

К. т. н. С. Б. АЛЕКСАНДРОВ, К. М. КРУПАЛЬНИК,  
Н. А. КОРНИЛОВ, Т. А. КОНДРАТЬЕВА

Дата поступления в редакцию  
06.10.2010 г.

Россия, г. Санкт-Петербург, ЗАО «Научное и технологическое оборудование»  
E-mail: sales@semiteq.ru

Оппонент к. т. н. В. И. БОСЫЙ  
(НПП «Сатурн», г. Киев)

## ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ $A_3B_5$

*Рассмотрены принципы построения технологических модулей. Показаны значения контактного сопротивления пленок, полученных с помощью установок электронно-лучевого напыления серии STE EB и установок быстрого термического отжига серии STE RTA.*

Современные полупроводниковые приборы на основе гетероструктур  $A_3B_5$  являются перспективной элементной базой микроэлектроники. В России создание на их основе транзисторов, СВЧ интегральных схем и т. п. сейчас находится на стадии завершающихся опытно-конструкторских работ. За последние десять лет был решен ряд сложных технологических задач, в том числе связанных с этапами постростового цикла планарных операций. Однако все еще существуют сложности с реализацией таких важнейших операций, как формирование омических контактов к приборам на основе гетероструктур  $A_3B_5$ .

Технологический процесс формирования омического контакта состоит из двух основных этапов: создание непосредственно контактной металлизации и ее дальнейшая термическая обработка. Полученный контакт должен иметь как можно более высокую электропроводность и теплопроводность, вносить как можно меньшие механические напряжения, иметь хорошую адгезию к поверхности эпитаксиальной структуры, низкую шероховатость, быть технологичным и воспроизводимым.

### Формирование контактной металлизации

Самым современным методом формирования контактной металлизации является электронно-лучевое напыление. Такая технология предполагает низкий уровень предоперационного давления — не более  $1 \cdot 10^{-7}$  Па и позволяет осаждать сверхчистые металлические покрытия в высоком и сверхвысоком вакууме, что исключает влияние фона установки на ход технологического процесса и его результаты для приборов на основе широкозонных и слаболегированных полупроводников [1].

На чистоту осажденного покрытия непосредственно влияет процесс загрузки образцов в технологический модуль, а также процесс предварительной подготовки образца. Так, например, если проводить очистку образца ионным пучком, то это приведет к

распылению загрязнений и оксидов с его поверхности и к конденсации удаляемых продуктов на внутренней поверхности камеры напыления и на нагреваемых узлах испарителя (на мишени). В процессе напыления слоя металла эти загрязнения встроются в поток вещества и, как следствие, в состав пленки.

Для устранения влияния перечисленных факторов на процесс осаждения пленки металлизации была предложена двухкамерная система электронно-лучевого напыления. Первая камера (шлюз) по сути является камерой очистки и подготовки образцов, в которой при необходимости может быть установлена ионная пушка для очистки образцов. Загрузка образцов в камеру напыления происходит через шлюзовую затвор, что полностью исключает загрязнение камеры до начала процесса напыления, во время загрузки и очистки образца, а также после напыления, при последующей перезагрузке. В камере напыления также может быть установлено дополнительное аналитическое оборудование.

Этот принцип разделения камеры на две лег в основу создания выпускаемых компанией ЗАО «НТО» установок электронно-лучевого напыления серии STE EB. Наиболее совершенной из них является двухкамерная установка STE EB 71 (рис. 1), позволяющая располагать ионную пушку в камере подготовки. Конструкция камеры напыления обеспечивает уровень предоперационного давления до  $10^{-9}$  Па. Установка снабжена электронно-лучевым испарителем мощностью 6 кВт и варьируемым набором ячеек (до 7) объемом от 7 до 15 см<sup>3</sup>. Расстояние между испарителем и



Рис. 1. Установка электронно-лучевого напыления STE EB 71

обрабатываемыми образцами изменяется в диапазоне 200—400 мм. Можно обрабатывать образцы диаметром до 150 мм или несколько образцов меньших диаметров на плоском или сферическом держателе с возможностью его прогрева и вращения в процессе осаждения. Загрузка и выгрузка образцов автоматизирована.

### Термическая обработка

Термическая обработка пленки контактной металлизации после ее осаждения определяет такие ключевые параметры контакта как морфология и омическое сопротивление. При этом обработка образцов на основе гетероструктур  $A_3B_5$ , имеющих в качестве подложек материалы с неоднородным поглощением оптического излучения по поверхности, такие как карбид кремния, сапфир и др., сопряжена с рядом технологических трудностей.

Важнейшими технологическими параметрами процесса термической обработки являются температура процесса, скорость и однородность нагрева образца. Так, для отжига контактной металлизации к транзисторным гетероструктурам на основе нитрида галлия требуется скорость нагрева образца порядка  $30^\circ\text{C}/\text{с}$  при максимальной температуре  $800\text{—}850^\circ\text{C}$  [2]. Допустимая неоднородность нагрева при этом не должна превышать 5—7% для образца диаметром 100 мм. Подобные технологические параметры используются для создания контактной металлизации на основе системы металлов «титан — алюминий», например  $\text{Ti}/\text{Al}/\text{Ni}/\text{Au}$ . При этом относительно низкая температура плавления алюминия диктует необходимость в высокой скорости нагрева образца для исключения влияния расплавленного алюминия на структуру контакта во избежание его деградации [3]. Высокая максимальная температура процесса обусловлена высокой, более  $800^\circ\text{C}$ , температурой образования фазы  $\text{Ti}_x\text{N}_y$ , которая «связывает» азот из приповерхностного слоя полупроводника, создавая вакансии, которые, в свою очередь, являются донорами для нитридных материалов.

Таким образом, для формирования омических контактов полупроводниковых приборов на основе гетероструктур  $A_3B_5$  необходимо провести быструю высокотемпературную обработку металлизации. Такой процесс принято называть взрывным вжиганием [4]. В ряде случаев для термической обработки контактной металлизации к нитридным гетероструктурам используется так называемый флеш-процесс [5].

В составе конструкции большинства современных установок термической обработки имеется нагревательный элемент на основе галогенных ламп накаливания. Такие нагревательные элементы обладают низкой инерционностью и позволяют достичь скорости нагрева образца  $40^\circ\text{C}/\text{с}$  и более, а также реализовать ПИД-закон для прецизионного управления процессом температурной обработки.

Общий принцип построения установок термической обработки представлен на **рис. 2**. Однако он имеет ряд существенных недостатков, основным из которых является значительная неоднородность нагрева образцов с неоднородным поглощением оптиче-

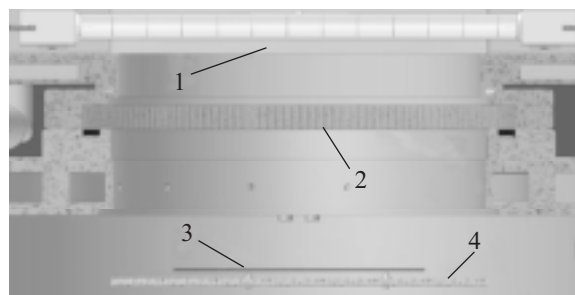


Рис. 2. Принципиальная схема установки термической обработки контактной металлизации:

1 — массив галогенных ламп накаливания; 2 — кварцевое окно для ввода излучения; 3 — образец; 4 — держатель образца

ского излучения по поверхности. К подобным образцам относятся, например, полупроводниковые транзисторные гетероструктуры, выращенные на сапфировых подложках. Такие образцы, как правило, не имеют постоянной степени заполнения металлом сформированной на поверхности пленки, что приводит к неоднородности нагрева образца и низкой повторяемости технологического процесса в производственном цикле, особенно при обработке мелких серий образцов различных типов.

Кроме того, принцип расположения ламп внутри нагревательного элемента также влияет на однородность нагрева образца за счет неоднородного распределения падающего на его поверхность излучения. При температурах порядка  $600\text{—}800^\circ\text{C}$  это влияние проявляется в появлении светлых и темных пятен на поверхности полупроводниковой пластины, соответствующих форме и расположению галогенных ламп накаливания в нагревательном элементе. Такой недостаток можно компенсировать, располагая несколько массивов ламп с разных сторон образца в различных конфигурациях, в том числе это могут быть два параллельных массива, образующие решетку.

Спектр излучения линейных галогенных ламп накаливания также влияет на однородность и эффективность нагрева образца. Так, наиболее распространенные линейные галогенные лампы с биспиральной нитью накаливания имеют широкий спектр излучения, часть которого лежит в видимом диапазоне. В то же время, подложка и сформированная металлизация имеют различные коэффициенты поглощения такого излучения, что и обуславливает неоднородность нагрева. Эффективность нагрева образца определяется его коэффициентом поглощения, который увеличивается с увеличением длины волны излучения. С этой точки зрения, видимая часть спектра излучения галогенных ламп накаливания уменьшает эффективность нагрева образца. Для повышения эффективности нагрева можно использовать инфракрасные галогенные лампы, спектр излучения которых также широкий, однако его пик значительно сдвинут в длинноволновую область.

Для компенсации перечисленных недостатков нагревательных элементов на основе галогенных ламп накаливания была предложена конструкция термостабилизирующего элемента, которая легла в основу линии

серийно выпускаемых установок быстрого термического отжига компании ЗАО «НТО». В качестве термостатирующего элемента в них используется держатель образца, изготовленный из материала, позволяющего улучшить распределение падающего на образец излучения. В этом случае образец поглощает не первичное излучение от галогенных ламп, а вторичное излучение термостатирующего элемента, испускаемое на длине волны, соответствующей его температуре. На основе расчетов и проведенных экспериментов в качестве материала для термостатирующего элемента был выбран пиролитический графит. Предложенный термостатирующий элемент представляет собой два плоских диска, между которыми располагается образец. При температурах процесса порядка 800—1000°C спектр излучения подобного элемента будет лежать в инфракрасной области. Образец будет более эффективно поглощать такое излучение, чем излучение галогенных ламп с более широким спектром. Кроме того, использование двух дисков способствует выравниванию температуры образца, т. к. фактически тепловая «засветка» происходит с двух сторон. Помимо термостатирующего элемента, во всех установках термического отжига также применяются системы тепловых экранов, позволяющие повысить эффективность и увеличить однородность нагрева образца (рис. 3).

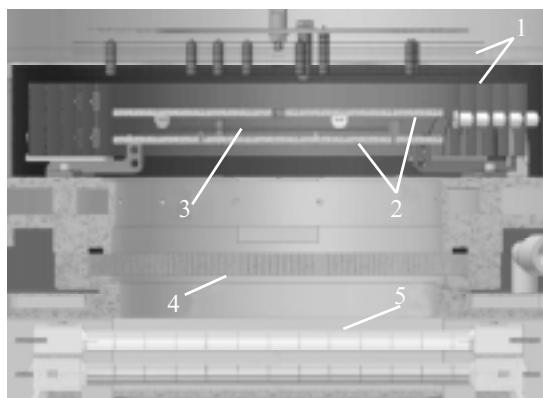


Рис. 3. Общая схема построения установок термического отжига серии STE RTA:

1 — тепловые экраны; 2 — термостатирующие элементы;  
3 — образец; 4 — кварцевое окно для ввода излучения;  
5 — массив галогенных ламп

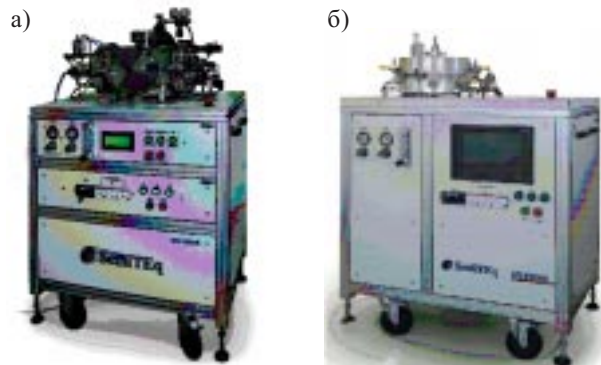


Рис. 4. Установки быстрого термического отжига STE RTA79 (а) и STE RTA70 H (б)

По такой схеме были реализованы установки STE RTA 79 и STE RTA 70H (рис. 4), предназначенные для проведения быстрой температурной обработки в управляемой газовой среде. Установка STE RTA 79 позволяет проводить кратковременные (до 10 мин) процессы термической обработки в инертной атмосфере при температуре до 900°C и при более высоких скоростях нагрева, чем в установке STE RTA 70H с температурой отжига до 1300°C и временем отжига до 120 мин. При этом отжиг может проводиться в вакууме, в инертной или химически активной среде. Обе установки позволяют проводить многостадийный отжиг образцов в полностью автоматическом режиме.

### Экспериментальные результаты

В ходе проведения экспериментов на установке STE EB 71 осаждались многослойные металлические покрытия Ti/Al/Ni/Au и Ni/Ge/Au для омических контактов приборов на основе нитридных (Al,Ga)N/GaN и арсенидных (Al,Ga)As/GaAs гетероструктур, соответственно. Неоднородность напыления составила 0,5% для образца диаметром 100 мм.

На установке STE RTA 79 в ЗАО «Светлана-Рост» был проведен ряд экспериментов по вжиганию полученных многослойных металлических систем. Скорость нагрева образцов на линейном участке кривой зависимости температуры от времени составила 35—40°C/c (для нитридных структур) при неоднородности нагрева не более 2% на диаметре 100 мм.

Полученные значения контактного сопротивления составляют для нитридных гетероструктур 0,4—0,6 Ом·мм при значении шероховатости поверхности 0,2—0,09 мкм, для слаболегированных арсенидных слоев 0,15—0,25 Ом·мм при шероховатости 0,05—0,01 мкм.

Аналогичные результаты были получены на такой же установке в ЗАО «Светлана-Электронприбор». Значение контактного сопротивления для арсенидных контактных слоев составило 0,1—0,15 Ом·мм при шероховатости 0,05—0,02 мкм.

Следует отметить, что во всех случаях вжигания омических контактов к нитридным и арсенидным гетероструктурам разброс полученных значений сопротивления не превышал 5% для образца диаметром 76 мм. Незначительная неоднородность, которую можно наблюдать на некоторых нитридных образцах, выращенных на сапфировых подложках и подложках из карбида кремния, является следствием неплотного прилегания пластины к держателю образца. Это обусловлено тем, что поверхность образца со стороны подложки не идеально ровная вследствие внутренних механических напряжений самой структуры. В настоящий момент ведутся эксперименты по устранению этой неоднородности за счет использования держателя образцов специальной конструкции.

\*\*\*

Таким образом, показано, что созданные в компании ЗАО «НТО» установки электронно-лучевого напыления серии STE EB и установки быстрого термического отжига серии STE RTA в составе комплекса оборудования планарного технологического цикла по-



зволяют проводить как исследовательские, так и промышленные работы по формированию низкоомных омических контактов полупроводниковых приборов на основе современных материалов  $A_3B_5$ . Установки целесообразно использовать при разработке СВЧ- и оптоэлектронных приборов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Александров С. Б., Алексеев А. Н., Веселова Е. А. и др. Отечественные установки электронно-лучевого напыления. Реализация низкоомных омических контактов к мощным нитридным СВЧ-транзисторам на основе тугоплавких материалов // Тр. 9-й Междунар. конф. "Пленки и покрытия — 2009".— Россия, С.-Петербург.— 2009.— С. 179.

2. Ruvimov S. Microstructure of Ti/Al and Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts for n-GaN // Applied Physics Letters.—1996.— Vol. 69, N 11.— P. 1556—1558.

3. Luther B. P., Mohny S. E. Investigation of the mechanism for Ohmic contact formation in Al and Ti/Al contacts to n-type GaN // Applied Physics Letters.— 1997.— Vol. 70.— P. 57—59.

4. Fiory A. T. Methods in microelectronics for rapid thermal annealing of implanted dopants // 11<sup>th</sup> Workshop on Crystalline Silicon Solar Cell Materials and Processes.— Estes Park, Colorado.— 2001.— P. 102—105.

5. Prucnal S., Sun J. M. Flash lamp annealing vs rapid thermal and furnace annealing for optimized metal-oxide-silicon-based light-emitting diodes // Solid-State Letters.— 2007.— Vol 10.— Is. 2.— P. H50—H52.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



**Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. — М.: Техносфера, 2009.— 472 с.**



Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

Описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового теле- и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

Представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающее вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимально необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

НОВЫЕ КНИГИ



**Наноструктурные покрытия / Под ред. А.Кавалейро, Д. де Хоссона.— М.: Техносфера, 2011.— 752 с.**

Сборник подготовлен международным коллективом ведущих специалистов в области нанонауки и наноструктурных покрытий. Изложены основные сведения о синтезе сверхтвердых пленок на основе тугоплавких соединений, их структуре, фазовом составе, физико-механических свойствах и сферах применения. Подробно характеризуются методы исследования покрытий: просвечивающая электронная микроскопия, наноиндентирование и компьютерный эксперимент. Детально анализируются теоретические и опытные данные о природе деформации и разрушения сверхтвердых покрытий. Особое внимание уделено их трибологическим характеристикам и термической стабильности.

Сборник будет полезен ученым, инженерам и преподавателям высшей школы, студентам и аспирантам, специализирующимся в области нанотехнологий, наноматериалов и нанопокровтий.