

Е.Я. Швец, первый проректор, к.т.н., профессор

Л.Б. Дмитриева, доцент, к.т.н.

В.С. Дмитриев, магистрант

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА НА ВЫСОТУ БАРЬЕРА ШОТТКИ

Запорожская государственная инженерная академия

Наведено результати структурних досліджень перехідних областей контактів з бар'єром Шоттки $Ag/n-GaAs$, які виготовлено за різних умов термообробки.

Приведены результаты структурных исследований переходных областей контактов с барьерами Шоттки $Ag/n-GaAs$, изготовленных при различных режимах термообработки.

Введение. Интерес к барьерам Шоттки на арсениде галлия не ослабевает уже в течение 30 лет [1-6]. Арсенид галлия привлекает исследователей как перспективный материал для микроэлектроники. Высокая (в шесть раз большая, чем у кремния) подвижность электронов в электрических полях низкой напряженности потенциально позволяет создать СВЧ приборы с улучшенными характеристиками [3]. Арсенид галлия имеет большую ширину запрещенной зоны, что является необходимым условием работоспособности структур при повышенных температурах. Малая величина времени жизни неосновных носителей и большая, чем у кремния, ширина запрещенной зоны [1,2] делают арсенид галлия перспективным материалом для создания радиационно-стойких приборов и интегральных схем. Высокоомный арсенид галлия может использоваться в качестве диэлектрика в интегральных схемах, работающих в СВЧ диапазоне, а также для изоляции структур в цифровых ИС.

Анализ последних достижений и публикаций. К контактам на основе барьера Шоттки предъявляется ряд требований: высокие механическая прочность, устойчивость по отношению к агрессивным средам, уровень рассеиваемой мощности, широкий диапазон рабочих температур, относительно малая толщина переходного слоя «металл-полупроводник», не содержащего аморфные фазы [1,6]. Одной из основных качественных характеристик барьера Шоттки является высота потери барьера ϕ_b . Известно, что на величину потенциального барьера определенное влияние оказывают выбор контактной пары [2], метод нанесения [1], а также условия термообработки [1,3].

В настоящее время влияние межфазной границы раздела на высоту барьера Шоттки изучено еще недостаточно, хотя предполагается, что его электрофизические свойства во многом определяются состоянием структуры в зоне контакта. Поэтому методы изготовления приборов с барьером Шоттки должны обеспечивать требуемую структуру межфазной границы и возможность получения высококачественных слоев «металл-полупроводник» на большой площади.

Постановка задачи. Среди наиболее эффективных средств управления структурой границы раздела выделяется отжиг тонкопленочных структур,

механизм которого к настоящему времени еще не до конца изучен. Поэтому исследования влияния

© Швец Е.Я., Дмитриева Л.Б., Дмитриев В.С., 2012

режимов термообработки на высоту барьера Шоттки применительно к арсениду галлия, установление взаимосвязи между структурным совершенством изготовленного контакта и его электрофизическими параметрами позволят уточнить представления о переходных процессах в микроэлектронных композициях с БШ.

Основная часть исследований. Исследовали контакты к эпитаксиальному слою $GaAs$ (111) n -типа толщиной порядка несколько микрометров с подвижностью более $5000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и концентрацией носителей заряда $n_{\text{эл. сл}} = 6 \cdot 10^{15} \dots 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, выращенному на высоколегированных подложках ($n \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$).

Кристаллографическая ориентация оказывает определенное влияние на высоту барьера Шоттки [2,3]. Наиболее высокий барьер получается на поверхности, ориентированной по плоскости $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$, меньший – на поверхности (111), а еще меньший – на поверхности (100). Различие между высотой барьера ϕ_b на поверхностях $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ и (100) составляет 0,1 эВ.

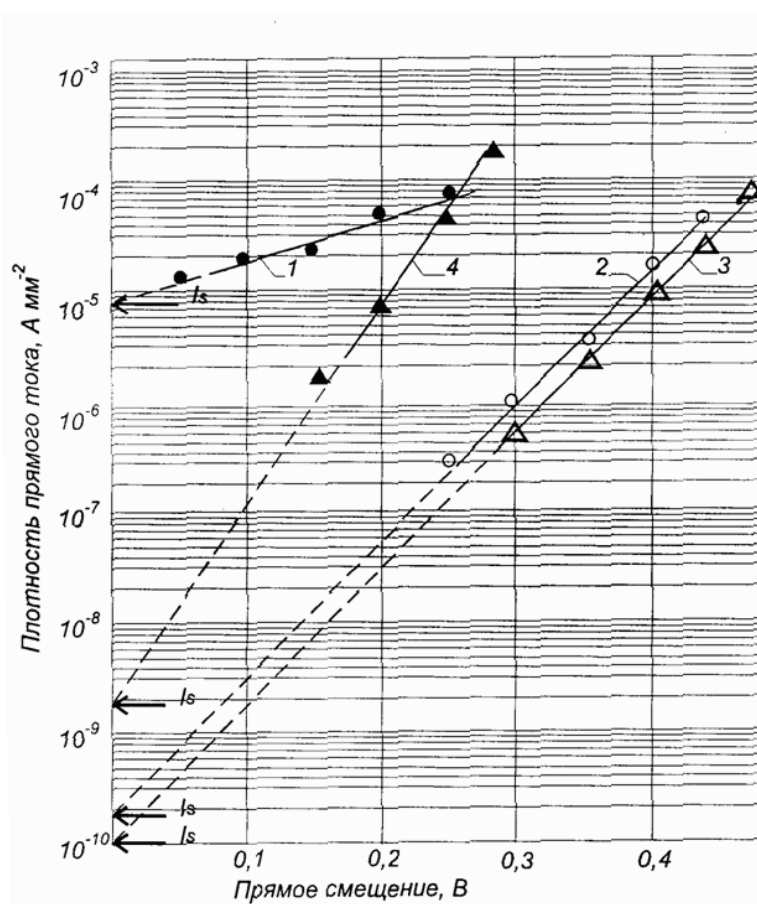
По результатам предварительных исследований в качестве контактного материала к арсениду галлия выбрали серебро высокой чистоты (99,999). Основанием для выбора послужило то, что температурный коэффициент расширения (ТКР) серебра ($\alpha_{Ag} = 19 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$) соизмерим с ТКР арсенида галлия ($\alpha_{GaAs} = 5,8 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$). Серебро хорошо смачивает поверхность арсенида галлия, что обеспечивает хорошую механическую прочность контакта, облегчает технологию создания барьеров Шоттки. Температура эвтектики серебра с арсенидом галлия – 923 К, температура плавления серебра – 1233,8 К. Серебро индифферентно к кислотам и щелочам, а также большинству едких газов, обладает хорошей теплопроводностью ($Q_{Ag \text{ 373}} = 4,22 \text{ Дж/см}\cdot\text{с}\cdot\text{град}$), следовательно, выпрямляющий контакт будет иметь высокий уровень мощности. Данный металл имеет относительно небольшой коэффициент диффузии в арсенид галлия ($\gamma_{Ag} = 5 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$), по сравнению, например, с золотом ($\gamma_{Au} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$), что позволяет уменьшить толщину переходного слоя [3].

Осаждение серебра производили на подложку через молибденовую маску с окнами определенной конфигурации. Контакты изготавливали методом вакуумного осаждения на установке ВУП-2К при остаточном давлении порядка $2,66 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$. Высокий вакуум в процессе термического испарения позволяет получить металлические пленки без загрязнений. Этот метод обладает большой гибкостью, так как позволяет в широких пределах регулировать скорость испарения материала навески (серебра) и температуру подложки. Толщину пленки контакта задавали точной массой навески испаряемого материала. Зависимость между массой навески испаряемого материала и толщиной металлической пленки изучали на серии контрольных образцов при помощи интерферометра Линника МИИ-4. Критерием оценки качества барьера является его высота, определяемая в данной работе по методу вольтамперных характеристик [1,2]. Для выяснения

влияния термообработки на свойства барьерного контакта изготовленные структуры $Ag/n-GaAs$ (111) подвергали отжигу при различных температурах.

Обсуждение полученных результатов. Несмотря на то, что основные физические процессы в барьерах Шоттки достаточно хорошо изучены, в некоторых деталях теории этих явлений еще нет согласия с экспериментом, в основном, из-за недостаточности знаний о природе промежуточных слоев и свойствах поверхности полупроводников. Это относится, прежде всего, к точному установлению причин отклонения вольтамперных характеристик барьеров Шоттки от идеальных. И здесь мы сталкиваемся скорее с технологическими трудностями, чем с несовершенством теории.

При установлении зависимости высоты потенциального барьера ϕ_b от температуры отжига для исследуемой группы образцов выяснилось, что высота барьера увеличивается с повышением температуры отжига и достигает своего максимального значения (0,9...0,95 эВ) при температуре 823 К, а затем уменьшается (рис. 1).



температура подложки - 373 К; время отжига - 10 мин
 температура отжига, К: 1 – 723; 2 – 773; 3 – 823; 4 – 873

Рисунок 1 – Зависимость плотности тока от приложенного в прямом направлении напряжения в барьерах Шоттки $Ag/n-GaAs$ (111), отожженных при различных температурах

Это происходит, по-видимому, вследствие уменьшения прослойки между металлом и полупроводником из-за проникновения металла, образующего контакт, в промежуточный слой, при этом увеличивается плотность поверхностных состояний.

При определенной температуре, когда промежуточный слой почти полностью исчезает (то есть уменьшается до моноатомного слоя), а плотность поверхностных состояний достигает своего максимального значения, высота потенциального барьера становится равной $2/3$ ширины запрещенной зоны полупроводника.

Переходной слой (ПС) образуется при формировании контактов «металл-полупроводник» как результат взаимодействия нарастающего слоя металла с полупроводниковой подложкой. ПС является зоной срастания двух разнородных материалов, обеспечивающей постепенный переход от кристаллической решетки монокристалла к решетке нарастающей фазы. Строение и фазовый состав ПС, а также механизм эпитаксии полностью определяются диаграммой фазового равновесия нарастающей фазы и подложки.

Представляет интерес управление структурой границы раздела, достигаемое с помощью отжига тонкопленочных структур. После термообработки при температуре 723 К в течение времени, достаточного для протекания диффузионных процессов в области контакта, переходной слой будет иметь изменяющийся по глубине состав. Изменение состава должно происходить в полном соответствии с диаграммой состояния. Непостоянство состава переходного слоя контактов – результат взаимодействия ограниченных объемов вещества подложки и пленки. Если же все вещество металлической пленки участвовало в реакции с подложкой, то число фаз в слоях переменного состава может быть меньшим и определяться температурой и продолжительностью процесса.



Рисунок 2 – Электронограмма от приконтактной зоны $n\text{-GaAs}$, $\times 10\,000$
(температура отжига 773 К)

Анализ результатов исследований структур $Ag/n\text{-GaAs}$ (111) на электронном микроскопе типа УЭМВ-100К показал, что при увеличении температуры отжига напыленных контактов от 723 до 773 К высота потенциального барьера несколько возрастает, что можно объяснить улучшением адгезии, а также начинающейся взаимной диффузией серебра, галлия и мышьяка в области контакта. При температуре отжига контакта 773 К на электронограмме приконтактной области наблюдается видоизмененная система рефлексов, возникающая вследствие внедрения атомов серебра в решетку монокристалла (рис. 2).

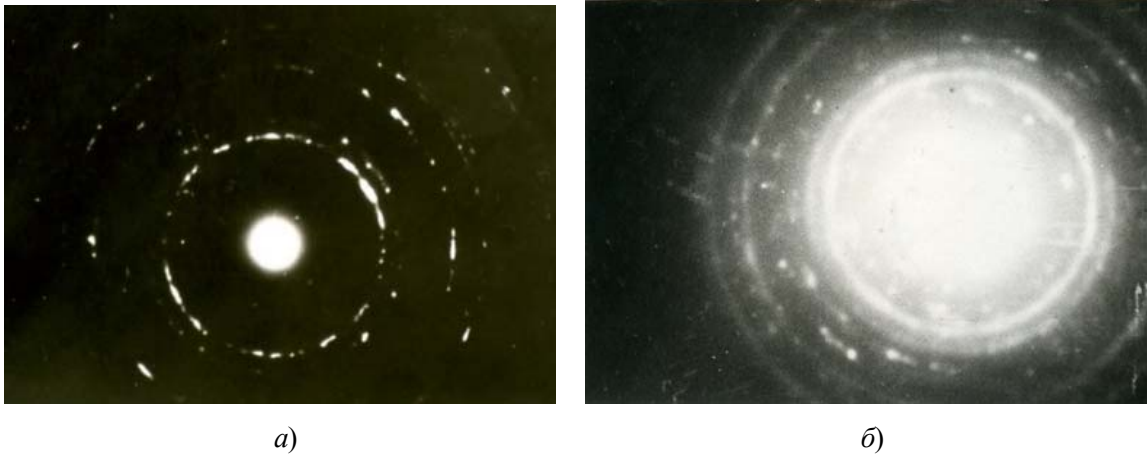


Рисунок 3 – Электронограммы от пленки контакта $Ag/n-GaAs$ (111):
 а) температура отжига 773 К, х 10000
 б) температура отжига 823 К, х 5000

Как показал электронографический анализ контактных областей, в пленке серебра растворяется некоторое количество мышьяка (рис. 3,а).

Слои серебра, сформированные напылением, при всех температурах отжига по-ликристаллические. После отжига пленок серебра при температуре 823 К наблюдается мелкокристаллическая структура с равномерным распределением одинаковых зерен. Расшифровка электронограммы (рис. 3,б) показала, что при этой температуре в контактной области, помимо мышьяка, в пленке серебра уже имеется небольшое количество галлия.

Увеличение температуры отжига до 873 К приводит к снижению высоты барьера Шоттки, при этом структура становится более крупнозернистая и неодинаковая по размеру зерен. Имеются следы оплавления. Это объясняется образованием эвтектики $Ag-As$ в тройной системе « $Ga-As-Ag$ » при температуре, близкой к 873 К, которая при отжиге приводит к оплавлению пленки и ухудшению структуры и свойств контактов. Оптимальная глубина проникновения серебра в приконтактную область арсенида галлия наблюдается в отжиге при температуре 823 К в течение 10 мин.

Заключение. Изменение электрофизических параметров контактов $Ag/n-GaAs$ (111) можно объяснить структурными превращениями и перераспределением химических элементов в приконтактной зоне подложки и пленки выпрямляющего контакта. Оптимальными режимами изготовления контактных пленок серебра на $n-GaAs$ являются: температура подложки при напылении – 373 К; остаточное давление в камере – $2.66 \cdot 10^{-3}$ Па; длительность отжига контактов – 10 мин. Структура металлических пленок контактов при оптимальных режимах их изготовления поликристаллическая мелкозернистая, по составу, в основном, соответствует распыляемому материалу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Милнс, А. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник [Текст] / А. Милнс, Д. Фойхт. – М. : Мир, 1975. – 432 с. – Библиогр. : с. 342-431.
2. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов [Текст] / С. Зи. – 2-е изд., перераб. – М. : Мир, 1984. – 456 с. – Библиогр. : с. 450-453.
3. Баранский, П. И. Полупроводниковая электроника [Текст] : справочник / П. И. Баранский, В. П. Клочков, И. В. Потыкевич. – К. : Наукова думка, 1975. – 706 с. – Библиогр. : с. 252-296, 459-476, 508-510, 608-617, 655-657.

4. *Шиммель, Г.* Методика электронной микроскопии [Текст] / Г.Шиммель. – М. : Мир, 1972. – 300 с. – Библиогр. : с. 285-292.
5. *Шур, М.* Современные приборы на основе арсенида галлия [Текст] / М. Шур. – М. : Мир, 1991. – 632 с. – Библиогр. : с. 626. – ISBN 5-03-001459-4.
6. *Баранцева, О. Д.* Повышение качества диодов Шоттки для СВЧ элементов [Текст] / О. Д. Баранцева, Л. Б. Дмитриева // Диэлектрики и полупроводники : сб. научн. трудов. – К. : 1983. – Вып. 24. – С. 83-85.

Стаття надійшла до редакції 02.11.2011 р.
Рецензент проф. І.Ф. Червоний