроволоки

для золота и GaAs гораздо больше, чем для Si и GaAs, что приводит к большей интенсивности сигналов КРС и ФЛ при помещении нанопроволоки GaAs на поверхность золота.

Для атомно-силовой микроскопии, измерений КРС и ФЛ использовалась установка XploRA Nano, состоящая из двух узлов: спектрометра КРС и атомно-силового микроскопа. При построении АСМ-изображения использовался кремниевый зонд TipsNano. Спектрометр модели Horiba XploRA Plus позволяет проводить эксперименты по измерению спектров КРС и ФЛ, по построению и анализу спектральных карт КРС и ФЛ как в микрометровом, так и нанометровом масштабах.

Для экспериментов по наноФЛ использовался зонд TipsNano, покрытый слоем серебра по методике, описанной в [19]. Также возможен выбор поляризации лазерного излучения: вертикальной или горизонтальной поляризации, или неполяризованного света. Возбуждение и регистрация рассеянного света осуществлялись с помощью объектива (100×, 0,7 NA). Остриё металлизированного зонда АСМ облучалось лазерным лучом, падающим под углом 65° по нормали к поверхности образца. Сам образец помещён на подвижную подставку, позволяющую контролировать его перемещение в горизонтальной плоскости, а также задавать шаг картирования, определяющий качество построения спектральных карт КРС и ФЛ. Измерения микро- и наноФЛ проводились при длине волны лазерного излучения $\lambda = 785$ нм и мощности лазерного излучения около 30 мкВт на поверхности образца во избежание нагрева нанопроволоки. При получении оптического изображения использовался объектив с увеличением 100×.

Результаты и обсуждение.

Комбинационное рассеяние света и фотолюминесценция с микрометровым пространственным разрешением. Для нанопроволок, выращенных на подложках ориентаций (001) и (111), были получены оптические изображения (рис. 2, а) и изображения АСМ (рис. 2, б), которые позволяют определить их длину (несколько микрон) и средний диаметр (около 90 нм).

Типичный спектр ФЛ отдельной нанопроволоки GaAs (диаметр 96 нм) в диапазоне 1,3–1,58 эВ при возбуждении лазером при $\lambda = 785$ нм в неполяризованном свете (что соответствует сдвигу КРС 2000–0 см^{-1}) представлен на рис. 2, с. В спектре наблюдается интенсивный широкий пик, соответствующий межзонной ФЛ при энергии оптического перехода, равного ширине запрещённой зоны объёмного полупроводника $E_g \approx 1,42$ эВ. На низких частотах при 271 и 290 см^{-1} наблюдаются пики поперечных (ТО) и продольных (ЛО) оптических фононов GaAs соответственно. Так как энергия света $E_{\hbar\omega} \approx 1,58$ эВ больше ширины запрещённой зоны GaAs, но близка к резонансным условиям, то возможна реализация мультифононного КРС (см. рис. 2, с). Это наблюдается в спектре в виде серии пиков 2LO, 3LO и 4LO, расположенных на частотах 582, 873 и 1164 см^{-1} соответственно.

По интенсивности сигнала ФЛ выполнено картирование нанопроволок GaAs с микрометровым пространственным разрешением. Характерная карта ФЛ с микрометровым разрешением представлена на рис. 2, д. Шаг картирования составлял 300 нм. Как видно из рисунка, карта ФЛ соответствует оптическому и АСМ-изображениям. Вместе с тем диаметр нанопроволоки по данным ФЛ и оптическому изображению оказывается уширен вследствие дифракционного предела оптического метода. Интересно, что наблюдается гашение интенсивности ФЛ со стороны галлиевой капли. Причина такого гашения требует отдельного изучения. После серии аналогичных экспериментов, проведённых для нанопроволок различного диаметра, для дальнейшего исследования были выбраны нанопроволоки, дающие наибольший отклик сигналов КРС и ФЛ.

Анизотропия ФЛ нанопроволок. Интенсивность сигнала ФЛ от нанопроволок сильно зависит от поляризации лазерного излучения относительно расположения самой нанопроволоки [2]. На это влияют два фактора: поляризационная зависимость поглощения излучения и поляризационная зависимость ФЛ [20], что является следствием анизотропии

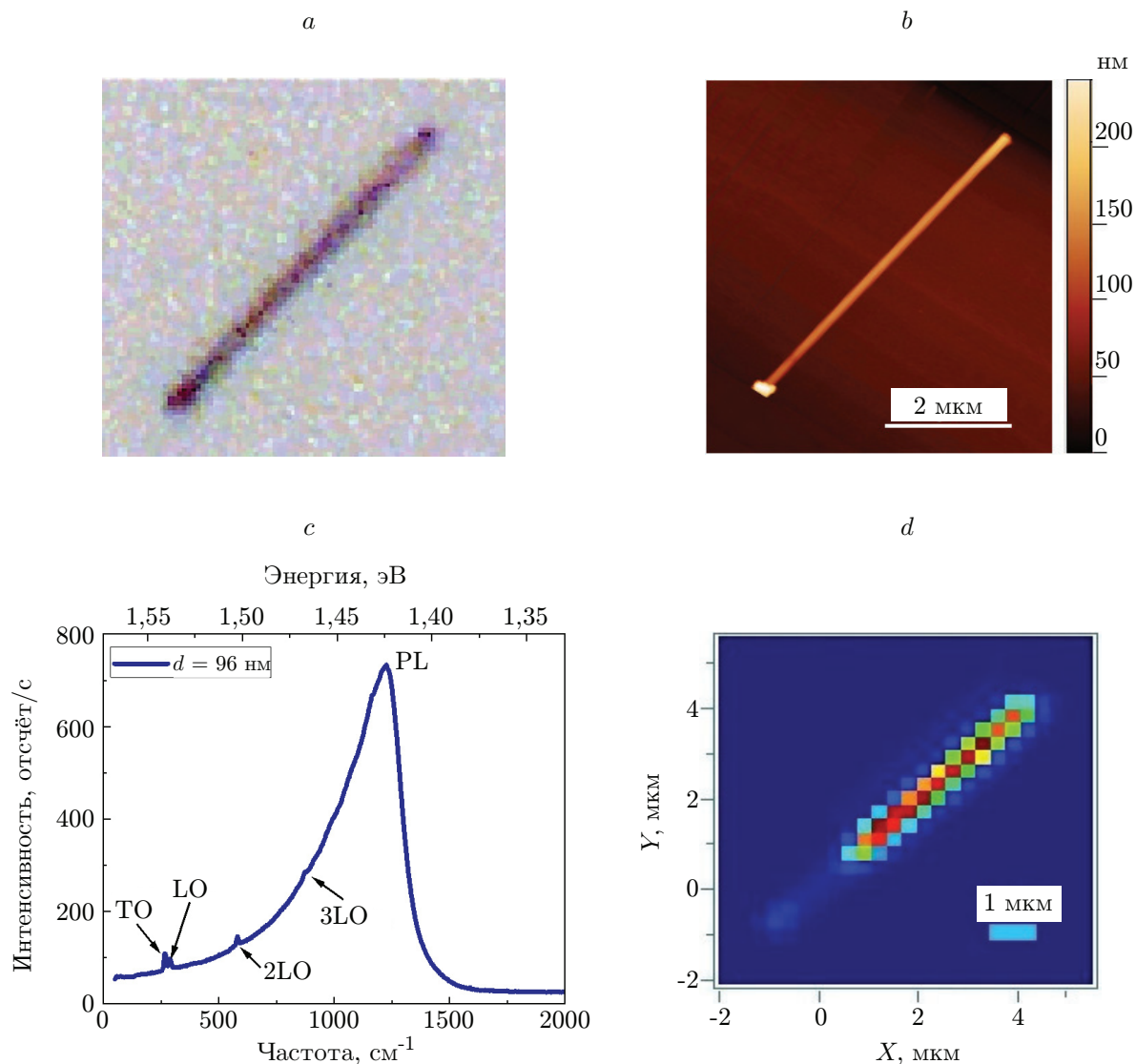


Рис. 2. Характеризация одиночной проволоки GaAs: *a* — оптическое изображение; *b* — АСМ-изображение; *c* — усреднённый спектр ФЛ и КРС нанопроволоки GaAs, записанный при $\lambda = 785$ нм в неполяризованном свете; *d* — карта интенсивности межзонной ФЛ нанопроволоки GaAs

оптических свойств в продольном и поперечном направлениях. При определённых условиях отношение интенсивности ФЛ при поляризации лазерного пучка вдоль проволоки может многократно превосходить интенсивность ФЛ в поперечном направлении. Этот факт может лечь в основу создания поляризаторов из нанопроволок [21].

Для анализа поляризационной зависимости интенсивности сигнала ФЛ в нанопроволоках GaAs были проведены соответствующие эксперименты. В первом эксперименте для нанопроволоки были построены спектры КРС и ФЛ при различных поляризациях электрического поля лазера: сонаправленной нанопроволоке и перпендикулярной ей. Результаты этого эксперимента представлены на рис. 3. Как и ожидалось, наиболее интенсивный сигнал ФЛ достигается при поляризации лазерного излучения вдоль нанопроволоки.

Отметим, что интенсивности пиков КРС и ФЛ в спектрах для нанопроволок GaAs, показанных на рис. 3 и 2, *c*, существенно различаются. Однако анализ спектров нанопроволок разного диаметра показал отсутствие взаимосвязи диаметра с интенсивностью мод

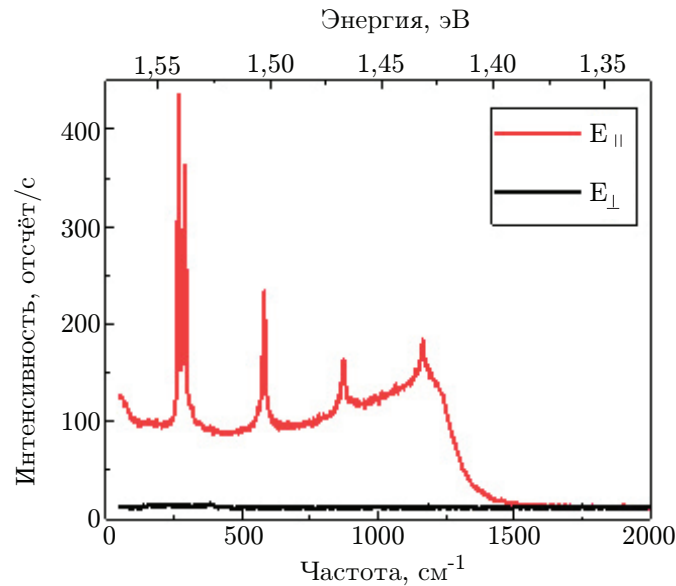


Рис. 3. Спектры ФЛ и КРС от нанопроволоки GaAs, записанные при поляризации лазерного света вдоль ($E_{||}$) и поперёк нанопроволоки (E_{\perp})

КРС и ФЛ. Очевидно, различие интенсивностей этих мод обусловлено разным структурным качеством нанопроволок.

Комбинационное рассеяние света и фотолюминесценция с нанометровым пространственным разрешением. Для исследований КРС и ФЛ нанопроволок GaAs в нанометровом масштабе был выбран зонд АСМ, покрытый серебром, длина волны лазерного излучения (785 нм) и малая мощность лазерного излучения (30 мкВт). В этом случае АСМ-изображения (рис. 4, а) и спектральная карта интенсивности наноФЛ записывались одновременно в контактном режиме (для АСМ-картирования) и на расстоянии 50 нм (рис. 4, б) от Ag-зонда до поверхности (для наноФЛ). При этом АСМ-картирование демонстрирует наличие двух нанопроволок на поверхности длиной около 5 мкм и диаметром около 200 нм (см. рис. 4, а). Карты ближнеполюсной наноФЛ были получены как разность изображений в контактном режиме и на расстоянии 50 нм от Ag-зонда до поверхности (см. рис. 4, б).

Как видно из рис. 4, б, картирование сигнала ближнеполюсной экситонной ФЛ (840–880 нм) позволяет получить оптическое изображение нанопроволок, которое полностью соответствует АСМ-изображению. При этом пространственное разрешение спектральной карты наноФЛ (и размер пикселя) составляет $\Delta x \approx 20$ нм, что намного меньше дифракционного предела оптического микроскопа.

Усреднённые спектры наноФЛ из разных областей, как показано на рис. 4, б, представлены на рис. 4, с. Как видно из рис. 4, с, в спектрах, полученных от нанопроволоки (области 2 и 4 на рис. 4, б), наблюдается ближнеполюсный сигнал экситонной наноФЛ. Спектральное положение ФЛ от нанопроволок изменяется в зависимости от положения зонда в пределах 20 нм, как показано на рис. 4, с для областей 2 и 4. Заметим, что в области вне проволоки наблюдается особенность вблизи 870 нм, которая, по-видимому, обусловлена плазмоном зонда АСМ при его взаимодействии с поверхностью (области 1 и 3 на рис. 4, с). Зачастую в экспериментах по наноКРС, когда зонд находится в контакте с поверхностью нанопроволоки GaAs, происходит полное гашение ФЛ и выполнить картирование не представляется возможным. Гашение ФЛ связано с интенсификацией процессов безызлучательной рекомбинации электронов и дырок и, в частности, оже-рекомбинацией [22, 23]. Причиной оже-рекомбинации в нанопроволоке является инжекция электронов из металлизированного

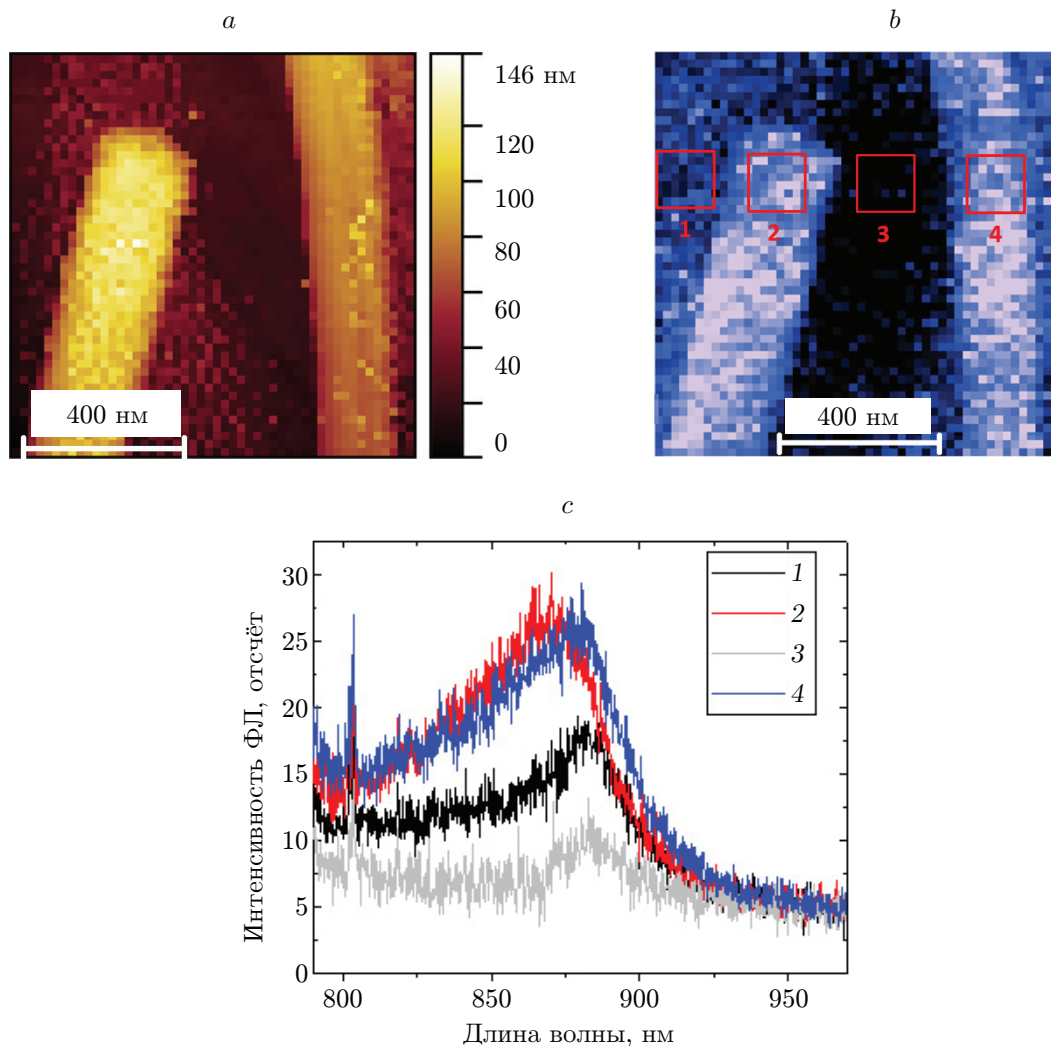


Рис. 4. Нанохарактеризация одиночной нанопроволоки: *a* — АСМ-изображение, *b* — спектральная карта ближнепольной наноФЛ нанопроволоки, *c* — усреднённые спектры КРС и ФЛ для областей, показанных прямоугольниками на (*b*)

зонда в полупроводниковую нанопроволоку при их контакте. Интенсивность наблюдаемых фонных мод и обертонов в спектрах наноКРС меняется незначительно и усиления сигнала наноКРС не наблюдается, но меняется вид спектра. Наблюдается лишь слабая мода первого обертона, в то время как спектры микроКРС демонстрируют интенсивные фонные моды и обертоны вплоть до третьего порядка. Очевидно, что такой вид спектров наноКРС свидетельствует о нерезонансном характере процесса КРС в данной геометрии рассеяния.

Заключение. В данной работе изучены структурные, колебательные и оптические свойства отдельных нанопроволок GaAs методами атомно-силовой микроскопии, спектроскопий КРС и ФЛ. Изучены спектры КРС оптическими фононами и экситонной ФЛ отдельных нанопроволок в условиях, близких к резонансным. Интенсивность ФЛ в изученных нанопроволоках анизотропна, при этом максимальный сигнал микроФЛ наблюдается при направлении вектора поляризации вдоль проволоки, а минимальный — поперёк проволоки. Впервые изучена наноФЛ нанопроволок и выполнено картирование интенсивности межзонной ФЛ с пространственным разрешением около 20 нм, что существенно ниже

дифракционного предела. Обнаруженная ближнеполюсная межзонная наноФЛ обусловлена усилением сигнала ФЛ в присутствии Ag АСМ-зонда.

Разработанные подходы показали свою применимость для исследования оптических и фононных свойств отдельных наноразмерных полупроводниковых структур с помощью спектроскопии наноФЛ с высоким пространственным разрешением, соответствующим разрешению АСМ.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта № 075-15-2020-797 (13.1902.21.0024).

Благодарности. Авторы выражают благодарность А. С. Медведеву и Л. А. Ненашевой за изготовление зондов для наноФЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ketterer B.** Raman Spectroscopy of GaAs Nanowires: Doping Mechanisms and Fundamental Properties: PhD thesis. École Polytechnique Fédérale De Lausanne. Suisse, 2011. 122 p.
2. **Johnston M. B., Joyce H. J.** Polarization anisotropy in nanowires: Fundamental concepts and progress towards terahertz-band polarization devices // *Progr. Quantum Electron.* 2022. **85**. 100417.
3. **Giazotto F., Spathis P., Roddaro S. et al.** A Josephson quantum electron pump // *Nature Phys.* 2011. **7**. P. 857–861.
4. **Yi R., Zhang X., Li C. et al.** Self-frequency-conversion nanowire lasers // *Light Sci. Appl.* Springer Nature. 2022. **11**(1). Art. N 120.
5. **Hamedi S., Kordrostami Z., Yadollahi A.** Artificial neural network approaches for modeling absorption spectrum of nanowire solar cells // *Neural Comput. and Appl.* 2019. **31**, Iss. 12. P. 8985–8995.
6. **Smith A. F., Liu X., Woodard T. L. et al.** Bioelectronic protein nanowire sensors for ammonia detection // *Nano Res.* 2020. **13**, N 5. P. 1479–1484.
7. **Philip M. R., Choudhary D. D., Djavaid M. et al.** High efficiency green/yellow and red InGaN/AlGaIn nanowire light-emitting diodes grown by molecular beam epitaxy // *Journ. Sci.: Adv. Mater. and Devices.* 2017. **2**, N 2. P. 150–155.
8. **Han X. X., Rodriguez R. S., Haynes C. L. et al.** Surface-enhanced Raman spectroscopy // *Nature Rev. Meth. Primers.* 2021. **1**, Iss. 1. Art. N 87.
9. **Abbe E.** Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung: I. Die Construction von Mikroskopen auf Grund der Theorie // *Archiv für mikroskopische Anatomie.* 1873. **9**, N 1. S. 413–418.
10. **Cara E., Mandril L., Sacco A. et al.** Towards a traceable enhancement factor in surface-enhanced Raman spectroscopy // *Journ. Mater. Chem. C.* 2020. **8**, Iss. 46. P. 16513–16519.
11. **Gorman D.** Photoluminescence and Excitation Studies of Semiconductors: Master of Science thesis. Dublin City University, 2001. 82 p.
12. **Senichev A. V., Talalaev V. G., Shtrom I. V. et al.** Nanospectroscopic Imaging of Twinning Superlattices in an Individual GaAs-AlGaAs Core-Shell Nanowire // *ACS Photonics.* 2014. **1**, Iss. 1. P. 1099–1106. DOI: 10.1021/ph5002022.
13. **Senichev A., Corfdir P., Brandt O. et al.** Electronic properties of wurtzite GaAs: A correlated structural, optical, and theoretical analysis of the same polytypic GaAs nanowire // *Nano Res.* 2018. **11**. P. 4708–4721. DOI: 10.1007/s12274-018-2053-5.
14. **Finnie C. M., Bohn P. W.** Near-field photoluminescence of microcrystalline arsenic oxides produced in anodically processed gallium arsenide // *Appl. Phys. Lett.* 1999. **74**, Iss. 8. P. 1096–1098. DOI: 10.1063/1.123454.

15. **Lee H., Lee D. Y., Kang M. G. et al.** Tip-enhanced photoluminescence nano-spectroscopy and nano-imaging // *Nanophotonics*. 2020. **9**, Iss. 10. P. 3089–3110. DOI: 10.1515/nanoph-2020-0079.
16. **Schuller J. A., Barnard E. S., Cai W. et al.** Plasmonics for extreme light concentration and manipulation // *Nat. Mater.* 2010. **9**. P. 193–204. DOI: 10.1038/nmat2630.
17. **Shao F., Zenobi R.** Tip-enhanced Raman spectroscopy: Principles, practice, and applications to nanospectroscopic imaging of *2D* materials // *Anal. and Bioanal. Chem.* 2019. **411**, Iss. 1. P. 37–61. DOI: 10.1007/s00216-018-1392-0.
18. **Cho A. Y., Arthur J. R.** Molecular beam epitaxy // *Progr. Solid State Chem.* 1975. **10**. P. 157–191.
19. **Basalaeva L. S., Kurus N. N., Rodyakina E. E. et al.** Fabrication of Au and Ag – Coated AFM Probes for Tip-Enhanced Raman Spectroscopy // *Journ. Phys.: Conf. Ser.* 2021. **2015**. P. 012013.
20. **Ruda H. E., Shik A.** Polarization-sensitive optical phenomena in semiconducting and metallic nanowires // *Phys. Rev. B*. 2005. **72**, Iss. 11. P. 115308.
21. **Yang Z. Z., Lu Y. F.** Broadband nanowire-grid polarizers in ultraviolet-visible-near-infrared regions // *Opt. Express*. 2007. **15**, Iss. 15. P. 9510–9519.
22. **Ratchford D., Shafiei F., Kim S. et al.** Manipulating coupling between a single semiconductor quantum dot and single gold nanoparticle // *Nano Lett.* 2011. **11**, Iss. 3. P. 1049–1054.
23. **Jin S. Y., DeMarco E., Pellin M. J. et al.** Distance-engineered plasmon-enhanced light harvesting in CdSe quantum dots // *Journ. Phys. Chem. Lett.* 2013. **4**, Iss. 20. P. 3527–3533.

Поступила в редакцию 15.07.2023

После доработки 01.08.2023

Принята к публикации 23.08.2023
