УДК: 546.86.681:538.973

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ НА МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦАХ МНОГОСЛОЙНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ, НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТОВ К ФОТОПРИЕМНИКАМ НА КВАНТОВЫХ ЯМАХ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaAs/GaAs

© 2005 В.В. Арбенина*, И.В. Будкин**, Е.Б. Демиденко*, А.А. Мармалюк**

* Московская государственная академия тонкой химической технологии им. М. В. Ломоносова ** ООО «Сигм Плюс»

Поступила в редакцию: 11.10.04

В работе исследовались особенности формирования и характеристики контактов на основе системы многослойной металлизации GaAs/Ni/Au-Ge/Au для фотоприемных устройств на квантовых ямах. На основе измерения контактного сопротивления, исследования микроструктуры и расчетов диффузионных профилей проведен анализ процессов, протекающих на межфазных границах многослойных контактов к гетероструктурам AlGaAs/GaAs. Предложено объяснение влияния диффузионных процессов и структуры слоев металлизации на величину контактного сопротивления и ее воспроизводимость. Рассмотрена возможность формирования контакта с тонким инверсионным слоем, который является вариантом выпрямляющего контакта.

Одной из важнейших проблем, которая стоит перед производителями фотоприемников (ФП) на основе GaAs, является воспроизводимое создание низкоомных омических контактов (ОК), обеспечивающих соединение эпитаксиальной гетероструктуры (ГС) с металлическими токопроводящими элементами приборов и обладающих высокой термической стабильностью и длительным сроком службы.

Поскольку плотность поверхностных состояний в GaAs высокая ($D_s = 1,25 \times 10^{14}$ эВ⁻¹см⁻²), то к структурам на его основе создают контакты второго или третьего типов, в которых присутствуют потенциальные барьеры на границе «контакт/полупроводник». На технологическом уровне с целью увеличения воспроизводимости свойств контактов испробовано много различных систем многослойной металлизации. Однако проблема выбора оптимальной контактной системы до сих пор остается нерешенной, не существует общей теории контактов, непонятно, в результате каких процессов омический контакт необратимо переходит в барьер Шоттки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе исследовались особенности формирования и характеристики контактов на основе

системы многослойной металлизации GaAs/Ni/ Au-Ge/Au для фотоприемных устройств на квантовых ямах. ГС выращивались методом МОСГЭ в диапазоне температур 750-770 °С при пониженном давлении (рабочее давление в камере реактора 60-70 мм рт. ст.) и состояли из легированных Si до уровня $n = 1 \times 10^{18}$ см⁻³ верхнего (0,5 мкм) и нижнего (1 мкм) контактных слоев n⁺-GaAs, между которыми выращивались 50 периодов сверхрешетки AlGaAs/GaAs: нелегированный барьер Al_xGa_{1-x}As (45 нм) и квантовая яма из GaAs<Si> (4 нм). Контакты, сформированные на верхнем и нижнем контактных слоях ГС методом термовакуумного испарения (ТВИ) на установке УВН-71П-3 (*T*_{подл.} = 120 °С), состояли из слоя эвтектического состава Au-Ge (12 вес.% Ge), обеспечивающего хорошую адгезию, и слоев Ni и Au, определяющих высокую проводимость контак-Ta: n^+ -GaAs/Ni(30 Å)/Au-Ge(500 Å)/Au(2000 Å) (рис. 1). После напыления контакты вжигались при T = 420 °C, в атмосфере сухого азота в течение 2 мин.

Для проведения исследований на гетероструктурах, предназначенных для создания ФП, наряду с контактами для измерения ВАХ фотоприемных



Подложка

Рис. 1. Конструкция гетероструктуры с контактом для ФП на квантовых ямах

структур, формировались контакты-тесты для определения характеристик контактов. Используя Au-зонды, на установке ПНХТ-1 снимали ВАХ и при условии ее линейности проводили измерение сопротивления между контактами. На основе зависимости $R_{_{\rm H3M.}}$ от расстояния между контактами рассчитывали контактное сопротивление (КС) и оценивали изменение характеристик контактных слоев ГС. Такая методика позволяет дополнительно получать информацию о распределении сопротивления контактов по площади гетероструктуры, что имеет важное значение при изготовлении матричных фотоприемников большой площади.

Для выявления микроструктуры слоев металлизации использовали травитель состава: HNO₃: HCl : глицерин в соотношении 1 : 1 : 8, позволявший удалять верхние слои Au и наблюдать микроструктуру нижележащих слоев [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные по измерению сопротивления контактов и расчету характеристик контактных полупроводниковых слоев приведены в табл.1. Анализ показывает, что среди контактов, сформированных на верхнем и нижнем контактных слоях гетероструктуры, 4—8 % составляют выпрямляющие (барьерные) контакты и наблюдается тенденция к разделению омических контактов на низкоомные и высокоомные, причем в первой группе контакты с низким КС преобладают, а во второй — составляют только 1/3 часть.

Сопротивление многослойного контакта складывается последовательно из сопротивления всех слоев и потенциальных барьеров на межфазных границах. Как видно из табл. 1, при низком КС (~10⁻⁴ Ом · см²) рассчитанное сопротивление приконтактной области слоя n^+ -GaAs на 1—2 порядка меньше первоначального значения, которое равно $\approx 6 \times 10^{-3}$ Ом · см при $n \approx 10^{18}$ см⁻³. Увеличение сопротивления контакта сопровождается ростом сопротивления приконтактной области слоя GaAs. Это указывает на определяющую роль в формировании свойств контактов процессов, протекающих на межфазной границе «контакт/GaAs» и структуры слоев металлизации.

На границе «контакт/GaAs» возможны следующие, конкурирующие по влиянию на величину потенциального барьера и электрические характеристики контактного слоя n^+ -GaAs процессы: диффузия Ni из слоя никеля и сильно различающиеся по скоростям диффузия Аи (донор) и Ge (амфотерная примесь) из слоя эвтектического состава. Как показали микроструктурные исследования, слои Au-Ge эвтектического состава, осажденные методом ТВИ, обладают сильно неравновесной поликристаллической структурой с большой неоднородностью размеров зерен различного состава. Слои Ni, пересыщенные по содержанию Au после процесса вжигания, имеют дифрагированную структуру, что увеличивает их сопротивление и облегчает граничную диффузию Au и Ge в GaAs. Это приводит к локальной неоднородности фронта диффузии в приконтактной области слоя GaAs, появлению диффузионных клиньев, обогащенных Ge.

Ni проявляет в GaAs акцепторные свойства и склонен к комплексообразованию с Si, в результате чего последний может переходить в электрически неактивное состояние. Ge также может вести себя в GaAs, как мелкий акцептор. Это приводит к развитию в приконтактной области компенсационных процессов.

Благодаря высокой скорости диффузии и, как следствие, высокой концентрации Au в слое GaAs, происходит снижение сопротивления контактного слоя, образование вблизи границы «контакт/GaAs» сильно легированной области и формирование контакта с узким, туннельно-прозрачным потенциальным барьером. Однако если контакт находится в области неоднородности диффузионного фронта, то за счет усиления компенсационных процессов

Тип контакта	Кол-во	<i>R</i> _{изм.,} Ом	Контактное сопротивление, Ом · см²	Оценка характеристик контактных слоев		
				∆ <i>R</i> , Ом/мкм	ρ, Ом·см	<i>п</i> , см ⁻³
¹ Верхний	64 %	16±2	(1,44±0,22)·10 ⁻⁴	0,047±0,005	7.10-5	$\sim 1,5 \cdot 10^{20}$
	10%	76,5±3,8	(6,89±0,34)·10 ⁻⁴	0,286±0,014	4,5.10-4	~2,5.1019
	8 %	-	Выпрямляющие			
² Нижний	16 %	-	Не измерялось			
	28%	15±7,5	(1,35±0,675)·10-4	0,0435±0,015	~1,3.10-4	~5.1019
	62%	115±75	(1,03±0,65)·10 ⁻³	0,62±0,56	~1,8.10-3	~3.1018
	4 %	-	Выпрямляющие			
	6 %	-	Не измерялось			

Результаты измерения КС и расчета характеристик контактных слоев

Примечание: сформированы на верхнем (1) и нижнем (2) контактных слоях n^+ -GaAs

при увеличении содержания атомов Ni и Ge в слое *n*⁺-GaAs концентрация электронов в приконтактной области снижается и сопротивление контакта возрастает. В результате развития этих процессов в приконтактной области может возникать тонкий инверсионный слой — слой р-типа проводимости. Контакт с инверсионным слоем является вариантом выпрямляющего контакта.

Концентрационные профили Ni, Au и Ge в GaAs, рассчитанные по уравнениям объемной диффузии из ограниченного источника при условиях термообработки, подтверждают предложенную модель влияния процессов, протекающих на межфазных границах, и структуры слоев металлизации на контактное сопротивление. Как показывают расчеты, концентрация Ni и Ge > 10^{18} см⁻³ может возникать в слое толщиной не более ~ 2-3 нм у межфазной границы.

Следствием сложной картины, возникающей на границе «контакт/GaAs» в результате наложения различных диффузионных процессов, является большой разброс значений КС, особенно в группе нижних контактов, что можно связать и с большей дефектностью нижнего контактного слоя n^+ -GaAs. В этой группе контактов чаще возникают резкие скачки сопротивления на зависимости $R_{\rm изм}$ от расстояния между контактами, которые

можно объяснить попаданием в область контакта такого дефекта структуры эпитаксиального слоя, как дислокация. При образовании вокруг дислокации примесных атмосфер атомы Au, Ni и Si переходят в электрически неактивную форму, и сопротивление контакта возрастет.

Таблица 1

На основе измерения контактного сопротивления, исследования микроструктуры и расчетов диффузионных профилей проведен анализ процессов, протекающих на межфазных границах многослойной металлизации в системе GaAs/ Ni/Au-Ge/Au. Предложено объяснение влияния диффузионных процессов и структуры слоев металлизации на величину контактного сопротивления и ее воспроизводимость. Рассмотрена возможность формирования контакта с тонким инверсионным слоем, являющимся вариантом выпрямляющего контакта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.В. Арбенина, Р.Х. Акчурин, Е.Б. Демиденко и др. Особенности формирования микроструктуры и анализ диффузионных процессов в системах металлизации, используемых в технологии лазерных диодов на основе гетероструктур AlGaAs/ GaAs // Конденсированные среды и межфазные границы. 2002. Т. 4. № 4. С. 293—298.