

Определение модуля Юнга нанопроводов GaAs, наклонно растущих на подложке

© П.А. Алексеев^{†*}, М.С. Дунаевский⁺, А.В. Стовпяга[†], М. Lepsa[‡], А.Н. Титков⁺

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

^{*} Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,
197376 Санкт-Петербург, Россия

[†] Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий,
механики и оптики,
197101 Санкт-Петербург, Россия

[‡] Peter Grünberg Institute (PGI-9), Forschungszentrum Jülich GmbH,
52425 Germany

(Получена 16 ноября 2011 г. Принята к печати 21 ноября 2011 г.)

В работе представлен удобный и оперативный метод измерения модуля Юнга полупроводниковых нанопроводов, наклонно стоящих на ростовой подложке. Метод состоит в упругом изгибе нанопровода под давлением зонда атомно-силового микроскопа с одновременной регистрацией нагрузочно-разгрузочных зависимостей возникающего изгиба балки зонда. Из этих зависимостей определяется коэффициент изгибной жесткости наклонных нанопроводов и затем с учетом их габаритов находится модуль Юнга. Применение метода показано на примере нанопроводов GaAs, наклонно растущих на подложке GaAs(111). Определение модуля Юнга с учетом реальной формы и огранки нанопроводов выполнялось по методу конечных элементов для случая упругого стационарного изгиба нанопроводов. Оказалось, что достаточно аккуратные оценки модуля Юнга могут быть получены и при использовании аппроксимации нанопроводов круглыми и цилиндрами с одинаковой площадью сечения. Для исследованных нанопроводов GaAs с кубической решеткой значение модуля Юнга оказалось в 2–3 раза меньше его величины в объемном GaAs. Найденное отличие связывается с присутствием в нанопроводах дефектов упаковки.

1. Введение

Полупроводниковые нанопровода (nanowires NWs) считаются сейчас весьма перспективными элементами для использования в качестве соединительных и активных компонент в новых электронных, оптоэлектронных и электромеханических приборных наноструктурах [1–5]. При этом существует интерес к созданию таких структур и на гибких подложках [6]. Очевидно, что полупроводниковые NWs, встраиваемые в приборные структуры, могут испытывать значительные механические напряжения. Для избежания возможных при этом разрушений NWs возникает необходимость в изучении их упругих характеристик, в частности, в определении модуля Юнга.

К сожалению, известные к настоящему времени исследования упругих свойств NWs довольно малочисленны и противоречивы. Так, например, для ZnO-NWs [7,8] и GaAs-NWs [9] наблюдалось увеличение модуля Юнга при уменьшении диаметра, для GaN-NWs, напротив наблюдалось уменьшение модуля Юнга [10], а в Ge-NWs изменения модуля Юнга с уменьшением диаметра замечено не было [11]. При этом в работах [7,8] увеличение модуля Юнга в ZnO-NWs было обнаружено при разных значениях диаметра: 150 и 30 нм соответственно. В качестве причины увеличения модуля Юнга с уменьшением диаметра для ZnO-NWs называлась повышенная жесткость поверхностного слоя, роль которого

возрастает в более тонких NWs. Наблюдаемый разброс результатов упомянутых работ говорит о том, что должны быть и другие факторы, влияющие на результаты измерений упругих характеристик NWs. Из физических причин следует, очевидно, отметить еще и различие кристаллической структуры изучавшихся NWs и степени их совершенства. При непосредственном определении модуля Юнга еще важно правильно учитывать размеры и форму NWs, а также корректно сопоставлять значения, получаемые разными методами.

Для определения модуля Юнга NWs могут применяться различные методы. В работах [7–10] осуществлялось возбуждение механических колебаний ZnO-NWs и GaN-NWs переменным электрическим полем и затем с помощью электронного микроскопа по наблюдению за амплитудой возбуждаемых колебаний устанавливалась их резонансная частота, что позволяло определять значения модуля Юнга. В работе [8] определение модуля Юнга выполнялось в эксперименте по индентации твердой пирамидки в ZnO-NWs. Для исследования упругих свойств GaAs-NWs применялось квазистатическое изгибание NWs, вертикально закрепленных на подложке, с изменением угла изгиба при наблюдении в электронном микроскопе [9]. Измерение упругих параметров NWs возможно также при их горизонтальном размещении на гладкой поверхности над специально приготовленными углублениями в поверхности. В такой геометрии зондом атомно-силового микроскопа (АСМ) осуществляется прогибание нанопровода с записью нагрузочно-разгрузочных зависимостей глубины прогибания NWs,

[†] E-mail: nproхер@gmail.com

последующий анализ которых позволяет определять модуль Юнга [12]. Известно применение этого метода при исследовании механических свойств углеродных нанотрубок [13] и металлических Au-NWs [14]. Отмеченный подход к измерению модуля Юнга требует, однако, перенесения NWs с ростовой подложки на опорную поверхность с последующим точным позиционированием и механической фиксации над заранее подготовленными углублениями. Эти процедуры довольно сложны и затрудняют применение данного метода. В последнее время появились работы по изгибанию NWs, сохраняющих контакт с ростовой подложкой, зондом АСМ с контролем позиционирования зонда и величины изгиба NWs с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) [15,16]. В работе [17] позиционирование зонда контролировалось с помощью СЭМ, но изгиб SnO_2 -NWs определялся также методом АСМ.

Настоящая работа посвящена изучению упругих свойств GaAs-NWs, получаемых методом молекулярно-пучковой эпитаксии по механизму пар-жидкость-кристалл (ПЖК) на подложке GaAs(111). Надо отметить, что GaAs-NWs являются одними из наиболее активно изучаемых сейчас полупроводниковых NWs, исследованию механических свойств которых, однако, еще не было уделено достаточного внимания. В работе в качестве метода исследования была применена процедура изгиба GaAs-NWs под давлением зонда АСМ. Проводимые исследования имели оригинальную особенность, состоящую в том, что и позиционирование зонда на нанопроводе, и последующий изгиб нанопровода контролировались только с помощью АСМ без использования СЭМ-наблюдений, что значительно упрощает и ускоряет проведение исследований.

2. Методика эксперимента

Исследовавшиеся GaAs-NWs были выращены на подложке GaAs(111), активированной каталитическими каплями Ga [18]. Обычно в качестве катализатора при получении GaAs-NWs используются капли Au. Однако есть опасения, что диффузия атомов Au в NWs может приводить к созданию центров безызлучательной рекомбинации, ухудшающих электронные характеристики NWs. При использовании в качестве катализатора Ga эта опасность устраняется. Получаемые GaAs-NWs характеризовались значениями диаметров $d = 115\text{--}180$ нм и длин L_0 в диапазоне 1.5–2 мкм. При получении GaAs-NWs на поверхности подложки GaAs(111) рост NWs в принципе может происходить вдоль всех четырех эквивалентных направлений $\langle 111 \rangle$. Одно из этих направлений перпендикулярно поверхности подложки, а три других составляют с поверхностью угол 19° при относительной ориентации в плоскости поверхности на 120° . GaAs-NWs, растущие вдоль этих направлений, оказываются сильно наклоненными к поверхности и весьма удобными для позиционирования зонда АСМ на верхнем окончании нанопровода для последующего

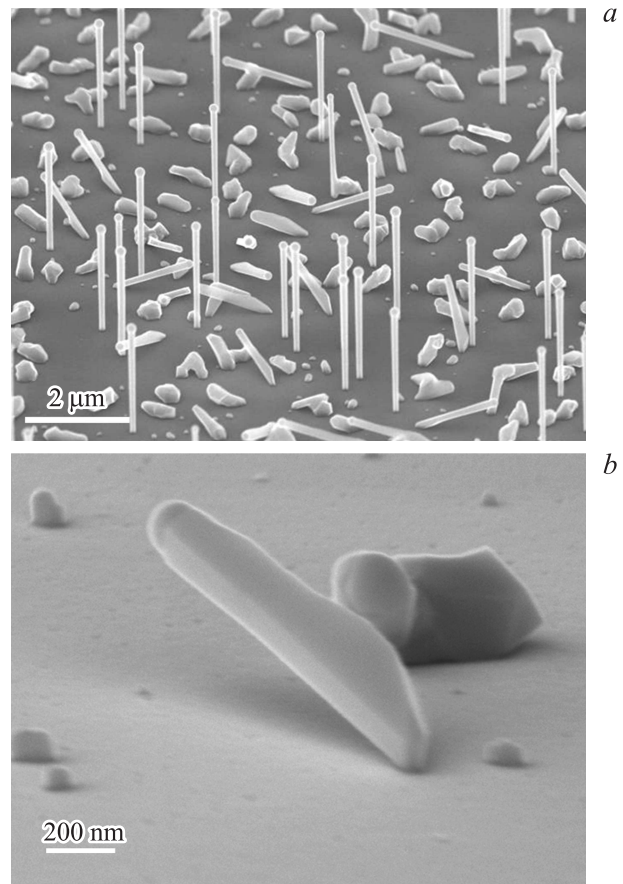


Рис. 1. СЭМ-изображения вертикальных и наклонных GaAs-NWs на подложке GaAs(111). *a, b* — разный масштаб. *b*: хорошо видны наклон, форма и габариты одного из наклонных GaAs-NWs.

осуществления изгиба. На рис. 1, *a* и *b* представлены СЭМ-изображения вертикально стоящих и наклонных GaAs-NWs. На вершинах NWs отчетливо наблюдаются каталитические шапочки Ga. Также хорошо заметна огранка поверхности GaAs-NWs плоскостями второго порядка, характерная для роста GaAs-NWs под каталитическими каплями Ga [18,19].

Исследования упругих свойств GaAs-NWs выполнялись на сканирующем зондовом микроскопе Ntegra-AURA (NT-MDT, Россия). Использовались кремниевые зонды NSG11 (NT-MDT) с коэффициентом жесткости $k_{\text{cant}} = 3\text{--}15$ Н/м и радиусом закругления кончика зонда $R_{\text{tip}} = 30$ нм. Исследования проводились при комнатной температуре.

На рис. 2 приведено топографическое АСМ-изображение изучавшихся GaAs-NWs. Можно видеть взаимную разориентацию наклонных NWs в плоскости подложки под углом, близким к 120° . Профиль вдоль одного из NWs приведен на вставке к рисунку. Из профиля легко определяется угол наклона нанопровода (NW) к поверхности подложки. Получаемый профиль одновременно позволяет точно позиционировать положение зонда АСМ на NW.

Схема эксперимента по определению модуля Юнга представлена на рис. 3, *a*. Зонд АСМ подводится к NW вдоль его продольной оси. Пирамида зонда крепится на прямоугольной балке, которая по конструкции АСМ наклонена к изучаемой поверхности под углом 20° . Близость углов наклона балки зонда и GaAs-NW фактически случайная, но оказывается, однако, физически важной, так как реализует наиболее устойчивую геометрию эксперимента, когда пирамида зонда оказывается расположенной перпендикулярно к поверхности NW. При опускании и возвратном подъеме сканера АСМ зонд приводится в контакт с NW и производится запись нагрузочно-разгрузочных кривых изгиба балки зонда. Изгиб балки зонда детектируется с помощью четырехсекционного фотодиода, в центр которого попадает отраженный от балки лазерный луч, и выражается через ток рассогласования между верхней и нижней секциями фотодиода (I).

Основная идея измерения нагрузочно-разгрузочных зависимостей заключается в возможности определения коэффициента изгибной жесткости NW (k_{NW}), связывающего величину изгиба NW с приложенной к его верхней части силой (F). Если знать эту величину

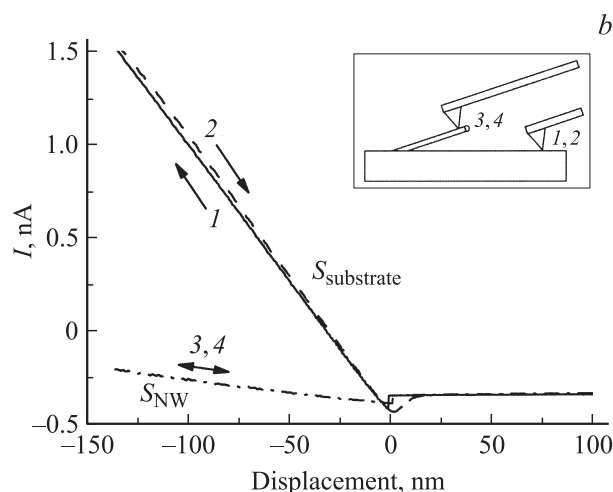
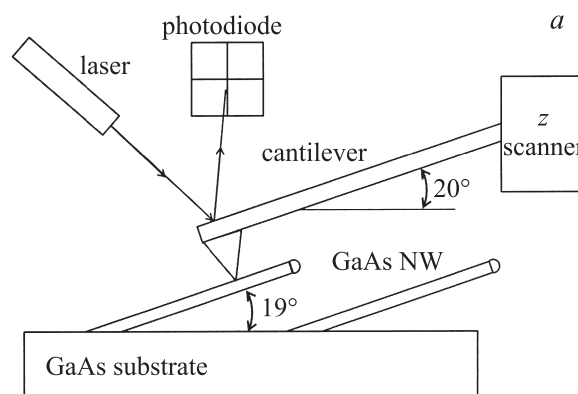


Рис. 3. Схема эксперимента (*a*) и нагрузочно-разгрузочные кривые (*b*), отражающие изгиб гибкой балки АСМ-зонда при взаимодействии с поверхностью подложки GaAs (*1, 2*) и GaAs-NWs (*3, 4*) в зависимости от величины вертикального смещения сканера (отрицательные значения — смещение вниз, положительные — вверх).

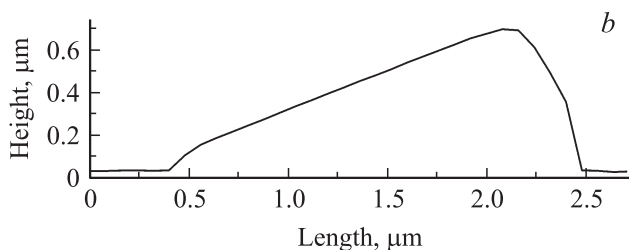
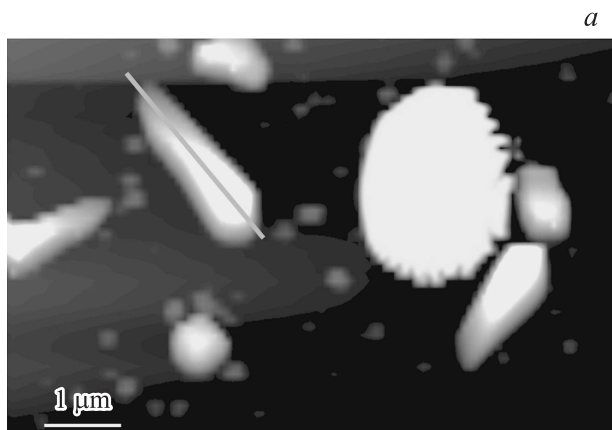


Рис. 2. *a* — топографическое АСМ-изображение вертикальных и наклонных GaAs-NWs на поверхности подложки GaAs(111); вертикальные NWs проявляются в виде округлых пятен, более широких для более высоких NWs; наклонные NWs проявляются в виде вытянутых полос с меняющимся контрастом по длине: более высокие участки выглядят светлее *b* — профиль одного из наклонных NWs, отмеченного линией на изображении. Изображение получено в полуконтактной АСМ-моду при слабом воздействии зонда АСМ на наклонные NWs ($F = 0.1$ нН), не вызывающем их изгиба.

и геометрические параметры NW (плечо приложения силы относительно точки закрепления NW L и диаметр d), можно определить модуль Юнга NW. Заметим, что при записи зависимостей верхнее окончание NW изгибалось на величину Δz до 150 нм, т.е. эксперимент осуществлялся в области малых изгибов NW ($\Delta z \ll L$). Это позволяет считать изгиб NW упругим и использовать теорию упругости для определения механических параметров.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Экспериментально измеренные нагрузочно-разгрузочные кривые изгиба балки зонда представлены на рис. 3, *b*. Зависимости приведены для двух случаев: подвода зонда к твердой поверхности подложки (*1, 2*) и верхнему окончанию существенно более мягкого NW (*3, 4*). В первом

случае при движении верхнего окончания балки зонда к образцу имеет место изгиб только балки зонда. Во втором случае под действием зонда имеет место значительный изгиб NW, и при столь же больших вертикальных перемещениях балки зонда ее изгиб оказывается существенно меньше. В результате в первом случае крутизна нагрузочно-разгрузочных кривых $S_{\text{substrate}}$ определяется величиной жесткости балки зонда k_{cant} , а во втором крутизна S_{NW} определяется уже комбинацией величин k_{cant} для балки и k_{NW} для NW. Как было показано в [20], из сопоставления зависимостей S_{NW} и $S_{\text{substrate}}$ для величины k_{NW} может быть получено следующее выражение:

$$k_{\text{NW}} = k_{\text{cant}} / [(S_{\text{substrate}} / S_{\text{NW}}) - 1]. \quad (1)$$

Значения k_{cant} коммерческих зондов обычно указываются в их описании (см. разд. 2), но довольно приблизительно. Поэтому для измерений k_{NW} значения коэффициента жесткости балки k_{cant} точно определялись для каждого используемого зонда по методу [21]. В конечном итоге для исследовавшихся NWs были определены величины k_{NW} , которые для различных диаметров и длин лежали в интервале 0.3–5 Н/м.

Стоит отметить возможность существования в выполняемых экспериментах так называемого эффекта плуга, который может оказывать влияние на точность измерений крутизны нагрузочно-разгрузочных кривых. Эффект плуга представляет собой латеральное проскальзывание пирамиды зонда по изучаемой поверхности, вызванное нарастающим изгибом балки зонда по мере увеличения силы прижима к поверхности. Проскальзывание пирамиды зонда по исследуемой поверхности изменяет место приложения силы и затрудняет в дальнейшем точный расчет модуля Юнга из-за изменения длины плеча приложения силы. Возникновение эффекта плуга проявляется в возникновении гистерезиса нагрузочно-разгрузочных кривых и вызвано силами трения между зондом и исследуемой поверхностью [22]. На рис. 3, *b* можно наблюдать вызванный эффектом плуга небольшой гистерезис кривых преимущественно в верхней части зависимостей 1 и 2 (большие изгибы балки зонда), что не сильно влияло на определение величины крутизны $S_{\text{substrate}}$. Гистерезис отсутствовал на кривых, записанных при изгибании NWs (кривые 3 и 4). Можно полагать, что отсутствие гистерезиса при нажиме на NW связано с особенностями геометрии эксперимента, так как параллельное расположение балки зонда и исследуемого нанопровода фактически минимизирует силы трения между ними.

В работе анализировались только нагрузочно-разгрузочные кривые, воспроизводимо и устойчиво получавшиеся на каждом изучавшемся NW. Верхняя поверхность NW, как правило, представляла собой плоскость, удобную для упора пирамиды зонда в середине NW. Контроль того, что нагрузочно-разгрузочные кривые записаны именно над нанопроводом, осуществлялся следующим

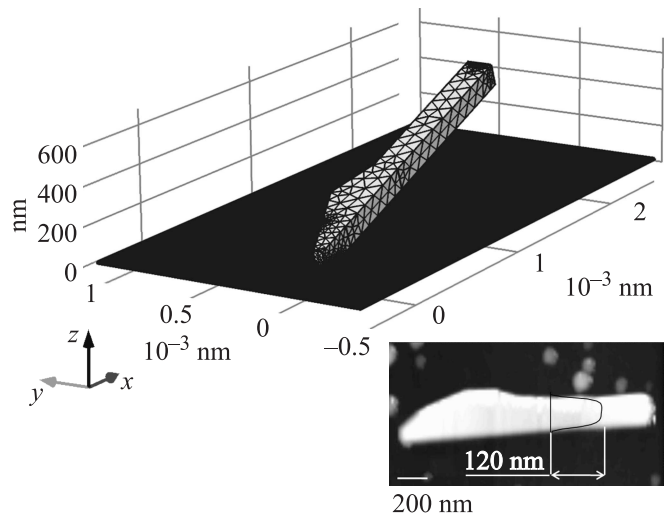


Рис. 4. Разбиение на элементы использовавшейся в расчетах геометрической модели NW, соответствующей его реальной форме. На вставке — топографическое АСМ-изображение NW, горизонтально лежащего на поверхности подложки. АСМ-изображение позволяет определить длину нанопровода 1.7 мкм, его толщину 120 нм и ширину в месте, где показан вертикальный профиль.

образом. После получения АСМ-изображения NW в выбранном по оси NW месте приложения силы записывалась серия нагрузочно-разгрузочных кривых при смещении зонда АСМ вдоль линии, перпендикулярной оси нанопровода. Соскальзывание острия пирамиды зонда с NW при смещении к его краям проявлялось в возникновении нелинейностей и гистерезиса получаемых нагрузочно-разгрузочных кривых. Для анализа из серии полученных кривых выбирались центральные, линейные и без гистерезиса, отвечающие устойчивому контакту зонда с NW.

При переходе к определению модуля Юнга E_{NW} было обращено внимание на не совсем простую форму наклонных NWs, а именно при общей вытянутости и отчетливой огранке практически все NWs имели боковой планарный нарост в первой трети длины (см. рис. 1 и вставку на рис. 4). С учетом сложной формы NWs было проведено моделирование изгиба методом конечных элементов (finite element analysis) в программном пакете COMSOL Multiphysics [23]. На основе геометрической формы и линейных размеров NWs, получаемых из АСМ-изображений, строилась геометрическая модель, максимально точно воспроизводившая изучавшийся NW (см. рис. 4). Для повышения точности модели обмер поперечных размеров образца осуществлялся по АСМ-топографиям, полученным после снятия нагрузочно-разгрузочных кривых на намеренно сломанных NWs, т. е. на NWs, лежащих на поверхности горизонтально (см. вставку на рис. 4). В модели принималась прямоугольная форма поперечного сечения NW, как это видно из СЭМ-изображения на рис. 1, *a*. Далее методом конечных

элементов решались уравнения теории упругости для случая линейного стационарного изгиба нанопровода

$$\Delta z = F/k_{NW}. \quad (2)$$

В дальнейшем проводилось моделирование, при котором варьировалось значение модуля Юнга E_{NW} и рассчитывалась величина изгиба Δz_{model} при заданной силе F . За значение модуля Юнга принималась величина параметра E_{NW} , приводившего к совпадению значения Δz_{model} , полученного при моделировании, со значением Δz из выражения (2). С помощью указанной процедуры были получены значения модуля Юнга для трех GaAs-NWs разных толщин от 130 до 160 нм. Среднее значение составило величину $E_{NW} = (42 \pm 5)$ ГПа. Малое различие значений не позволяет, по мнению авторов, обсуждать зависимость модуля Юнга от диаметра NWs.

В связи с преимущественно вытянутой формой NWs было интересно попробовать оценить модуль Юнга NW в простой модели цилиндрической балки с одним закрепленным концом, имеющей аналитическое решение [22]

$$E_{NW} = k_{NW}64L^3/3\pi d^4. \quad (3)$$

В качестве длины L в формулу (3) подставлялось расстояние от точки закрепления NW на подложке до места приложения силы к NW. За значение диаметра d принималось значение диаметра круга, имеющего площадь, равную площади сечения вытянутой части NW.

Экспериментальные данные были получены для 14 нанопроводов во всем диапазоне толщин NWs от 115 до 180 нм. Модули Юнга NWs, вычисленные по приведенной выше формуле (3), имели близкие значения и находились в диапазоне от 30 до 38 ГПа. Одновременно наблюдается и близость значений модуля Юнга NWs, полученных точным и приближенным методами. Последний результат в настоящее время еще не совсем понятен. Возможно, что утолщение NWs в нижней части не так сильно влияет на их изгиб, большая часть которого, как известно, приходится на верхнюю и среднюю части NWs. Тем не менее полученная близость результатов, как представляется, позволяет использовать модель цилиндрической балки с закрепленным одним концом для оценки модуля Юнга вытянутых NWs с близкими площадями сечений.

Полученные величины модуля Юнга для исследованных GaAs-NWs с кубической решеткой цинковой обманки оказываются в несколько раз меньше значений для объемного GaAs, а также близких к ним значений для GaAs-NWs, измеренных в работе [9]. Для объемных кристаллов GaAs с кубической решеткой, действительно, величины модуля Юнга значительно выше и в зависимости от кристаллографического направления составляют от 85 до 141 ГПа [24]. Как отмечалось во Введении, механизмы изменения модуля Юнга в NWs еще далеко не ясны. К таким изменениям может приводить, в частности, и огранка поверхности NW кристаллографическими плоскостями со специфической

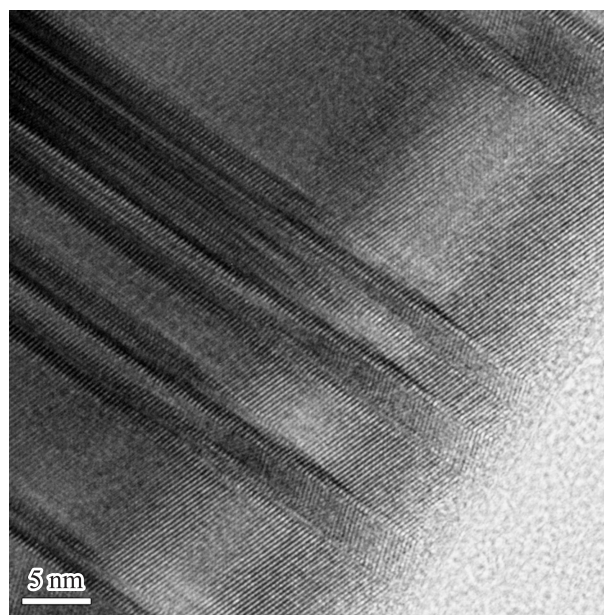


Рис. 5. Наблюдение двойниковых дефектов в GaAs-NWs методом HR-XTEM.

реконструкцией атомов в приповерхностных слоях, развитие в них дефектов, окисление. В выполненных исследованиях не наблюдалось изменения величин модуля Юнга с уменьшением поперечных размеров NW, что не позволяет объяснить полученные значения возможным влиянием поверхности. Возможно, объяснение обнаруженного уменьшения значений модуля Юнга для измерявшихся GaAs-NWs следует искать в изменении их объемных свойств, в наличии дефектов. Стоит отметить, что в работе [9] GaAs-NWs были бездефектными. В этой связи в настоящей работе были выполнены исследования кристаллической структуры изучавшихся GaAs-NWs методом высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии (HR-ТЕМ), которые выявили в средней части присутствие определенного количества дефектов упаковки и двойникового с поворотом вокруг кристаллографической оси (см. рис. 5). Однако их влияние на изменение модуля Юнга GaAs-NWs остается не установленным и требует дальнейшего исследования.

4. Заключение

В работе рассмотрен достаточно простой и оперативный метод определения модуля Юнга полупроводниковых нанопроводов, наклонно растущих на подложке, с помощью техники атомно-силовой микроскопии. Метод выделяют два достоинства: 1) возможность проведения исследований механических свойств NWs без их удаления с ростовой подложки и дальнейших сложных манипуляций по фиксации для выполнения измерений; 2) прямой доступ к исследованию индивидуальных NWs на ростовой подложке, отличающихся размера-

ми, формой и структурой. Метод удобен для сбора статистических данных по большому ансамблю NWs. С увеличением силы воздействия зонда АСМ на NWs метод может быть легко распространен на измерения предельной прочности NWs.

В работе исследовались GaAs-NWs с решеткой цинковой обманки, с поперечными размерами, изменяющимися в диапазоне 115–190 нм, имеющие огранку боковой поверхности плоскостями второго порядка. Для них было обнаружено уменьшение значений модуля Юнга в 2–3 раза по сравнению с объемными кристаллами GaAs. При этом не наблюдалось зависимости модуля Юнга от поперечных размеров NWs. В связи с этим делается предположение, что уменьшение модуля Юнга может быть связано с наблюдавшимся присутствием некоторого числа структурных дефектов в центральной части NWs. Окончательное понимание выявленных отличий значений модуля Юнга требует, однако, дальнейших исследований.

Авторы выражают благодарность И.А. Няпшаеву и А.В. Анкудинову за помощь в проведении эксперимента и полезные обсуждения.

Работа поддержана грантом РФФИ (№ 10-02-00784-а), грантом Президента для научных школ (№ НШ-3306.2010.2), а также программой фундаментальных исследований Президиума РАН „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“ (проект 27).

Список литературы

- [1] Y. Li, J. Xiang, F. Quang, S. Gradecak, Y. Wu, H. Yan, D.A. Blom, C.M. Lieber. *Nano Lett.*, **6**, 1468 (2006).
- [2] M.T. Bjork, B.J. Ohlsson, T. Sass, A.I. Persson, C. Thelander, M.H. Magnusson, K. Deppert, L.R. Wallenberg, L. Samuelson. *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 1058 (2002).
- [3] R.B. Markus, T.S. Ravi, T. Gimmer, K. Chin, D. Liu, W.J. Orvis, D.R. Ciarlo, C.E. Hunt, J. Trujillo. *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 236 (1990).
- [4] C.M. Lieber. *Nature Biotechnology*, **23**, 1294 (2005).
- [5] J.J. Chao, S.C. Shiu, S.C. Hung, C.F. Lin. *Nanotechnology*, **21**, 285 203 (2010).
- [6] Y. Sun, J.A. Rogers. *Nano Lett.*, **4**, 1953 (2004).
- [7] C.Q. Chen, Y. Shi, Y.S. Zhang, J. Zhu, Y.J. Yan. *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 075 505 (2006).
- [8] G. Stan, C.V. Ciobanu, P.M. Parthangal, R.F. Cook. *Nano Lett.*, **7**, 3691 (2007).
- [9] Yan-Bo Wang, Li-Feng Wang, Hannah J. Joyce, Qiang Gao, Xiao-Zhou Liao. *Adv. Mater.*, **23**, 1356 (2011).
- [10] C.-Y. Nam, P. Jaroenapibal, D. Tham, D.E. Luzzi, St. Evoy, J. Fisher. *Nano Lett.*, **6**, 153 (2006).
- [11] L.T. Ngo, D. Almecija, J.E. Sader, B. Daly, N. Petkov, J.D. Holmes, D. Erts, J. Boland. *Nano Lett.*, **6**, 2964 (2006).
- [12] J.-P. Salvetat, A. Briggs, L.-M. Bonard, R. Basca, A. Kulik, Th. Stockli, N.A. Burnham, L. Forro. *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 944 (1999).
- [13] E.D. Minot, Yu. Yaish, V. Sazonova, M. Brink, P.L. McEuen. *Phys. Rev. Lett.*, **90**, 156 401 (2003).
- [14] B. Wu, A. Heidelberg, J.J. Boland. *Nat. Mater.*, **4**, 525 (2005).
- [15] S. Hoffmann, I. Utke, B. Moser, J. Michler, S.H. Christiansen, V. Schmidt, St. Senz, P. Werner, U. Gosele, Ch. Ballif. *Nano Lett.*, **6**, 622 (2006).
- [16] S. Hoffmann, F. Ostlund, J. Michler, H.J. Fan, M. Zacharias, S.H. Christiansen, C. Ballif. *Nanotechnology*, **18**, 205 503 (2007).
- [17] S. Barth, C. Harnagea, S. Mathur, F. Rossei. *Nanotechnology*, **20**, 115 705 (2009).
- [18] M. Lepsa, Th. Schaeppers, D. Gruetzmacher. *Proc. 38th Int. Symp. Comp. Semicond* (2011) p. 119.
- [19] St. Breuer, L.-F. Feiner, L. Geelhaar, H. Riechert. *Book Int. Symp. Nanowire Fabrication*. (2011) p. 12.
- [20] P.J. Cumpson, J. Hedley, P. Zhdan. *Nanotechnology*, **14**, 918 (2003).
- [21] J.E. Sader, J.W.M. Chon, P. Mulvaney. *Rev. Sci. Instr.*, **70**, 3967 (1999).
- [22] D. Sarid. *Scanning Force Microscopy* (Oxford University Press, 1991).
- [23] <http://www.comsol.com/>
- [24] W.A. Brantley. *J. Appl. Phys.*, **44** (1), 534 (1973).

Редактор Л.В. Шаронова

Determination of Young's modulus of GaAs nanowires growing obliquely on the substrate

P.A. Alekseev^{+,*}, M.S. Dunaevskii^{+,†}, A.V. Stovpyaga[†], M. Lepsa[‡], A.N. Titkov^{*}

⁺ Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

^{*} St. Petersburg State Electrotechnical University „LETI“, 197376 St. Petersburg, Russia

[†] National Research University ITMO, 197101 St. Petersburg, Russia

[‡] Peter Grüngerg Institute (PGI-9), Forschungszentrum Jülich GmbH, 52425 Germany

Abstract In this paper, there is presented a comfortable and reliable method for measuring the Young's modulus of semiconductor nanowires obliquely standing on the growth substrate. The method consists of elastic nanowire bending under pressure of atomic force microscope probe with simultaneous registration of load–unload cantilever bending curves. From these curves, taking into account the dimensions of nanowires, there were determined bending stiffness of inclined nanowires and then the Young's modulus. Application of the method was demonstrated for GaAs nanowires, obliquely grown on a GaAs(111) substrate. Taking into account the nanowires actual shape, the Young's modulus was determined by the method of finite elements for the case of stationary elastic bending of a nanowire. It is found that rather accurate estimations of Young's modulus can be obtained at approximations of nanowires as circular cylinders with the same cross-section area. The found Young's modulus values for the studied GaAs nanowires with the cubic lattice were 2–3 times less than the known value for bulk GaAs. The found difference was considered to be related with the presence of stacking faults in the middle part of GaAs nanowires.