

К. ф.-м. н. Н. С. БОЛТОВЕЦ, В. Н. ИВАНОВ, В. М. КОВТОНЮК, Н. С. РАЕВСКАЯ,
 д. ф.-м. н. А. Е. БЕЛЯЕВ, д. ф.-м. н. А. В. БОБЫЛЬ, д. т. н. Р. В. КОНАКОВА,
 к. т. н. Я. Я. КУДРИК, к. ф.-м. н. В. В. МИЛЕНИН, С. В. НОВИЦКИЙ, В. Н. ШЕРЕМЕТ

Украина, г. Киев, НИИ «Орион», ИФП им. В. Е. Лашкарёва НАНУ;
 Россия, г. Санкт-Петербург, ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН
 E-mail: konakova@isp.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
 22.06 2010 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. Ю. МИТЯГИН
 (ИРЭ РАН, г. Москва)

ДИОДЫ ГАННА ИЗ InP С КАТОДНЫМ КОНТАКТОМ, ИНЖЕКТИРУЮЩИМ ГОРЯЧИЕ ЭЛЕКТРОНЫ. ЧАСТЬ 1. МЕЖФАЗНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КАТОДНЫХ КОНТАКТАХ

Предложена технология формирования низкобарьерного катодного контакта Au-Ge-InP, обеспечивающая такие же выходные параметры диодов Ганна как и катодные контакты, полученные по более сложной технологии.

О возможности повышения эффективности арсенид-галлиевых и фосфид-индиевых диодов Ганна за счет использования инжектирующих горячие электроны катодных контактов сообщалось многими авторами [1—8]. Инжекция горячих электронов из обратнорасположенного катодного контакта, изготовленного в виде низкобарьерного диода Шоттки, существенно сокращает длину «мертвой зоны», — пространства, на котором электрон набирает энергию, достаточную для междолинного перехода и способствует повышению эффективности диодов Ганна. Сильное поле в области катода можно создать и другими методами, например используя в качестве контактов обратнорасположенный гетеропереход либо создавая контакты с тонким высокоомным слоем полупроводника в приконтактной области или туннельным $p-n$ -переходом [6, 9, 10]. Однако все эти методы весьма трудоемки и оставляют желать лучшего в части воспроизводимости параметров катодного контакта. Более предпочтительным в этом отношении является низкобарьерный контакт Шоттки, хотя создание такого контакта также проблематично, поскольку речь идет о формировании катодного контакта с высотой барьера Шоттки $\phi_B \leq 0,4$ В к диодам Ганна на основе сравнительно широкозонных полупроводников GaAs и InP. Поэтому до настоящего времени остается актуальной задача создания низкобарьерного катодного контакта к n -GaAs(InP), инжектирующего горячие электроны. Особенно это существенно для InP-диодов Ганна, рабочий диапазон частот которых лежит в области ≥ 100 ГГц, где GaAs-диоды маломощны и малоэффективны [11].

Наиболее предпочтительным методом понижения высоты барьера является создание в приконтактной области n -InP тонкого n^+ -слоя, обеспечивающего туннельное прохождение тока в контакте. При использовании в качестве контактообразующего слоя Ge или

его сплавов (например, AuGe) в процессе последующей термообработки n^+ -слой формируется вследствие массопереноса Ge в InP [1, 8, 12, 13]. Такая технология изготовления катодного контакта весьма чувствительна как к режиму термообработки, так и к выбору материала диффузионного барьера, препятствующего межфазным взаимодействиям в контактной металлизации. В связи с этим целью данной работы было исследование межфазных взаимодействий в контактной металлизации и контактообразующем слое в зависимости от их состава и режима термообработки. Вторая часть работы будет посвящена изучению влияния указанных факторов на параметры катодного контакта и температурную зависимость контактного сопротивления.

Образцы и методы исследования

Исследовались два типа образцов: тестовые структуры трех типов и диоды Ганна, изготовленные на основе $n-n^+-n^{++}$ -структур фосфида индия с концентрацией носителей в n -слое $(8-12) \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$ и толщиной n -слоя 2,5—1,5 мкм. Толщина буферного n^+ -слоя составляла 5—7 мкм, толщина n^{++} -подложки — 300 мкм. Концентрация носителей заряда в n^+ InP и n^{++} InP составляла $7 \cdot 10^{17}$ и 10^{18} см $^{-3}$, соответственно.

Тестовые структуры I типа имели двухслойную металлизацию Au-Ge- $n-n^+-n^{++}$ -InP с толщиной слоя Ge 300 Å, слоя Au 1000 Å.

Тестовые структуры II типа представляли собой также двухслойную металлизацию TiB $_x$ -Ge- $n-n^+-n^{++}$ -InP с толщиной слоев Ge и TiB $_x$ по 1000 Å каждый.

Тестовые структуры III типа имели трехслойную металлизацию Au-TiB $_x$ -Au- $n-n^+-n^{++}$ -InP с толщиной слоев по 1000 Å каждый.

Слои металлизации получали методом магнетронного напыления соответствующих материалов на подогретую до 100°C подложку InP.

До и после быстрой термической обработки (БТО) при температуре 400 или 500°C методом электронной Оже-спектроскопии измерялись профили распределения компонентов в слоях металлизации и на границе раздела с InP.

Диоды Ганна изготавливались на основе $n-n^+-n^{++}$ -структуры InP с контактной металлизацией Au-TiB $_x$ -Au-Ge по технологии, описанной в [8]. СВЧ-пара-

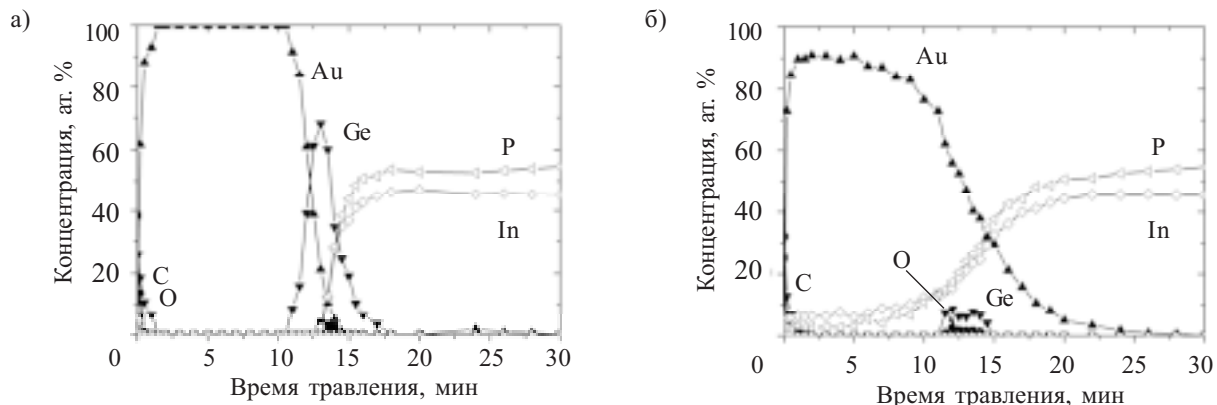


Рис. 1. Профили распределения компонентов в слоях Au–Ge– n – n^+ – n^+ –InP до (а) и после БТО при 400°C в течение 60 с (б)

метры диодов измерялись на второй гармонике в температурном интервале –40...+60°C.

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены результаты Оже-профилей контактной структуры, полученной напылением слоев Ge и Au на поверхность эпителки InP и подвергнутой отжигу при 400°C. Приведенные результаты отражают специфику влияния выбранного режима термообработки на распределение каждого из атомных компонентов структуры, что выражается в отличиях глубины проникновения Ge и Au в InP, и подтверждают известный факт о ключевой роли Au в протекании металлургических реакций в данной системе металлизации. Поскольку температура отжига превышает температуру разложения InP (325–365°C [14]) и, тем более, образования капель индия (температура плавления 156°C), а также температуру образования эвтектики Au–Ge (360°C [15]), сформированный контакт неоднороден по фазовому составу и, по всей вероятности, имеет зернистую структуру.

Как следует из данных рис. 1, при БТО имеет место селективное поглощение пленкой золота атомов In, что приводит к увеличению концентрации вакансий в решетке InP. Последние в свою очередь заполняются атомами германия, увеличивая концентрацию доноров в приповерхностной области полупроводника, аналогично тому, как это происходит в контактах AuGe– n –GaAs. Детально механизм возникновения n^+ -слоя был проанализирован в [16]. При этом могут быть реализованы два крайних случая:

- а) с малой высотой потенциального барьера полупроводника;
- б) с узкой областью пространственного заряда.

Сформированный контакт обладает омическими характеристиками, а его сопротивление зависит от концентрации носителей заряда и коэффициента прозрачности области пространственного заряда [17].

Сильнолегированный n^+ -слой может быть сформирован и в отсутствие эффектов, связанных с плавлением и рекристаллизацией, которые имеют место в контактных структурах на основе Au–Ge. Это возможно при реализации диффузионной модели формирования контакта, базирующейся на твердофазных взаимодействиях контактообразующего слоя с полу-

проводником. Такой механизм формирования контакта происходит эффективно при высокой температуре отжига, что требует включения в систему контактной металлизации термостойких слоев с низким коэффициентом диффузии атомов контактообразующих материалов, так называемых диффузионных барьеров [18]. В качестве диффузионного барьера нами были использованы аморфные пленки TiB_x , в химическом составе которых имеется кислород, обуславливающий формирование пленки оксибирида титана $Ti_xB_yO_{1-x-y}$.

Приведенные на рис. 2 результаты исследований контактной структуры, изготовленной напылением

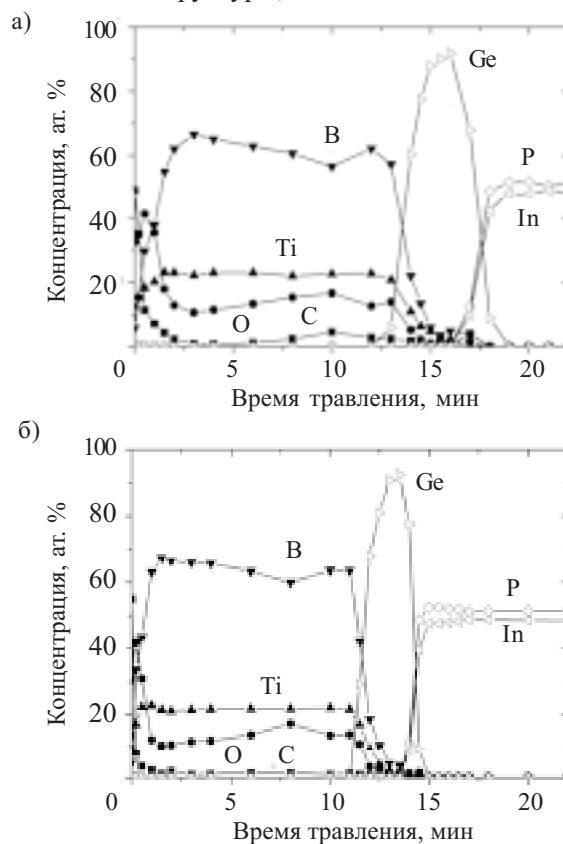


Рис. 2. Профили распределения компонентов в слоях TiB_x –Ge– n – n^+ – n^+ –InP до (а) и после БТО при 500°C в течение 60 с (б)

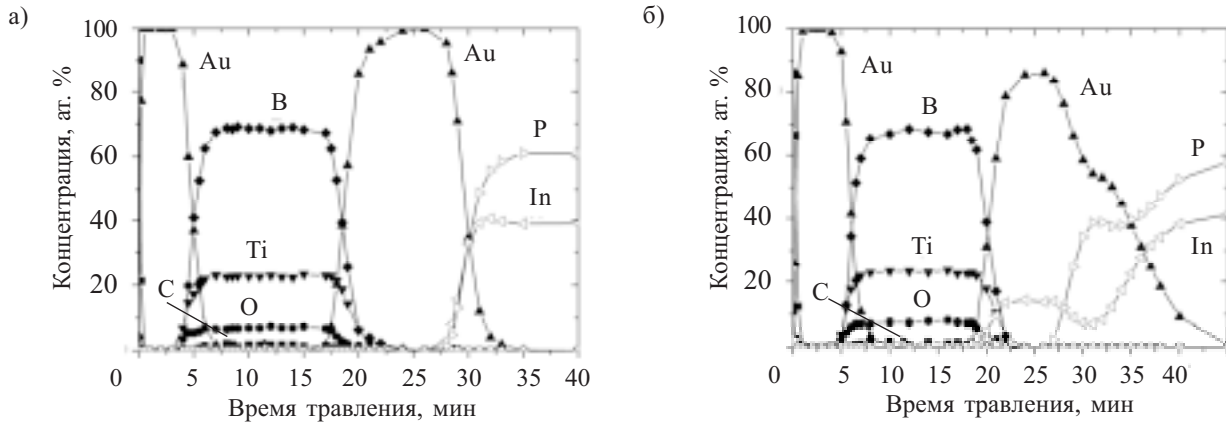


Рис. 3. Профили распределения компонентов в слоях Au–TiB_x–Au–n–n⁺–n⁺⁺–InP до (а) и после БТО при 400°С в течение 60 с (б)

Выходная мощность (в мВт) диодов Ганна при различной температуре для двух значений частоты

Частота, ГГц	Температура, °С										
	-40	-30	-20	-10	0	+10	+20	+30	+40	+50	+60
90	7,5	7,2	6,9	6,4	6,2	6,1	6,0	6,0	5,7	5,0	4,7
130	6,1	6,1	5,7	5,3	5,1	4,8	4,5	4,4	4,0	3,7	3,5

пленок германия и оксиборида титана на подложку InP, показали, что уже при нанесении контактообразующих слоев происходит некоторое размытие границы раздела Ge–InP, вызванное взаимодиффузией атомов Ge и компонентов полупроводника. Глубина диффузии Ge возрастает при проведении отжига, но протяженность легированного слоя не намного отличается от соответствующей величины в исходных образцах. По-видимому, это является следствием формирования на границе раздела слоя GeP₂, как это отмечалось в [19], противодействующего диффузии Ge. Граница раздела «оксиборид титана — германий» является термически стабильной.

На основании данных рис. 2 можно заключить, что здесь имеет место легирование Ge приповерхностного слоя InP. Однако для увеличения протяженности легированного слоя необходимо использовать более высокую температуру отжига либо вводить в систему металлизации дополнительные материалы, способные повлиять на механизм формирования контакта, чтобы тем самым ослабить роль химического взаимодействия между Ge и P.

Из профилей распределения компонентов в слоях металлизации Au–Ti_xB_yO_{1-x-y}–Au–n–n⁺–n⁺⁺–InP, приведенных на рис. 3, видно, что граница раздела была размыта уже в исходном образце, а интенсивный массоперенос Au в InP с образованием сплавов In с Au в переходном слое Au–InP наблюдается после БТО при 400°С, о чем свидетельствует наличие полочек на профилях распределения Au и In. При этом граница раздела Au с оксиборидом титана и со стороны верхней металлизации, и со стороны контактообразующего

слоя остается термостабильной, как и в случае контакта оксиборида титана с германием.

Сравнение приведенных на рис. 1—3 профилей распределения компонентов в исходных и прошедших БТО контактах показывает, что эффективность массопереноса Ge в InP возрастает в присутствии Au. Следовательно, если в состав рассмотренной на рис. 2 слоевой структуры контакта ввести дополнительно пленку Au (Ge–Au–Ti_xB_yO_{1-x-y}), то при том же режиме термообработки можно существенно изменить характер межфазных взаимодействий. Модель формирования контакта в этом случае будет отличаться от вышерассмотренной, базирующейся на твердофазных взаимодействиях. Введение Au усиливает роль возникающих на поверхности InP легкоплавких эвтектик Au–In, которые обуславливают более глубокое проникновение Ge в полупроводник [19]. Диоды Ганна, изготовленные с такой контактной металлизацией, генерировали СВЧ-колебания на второй гармонике в температурном интервале –40...+60°С. Их выходная мощность на частотах 90 и 130 ГГц представлена в таблице, что близко выходным параметрам InP-диодов Ганна разработанных по более сложной технологии в [11], а также диодов фирмы Quinstar Technology Inc. [20].

Оптимизация режимов БТО и параметров контактообразующего слоя позволит улучшить выходные параметры диодов и создать достаточно простую и экономичную технологию фосфид-индиевых диодов Ганна, что будет предметом наших дальнейших исследований. Следует отметить, что рассматриваемый контактообразующий слой для катодного контакта к

InP-диодам Ганна формирует на границе раздела с InP низкобарьерный контакт Шоттки, который при включении в обратном направлении инжектирует «горячие» электроны непосредственно в верхнюю долину. Подтверждением этому являются приведенные в таблице данные.

Таким образом, предложенная технология формирования низкобарьерного катодного контакта Au-Ge-InP обеспечивает такие же выходные параметры диодов Ганна как и катодные контакты, полученные по более сложной технологии.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Hariu T., Shibata T. Optimum Schottky height for high-efficiency microwave transferred-electron diodes // Proc. IEEE.— 1974.— Vol. 63, N5.— P. 823—824.
2. Krishnan C. N., Sharan R. Injection control in TED's by metal- n^+ (thin)- n cathode structure // IEEE.— Trans. Electron. Dev, 1971.— Vol.24, N10.— P. 1264—1265.
3. Kaiyama K., Sakata S., Mizushima Z. Schottky-barrier devices with low barrier height // Electron. Lett, 1974.— Vol.62, N9.— P. 1287—1288.
4. Брянцева Т. А., Любченко В. Е., Юневич Е. О. Диоды Шоттки с пониженным барьером на основе тонкопленочных контактов Au+Ge/GaAs // Радиотехника и электроника.— 1995.— Т. 40, №8.— С.1306—1310.
5. Дубровский В. Н., Карасев А. С., Киреев О. А. Экспериментальное исследование контактов с малой высотой барьера к n -GaAs // Радиотехника и электроника.— 1987.— Т. 32, №3.— С. 612—616.
6. Аркуша Ю. В. Катодные контакты для коротких диодов Ганна // Матер. 6-й Междунар. крым. микроволн. конф. «КрыМиКо-96».— Украина, г. Севастополь.— 1996.— С. 325—327.
7. Касаткин Л. В., Чайка В. Е. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн.— Севастополь: Вебер, 2006.
8. Иванов В. Н., Ковтонюк В. М., Раевская Н. С., Николаенко Ю. Е. Особенности технологии и конструирования InP диодов Ганна // Техника и приборы СВЧ.— 2009.— №1.— С. 31—33.
9. Аркуша Ю. В., Прохоров Э. Д., Сторожено И. П. Высоко-частотные физические процессы в диоде Ганна с туннельным катодом. // Матер. 6-й Междунар. крым. микроволн. конф. «КрыМиКо-96».— Украина, г. Севастополь.— 1996.— С. 322—324.
10. Forster A., Stock J., Montanari S. et. al. Fabrication and characterization of GaAs Gunn diode chips for application at 77 GHz in automotive industry. // Sensors.— 2006.— N6.— P. 2371—2378.
11. Eisele H., Kamoua R., Submillimeter-wave InP Gunn devices // IEEE Trans. MTT.— 2004.— Vol. 52, N10.— P. 2371—2378.
12. Morais J., Fazan T. A., Landrs R., Sato E. A. S. Ohmic contacts formation on n -InP // J. Appl. Phys.— 1996.— Vol. 79, N9.— P. 7058—7061.
13. Dixon-Warren St. J., Zhang S., Kuchibhatla R. et.al. Sputtered full-wafer backside metallization for n -type InP: effect of temperature annealing // Thin Solid Films.— 2005.— Vol. 472, N1.— P. 76—83.
14. Венгер Е. Ф., Конакова Р. В., Коротченко С. Г. и др. Межфазные взаимодействия и механизм диффузии в структурах металл—InP и металл—GaAs.— Киев: Научная книга, 1999.
15. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. Т. 1 / Пер. с англ. под ред. И. И. Новикова и Н. Л. Рогельберга.— М.: Изд. Науч.-техн. инст. по черной и цветной металлургии, 1962.
16. Борковская О. Ю., Дмитрук Н. Л., Ермолович И. Б., Конакова Р. В., Миленин В. В. Влияние γ -облучения ^{60}Co на формирование омических контактов в структурах металл—GaAs ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) // ЖТФ.— 2004.— Т. 74, вып. 3.— С. 44—49.
17. Стриха В. И. Теоретические основы работы контакта металл-полупроводник.— Киев: Наукова думка, 1974.
18. Агеев О. А., Беляева Б., Болтовец Н. С. и др. Фазы внедрения в технологии полупроводниковых приборов и СБИС.— Харьков: НТК Институт монокристаллов, 2008.
19. Wen Chang Huang, Tan Fu Lei, Chung Len Lee. AuGePt ohmic contact to n -type InP. // J. Appl. Phys.— Vol. 79, N 12.— 1996.— P. 9200—9205.
20. <http://www.quinsrar.com>

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Акиншин Н. С., Быстров Р. П., Румянцев В. Л., Соколов А. В. Миллиметровая радиолокация: методы обнаружения негауссовских сигналов.— М.: Радиотехника, 2010.— 528 с.

Освещены вопросы распространения радиоволн миллиметрового диапазона, характеристики отражения наземных объектов, а также потенциальные возможности радиолокационных систем в короткой части миллиметрового диапазона радиоволн. Показаны альтернативные варианты построения и оценены параметры активных РЛС обнаружения наземных объектов. Рассмотрено понятие информационных возможностей РЛС обнаружения наземных объектов, охарактеризованы перспективные методы обработки радиолокационных сигналов. Особое внимание при этом уделено моделированию отраженного негауссовского радиолокационного сигнала и методом обнаружения негауссовских сигналов. Приведен анализ состояния элементной базы радиолокационной техники миллиметрового диапазона.

Для научных работников, инженеров, преподавателей и студентов вузов по общетеоретическим и прикладным вопросам радиотехники и радиофизики.

