

06

Накопление заряда на поверхности GaAs нанопроводов вблизи контакта Шоттки

© М.С. Дунаевский, П.А. Алексеев, М.И. Lepsa, D. Gruetzmacher, А.Н. Титков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Россия
Peter Grünberg Institute (PRI-9), Forschungszentrum Jülich GmbH, 52425, Jülich and Jülich Aachen Research Alliance for Fundamentals of Future Information Technology (JARA-FIT), Germany
E-mail: Mike.Dunaeffsky@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 7 октября 2012 г.

Методом градиентной кельвин-зонд-микроскопии исследовалось распределение внешнего потенциала вдоль GaAs-нанопроводов со сформированными на концах электрическими контактами. Обнаружено, что в случае формирования контакта Шоттки приложение внешнего запирающего напряжения вызывает накопление вблизи контакта зарядов в поверхностном слое естественного окисла. Накопление зарядов существенно изменяет распределение потенциала вдоль GaAs-нанопровода. Накопление заряда и его диссипация после снятия напряжения происходят с характерными временами в несколько минут.

В последнее десятилетие активно исследуются физические свойства полупроводниковых нанопроводов ЛОК (НП, в англоязычной литературе NW — nanowire) [1,2]. Полупроводниковые НП имеют форму стержней с диаметрами в несколько десятков нанометров и длиной до нескольких микрон. В настоящее время активно ведутся работы по созданию на основе НП новых конструкций полупроводниковых приборов, как, например, перспективных транзисторных устройств [3], электронных эмиттеров [4], химико-биологических сенсоров [5] и др. Особую важность для практических применений представляют те свойства и процессы в НП, которые могут влиять на распределение напряжений и токов в создаваемых структурах. Важной особенностью НП является резкое возрастание роли поверхности на фоне уменьшения их объема. Поэтому в НП могут возникать необычные

эффекты, которые не наблюдаются в объемных полупроводниковых приборах. Можно предположить, что в случае скопления зарядов на поверхностных состояниях НП вызванные ими электрические поля смогут существенным образом менять распределение встроенных в НП и приложенных извне полей. Этот эффект был обнаружен в данной работе.

В работе исследовалось распределение внешнего потенциала вдоль GaAs-НП, расположенных горизонтально на диэлектрической подложке (слой термического SiO₂ толщиной 50 nm на полуизолирующем кремнии), с подведенными к их окончаниям металлическими контактами. Контакты формировались последовательным напылением слоев Pt, Ti, Pt и Au с толщинами соответственно 5, 10, 10 и 160 nm. GaAs-НП легировались бериллием (Be), который в GaAs дает дырочный тип проводимости. В ходе эксперимента к сформированным металлическим контактам прикладывалось внешнее смещение $\Delta U_{ext} = 1$ V и затем методом градиентной кельвин-зонд-микроскопии (ГКЗМ) [6] проводилась серия измерений с задержками во времени распределений потенциала $\Delta\phi_1(x)$ вдоль смещенного НП. Затем внешнее напряжение снималось ($\Delta U_{ext} = 0$ V) и вновь проводилась серия измерений распределений потенциала $\Delta\phi_0(x)$ вдоль заземленных с обоих концов НП. Выбор метода ГКЗМ был обусловлен тем, что такая модификация стандартного метода кельвин-зонд-микроскопии обладает повышенным пространственным разрешением [7] и позволяет прецизионно измерять распределение потенциала на структурах с характерными линейными размерами элементов субмикронного и нанодиапазонов [8]. Исследования проводились в условиях среднего вакуума ($p_{res} = 10^{-6}$ bar), чтобы исключить токовые утечки по слою водного адсорбата, обычно присутствующего на поверхности структуры в атмосферных условиях [7].

На рис. 1 приведена схема ГКЗМ-эксперимента (рис. 1, *a*) на горизонтально расположенном GaAs-НП с двумя металлическими контактами. На рис. 1, *b* приведено ГКЗМ-изображение распределения внешнего напряжения $\Delta U_{ext} = 1$ V, приложенного к металлическим контактам. На изображении можно видеть, что приложенное напряжение падает в основном вдоль GaAs-НП.

Детали распределений напряжения лучше видны на рис. 2, где приведена характерная для исследовавшихся GaAs-НП серия изменяющихся во времени профилей падения напряжения при приложении внешнего смещения $\Delta U_{ext} = 1$ V. Характер профилей падения напряжения указывает на наличие барьера Шоттки в контакте GaAs-НП–металл. При

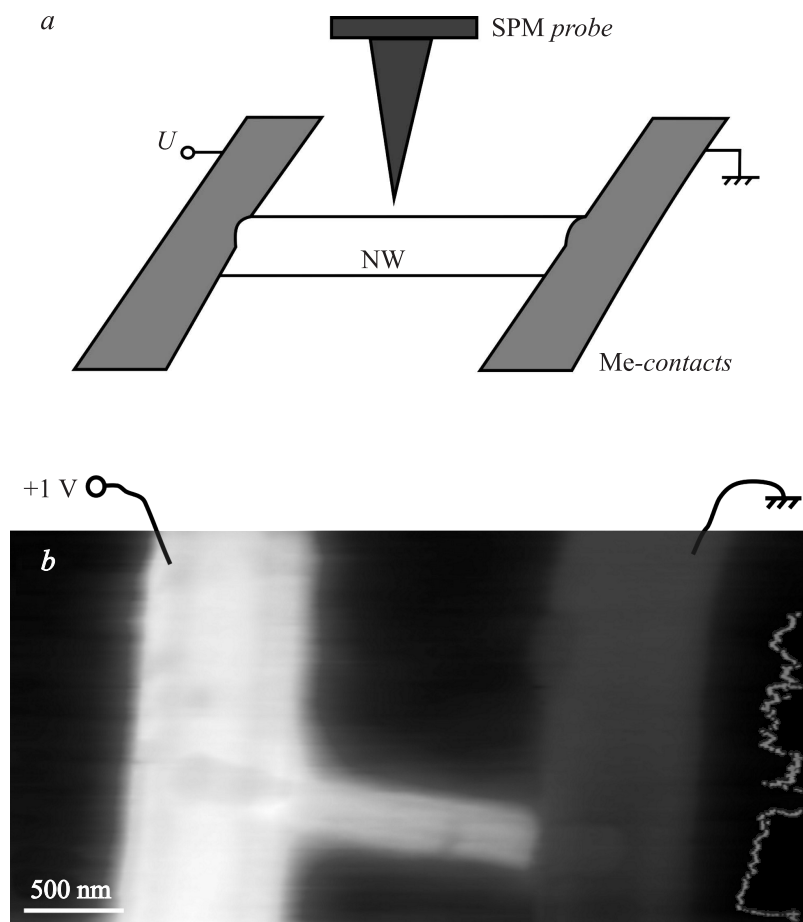


Рис. 1. *a* — схема ГКЗМ-эксперимента, *b* — ГКЗМ-изображение распределения напряжения, приложенного к контактам GaAs-НП.

смене знака подаваемого внешнего смещения картина наблюдаемых методом ГКЗМ профилей зеркально менялась. Фактически при разных знаках смещения GaAs-НП образовывали два встречных барьера Шоттки на левом и правом контактах, и при любой полярности

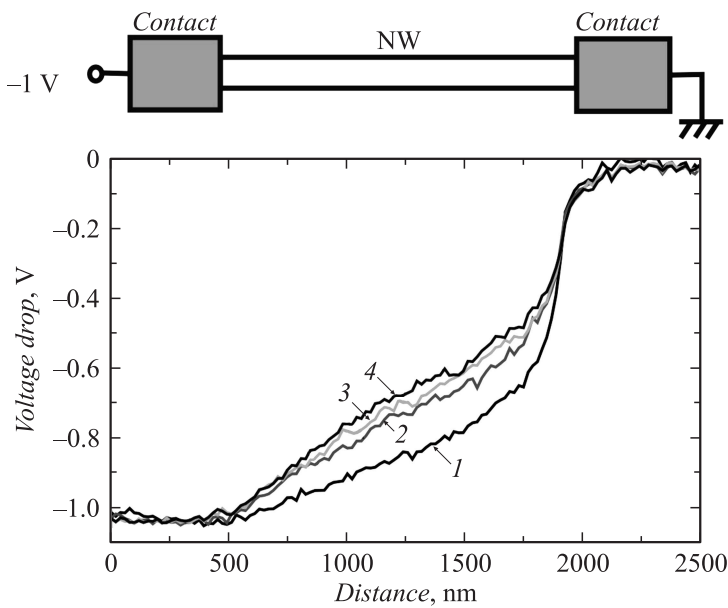


Рис. 2. Профили (1–4) распределений приложенного напряжения вдоль GaAs-НП, полученные сразу после приложения напряжения (профиль 1) и с временным шагом в 2 min при получении последующих профилей.

прикладываемого напряжения один из барьеров был открыт, а второй закрыт. На рис. 2 правый барьер Шоттки закрыт и на нем падает основная часть прикладываемого напряжения. Полярности запиорных напряжений подтверждают *p*-тип легирования GaAs-НП.

В случае приложения внешнего смещения (в обеих полярностях) наблюдалось изменение во времени регистрируемого профиля приложенного напряжения. Временной шаг между измерениями составлял 2 min. В обоих случаях наблюдается увеличение со временем регистрируемого напряжения по направлению к контакту Шоттки, находящемуся в закрытом состоянии. Эти изменения происходят на шкале времен в несколько минут и затем насыщаются.

На рис. 3, а приведена серия профилей потенциала вдоль заземленного ($\Delta U_{ext} = 0$ V) GaAs-НП, измеренная непосредственно после снятия внешнего смещения ($\Delta U_{ext} = 1$ V) с левого контакта. Временной шаг

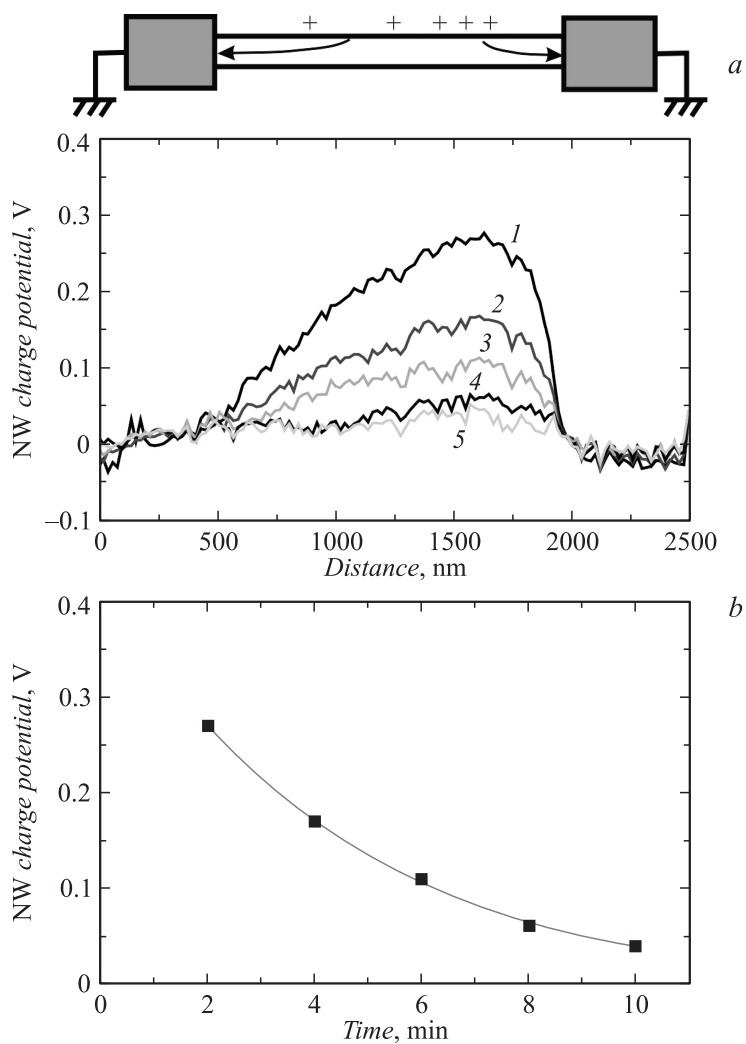


Рис. 3. *a* — спадание во времени профилей наведенного потенциала на поверхности GaAs-НП после снятия ранее приложенного напряжения: профили 1–5 регистрировались последовательно через 2 min; *b* — изменение во времени наведенного потенциала в области максимума его распределения.

между измерениями составлял 2 min. На первом же полученном профиле виден отличный от нуля остаточный положительный потенциал $\Delta\varphi_0(x, t) > 0$, который прямо указывает на накопление положительного заряда вблизи контакта Шоттки при приложении запорного смещения. С течением времени остаточный поверхностный заряд стекает и величина измеряемого потенциала $\Delta\varphi_0(x, t)$ уменьшается и выравнивается по всей длине нанопровода, возвращаясь к исходному до приложения смещения уровню. На рис. 3, *b* приведена зависимость от времени значения потенциала $\Delta\varphi_{0,\max}(t)$ в максимуме распределения. Можно видеть, что эта зависимость хорошо описывается спадающей экспоненциальной функцией: $\Delta\varphi_{0,\max}(t) = Ae^{-t/\tau}$. Измеренное характерное время диссипации поверхностного заряда составило величину $\tau = 54$ min.

Можно достаточно уверенно предположить, что измерение со временем измеряемых методом ГКЗМ профилей напряжений связано с накоплением заряда на боковой окисленной поверхности GaAs-НП. Действительно, процессы перераспределения потенциалов и зарядов в объеме полупроводниковых материалов происходят на несколько порядков быстрее. В то же время процессы зарядки ловушечных центров на окисленной поверхности НП должны быть более медленными, что связано с необходимостью преодоления отделяющих их барьеров. Стоит отметить, что в работах по изучению временной динамики зарядов, инжектированных в тонкие пленки SiO₂ окисла [9,10], были получены близкие значения характерных времен диссипации заряда $\tau = 5-10$ min. На проявление в нашем случае именно зарядов на поверхностных состояниях GaAs-НП указывает еще и то наблюдение, что рассматриваемый эффект отсутствует в случае проведения исследований в атмосферных условиях, где имеет место быстрая утечка зарядов с поверхности по слою водного адсорбата.

Рассмотрим вопрос о происхождении накапливаемого положительного заряда на боковой поверхности *p*-GaAs-НП вблизи контакта Шоттки при приложении запирающего напряжения. При такой полярности приложенного напряжения имеет место туннелирование носителей из валентной зоны НП в металлический контакт и локальное динамическое увеличение концентрации дырок в НП вблизи контакта. А это, в свою очередь, должно приводить к увеличению концентрации дырок и на состояниях окисленной поверхности НП в этом месте, что, очевидно, и было зарегистрировано в данной работе по увеличению поверхностного потенциала во времени. Предлагаемой модели соответствует и наблюдаемое нарастание плотности избыточных дырок по

мере приближения к металлическому контакту, и ее резкое падение на границе с контактом. После снятия внешнего смещения избыточные дырки будут медленно стекать обратно в НП путем туннелирования через приповерхностный барьер. Так как и процесс захвата дырок на поверхность, и процесс их возврата в НП происходят путем туннелирования, то это приводит к достаточно медленным характерным временам развития этих процессов. В качестве подтверждения ухода дырок именно в НП после снятия напряжения можно рассмотреть сохранение асимметричной формы остаточного потенциала при его спадаении после снятия внешнего напряжения. В случае ухода дырок в металлический контакт по поверхности НП можно было бы ожидать относительно более быстрого понижения профиля потенциала в его правой части вблизи контакта из-за заметного уменьшения расстояния захваченных дырок от контакта, что не наблюдается.

Обнаруженный эффект накопления зарядов на боковой поверхности GaAs-НП вблизи запираемых контактов может иметь важное практическое значение. Поле, создаваемое поверхностными зарядами, может проникать под поверхность НП и существенным образом влиять на протекание тока внутри НП. Так, в этой работе при измерении вольт-амперных характеристик (ВАХ) *p*-GaAs-НП был замечен ряд дополнительных особенностей (в статье подробно не рассматриваются), а именно: 1) развитие во времени заметного гистерезиса ВАХ при постепенном приложении и снятии внешнего напряжения и 2) нестандартный вид ВАХ с насыщением прямых веток при увеличении протекающего тока. Возможны ситуации, когда накопленные поверхностные заряды смогут играть роль своеобразного затвора и будут влиять на канал проводимости внутри НП. Отмеченные обстоятельства следует учитывать при создании приборных структур на базе НП.

Таким образом, в работе был обнаружен эффект накопления дырок на боковой окисленной поверхности *p*-GaAs-НП вблизи металлических контактов Шоттки при приложении к ним запирающего потенциала. Предполагается, что накопление дырок на боковой поверхности НП происходит за счет туннелирования носителей из объема НП на состояния в окисленной поверхности НП. При снятии внешнего смещения накопленный на боковой поверхности заряд медленно стекает обратно в НП. Характерные времена накопления заряда на боковой поверхности GaAs-НП и его диссипации при снятии напряжения оказываются близкими и составляют несколько минут.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (10-02-00784-а, 12-02-01042-а), программы РАН, гранта президента РФ для ведущих научных школ НШ-3008.2012.2 и ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы“.

Список литературы

- [1] *Li Y., Xiang J., Quang F., Gradecak S., Wu Y., Yan H., Blom D.A., Lieber C.M.* // NanoLett. 2006. V. 6. P. 1468.
- [2] *Dubrovskii V.G., Soshnikov I.P., Sibiev N.V., Cirlin G.E., Tonkikh A.A., Samsonenko Yu.B., Ustinov V.M.* // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. P. 205 325.
- [3] *Thelander C., Martensson T., Bjork M.T., Ohlsson B.J., Larsson M.W., Wallenberg L.R., Samuelson L.* // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. P. 2052.
- [4] *Semet V., ThienBinh Vu., Pauporte Th., Joulaud L., Vermersch F.J.* // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 054 301.
- [5] *Wang Q., Li Q.H., Chen Y.J., Wang T.H., He C.L., Li J.P., Lin C.L.* // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. P. 3654.
- [6] *Girard P., Titkov A.N.* // Applied Scanning Probe Methods. V. 2. Chap. 9 / B. Bhushan & H. Fuchs. Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [7] *Dunaevskiy M.S., Alekseev P.A., Girard P., Lahderanta E., Lashkul A., Titkov A.N.* // J. Appl. Phys. 2011. V. 110. P. 084 304.
- [8] *Ладутенко К.С., Анкудинов А.В., Евтихьев В.П.* // Письма в ЖТФ. 2010. V. 36. P. 71.
- [9] *Kang C.J., Buh G.H., Lee S., Kim C.K., Mang K.M., Im C., Kuk Y.* // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. P. 1815.
- [10] *Buh G.H., Chung H.J., Kuk Y.* // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 79. P. 2010.