

УДК 53.08, 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ ПОДВЕШЕННЫХ ПРОВОДЯЩИХ НАНОСТРУКТУР GaAs/AlGaAs С ПОМОЩЬЮ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ*

Е. Ю. Жданов^{1,2}, А. Г. Погосов^{1,2}, Д. А. Похабов^{1,2}, М. В. Буданцев¹,
А. С. Кожухов¹, А. К. Бакаров¹

¹Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

²Новосибирский государственный университет,

630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

E-mail: zhdanov@isp.nsc.ru

Демонстрируется применимость атомно-силовой микроскопии к исследованию упругих свойств подвешенных полупроводниковых структур на основе относительно толстых мембран GaAs/AlGaAs в условиях, когда исследуемая жёсткость существенно превышает жёсткость кантилевера атомно-силового микроскопа, что подтверждается соответствием экспериментально определённых значений как относительной, так и абсолютной жёсткости, измеренной в разных точках структуры, теоретическим значениям.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, наноэлектромеханические системы, подвешенные наноструктуры, GaAs/AlGaAs.

DOI: 10.15372/AUT20180511

Введение. Проводящие полупроводниковые мембраны интересны с точки зрения создания на их основе подвешенных полупроводниковых наноструктур с двумерным электронным газом (ДЭГ). Обычно наноструктуры с ДЭГ изготавливаются вмурованными в массив полупроводника и в таком качестве изучаются уже достаточно давно [1]. Основные исследуемые явления включают квантовую интерференцию, баллистические эффекты, электрон-электронное взаимодействие и др. В наноструктурированном ДЭГ они проявляются в электронном транспорте в виде особенностей мезоскопических флуктуаций кондактанса [2] и термоЭДС [3], необычном поведении квантового эффекта Холла [4, 5], а также фазового времени релаксации [6]. Технология селективного травления жертвенного слоя позволяет создавать тонкие подвешенные (оторванные от подложки) полупроводниковые мембраны, на основе которых можно изготавливать микро- и наноэлектромеханические системы (НЭМС). Интерес к таким структурам обусловлен преимущественно дополнительными механическими степенями свободы [7–12], усиленным электрон-электронным взаимодействием [13–16], особенностями явлений теплопереноса, вызванными ослабленным теплоотводом непосредственно через подложку [17, 18], а также взаимным влиянием электрических и механических степеней свободы [19, 20]. В этой связи изучение упругих свойств подвешенных микро- и наноструктур приобретает особую актуальность.

Механические свойства НЭМС, такие как жёсткость, собственные частоты и добротность, определяемые размерами, геометрией, характеристиками материалов, а также качеством изготовления структур, не всегда могут быть точно рассчитаны теоретичес-

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-02-0059: измерения методом атомно-силовой микроскопии), Российского научного фонда (грант № 18-72-10058: создание образцов) и Федерального агентства научных организаций (государственная регистрация № АААА-А17-117042110146-0: теоретические расчёты).

ки. Расчёты должны учитывать множество факторов, например наличие нежелательных твёрдых продуктов травления, формирующихся на нижней части подвешенной мембраны во время удаления жертвенного слоя и приводящих к дополнительным механическим напряжениям в НЭМС [21]. Данные факторы сложно предсказать, однако они могут существенно влиять на жёсткость, собственные частоты и добротность наноэлектромеханических резонаторов.

Атомно-силовая микроскопия широко используется для исследования различных наноструктур [22]. Надавливание кантилевером атомно-силового микроскопа (АСМ) — простая и эффективная методика для извлечения упругих свойств, таких как коэффициент жёсткости и прочность на разрыв подвешенных микро- и наномеханических мембран из измерений зависимостей силы от смещения кантилевера АСМ. Эта методика успешно используется для изучения механических свойств двумерных материалов, например графена [23, 24] и MoS_2 [25], осаждённых на предварительно подготовленную подложку SiO_2 . Данная методика также применялась для исследования упругих свойств подвешенных металлических кантилеверов толщиной 50 нм [26]. Возможность изучения механических свойств таких материалов с помощью АСМ обусловлена их относительно малой жёсткостью k , сравнимой с жёсткостью кантилевера АСМ k_c . Однако несмотря на значительный прогресс в разработке НЭМС данная методика не использовалась для изучения механических свойств НЭМС на основе кремния или арсенида галлия. Поскольку жёсткость масштабируется с толщиной h мембраны как h^3 [27], эта методика подходит только для тонких мембран, когда $k \ll k_c$, и, очевидно, не подходит для очень толстых мембран, когда $k \gg k_c$. Особенность проводящих полупроводниковых мембран с ДЭГ состоит в том, что их нельзя сделать очень тонкими из-за эффектов обеднения, связанных с приближением поверхности к ДЭГ. Кроме того, утоньшение мембраны, а значит, и спейсерного слоя приведёт к нежелательному уменьшению подвижности электронов. Поэтому применимость данной методики к относительно толстым мембранам ($k \gtrsim k_c$), содержащим ДЭГ, требует отдельной экспериментальной проверки.

В предлагаемой работе продемонстрирована возможность применения методики надавливания кантилевером АСМ для определения упругих свойств достаточно толстых (160 нм) мембран $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ с ДЭГ в случае, когда коэффициент жёсткости структуры значительно превосходит коэффициент жёсткости кантилевера АСМ.

Образцы. Методика измерений. Экспериментальные образцы изготавливались на основе гетероструктур $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ с ДЭГ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Двумерный электронный газ характеризуется высокой подвижностью электронов $\mu = 2 \cdot 10^6 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при концентрации $n = 7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Гетероструктуры толщиной $h = 160 \text{ нм}$ выращивались поверх жертвенного слоя $\text{Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$ толщиной 400 нм. Образцы в форме крестов создавались с помощью оптической литографии. Затем путём изотропного селективного травления в 2 %-ном водном растворе плавиковой кислоты из-под них удалялся жертвенный слой. Время травления подбиралось таким образом, чтобы почти весь крест, кроме небольшого участка под его центром, оказывался подвешенным над подложкой. Центральная часть креста оставалась неподвешенной. Подобные образцы (только с полностью подвешенными крестами) использовались для изучения электронного транспорта, в частности, квантового эффекта Холла в подвешенных образцах [17]. В работе приводятся данные для креста, схематическое изображение которого с указанием размеров показано на вставке рис. 1. Также на рисунке приведено изображение подвешенного креста, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа при падении электронного пучка под углом 60° относительно нормали к поверхности образца. Литографические размеры уточнялись измерениями, сделанными с помощью атомно-силового микроскопа Ntegra Aura фирмы NT-MDT в полуконтактном режиме. Исследование жёсткости

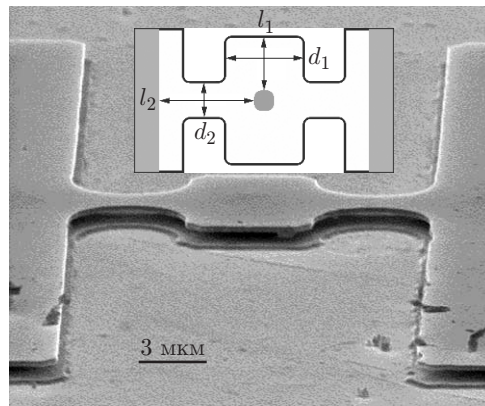


Рис. 1. Изображение подвешенного образца, полученное с помощью метода сканирующей электронной микроскопии. На вставке схематически показана геометрия образца ($d_1 = 6$ мкм, $l_1 = 4$ мкм, $d_2 = 3$ мкм, $l_2 = 6$ мкм); серым цветом выделены неподвешенные области мембраны

полученных структур производилось в контактном режиме. В экспериментах использовались кремниевые кантилеверы NSG01. Точность калибровки кантилевера, обусловленная разной локальной жёсткостью калибровочной кремниевой поверхности, не превышала 10 %.

Кантилевером производилось нажатие на структуру в различных точках (отмечены на вставке на рис. 2), одна из которых (точка O) соответствует малой ($0,4 \times 0,4$ мкм) неподвешенной центральной области креста. При нажатии лазерный луч, отражённый от кантилевера, отклонялся. По отклонению лазерного луча определялась в относительных единицах сила F , действующая на кантилевер. На рисунке приведена типичная зависимость силы F от величины смещения кантилевера в одной из точек. Из графика видно, что сначала при подводе кантилевера ($x > 100$ нм) сила на него не действует, потом кантилевер АСМ касается поверхности образца ($z \approx 100$ нм), а затем ($x < 100$ нм) сила линейно растёт со смещением кантилевера. Производная силы на линейном участке

$$\kappa = |\partial F / \partial x|$$

пропорциональна жёсткости системы $\alpha\kappa$, где α — коэффициент пропорциональности, воз-

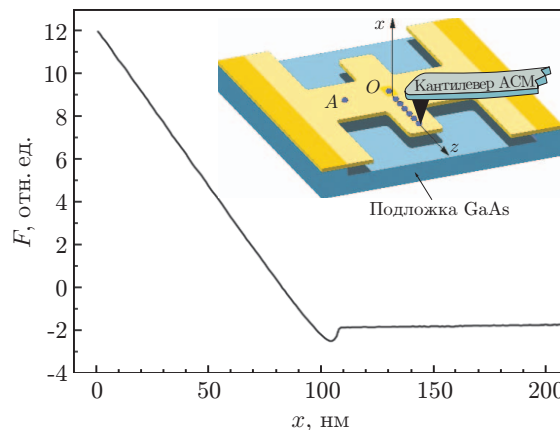


Рис. 2. Зависимость силы, действующей на кантилевер АСМ, от величины его смещения при подводе к образцу. На вставке точками обозначены места, в которых производилось надавливание

никающий из-за того, что сила F , а с ней и κ измеряются в относительных единицах. Измеряемая жёсткость $\alpha\kappa$ определяется жёсткостью структуры k и соединённой последовательно жёсткостью кантилевера k_c , которой, как отмечалось выше, в нашем случае пренебречь нельзя:

$$1/\alpha\kappa = 1/k + 1/k_c.$$

В частности, при нажатии на неподвешенную часть структуры в точке O , где её жёсткость можно считать бесконечной,

$$1/\alpha\kappa_O = 1/k_c.$$

Из двух предыдущих уравнений получим выражение для относительной жёсткости:

$$\xi = k/k_c = \kappa/(\kappa_O - \kappa).$$

Таким образом, экспериментально определялась относительная жёсткость структуры как отношение жёсткости балки к жёсткости кантилевера.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Относительная жёсткость структуры $\xi(z) = k(z)/k_c$, измеренная в различных точках, лежащих на оси Z , проходящей через центр одного из лучей креста с незакреплённым концом (см. вставку на рис. 2), представлена на рис. 3. Из графика видно, что зависимость монотонно убывает по мере удаления от закреплённого края образца. Для сравнения измеренной зависимости $\xi(z)$ с теорией будем приближённо рассматривать эту сторону креста как тонкий стержень длиной $l_1 = 4$ мкм и шириной $d_1 = 6$ мкм (см. вставку на рис. 1) с одним закреплённым и одним свободным концами. В этом приближении ξ должно зависеть от z следующим образом [26]:

$$\xi(z) = \frac{k(z)}{k_c} = \frac{Ed_1h^3}{2k_c} \frac{1}{z^2(3l_1 - z)}, \quad (1)$$

где E — модуль Юнга. Соответствующая теоретическая зависимость с постоянным множителем $Ed_1h^3/(2k_c) = 330$ мкм³ как подгоночным параметром показана сплошной кривой на рис. 3. Из рисунка видно, что экспериментальная зависимость (квадраты) хорошо согласуется с теорией. Следует отметить, что, если рассматривать вместо модели тонкого

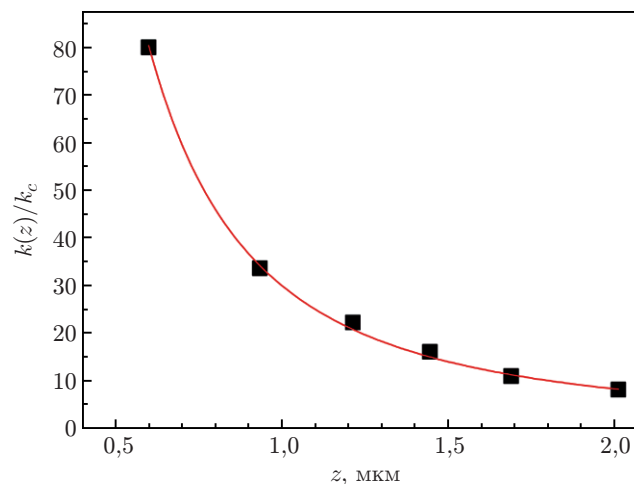


Рис. 3. Относительная жёсткость балки с одним закреплённым концом как функция расстояния от закреплённого края

стержня модель тонкой пластины, в коэффициенте жёсткости возникнет поправочный множитель, лежащий в диапазоне от 1 до $1/(1-\sigma^2)$, где σ — коэффициент Пуассона (для GaAs $\sigma = 0,31$ [28]). Отбрасывание этого множителя приведёт к погрешности, не превышающей 10 %.

В эксперименте также измерялась относительная жёсткость структуры в точке А (см. вставку на рис. 2), т. е. в центре луча креста с двумя закреплёнными концами длиной $l_2 = 6$ мкм и шириной $d_2 = 3$ мкм (см. вставку на рис. 1), $\xi_A = k_A/k_c$. В приближении тонкого стержня с двумя закреплёнными концами относительная жёсткость [26]

$$\xi_A = \frac{k_A}{k_c} = \frac{2Ed_2h^3}{k_c(l_2/2)^3}. \quad (2)$$

Из равенств (1) и (2) следует, что отношение относительных жёсткостей балок с двумя и одним заделанными краями определяется следующим образом:

$$\frac{\xi_A}{\xi(z)} = \frac{k_A}{k(z)} = \frac{32d_2z^2(3l_1 - z)}{d_1l_2^3}.$$

Для $z = z_0 = 2$ мкм теоретическая оценка $\xi_A/\xi(z_0) \approx 2,96$. При этом экспериментально полученное значение $\xi_A/\xi(z_0) \approx 2,89$ соответствует теории, что подтверждает корректность проведённых измерений относительных жёсткостей структуры в различных точках. Для извлечения же абсолютных значений жёсткость кантилевера $k_c = 5$ Н/м была определена методом, использующим спектр тепловых шумов [29], и оказалась близка к среднему значению жёсткости для кантилеверов такого типа ($\langle k_c \rangle = 5,1$ Н/м), заявленному производителем. Если подставить данное значение, то для абсолютных значений жёсткостей балок с одним и двумя заделанными краями получим $k(z_0) = \xi(z_0)k_c = 40$ Н/м, $k_A = \xi_A k_c = 116$ Н/м.

Используя в (1) и (2) модуль Юнга $E = 121$ ГПа для $Al_{0,33}Ga_{0,67}As$ в направлении [110] [28], найдём теоретические значения этих величин: $k(z_0) = 37$ Н/м, $k_A = 110$ Н/м, которые, как видно, согласуются с экспериментальными значениями (с погрешностью, не превышающей 20 %). Небольшое отличие данных значений от экспериментальных может быть обусловлено отличием геометрии реальных наноструктур от используемой в расчёте.

Заключение. Методика надавливания кантилевером АСМ адаптирована для измерения относительных и абсолютных жёсткостей подвешенных наноструктур, изготовленных из толстых проводящих мембран. Результаты экспериментального исследования хорошо согласуются с теоретическими расчётами, что подтверждает возможность применения данной методики в случае, когда жёсткость структур превышает жёсткость кантилевера АСМ. Этот случай особенно важен для исследования подвешенных наноструктур с ДЭГ, толщина которых не может быть уменьшена без нежелательного существенного снижения подвижности и концентрации электронов.

Авторы выражают благодарность канд. физ.-мат. наук А. А. Шевырину за обсуждение результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Beenakker C. W. J., van Houten H.** Quantum transport in semiconductor nanostructures // Solid State Phys. 1991. **44**, N 1. P. 1–228.
2. **Gusev G. M., Kvon Z. D., Lubyshev D. I. et al.** Quantum transport in δ -doped GaAs layers // Sov. Phys. Semicond. 1991. **25**, N 4. P. 364–367.

3. **Budantsev M. V., Kvon Z. D., Pogosov A. G. et al.** Mesoscopic conductance fluctuations in an electron billiard // JETP Lett. 1994. **59**, N 9. P. 645–650.
4. **Budantsev M. V., Pogosov A. G., Plotnikov A. E. et al.** Giant hysteresis of magnetoresistance in the quantum hall effect regime // JETP Lett. 2007. **86**, N 4. P. 264–267.
5. **Budantsev M. V., Pokhabov D. A., Pogosov A. G. et al.** Hysteretic phenomena in a 2DEG in the quantum Hall effect regime, studied in a transport experiment // Semiconductors. 2014. **48**, N 11. P. 1423–1431.
6. **Gusev G. M., Kvon Z. D., Pogosov A. G.** Thermoelectric effects in mesoscopic conductor // JETP Lett. 1990. **51**, N 3. P. 171–174.
7. **Ekinci K. L., Roukes M. L.** Nanoelectromechanical systems // Rev. Sci. Instrum. 2005. **76**, Is. 6. 061101.
8. **Cleland A. N., Aldridge J. S., Driscoll D. C., Gossard A. C.** Nanomechanical displacement sensing using a quantum point contact // Appl. Phys. Lett. 2002. **81**, Is. 9. P. 1699–1701.
9. **Shevyrin A. A., Pogosov A. G., Bakarov A. K., Shklyayev A. A.** Piezoelectric electro-mechanical coupling in nanomechanical resonators with a two-dimensional electron gas // Phys. Rev. Lett. 2016. **117**, N 1. 017702.
10. **Shevyrin A. A., Pogosov A. G., Budantsev M. V. et al.** Actuation and transduction of resonant vibrations in GaAs/AlGaAs-based nanoelectromechanical systems containing two-dimensional electron gas // Appl. Phys. Lett. 2015. **106**, Is. 18. 183110.
11. **Shevyrin A. A., Pogosov A. G., Budantsev M. V. et al.** High-amplitude dynamics of nanoelectromechanical systems fabricated on the basis of GaAs/AlGaAs heterostructures // Appl. Phys. Lett. 2013. **103**, Is. 13. 131905.
12. **Steele G. A., Hüttel A. K., Witkamp B. et al.** Strong coupling between single-electron tunneling and nanomechanical motion // Science. 2009. **325**, Is. 5944. P. 1103–1107.
13. **Shevyrin A. A., Pogosov A. G., Budantsev M. V. et al.** The features of ballistic electron transport in a suspended quantum point contact // Appl. Phys. Lett. 2014. **104**, Is. 20. 203102.
14. **Zhdanov E. Yu., Pogosov A. G., Budantsev M. V. et al.** Ballistic magnetotransport in a suspended two-dimensional electron gas with periodic antidot lattices // Semiconductors. 2017. **51**, N 1. P. 8–13.
15. **Pogosov A. G., Budantsev M. V., Shevyrin A. A. et al.** Blockade of tunneling in a suspended single-electron transistor // JETP Lett. 2008. **87**, N 3. P. 150–153.
16. **Pokhabov D. A., Pogosov A. G., Zhdanov E. Yu. et al.** Lateral-electric-field-induced spin polarization in a suspended GaAs quantum point contact // Appl. Phys. Lett. 2018. **112**, Is. 8. 082102.
17. **Pogosov A. G., Budantsev M. V., Zhdanov E. Yu. et al.** Electron transport in suspended semiconductor structures with two-dimensional electron gas // Appl. Phys. Lett. 2012. **100**, Is. 18. 181902.
18. **Zhdanov E. Yu., Pogosov A. G., Budantsev M. V., Pokhabov D. A.** Ballistic electron transport in structured suspended semiconductor membranes // AIP Conf. Proc. 2013. **1566**, N 1. P. 211–212.
19. **Okazaki Y., Mahboob I., Onomitsu K. et al.** Gate-controlled electromechanical backaction induced by a quantum dot // Nature Commun. 2016. **7**. 11132.
20. **Yamaguchi H., Okamoto H., Ishihara S., Hirayama Y.** Motion detection of a micro-mechanical cantilever through magneto-piezovoltage in two-dimensional electron systems // Appl. Phys. Lett. 2012. **100**, Is. 1. 012106.
21. **Shevyrin A. A., Pogosov A. G., Budantsev M. V. et al.** The role of Euler buckling instability in the fabrication of nanoelectromechanical systems on the basis of GaAs/AlGaAs heterostructures // Appl. Phys. Lett. 2012. **101**, Is. 24. 241916.

22. **Деребезов И. А., Гайслер А. В., Гайслер В. А. и др.** Спектроскопия одиночных квантовых точек AlInAs // Автометрия. 2018. **54**, № 2. С. 70–77.
23. **Annamalai M., Mathew S., Jamali M. et al.** Elastic and nonlinear response of nanomechanical graphene devices // Journ. Micromech. Microeng. 2012. **22**, N 10. 105024.
24. **Lee C., Wei X., Kysar J. W., Hone J.** Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene // Science. 2008. **321**, Is. 5887. P. 385–388.
25. **Bertolazzi S., Brivio J., Kis A.** Stretching and breaking of ultrathin MoS₂ // ACS Nano. 2011. **5**, N 12. P. 9703–9709.
26. **Ryan P. J., Adams G. G., McGruer N. E., Muftu S.** Contact scanning mode AFM for nanomechanical testing of free-standing structures // Journ. Micromech. Microeng. 2006. **16**. P. 1040–1046.
27. **Landau L. D., Lifshitz E. M.** Theory of Elasticity. Oxford: Pergamon Press, 1970. Vol. 7. 166 p.
28. **Adachi S.** GaAs, AlAs, and Al_xGa_{1-x}As: Material parameters for use in research and device applications // Journ. Appl. Phys. 1985. **58**, N 3. P. 1–29.
29. **Hutter J. L., Bechhoefer J.** Calibration of atomic-force microscope tips // Rev. Sci. Instrum. 1993. **64**, Is. 7. P. 1868–1873.

Поступила в редакцию 18 декабря 2017 г.
