

С. В. Новицкий

ОМИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ К ФОСФИДУ ИНДИЯ

Введение

С развитием микроволновой электроники остро встала проблема повышения рабочей частоты и быстродействия полупроводниковых приборов и интегральных схем, а также снижения потребляемой мощности. Это обусловило поиск новых материалов, которые имели бы большую подвижность и меньшую ионизацию электронов, чем в кремнии, — наиболее широко используемом полупроводниковом материале, а также не уступали бы по другим характеристикам. В этом отношении наиболее предпочтительны арсенид галлия и фосфид индия.

Подвижность электронов в арсениде галлия в 4–5 раз выше, чем в кремнии. Особенным свойством GaAs является наличие отрицательной дифференциальной проводимости в интервале электрических полей 3,5–20 кВ/см, а возможность изменения в широком диапазоне удельного сопротивления (от 10^{-3} до 10^7 Ом·см) делает GaAs превосходным материалом

как для сверхвысокочастотной электроники, так и для оптоэлектроники. Недостатками этого материала являются сравнительно низкая стабильность, большое время разогрева и релаксации энергии электронов при пороговом поле, что ограничивает рабочую частоту диодов Ганна [1].

В связи с повышением рабочего диапазона частот полупроводниковых приборов и переходом в диапазон миллиметровых волн арсенид галлия не способен удовлетворять современным требованиям. Поэтому необходим более совершенный материал, качество которого может быть использован фосфид индия, являющийся прямозонным полупроводником, уникально объединяющим в себе электрические и оптические свойства, например, высокие подвижность электронов, скорость насыщения, слабую ионизацию и высокую радиационную стойкость, а также высокие теплопроводность и поле проб (табл. 1) [1–4].

Фосфид индия нашел применение для создания широкого ряда микроэлектронных и оптоэлектронных приборов. К ним относятся диоды Ганна, полевые транзисторы, полевые транзисторы с управляемым рп-переходом, транзисторы с высокой подвижностью электронов, биполярные транзисторы на гетеропереходе, а также длинноволновые лазерные диоды, светоизлучающие диоды, фотоприемники, топливные батареи и оптоэлектронные интегральные схемы [4].

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МИКРОВОЛНОВЫХ ПРИБОРОВ [1, 5, 6]

Параметр при 300 К	InP	GaAs	Si
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,35	1,42	1,12
Кристаллическая структура	Цинк. об.	Цинк. об.	Алмаз
Постоянная решетки, Å	5,869	5,653	5,431
Атомное сродство, v	4,38	4,07	4,05
Удельное сопротивление ρ , Ом·см	$2 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^5$
Диэлектрическая постоянная	12,6	12,9	11,9
Плотность пробоя, В/см	$\gg 5 \cdot 10^5$	$\gg 4 \cdot 10^5$	$\gg 3 \cdot 10^{15}$
Скорость насыщения, см/с	$0,67 \cdot 10^7$	$0,72 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$
Подвижность, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	μ_n	4600	8000
	μ_p	150	400
Эффективная масса	m_n^*/m_0	0,077	0,063
	m_p^*/m_0	0,64	0,5
Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	4,79	5,32	2,33
Теплопроводность, $\text{Вт}/\text{см} \cdot ^\circ\text{C}$	0,68	0,46	1,5
Температура плавления, $^\circ\text{C}$	1070	1238	1420
Коэффициент теплового расширения	$4,56 \cdot 10^{-6}$	$5,9 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$
Радиационная стойкость, Гр	$10^6 \cdot 10^7$	$10^5 \cdot 10^6$	10^3

Такие приборы, работающие при высоких плотностях тока – $4 - 10 \text{ кА}/\text{см}^2$, постоянно совершенствуются, что связано с проблемами минитюаризации и разработкой новых технологий [7]. Однако до сих пор в этом направлении имеется ряд физико-технологических задач, разрешение которых тормозится из-за хрупкости и чувствительности InP к ионноиндуцированным дефектам. Все еще серьезными проблемами остаются склонность к аморфизации полупроводниковых соединений на основе InP во

время имплантации и сильное испарение фосфора с поверхности образца при высокотемпературном отжиге. Производство приборов на основе InP и его сплавов намного дороже, чем стоимость производства приборов на Si и GaAs, поэтому в промышленном производстве InP используется не так часто, как Si или GaAs. Но сомнений в преимуществах InP не возникает, и разработчики элементной базы на основе InP постоянно ведут работы по удешевлению технологии производства фосфидиндиевых полупроводниковых приборов [7].

Для включения активной области полупроводникового прибора во внешнюю цепь необходим контакт между металлом и полупроводником, не инжектирующий электроны, с электрическим сопротивлением, значительно меньшим, чем у полупроводника, и с линейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Такой контакт называется омическим. Важную роль для всех электронных и оптоэлектронных устройств играет удельное сопротивление омического контакта R_c [8]. Контакт с большим сопротивлением ухудшает энергетическую эффективность прибора из-за избыточного падения постоянного напряжения на нем. Малые размеры полупроводниковых активных элементов накладывают серьезные ограничения на обработку материалов, используемых для создания омических контактов. Основные требования к омическим контактам заключаются в том, что они должны иметь низкое R_c , быть термически стабильными, иметь хорошую адгезию, малую глубину диффузии и достаточную однородность [4].

Теоретически наименьшее контактное сопротивление может быть получено путем выбора металла с работой выхода, при которой барьера между металлом и полупроводником не существует. Однако в действительности типичные контакты металл – $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ (GaAs, InGaAs, InP) на границе раздела содержат высокую плотность поверхностных состояний, закрепляющих уровень Ферми на поверхности [5]. В результате всегда возникает барьер на границе металл – полупроводник, зависящий от контактного

металла [9]. Контактное сопротивление определяется высотой барьера и областью пространственного заряда (ОПЗ) в полупроводнике. Когда в омическом контакте ОПЗ узкая и барьер небольшой, электроны преимущественно проходят за счет квантово-механического туннелирования. Сопротивление контакта может быть снижено уменьшением высоты барьера или уменьшением ширины ОПЗ при увеличении легирования полупроводника.

Для туннелирования через потенциальный барьер на границе раздела требуется сильнолегированный полупроводник, получаемый введением Si или Ge для *n*-InP и Zn для *p*-InP.

Несмотря на большое разнообразие контактных структур, для создания омических контактов к InP часто используется золото, которое обеспечивает хорошую адгезию и имеет очень низкое удельное сопротивление (табл. 2). Однако неравномерность глубины взаимодействия Au с GaAs приводит к неоднородной плотности тока через контакт, что влечет за собой отсутствие долговременной металлургической стабильности. Эти недостатки Au накладывают существенные ограничения на контакты с Au и соответственно на приборы, работающие при высоких температурах.

Альтернативой золоту служат полублагородные металлы, которые более термодинамически стабильны и менее реактивны, например, Pd и Pt. Они имеют ряд преимуществ в контактообразовании, связанных с простотой осаждения на InP, низкой температурой реакции с InP, проникаемостью собственной тонкой оксидной пленки на поверхности InP и устойчивостью к окислению [10].

Для обеспечения термической стойкости и надежности в контактную структуру вводят диффузионный барьер, что противодействует процессам массопереноса в контактной металлизации. В качестве диффузионных барьеров наиболее широко используются бориды, нитриды тугоплавких металлов, а также Cr, Ru, Ti и др. тугоплавкие металлы.

Таким образом, создание контактной структуры, оптимально объединяющей в себе низкое удельное

Таблица 2

ПАРАМЕТРЫ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К *n*-INP И *p*-INP

Металл	Работа выхода, эВ, при T=300K [11]	Температура плавления, °C [11]	Постоянная решетки, нм [12]	Температурный коэффициент линейного расширения при 300 K, ·10 ⁻⁶ K ⁻¹ [11]	Удельное сопротивление, мкОм·м [11]	Цена (допл./кг) [13, 14]
Ag	4,3	961	0,409	18,6	0,015	588
Al	4,25	660	0,405	21,0	0,026	2,04
Au	4,3	1063	0,408	14,0	0,023	36 370
Be	3,92	1280	0,229	12,0	0,041	–
Cr	4,58	1900	0,283	6,2	0,130	–
Cu	4,4	1083	0,361	16,6	0,017	8,28
In	3,8	156	0,458	28,4	0,090	520
Ir	4,7	2410	0,383	6,5	0,054	13 117
Mo	4,3	2620	0,315	5,3	0,050	31,5
Ni	4,5	1453	0,352	13,2	0,068	17,49
Pb	4,2	327	0,495	28,3	0,190	2,08
Pd	4,8	1550	0,389	9,5	0,108	13 632
Pt	5,32	1770	0,392	9,5	0,098	49 995
Re	5,0	3180	0,27	6,7	0,214	6 250
Ru	4,6	2250	0,27	9,1	0,075	5 562
Sr	2,35	770	0,608	21	0,227	–
Ta	4,12	3000	0,331	6,6	0,124	–
Ti	3,95	1670	0,295	8,1	0,47	–
W	4,54	3400	0,316	4,4	0,055	–
Zn	4,25	419	0,286	30	0,059	1,99
Zr	3,9	1855	0,323	6,3	0,41	–
TiB ₂	–	2790	–	5,5	–	–
WB	–	2800	–	–	–	–
TiN	–	2950	–	4,7	–	–

контактное сопротивление, термостойкость и стабильность омического контакта, представляет серьезную физико-технологическую проблему, решение которой позволит создавать надежные, высокоомощные диоды Ганна, для которых эта проблема актуальная.

Механизм создания омического контакта

В зависимости от ВАХ, контакты металл – полупроводник можно разделить на два типа. Первые – это контакты, которые имеют выпрямляющую ВАХ, называются барьерными контактами Шоттки или выпрямительными контактами. Вторые – это контакты, имеющие линейную ВАХ – омические контакты. На практике контакт считается омическим, если падение напряжения на нем ничтожно мало по сравнению с падением напряжения на самом приборе, т. е. омический контакт не влияет на ВАХ диода.

Есть несколько способов формирования омического контакта к InP с низким сопротивлением [15]: контакт без потенциального барьера – для этого работа выхода металла для контакта к полупроводнику *p*-типа должна быть меньше электронного потенциала полупроводника, что для фосфида индия составляет 4,38 эВ, а для *p*-типа – больше суммы энергии запрещенной зоны и электронного сред-

ства, что для InP составляет 5,72 эВ (работа выхода некоторых металлов для омических контактов к *p*- и *n*-InP представлена в табл. 2) [16];

сужение потенциального барьера, создаваемое сильным легированием приповерхностного слоя полупроводника ($>5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) [7], основным механизмом токопереноса в этом случае является полевая эмиссия;

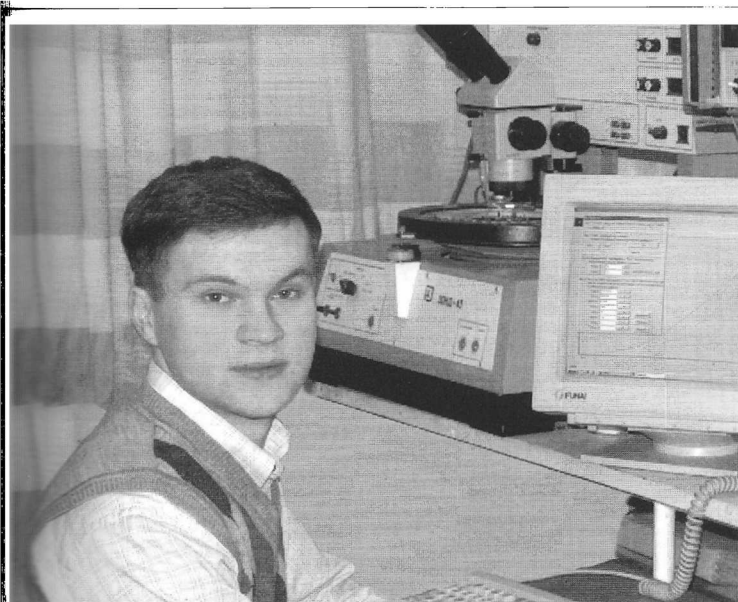
понижение потенциального барьера, который преодолевают носители заряда, достигаемое созданием узкозонного приконтактного слоя, в таком случае электроны переходят границу раздела над барьером, этот механизм обусловлен термоэлектронной эмиссией.

В случае термополевой эмиссии электроны проходят через вершину потенциального барьера.

Другим вариантом, при котором существует потенциальный барьер, но возможен омический контакт, является случай, когда область пространственного заряда пронизана металлическими шун-

тами (закорочена) образованными, например, вследствие осаждения атомов металлов на дислокациях или других структурных несовершенствах полупроводника. Такой случай наиболее характерен для сплавных контактов [17].

Производство наиболее распространенных коммерческих контактов всегда включает в себя создание тонкого сильнолегированного приконтактного слоя полупроводника $>5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Истощенная область, возникающая на границе между металлом и полупроводником, является настолько тонкой, что становится возможным квантово-механическое туннелирование носителей заряда. В этом случае можно получить контакт с очень низким сопротивлением при нулевом смещении.



Новицкий Сергей Вадимович, аспирант Института физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины. Область научных интересов – физика, технология и диагностика омических контактов к фосфинидиндиевым приборам. Автор 16 публикаций.

Высоколегированная поверхность создается разными способами.

Первый метод заключается в выращивании сильнолегированного эпитаксиального слоя. Эпитаксиальным слоем может быть материал с узкой запрещенной зоной, например, для фосфида индия — $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ($E_g = 0,75$ эВ), у которого постоянная решетки соответствует InP [7]. Эти контакты не требуют последующего отжига и называются несплавными контактами, но на практике большая часть этих контактов все же отжигается для достижения оптимального значения контактного сопротивления.

Другой метод получения легированных тонкослойных поверхностей заключается в добавлении легирующей примеси в InP, например, для InP *p*-типа используются Zn, Be, Mg, а для *n*-типа — Si, Ge, Sn [18–21]. Они наносятся в виде тонкого слоя (порядка десятков нанометров) на поверхность полупроводника методом электронно-лучевого испарения и, как правило, вводятся в полупроводник твердофазной диффузией, которая требует нагрева контакта.

Третий метод основан на формировании сильнолегированной области полупроводника ионным легированием.

Анализ литературных данных, приведенный в ряде работ, показал, что омические контакты должны иметь минимально возможное сопротивление; быть стабильными и структурно однородными в широком температурном диапазоне; стабильными и устойчивыми к длительным электрическим и тепловым нагрузкам во время работы прибора; механические напряжения в металлических пленках должны быть минимальными; процесс изготовления контакта должен отвечать всем требованиям для использования его в производстве и эксплуатации полупроводниковых приборов.

Выполнение всех этих требований для контактной металлизации представляет значительную проблему. Самое сложное — реализация стабильности и однородности контактной структуры с ограничением межфазных реакций.

В принципе наиболее распространенным методом создания омических контактов является легирование приповерхностной области полупроводника с последующей металлизацией его поверхности. Однако реальные контактные структуры многослойные, включающие контактообразующий металл, металл, улучшающий адгезию, диффузионный барьер и металлический слой, обеспечивающий внешнее контактирование. В результате многокомпонентные системы состоят от 3 до 6–7 металлических слоев. О необходимости каждого слоя и о том, какой элемент или сплав может удовлетворять поставленным требованиям, будет рассмотрено в данной статье.

Минимальное контактное сопротивление

Предельно возможное минимальное сопротивление омического контакта $R_{c\min}$ для полупроводника с произвольной степенью вырождения рассчитано в [22], где также показано, что при протекании тока из полупроводника в металл барьер отсутствует, а вероятность туннелирования в том же направлении равняется 1. Соответственно этому предположению $R_{c\min}$ определяется по следующей формуле:

$$R_{c\min} = \frac{k}{qA \left(\frac{m_e}{m_0}\right) T} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) = \frac{k}{qA \left(\frac{m_e}{m_0}\right) T} \frac{N_c}{N_d}, \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана; q — заряд электрона; A — постоянная Ричардсона, равная $120 \text{ A}\cdot\text{см}^2 \cdot \text{K}^{-2}$; m_e и m_0 — эффективная масса и масса свободного электрона соответственно; T — температура. $N_c = 2(2\pi kTm^*/h^2)^{3/2}$ — эффективная плотность состояний в зоне проводимости; N_d — концентрация электрически активных примесей в объеме полупроводника.

В соответствии с [22] для *n*-InP рассчитано минимальное контактное сопротивление

$$R_{c\min} = 9,8 \cdot 10^8 [\text{Ом}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{K}^{-1/2}] \frac{\sqrt{T} [\text{K}^{1/2}]}{N_d [\text{см}^{-3}]}. \quad (2)$$

При концентрации носителей $N_d = 9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $T = 300 \text{ K}$ рассчитанное минимальное контактное

сопротивление $R_{c \min} = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Экспериментальное значение R_c составило $5,2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, что согласуется в соответствии с литературными данными [23].

Для определения доминирующего механизма переноса Падовани и Стреттон предложили использовать характеристическую энергию E_{00} , которая определяется по следующей формуле [24]:

$$E_{00} = \frac{h}{2} \left(\frac{N_d}{m \epsilon_n} \right)$$

N_d — концентрация доноров, m^3 ; m — эффективная масса электронов в полупроводнике; $\epsilon_n = \epsilon_s \epsilon_0$ — диэлектрическая постоянная полупроводника; h — постоянная Планка; ϵ_s — диэлектрическая постоянная полупроводника.

При выполнении условия $qE_{00} \ll kT$ основным механизмом токопереноса является термоэлектронная эмиссия, если $qE_{00} \gg kT$, тогда преобладающей будет полевая эмиссия, в случае $qE_{00} \approx kT$ реализуется термополевая эмиссия [15].

Контакты к InP на основе Au и Ag

Металлизация на основе Au уже давно широко используется в омических контактах к полупроводниковым соединениям A^{III}B^V, например, GaAs, GaP, Sb, GaSb, InP. Золото имеет ряд полезных свойств, таких, например, как достаточно низкое удельное контактное сопротивление и соответственно низкое сопротивление металлического слоя в контактной металлизации, высокая устойчивость к коррозии, совместимость со стандартными методами нанесения слоя металла и фотолитографии, а также достаточная надежность.

В полупроводниковых соединениях A^{III}B^V золото действует как окислитель, вытесняя элементы V группы и формируя различные соединения с элементами III группы. В контактных структурах Au может быть использовано в качестве верхнего слоя металлизации, или же непосредственно в структуре для создания контактообразующего слоя.

В структуре Au/InP при небольших температурах (<320 °C) формируется тройная фаза Au – In – P, а при увеличении до 450°C постепенно возникают соединения Au – In и Au – P (табл. 3), где первое соединение более устойчиво. При увеличении температуры быстрой термической обработки (БТО) формируется несколько фаз Au_xIn_y (x=1, 2, 3, 7, 9, 10, 11; y=1, 2, 3, 4) и фаза Au₂P₃ [25].

Таблица 3

ПАРАМЕТРЫ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ AU(AG)/n-INP

Толщина слоя металла, нм	Тип InP	Уровень легирования, см ⁻³	Минимальное контактное сопротивление, Ом·см ²	Условия обработки	Ссылки
Au (200)	n	1·10 ¹⁸	5·10 ⁻⁵	400°C, 60 с	[26]
Ag (200)	n	1,7·10 ¹⁸	10 ⁻⁶	300-450°C, 30 с	[27]

Сравнительно толстый слой Au, порядка нескольких сотен нанометров, нанесенный на верхнюю часть контактной структуры, обеспечивает низкое сопротивление контакта и защищает от окисления. Проблема, которая присуща контактам на основе золота, — это сродство Au к элементам третьей группы таблицы Менделеева. В InP таким элементом выступает индий. Вследствие диффузии золота в глубь полупроводника происходит внешняя диффузия In, это приводит к формированию соединений Au – In, которые, как правило, растут неравномерно. Диффузия In в слой Au ставит под угрозу долгосрочную стабильность и целостность контактной структуры.

Поведение контактов Ag/InP очень похоже на Au/InP, впрочем, как и собственно свойства Au и Ag (см. табл. 2) [26, 28 – 30]. Основное различие заключается в том, что процессы взаимной диффузии в контакте Ag/InP менее сбалансированы, In и P диффундируют значительно быстрее в Ag, чем Ag диффундирует в полупроводник. В результате на границе раздела металл – полупроводник формируются твердые фазы AgP₂ и Ag – In. В диапазоне температур от 300

до 450°C, исследованном в работе [26], бинарные соединения с In не наблюдались. Формирование омического контакта авторы связывают с фазой AgP₂. Величина контактного сопротивления при аналогичном уровне легирования значительно меньше, чем в Au/InP (см. табл. 3). В промышленном производстве чаще используются контакты на основе золота.

Контакты с легирующим слоем

Многослойные схемы металлизации обычно включают слои, являющиеся источниками примесей *p*- или *n*-типа, обеспечивающие легирование поверхности полупроводника через твердые или жидкие фазы реакции в процессе отжига. Благодаря этим легированным областям, удается уменьшить ширину обедненного слоя, образованного на границе раздела металл – полупроводник, и соответственно величину R_c .

Для создания контакта к *p*-InP часто используются металлизации Au – Zn и Au – Be, где Zn и Be применяются для *p*-типа легирования [23, 31-34]. В структуре Au – Zn/*p*-InP цинк и золото наносятся по отдельности, и тогда Zn проникает в полупроводник, или напыляются вместе. В процессе отжига при $T=340^\circ\text{C}$ Au и Zn диффундируют в полупроводник, а In – наружу, в металлизацию. Известно, что Au диффундирует быстрее чем Zn, и успевает сформировать соединения с фосфором. В процессе отжига при $T=360^\circ\text{C}$ возникают фазы Au-In, а в результате отжига при $T=380^\circ\text{C}$ контакт становится омическим. Наименьшее контактное сопротивление $R_c = 1,8 \cdot 10^{-4}$ Ом·см² для Au-Zn/*p*-InP с уровнем легирования полупроводника $5,5 \cdot 10^{18}$ см⁻³ было получено при отжиге 420 – 480°C, что авторы [31] объясняют формированием фаз Au₃In₂/ Au₉In₄ и Au₂P₃. Из-за очень слабой адгезии между Au – Zn и поверхностью полупроводников A^{III}B^V возникает ряд технологических проблем, связанных с легированием и отжигом контактов. В качестве альтернативы используется бериллий. Взаимодействия между Au, Be, In и P в системе Au – Be/InP очень похожи на взаимодействие в системе Au – Zn/InP, за исключением того,

что не формируются соединения Au – Be и Be – P. Для получения омического контакта с низким сопротивлением необходимо термическое воздействие при температурах выше 400°C. При температурах 420 – 450°C образуются Au₉In₄ и Au₂P₃. Как видно из табл. 4, такой контакт к *p*-InP имеет сопротивление $8 \cdot 10^{-5}$ Ом·см², что на два порядка ниже, чем в контактах с цинком [32].

Таблица 4

ПАРАМЕТРЫ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ С ПОДЛЕГИРОВАНИЕМ ПРИКОНТАКТНЫХ СЛОЕВ *p*- И *n*-INP

Типы металлизации и толщины слоев металлов, нм	Тип InP	Уровень легирования, см ⁻³	Минимальное контактное сопротивление, Ом·см ²	Условия обработки	Ссылки
Au(20)/Zn(40)/Au(270)	<i>p</i>	$5,5 \cdot 10^{18}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	420°C, 3 мин	[23]
Au-Be(250)	<i>p</i>	$5,5 \cdot 10^{18}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	460°C, 3 мин	[23]
Au-Be(100)	<i>p</i>	$1,3 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{-4}$		[23]
Au-Be(80)/Au(210)	<i>p</i>	$1 \cdot 10^{18}$	$8 \cdot 10^{-5}$	420°C, 10 мин	[29]
Au-Be(100)/Au(200)	<i>p</i>	$2 \cdot 10^{18}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	430°C, 4 мин	[33]
Mn(20)/Au(150)	<i>p</i>	$2 \cdot 10^{18}$	$6 \cdot 10^{-4}$	450°C, 15 с	[35]
Mg(40)/Au(160)	<i>p</i>	$6 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{-4}$	446°C, 50 мин	[36]
Ni(40)/Au(140)	<i>p</i>	$2 \cdot 10^{18}$	$9 \cdot 10^{-4}$	400°C, 30 с	[36]
Au-Sn(250)	<i>n</i>	$3 \cdot 10^{18}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	390°C, 30 с	[37]
Au-Ge(300)	<i>n</i>	$3 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{-7}$	375°C, 30 с	[38]
Au-Ge(100)/Au(100)	<i>n</i>	$1,6 \cdot 10^{18}$	0.03 Ом·мм	420°C, 30-270 с	[39]

Для *p*-InP применялись и другие контактные структуры, например, с использованием Mn, Mg, Ni, но на их основе пока не удалось получить меньшее контактное сопротивление. Данные о процессе формирования R_c и величинах легирования приведены в табл. 4 [33, 35].

Малые величины контактного сопротивления были получены для контакта Au – Sn к *n*-InP, которые на порядок меньше, чем в Au – Be/*p*-InP. При легировании *n*-InP $n = 3 \cdot 10^{18}$ см⁻³ после отжига контактов

температуре 390°C длительностью 30 с сопротивление контакта составило $R_c = 1,8 \cdot 10^{-6}$ Ом·см² [37]. В температурах отжига 380–410°C в контактной структуре были образованы фазы Au₄In, AuSn и полукристаллический InP. При температурах выше 390°C в контакте выявлен преимущественно Au₃In. Недостаток использования такой схемы состоит в том, что формирование омического контакта происходит в узком температурном диапазоне между 380–410°C [39, 40].

Очень часто для получения как можно меньшего контактного сопротивления к *n*-InP в качестве контактообразующего слоя используют Au–Ge – золегерманиевую эвтектику [34, 41], в которой процентное содержание Au – 12,5%, а температура ее плавления составляет 363°C [25]. По мнению авторов [34] при температуре плавления эвтектики происходит локализация расплава Au–Ge, что приводит к образованию InP. При этом In, диффундируя наружу Au и Ge, формирует участки, обогащенные индием, и выступает в роли донора. Однако при отжиге контактной структуры Au–Ge/InP при температуре от 380 до 450°C проходят твердофазные реакции, а именно формируются бинарные фазы. Сначала при 320°C образуется GeP, затем при увеличении температуры формируются Au₃In и Au₂P, и уже при 450°C в контакте присутствуют фазы GeP, Au₉In и Au₂P₃. После следующего увеличения температуры обработки наблюдается внешняя диффузия и возникновение вакансий фосфора, что ведет к деградации контакта и увеличению сопротивления. Омические свойства контакта начинают проявляться при температуре отжига 320°C и уровне легирования $3 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Наибольшее значение $R_c = 1 \cdot 10^{-7}$ Ом·см² для контакта Au–Ge/*n*-InP было получено при температуре отжига 375°C в течение 30 с [34].

Анализируя изложенное, можно заключить, что для контактов Au/*n*-InP и на основе Au с дополнительными легирующими слоями оптимальный температурный диапазон формирования R_c приблизительно одинаков: 390–420°C. Однако контактное

сопротивление для *n*-InP на один-два порядка ниже у контактов, в которые введены Sn или Ge.

Адгезионные слои

Каждый слой контактной структуры играет важную роль в формировании и работе омического контакта. Например, для защиты контакта от окисления в роли верхнего слоя наносится Au, для легирования полупроводника на его поверхность наносится Ge для *n*-InP или Zn для *p*-InP, а для улучшения адгезии в контактной структуре в нее дополнительно вводится адгезионный слой (например, Pd или Ni).

Характерные особенности этих металлов – стойкость к окислению, низкая температура реакции с A^{III}B^V, вследствие чего значительно повышается адгезия к полупроводнику, а также способность формирования соединений с элементами групп III и V периодической системы Менделеева. Примерами таких контактных структур могут быть Ni/Zn/Ni/*p*-InP; Au/Pd/Zn/Pd/*p*-InP [42-44], Pd/Sb/Zn/Pd/*p*-InP [45, 46], Au/Ni/Au–Ge [47-52], Pd/InP, Pt/InP [4] и Ni/InP [53].

Палладий в омических контактах

В контактных структурах палладий может использоваться непосредственно для формирования омических контактов к полупроводниковым соединениям A^{III}B^V (Pd/*n*-InP, $R_c = 7 \cdot 10^{-5}$ Ом·см²) [14]. При небольших температурах БТО (<250°C) формируются аморфные тройные фазы. При температурах выше 400°C тернарная фаза Pd₂InP разлагается с образованием бинарных фаз PdIn и PdP₂, которые уравновешены в контакте с InP.

На практике чаще всего Pd используют как один из компонентов в многослойной металлизации, где его основная функция состоит в обеспечении хорошей адгезии между металлизацией и поверхностью полупроводника. Наиболее часто создается контактная металлизация Ge/Pd/*n*-InP. В этом случае омический контакт формируется на основе механизма твердофазной рекристаллизации, соответственно которому после того, как на поверхность *n*-InP нано-

сятся пленки Pd и Ge и подвергаются низкотемпературному отжигу, происходит формирование тернарной фазы Pd₂InP. При повышении температуры БТО германий, вступая в реакцию с Pd₂InP, формирует устойчивую бинарную фазу с палладием Pd – Ge, а часть германия легирует приповерхностный слой InP. При температурах БТО 350 – 400°C формируется омический контакт. Контактное сопротивление при БТО $T = 400 - 450^\circ\text{C}$ составляет $6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ [4].

Выбору правильного соотношения между Ge и Pd большое внимание уделялось в работе [14], поскольку это существенно влияло на морфологию и стабильность контакта. В [14] авторы исследовали контактное сопротивление контакта Pd/Ge/*n*-InP при разных атомных соотношениях между Pd и Ge. Для соотношений Pd:Ge > 2 удельное контактное сопротивление $R_c = 1 - 3 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$, для Pd:Ge > 1 $R_c = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$, а для Pd:Ge < 1 – $R_c = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$. Оптимально, когда атомное соотношение Pd:Ge немного превышает 1, в этом случае достигается минимальное значение удельного контактного сопротивления, а структурные исследования показали, что при этом формируется только стабильная бинарная фаза PdGe, которая противодействует образованию других фаз [4].

Методом просвечивающей электронной микроскопии было показано, что в исходном образце вследствие нанесения металлизации на разогретую подложку InP формируются тернарная фаза Pd – In – P и бинарная фаза AuGe [14]. Отжиг при $T = 250^\circ\text{C}$ в течение 180 с ведет к существенным изменениям в структуре контакта, связанным с возникновением фазы Au – Ge – Pd – P, и диффузией In к слою золота, в котором формируются фазы Au – In и Au₁₀In₃. Весь палладий уходит на формирование четверной фазы и PdGe. При этом граница раздела между металлизацией и полупроводником осталась достаточно резкой. Повышение температуры отжига приводит к разложению Au – Ge – Pd – P на GeP и GePd, образованию стабильной фазы Au₁₀In₃ и перемешиванию созданных фаз. Таким образом, после отжига при $T = 325^\circ\text{C}$ в течение 5 с граница раздела стала сильно

размытой, а при $T = 400^\circ\text{C}$ в течение 20 с и $T = 450^\circ\text{C}$ в течение 180 с она значительно расширилась.

В работе [54] исследовались контактные структуры Ge/Pd/*n*-InP и Au/Ge/Pd/*n*-InP с одинаковым уровнем легирования полупроводника $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Наименьшее контактное сопротивление было получено на контакте с верхним слоем золота $R_c = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ при температуре отжига 300 – 375°C. Контакт, который не имел золота, отжигался при температурах 400 – 450°C для достижения $R_c = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$.

Использование Pd в контакте значительно повышает адгезию между контактной структурой и полупроводником. Наличие Au в контакте Au/Ge/Pd положительно влияет на понижение контактного сопротивления, но в контакте Pd/Ge удалось достичь более гладкой морфологии поверхности. Отметим также, что температурный диапазон формирования омического контакта Pd/Ge составляет 350 – 450°C что выше, чем для контакта Au/Ge/Pd, где этот диапазон составляет 300 – 375°C.

Исходя из того, что для *n*-InP омический контакт может формироваться либо в случае сильнолегированной приповерхностной области полупроводника либо в случае, когда работа выхода металла будет меньше работы выхода InP, в работе [14] отмечалось, что фазы Au₁₀In₃, GeP в контакте Au/Ge/Pd и фазы PdIn, PdP₂, Pd₂Ge, PdGe в контакте Pd/Ge имеют работу выхода не ниже, чем InP. При этом предполагалось, что омический контакт формируется вследствие диффузии Ge в InP с образованием тонкого сильнолегированного слоя в приповерхностной области InP. Золото усиливает процесс легирования, таким образом, сопротивление контакта Au/Ge/Pd становится меньше, чем Pd/Ge.

В [14] исследовалось также влияние длительности отжига на контактное сопротивление при температурах 300, 325, 350 и 375°C (рис 1). При БТО до 300°C и выше 400°C контакты имеют барьерную ВАХ.

Из рис. 1 видно, что R_c резко уменьшается после БТО длительностью до 100 с. При более длительном

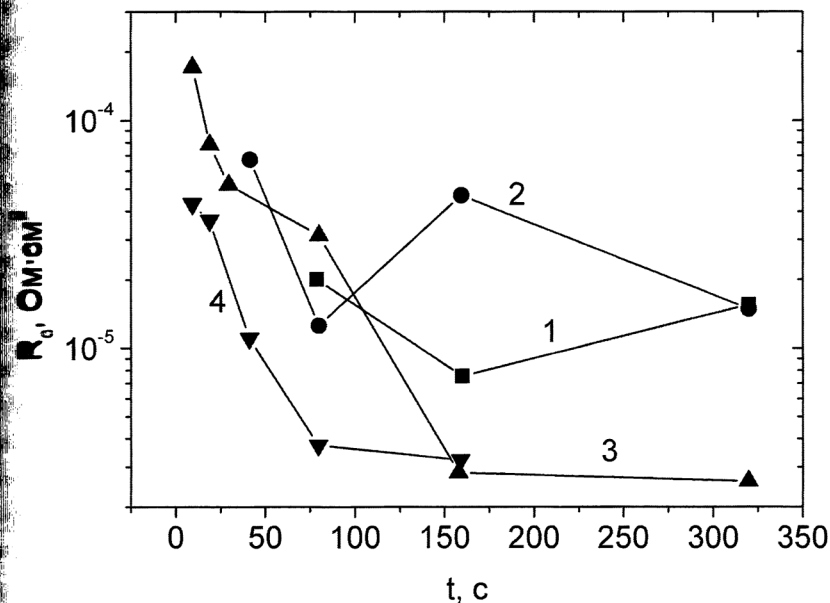


Рис. 1. Зависимость удельного контактного сопротивления контакта Au/Ge/Pd/n-InP от времени отжига при разных температурах: 1 – 300°C; 2 – 325°C; 3 – 350°C; 4 – 375°C [14]

С увеличением температуры темп спада R_c уменьшается. Наименьшее контактное сопротивление было получено для образцов, прошедших БТО при $T=350$ и $T=375$ °C. Разброс значений R_c может быть связан с неравномерным распределением фаз в металлизации.

В приборах с контактами Pd/Ge создается защитная металлизация, например, Ti/Pt, противодействующая окислению Ge и остающаяся инертной до температуры отжига 550°C. При дальнейшем повышении температуры отжига микроструктура контакта Pd/Ge/n-InP резко ухудшается [14].

В [55, 56] исследовались реакции между Pd и n-InP в случае, когда Pd осаждался не обычным электронно-лучевым испарением или методами напыления, а методом химического восстановления. Оптимальное контактное сопротивление при уровне легирования полупроводника 10^{15} см⁻³ составило $5 \cdot 10^{-7}$ Ом·см² после отжига при $T=300$ °C. С помощью рентгенофазового анализа в исходном образце была выявлена фаза InPd,

а после отжига при 300°C идентифицированы Pd₂In и PdIn₃.

Никель в омических контактах к InP

Никель широко применяется в контактах к n-InP. Формирование контакта Ni на подложке n-InP происходит в интервале температур 200 – 500°C [55, 57]. Процессы, проходящие при формировании контакта Ni/InP, очень похожи на процессы в структуре Pd/InP. После нанесения металла на подложку возникает тройная аморфная фаза Ni_{2,7}InP и при низкотемпературных отжигах < 200°C особых изменений не происходит. Такая же ситуация наблюдается в случае отжига $T=250$ °C, когда в соответствии с данными рентгенофазового анализа Ni расходуется на формирование соединения Ni₃InP [57]. Начало кристаллизации аморфного слоя проявляется в образцах, отожженных в диапазоне $T=250-300$ °C. Кроме тернарной фазы Ni₂InP возникают бинарные фазы Ni₂P и In₂O₃. В отличие от Pd/InP, в Ni/InP процесс кристаллизации очень неравномерный. В контакте

наряду с Ni_2InP присутствуют смешанные области Ni_2InP и Ni_2P , в то время как другие области состоят из In_2O_3 [57]. Отжиг при $T = 500^\circ\text{C}$ приводит к распаду Ni_2InP на Ni_2P и металлический In , который частично диффундирует наружу, окисляясь и формируя In_2O_3 и $\text{In} - \text{P}$, что свидетельствует о том, что P израсходован.

Об омических контактах Ni/InP , состоящих из фосфида никеля, сообщалось в [58], где исследовалось взаимодействие напыленной пленки Ni_2P на подложки $n\text{-InP}$ и $p\text{-InGaAs}$ и было обнаружено формирование омических контактов с низким удельным контактным сопротивлением: для $n\text{-InP}$ $R_c = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ при уровне легирования $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а для $p\text{-InGaAs}$ $R_c = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ при уровне легирования $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. В [36] высказано предположение, что контакт Ni/InP становится омическим, потому что Ni_2P создает низкий потенциальный барьер к InP . На основе анализа фазовых диаграмм $\text{Ni} - \text{In} - \text{P}$ авторы [36] считают, что фаза Ni_2P должна быть стабильной в контакте с InP по крайней мере до температуры 600°C .

Для контакта Ni/InP получено контактное сопротивление $10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ с уровнем легирования InP $1,7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при отжиге 400°C в течение 2–20 мин [59]. В отличие от работы [58] на поверхности InP наблюдается фаза Ni_3P , а не Ni_2P , которая собственно и обуславливает низкое сопротивление контакта. При более длительных отжигах Ni_3P трансформируется в Ni_2P , вследствие этого резко увеличивается контактное сопротивление.

В [55] получен омический контакт методом химического осаждения Ni на $n\text{-InP}$ с уровнем легирования 10^{18} см^{-3} . Сопротивление контактов порядка $R_c = 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ сохранялось в широком температурном диапазоне термических обработок $300 - 500^\circ\text{C}$. В отличие от химически осажденных контактов Pd/InP , Ni реагирует с фосфором с образованием фосфидов Ni_3P и Ni_2P , которые являются металлическими проводниками с низким объемным удельным сопротивлением.

Платина в омических контактах к InP

Платина в первую очередь используется в качестве одного из компонентов многослойной структуры металлизации для улучшения адгезии с полупроводником.

Контакты на основе платины широко используются для создания термостабильных омических контактов со сравнительно низким сопротивлением и однородностью лучше, чем у контактов на основе золота (табл. 5).

Платина также широко используется в качестве диффузионного барьера для минимизации взаимной диффузии между полупроводником и металлическими компонентами контактной структуры. Она, как правило, менее активна, что обуславливает формирование более однородной границы раздела. К достоинствам платины относятся также простота осаждения, стойкость к окислению и относительно низкая температура реакции с $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, что значительно повышает адгезию между контактом и полупроводником [4].

Платина реагирует с $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ при низких температурах около 325°C с образованием тернарных металлических фаз, многие из которых при соединении с InP являются аморфными. При последующем увеличении температуры БТО возникают кристаллические фазы, тройная Pt_3InP кубическая Pt_3In при 350°C [69]. Отжиг тройных фаз при высоких температурах 450°C приводит к их разложению в бинарные фазы PtIn_2 и PtP . Фазовые диаграммы при 600°C показали наличие фазы $\text{Pt} - \text{In} - \text{P}$. Реакции в контакте Pt/InP близки к реакциям в контактах Ni/InP и Pd/InP . Основным отличием являются более высокие температуры взаимодействия, что неудивительно, учитывая более высокую температуру плавления Pt 1772°C по сравнению с Pd 1554°C и Ni 1452°C [69].

Также платина широко используется в нелегированных омических контактах. Такие контакты, как правило, формируются последовательным нанесением на поверхность полупроводника титана

Таблица 5

ПАРАМЕТРЫ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К p- И n-IMP

Типы металлизации и толщины слоев металлов, нм	Тип InP	Уровень легирования, см ⁻³	Минимальное контактное сопротивление, Ом·см ²	Условия обработки	Ссылки
	n	1·10 ¹⁸	7·10 ⁻⁵	300-350°C	[14]
	n	1·10 ¹⁸	5·10 ⁻⁷	хим. осажд. 300-350°C	[55, 56]
Pd(30)/Ge(50)	n	1·10 ¹⁷	6·10 ⁻⁶	400-450°C	[4]
Pd(50)/Ge(115)	n	5,3·10 ¹⁸	1,27·10 ⁻⁵	300°C	[60]
Pd(10)/Ge(5)/Pd(25)	n	1·10 ¹⁷	1·10 ⁻⁵	400-425°C, 180 с	[14]
Pd(10)/Ge(20)/Pd(25)	n	1·10 ¹⁷	4,2·10 ⁻⁶	400-450°C	[14]
Pd(30)/Ge(50)	n	1·10 ¹⁷	6·10 ⁻⁶	400-450°C	[14]
Pd(25)/Ge(50)/Au(40)	n	1·10 ¹⁷	2,5·10 ⁻⁶	350-375°C	[4, 14]
Pd(10)/Zn(5)/Pd(20)/Au(60)	p	2·10 ¹⁸	7·10 ⁻⁵	420-425°C, 30-70 с	[45]
	n	1·10 ¹⁸	1·10 ⁻⁶	350°C	[55]
	n	2·10 ¹⁸	3·10 ⁻⁶	–	[58]
Pd(20)	n	1,7·10 ¹⁸	3·10 ⁻⁷	400°C	[59]
Pd(150)/Ni(30)	n	8·10 ¹⁷	0,09-0,16 Ом·мм	360-630°C, 30 с	[61]
Pd(125)/Ni(25)	n	8·10 ¹⁷	8·10 ⁻⁶	375°C, 3 мин	[62]
Pd(300)/Ni(70)	n	8·10 ¹⁷	1,2·10 ⁻⁶	350-400°C, 2 мин	[23]
Pd(20)/Au(40)/Ni(140)	n	1,7·10 ¹⁸	1·10 ⁻⁷	400°C, 20 мин	[63]
Pd(50)/Au(500)/Ni(5)	n	10 ¹⁵	1,5·10 ⁻⁶	330-390°C, 15 мин	[64]
Pd(25)/Ge(50)/Au(40)	n	1·10 ¹⁷	1·10 ⁻⁷	400°C, 10 с	[65]
Pd(40)/Ge(20)/Ni(140)	n	1,7·10 ¹⁸	1·10 ⁻⁸	400°C, 5 мин	[63]
Pd(60)/Ni(15)/Au(40)	n	2·10 ¹⁸	2·10 ⁻⁷	430-450°C, 2 с	[48]
Pd(50)/Ni(75)/Au(100)	n	2·10 ¹⁸	8·10 ⁻⁷	450°C, 25 с	[66]
Pd(25)/Au(50)/Ge(25)/Ni(5)	n	(5-9)·10 ¹⁵	1·10 ⁻⁴	450°C, 1 мин	[23]
Pd(40)/Au-Ge(300)/Ni(70)	n	8·10 ¹⁷	2,3·10 ⁻⁶	400°C, 2 мин	[23]
Pd(100)	n	8·10 ¹⁸	3·10 ⁻⁶	напыление	[58]
Pd(50)/Pt(60)/Au(500)	n	1·10 ¹⁸	8·10 ⁻⁶	–	[63]
Pd(50)/Pt(60)	n	(5-8)·10 ¹⁸	8·10 ⁻⁷	–	[67]
Pd(50)/Pt(60)	n	(5-8)·10 ¹⁸	3·10 ⁻⁷	без отжига	[68]
Pd(50)/Pt(75)	n	(5-6)·10 ¹⁷	1·10 ⁻⁵	–	[67]
Pd(50)/Pt(75)	n	(5-6)·10 ¹⁷	1,8·10 ⁻⁶	без отжига	[68]

платины и золота [67, 68, 70–75]. Осаждение Au до отжига позволяет не нарушать условия вакуума при последовательном нанесении всех компонентов металлизации. Недостатком такого способа является низкая устойчивость контакта к последующему отжигу. Pt и Ti улучшают адгезию к полупроводнику и выступают в качестве диффузионных барьеров для Au [72]. Наиболее подробно контакты Pt/Ti рассмотрены в [71, 75, 74, 75].

Контакты с диффузионными барьерами

В качестве диффузионных барьеров в технологии омических контактов используются тугоплавкие металлы и их сплавы. Однако при долгосрочной работе и повышенной температуре между поликристаллическими компонентами металлизации наблюдается межзеренная диффузия, разрушающая границу раздела металл – полупроводник. Для ограничения диффузии вместо поликристаллических пленок тугоплавких металлов все чаще применяются диффузионные барьеры из аморфных или квазиаморфных пленок, боридов, вольфрамидов, нитридов тугоплавких металлов. Например, борид титана в контакте Au/TiB_x/InP является термостойким до температуры 600°C, а при 800°C еще сохраняет свои барьерные свойства [76, 77]. Примером таких барьерных контактов, могут быть AuZn/TiW/Au [78] и AuGe/TiB_x/Au [76, 77].

Таблица 5

ПАРАМЕТРЫ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ С ДИФфуЗИОННЫМИ БАРЬЕРАМИ К *p*- И *n*-INP

Типы металлизации и толщины слоев металлов, нм	Тип InP	Уровень легирования, см ⁻³	Минимальное контактное сопротивление, Ом·см ²	Условия обработки	Ссылки
AuBe(80)/Cr(20)/Au(200)	<i>p</i>	$5,5 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{-4}$	420°C, 4 мин	[38]
AuBe(80)/Cr(20)/Au(200)	<i>p</i>	$2 \cdot 10^{18}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	420°C, 3 мин	[38]
AuBe(80)/Cr(20)/Au(200)	<i>p</i>	$1 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{-5}$	410°C, 3-4 мин	[79]
Ge(45)/Au(80)/Ti(50)/Au(300)	<i>n</i>	$1 \cdot 10^{18}$	$4 \cdot 10^{-7}$	480°C, 90 с	[80]
Ge(45)/Au(80)/Ni(25)/Ti(50)/Au(300)	<i>n</i>	$1 \cdot 10^{18}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	440°C, 90 с	[80]
AuZn(25)/TiW(50)/Au(1000)	<i>p</i>	$1 \cdot 10^{18}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	410°C, 30 с	[78]
AuGe/TiB ₂ /Au	<i>n</i>	$1 \cdot 10^{18}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	400°C	[81]
Ni/AuGe/Ru/Au	<i>n</i>	–	$1 \cdot 10^{-7}$	400°C, 30 с	[82]
Ni(25)/Ge(50)/Au(80)/Ti(5)/TiN(100)/Ti(5)/Au(200)	<i>n</i>	$2 \cdot 5 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 8,3 \cdot 10^{-5}$	375°C, 15 с	[83]

Контактное сопротивление и условия процесса формирования этих контактов приведены в табл. 6.

Вольфрамид титана использовался в контактной металлизации AuZn/TiW/Au [78, 84, 85] для полевых транзисторов на основе *p*-InP. Контактное сопротивление $R_c = 3,7 \cdot 10^{-5}$ Ом·см² было получено после БТО при $T = 410^\circ\text{C}$

В [76, 77] в качестве диффузионного барьера использовался квазиаморфный TiB₂, который наносился на поверхность InP, подвергнутую импульсной фотонной очистке, методом магнетронного распыления в атмосфере Ag + N₂ из порошковых пресованных мишеней. Подложки были двух видов – пористые и эпитаксиальные. Контактные структуры TiB_x/InP и Au/TiB_x/InP отжигались в атмосфере водорода при температурах $T = 400 - 800^\circ\text{C}$ в течение 60 с. Для исследований были использованы методы оже-спектро-

скопии, рентгенофазного анализа и атомно-силовой микроскопии.

Оказалось, что при температурах отжига до 600°C диффузионный барьер сохраняет резкую границу раздела. При увеличении температуры отжига до 800°C происходит сильное размытие границы раздела и усиливается массоперенос, что обусловлено релаксацией внутренних механических напряжений в контактах, сопровождающейся растрескиванием контактной системы.

Авторы работ [76, 77] отмечают значительное преимущество контактов к структурам $n^+ + n^-$ InP с пористым n^+ буферным слоем, обусловленное минимальным содержанием концентраторов напряжений – в отличие от эпитаксиальных структур, выращенных на стандартных подложках.

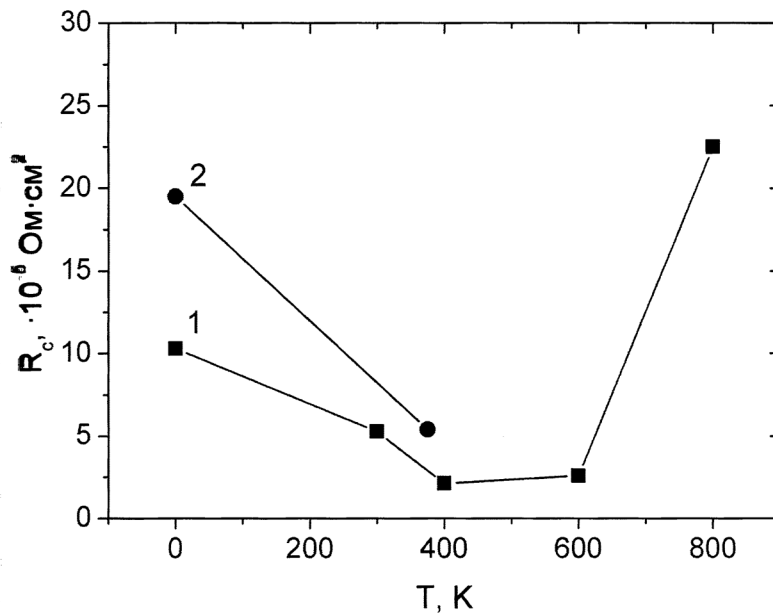


Рис. 2 Зависимость удельного контактного сопротивления контактных структур от температуры БТО: 1 – Au/TiB_x/AuGe/InP; 2 – Ge/Au/Ti/TiN/Ti/Au/InP [83]

В [81] рассмотрено влияние процессов межфазного взаимодействия на свойства омического контакта Au/TiB_x/AuGe/InP. Зависимость удельного контактного сопротивления от температуры БТО указана на рис. 2.

Наименьшее сопротивление $R_c = 2,12 \cdot 10^{-5}$ Ом·см² получено при отжиге 400°С, при котором происходит впавление в поверхность InP пленочного золота с германием, что подтверждается рентгеноструктурным анализом.

Выводы

На основе анализа литературных данных установлено, что основным механизмом деградации контактной металлизации к фосфиду индия, сформированной поликристаллическими пленками металлов-сплавов, является массоперенос компонентов металлизации по границам зерен.

Для повышения термостойкости омических контактов к фосфиду индия необходимо между контактообразующим материалом и верхним слоем металлизации создавать диффузионные барьеры,

состоящие из проводящих пленок аморфных сплавов тугоплавких металлов, не взаимодействующих с компонентами металлизации и полупроводника и существенно замедляющих (или исключаящих) зернограничную диффузию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фосфид индия в полупроводниковой электронике / Под ред. академика АН МССР С. И. Радауцана. — Кишинев: Штинца, 1988. — 294 с.
2. Golio J. M. Optimum semiconductors for high-frequency and low-noise MESFET applications / J. M. Golio, R. J. Trew // IEEE Trans. Electron Dev.. — 1983. — V. ED-30, N 10. — P. 1411–1413.
3. 22nd International conference on Indium Phosphide and Related Materials: Conference proceeding (May 31 – June 4, 2010) / Yoshiaki Nakano. — Japan, Kagawa, 508 p.
4. Ivey D. G. Platinum metals in ohmic contacts to III-V semiconductors / D. G. Ivey // Platinum Met. Rev.. — 1999. — V. 43, N1 – P. 2–12.
5. Sze S. M., Kwok K. Ng. Physics of semiconductor devices. — A. John Wiley & Sons, Inc., Publ., 2007. — 815 p.
6. Dargys A. Kundrotas J. Handbook on physical properties of Ge Si GaAs and InP. — Vilnius, Science and Encyclopedia Publisher, 1994.
7. Ohmic contacts to InP and related materials: Proceeding of the conference Indium phosphide and related materials, processing, technology and devices, (Artech House, New York 1992) / A. Katz, 1992. — P. 307–328.

8. ErAs epitaxial ohmic contacts to InGaAs/InP / U. Singiseti, J. D. Zimmerman, M. A. Wistey [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* — 2009. — V. 94, N 8. — P. 083505.
9. Бедный Б. И. Электронные ловушки на поверхности полупроводников / Б. И. Бедный // *СОЖ*. — 1998. — №7. — С. 114—121.
10. Jian P. Ohmic contact formation in palladium-based metallizations to n-type InP / P. Jian, D. G. Ivey // *J. Electron. Mater.* — 1994. — V. 23, N 9 — P. 953—962.
11. Справочник по электротехническим материалам. В 2 т. Т. 2 / Под ред. Корицкого Ю. В., Пасынкова В. В., Тареева Б. М. — Л.: Энергоатомиздат, 1988. — 728 с.
12. Физические величины / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1231 с.
13. Basemetals.com [Electronic resource]. — Electronic data. — FastMarkets Ltd 2012. — Mode access : <http://www.thebulliondesk.com>
14. London metal exchange [Electronic resource]. — Electronic data. — London, UK 2012. — Mode access : <http://www.lme.com>
15. Rhoderich E. H., Williams R. H. Metal-Semiconductor contacts, 2nd edn. Clarendon, Oxford., 1988.
16. Фоменко В. С. Эмиссионные свойства материалов. Справочник. / В. С. Фоменко. — Киев: Наукова думка, 1981. — 340 с.
17. Бланк Т. В. Механизмы протекания тока в омических контактах металл—полупроводник. Обзор / Бланк Т. В., Гольдберг Ю. А. // *ФТП*. — 2007. — Т. 41, №11. — С. 1281—1308.
18. Huang W. C. Effect of Au overlayer on PtSi ohmic contacts with n-InP / W. C. Huang // *Appl. Surf. Sci.* — 2005. — V. 245. — P. 141—148.
19. Dutta R. Graded band-gap ohmic contacts to n- and p-type InP / R. Dutta, M. A. Shahid, P. J. Sakach // *J. Appl. Phys.* — 1991. — V. 69, N. 7. — P. 3968—3974.
20. Huang W. C. AuGePt ohmic contact to n-type InP / W. C. Huang, T. F. Lei, C. L. Lee // *J. Appl. Phys.* — 1996. — V. 79, N 12. — P. 9200—9205.
21. Huang W. C. PtGe ohmic contact to n-type InP / W. C. Huang, T. F. Lei, C. L. Lee // *J. Appl. Phys.* — 1995. — V. 78, N 10. — P. 6108—6112.
22. Kupka R. K. Minimal ohmic contact resistance limits to n-type semiconductors / R. K. Kupka, W. A. Anderson // *J. Appl. Phys.* — 1991. — V. 69, N6. — P. 3623—3632.
23. Gold-based ohmic contacts on III-V compounds: Thermally induced reactions between metallization and the semiconductor compound / A. Piotrowska, E. Kaminska, A. Barcz [et al.] // *Thin Solid Films*. — 1985. — V. 130, N 3-4. — P. 231—236.
24. Padovani F. A. Field and thermoionic—field emission in Schottky barriers / F. A. Padovani, R. Stratton // *Sol. St. El.* — 1966. — V. 9, N 7. — P. 695—707.
25. Хансен М. Структуры двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко. — М.: Металлургия, 1962. — 607 с. — (Сер. «Структуры двойных сплавов»; Т. 1).
26. Weizer V. G. Low resistance silver contacts to indium phosphide: Electrical and metallurgical considerations / V. G. Weizer, N. S. Fata // *J. Appl. Phys.* — 1993. — V. 73, N 5. — P. 2353—2359.
27. Cross-sectional transmission electron microscopic study of Au-GaP and Au/InP contacts / B. P. cz, R. Veresegey zy, G. Radn cz [et al.] // *J. Appl. Phys.* — 1991. — V. 70. — P. 332—336.
28. Mills J. S. K. Conditions of fabrication that control the interfacial microstructure of metal-semiconductor contacts formed on silver metal and (100) - oriented substrates of indium phosphide / J. S. K. Mills, D. L. Kirk // *Thin Solid Films*. — 1978. — № 55 — P. 149—167.
29. Kirk D. L. The relationship between the microwave efficiency of indium phosphide transferred electron devices and the metallurgical state of the cathode contact / D. L. Kirk, J. S. K. Mills, J. E. Pattison // *J. Phys. D: Appl. Phys.* — 1979. — V. 12, N 11. — P. 1995—2001.
30. Saidane A. The use of mixed alloy contacts to engineer metal-semiconductor interfaces and electrical characteristics of metal-InP contacts / A. Saidane, D. L. Kirk // *J. Phys. D: Appl. Phys.* — 1985. — V. 18, N 8. — P. 1609—1625.
31. Characterization of Zn/Au back contact to low-doped p-type InP / O. Oparaku, C. L. Dargan, N. M. Pearsall [et al.] // *Semicond. Technol.* — 1990. — V. 5, N 1. — P. 65—68.
32. Ohmic contacts to p-type InP using BeAu metallization / H. Temkin, R. J. McCoy, V. G. Keramidas [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* — 1980. — V. 36, N 6. — P. 444—446.
33. Malina V. Au-Be/Au and Au-Be/Cr/Au ohmic contacts to p-type InP and InGaAsP / V. Malina, K. Vogel, J. Zelinka // *Semicond. Sci. Technol.* — 1988. — V. 3, N 10. — P. 1015—1021.
34. Formation, microstructure et resistances des contacts Au-Ge/n-GaAs, Au-Ge/n-InP, Au-Zn/p-InP et Au-Be/p-InP / P. Auvarc'h, A. Guivarc'h, H. L'haridon [et al.] // *Thin Solid Films*. — 1985. — V. 127, N 1-2. — P. 39—68.
35. Ivey D. G. An investigation of Au/Mn contacts to p-type InP / D. G. Ivey, P. Jian, R. Bruce // *Thin Solid Films*. — 1990. — V. 190, N 2. — P. 217—226.
36. Piotrowska A. Ohmic contacts to III-V compound semiconductors: a review of fabrication techniques / A. Piotrowska, A. Guivarc'h, P. Pelous // *Solid-State Electron.* — 1983. — V. 26, N 3. — P. 179—185.
37. Barnes P. A. Alloyed tin-gold ohmic contacts to n-type indium phosphide / P. A. Barnes, R. S. Williams // *Solid-State Electron.* — 1981. — V. 24, N 10. — P. 907—913.
38. Keramidas V. G. Metallurgical interactions at metallization-semiconductor interfaces / V. G. Keramidas // *Thin Solid Films*. — 1982. — V. 96, N 4. — P. 347—363.
39. Metallurgical behavior of gold-based ohmic contacts to InP/InGaAsP material system / I. Camlibel, A. K. Chin, F. Ermanis [et al.] // *J. Electrochem. Soc.* — 1982. — V. 129, N 11. — P. 2585—2591.
40. Barnes P. A. Alloyed tin-gold ohmic contacts to n-type indium phosphide / P. A. Barnes, R. S. Williams // *Solid-State Electron.* — 1981. — V. 24, N 10. — P. 907—913.

51. Binari S. C. AuGe/Au ohmic contacts to n-type InP by hot-plate / S. C. Binari, J. B. Boos // *Electron. Lett.* — 1989. — V. 25, N 1. — P. 1207–1209.
52. Near-noble transition-metal-based ohmic contacts to p-InP: Comparison of Ni and Pd as a base metal / A. Yamaguchi, H. Asamizu, T. Okamoto // *J. Appl. Phys.* — 1999. — V. 85, N 11. — P. 7792–7796.
53. Hwang S. Ohmic contacts of Pd/Zn/M(= Pd or Pt)/Au to p-InP / S. Hwang, J. Shim, Y. Eo // *J. Korean Phys. Soc.* — 2005. — V. 47, N 4. — P. 751–755.
54. Pd/Zn/Pd/Au ohmic contacts to p-type InP / D. G. Ivey, L. Wan [et al.] // *J. Electron. Mater.* — 1991. — V. 20, N 3. — P. 243–246.
55. Low resistance ohmic contact scheme ($\mu\Omega\text{ cm}^2$) to p-InP / D. G. Ivey, L. C. Wang, J. Y. Cheng, [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* — 1991. — V. 70, N 1. — P. 99–101.
56. Park M.-H. Anomalous lateral Zn surface diffusion in InP caused by Zn-contained metallization / M.-H. Park, P. H. Hao, L. C. Wang // *J. Electron. Mater.* — 1997. — V. 26, N 1. — P. 25–29.
57. Clausen T. Metallurgical optimization for ohmic contacts to InP by conventional metallization schemes / T. Clausen, O. Leistiko // *Electron. Eng.* — 1992. — V. 18. — P. 305–325.
58. Rapid thermal alloyed ohmic contact on InP / G. Bahir, J. R. Abelson [et al.] // *J. Electron. Mater.* — 1987. — V. 16, N 2. — P. 257–262.
59. Zhao W. Electrical and structural investigations of Ag-based ohmic contacts for InAlAs/InGaAs/InP high electron mobility transistors / W. Zhao, L. Wang, I. Adesida // *Appl. Phys. Lett.* — 2006. — V. 89, N 1. — P. 072105-1–072105-3.
60. Erickson P. Characterization of ohmic contacts to InP / P. Erickson, A. Wascom, G. Y. Robinson // *Thin Solid Films.* — 1979. — V. 67, N 2. — P. 421–426.
61. Dunn J. Annealed AuGe based ohmic contacts on InP with ion implantation prior to metallization / J. Dunn, G. B. Stringfellow // *J. Electron. Mater.* — 1990. — V. 19, N 2. — P. L1–L3.
62. Ohmic contacts formation on n-InP / J. Morais, T. A. Fazan, J. R. Abelson [et al.] // *J. Appl. Phys.* — 1996. — V. 79, N 9. — P. 7058–7061.
63. Mohney S. E. Phase formation in Ni/InP contacts / S. E. Mohney, Y. A. Chang // *J. Appl. Phys.* — 1995. — V. 78, N 2. — P. 1342–1347.
64. Ohmic contact formation in palladium-based metallizations to p-type InP / P. Jian, D. G. Ivey, R. Bruce [et al.] // *J. Electron. Mater.* — 1994. — V. 23, N 9. — P. 953–962.
65. Refractory ohmic contacts formed by electroless deposition of palladium and nickel onto n-InP / G. Stremmsdoerfer, Y. Wang, J. R. Martin [et al.] // *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* — 1992. — V. 270. — P. 543–548.
66. Low resistance ohmic contacts onto n-InP by palladium electroless bath deposition / G. Stremmsdoerfer, C. Calais, J. R. Martin [et al.] // *J. Electrochem. Soc.* — 1990. — V. 137, N 3. — P. 835–838.
67. Ni-InP reaction: formation of amorphous and crystalline ternary compounds / T. Sands, C. C. Chang, A. S. Kaplan [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* — 1987. — V. 50, N 19. — P. 1346–1348.
68. Appelbaum A. Sputtered Ni-P as an ohmic contact to n-InP, p-InGaAs and as a diffusion barrier / A. Appelbaum, M. Robbins, F. Schrey // *IEEE Trans. Electron Dev.* — 1987. — V. ED-34, N 5. — P. 1026–1031.
69. Fatemi N. S. The structural and electrical properties of low-resistance Ni contacts to InP / N. S. Fatemi, V. G. Weizer // *J. Appl. Phys.* — 1993. — V. 73, N 1. — P. 289–295.
70. Solid-phase epitaxial Pd/Ge ohmic contacts to $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ /InP / W. X. Chen, S. C. Hsueh, P. K. L. Yu [et al.] // *IEEE Electron. Device Lett.* — 1986. — V. EDL-7, N 8. — P. 471–473.
71. Del Alamo J. A. AuGeNi ohmic contacts to n-InP for FET applications / J. A. Del Alamo, T. Mizutani // *Solid-State Electron.* — 1988. — V. 31, N 11. — P. 1635–1639.
72. An optimal annealing technique for ohmic contacts to ion-implanted n-layers in semi-insulating indium phosphide / K. P. Pande, E. Martin, D. Gutierrez, [et al.] // *Solid-State Electron.* — 1987. — V. 30, N 3. — P. 253–258.
73. Fatemi N. S. The achievement of low contact resistance to indium phosphide: the roles of Ni, Au, Ge, and combinations thereof / N. S. Fatemi, V. G. Weizer // *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* — 1992. — V. 260. — P. 537–542.
74. Anderson D. A. The influence of interfacial morphology and composition on the behavior of AuGeNi contacts to InP / D. A. Anderson, R. J. Graham, J. W. Steeds // *Semicond. Sci. Technol.* — 1988. — V. 3, N 2. — P. 63–76.
75. Au/Ge/Ni ohmic contacts to n-type InP / D. G. Ivey, D. Wang, D. Yang, R. Bruce, G. Knight // *J. Electron. Mater.* — 1994. — V. 23, N 5. — P. 441–446.
76. Morkoc H. Schottky barriers and ohmic contacts on n-type InP based compound semiconductors for microwave FET's / H. Morkoc, T. J. Drummond, C. M. Stanchak // *IEEE Trans. Electron Dev.* — 1981. — V. ED-28, N 1. — P. 1–5.
77. Katz A. Au/Pt/Ti contacts to p-In_{0.53}Ga_{0.47}As and n-InP layers formed by a single metallization common step and rapid thermal processing / A. Katz, B. E. Weir, W. C. Dautremont-Smith // *J. Appl. Phys.* — 1990. — V. 68, N 3. — P. 1123–1128.
78. Pt/Ti/n-InP nonalloyed ohmic contacts formed by rapid thermal processing / A. Katz, B. E. Weir, S. N. G. Chu [et al.] // *J. Appl. Phys.* — 1990. — V. 67, N 8. — P. 3872–3875.
79. Mohney S. E. Interfacial reactions in Pt/InP contacts / S. E. Mohney, Y. A. Chang // *J. Appl. Phys.* — 1993. — V. 74, N 7. — P. 4403–4408.
80. Rapid isothermal processing of Pt/Ti contacts to p-type III-V binary and related ternary materials / A. Katz, S. N. G. Chu, B. E. Weir [et al.] // *IEEE Trans. Electron Dev.* — 1992. — V. 39, N 1. — P. 184–191.
81. Pt/Ti/p-In_{0.53}Ga_{0.47}As low resistance nonalloyed ohmic contact formed by rapid thermal processing / A. Katz, W. C. Dautremont-Smith, S. N. G. Chu [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* — 1989. — V. 54, N 23. — P. 2306–2308.
82. Interfacial microstructure and electrical properties of the Pt/Ti ohmic contact in p-In_{0.53}Ga_{0.47}As formed by rapid thermal processing /

S. N. G. Chu, A. Katz, T. Boone [et al.] // J. Appl. Phys.. — 1990. — V. 67, N 8. — P. 3754–3760.

73. Pt/Ti Ohmic contact to p^{++} InGaAsP (1.3 μm) formed by rapid thermal processing / A. Katz, P. M. Thomas, S. N. G. Chu [et al.] // J. Appl. Phys.. — 1990. — V. 67, N 2. — P. 884–889.

74. Pt/Ti p-InGaAsP nonalloyed ohmic contact formed by rapid thermal processing / A. Katz, W. C. Dautremont-Smith, P. M. Thomas [et al.] // J. Appl. Phys.. — 1989. — V. 65, N 11. — P. 4319–4323.

75. Interfacial microstructure and carrier conduction process in Pt/Ti ohmic contact to p-In_{0.53}Ga_{0.47}As formed by rapid thermal processing / S. N. G. Chu, A. Katz, T. Boone [et al.] // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. — 1990. — V. 181. — P. 389–399.

76. Межфазные взаимодействия и особенности структурной релаксации в контактах TiB_x n-GaAs (InP, GaP, 6H-SiC) подвергнутых активным обработкам / Н. С. Болтовец, В. Н. Иванов, Р. В. Конакова [и др.] // ФТП. — 2004. — Т. 38, № 7. — С. 769–774.

77. Свойства барьерных контактов к InP с наноразмерными слоями TiB_x / И. Н. Арсентьев, А. В. Бобыль, И. С. Тарасов [и др.] // ФТП. — 2008. — Т. 42, № 7. — С. 793–798.

78. Boos J. B. Low-resistance AuZn gate ohmic contacts for InP JFETs / J. B. Boos, W. Kruppa // Solid-State Electron.. — 1988. — V. 31, N 2. — P. 127–133.

79. Hasenberg T. C. An improved Au/Be contact to p-type InP / T. C. Hasenberg, E. Garmire // J. Appl. Phys.. — 1987. — V. 61, N 2. — P. 808–809.

80. Dunn J. Annealed AuGe based ohmic contacts milling prior to metallization on InP with ion / J. Dunn, G. B. Stringfellow // J. Electrochem. Mater. — 1990. — V. 19, N 2. — С. L1–L3.

81. Фазы внедрения в технологии полупроводниковых структур / [Ареев О. А., Беляев А. Е., Болтовец Н. С., Конакова Р. В. и др.]. — X. : НТК «Институт монокристаллов», 2008. — 385 с.

82. The role of Ru in improving Schottky and ohmic contacts to InP / W. O. Barnard, G. Myburg, F. D. Auret [et al.] // J. Vac. Sci. Technol. A. — 1995. — V. 46, N 8–10. — P. 893–897.

83. Sputtered full-wafer backside metallization for n-type InP: effect of temperature annealing / St. J. Dixon-Warren, S. Zhang, R. Kucshatla [et al.] // Thin Solid Films. — 2005. — V. 472. — P. 76–83.

84. Boos J. B. Planar fully ion-implanted InP junction FET's with nitride-registered gate metallization / J. B. Boos, W. Kruppa, B. Manar // IEEE Trans. Electron Dev.. — 1989. — V. 10, N 2. — P. 79–83.

85. Patent 5015306 United States, H 01 L 29/80. TiW diffusion barrier for AuZn ohmic contact to p-type InP / Boos J. B. et al.; assigned to the USA as represented by the Secretary of the Navy, Washington, D.C.; Filed: 28.12.1988.

Уважаемые авторы и читатели!

В «Петербургском журнале электроники» могут быть опубликованы статьи по различным направлениям развития электроники.

Основные требования к публикуемым материалам – полезность и необходимость предлагаемых решений, исследований и разработок, применимость в самых широких областях человеческой деятельности.

Статью необходимо прислать по электронной почте (текст – Word, рисунки, фото – tiff, jpeg, не менее 300 dpi).

Обязательно нужно представить фотографию и короткую справку об авторе.

К статье должно быть приложено экспертное заключение.

Справки по телефону: (812) 676-29-54

E-mail: tan@elstandart.spb.ru

Твердуріскі
журнал



Элемент

1
2012