

VIII международная научная конференция
«Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических
материалах»

УДК 537.312.5

А.В. САЧЕНКО*, А.Е. БЕЛЯЕВ*, Н.С. БОЛТОВЕЦ**, Р.В. КОНАКОВ*А, Я.Я. КУДРИК*, С.В. НОВИЦКИЙ*,
В.Н. ШЕРЕМЕТ*, Ю.В. БЫКОВ***, С.В. ЕГОРОВ***, А.Г. ЕРЕМЕЕВ***

**ВЛИЯНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЕХАНИЗМ ТОКОПЕРЕНОСА В
ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТАХ К СОЕДИНЕНИЯМ A^3B^5**

Исследовано влияние микроволновой обработки частотой 2,4 и 24 ГГц на параметры омических контактов к GaAs и InP. До и после микроволновой обработки измерены зависимости удельного контактного сопротивления от температуры, которые описаны моделью омического контакта с высокой плотностью дислокаций в приконтактной области полупроводника с учетом диффузионного подвода электронов и сопротивления шунтов. Микроволновая обработка приводит к увеличению плотности проводящих дислокаций (в ~1,5 раза), что приводит к уменьшению удельного контактного сопротивления.

Ключевые слова: омический контакт, фосфид индия, арсенид галлия, микроволновая обработка, быстрая термическая обработка

Механизмы токопередачи в омических контактах хорошо изучены теоретически и экспериментально, а также надежно воспроизводимы в технологии практически всех полупроводниковых приборов [1-3]. Вместе с тем в интенсивно изучаемых в последнее время сплавных омических контактах к широкозонным полупроводникам с высокой плотностью структурных дефектов в приконтактной области, таких как GaN и GaP отмечались качественные изменения в температурной зависимости удельного контактного сопротивления $\rho_c(T)$. Эти зависимости были не спадающими с ростом температуры, как при реализации известных механизмов, а растущими [4-7]. Указанные отклонения наблюдаются в температурной зависимости $\rho_c(T)$ и связываются с прохождением тока по металлическим шунтам. Величина $\rho_c(T)$ с увеличением температуры измерения ρ_c растет, что предположительно обусловлено металлической проводимостью шунтов, локализованных на структурных дефектах, например, на дислокациях [4]. В [7] это предположение было теоретически детально проанализировано и предложена новая концепция, объясняющая аномальную зависимость $\rho_c(T)$. Ее суть заключается в учете двух механизмов протекания тока: протекание тока через металлические шунты, пронизывающие дислокации и ограничение протекающего тока диффузионным подводом в связи с реализацией у торцов металлических шунтов слоев обогащения, а не обеднения, как в классической модели контакта металл-полупроводник. Такие эффекты, как показывает анализ литературы, типичны для сплавных омических контактов, в которых дефектная приконтактная область полупроводника формируется в процессе релаксации внутренних механических напряжений. В зависимости от режимов отжига контактов, коэффициентов термического расширения металлов и полупроводника и их параметров решеток, плотность структурных дефектов, в том числе дислокаций, может заметно изменяться.

В связи с этим возникает вопрос. Возможно ли целенаправленно изменять абсолютную величину ρ_c и ее наклон от температуры измерения.

Целью данной работы являлось исследование влияния микроволнового излучения на температурную зависимость удельного контактного сопротивления омических контактов к некоторым, практически важным соединениям A^3B^5 и механизм токопередачи в них.

В работе исследовались тестовые структуры для измерения температурной зависимости ρ_c методом TLM в диапазоне температур 100 – 400 К. Параметры эпитаксиальных структур GaAs, InP и GaN приведены в таблице 1.

Контактная металлизация для контактных систем на основе InP была Au(2000 Å)-TiB₂(1000 Å)-Au(250 Å)-Ge(250 Å)-InP и Au(2000 Å)-TiB₂(1000 Å)-Ge(600 Å)-Au(1800 Å)-InP, для контактной

системы на основе GaAs: Au(2000 Å)-TiB₂(1000 Å)-Au(1800 Å)-Ge(300 Å)-GaAs; для GaN – Au(500 Å)-Ti(500 Å)-GaN.

Таблица 1

Параметры эпитаксиальных структур

	n , см ⁻³	d_n , мкм	n^+ , см ⁻³	d_{n^+} , мкм	n^{++} , см ⁻³	$d_{n^{++}}$, мкм
GaAs	$6 \cdot 10^{15}$	3	$5 \cdot 10^{17}$	3	$2 \cdot 10^{18}$	350
InP	$9 \cdot 10^{15}$	2	$5 \cdot 10^{17}$	3	10^{18}	350
GaN	$1,5 \cdot 10^{19}$	1	$> 10^{19}$	1	толщина подложки сапфира ~400 мкм	

Компоненты металлизации напылялись методом последовательного магнетронного распыления на подогретые до 100°C подложки InP и GaAs с последующим быстрым термическим отжигом (БТО) при T=450°C в течение 30 сек InP и 520°C в течение 60 сек. БТО контактов к n⁺-GaN проводили при T=900°C в течение 60 сек.

Микроволновая обработка (МО) осуществлялась микроволновым излучением удельной мощностью 1,5 Вт/см² в течение 10 и 60 с на частоте 2,45 ГГц и 3 с на частоте 24 ГГц. МО на частоте 24 ГГц проводилась в Институте прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород).

В соответствии с предложенной в [7] моделью омического контакта с высокой плотностью дислокаций в приконтактной области полупроводника величину $\rho_c(T)$ с учетом диффузионного подвода электронов и сопротивления шунтов можно рассчитать по формуле

$$\rho_c(T) = \frac{kT}{q} \frac{(1 + 0.6\beta)}{(qV_T/4)e^{y_{c0}}\pi L_D^2 n_\omega N_{D1}} + \frac{\rho_0(1 + \alpha T)d_D}{\pi r^2 N_{D1}}, \quad (1)$$

где k - постоянная Больцмана, T - температура, q - заряд электрона, V_T - средняя тепловая скорость электронов, $y_{c0} = q\phi_{c0}/kT$ - равновесный безразмерный потенциал на границе раздела металл-полупроводник, n_ω - объемная концентрация электронов, $D_n = kT\mu_n/q$ - коэффициент диффузии электронов, μ_n - подвижность электронов, $\beta = (V_T L_D / 4D_n)e^{y_{c0}}$ - коэффициент, учитывающий ограничение тока диффузионным подводом, L_D - длина экранирования Дебая, N_{D1} - плотность проводящих дислокаций, ρ_0 - удельное сопротивление металла при T=0°C, α - его температурный коэффициент, r - радиус металлических шунтов, d_D - расстояние, которое электроны проходят по дислокациям из объема полупроводника до сплошного металлического контакта.

Из приведенной выше формулы следует, что $\rho_c(T)$ существенно зависит от хода температурной зависимости подвижности электронов, а именно $\rho_c(T) \propto 1/\mu(T)$, от температурной зависимости сопротивления металлических шунтов и, кроме того, величина $\rho_c(T)$ обратно пропорциональна плотности проводящих дислокаций в приконтактной области полупроводника. Температурная зависимость ρ_c до и после МО была рассчитана по формуле (1) с учетом механизмов рассеяния электронов на заряженных примесях, на дислокациях и на оптических фононах для n-GaAs, n-InP и n-GaN из соответствующих формул, приведенных в [7].

На рис. 1 и 2 приведены температурные зависимости ρ_c для омических контактов к GaAs и InP до и после МО частотой 2,4 ГГц в течение 10 с и частотой 24 ГГц 3 с (рис. 3). Видно, что для всех образцов после МО ρ_c уменьшается во всем измеряемом диапазоне температур. При этом наблюдается хорошее соответствие экспериментальных зависимостей ρ_c с расчетными. Однако в контактах Au(2000 Å)-TiB₂(1000 Å)-Au(250 Å)-Ge(250 Å)-n-n⁺-n⁺⁺InP после облучения зависимость $\rho_c(T)$ сдвигается в сторону уменьшения ρ_c практически без изменения наклона. Это обстоятельство свидетельствует только о релаксации внутренних механических напряжений с увеличением плотности проводящих дислокаций без изменения состава металлической фазы, формирующей шунты. В то время как в образце с более толстыми металлическими слоями (образцы Au(2000 Å)-TiB₂(1000 Å)-Au(1800 Å)-Ge(300 Å)-n-n⁺-n⁺⁺GaAs и Au(2000 Å)-TiB₂(1000 Å)-Ge(600 Å)-Au(1800 Å)-n-n⁺-n⁺⁺InP) уменьшение ρ_c в области температур выше 250 К после МО идет с изменением наклона зависимости $\rho_c(T)$ по сравнению с необлученными, что указывает не только на увеличение плотности структурных дефектов в приконтактной области полупроводника, но и на изменение состава металлического шунта, например, за счет стимулированного микроволновым излучением массопереноса Au через пленку Ge в контакте к GaAs и Ge через пленку Au в контакте

ВЛИЯНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЕХАНИЗМ ТОКОПЕРЕНОСА В35 ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТАХ К СОЕДИНЕНИЯМ А³В⁵

к InP. О стимулированном микроволновым излучением массопереносе в контактной металлизации сообщалось в [8].

Наряду с плотностью проводящих дислокаций N_{D1} из зависимостей $\rho_c(T)$ в соответствии с [7] также можно рассчитать плотность рассеивающих дислокаций N_{D2} . Данные о параметрах структурных дефектов и величинах ρ_c , измеренных при комнатной температуре, приведены в таблице 2.

Из приведенных в таблице 2 данных видно, что плотность рассеивающих дислокаций N_{D2} в омических контактах к InP практически не изменяется после МО.

Обращает на себя внимание также уменьшение времени экспозиции МО при увеличении частоты излучения. Эффект уменьшения ρ_c при облучении на частоте 24 ГГц достигается за 3 с, а при облучении на частоте 2,45 ГГц за 60 с.

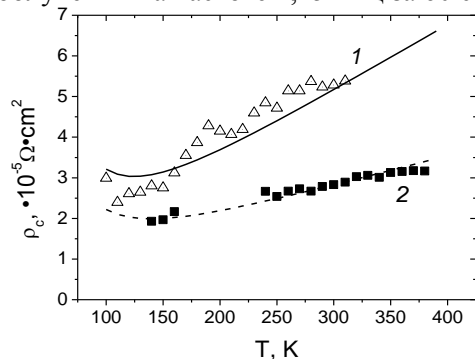


Рис. 1 Температурные зависимости ρ_c для омических контактов к GaAs до (кривая 1) и после МО частотой 2,4 ГГц в течение 10 с (кривая 2) сплошные линии – теория, точки – эксперимент. N_{D1} , см⁻²: 1 – $1 \cdot 10^9$; 2 – $1.5 \cdot 10^9$.

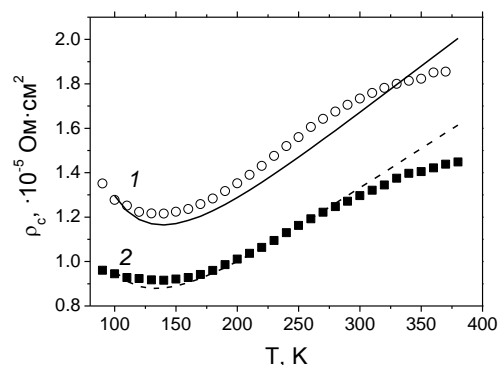


Рис. 2 Температурные зависимости ρ_c для омических контактов к InP до (кривая 1) и после МО частотой 2,4 ГГц в течение 10 с (кривая 2) сплошные линии – теория, точки – эксперимент. N_{D1} , см⁻²: 1 – $3,7 \cdot 10^{10}$; 2 – $2,7 \cdot 10^{10}$, N_{D2} , см⁻²: 1 – $4 \cdot 10^7$; 2 – $4 \cdot 10^7$.

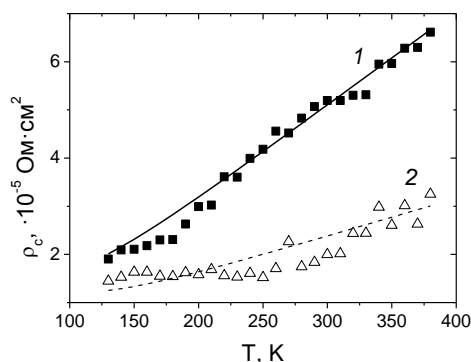


Рис. 3 Температурные зависимости ρ_c для омических контактов к InP до (кривая 1) и после МО частотой 24 ГГц в течение 3 с (кривая 2) сплошные линии – теория, точки – эксперимент. N_{D1} , см⁻²: 1 – $2,5 \cdot 10^{10}$; 2 – $3 \cdot 10^{10}$, N_{D2} , см⁻²: 1 – $4 \cdot 10^7$; 2 – $4 \cdot 10^7$.

Таблица 2

Параметры омических контактов до и после МО

	GaAs		InP			
	исходный	f , 2,45 ГГц	Исходный	f , 2,45 ГГц	Исходный	f , 2,45 ГГц
ρ_c , исх., Ом·см ²	$5,5 \cdot 10^{-5}$		$1,75 \cdot 10^{-5}$		$5,2 \cdot 10^{-5}$	
ρ_c , после МО., Ом·см ²		$3 \cdot 10^{-5}$		$1,3 \cdot 10^{-5}$		$2 \cdot 10^{-5}$
N_{D1} , исх., см ⁻²	$1 \cdot 10^9$		$2,7 \cdot 10^{10}$		$2,5 \cdot 10^{10}$	
N_{D1} , после МО, см ⁻²		$1,5 \cdot 10^9$		$3,7 \cdot 10^{10}$		$3 \cdot 10^{10}$
N_{D2} , исх., см ⁻²	$4 \cdot 10^7$		$4 \cdot 10^7$		$4 \cdot 10^7$	
N_{D2} , после МО, см ⁻²		$4 \cdot 10^7$		$4 \cdot 10^7$		$4 \cdot 10^7$

В контактных структурах к вырожденному n^+ -GaN величина ρ_c до и после МО была измерена лишь при $T=300\text{K}$. В исходном образце величина ρ_c составляла $\sim 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$. после облучения она уменьшилась практически на порядок и оказалась равной $2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$.

Анализ температурных зависимостей ρ_c облученных контактных систем к GaAs и InP с учетом формулы (1) показывает, что механизм токопереноса в них, также как и в исходных образцах обусловлен металлической проводимостью по шунтам, ограниченной диффузионным подводом электронов. Изменение наклона зависимости $\rho_c(T)$ в высокотемпературной области измерений, по-видимому, связано с качественным изменением материала шунтов. Выяснение причины изменения наклона зависимости $\rho_c(T)$ требует дополнительных исследований, проблематичность которых связана с малыми (атомными) размерами металлических шунтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. M. Sze, K. N. G. Physics of Semiconductor Devices. 3rd Ed. (John Wiley and Sons, 2007).
2. В. И. Стриха. Теоретические основы работы контакта металл-полупроводник (Наукова думка; Киев, 1974).
3. E. H. Roderik, R. H. Williams. Metal-Semiconductor contacts. (Clarendon, Oxford. 1988).
4. Т. В. Бланк, Ю. А. Гольдберг. ФТП. 41(11), 1281 (2007).
5. Т. В. Бланк, Ю. А. Гольдберг, Е. А. Поссе. ФТП, 43(9), 1204 (2009).
6. Zhang Yue-Zong, Feng Shi-Wei, Guo Chun-Sheng, et al., Chin. Phys. Lett. 25(11), 4083 (2008).
7. A. V. Sachenko, A. E. Belyaev, N. S. Boltovets, et al. J. Appl. Phys. 111, 083701 (2012).
8. A. E. Belyaev, E. F. Venger, I. B. Ermolovich et. al. Effect of microwave and laser radiations of the parameters of semiconductor structures. Kiev. Intas. 2002. 191 p.

*Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев, Украина

**НИИ "Орион", г. Киев, Украина

***Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

E-mail: belyaev@isp.kiev.ua, konakova@isp.kiev.ua, byk@appl.sci-nnov.ru

Саченко Анатолий Васильевич, д.ф.м.н., профессор, гл. науч. сотр.;
Беляев Александр Евгеньевич, член.-корр. НАНУ, д.ф.м.н., профессор, зам. директора;
Болтовец Николай Силович, к.ф.м.н., нач. отделения;
Конакова Раиса Васильевна, д.т.н., профессор, зав. лабораторией;
Кудрик Ярослав Ярославович, к.т.н., ст. науч. сотр.;
Новицкий Сергей Вадимович, аспирант;
Шеремет Владимир Николаевич, к.ф.м.н., ст. науч. сотр.;
Быков Юрий Владимирович, зав. лабораторией;
Егоров Сергей Васильевич, к.ф.м.н., ст. науч. сотр.;
Еремеев Анатолий Георгиевич, к.ф.м.н., ст. науч. сотр.