

06.2

## Транзисторные структуры с управляемым потенциальным рельефом одномерного квантового канала

© В.И. Борисов, В.Г. Лапин, В.Е. Сизов, А.Г. Темиряев

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Фрязино, Московская обл.  
ФГУП «НПП „Исток“», Фрязино, Московская обл.  
E-mail: vbi@ms.ire.rssi.ru

Поступило в Редакцию 23 июня 2010 г.

На основе гетероструктур GaAs/AlGaAs с двумерным электронным газом методом локального анодного окисления с помощью сканирующего зондового микроскопа созданы структуры с одномерным проводящим каналом и трехсекционными боковыми управляющими затворами. Показано, что затворы позволяют управлять продольным потенциальным профилем канала. На измеренных зависимостях кондактанса канала от напряжений на затворах наблюдались плато, в том числе не кратные  $2e^2/h$ , и максимумы, положение и вид которых определяются соотношением потенциалов на затворах.

Мезоскопические полупроводниковые структуры (квантовые контакты, открытые квантовые точки, одномерные проводники) и их транспортные свойства интенсивно исследуются уже более двух десятилетий. На сегодняшний день твердо установлено, что явление квантования их продольной дифференциальной проводимости (кондактанса)  $G$  с величиной кванта  $G_0 = 2e^2/h \approx 77.5 \mu S$  ( $e$  — элементарный заряд,  $h$  — постоянная Планка) связано с квантованием поперечного движения носителей в узких каналах. Множитель 2 в выражении для  $G_0$  отражает тот факт, что подзоны одномерного квантования вырождены по спину. В сильных магнитных полях вырождение снимается и квантование кондактанса происходит с величиной кванта  $e^2/h$ . Кроме целочисленного квантования  $G = nG_0$  на графиках зависимости кондактанса от потенциала управляющего электрода (затвора)  $G(U_g)$  наблюдаются особенности в виде дополнительных пиков или плато при значениях проводимости, не кратных  $G_0$ . Наиболее широко обсуждается „особен-

ность  $0.7^{\text{с}}$  (квазиплато при  $G = 0.7 G_0$ ) [1]. Помимо этого наблюдаются и другие особенности, возникающие при наличии продольного постоянного смещения  $U_{sd}$  [2,3] или неодинаковом потенциале формирующих канал затворов [4]. Среди них наиболее часто воспроизводится плато на уровне  $G = 0.25G_0$ . Экспериментально особенности наблюдались на структурах различной геометрии, при изготовлении которых использовались разные методы формирования одномерного канала и материалы разной степени совершенства, в том числе гетероструктуры с рекордными подвижностями ( $\sim 10^7 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ). Механизмы образования этих особенностей продолжают оставаться не выясненными и широко дискутируются в литературе, например в [1] и других статьях данного тематического выпуска журнала. В качестве причин возникновения особенностей обсуждаются возможность формирования квазисвязанных состояний и спонтанной спиновой поляризации носителей в канале, обусловленной сильным межэлектродным взаимодействием.

Целью настоящей работы было создание структур с одномерным электронным каналом (квантовой проволокой) и многосекционными затворами, позволяющими управлять потенциальным рельефом вдоль канала и контролируемым образом создавать условия для формирования в нем квазисвязанных электронных состояний. Наличие таких состояний должно проявляться в изменении графиков зависимости  $G$  от потенциала каждого из затворов  $U_{gi}$ .

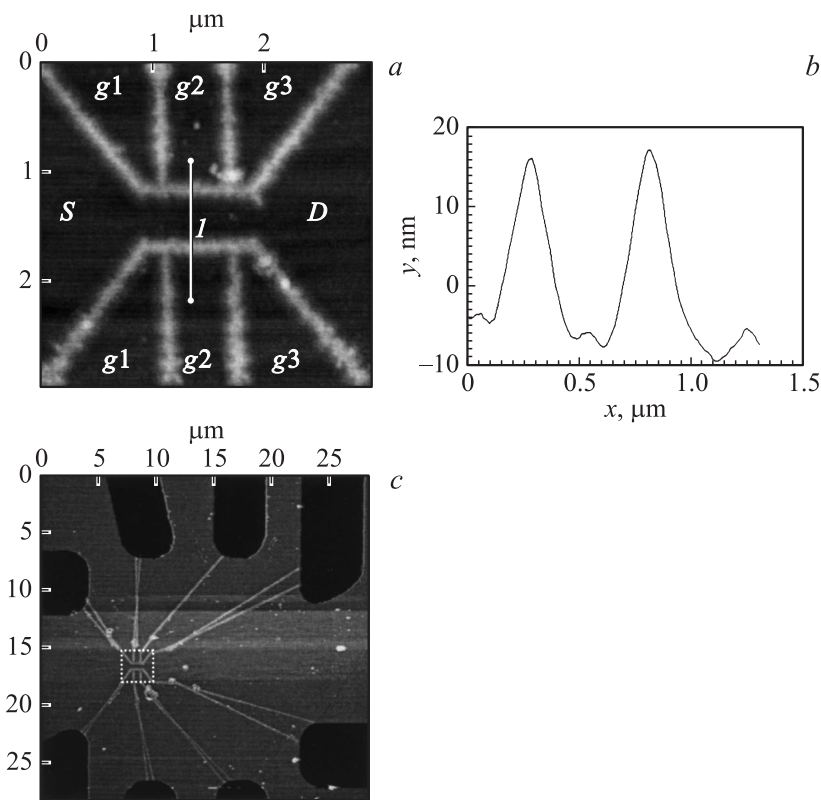
Для уменьшения экранирующего влияния затворов на межэлектронное взаимодействие в канале и обусловленные этим взаимодействием эффекты накопления заряда в квантовом проводе и образование спиновой поляризации экспериментальные структуры изготавливались в виде транзисторов с боковыми управляющими электродами [5]. В таких структурах проводящий канал отделен от затворов, образованных боковыми (по отношению к каналу) слоями двумерного электронного газа, с помощью изолирующих областей шириной  $0.1\text{--}0.5 \mu\text{m}$ . Такие же области могут изолировать друг от друга отдельные части многосекционных затворов. Изолирующие области могут быть созданы как в виде канавок, полученных путем химического, ионно-плазменного или плазмо-химического травления, так и путем локального анодного окисления (ЛАО) поверхности исходной гетероструктуры с помощью сканирующего зондового микроскопа (СЗМ). Для того чтобы транспорт электронов в канале был баллистическим, длина канала должна быть меньше длины свободного пробега двумерных электронов, которая для

наших структур при 4.2 К составляла 3–5  $\mu\text{m}$ . Создание структур с длиной канала  $\leq 1 \mu\text{m}$ , имеющих по три управляющих боковых затвора с каждой стороны, требует применения литографии с характерными размерами элементов  $\sim 0.1 \mu\text{m}$ . Это возможно с использованием электронной литографии высокого разрешения, как это делалось, например, в [5], или литографии путем ЛАО [6,7]. В настоящей работе мы использовали второй метод. Образцы кристаллов с контактами к областям с двумерным электронным газом изготавливались методом обычной оптической литографии и собирались в корпус. Затем на каждом таком образце проводилась индивидуальная нанолитография транзисторных структур с одномерным каналом и секционированными боковыми затворами.

Исследуемые образцы изготавливались на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке из полуизолирующего GaAs. Последовательно наращивались слои нелегированного GaAs толщиной 1  $\mu\text{m}$ , AlGaAs — 35 nm и защитный слой нелегированного GaAs — 5 nm. Слой AlGaAs содержит два дельта-слоя, легированных Si. Двумерный электронный газ формируется в треугольной потенциальной яме в GaAs на расстоянии 20 nm от ближайшего дельта-слоя. Концентрация и подвижность электронов в двумерном слое при температуре 4.2 К составляли соответственно  $5.5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  и  $5 \cdot 10^5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  после подсветки и  $3.5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  и  $3.0 \cdot 10^5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  в темноте (после длительной релаксации).

С помощью стандартной оптической литографии и химического травления на поверхности гетероструктуры формировалась мезаструктура высотой  $\sim 50 \text{ nm}$ . Затем методом взрывной фотолитографии создавалась система Ni/Ge/Au омических контактов к областям стока, истока и затворов и потенциальные контакты, обеспечивающие измерение проводимости канала по четырехзондовой схеме. На заключительном этапе оптической литографии химическим травлением формировались канавки, разделяющие области структуры там, где ширина этих канавок не была критична. После этого структуры собирались в корпус.

Окончательно формирование проводящего канала и системы из шести затворов (по три с каждой стороны канала) осуществлялось методом литографии ЛАО. Литография проводилась с использованием СЗМ Smart в полуконтактной моде. При этом на кантилевер микроскопа подавалось постоянное напряжение смещения  $-25 - -40 \text{ V}$ , а ток ограничивался включенным в цепь высокоомным балластным резистором.



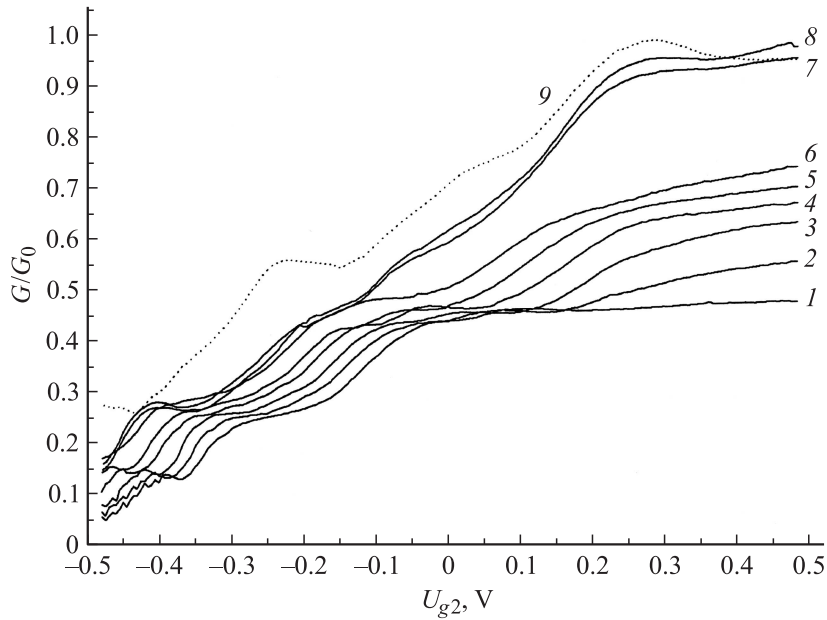
**Рис. 1.** *a* — СЗМ-изображение области структуры с каналом и секционированными боковыми управляющими затворами, *S* — исток, *D* — сток, *g1*, *g2* и *g3* — секции боковых затворов; *b* — профиль высоты структуры вдоль линии *I* на рис. 1, *a*; *c* — общий вид центральной части структуры. Темные области — изолирующие канавки, полученные методом химического травления. Тонкие светлые линии — линии ЛАО. Штриховым прямоугольником выделена область, представленная на рис. 1, *a*.

Примененная методика позволяла не допускать разрушения кантилвера в процессе литографии, устойчиво получать высоту образующегося при этом анодного окисла  $\sim 15\text{--}20\text{ nm}$  и изолировать друг от друга электроды структуры (рис. 1).

Измерения характеристик структуры проводились при температуре 1.5 К. Режим охлаждения был следующим. Изготовленные структуры устанавливались во вставку, погружаемую в транспортный дьюар с жидким гелием. При понижении температуры до 5–10 К производилась подсветка инфракрасным светодиодом. После выключения подсветки структура выдерживалась в течение 20–30 мин при постоянной температуре, затем включалась откачка гелия из вставки. Измерялись зависимости дифференциальной проводимости канала ( $G$ ) от постоянного напряжения на затворах ( $U_{gi}$ ). Исток при измерениях заземлялся. Кондактанс канала измерялся на переменном сигнале с частотой 133 Hz, амплитуда не превышала  $30\mu\text{V}$ . Для измерения переменного напряжения на потенциальных электродах стока и истока и тока истока использовался метод синхронного детектирования. Постоянные напряжения измерялись непосредственно на электродах затворов и стока.

На рис. 2 приведены результаты измерения зависимости кондактанса структуры от напряжения на центральной паре затворов ( $g2$ ) при фиксированных напряжениях на крайних затворах ( $g1$  и  $g3$ ). Из рисунка видно, что проводимость канала зависит от продольного потенциального профиля, создаваемого секциями затворов. Так, кривая 1 показывает, что при увеличении потенциала среднего затвора  $U_{g2}$  кондактанс растет, но при  $U_{g2} > -50\text{ mV}$  он достигает насыщения. Это означает, что в этой области проводимость канала определяется потенциалами крайних затворов. Действительно, увеличение потенциала на затворе  $g3$  приводит к росту проводимости (кривые 2–8) в этой области  $U_{g2}$  вплоть до  $G \approx G_0$ . Действие затвора  $g3$  проявляется не только в увеличении проводимости, но и в изменении формы всей характеристики, причем плато на кривой 1 при проводимостях  $0.25 G_0$  и  $0.5 G_0$  модифицируются в пологие максимумы. В то же время при больших потенциалах на затворе  $g3$  его влияние ослабевает, кривые 7 и 8 почти совпадают, несмотря на относительно большое изменение потенциала на  $g3$ .

Тот факт, что потенциалы затворов влияют на потенциальный профиль канала, от которого радикальным образом зависит его проводимость, подтверждает и сравнение кривых 8 и 9. Хотя суммарное изменение потенциалов  $U_{g1} + U_{g3}$  (630 mV для кривой 9 по сравнению с кривой 1) меньше величины изменения  $U_{g3}$  (850 mV для кривой 8), кривая 9 при  $G < G_0$  лежит выше кривой 8. При этом характерные



**Рис. 2.** Зависимости проводимости канала  $G$  от напряжения на средних затворах ( $U_{g2}$ ) при  $U_{g1} = -280$  мВ (кривые 1–8) и  $U_{g3} = -350$  (1),  $-300$  (2),  $-250$  (3),  $-200$  (4),  $-140$  (5),  $-100$  (6),  $350$  (7),  $500$  мВ (8) и  $U_{g1} = U_{g3} = 0$  мВ (кривая 9).

плато проводимости при  $G = 0.25G_0$ ,  $0.5G_0$  и  $G_0$  имеют форму пологих максимумов.

Особенности кондактанса в виде плато при этих же уровнях проводимости или максимумов на графиках  $G(U_g)$  наблюдались в работах [2–4] на структурах с расщепленным затвором при разных условиях измерения. В [8,9] эти структуры были изменены путем создания трех дополнительных поверхностных затворов [8] или разделения одного из затворов на три секции [9]. В этих структурах при температурах  $\sim 50$  мК и определенных соотношениях напряжений на дополнительных затворах наблюдались пики проводимости, которые связывались с формированием в канале квазисвязанных состояний. Причем форма

особенностей в виде пиков объяснялась эффектом кулоновской блокады или резонансными явлениями.

Следует отметить, что особенности на зависимостях  $G(U_g)$  при  $G \approx 0.25G_0$  и  $G \approx 0.5G_0$  наблюдались и на других изготовленных нами образцах с близкими геометрическими размерами и полностью не исчезали при подаче больших положительных потенциалов на крайние затворы. Учитывая, что литографическая ширина канала в структурах составляла  $\sim 0.3-0.4 \mu\text{m}$ , а ширина области поперечной локализации электронов, по оценкам, значительно меньше, следует предположить, что проводимость канала и продольный профиль потенциала в нем в значительной мере определяются величиной и пространственным распределением заряда, внесенного в процессе локального анодного окисления. Эти заряды можно изменять, изменяя геометрию структуры и глубину окисления при создании изолирующих областей. Оптимизация геометрических размеров структуры и режимов окисления должна улучшить управляемость структур при сохранении достаточно высоких пробивных напряжений затворов.

Таким образом, на основе гетероструктур с двумерным электронным газом методом локального анодного окисления созданы структуры с одномерным проводящим каналом и трехсекционными боковыми управляющими затворами. Показано, что соотношение потенциалов на затворах определяет продольный потенциальный профиль канала. На зависимостях кондактанса канала от напряжения на затворах обнаружены дополнительные плато и максимумы, положение и вид которых определяются потенциалами затворов. Эти особенности связаны, по-видимому, с образованием квазисвязанных состояний в потенциальном рельефе, создаваемом затворами. Но этот вопрос требует дальнейшего исследования.

Авторы благодарят В.А. Сабликова за интерес и внимание к работе и А.И. Торопова за предоставленные гетероструктуры AlGaAs/GaAs.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований президиума РАН № 27 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“ и Программы ОФН РАН „Сильно коррелированные электроны в твердых телах и структурах“.

## Список литературы

- [1] *Pepper M., Bird J.* // J. Phys.: Condens. Matter. 2008. V. 20. N 16. P. 160301.
- [2] *Simmonds P.J., Sfigakis F., Beere H.E.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 152108.
- [3] *Chen T.-M., Graham A.C., Pepper M.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 032102.
- [4] *Liu K.M., Hsiao J.H., Hong T.M.* et al. // J. Phys.: Conference Series. 2009. V. 150. P. 022052.
- [5] *Nieder J., Wieck A.D., Grambow P.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. N 25. P. 2695.
- [6] *Held R., Vancura T., Heinzl T.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. N 2. P. 262.
- [7] *Fuhrer A., Lüscher S., Heinzl T.* et al. // Phys. Rev. B. 2001. V. 63. N 12. P. 125309.
- [8] *Liang C.-T., Pepper M., Simmons M.Y.* et al. // Chinese J. of Physics. 2001. V. 39. N 6. P. 533–544.
- [9] *Liu T.-M., Hemingway B., Kogan A.* et al. // arXiv:0910.0570v2. 2009.