

# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2016. Т. 19, № 4. С.271—278.  
ISSN 1609–3577. DOI: 10.17073/1609-3577-2016-4-271-278

УДК 621.315.592

## ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К ГЕТЕРОСТРУКТУРАМ AlGaAs/GaAs С ДВУМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ГАЗОМ

© 2016 г. С. П. Курочка<sup>1</sup>, М. В. Степушкин<sup>1,2</sup>, В. И. Борисов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049, Россия

<sup>2</sup>ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН,  
пл. Введенского, д. 1, Фрязино, Московская обл., 141120, Россия

Проведен анализ литературы, посвященной особенностям создания омических контактов к гетероструктурам AlGaAs/GaAs с двумерным электронным газом с высокой подвижностью носителей заряда. Рассмотрен процесс вжигания контактов на основе системы Ni/Au/Ge. Приведены рекомендуемые в литературе параметры напыляемых слоев и режимы их вжигания, которые позволяют получить омические контакты, обладающие низким электрическим сопротивлением до температур ниже 4 К. Рассмотрено несколько механизмов, которые могут приводить к экспериментально наблюдаемой зависимости характеристик контактов от их кристаллографической ориентации. Описан метод создания контактов с использованием металлизации Au/Ge/Pd, при котором формирование контакта происходит за счет взаимной диффузии и взаимодействия металлов и полупроводника в твердой фазе при температурах менее 200 °С. Это обеспечивает большую однородность контакта по составу, гладкую границу раздела металл—полупроводник и может привести к снижению влияния эффектов ориентации на электрические характеристики контакта.

**Ключевые слова:** двумерный электронный газ, омический контакт, GaAs, гетероструктура, кристаллографическая ориентация.

### Введение

Селективно–легированные полупроводниковые гетероструктуры (СЛГС) AlGaAs/GaAs с двумерным электронным газом (ДЭГ) с высокой подвижностью электронов являются в настоящее время основой для создания современных транзисторов, в том числе полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (*high electron mobility transistor*, **HEMT**), приборов для систем телекоммуникаций, СВЧ– и оптоэлектроники, а также высокочувствительных миниатюрных датчиков для систем управления и контроля [1, 2]. По мере увеличения плотности и быстродействия полупроводниковых приборов размеры их активных областей уменьшаются до десятков и даже единиц нанометров. При этом корпускулярные свойства электрона, на которые опираются при разработке классических транзисторов, уступают

место волновым. Это открывает возможности создания новых классов полупроводниковых приборов и требует более глубокого изучения квантовых эффектов. Таким образом, формирование и исследование структур, характерные размеры активных областей которых составляют десятки и единицы нанометров, в настоящее время является одним из важнейших направлений фундаментальных и прикладных исследований в физике и технологии твердого тела. Наиболее совершенные полупроводниковые наноструктуры, позволяющие исследовать особенности квантового транспорта электронов, также создаются на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs с двумерным электронным газом с высокой подвижностью электронов [3].

При создании полупроводниковых приборов одной из основных и критических технологических операций является формирование

**Курочка Сергей Петрович**<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент; **Степушкин Михаил Владимирович**<sup>1,2</sup> — аспирант (1), старший инженер (2), e-mail: sokpoveheu@yandex.ru; **Борисов Виталий Иванович**<sup>2</sup> — канд. физ.–мат. наук, зав. лабораторией.

низкоомных омических контактов к проводящему каналу. В этих целях в основном используют вплавляемые контакты на основе системы Ni/Au/Ge. Эти контакты и режимы их формирования хорошо отработаны для приборов на основе  $n$ -GaAs и достаточно подробно освещены в литературе [4–7]. Однако, если для создания контакта к объемному  $n$ -GaAs достаточно легирования небольшой приконтактной области, то в случае СЛГС необходимо обеспечить проводимость всего слоя полупроводника от границы металла до проводящего слоя и при этом не нарушить его проводимость внесением дефектов.

### Образцы и методы исследования

Обычно СЛГС AlGaAs/GaAs создаются методами молекулярно–лучевой эпитаксии или эпитаксии из металлоорганических соединений. Такие гетероструктуры состоят из полуизолирующей подложки, на которую нанесены буферный слой нелегированного GaAs, нелегированный слой AlGaAs (спейсер), легированный слой AlGaAs и защитный слой GaAs. Легирование слоя AlGaAs может быть или объемным, когда примесь распределена по всей толщине, или тонким ( $\delta$ -слой). Зонные диаграммы таких структур приведены на рис. 1.

Наличие спейсера обусловлено необходимостью сохранения высокой подвижности электронов в двумерном канале, которая могла быть снижена из-за наличия атомов легирующей примеси. Защитный слой служит для защиты более химически активного слоя AlGaAs от воздействия внешней среды.

Электрическое сопротивление контактов к ДЭГ традиционно измеряют при помощи метода передающей линии (*transmission line method*, **TLM**) [8, 9], который был разработан для исследования планар-

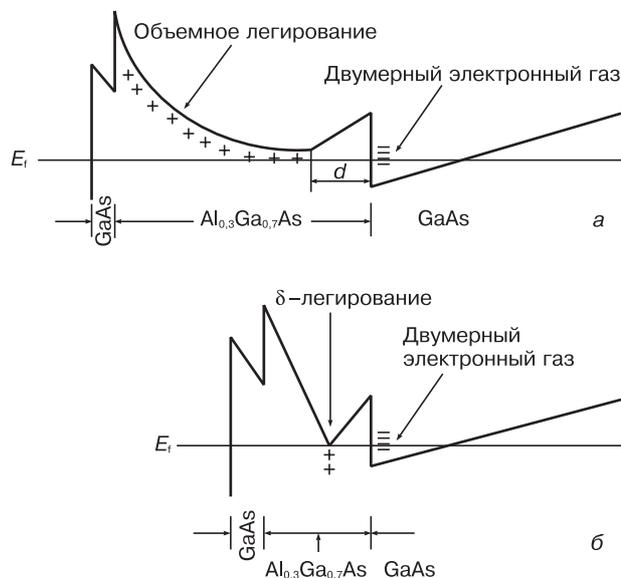


Рис. 1. Зонные диаграммы гетероструктур AlGaAs/GaAs с объемным (а) и  $\delta$ -легированием (б) [10]

Fig. 1. Band diagrams of AlGaAs/GaAs for (a) bulk and (b)  $\delta$ -doping [10]

ных тонкопленочных структур. Он заключается в изготовлении специального образца с несколькими одинаковыми контактами, расположенными на разных расстояниях друг от друга, в измерении электрических сопротивлений между ними и последующем расчете электрического сопротивления одного контакта. Применение этого метода основано на предположении, что контакты не меняют характеристик полупроводника или меняют их на расстоянии, много меньшем расстояния между контактами. Как будет показано далее, это предположение не всегда верно.

Процесс изготовления образцов для исследования качества омических контактов к ДЭГ в гетероструктурах AlGaAs/GaAs описан в работах [10, 11] и включает в себя те же основные этапы, из которых состоит процесс изготовления контактов к объемному GaAs. Например, в работе [11] предложена следующая схема.

1. Химическая обработка исходных гетероструктур, включающая обработку в органических растворителях (по 3 мин в ацетоне и изопропиловом спирте), промывку в деионизованной воде и сушку в потоке азота.

2. Формирование мезы путем травления с использованием фоторезистивной маски и травителя (например,  $H_2O : H_2O_2 : H_2SO_4 = 100 : 3 : 3$  или  $H_2O_2 : H_3PO_4 : H_2O = 1 : 3 : 40$ ).

3. Удаление фоторезиста и подготовка поверхности ко второй фотолитографии.

4. Создание фоторезистивной маски для последующего напыления металлизации контактов. Вследствие высокой чувствительности структур с ДЭГ к механическим повреждениям поверхности применяют маску с обратным клином [5].

5. Очистка поверхности гетероструктуры в окнах маски путем удаления остатков фоторезиста в кислородной плазме с последующим, непосредственно перед помещением образца в вакуумную камеру, снятием оксида в растворе HCl (авторы работы [12] рекомендуют травление в течение 5 с при концентрации 30 %). Затем следуют промывка в воде и сушка в потоке азота.

6. Напыление слоев металлизации.

7. Удаление фоторезиста и напыленного на него металла.

8. Вжигание контактов в атмосфере инертного или форми́нг-газа.

Состав и толщины напыляемых слоев металлизации, а также режим вжигания зависят от параметров конкретной структуры и будут рассмотрены ниже.

### Выбор состава металлизации

Как уже указывалось выше, при создании приборов на основе СГСЛ AlGaAs/GaAs наиболее широко используют вплавляемые контакты на основе

системы Ni/Au/Ge. Они обладают низким электрическим сопротивлением, отличаются надежностью и применимы в широком диапазоне уровня легирования GaAs [7]. Однако им присущи и существенные недостатки: ограниченная стабильность при повышенных температурах, неоднородность поверхности и неровный край контакта, ограничивающие применение для создания контактов малой площади.

В работах [13—15] предложен контакт Au/Ge/Pd, лишенный этих недостатков. Схема его формирования показана на рис. 2. При реакции палладия с GaAs образуется соединение Pd<sub>4</sub>GaAs, которое при взаимодействии с германием переходит в PdGe и GaAs, легированный германием. При этом поверхности, фронт рекристаллизации и край остаются гладкими, а более низкая температура формирования контакта снижает термические напряжения в структуре.

Как показали исследования, проведенные методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), толщина рекристаллизованной области составила 10—20 нм, что меньше глубины залегания проводящего слоя в СЛГС. Более подробно механизм проводимости такого контакта рассмотрен в работе [15]. Исследования проводили на следующей структуре:

- полуизолирующая подложка;
- слой AlGaAs толщиной 250 нм;
- буферный слой GaAs толщиной 800 нм;
- слой InGaAs толщиной 11 нм;
- спейсер AlGaAs толщиной 4,5 нм;
- слой AlGaAs толщиной 37 нм с концентрацией легирующей примеси  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ;
- защитный слой GaAs толщиной 55 нм с концентрацией примеси  $3,7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , на который были последовательно нанесены слои Pd, Ge и Au толщиной 50, 125 и 300 нм соответственно.

После нанесения, контакты вжигали при температуре 320 °С в течение 1 мин. Таким образом, глубины диффузии металлов недостаточно для обеспечения контакта непосредственно со слоем двумерного газа. Вместо этого контакт образуется с защитным слоем GaAs, а дальнейшее прохождение тока обеспечивается большой площадью контакта, высокой концентрацией носителей заряда в полупроводнике и туннелированием через барьеры гетероструктуры. Следовательно, область применения контактов такого типа ограничена структурами с сильным легированием и малой толщиной спейсера, используемыми, например, в малощумящих и охлаждаемых НЕМТ. Далее будут рассмотрены более универсальные контакты Ni/Au/Ge.

Результаты исследований таких контактов, а также контактов на основе Ti/AuGe и Cr/AuGe, не содержащих

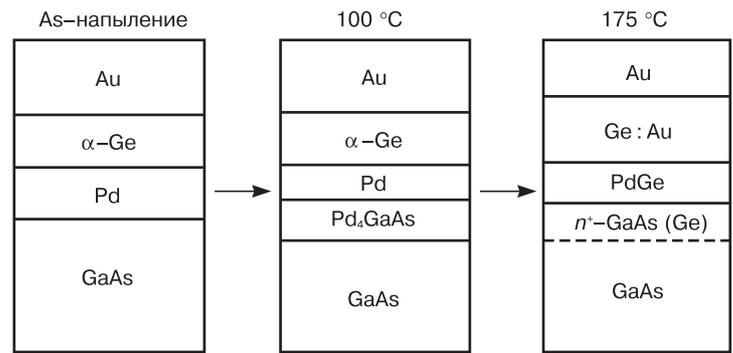


Рис. 2. Механизм образования контакта Au/Ge/Pd [13]  
Fig. 2. Au/Ge/Pd contact formation mechanism [13]

ферромагнитных металлов, приведены в работе [16]. Авторы работы [16] сравнивали электрические сопротивления и морфологию контактов с различным соотношением компонентов, а также магнитные свойства, обусловленные наличием металлического никеля. Наиболее низкое электрическое сопротивление показали контакты с весовым соотношением Au : Ge в сплаве 88 : 12 и толщиной никеля, равной четверти толщины AuGe, однако оно не оптимально с точки зрения морфологии. Меньшей шероховатостью обладают структуры с меньшей концентрацией германия в сплаве AuGe (97,3 : 2,7) и большим количеством никеля (30 % толщины AuGe). Однако они обладали высоким электрическим сопротивлением. Таким образом, соотношение толщин слоев выбирают, исходя из требуемой однородности контакта и его электрического сопротивления. Контакты на основе систем Ti/AuGe, Cr/AuGe и Au/AuGe по сравнению с традиционными не обладали ни лучшей проводимостью, ни морфологией.

В работе [10] предложены толщины слоев Ni, Ge, Au и Ni, равные 10, 60, 120, 10 нм соответственно. Кроме того, в работе [10] показано, что дополнительное напыление слоев Pt и Au толщиной 50 и 100 нм соответственно значительно снижает неровность поверхности и края контакта. Эти контакты были исследованы для структур с глубиной залегания ДЭГ от 20 до 145 нм. Вжигание проводили в течение 1 мин при температурах от 400 до 500 °С в зависимости от образца.

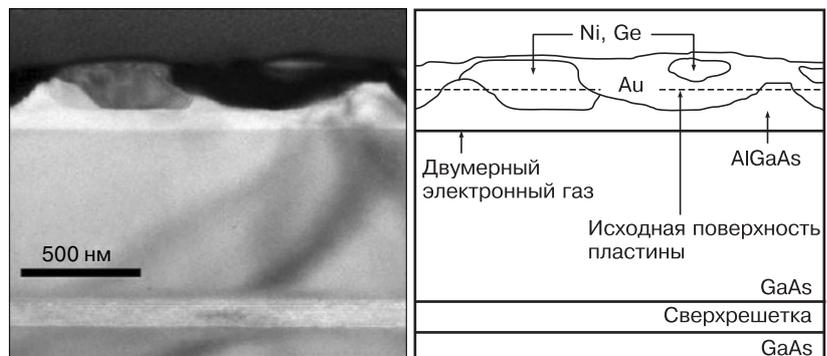


Рис. 3. ПЭМ–изображение контакта, вжигавшегося в течение 5 мин при температуре 450 °С [18]  
Fig. 3. SEM image of contact burnt-in for 5 min at 450 °С [18]

Авторы работы [12] на основании своего эмпирического опыта предложили рассчитывать толщину слоев металлизации более точно, исходя из глубины залегания ДЭГ. При глубине менее 80 нм использовать толщины слоев Ni, Ge и Au, равные 40, 52,8 и 107,2 нм соответственно. Для структур с большей глубиной рекомендуется применять масштабный коэффициент

$$s = \frac{D + 30 \text{ нм}}{110 \text{ нм}},$$

где  $D$  — глубина залегания двумерного электронного газа.

### Механизм образования контакта

В работе [17] приведено несколько наиболее распространенных способов создания контактов к объемному полупроводнику:

- подбор металла с работой выхода электрона, близкой к средству к электрону у полупроводника;
- уменьшение ширины барьера металл—полупроводник за счет увеличения концентрации примеси, что делает его туннельно—прозрачным;
- уменьшение высоты барьера за счет создания узкозонной приконтактной области полупроводника.

Контакты к гетероструктурам подобны контактам к объемному полупроводнику, однако обладают рядом особенностей. Например, согласно работе [10], для объемного GaAs предпочтительным является вжигание при минимальном времени и температуре не более 500 °С, тогда как для рассматриваемых СЛГС время и температура вжигания зависят от параметров структуры и требуют более точного

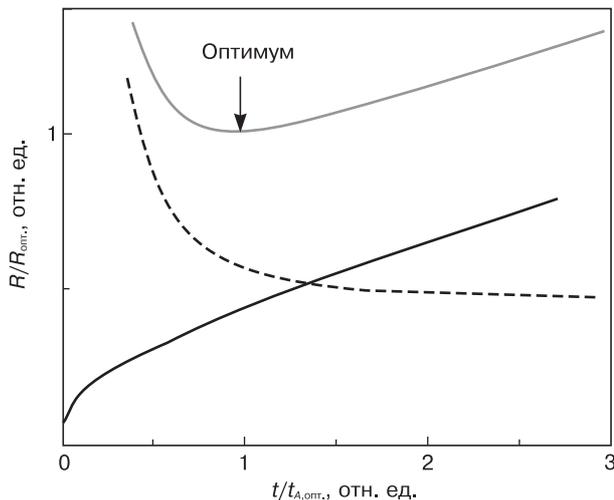


Рис. 4. Зависимости электрического сопротивления слоя полупроводника от времени вжигания [18]: черная линия — вклад боковой диффузии золота; пунктирная — диффузии германия; серая — полное электрическое сопротивление

Fig. 4. Electrical resistance of semiconductor layer as a function of burning-in time [18]: black curve: lateral gold diffusion contribution; dashed curve: germanium diffusion; grey curve: total electrical resistance

контроля. Это послужило причиной исследования внутренней структуры контактов при помощи ПЭМ и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии [18]. Авторы работы [18] обнаружили, что при вжигании образуются области, преимущественно состоящие из никеля или золота. Причем в первых оказалась высокой концентрация германия. Эти области проникали в гетероструктуру не ровным фронтом, а отдельными зернами, причем для получения оптимального контакта они не должны достигать слоя ДЭГ. Германий, диффундируя за пределы никелевого зерна, легирует слой полупроводника между металлом и двумерным газом, как показано на рис. 3. Однако даже увеличение времени вжигания, обуславливающее значительный рост электрического сопротивления контакта, не приводит к проникновению зерен металлизации через двумерный слой.

Авторы работы [18] провели математическое моделирование этого процесса, учитывая два механизма: диффузия германия в глубь полупроводника и диффузия золота вдоль поверхности зерен никеля. Электрическое сопротивление слоя AlGaAs обратно пропорционально концентрации легирующей примеси. Таким образом, вклад первого процесса можно описать следующей формулой:

$$R_{Ge} \propto \int \frac{1}{C(z)/C_0} dz,$$

где  $C(z)/C_0$  — концентрация германия на глубине  $z$ ; интеграл рассчитывается от глубины залегания зерен никеля и золота до двумерного газа. На рис. 4 изображена зависимость электрического сопротивления полупроводника от времени (штриховая линия).

Увеличение электрического сопротивления при дальнейшем вжигании может быть связано с боковой диффузией золота, уменьшающей площадь соприкосновения зерен никеля с легированным полупроводником. В качестве модели было выбрано квадратное зерно площадью  $A_{Ni} = L_{Ni}^2$ . Зависимость расстояния боковой диффузии от времени можно описать следующей формулой:

$$L_{Ni} = L_0 - 2\sqrt{4D_{Au}t},$$

где  $L_0$  — исходный размер зерна;  $D_{Au}$  — коэффициент диффузии золота,  $D_{Au} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Таким образом, вклад этого процесса в общее электрическое сопротивление можно описать как

$$R_{if} \propto \frac{1}{(L_0 - 2\sqrt{4D_{Au}t})^2}.$$

В широком диапазоне значений эта составляющая электрического сопротивления растет линейно от времени (см. рис. 4, черная кривая).

Складывая эти две составляющие, можно получить зависимость удельного электрического сопротивления контакта от времени вжигания. Эта

зависимость изображена серой линией на рис. 4, и из нее следует, что для каждой структуры существует оптимальное время вжигания, при котором электрическое сопротивление контакта оказывается минимальным.

Численное моделирование показало, что это время можно аппроксимировать следующей формулой:  $t = d/v$ , где  $d$  — глубина залегания двумерного газа. Зависимость величины  $v$  от температуры также была получена численным моделированием:

$$v(T) = v_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right),$$

где  $E_a$  — энергия активации, принимаемая равной 0,6 эВ для обоих процессов; значение  $v_0$  принимали равным  $7,6 \cdot 10^{-5}$  м/с. Это грубая модель, но она способна дать приближенное значение времени вжигания, которое впоследствии может быть более точно определено экспериментально. Дальнейшие исследования [19] показали, что при использовании установки импульсного вжигания (*rapid thermal annealing*) требования к точности выдерживания временных интервалов могут быть значительно снижены: при изменении времени от 20 до 350 с удельное электрическое сопротивление контактов менялось от 0,08 до 0,5 Ом · мм соответственно. Однако причина такого сильного влияния скорости изменения температуры на чувствительность ко времени вжигания пока не выяснена.

### Влияние ориентации на электрическое сопротивление

При определении электрического сопротивления контактов методом ТЛМ было сделано предположение, что влияние контакта на электрическое сопротивление полупроводника распространяется на пренебрежимо малое расстояние. Однако, как показано в работе [12], это не всегда верно. При исследовании контактов различных размеров и с разной кристаллографической ориентацией было установлено, что электрическое сопротивление контакта зависит не столько от его площади, сколько от длины его границы с полупроводником. Кроме того, обнаружено, что контакты с разной ориентацией обладают разным электрическим сопротивлением и даже разной его зависимостью от расстояния между соседними контактами.

Контакты, расположенные вдоль направления [011], обладают линейной зависимостью электрического сопротивления от расстояния, т. е. могут быть измерены методом ТЛМ. Исследования образцов с различной шириной мезы показало, что удельное электрическое сопротивление контактов практически не меняется, т. е. влияние ее границы невелико. В то же время контакты, расположенные вдоль направления [01 $\bar{1}$ ], продемонстрировали увеличение электрического сопротивления при уменьше-

нии длины зазора (рис. 5). Кроме того, обнаружили большой разброс электрических сопротивлений контактов, сильную зависимость от ширины мезы и плохую воспроизводимость. С целью минимизации этого эффекта при изготовлении образцов для измерения эффекта Холла была дана рекомендация применять контакты с краем в форме меандра с длинными участками, перпендикулярными к направлению [011].

Подобный эффект зависимости электрического сопротивления контакта от его ориентации был рассмотрен и в работе [20]. На рис. 6 изображена зависимость электрического сопротивлений контактов

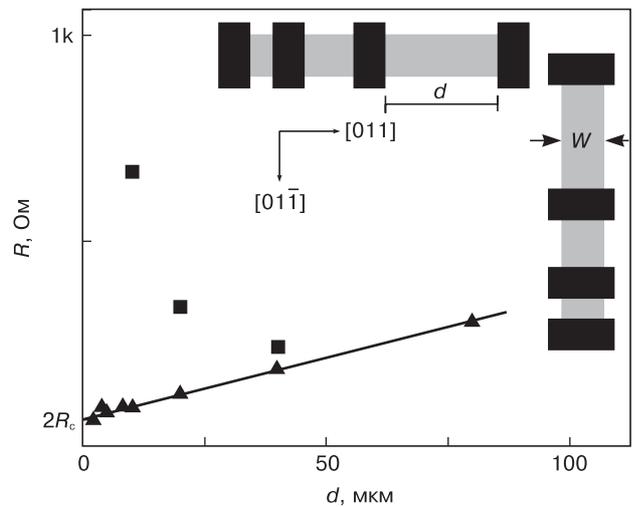


Рис. 5. Зависимость электрического сопротивления зазоров от ориентации и длины [12]: Треугольные маркеры — направление протекания тока [011]; квадратные — [01 $\bar{1}$ ]. Ширина мезы  $w = 10$  мкм

Fig. 5. Electrical resistance of gaps as a function of orientation and length [12]: triangles: [011] current flow direction; squares: [01 $\bar{1}$ ]. Gap width  $w = 10 \mu\text{m}$

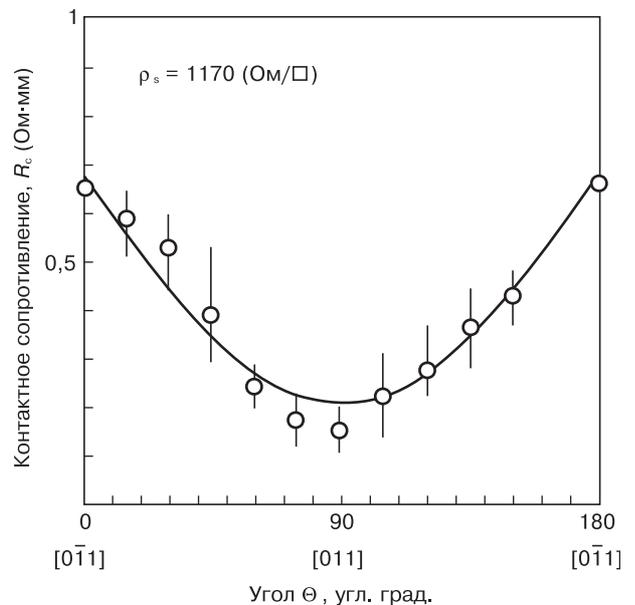


Рис. 6. Зависимость электрического сопротивления контактов от их ориентации [20]

Fig. 6. Electrical resistance of contacts as a function of orientation [20]

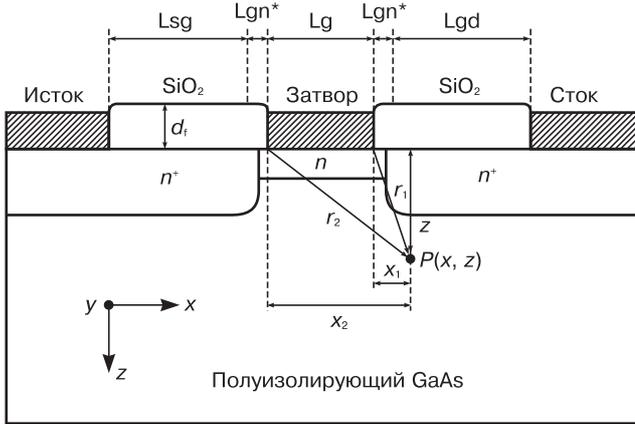


Рис. 7. Исследуемая структура транзистора [23]  
Fig. 7. Test transistor structure [23]

от их ориентации. Для объяснения этой зависимости были предложены три механизма: анизотропия диффузии металла, взаимодействие кристаллических решеток металла и полупроводника и пьезоэффект. Первый механизм самый простой, и его результаты изображены на рис. 6 сплошной линией. В качестве модели было принято, что длина, на которую проникла металлизация, составила 0,41 мкм, что намного больше, чем реальная длина боковой диффузии.

Согласно работе [21], зерна NiGeAs имеют прямоугольную форму и ориентируются вдоль направлений [011] и [01 $\bar{1}$ ]. В этом случае структура и площадь контакта зерна и полупроводника будут зависеть от ориентации.

Наличие на поверхности полупроводника слоев металлов и диэлектриков, формируемых при высоких температурах, а также отличие их коэффициентов термического расширения, приводит к возникновению механических напряжений. Одними из первых на этот эффект обратили внимание авторы работы [22], рассмотревшие пьезоэффект, вызванный таким напряжением на границе объемного GaAs и подзатворного диэлектрика Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> в полевых

транзисторах с различной кристаллографической ориентацией и длиной канала до 10 мкм. Более подробно транзисторы с коротким каналом рассмотрены в работе [23]. Схема такого транзистора изображена на рис. 7. Пьезоэффект, возникающий на границе диэлектрика, приводил к изменению плотности зарядов, описываемому следующей формулой:

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

где  $\gamma_b = 2d_{14}(4 - \nu)/\pi$ ;  $\nu$  — коэффициент Пуассона, для GaAs  $\nu = 0,23$ ;  $d_{14}$  — пьезокоэффициент, для GaAs  $d_{14} = 2,69 \cdot 10^{-17}$  Кл/дин (1 дин =  $10^{-5}$  Н);  $d_f$  — толщина диэлектрика;  $\beta = (2 + \nu)/(4 - \nu) = 0,59$ ;  $\sigma_f$  — механическое напряжение. Эта формула соответствует направлению [011], для направления [01 $\bar{1}$ ] необходимо изменить знак  $d_{14}$ , а для других направлений — воспользоваться поворотом тензора пьезокоэффициентов. Рассмотрим полевые транзисторы с коротким затвором, на которых пьезоэффект наиболее заметен. В качестве изолятора был применен SiO<sub>2</sub>, приводящий к возникновению напряжения порядка  $10^9$  дин/см<sup>2</sup>. Длина затвора менялась от 0,5 до 5 мкм, расстояние от затвора до стока и истока составляло 0,75 мкм.

Расчеты двумерного случая методом конечных элементов позволили сделать вывод, что в транзисторах с коротким каналом пьезоэффект оказался существенным фактором, который накладывает определенные ограничения на минимальную длину канала, поскольку, как видно из приведенной выше формулы, с уменьшением длины канала значение пьезоэффекта возрастает. Также, согласно этой формуле, пьезозаряды при ориентациях [011] и [01 $\bar{1}$ ] имеют противоположные значения. Для сравнения рассмотрим модель транзистора с ориентацией [001], в котором из-за симметрии кристалла пьезоэффект наблюдаться не будет. Зависимости токов стока

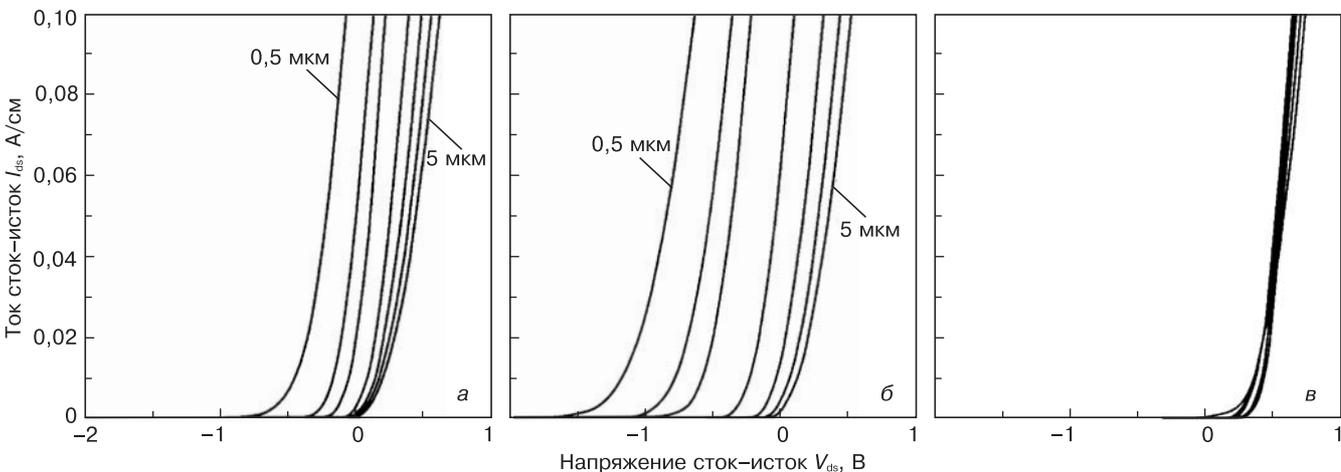


Рис. 8. Зависимости тока сток–исток от напряжения на затворе для различных ориентаций [23]:  
а — [001]; б — [011]; в — [01 $\bar{1}$ ].  
Длина канала составляет 0,5, 0,75, 1, 2, 3, 4 и 5 мкм;  $d_f = 1200$  нм

Fig. 8. Source-drain current as a function of gate voltage for different orientations [23]:  
а — [001]; б — [011]; в — [01 $\bar{1}$ ]. Channel length 0.5, 0.75, 1, 2, 3, 4 and 5  $\mu$ m and  $d_f = 1200$  nm

от напряжений на затворе приведены на рис. 8, а. Из рис. 8 видно влияние длины канала: при увеличении длины более 2 мкм пороговое напряжение перестает изменяться. Для транзисторов с ориентациями [011] и [01 $\bar{1}$ ], графики зависимостей которых приведены на рис. 8, б и в соответственно, ситуация иная. В случае ориентации [011] влияние длины канала значительно сильнее. Напротив, при ориентации [01 $\bar{1}$ ] пороговое напряжение почти не зависит от длины канала, т. е. пьезоэффект компенсирует его влияние.

Помимо необходимости учета пьезоэффекта при проектировании полупроводниковых приборов, он может быть использован для управления потенциальным профилем в плоскости двумерного электронного газа. Например, в работе [24] предложен способ формирования планарной сверхрешетки путем нанесения металлических затворов на поверхность полупроводника.

### Заключение

Наиболее распространенным методом создания контактов к селективно-легированным гетероструктурам на основе AlGaAs/GaAs является нанесение металлизации Ni/Au/Ge с последующим вплавлением. Такие контакты обеспечивают большую глубину легирования, однако обладают неровными краем, поверхностью и границей раздела металл—полупроводник. Для достижения оптимального соотношения электрического сопротивления контакта и его морфологии выбирают соотношение толщин слоев и режим вжигания. Обычно вжигание проводят при температуре от 400 до 500 °С в течение 1—5 мин в зависимости от конкретной структуры. Качество поверхности может быть существенно улучшено добавлением слоев металлизации, например Au/Pt.

Значительно большей однородностью при сравнимом электрическом сопротивлении обладают контакты к сильнолегированным гетероструктурам с тонким спейсером, формируемые методом твердофазной рекристаллизации из нанесенных слоев Au/Ge/Pd.

В определенных ситуациях контакты к таким структурам проявляют анизотропию электрических характеристик, и наблюдается влияние на них соседних контактов, расположенных на расстоянии в десятки микрометров и даже больше, что может накладывать существенные ограничения на топологию структур. Наиболее вероятное объяснение этого явления — влияние пьезоэлектрического эффекта, возникающего вследствие механических напряжений, вносимых контактами.

### Библиографический список

1. Алфёров, Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур / Ж. И. Алфёров // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32, вып. 1. – С. 3—18.

2. Шука, А. А. Нанoeлектроника / А. А. Шука. – М.: Физмат-книга, 2007. – 464 с.

3. Beenakker, C. W. J. Quantum transport in semiconductor nanostructures / C. W. J. Beenakker, H. van Houten // Solid State Physics. – 1991. – V. 44. – P. 1—228. DOI: 10.1016/S0081-1947(08)60091-0

4. Contacts to Semiconductors: Fundamentals and Technology / Ed. By L. J. Brillson. – Park Ridge (NJ) : Noyes Publication, 1993. – 680 p. DOI: 10.1002/adma.19950070123

5. Ghandhi, S. K. VLSI Fabrication Principles / S. K. Ghandhi. – New York : Wiley and sons, 1994. – 837 p.

6. Braslau, N. Metal–semiconductor contacts for GaAs bulk effect devices / N. Braslau, J. B. Gunn, J. L. Staples // Solid-State Electronics. – 1967. – V. 10, iss. 5. – P. 381—383. DOI: 10.1016/0038-1101(67)90037-8

7. Baca, A. G. A survey of ohmic contacts to III–V compound semiconductors / A. G. Baca, F. Ren, J. C. Zolper, R. D. Briggs, S. J. Pearton // Thin Solid Films. – 1997. – V. 308–309. – P. 599—606. DOI: 10.1016/S0040-6090(97)00439-2

8. Reeves, G. K. Obtaining the specific contact resistance from transmission line measurements / G. K. Reeves, H. B. Harrison // IEEE Electron. Device. Lett. – 1982. – V. 3, N 5. – P. 111. DOI: 10.1109/EDL.1982.25502

9. Heiblum, M. Characteristics of AuGeNi ohmic contacts to GaAs / M. Heiblum, M. I. Nathan, C. A. Chang // Solid-St. Electron. – 1982. – V. 25. – P. 185. DOI: 10.1016/0038-1101(82)90106-X

10. Jin, Y. Ohmic contact to *n*-type bulk and  $\delta$  doped Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs MODFET type heterostructures and its applications / Y. Jin // Solid-State Electronics. – 1991. – V. 34, N 2, P. 117—121. DOI: 10.1016/0038-1101(91)90076-B

11. Baer, S. Transport Spectroscopy of Confined Fractional Quantum Hall Systems. Springer Series in Solid-State Sciences. V. 183 / S. Baer, K. Ensslin. – Springer International Publishing, 2015. – 308 p. DOI 10.1007/978-3-319-21051-3

12. Göktaş, O. Alloyed ohmic contacts to two-dimensional electron system in AlGaAs/GaAs heterostructures down to submicron length scale / O. Göktaş, J. Weber, K. von Klitzing // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. 2008. – V. 40, iss. 5. – P. 1579—1581. DOI: 10.1016/j.physe.2007.09.115

13. Wang, L. C. Ohmic contact formation mechanism of the Au/Ge/Pd/*n*-GaAs system formed below 200 °C / L. C. Wang, P. H. Hao, J. Y. Cheng, F. Deng, S. S. Lau // J. Appl. Phys. – 1996. – V. 79, iss. 8. – P. 4211. DOI: 10.1063/1.361789

14. Wang, L. C. Low-resistance nonspiking ohmic contact for AlGaAs/GaAs high electron mobility transistors using the Ge/Pd scheme / L. C. Wang, S. S. Lau, E. K. Hsieh, J. R. Velebir // Appl. Phys. Lett. – 1989. – V. 54, iss. 26. – P. 2677—2679. DOI: 10.1063/1.101032

15. Morozov, S. V. Electrical properties of PdGe ohmic contacts to GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterostructures at liquid helium temperature / S. V. Morozov, Yu. V. Dubrovskii, V. N. Abrosimova, J. Würfl // Appl. Phys. Lett. – 1998. – V. 72, N 22. – P. 2882—2884. DOI: 10.1063/1.121489

16. Abhilash, T. S. Magnetic, electrical and surface morphological characterization of AuGe/Ni/Au Ohmic contact metallization on GaAs/AlGaAs multilayer structures / T. S. Abhilash, Ch. Ravi Kumar, G. Rajaram // J. Nano-Electron. Phys. – 2011. – V. 3, N 1. – P. 396—403.

17. Бланк, Т. В. Механизмы протекания тока в омических контактах металл–полупроводник / Т. В. Бланк, Ю. А. Гольдберг // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41, вып. 11. – С. 1281—1308.

18. Кооп, Е. J. On the annealing mechanism of AuGe/Ni/Au ohmic contacts to a two-dimensional electron gas in GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterostructures / E. J. Koop, M. J. Iqbal, F. Limbach, M. Boute, B. J. van Wees, D. Reuter, A. D. Wieck, B. J. Kooi, C. H. van der Wal // Semicond. Sci. Technol. – 2013. – V. 28, N 2. – P. 025006. DOI: 10.1088/0268-1242/28/2/025006

19. Iqbal, M. J. Robust recipe for low-resistance ohmic contacts to a two-dimensional electron gas in a GaAs/AlGaAs heterostructure / M. J. Iqbal, D. Reuter, A. D. Wieck, C. H. van der Wal // arXiv:1407.4781v1 [cond-mat.mes-hall]. – 2014. URL: https://arxiv.org/abs/1407.4781

20. Kamada, M. Investigation of orientation effect on contact resistance in selectively doped AlGaAs/GaAs heterostructures / M. Kamada, T. Suzuki, F. Nakamura, Y. Mori, M. Arai // Appl. Phys. Lett. – 1986. – V. 49. – P. 1263. DOI: 10.1063/1.97381

21. Christou, A. Solid phase formation in Au : Ge/Ni, Ag/In/Ge, In/Au : Ge GaAs ohmic contact systems / A. Christou // Solid State Electron. – 1979. – V. 22. – P. 141. DOI: 10.1016/0038-1101(79)90106-0

22. **Asbeck, P. M.** Piezoelectric effects in GaAs FET's and their role in orientation-dependent device characteristics / P. M. Asbeck, Ch.-P. Lee, M.-Ch. F. Chang // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1984. – V. 31, N 10. – P. 1377–1380. DOI: 10.1109/T-ED.1984.21719

23. **Shin-Shien Lo.** Two-dimensional simulation of orientation effects in self-aligned GaAs MESFET's / Shin-Shien Lo, Chien-

Ping Lee // IEEE Trans. on Electron Devices. – 1990. – V. 37, N 10. – P. 2130–2140. DOI: 10.1109/16.59901

24. **Larkin, I. A.** Theory of potential modulation in lateral surface superlattices. II. Piezoelectric effect // I. A. Larkin, J. H. Davies, A. R. Long, R. Cuscó / Physical Rev. B. – 1997. – V. 56, N 23. – P. 15242–15251. DOI: 10.1103/PhysRevB.56.15242

ISSN 1609–3577 Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering. 2016, vol. 19, no. 4, pp. 271–278.

## Specifics of fabrication of Ohmic contacts to AlGaAs/GaAs heterostructures with a 2D electron gas

S. P. Kurochka<sup>1</sup>, M. V. Stepushkin<sup>1,2</sup>, V. I. Borisov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National University of Science and Technology MISiS,  
4 Leninsky Prospekt, Moscow 119049, Russia

<sup>2</sup>Kotel'nikov' Institute of Radio Engineering and Electronics RAS,  
1 Vvedenskogo Sq., Fryazino, Moscow Reg. 141190, Russia

**Abstract.** This paper reviews the literature concerning the specifics of creating Ohmic contacts to AlGaAs/GaAs heterostructures with a 2D electron gas with high electron mobility. The process of annealing the contacts based of the Ni/Au/Ge system is considered, and the recommended parameters of the metalization layers are borrowed from the literature. This process allows reproducible fabrication of Ohmic contacts with a low electrical resistance to temperatures below 4K. Several mechanisms are analyzed which could result in the experimentally observed dependence of the contact parameters on crystallographic orientation. A method of contact fabrication with Au/Ge/Pd metallization is described for which the contact is formed by mutual diffusion and interaction of the metals and the semiconductor in the solid phase at temperatures below 200 °C. This provides for high composition homogeneity of the contacts, a smooth metal/semiconductor boundary and can reduce the effect of orientation on the electric characteristics of the contact.

**Keywords:** two-dimensional electron gas (2DEG), Ohmic contact, GaAs, heterostructure, crystallographic orientation

### References

1. Alferov Zh. I. The history and future of semiconductor. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*, 1998, vol. 32, no. 1, pp. 3–18. (In Russ.)
2. Shchuka A. A. *Nanoelektronika* [Nanoelectronics]. Moscow: Fizmatkniga, 2007. 464 p. (In Russ.)
3. Beenakker C. W. J., van Houten H. Quantum transport in semiconductor nanostructures. *Solid State Physics*. 1991, vol. 44, pp. 1–228. DOI: 10.1016/S0081-1947(08)60091-0
4. Contacts to Semiconductors: Fundamentals and Technology / Ed. By L. J. Brillson. Park Ridge (NJ) : Noyes Publication, 1993. 680 p. DOI: 10.1002/adma.19950070123
5. Ghandhi S. K. VLSI Fabrication Principles. New York : Wiley and sons, 1994. 837 p.
6. Braslau N., Gunn J. B., Staples J. L. Metal-semiconductor contacts for GaAs bulk effect devices. *Solid-State Electronics*, 1967, vol.10, no. 5, pp. 381–383. DOI: 10.1016/0038-1101(67)90037-8
7. Baca A. G., Ren F., Zolper J. C., Briggs R. D., Pearson S. J. A survey of ohmic contacts to III–V compound semiconductors. *Thin Solid Films*, 1997, vol. 308–309, pp. 599–606. DOI: 10.1016/S0040-6090(97)00439-2
8. Reeves G. K., Harrison H. B. Obtaining the specific contact resistance from transmission line measurements. *IEEE Electron. Device. Lett.*, 1982, vol. 3, no. 5, p. 111. DOI: 10.1109/EDL.1982.25502
9. Heiblum M., Nathan M. I., Chang C. A. Characteristics of AuGeNi ohmic contacts to GaAs. *Solid-St. Electron.*, 1982, vol. 25, p. 185. DOI: 10.1016/0038-1101(82)90106-X
10. Jin Y. Ohmic contact to n-type bulk and  $\delta$  doped Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs MODFET type heterostructures and its applications. *Solid-State Electronics*, 1991, vol. 34, no. 2, pp. 117–121. DOI: 10.1016/0038-1101(91)90076-B

### Information about authors:

**Sergey P. Kurochka**<sup>1</sup> — Cand. Sci (Eng.), Associate Professor; **Mikhail V. Stepushkin**<sup>1,2</sup> — PostGraduate Student(1), Senior Engineer(2) (cokpoweheu@yandex.ru); **Vitaly I. Borisov**<sup>2</sup> — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Head of Laboratory.

11. Baer S., Ensslin K. Transport Spectroscopy of Confined Fractional Quantum Hall Systems. Springer Series in Solid-State Sciences. V. 183. Springer International Publishing, 2015. 308 p. DOI: 10.1007/978-3-319-21051-3

12. Göktaş O., Weber J., Weis J., von Klitzing K. Alloyed ohmic contacts to two-dimensional electron system in AlGaAs/GaAs heterostructures down to submicron length scale. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2008, vol. 40, no. 5, pp. 1579–1581. DOI: 10.1016/j.physe.2007.09.115

13. Wang L. C., Hao P. H., Cheng J. Y., Deng F., Lau S. S. Ohmic contact formation mechanism of the Au/Ge/Pd/n-GaAs system formed below 200 °C. *J. Appl. Phys.*, 1996, vol. 79, no. 8, pp. 4211. DOI: 10.1063/1.361789

14. Wang L. C., Lau S. S., Hsieh E. K., Velebir J. R. Low-resistance nonspiking ohmic contact for AlGaAs/GaAs high electron mobility transistors using the Ge/Pd scheme. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, vol. 54, no. 26, pp. 2677–2679. DOI: 10.1063/1.101032

15. Morozov S. V., Dubrovskii Yu. V., Abrosimova V. N., Würfl J. Electrical properties of PdGe ohmic contacts to GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterostructures at liquid helium temperature. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, vol. 72, no. 22, pp. 2882–2884. DOI: 10.1063/1.121489

16. Abhilash T. S., Kumar Ch. R., Rajaram G. Magnetic, electrical and surface morphological characterization of AuGe/Ni/Au Ohmic contact metallization on GaAs/AlGaAs multilayer structures. *J. Nano-Electron. Phys.*, 2011, vol. 3, no. 1, pp. 396–403.

17. Blank T. V. Mechanisms of current flow in ohmic metal-semiconductor contacts. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*, 2007, vol. 41, no. 11, pp. 1281–1308. (In Russ.)

18. Koop E. J., Iqbal M. J., Limbach F., Boute M., van Wees B. J., Reuter D., Wieck A. D., Kooi B. J., van der Wal C. H. On the annealing mechanism of AuGe/Ni/Au ohmic contacts to a two-dimensional electron gas in GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterostructures. *Semicond. Sci. Technol.*, 2013, vol. 28, no. 2, p. 025006. DOI: 10.1088/0268-1242/28/2/025006

19. Iqbal M. J., Reuter D., Wieck A. D., van der Wal C. H. Robust recipe for low-resistance ohmic contacts to a two-dimensional electron gas in a GaAs/AlGaAs heterostructure. URL: <https://arxiv.org/abs/1407.4781>

20. Kamada M., Suzuki T., Nakamura F., Mori Y., Arai M. Investigation of orientation effect on contact resistance in selectively doped AlGaAs/GaAs. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, vol. 49, p. 1263. DOI: 10.1063/1.97381

21. Christou A. Solid phase formation in Au : Ge/Ni, Ag/In/Ge, In/Au : Ge GaAs ohmic contact systems. *Solid State Electron.*, 1979, vol. 22, p. 141. DOI: 10.1016/0038-1101(79)90106-0

22. Asbeck P. M., Lee Ch.-P., Chang M.-Ch. F. Piezoelectric effects in GaAs FET's and their role in orientation-dependent device characteristics. *IEEE Transactions on electron devices*, 1984, vol. 31, no. 10, pp. 1377–1380. DOI: 10.1109/T-ED.1984.21719

23. Shin-Shien Lo, Chien-Ping Lee. Two-dimensional simulation of orientation effects in self-aligned GaAs MESFET's. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1990, vol. 37, no. 10, pp. 2130–2140. DOI: 10.1109/16.59901

24. Larkin I. A., Davies J. H., Long A. R., Cuscó R. Theory of potential modulation in lateral surface superlattices. II. Piezoelectric effect. *Physical Rev. B.*, 1997, vol. 56, no. 23, pp. 15242–15251. DOI: 10.1103/PhysRevB.56.15242