

**ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ /
PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY**

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2025. Т. 28, № 1. С. 44—54.

DOI: 10.17073/1609-3577j.met202407.602

УДК 621.315.592

**Параметры омических контактов и учет влияния
реальных размеров образцов на полевую зависимость
дрейфовой скорости в слоях $\text{In}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{As}$**

© 2025 г. В. А. Кузнецов^{1,2,✉}, Д. Ю. Протасов^{1,2}, Д. В. Дмитриев¹,
В. Я. Костюченко³, Д. И. Роголо¹, **К. С. Журавлев¹**

¹ *Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова
Сибирского отделения Российской академии наук,
просп. Акад. Лаврентьева, д. 13, Новосибирск, 630090, Российская Федерация*

² *Новосибирский государственный технический университет,
просп. Карла Маркса, д. 20, Новосибирск, 630073, Российская Федерация*

³ *Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
ул. Плеханова, д. 10, Новосибирск, 630108, Российская Федерация*

✉ Автор для переписки: vadya.suz98@gmail.com

Аннотация. Рассмотрен способ получения омического контакта к слоям $\text{In}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{As}$. Контактное сопротивление измерялось методом длинной линии с радиальной геометрией контактов. Показано, что контакт на основе Ni/Au/Ge/Au/Ge/Ni/Au является омическим и достигает минимального удельного контактного сопротивления $6 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ после вжигания при температуре 450 °С в течение 5 мин в атмосфере формовочного газа. Для измерений дрейфовой скорости в сильном электрическом поле выбрана форма образца, исключающая попадание доменов сильного поля в область измерений. Получено выражение, позволяющее корректно рассчитывать значения напряженности электрического поля и дрейфовой скорости с учетом реальных геометрических размеров образца, определяемых методом растровой электронной микроскопии. Показано, что использование полученного выражения позволяет получать одинаковые полевые зависимости дрейфовой скорости для образцов $\text{In}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{As}$ с разными геометрическими размерами.

Ключевые слова: гетероструктура $\text{In}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{As}/\text{GaAs}$, контактное сопротивление, сильное электрическое поле, дрейфовая скорость

Благодарности: Рост образцов выполнен в рамках Государственного задания Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (тема № FWGW-2025-0024). Создание контактных площадок методами литографии, исследование их морфологии методом растровой электронной микроскопии и измерения вольтамперных характеристик выполнены на оборудовании ЦКП «Наноструктуры» при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-72-10124). Авторы благодарны Ю.А. Живодкову за проведение данных измерений.

Для цитирования: Кузнецов В.А., Протасов Д.Ю., Дмитриев Д.В., Костюченко В.Я., Роголо Д.И., Журавлев К.С. Параметры омических контактов и учет влияния реальных размеров образцов на полевую зависимость дрейфовой скорости в слоях $\text{In}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{As}$. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2025; 28(1): 44—54. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202407.602>

Parameters of ohmic contacts and consideration of the influence of actual sample sizes on the field dependence of the drift velocity in $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$ layers

V. A. Kuznetsov^{1,2,✉}, D. Yu. Protasov^{1,2}, D. V. Dmitriev¹, V. Ya. Kostyuchenko³,
D. I. Rogilo¹, K. S. Zhuravlev¹

¹ *Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 13 Acad. Lavrentieva Ave., Novosibirsk 630090, Russian Federation*

² *Novosibirsk State Technical University, 20 Karla Marksa Ave., Novosibirsk 630073, Russian Federation*

³ *Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10 Plakhotnogo Str., Novosibirsk 630108, Russian Federation*

✉ Corresponding author: vadya.suz98@gmail.com

Abstract. The method of obtaining ohmic contact to $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$ layers is given in this paper. Contact resistance was measured by the transmission line method with radial geometry of contacts. It is shown that the Ni/Au/Ge/Au/Ge/Ni/Au-based contact is ohmic and reaches a minimum specific contact resistance of $6 \cdot 10^{-5} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}^2$ after annealing at $450 \text{ }^\circ\text{C}$ for 5 min. in the atmosphere of forming gas. To measure the dependence of the drift velocity on a high electric field, a sample with a specific shape was chosen that prevents the penetration of high field domains into the measurement area. An expression is obtained that allows for accurate calculation of electric field strength and drift velocity, considering the actual geometric sizes of the sample as determined by scanning electron microscopy. It is shown that the obtained expression allows us to obtain the same field dependences of the drift velocity for $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$ samples with different geometrical sizes.

Keywords: heterostructure $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}/\text{GaAs}$, contact resistance, high electric field, drift velocity

Acknowledgments: The growth of the samples was carried out within the framework of the State Assignment of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (topic No. FWGW–2025–0024). The creation of contact pads by lithography methods, the study of their morphology by scanning electron microscopy and the measurements of the current–voltage characteristics were performed on the equipment of the Nanostructures Collective Use Center with the financial support of the Russian Science Foundation (grant No. 22–72–10124). The authors are grateful to Yu.A. Zhivodkov for carrying out these measurements.

For citation: Kuznetsov V.A., Protasov D.Yu., Dmitriev D.V., Kostyuchenko V.Ya., Rogilo D.I., Zhuravlev K.S. Parameters of ohmic contacts and consideration of the influence of actual sample sizes on the field dependence of the drift velocity in $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$ layers. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2025; 28(1): 44–54. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202407.602>

Введение

Благодаря высокому быстродействию, большой эффективности и низкому шуму транзисторы, изготовленные на гетероструктурах с повышенной

подвижностью электронов (*High Electron Mobility Transistor*, *HEMT*) широко применяются в современных приемно–передающих модулях сверхвысокочастотных приборов [1–3]. Проводящий канал таких транзисторов образован тройным сплавом

© 2025 National University of Science and Technology “MISIS”.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

InGaAs. Для этого слой InGaAs помещается между широкозонными барьерами InAlAs или GaAlAs. При росте гетероструктуры на подложке GaAs слой InGaAs вырастает напряженным вследствие различия постоянных решетки InGaAs и GaAs [4]. Мольная доля индия для такого слоя в транзисторных гетероструктурах лежит в диапазоне 0,16—0,25, когда еще возможен псевдоморфный рост InGaAs толщиной порядка 10 нм. В этом случае в название транзисторных гетероструктур добавляется слово «псевдоморфные» (*pseudomorphic*) — рНЕМТ.

Быстродействие высокочастотных транзисторов определяется как значением насыщенной скорости дрейфа, так и длиной затвора [5]. Поэтому насыщенная скорость дрейфа является важным параметром полупроводниковой гетероструктуры, во многом определяющим свойства транзисторов. Для моделирования полевой зависимости дрейфовой скорости электронов в гетероструктурах широко используется метод Монте-Карло [6, 7]. Однако при составлении математической модели требуется знание многочисленных параметров, определяющих как механизмы рассеяния, так и особенности зонной структуры [8]. Так как заметная доля этих параметров известна с невысокой точностью, то в процессе моделирования часть этих параметров уточняется так, чтобы рассчитанные полевые зависимости дрейфовой скорости лучше соответствовали экспериментальным данным. Естественно, что число таких варьируемых параметров стремятся минимизировать для повышения достоверности получаемых результатов. В транзисторах рНЕМТ вследствие механических напряжений в слое InGaAs эти параметры изменяются относительно приведенных в литературе значений, так как при этом меняется ширина запрещенной зоны и положение верхних боковых долин. Это приводит к существенному уменьшению дрейфовой скорости [9]. Следовательно, задача моделирования полевых зависимостей дрейфовой скорости еще более усложняется. Для упрощения процедуры моделирования необходимо сравнивать теоретические значения с экспериментальными, полученными для ненапряженного слоя InGaAs с мольной долей In в диапазоне 0,16—0,25.

Полевая зависимость дрейфовой скорости чаще всего измеряется методом проводимости, когда к исследуемому образцу прикладывают короткие импульсы напряжения [10—12]. При изготовлении образцов для измерений подвижности и скорости насыщенного дрейфа электронов особое внимание уделяется омическим контактам. К ним предъявляется ряд требований, а именно: вольт-амперная характеристика (**ВАХ**) контакта должна быть линейной, и контактное сопротивление должно

быть мало по сравнению с общим сопротивлением образца. Эти требования удовлетворяются подбором оптимального состава контактной системы и оптимальных условий вжигания контактов.

Условия формирования омических контактов к слоям InGaAs *n*-типа проводимости были определены ранее для случая высокого содержания индия в сплаве:

- для мольного содержания In $x = 0,5$ в работах [13, 14];
- для $x = 0,53$ в работах [15, 16];
- для $x = 0,7$ в работе [17].

Все используемые конструкции контактов содержали или кремний, или германий в качестве элемента для легирования подконтактной области. Температуру отжига варьировали в диапазоне 250—500 °С, а время — от 10 с до нескольких минут в атмосфере инертного газа. Полученные значения удельного сопротивления контактов лежат в диапазоне от $2 \cdot 10^{-8}$ до $1,4 \cdot 10^{-6}$ Ом · см². Для слоев InGaAs с $x = 0,16 \div 0,25$ параметры отжига и данные об удельном сопротивлении контактов в литературе отсутствуют.

Измерения полевой зависимости дрейфовой скорости проводят в сильных электрических полях, в которых первоначально однородный полупроводник становится электрически неоднородным из-за образования и распространения доменов [18, 19]. Для устранения влияния такой неоднородности требуется использование специальной конструкции образцов для измерений.

Образец для проведения измерений скорости носителей заряда в сильном электрическом поле, как правило, имеет неодинаковую ширину: она уменьшается между контактными площадками и активной областью образца, где расположены потенциальные контакты. Это нужно для того, чтобы уменьшить инжекцию носителей из контактов. Также достоинством такой формы образца является то, что в случае зарождения вблизи контактов доменов электрического поля эти домены не будут распространяться в область сужения [20]. А значит, это позволит прикладывать большие электрические поля без пробоя по сравнению с образцами прямоугольной формы. Однако в работах [18—20] не проводился поиск оптимального расстояния от потенциальных контактов до активной области образца.

Ниже представлены результаты исследования влияния режимов вжигания на величину контактного сопротивления к ненапряженным слоям In_{0,16}Ga_{0,84}As, выращенным на подложках GaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии (**МЛЭ**) с использованием метаморфного буфера на основе InAlAs. Анализируется влияние геометрических размеров образцов на вид полевой зависимости скорости дрейфа в сильном электрическом поле.

Образцы и методы исследования

Гетероструктуры $\text{In}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{As}/\text{GaAs}$ были выращены методом МЛЭ на *epi-ready* подложках GaAs с ориентацией (100). Для этого использовалась установка Riber Compact 21 T. Процесс и скорости роста, а также состав слоев контролировали методом дифракции быстрых электронов (ДБЭ). Конструкция гетероструктуры представлена на рис. 1.

Буфер InAlAs общей толщиной 550 нм был метаморфным, концентрация индия в нем изменялась от 0,04 на границе с подложкой до 0,15 на границе со слоем $\text{In}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{As}$. При таком содержании индия слои $\text{In}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{As}$ и $\text{In}_{0,15}\text{Al}_{0,85}\text{As}$ согласованы по параметру решетки. Толщина слоя $\text{In}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{As}$ составляла 500 нм, легирование кремнием проводили во время роста. По измерениям эффекта Холла методом Ван-дер-Пау в слабом электрическом поле и магнитном поле 0,2 Тл были определены концентрация и подвижность электронов: $n = 1,4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $\mu = 4300 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Уровень концентрации подбирали таким, что бы слоевая концентрация ($7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) была сопоставимой с концентрацией двумерного электронного газа в гетероструктурах $\text{AlGaAs}/\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ с донорно-акцепторным легированием [21].

Для создания омического контакта к $\text{In}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{As}$ использовали металлизацию Ni/Au/Ge/Au/Ge/Ni/Au с толщинами 5/40/20/40/20/30/120 нм соответственно. Металлические слои осаждали методом термического испарения в вакууме. После осаждения проводили термический отжиг в атмосфере формовочного газа (N_2 95 %, H_2 5 %) при температуре 420, 450, 480 и 500 °С в течение 5 мин на установке быстрого термического отжига STE RTA 100.

Для измерения контактного сопротивления использовали метод длинной линии с радиальной геометрией контактов с постоянным соотношением $r_1/r_2 = 2,5$ [22]. Структуру для измерений, конструкция которой приведена на рис. 2, изготавливали методом фотолитографии. Малый

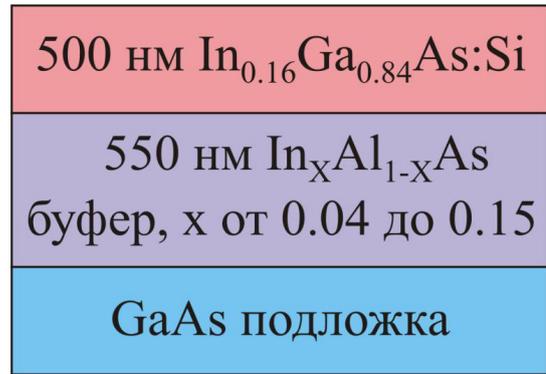


Рис. 1. Конструкция исследуемой гетероструктуры
Fig. 1. Design of the heterostructure under study

радиус r_1 составлял 50, 75, 100 и 150 мкм. Преимуществом этого метода является то, что сопротивление между зондом и контактным слоем не будет оказывать влияние на измеряемое контактное сопротивление.

ВАХи изготовленных контактов измеряли при помощи ручной зондовой станции Cascade M150 и параметрического анализатора Agilent B1500A при комнатной температуре. Значение контактного сопротивления рассчитывали при помощи выражения [22]:

$$R_t = \frac{R_s}{2\pi} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) + \frac{R_s}{2\pi} \frac{1}{\alpha r_1} \frac{I_0(\alpha r_1)}{I_1(\alpha r_1)}, \quad (1)$$

где R_t — полное сопротивление, измеряемое между контактными площадками; R_s — слоевое сопротивление полупроводника; r_1, r_2 — внешний и внутренний радиусы соответствующих контактных площадок (см. рис. 2); $I_0(\alpha r_1)$ и $I_1(\alpha r_1)$ — модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядков соответственно; $\alpha = (R_s/\rho_c)^{1/2}$; ρ_c — удельное сопротивление омических контактов.

Измерения полевой зависимости дрейфовой скорости в сильном электрическом поле проводили на образцах, схема которых приведена на рис. 3. Дрейфовая скорость измеряется в самой узкой части образца размером $12 \times 4 \text{ мкм}^2$ (активной об-

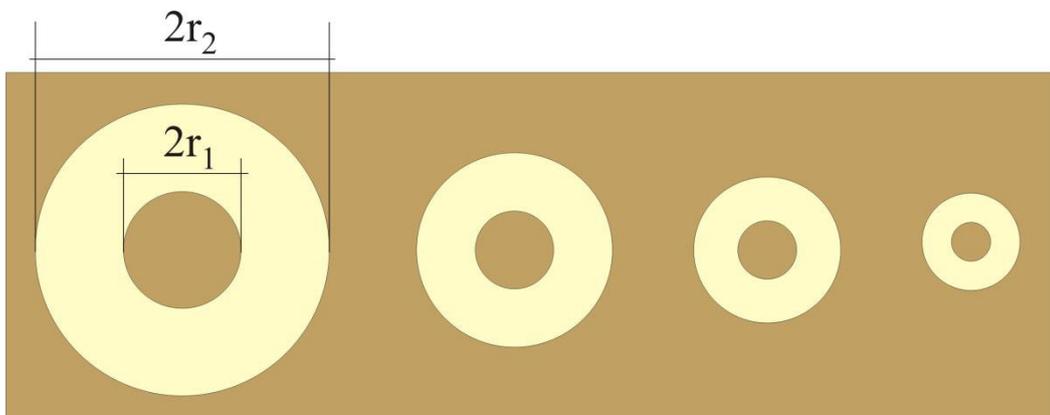


Рис. 2. Структура для измерения контактного сопротивления
Fig. 2. Structure for measuring contact resistance

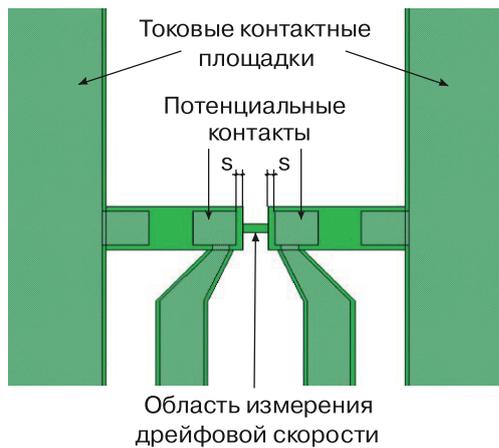


Рис. 3. Схема образца для измерения полевой зависимости дрейфовой скорости

Fig. 3. Schematic diagram of the sample for measuring the field dependence of the drift velocity

ласти). Импульсы напряжения прикладываются к токовым контактным площадкам, падающее на активной области образца напряжение измеряется на потенциальных контактах. В структурах варьировали расстояние s от металлизации потенциальных контактов до области сужения. Величина s составляла 3, 5 и 7 мкм. Так как в процессе изготовления образцов применяется жидкостное травление на глубину более 0,5 мкм, то в результате неконтролируемого бокового подтравления ширина области сужения может уменьшиться с 4 до ~3 мкм. Поэтому для точного определения размеров изготовленных при помощи фотолитографии образцов использовали растровый электронный микроскоп Hitachi SU8220.

Для измерения полевой зависимости дрейфовой скорости на образец подавались короткие импульсы длительностью 800 нс, амплитуда которых изменялась от 0 до 100 В. Схема измерений приведена на рис. 4. Последовательно с образцом соединялся резистор R_2 номиналом 50 Ом для измерения тока. Сопротивление $R_1 = 50$ Ом, па-

раллельное образцу, служило для согласования входного сопротивления источника напряжения и измерительной схемы. Напряжения V_1 , V_2 и V_3 измеряли при помощи 4-х канального осциллографа Rigol MSO5204.

Расчет напряженности электрического поля E , подвижности μ и дрейфовой скорости v электронов проводился по следующим формулам:

$$E = \frac{V_1 - V_2}{L}; \quad (2)$$

$$\mu = \frac{V_3 L}{R_2 e w d n (V_1 - V_2)}; \quad (3)$$

$$v = \mu E = \frac{V_3}{R_2 e w d n}, \quad (4)$$

где e — элементарный заряд; L , w , d — длина, ширина и толщина образца соответственно; n — концентрация электронов.

Результаты и их обсуждение

Величина контактного сопротивления к $\text{In}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{As}$. На рис. 5 приведены измеренные зависимости сопротивления от приложенного напряжения. Радиус контактов r_1 при этом был равен 150 мкм. Из рис. 5 видно, что сформированные контакты являются омическими для всех температур отжига, так как сопротивление изменяется слабо (в пределах погрешности) при увеличении напряжения. Значения сопротивления для температур отжига 420 и 500 °С почти совпадают, минимальное сопротивление достигается при температуре отжига 450 °С. Отметим, что для максимальной температуры вжигания 500 °С на поверхности металлического контакта обнаружен рельеф, связанный с увеличением шероховатости поверхности. Для остальных температур вжигания изменения вида поверхности

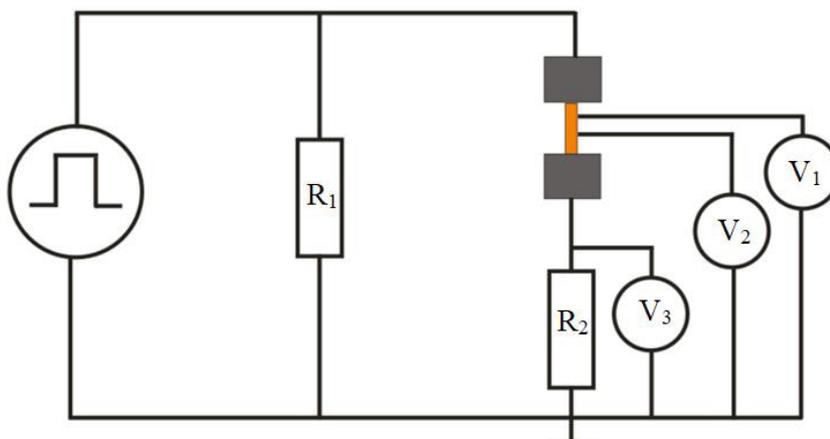


Рис. 4. Схема измерения дрейфовой скорости

Fig. 4. Drift velocity measurement scheme

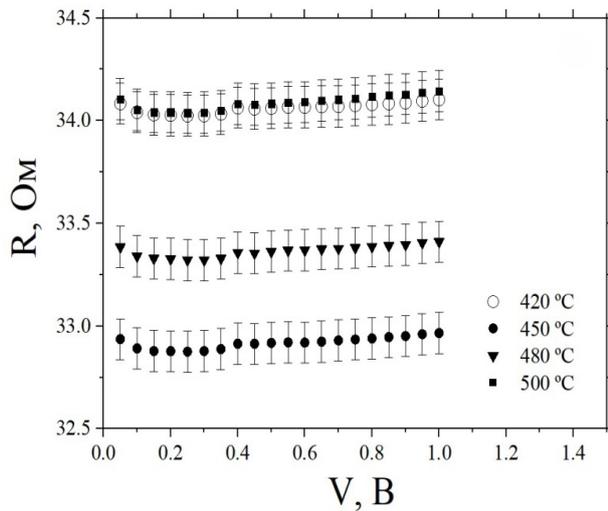


Рис. 5. Зависимости сопротивления от приложенного напряжения для образцов с контактами из Ni/Au/Ge/Au/Ge/Ni/Au для разных температур отжига

Fig. 5. Dependence of resistance on applied voltage for samples with Ni/Au/Ge/Au/Ge/Ni/Au contacts for different annealing temperatures

не наблюдается.

После измерения ВАХ была построена зависимость $R(r_1^{-2})$ для омических контактов Ni/Au/Ge/Au/Ge/Ni/Au (рис. 6). Теоретическая зависимость построена по формуле (1).

В нашем случае нельзя использовать приближение, справедливое при $\alpha r_1 \ll 1$, когда сопротивление R линейно зависит от r_1^{-2} и удельное контактное сопротивление определяется наклоном зависимости $R(r_1^{-2})$ [22]. Для слоевого сопротивления образца порядка 200 Ом/□, удельного сопротивления контакта 10^{-4} Ом·см² и наименьшего радиуса 50 мкм получаем $\alpha r_1 \approx 7$, что не позволяет

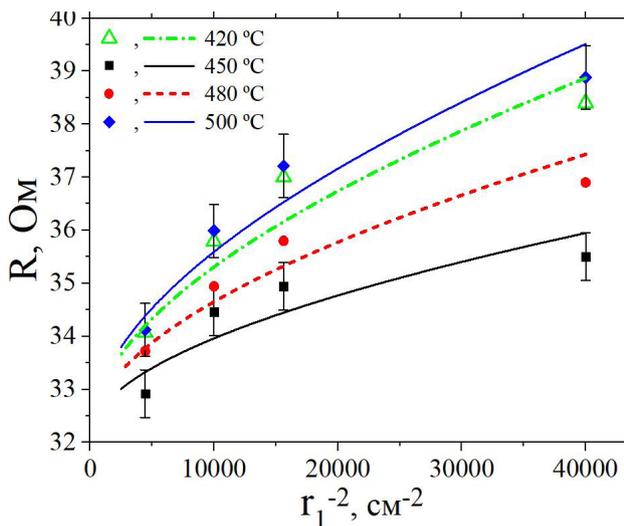


Рис. 6. Зависимости сопротивления от обратного квадрата радиуса r_1 для температур 420, 450, 480 и 500 °C. Точки — экспериментальные данные; линии — теоретический расчет по формуле (1)

Fig. 6. Dependence of resistance on the inverse square of radius r_1 for temperatures of 420, 450, 480 and 500 °C. Dots are experimental data, lines are theoretical calculations

линеаризовать формулу (1). Поэтому для определения удельного сопротивления ρ_c экспериментальные точки аппроксимировали теоретической зависимостью (1) с использованием двух подгоночных параметров: ρ_c и R_s . Экспериментальные значения сопротивления получены путем усреднения пяти измеренных величин сопротивления для каждого значения радиуса r_1 . При измерениях наблюдался небольшой разброс сопротивлений на разных участках структуры, показанный на рис. 6. Для температур 420 и 480 °C погрешности не показаны, чтобы избежать наложения. Подгонку осуществляли методом наименьших квадратов. Полученное значение R_s для всех температур составляло 220 Ом/□, что близко к слоевому сопротивлению, рассчитанному на основе холловских данных — 208 Ом/□. Полученные значения удельного сопротивления приведены ниже.

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho_c, 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$
420	17
450	6
480	11
500	20

Очевидно, что наименьшим сопротивлением обладают контакты, вжигаемые при 450 °C. Удельное сопротивление контактов при этой температуре составило $6 \cdot 10^{-5}$ Ом·см² (удельное сопротивление на единицу ширины составило $8,6 \cdot 10^{-4}$ Ом·см, при размере контакта 700×700 мкм²). Полученное значение удельного сопротивления контактов выше, чем приведенное в работах [13—17]. Однако следует учесть, что в этих работах контакты осуществлялись к более узкозонным слоям InGaAs с большим молярным содержанием индия. Кроме того, слои InGaAs имели более высокий уровень легирования. Так как размер исследованных токовых контактов составлял 700×700 мкм² (см. рис. 3), то значение контактного сопротивления составляло порядка 10^{-2} Ом, что гораздо меньше полного сопротивления исследованных образцов (примерно 1 кОм).

Исследование влияния формы образцов на измеряемые напряжения. Полученные условия создания омического контакта с минимальным удельным сопротивлением были использованы для изготовления образца для измерения полевой зависимости дрейфовой скорости. На рис. 7 приведено изображение такого образца, полученное методом растровой электронной микроскопии.

Боковой растрав при жидкостном травлении мезаструктуры привел к тому, что ширина образца в активной области составила 2,76 мкм вместо планируемых 4 мкм. Как следует из выражения (4), неучет растрова приведет к занижению рассчитываемых значений дрейфовой скорости.

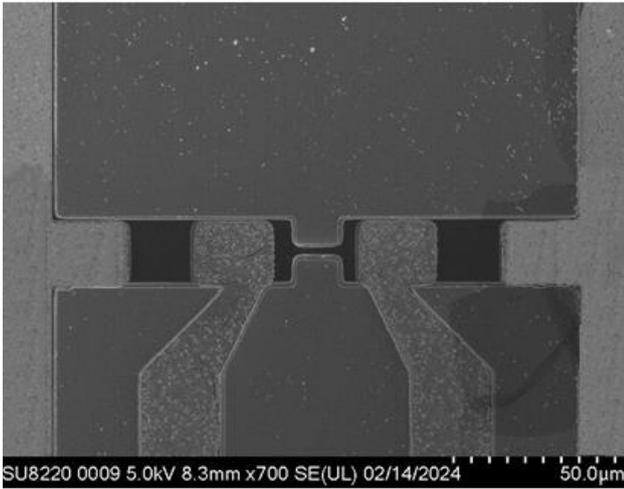


Рис. 7. Изображение изготовленного методом фотолитографии образца для измерения полевой зависимости дрейфовой скорости

Fig. 7. Image of a sample fabricated by photolithography for measuring the field dependence of the drift velocity

Напряжения V_1 и V_2 (см. рис. 4) измеряли на потенциальных контактах, расположенных по обеим сторонам активной области. Так как сами потенциальные контакты удалены от этой области на расстояние s , то необходимо учесть падение напряжения на этих участках образца.

В работе [23] приведена формула для определения сопротивлений областей таких образцов, граничащих с сужением:

$$R_{\text{END}} = \frac{\rho}{2d \operatorname{tg}(\theta)} \ln \left(1 + 2s \frac{\operatorname{tg}(\theta)}{w_0} \right), \quad (5)$$

где ρ — удельное сопротивление полупроводника; d — толщина образца; s — расстояние от контакта до области сужения; w_0 — ширина образца; $\operatorname{tg}(\theta)$ — тангенс угла растекания тока (рис. 8). При выводе формулы (5) предполагалось, что вне сужения ток течет в области, выделенной на рис. 8 зеленым

цветом, а также, что сопротивление этих областей постоянное (т. е. электрическое поле вне активной области образца является слабым, так как ширина образца вне сужения составляет 20 мкм, что в 6—7 раз больше, чем в сужении).

Однако при использовании формулы (5) наблюдается существенное расхождение в графиках при построении зависимости дрейфовой скорости от электрического поля: пик скорости приходится на различные значения поля, отличается значение подвижности. Поэтому формула (5) была уточнена, корректное значение добавочного сопротивления получилось равным:

$$R_{\text{END}} = \frac{\rho s}{d(h - w_0)} \ln \left(\frac{h}{w_0} \right). \quad (6)$$

Для проверки полученного выражения можно вычислить предел при $h \rightarrow w_0$, т. е. при стремлении трапеции на рис. 8 к прямоугольнику. В результате раскрытия неопределенности выражение (6) переходит к обычной формуле для сопротивления:

$$R = \frac{\rho S}{hd}.$$

В то же время предел выражения (5) при $h \rightarrow w_0$ равен 0. Таким образом, в работе [23] или угол должен отсчитываться от горизонтальной линии, или вместо тангенса должен стоять котангенс.

Для получения корректных значений дрейфовых скоростей в выражениях (2) и (3) разность напряжений V_1 и V_2 следует заменить на $V_1 - V_2 - I(R_{\text{END}1} + R_{\text{END}2})$, где сопротивления левой и правой областей растекания тока $R_{\text{END}1}$ и $R_{\text{END}2}$ рассчитывались отдельно. Вследствие рассовмещения при фотолитографии симметричность образца нарушается, и величины $R_{\text{END}1}$ и $R_{\text{END}2}$ становятся неодинаковыми.

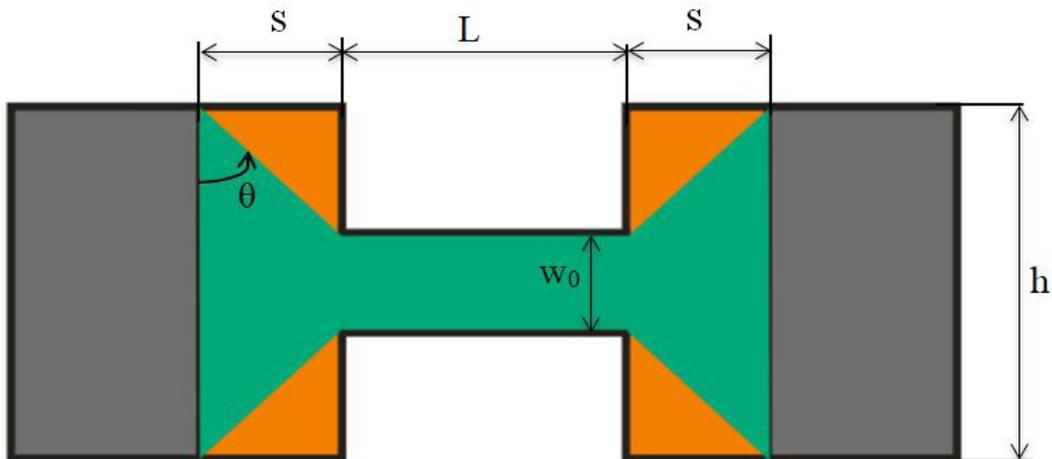


Рис. 8. Схематичное изображение образца.

Серым цветом выделены потенциальные контакты, зеленым — область протекания тока

Fig. 8. Schematic representation of the sample. Potential contacts are highlighted in gray, and the current flow area is highlighted in green

Полевые зависимости дрейфовой скорости.

На рис. 9 приведены полевые зависимости дрейфовой скорости, рассчитанные по формулам (2) и (4) без учета как изменения ширины активной области из-за растрыва, так и влияния сопротивлений R_{END1} и R_{END2} .

Как можно видеть из рис. 9, все зависимости качественно похожи, а именно: наблюдается линейный рост скорости в слабом электрическом поле, затем скорость достигает пика, после чего спадает и выходит на насыщение. Такая зависимость является типичной для полупроводников $A^{III}B^V$ [6]. Однако количественно полевые зависимости дрейфовой скорости не совпадают. Для трех образцов с разными значениями s различен наклон зависимости в слабом электрическом поле. Это означает различие слабополевой подвижности. Расчет по выражению (3) дает значения подвижности 2800, 2950 и 2500 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ для $s = 3, 5$ и 7 мкм соответственно. Видно, что полученные значения отличаются от величины $4300 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, определенной по измерениям эффекта Холла методом ван дер Пау. Кроме того, максимумы дрейфовой скорости приходятся на разные значения напряженности поля и величины насыщенной скорости дрейфа также отличаются.

Полевые зависимости дрейфовой скорости, скорректированные с учетом сопротивлений R_{END1} и R_{END2} , приведены на рис. 10.

Как видно из рис. 10, характер зависимостей не поменялся. Благодаря учету реальной ширины активной области ($w_0 = 2,60$ мкм, $2,80$ мкм и $2,76$ мкм для $s = 3, 5$ и 7 мкм соответственно) значение дрейфовой скорости в максимуме увеличилось до $1,7 \cdot 10^7$ см/с. Значение насыщенной скорости дрейфа также выросло и составило $(1,40—1,45) \times 10^7$ см/с. Максимум дрейфовой скорости после корректировки приходится на одинаковое значение поля $4,9$ кВ/см. По результатам расчета полевой зависимости дрейфовой скорости разными авторами, положение максимума находится от $4,1$ кВ/см для слоя $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ [24] до 5 кВ/см для гетероструктуры $\text{In}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}/\text{GaAs}$ [25]. Величина подвижности в слабом поле для всех трех образцов составляет $4100 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, что согласуется с данными измерения эффекта Холла.

Заключение

Исследовано сопротивление контактов Ni/Au/Ge/Au/Ge/Ni/Au в зависимости от температуры вжигания в диапазоне $420—500$ °С. Показано, что контакты к $\text{In}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{As}$ являются омическими. Минимальное удельное сопротивление $6 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ получено при температуре вжигания 450 °С.

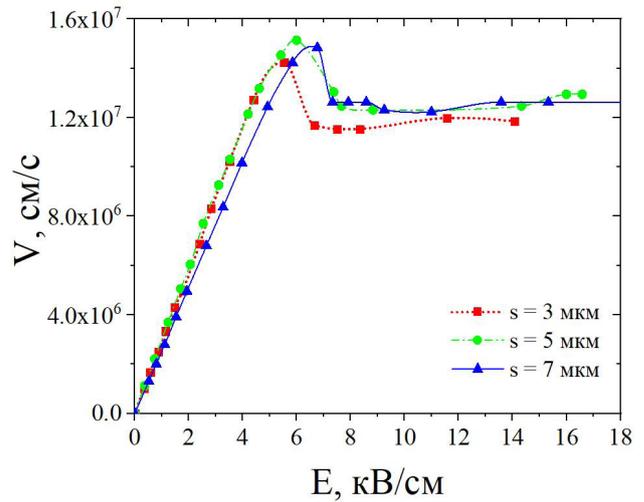


Рис. 9. Экспериментальные полевые зависимости дрейфовой скорости для различных расстояний s

Fig. 9. Measured field dependences of the drift velocity. Symbols represent experimental data for three values of distance s . Lines are drawn for clarity

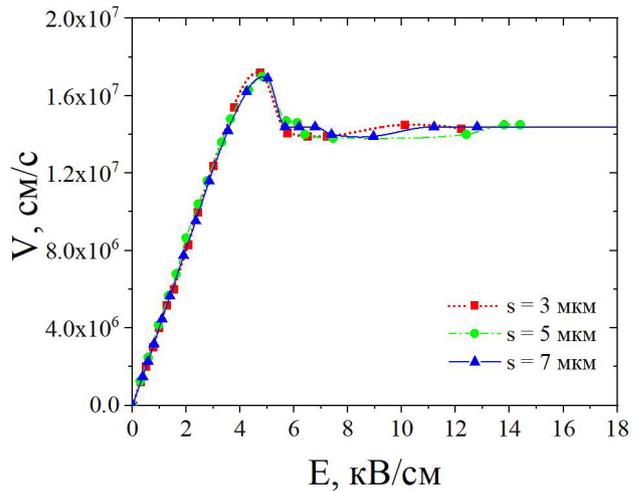


Рис. 10. Скорректированные экспериментальные полевые зависимости дрейфовой скорости для разных значений расстояния s .

Fig. 10. Corrected field dependences of the drift velocity. Symbols represent experimental data for three values of the distance s . Lines are drawn for clarity

Для проведения измерений зависимости дрейфовой скорости в сильном электрическом поле были выбраны образцы определенной формы, где ширина активной части образца в $6—7$ раз меньше, чем ширина образца в области потенциальных контактов. Это позволило избежать проникновения доменов сильного поля в активную область и прикладывать к образцу более сильные электрические поля.

Для правильного расчета напряженности электрического поля, подвижности и дрейфовой скорости в активной части образца уточнена формула, учитывающая растекание тока. Показано, что использование этой формулы с учетом реального положения потенциальных контактов и ши-

рины активной области, определенных методом растровой электронной микроскопии, позволило получить одинаковые зависимости дрейфовой

скорости от напряженности электрического поля для образцов $\text{In}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{As}$ с разными геометрическими размерами.

Библиографический список

1. Tokumitsu T., Kubota M., Sakai K., Kawai T. Application of GaAs device technology to millimeter-waves. *SEI Technical Review*. 2014; (79): 57—65.
2. Cho S.J., Wang C., Kim N.Y. High power density AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMTs using an optimized manufacturing process for Ka-band applications. *Microelectronic Engineering*. 2014; 113: 11—19. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2013.07.001>
3. Pashkovskii A.B., Bogdanov S.A., Bakarov A.K., Grigorenko A.B., Zhuravlev K.S., Lapin V.G., Lukashin V.M., Rogachev I.A., Tereshkin E.V., Shcherbakov S.V. Millimeter-wave donor-acceptor-doped DpHEMT. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2021; 68(1): 53—56. <https://doi.org/10.1109/TED.2020.3038373>
4. Chen Y.C., Bhattacharya P.K. Determination of critical layer thickness and strain tensor in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum-well structures by X-ray diffraction. *Journal of Applied Physics*. 1993; 73(11): 7389—7394. <https://doi.org/10.1063/1.354030>
5. Požela J. Physics of high-speed transistors. New York: Plenum Press; 1993. 337 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1242-8>
6. Иващенко В.М., Митин В.В. Моделирование кинетических явлений в полупроводниках. Метод Монте-Карло. Киев: Наук. думка, 1990; 189 с.
7. Воробьев Л.Е. Горячие электроны в полупроводниках и наноструктурах. СПб.: Изд-во СПбГТУ; 1999. 154 с.
8. Kablukova E., Sabelfeld K.K., Protasov D., Zhuravlev K. Stochastic simulation of electron transport in a strong electrical field in low-dimensional heterostructures. *Monte Carlo Methods and Applications*. 2023; 29(4): 307—322. <https://doi.org/10.1515/mcma-2023-2019>
9. Thobel J.L., Baudry L., Cappy A., Bourei P., Fauquembergue R. Electron transport properties of strained $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. *Applied Physics Letters*. 1990; 56(4): 346—348. <https://doi.org/10.1063/1.102780>
10. Айзенштат Г.И., Божков В.Г., Ющенко А.Ю. Измерение скорости насыщения электронов в квантовой яме AlGaAs/InGaAs. *Известия вузов. Физика*. 2010; 53(9): 34—39.
11. Шиленас А., Пожела Ю., Пожела К., Юцене В., Васильевский И.С., Галиев Г.Б., Пушкарев С.С., Климов Е.А. Максимальная дрейфовая скорость электронов в селективно легированных гетероструктурах InAlAs/InGaAs/InAlAs с введенной InAs-вставкой. *Физика и техника полупроводников*. 2013; 47(3): 348—352.
12. Протасов Д.Ю., Гуляев Д.В., Бакаров А.К., Торопов А.И., Ерофеев Е.В., Журавлев К.С. Увеличение насыщенной скорости дрейфа электронов в рHEMT гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием. *Письма в журнал технической физики*. 2018; 44(6): 77—84. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2018.06.45770.17098>
13. Kim I.H. Pd/Ge(or Si)/Pd/Ti/Au Ohmic Contacts to n-type InGaAs for AlGaAs/GaAs HBTs. *Metals and Materials International*. 2004; 10(4): 381—386.
14. Lee J.-M., Choi I.-H., Park S. H., Min B.-G., Lee T.-W., Park M. P., Lee K.-H. $\text{WN}_x/\text{WN}_{0,5x}/\text{W}$ ohmic contact to n-InGaAs and its application to AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors. *Journal of the Korean Physical Society*. 2000; 37(1): 43—48.
15. Iliadis A.A., Zahurak J.K., Neal T., Masselink W.T. Lateral diffusion effects in AuGe based source-drain contacts to AlInAs/InGaAs/InP doped channel MODFETs. *Journal of Electronic Materials*. 1999; 28(8): 944—948.
16. Yearsley J.D., Lin J.C., Hwang E., Datta S., Mohny S.E. Ultra low-resistance palladium silicide Ohmic contacts to lightly doped n-InGaAs. *Journal of Applied Physics*. 2012; 112: 054510. <https://doi.org/10.1063/1.4748178>
17. Nebauer E., Mai M., Richter E., Würfl J. Low resistance, thermally stable Au/Pt/Ti/WSiN ohmic contacts on n^+ -InGaAs/n-GaAs layer systems. *Journal of Electronic Materials*. 1998; 27(12): 1372—1374. <https://doi.org/10.1007/s11664-998-0100-9>
18. Barker J.M., Akis R., Thornton T.J., Ferry D.K., Goodnick S.M. High field transport studies of GaN. *Physica Status Solidi*. 2002; 190(1): 263—270.
19. Barker J.M., Ferry D.K., Koleske D.D., Shul R.J. Bulk GaN and AlGaN/GaN heterostructure drift velocity measurements and comparison to theoretical models. *Journal of Applied Physics*. 2005; 97: 063705. <https://doi.org/10.1063/1.1854724>
20. Yang D., Bhattacharya P.K., Hong W.P., Bhat R., Hayes J. R. High-field transport properties of $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}/\text{InP}$ ($0.3 \leq x \leq 1$) modulation doped heterostructures at 300 and 77 K. *Journal of Applied Physics*. 1992; 72(1): 174—178. <https://doi.org/10.1063/1.352154>
21. Gulyaev D.V., Zhuravlev K.S., Bakarov A.K., Tоропов А.И., Protasov D.Yu., Gutakovskii A.K., Ber B.Ya., Kazantsev D.Yu. Influence of the additional p^+ doped layers on the properties of AlGaAs/InGaAs/AlGaAs heterostructures for high power SHF transistors. *Journal Physics D: Applied Physics*. 2016; 49: 095108. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/9/095108>
22. Андреев А.Н., Растераева М.Г., Растераев В.П., Решанов С.А. К вопросу об учете растекания тока в полупроводнике при определении переходного сопротивления омических контактов. *Физика и техника полупроводников*. 1998; 32(7): 832—838.
23. Khan I.A., Cooper J.A. Measurement of high-field electron transport in silicon carbide. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2000; 47(2): 269—273. <https://doi.org/10.1109/16.822266>
24. Пожела Ю., Пожела К., Рагуотис Р., Юцене В. Дрейфовая скорость электронов в квантовых ямах селективно легированных гетероструктур $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}/\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ и $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в сильных электрических полях. *Физика и техника полупроводников*. 2011; 45(6): 778—782.
25. Thobel J.L., Baudry L., Bourel P., Dessenne F., Charef M. Monte Carlo modeling of high-field transport in III-V heterostructures. *Journal of Applied Physics*. 1993; 74(10): 6274—6280. <https://doi.org/10.1063/1.355145>

References

1. Tokumitsu T., Kubota M., Sakai K., Kawai T. Application of GaAs device technology to millimeter-waves. *SEI Technical Review*. 2014; (79): 57—65.
2. Cho S.J., Wang C., Kim N.Y. High power density AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMTs using an optimized manufacturing process for Ka-band applications. *Microelectronic Engineering*. 2014; 113: 11—19. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2013.07.001>
3. Pashkovskii A.B., Bogdanov S.A., Bakarov A.K., Grigorenko A.B., Zhuravlev K.S., Lapin V.G., Lukashin V.M., Rogachev I.A., Tereshkin E.V., Shcherbakov S.V. Millimeter-wave donor-acceptor-doped DpHEMT. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2021; 68(1): 53—56. <https://doi.org/10.1109/TED.2020.3038373>
4. Chen Y.C., Bhattacharya P.K. Determination of critical layer thickness and strain tensor in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum-well structures by X-ray diffraction. *Journal of Applied Physics*. 1993; 73(11): 7389—7394. <https://doi.org/10.1063/1.354030>
5. Požela J. Physics of high-speed transistors. New York: Plenum Press; 1993. 337 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1242-8>
6. Ivashchenko V.M., Mitin V.V. Modeling of kinetic phenomena in semiconductors. Monte Carlo method. Kiev: Nauk. dumka; 1990. 189 p. (In Russ.)
7. Vorobiev L.E. Hot electrons in semiconductors and nanostructures. St. Petersburg: Izd-vo SPbGTU; 1999. 154 p. (In Russ.)
8. Kablukova E., Sabelfeld K.K., Protasov D., Zhuravlev K. Stochastic simulation of electron transport in a strong electrical field in low-dimensional heterostructures. *Monte Carlo Methods and Applications*. 2023; 29(4): 307—322. <https://doi.org/10.1515/mcma-2023-2019>
9. Thobel J.L., Baudry L., Cappy A., Bourei P., Fauquembergue R. Electron transport properties of strained $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. *Applied Physics Letters*. 1990; 56(4): 346—348. <https://doi.org/10.1063/1.102780>
10. Ayzenshtat G.I., Bozhkov V.G., Yushchenko A.Y. Measurement of the electron saturation velocity in an AlGaAs/InGaAs quantum well. *Russian Physics Journal*. 2011; 53(9): 914—920. <https://doi.org/10.1007/s11182-011-9510-x>
11. Šilenas A., Požela Yu., Požela K., Jucienė V., Vasil'evskii I.S., Galiev G.B., Pushkarev S.S., Klimov E.A. Maximum drift velocity of electrons in selectively doped InAlAs/InGaAs/InAlAs heterostructures with InAs inserts. *Semiconductors*, 2013; 47: 372—375. <https://doi.org/10.1134/S1063782613030263>
12. Protasov D.Yu., Gulyaev D.V., Bakarov A.K., Toropov A.I., Erofeev E.V., Zhuravlev K.S. Increasing saturated electron-drift velocity in donor-acceptor doped pHEMT heterostructures. *Technical Physics Letters*. 2018; 44: 260—262. <https://doi.org/10.1134/S1063785018030240>
13. Kim I.H. Pd/Ge(or Si)/Pd/Ti/Au Ohmic Contacts to n-type InGaAs for AlGaAs/GaAs HBTs. *Metals and Materials International*. 2004; 10(4): 381—386.
14. Lee J.-M., Choi I.-H., Park S. H., Min B.-G., Lee T.-W., Park M. P., Lee K.-H. $\text{WN}_x/\text{WN}_{0.5x}/\text{W}$ ohmic contact to n-InGaAs and its application to AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors. *Journal of the Korean Physical Society*. 2000; 37(1): 43—48.
15. Iliadis A.A., Zahurak J.K., Neal T., Masselink W.T. Lateral diffusion effects in AuGe based source-drain contacts to AlInAs/InGaAs/InP doped channel MODFETs. *Journal of Electronic Materials*. 1999; 28(8): 944—948.
16. Yearsley J.D., Lin J.C., Hwang E., Datta S., Mohney S.E. Ultra low-resistance palladium silicide Ohmic contacts to lightly doped n-InGaAs. *Journal of Applied Physics*. 2012; 112: 054510. <https://doi.org/10.1063/1.4748178>
17. Nebauer E., Mai M., Richter E., Würfl J. Low resistance, thermally stable Au/Pt/Ti/WSiN ohmic contacts on $n^+\text{-InGaAs}/n\text{-GaAs}$ layer systems. *Journal of Electronic Materials*. 1998; 27(12): 1372—1374. <https://doi.org/10.1007/s11664-998-0100-9>
18. Barker J.M., Akis R., Thornton T.J., Ferry D.K., Goodnick S.M. High field transport studies of GaN. *Physica Status Solidi*. 2002; 190(1): 263—270.
19. Barker J.M., Ferry D.K., Koleske D.D., Shul R.J. Bulk GaN and AlGaN/GaN heterostructure drift velocity measurements and comparison to theoretical models. *Journal of Applied Physics*. 2005; 97: 063705. <https://doi.org/10.1063/1.1854724>
20. Yang D., Bhattacharya P.K., Hong W.P., Bhat R., Hayes J. R. High-field transport properties of $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}/\text{InP}$ ($0.3 \leq x \leq 1$) modulation doped heterostructures at 300 and 77 K. *Journal of Applied Physics*. 1992; 72(1): 174—178. <https://doi.org/10.1063/1.352154>
21. Gulyaev D.V., Zhuravlev K.S., Bakarov A.K., Toropov A.I., Protasov D.Yu., Gutakovskii A.K., Ber B.Ya., Kazantsev D.Yu. Influence of the additional p^+ doped layers on the properties of AlGaAs/InGaAs/AlGaAs heterostructures for high power SHF transistors. *Journal Physics D: Applied Physics*. 2016; 49: 095108. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/9/095108>
22. Andreev A.N., Rastegaeva M.G., Rastegaev V.P., Reshanov S.A. Allowing for current spreading in semiconductors during measurements of the contact resistivity of ohmic contacts. *Semiconductors*. 1998; 32: 739—744. <https://doi.org/10.1134/1.1187496>
23. Khan I.A., Cooper J.A. Measurement of high-field electron transport in silicon carbide. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2000; 47(2): 269—273. <https://doi.org/10.1109/16.822266>
24. Požela J., Požela K., Raguotis R., Jucienė V. Drift velocity of electrons in quantum wells of selectively doped $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ and $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ heterostructures in high electric fields. *Semiconductors*. 2011; 45: 761—765. <https://doi.org/10.1134/S1063782611060212>
25. Thobel J.L., Baudry L., Bourel P., Dessenne F., Charef M. Monte Carlo modeling of high-field transport in III-V heterostructures. *Journal of Applied Physics*. 1993; 74(10): 6274—6280. <https://doi.org/10.1063/1.355145>

Информация об авторах / Information about the authors

Кузнецов Вадим Алексеевич — аспирант, старший инженер, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, просп. Акад. Лаврентьева, д. 13, Новосибирск, 630090, Российская Федерация; Новосибирский государственный технический университет, просп. Карла Маркса, д. 20, Новосибирск, 630073, Российская Федерация; e-mail: vadya.suz98@gmail.com

Протасов Дмитрий Юрьевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, просп. Акад. Лаврентьева, д. 13, Новосибирск, 630090, Российская Федерация; Новосибирский государственный технический университет, просп. Карла Маркса, д. 20, Новосибирск, 630073, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7859-1590>; e-mail: protasov@isp.nsc.ru

Дмитриев Дмитрий Владимирович — младший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, просп. Акад. Лаврентьева, д. 13, Новосибирск, 630090, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7126-5338>; e-mail: dmitriev@isp.nsc.ru

Костюченко Владимир Яковлевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, ул. Плахотного, д. 10, Новосибирск, 630108, Российская Федерация; e-mail: v.y.kostuk@ssga.ru

Рогило Дмитрий Игоревич — старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, просп. Акад. Лаврентьева, д. 13, Новосибирск, 630090, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7586-0107>; e-mail: rogilo@isp.nsc.ru

Журавлев Константин Сергеевич — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, просп. Акад. Лаврентьева, д. 13, Новосибирск, 630090, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3171-5098>; e-mail: zhur@isp.nsc.ru

Vadim A. Kuznetsov — Postgraduate Student, Senior Engineer, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 13 Acad. Lavrentieva Ave., Novosibirsk 630090, Russian Federation; Novosibirsk State Technical University, 20 Karla Marksa Ave., Novosibirsk 630073, Russian Federation; e-mail: vadya.suz98@gmail.com

Dmitry Yu. Protasov — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 13 Acad. Lavrentieva Ave., Novosibirsk 630090, Russian Federation; Novosibirsk State Technical University, 20 Karla Marksa Ave., Novosibirsk 630073, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7859-1590>; e-mail: protasov@isp.nsc.ru

Dmitriy V. Dmitriev — Junior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 13 Acad. Lavrentieva Ave., Novosibirsk 630090, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7126-5338>; e-mail: dmitriev@isp.nsc.ru

Vladimir Ya. Kostyuchenko — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10 Plakhotnogo Str., Novosibirsk 630108, Russian Federation; e-mail: v.y.kostuk@ssga.ru

Dmitry I. Rogilo — Senior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 13 Acad. Lavrentieva Ave., Novosibirsk 630090, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7586-0107>; e-mail: rogilo@isp.nsc.ru

Konstantin S. Zhuravlev — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of Laboratory, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 13 Acad. Lavrentieva Ave., Novosibirsk 630090, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3171-5098>; e-mail: zhur@isp.nsc.ru

*Поступила в редакцию 16.07.2024; поступила после доработки 05.12.2024; принята к публикации 10.12.2024
Received 16 July 2024; Revised 5 December 2024; Accepted 10 December 2024*