

07;08

## Роль пьезоэффекта в аномальной зависимости проводимости гетероструктуры AlGaAs/GaAs с двумерным электронным газом от расстояния между контактами

© В.Е. Сизов, М.В. Степушкин

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл., Россия

E-mail: vesizov@mail.ru

Поступило в Редакцию 2 августа 2019 г.

В окончательной редакции 14 октября 2019 г.

Принято к публикации 15 октября 2019 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований проводимости гетероструктуры AlGaAs/GaAs с двумерным электронным газом в области температур 10–300 К. При низких температурах с уменьшением расстояния между контактами к структуре от 100 до 20 нм наблюдался рост сопротивления. Для объяснения данной аномальной зависимости выполнено численное моделирование влияния пьезоэффекта в полупроводнике на проводимость канала. Показано, что необходимо учитывать кристаллографическую ориентацию канала и влияние на его потенциал удаленных пьезозарядов.

**Ключевые слова:** двумерный электронный газ, проводимость канала, пьезоэлектрический эффект, кристаллографическое направление, AlGaAs/GaAs.

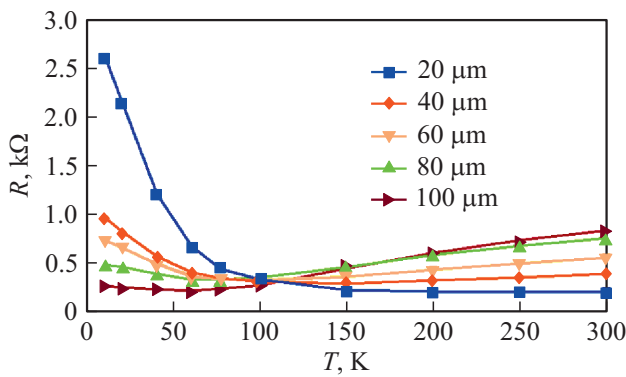
DOI: 10.21883/PJTF.2020.02.48947.18007

При электрофизических исследованиях на гетероструктурах AlGaAs/GaAs важно знать характеристики контактов, например контактное сопротивление к двумерному электронному газу. Одним из типичных методов измерения сопротивления контактов к тонкопленочным структурам является метод передающей линии [1,2]. Для него изготавливаются специальные образцы с несколькими одинаковыми контактами, расположенными на разных расстояниях друг от друга. В простой традиционной модели общее сопротивление между соседними контактами рассматривается как сумма удвоенного контактного сопротивления и сопротивления канала между ними. Если все контакты одинаковые и не влияют на соседние, а сопротивление канала прямо пропорционально величине зазора между контактами, то зависимость общего сопротивления от величины зазора будет линейной и пересекать ось ординат в точке, соответствующей удвоенному сопротивлению контакта. Однако встречаются отклонения от этой простейшей модели. Так, на структурах с GaAs иногда сопротивление между контактами растет с уменьшением расстояния между ними. Задача настоящей работы дать объяснение этой аномалии.

Из других эффектов в [3] наблюдалась зависимость сопротивления от направления протекания тока в кристалле, что объяснялось анизотропией диффузии металла контакта, анизотропией роста кристаллов металла и пьезоэлектрическим эффектом в полупроводнике, вызванным наличием на его поверхности металла или диэлектрика. А аналогичный нашему эффект описан в [4], где при протекании тока вдоль кристаллографического направления [011] гетероструктуры AlGaAs/GaAs

эксперимент описывался моделью, а при протекании тока вдоль направления [01 $\bar{1}$ ] вместо снижения сопротивления с уменьшением зазора между контактами наблюдался его значительный рост. Удовлетворительного объяснения такому поведению дано не было. Ряд особенностей в структурах на основе GaAs объясняется пьезоэффектом. Моделирование пьезоэффекта описано в [5,6] для полевого транзистора на основе GaAs. Источником механического напряжения в транзисторе были слои диэлектрика, SiO<sub>2</sub> или Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Индуцированные пьезозаряды в канале транзистора приводили к сдвигу порогового напряжения. Сдвиг зависел от ориентации и длины канала. В работе [7], где источником механических напряжений служил слой фоторезиста, рассчитывался созданный пьезозарядами потенциал в канале, а в [8,9] пьезоэффект влиял на дрейф характеристик вследствие химической реакции остаточного водорода с металлизацией затвора.

Для наших исследований на гетероструктурах AlGaAs/GaAs с одномерным квантовым каналом важно было иметь хорошие омические контакты к двумерному электронному газу (2DEG) при низких температурах. Сами гетероструктуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на полужизолирующей подложке GaAs, на которую последовательно наносились буферный слой GaAs толщиной 500 нм, слой AlGaAs (35 нм), содержащий два  $\delta$ -легированных кремнием слоя на расстояниях 20 и 25 нм от гетерограницы, и защитный слой GaAs (5 нм). Таким образом, расстояние от поверхности до двумерного электронного слоя в разрыве зон на границе AlGaAs/GaAs было равно 40 нм. При 4.2 К подвижность электронов составляла



**Рис. 1.** Температурные зависимости сопротивления между контактами при различных расстояниях между ними для случая протекания тока вдоль направления  $[01\bar{1}]$ .

$3 \cdot 10^5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ , а их концентрация —  $1.2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ . К структуре с помощью оптической литографии и вакуумно-термического испарения создавались контакты Ni/Ge/Au размером  $400 \times 400 \mu\text{m}$  на расстояниях 20, 40, 60, 80 и  $100 \mu\text{m}$ . Подробнее наши исследования и технология описаны в [10,11].

Измерения сопротивления между контактами с разной длиной зазора между ними проводились в температурной области 10–300 К, при этом вольт-амперные характеристики при всех зазорах были линейными, т.е. контакты оставались все время омическими. Зависимости не имели выбросов или других косвенных свидетельств брака какого-либо контакта. На рис. 1 приведены температурные зависимости сопротивления при протекании тока вдоль направления  $[01\bar{1}]$ . При высоких температурах эти зависимости почти совпадали с аналогичными для других направлений, при этом немного отличалась величина сопротивления контакта, которое для направления  $[01\bar{1}]$  составляло  $28 \Omega$  (удельное сопротивление  $11.2 \Omega \cdot \text{mm}$ ) при 300 К. Но с понижением температуры для данного направления наблюдалась аномальная зависимость сопротивления от расстояния между контактами, аналогичная отмеченной в [4]. Ключевым, на наш взгляд, моментом, затрудняющим объяснение аномального низкотемпературного поведения, является несоизмеримость геометрических параметров — слишком большое расстояние между контактами по сравнению с другими характерными размерами: длиной диффузии, глубиной залегания проводящего канала, длиной свободного пробега носителей заряда и др.

Мы предположили, что за аномальную зависимость отвечает пьезоэлектрический эффект в полупроводнике, индуцируемый при охлаждении механическим напряжением на границе полупроводник–металлический контакт. Само напряжение обусловлено различием в коэффициентах теплового расширения металла и полупроводника. Особенно эффект становится заметен при уменьшении температуры ниже 120 К.

Для численного моделирования мы использовали схему, аналогичную схеме из работ [5,6] (рис. 2). Металлические контакты считаются бесконечно протяженными в стороны от контактов вдоль оси  $X$ . Геометрические размеры структуры вдоль оси  $Y$  (перпендикулярно плоскости рисунка) также считаются бесконечно большими, что позволяет проводить расчет двумерного случая. Концентрация пьезозарядов в произвольной точке полупроводника может быть вычислена по формуле, приведенной в [5,6] для ориентации  $[110]$ :

$$N_{pz} = d_f \gamma_b \sigma \left( \frac{x_1 z (x_1^2 - \beta z^2)}{r_1^6} - \frac{x_2 z (x_2^2 - \beta z^2)}{r_2^6} \right),$$

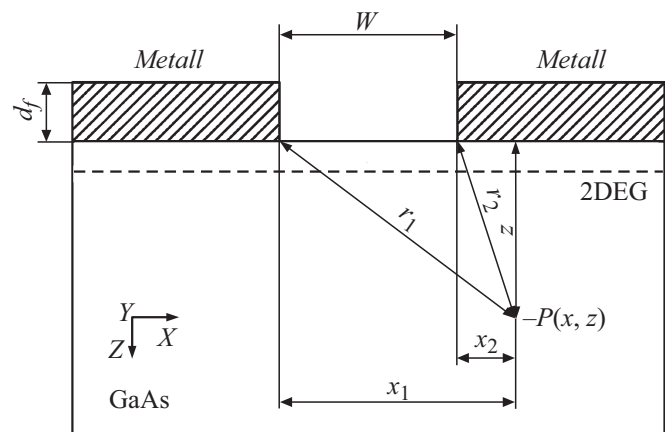
где  $d_f$  — толщина нанесенного на поверхность материала,  $\gamma_b = 2d_{14}(4 - \nu)/\pi$ ,  $d_{14} = 2.69 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$  — пьезокоэффициент для GaAs,  $\beta = (2 + \nu)/(4 - \nu) = 0.59$  для GaAs,  $\nu = 0.23$  — коэффициент Пуассона для GaAs,  $\sigma$  — величина механического напряжения, составляющая в упомянутой литературе порядка  $10^8 \text{ N/m}^2$ .

Вследствие анизотропии кристалла GaAs величина  $N_{pz}$  зависит от направления механического напряжения. Для направлений протекания тока  $[011]$  и  $[0\bar{1}1]$  компоненты одного тензора пьезокоэффициентов равны соответствующим компонентам другого и противоположны по знаку, т.е. механическое напряжение, вызывающее при одной ориентации за счет пьезоэффекта увеличение концентрации электронов в канале, при другой ориентации будет приводить к ее уменьшению.

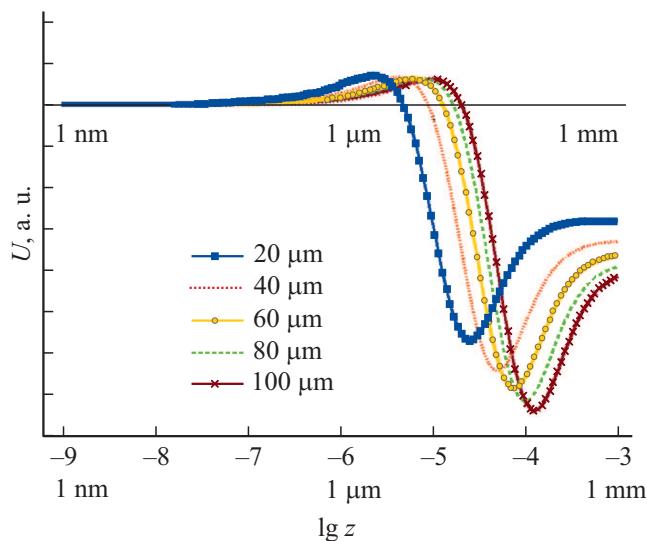
При моделировании было установлено, что учет влияния пьезозарядов, наведенных только в канале, недостаточен для объяснения аномалии. Необходимо учитывать заряды, индуцированные во всем объеме кристалла и сдвигающие потенциал в канале (аналогично затвору полевого транзистора). В двумерной модели вклад в потенциал точки канала от пьезозарядов с одинаковыми  $x$  и  $z$  вычислялся по формуле

$$\Delta\varphi = (\tau/4\pi\epsilon\epsilon_0) \ln(l_2/l_1),$$

где  $\tau = N_{pz} dx dz$  — линейная плотность заряда в направлении  $Y$ , а  $l_1$  и  $l_2$  — расстояния от выбранной точки до



**Рис. 2.** Модель структуры для расчета пьезоэффекта.



**Рис. 3.** Величина электростатического потенциала в центре каналов разной длины, наведенного пьезозарядами из объема полупроводника. По оси абсцисс в логарифмическом масштабе отложена глубина полупроводника, до которой учитывается вклад пьезозарядов.

контакта, принимаемого за опорный, и до рассматриваемой точки канала соответственно. На рис. 3 представлен сдвиг электростатического потенциала в центре канала при учете совокупности пьезозарядов в полупроводнике до различной глубины. Из рисунка следует, что существует область вполне реальных параметров структуры, в которой отрицательное (запирающее) напряжение в канале с малой длиной превышает напряжение в более длинном.

Проведенное нами численное моделирование подтвердило возможность объяснения с помощью пьезоэффекта аномального поведения сопротивления, а именно его увеличения при уменьшении расстояния между контактами от 100 до 20  $\mu\text{m}$  при глубине залегания проводящего слоя 40 nm. В нашем случае пьезоэффект при охлаждении вызывается механическим напряжением, обусловленным различием коэффициентов теплового расширения полупроводника и металла контактов. Для двух кристаллографических ориентаций образца [011] и  $[0\bar{1}\bar{1}]$  полярности наведенного пьезозарядами потенциала будут противоположными. Наибольшее влияние пьезоэффект оказывает на структуры с низкой концентрацией свободных носителей заряда в канале.

### Благодарности

Авторы благодарны А.И. Торопову (ИФП СО РАН) за предоставление исходных гетероструктур AlGaAs/GaAs.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Reeves G.K., Harrison H.B. // IEEE Electron Dev. Lett. 1982. V. 3. N 5. P. 111–113. DOI: 10.1109/EDL.1982.25502
- [2] Heiblum M., Nathan M.I., Chang C.A. // Solid-State Electron. 1982. V. 25. N 3. P. 185–195. DOI: 10.1016/0038-1101(82)90106-X
- [3] Kamada M., Suzuki T., Nakamura F., Mori Y., Arai M. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 49. N 19. P. 1263–1265. DOI: 10.1063/1.97381
- [4] Göktaş O., Weber J., Weis J., Von Klitzing K. // Physica E. 2008. V. 40. N 5. P. 1579–1581. DOI: 10.1016/j.physe.2007.09.115
- [5] Asbeck P.M., Lee C.-P., Chang M.-C.F. // IEEE Trans. Electron Dev. 1984. V. 31. N 10. P. 1377–1380. DOI: 10.1109/T-ED.1984.21719
- [6] Lo S.-S., Lee C.-P. // IEEE Trans. Electron Dev. 1990. V. 37. N 10. P. 2130–2140. DOI: 10.1109/16.59901
- [7] Larkin I.A., Davies J.H., Long A.R., Cuscó R. // Phys. Rev. B. 1997. V. 56. N 23. P. 15242–15251. DOI: 10.1103/PhysRevB.56.15242
- [8] Blanchard R.R., del Alamo J.A., Adams S.B., Chao P.C., Cornet A. // IEEE Electron Dev. Lett. 1999. V. 20. N 8. P. 393–395. DOI: 10.1109/55.778153
- [9] Mertens S.D., del Alamo J.A. // IEEE Trans. Electron Dev. 2002. V. 49. N 11. P. 1849–1855. DOI: 10.1109/TED.2002.804698
- [10] Борисов В.И., Кувшинова Н.А., Курочка С.П., Сизов В.Е., Степушкин М.В., Темирязов А.Г. // ФТП. 2017. Т. 51. В. 11. С. 1534–1537. DOI: 10.21883/FTP.2017.11.45106.20
- [11] Курочка С.П., Степушкин М.В., Борисов В.И. // Изв. вузов. Материалы электронной техники. 2016. Т. 19. № 4. С. 271–278. DOI: 10.17073/1609-3577-2016-4-271-278