

В. Н. ИВАНОВ, д. т. н. Р. В. КОНАКОВА,
к. ф.-м. н. В. В. МИЛЕНИН, М. А. СТОВПОВОЙ

Украина, г. Киев, НИИ «Орион», ИФП НАНУ
E-mail: bms@i.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
02.10 2002 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Е. М. СЕМАШКО
("Сатурн-Микро", г. Киев)

КОНТАКТООБРАЗУЮЩИЕ ПЛЕНКИ БОРИДОВ И НИТРИДОВ ТИТАНА В АРСЕНИДГАЛЛИЕВЫХ СВЧ-ПРИБОРАХ

Рассмотрена термостабильность омических и выпрямляющих контактных систем $AuGe-Ta-Au$, $AuGe-TaN_x-Au$, $AuGe-TiB_x-Au$, $AuGe-TiB_x-Mo-Au$ и $Ti-Au$, TiN_x-Au , TiB_x-Au к эпитаксиальным структурам арсенида галлия.

Несмотря на высокий уровень технологии арсенидгаллиевых дискретных СВЧ-приборов и интегральных схем, до сих пор наряду с материаловедческими проблемами существует ряд технологических задач, связанных с формированием омических и барьерных контактов к GaAs, от решения которых зависят качество и надежность элементной базы, ее работоспособность при повышенной температуре и в экстремальных условиях эксплуатации. Главная из них — устранение массопереноса и фазообразования в омических и барьерных контактах в области рабочих температур СВЧ-прибора (с учетом локального перегрева в т. н. «горячих» точках, когда температура может в 1,5–2 раза превышать рабочую). Решению этой задачи посвящается значительное количество физико-технологических исследований и технологических разработок, обобщенных в ряде обзоров [1–7].

Как известно, вследствие того, что контактообразующие материалы, как правило, являются поликристаллическими, основной механизм деградации в таких контактах обусловлен зернограничной диффузией — самым быстрым процессом, приводящим к разрушению прибора. Большая часть работ по контактам направлена на устранение этого механизма. Однако оказалось, что это довольно сложная технологическая задача, и полностью устранить нежелательные эффекты простыми методами не удастся. Так, использование в качестве контактов аморфных металлов ограничивается сравнительно низкой температурой фазового перехода; применение тонкого антидиффузионного слоя диэлектрика (например SiO_2) требует высокой точности технологического процесса, позволяющего создавать очень тонкие (≤ 50 Å) однородные слои SiO_2 ; создание контактных систем с помощью силицидных и нитридных фаз тугоплавких металлов также требует высокоточных технологических процессов формирования однородных по составу и структуре пленок.

В настоящем сообщении эта задача решается с помощью аморфных пленок боридов и нитридов титана.

В качестве исходного материала для формирования омических и барьерных контактов использовались эпитаксиальные структуры арсенида галлия толщиной $\sim 2,5\text{--}3$ мкм n -типа с концентрацией носителей $(5\text{--}6)\cdot 10^{15}\text{см}^{-3}$. Эти структуры выращивались на проводящих и полуизолирующих подложках.

Металлические контакты наносились методом магнетронного распыления в атмосфере аргона на модернизированной установке УВН-75Р2. В рабочей камере для нанесения контактов было установлено 4 магнетрона и устройство для импульсной фотонной очистки (ИФО) поверхности образцов.

Образцы для напыления крепились на столик, который устанавливается на карусель в камере. (На карусель можно устанавливать до 5 столиков.) Карусель позволяла фиксировать столик последовательно над любым магнетронным испарителем и напротив ИФО.

Напыление контактов на образец производилось последовательно с магнетронных испарителей в направлении заданной последовательности с предварительной очисткой поверхности ИФО в одном технологическом цикле без нарушения вакуума.

Рабочая камера предварительно вакуумировалась высоковакуумным молекулярным насосом до давления не хуже $5\cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. при прогреве до 60°C . Затем камера охлаждалась до комнатной температуры, производился напуск Ar до давления $2\cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. и производилось напыление контактов.

Исследовались следующие контактные системы: для омических контактов $AuGe-Ta-Au$, $AuGe-TaN_x-Au$, $AuGe-TiB_x-Au$, $AuGe-TiB_x-Mo-Au$, которые напылялись на эпитаксиальные структуры на полуизолирующей подложке. Толщина Au и Ge 1800 и 300 Å, соответственно; толщина Ta, TaN_x , TiB_x равна 1000 Å, Mo—500 Å, Au—2000 Å. Режим распыления TaN_x , TiB_x был выбран так, что формировалась аморфная пленка. После нанесения контактов образцы подвергались термообработке при 500°C в течение 1 мин в водороде. Методом фотолитографии изготавливались тестовые образцы для измерения контактного сопротивления методом передающей линии. Перед измерением контактных сопротивлений проверяли линейность и симметричность ВАХ. Образцы с омическими контактами подвергались термической обработке при температурах 500, 550 и 600°C в течение часа.

Для формирования барьерных контактов выбирались эпитаксиальные структуры GaAs на проводящей подложке. В качестве выпрямляющих контактов использовались системы Ti—Au, TiN_x—Au, TiB_x—Au и TiB_x—Mo—Au, которые наносились на поверхность эпитаксиальной пленки. Толщина пленок Ti, TiN_x и TiB_x равнялась 1000 Å, Mo—500 Å, Au—2000 Å.

Со стороны подложки напылялся омический контакт AuGe—TiB_x—Au, который подвергался термообработке в водороде в течение 1 мин.

После формирования контактов изготавливались мезаструктуры диаметром 100 мкм и глубиной 4 мкм методом фотолитографии и травления. Производилось измерение ВАХ и C—V-характеристик, из которых определялись высота барьера Шоттки и фактор идеальности и их изменения от температуры термообработки в течение 1 часа.

В табл. 1 приведены результаты измерений удельного сопротивления омических контактов к n-GaAs, сформированных на тестовых структурах, до и после термообработки в вакууме при температурах 500, 550 и 600°C в течение 1 часа. Из приведенных данных видно, что удельное сопротивление омических контактов, сформированных AuGe, практически одинаково для всех исходных структур. Отжиг при T=500°C не изменяет величины ρ. Однако термообработка при T=550°C на два порядка увеличивает ρ контактных структур с буферным слоем на основе поликристаллической пленки тантала, в то время как аморфные слои TaN_x и TiB_x препятствуют проникновению атомов золота из поверхностного слоя металлизации вглубь контактной структуры и приконтактный слой GaAs.

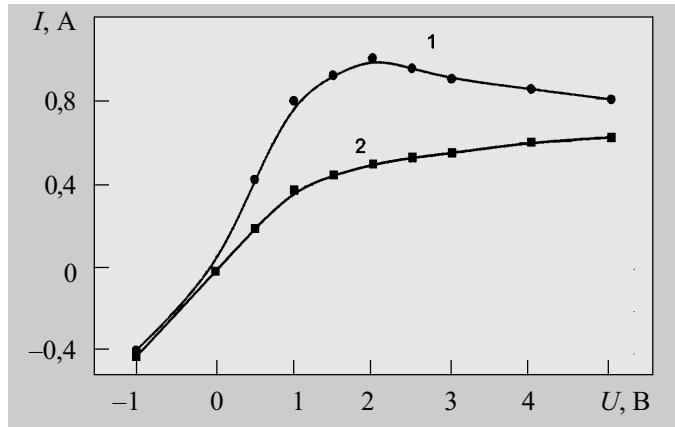
Таблица 1

Удельное сопротивление ρ омических контактов к n-GaAs

Тип омического контакта	ρ, Ом·см ²			
	Исходное	500°C	550°C	600°C
Au—Ta—AuGe—GaAs	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻³	7·10 ⁻³
Au—TaN _x —AuGe—GaAs	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	3·10 ⁻⁵
Au—TiB _x —AuGe—GaAs	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	3·10 ⁻⁵
Au—Mo—TiB _x —AuGe—GaAs	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁵

Отжиг при T=600°C ухудшает параметры всех контактных структур. При этом в образцах с буферными слоями TaN_x и TiB_x наблюдается релаксация внутренних механических напряжений, сопровождающаяся растрескиванием металлизации, что подтверждается измерениями радиуса кривизны R исходных и подвергнутых термообработке при T= 600°C контактных структур с буферными слоями TaN_x и TiB_x. Оказалось, что радиус кривизны неотожженных контактных структур был 30—35 м для разных образцов; после термообработки он оказался равным 60—72 м.

Эти результаты находятся также в соответствии с вольт-амперными характеристиками диодов Ганна до и после термообработки. Типичная ВАХ диода Ганна с омическими контактами на основе Au—Ta—AuGe—GaAs-структур до и после отжига при T= 600°C в течение 1 часа приведена на рисунке. Видно, что в результате деградации контактов ВАХ утратила N-образный участок. В то же время ВАХ диодов Ганна с



ВАХ диода Ганна с омическими контактами Au—Ta—AuGe—GaAs:

1 — до термообработки; 2 — после термообработки при T=600°C металлизацией, включающей буферные слои TaN_x или TiB_x, сохраняют N-образный вид при незначительном уменьшении тока в диапазоне прямых смещений 1—5 В.

В табл. 2 приведены результаты измерений высоты барьера Шоттки и фактора идеальности диодных структур Au—Ti—GaAs, Au—TiN_x—GaAs, Au—TiB_x—GaAs и Au—Mo—TiB_x—GaAs до и после термообработки в тех же условиях. Видно, что барьерные свойства в результате термообработки сохраняются у всех исследуемых структур. Однако барьеры Шоттки, сформированные аморфными слоями TiN_x и TiB_x, оказываются более термостойкими, чем контакты Au—Ti—GaAs, что находится в соответствии с данными послылойной Оже-электронной спектроскопии, полученными в контактах Au—TiB_x—GaAs и TiN_x—(TiB_x)—GaAs в работах [8, 9].

Таблица 2

Высота барьера φ_b и фактор идеальности n диодных структур до и после термообработки

Тип барьерных контактов	Исходные		500°C		550°C		600°C	
	φ _b , эВ	n	φ _b , эВ	n	φ _b , эВ	n	φ _b , эВ	n
Au—Ti—GaAs	0,70	1,18	0,75	1,10	0,72	1,22	0,57	2,45
Au—TiN _x —GaAs	0,60	1,08	0,60	1,08	0,67	1,15	0,68	1,37
Au—TiB _x —GaAs	0,78	1,23	0,78	1,23	0,78	1,25	0,76	1,30
Au—Mo—TiB _x —GaAs	0,78	1,20	0,78	1,20	0,78	1,23	0,76	1,30

Приведенные в таблице данные позволяют сделать заключение о достаточно высокой стабильности границы раздела "металл—GaAs" и перспективности использования подобных контактных структур для создания термостабильных приборов с барьером Шоттки. Наблюдаемая релаксация внутренних механических напряжений в барьерных структурах, приводящая после отжига при T=600°C к растрескиванию металлизации, не вызывает, однако, существенной деградации параметров барьера Шоттки.

Таким образом, как показали наши исследования, многослойные омические контакты Au—TaN_x(TiB_x)—AuGe—GaAs и выпрямляющие контакты Au—TiN_x(TiB_x)—GaAs могут стабильно работать при температурах до 550°C без изменения электрических параметров.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Арсенид галлия в микроэлектронике / Под ред. Н. Айнспрука, У. Уиссмана.— М.: Мир, 1988.
2. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия.— М.: Мир, 1991.
3. Гольдберг Ю. А. Омический контакт металл—полупроводник A^3B^5 . Метод создания и свойства // ФТП.—1994.— Т. 28, № 10.— С. 1681—1698.
4. Гольдберг Ю. А., Поссе Е. А. Образование омического контакта в процессе непрерывного нагревания диодов Шоттки на основе GaAs и GaP // Там же.— 1998.— Т. 32, № 2.— С. 200—202.
5. Myburg G., Auret F. D., Meyer W. E., Louw C. W. Summary of Schottky barrier height data on epitaxially grown *n*- and *p*-GaAs // Thin Solid Films.— 1998.— Vol. 325.— P. 181—186.

6. Ahmed M. M. Effect of sintering on Au/Ti—GaAs Schottky barrier submicron metal-semiconductor field-effect transistors characteristics // J. Vac. Sci. Technol. B.— 1998.— Vol.16, N 4.— P. 2034—2037.
7. Межфазные взаимодействия и механизмы деградации в структурах металл—InP и металл—GaAs / Под ред. Р. В. Конаковой и Г. С. Коротченкова.— Киев: ИИО ИФП НАНУ, 1995.
8. Boltovets N. S., Konakova R. V., Milenin V. V. et al. Power Schottky barrier diodes Au—TiB_x-*n-n*⁺-GaAs // Chemistry for Sustainable Development.— 2001.—Vol. 9.— P. 75—77.
9. Milenin V. V., Ermolovich I. B., Konakova R. V. et al. Reactions between phases and electronic processes at the TiB_x(TiN_x)—GaAs heterostructures interfaces // J. Korean Phys. Soc.— 1999.— Vol. 34, N 6.— P. s447—s450.

НОВЫЕ КНИГИ

В. Г. Вербицкий. Ионные нанотехнологии в электронике.— Киев: МП «Леся», 2002.— 376 с. Табл. 21, рис. 115, библи. 157 назв.

Формирование информационного пространства происходит на технической базе микроэлектроники, которая, сама являясь результатом больших открытий в области физики, химии, кибернетики, дала мощный импульс развитию представлений о структуре веществ, свойствах атомов и их взаимодействии. Интеграция элементов на кристалле интегральных схем не поспевает за потребностями общества в обработке увеличивающихся объемов информации. Переход от микро- к наноразмерам — требование времени, вызвавшее разработку научных основ модификации веществ в нанобластях, создание новых технологий изготовления микросхем с нанозементами в своем составе.

Наноэлектроника зародилась в недрах микроэлектроники. Существенный вклад в изучение явлений и процессов наноэлектроники сделали специалисты отраслевых научно-исследовательских учреждений, где сконцентрирована технологическая база разработки и изготовления интегральных устройств. Поэтому написание книги "Ионные нанотехнологии в электронике" В. Г. Вербицким, прошедшим путь от студента-радиофизика, инженера-технолога ионных процессов микроэлектроники, научного работника, руководителя творческого коллектива разработчиков БИС и микро-нанотехнологий до руководителя ряда украинских научно-тех-

нических программ в области электроники, вполне логично и достойно одобрения.

В книге представлено изложение основных положений и закономерностей ионной модификации веществ в нанобластях, методов получения заданных характеристик и параметров нанозементов, детально рассмотрены физико-химические воздействия. Проведено рассмотрение фундаментальных теоретических представлений о взаимодействии ионов с гетероструктурами и поверхностью, диффузии, отжиге и имплантации ионов, освещены новейшие достижения нанотехнологий и их применение в электронике. В ней удачно соединились строгое и последовательное изложение материала с доступностью восприятия читателем. Основной методический принцип, на котором построена книга, — "от эксперимента к обобщению и технологической реализации в производстве" — позволяет охватить все аспекты как разработки, так и сложного производства. Удачна структура книги: синтез физико-технологических методов ионной модификации кремния и нитрида галлия, на которых базируются технологические процессы получения интегральных элементов с расширенными функциями и рекордными параметрами на современном уровне и в перспективе.

Следует отметить, что аналогичных изданий по исполь-

зованию ионов в нанотехнологиях до этого времени в мировой литературе не было. Книга В. Г. Вербицкого является первой монографией, в которой органично сочетается освещение современных достижений в области нанотехнологии транзисторных интегральных схем и оптоэлектронных элементов на основе соединений A^3B^5 , что делает ее важным вкладом в решение проблем их функциональной интеграции.

Книга выгодно отличается от существующих удачным подбором материала. Ее чтение и изучение позволяет войти в проблематику ионных нанотехнологий и свободно там ориентироваться. Можно было, видимо, уделить больше внимания очень перспективным в наше время магнетронным системам и их применению в нанотехнологии.

Книга В. Г. Вербицкого чрезвычайно важна для возрождения отечественной микроэлектронной промышленности и будет полезна для инженеров электронной техники, аспирантов и студентов электронных, радиофизических и приборостроительных специальностей, а также студентов, аспирантов и инженеров, которые изучают и разрабатывают технологии оптоэлектроники, лазерной техники, компьютерных и телекоммуникационных средств.

Д. т. н. С. В. ДЕНЬНОВЕЦКИЙ
(НТУУ "Киевский политехнический институт", г. Киев)