

УДК 621.315.592

### ПОЛУЧЕНИЕ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ $A^3B^5$ МЕТОДОМ ИОННО-ЛУЧЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ

**Д.А. Гусев, И.А. Сысоев,  
В.Ф. Катаев, А.В. Закопа**

*Рассматривается целесообразность применения технологии ионно-лучевого осаждения для получения многокомпонентных полупроводниковых соединений. Описаны конструкция установки ионно-лучевого осаждения и сопутствующее оборудование. Рассмотрен эксперимент по получению четырехкомпонентных соединений. Приведены экспериментальные данные.*

**Ключевые слова:** технология ионно-лучевого осаждения, многокомпонентные полупроводниковые соединения  $A^3B^5$ , конструкция установки, эксперимент.

**Key words:** technology of ion-beam deposition, multi-component semiconductor compounds  $A^3B^5$ , design of assembling, experiment.

Четырехкомпонентные полупроводниковые соединения весьма перспективны для применения в оптоэлектронике. Однако существующие методы их получения, в частности, такие как молекулярно-лучевая и МОС-гидридная эпитаксия, являются экономически дорогостоящими и содержат целый ряд технологических трудностей. Интересным альтернативным решением, на наш взгляд, в настоящее время является технология ионно-лучевого осаждения. По предварительному анализу разработанная нами технология ионно-лучевого осаждения значительно дешевле по сравнению с молекулярно-лучевой и МОС-гидридной эпитаксией. К тому же необходимо отметить более широкие возможности этой технологии. Так, наряду с возможностью получения полупроводниковых эпитаксиальных пленок, возможно получение практически любой металлической пленки, а также создание диэлектрических слоев высокого качества в одной технологической камере.

Сущность предлагаемого нами метода заключается в распылении исходной мишени направленным ионным пучком и последующем осаждении распыленных частиц на нагретой до определенной температуры монокристаллической подложке. Преимуществами ионно-лучевой технологии по сравнению с традиционными методами эпитаксиального выращивания (жидкофазная, газофазная эпитаксия) является снижение температуры роста, экономичный расход распыляемых материалов, возможность получения слоев различных полупроводниковых соединений в едином цикле, более высокое качество получаемых результатов.

Для реализации указанного выше метода нами была сконструирована технологическая установка, отвечающая всем необходимым требованиям. Установка представляет собой систему, включающую герметичную рабочую камеру, ионный источник, вакуумное оборудование, силовые блоки, нагревательное устройство, устройство регулировки и контроля температуры. Общий вид установки представлен на рис. 1.

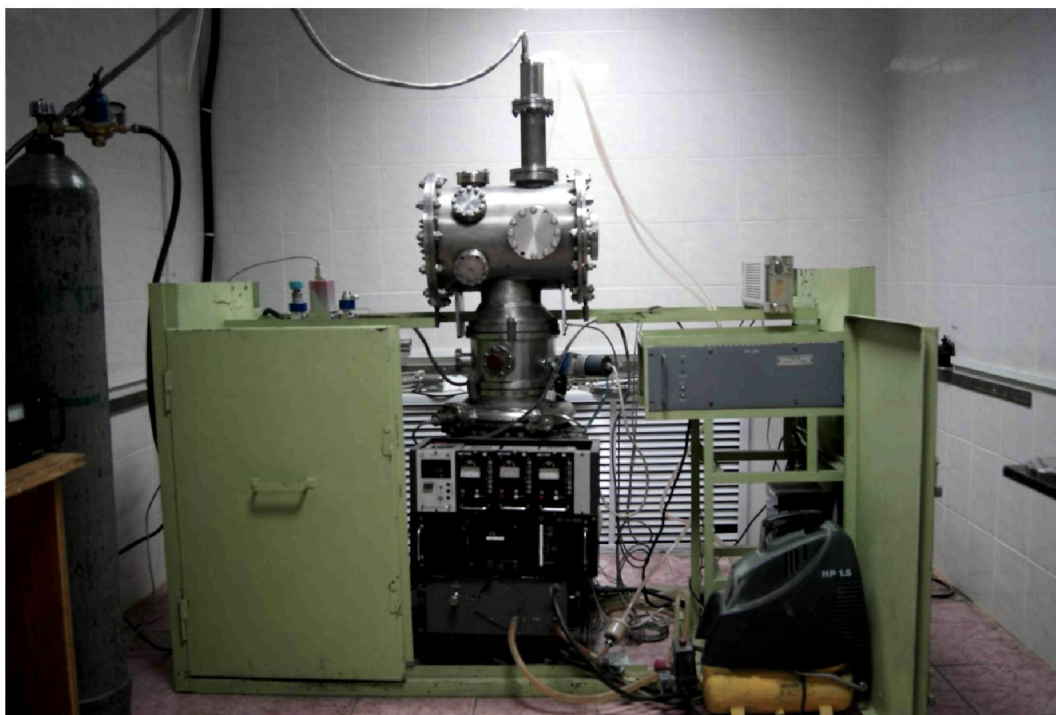


Рис. 1. Общий вид установки ионно-лучевого осаждения

**Принцип работы установки ионно-лучевого осаждения:** после загрузки исходной шихты и осаждаемых подложек в технологические кассеты установка герметизируется и производится откачка до высокого вакуума. По достижении необходимого уровня вакуума производится очистка распыляемого источника. Очистка производится ионным пучком, направленным под углом к поверхности источника, в результате чего осевшие на поверхность в процессе загрузки примеси и пыль «сравливаются» потоком ионов. По окончании процесса ионной очистки при помощи регулятора температуры устанавливается требуемая температура нагрева напыляемой подложки. При достижении ее ячейка с соответствующей шихтой кассеты-источника совмещается с ячейкой, содержащей осаждаемую подложку, и происходит процесс ионно-лучевого осаждения полупроводниковых соединений.

Разработанная нами технологическая оснастка располагается внутри рабочей камеры (рис. 2) и включает в себя кассету-источник, кассету с осаждаемыми подложками, ионный источник, нагреватель, охладитель, а также два штока. Обе кассеты закрепили на каждый шток по отдельности, а затем соединили оба штока общей перемычкой. Это позволило нам вращать обе кассеты независимо друг от друга, меняя соответствующие источники и осаждаемые подложки в ходе технологического процесса. Таким образом, в одном цикле можно производить выращивание на нескольких подложках последовательно или получать многослойные полупроводниковые структуры, а также пленки металлов или диэлектриков. В конструкции кассеты-источника нами было специально предусмотрено ограничительный экран, чтобы ограничить распыление по рабочей камере. Ячейки рассматриваемой кассеты могут изменять угол наклона. Это связано с особенностями процесса распыления [1]. Ионный источник смонтировали с верхней стороны камеры непосредственно под кассетой-источником. На задней крышке установки закрепили охладитель, который необходим для ограничения распространения тепла по объему рабочей камеры. Нагревательный элемент смонтировали через специальный разъем в охладителе и задней крышке камеры.

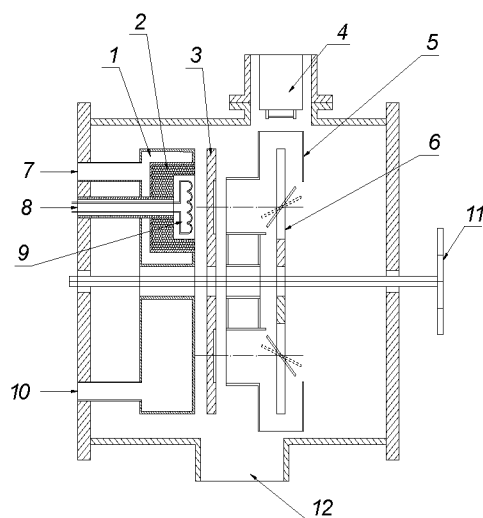


Рис. 2. Схематическое изображение рабочей камеры: 1 – охладитель; 2 – теплоизолятор; 3 – кассета с напыляемыми подложками; 4 – ионный источник; 5 – ограничительный экран; 6 – кассета-источник; 7 – входной патрубок охладителя; 8 – разъем для подключения нагревателя; 9 – нагреватель; 10 – выходной патрубок охладителя; 11 – шток; 12 – фланец откачки рабочего объема

В рассматриваемой установке используется источник ионов КЛАН-53М, обеспечивающий получение широкоапертурных моноэнергетичных пучков ионов инертных и химических активных газов. Максимальный ионный ток пучка 80 мА, диапазон регулирования энергии ионов в пучке от 150 эВ до 1500 эВ. Главным преимуществом этих источников ионов перед другими является возможность применения в качестве рабочих не только инертных газов, но и химически активных, например, кислород или азот. Это позволит получать пленки любых типов: полупроводниковые, металлические, пленки оксидов, нитридов и др. Для подачи напряжения к отдельным узлам и элементам ионного источника и обеспечения его функционирования с заданными параметрами служит система электропитания СЕФ-53М. Принципиальная схема источника ионов КЛАН-53М и системы электропитания СЕФ-53М приведена на рис. 3. Для подачи рабочего газа к ионному источнику используется система газоподдачи [3].

Так как процесс ионно-лучевого осаждения проходит в областях высокого вакуума [2], необходима вакуумная система, отвечающая необходимым требованиям. Вакуумная система установки включает в себя форвакуумный насос 2НВР-5ДМ УХЛ42, турбомолекулярный насос ТМН 01АБ-1500-004, пневматические клапана КПУ-40Л, байпас, систему вакуумного трубопровода.

Измерение давления в областях неглубокого вакуума происходит с помощью деформационных вакуумметров, в качестве чувствительных элементов имеющих герметичную упругую перегородку, способную деформироваться под действием приложенной к ней разности давлений.

В областях высокого вакуума используется ионизационный вакуумметр.

Силовые блоки опытного образца установки блок питания турбомолекулярного насоса БП-267, вакуумных клапанов и байпаса БП 24 В.

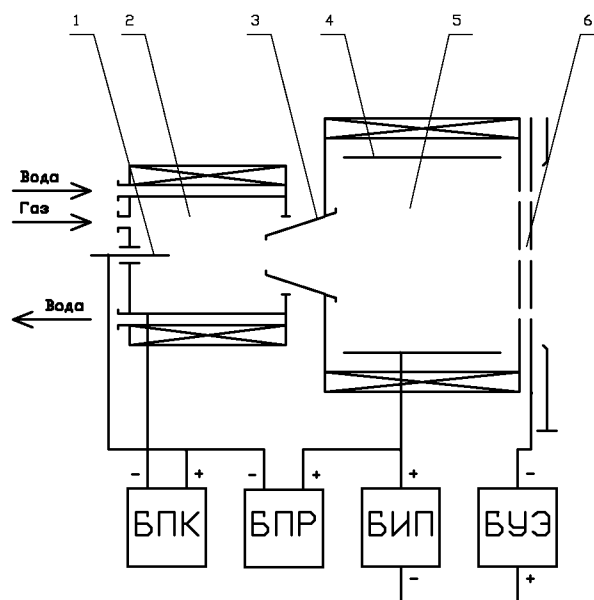


Рис. 3. Принципиальная схема источника ионов КЛАН-53М и системы электропитания СЕФ-53М [3]:

БПК – блок полого катода, БПР – блок питания разряда, БИП – блок ионного пучка, БУЭ – блок ускоряющего электрода; 1 – поджигной электрод, 2 – холодный полый катод, 3 – выходной электрод, 4 – анод, 5 – газоразрядная камера, 6 – ионно-оптическая система

**Описание и результаты эксперимента.** Для получения четырехкомпонентных соединений  $A^3B^5$  методом ионно-лучевого осаждения использовались исходные компоненты в твердой фазе. В качестве соединения выбрали  $Ga_{0,4}In_{0,1}P_{0,4}As_{0,1}$ . Компоненты взвешивались на высокоточных аналитических весах, общая масса шихты составляла 10 г. Исходные компоненты измельчались до порошкообразного состояния однородной фракции, тщательно перемешивались и спрессовывались. Готовая шихта помещалась в ячейку кассеты-источника, ориентированную под углом  $45^\circ$  по отношению к осаждаемой подложке.

В качестве подложки использовалась пластина GaAs с ориентацией поверхности {100}, легированная теллуром. Подложка после предварительной очистки помещалась во вторую кассету, предназначенную для выращиваемых соединений.

Установка герметизировалась и производилась предварительная откачка форвакуумным насосом до давления  $2 \cdot 10^{-1}$  мм рт. ст., сначала объема двигателя турбомолекулярного насоса, затем объема рабочей камеры. По окончании процесса предварительной откачки открыли высоковакуумный затвор и произвели откачку объема рабочей камеры турбомолекулярным насосом до давления порядка  $6 \cdot 10^{-3}$  Па, что является вполне достаточным условием для проведения процесса ионно-лучевого осаждения. По достижении необходимого остаточного давления включили нагреватель для получения необходимой температуры осаждаемой подложки.

Перед непосредственным процессом эпитаксиального выращивания произвели ионную очистку источника.

Температура подложки  $T_{\text{подл}} = 400^\circ\text{C}$ ; время очистки  $t_{\text{очист}} = 30$  мин. Параметры ионного пучка: напряжение на блоке управляющего электрода  $U_{\text{БУЭ}} = 200$  В; напряжение на блоке ионного пучка  $U_{\text{БИП}} = 180$  В; напряжение и ток на блоке разряда  $U_{\text{БПР}} = 55$  В,  $I_{\text{БПР}} = 0,45$  А.

## ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

По окончании процесса ионной очистки распыляемый источник совмещался с соответствующей подложкой и производилось эпитаксиальное выращивание GaInPAs/GaAs методом ионно-лучевого осаждения. Режимы осаждения и результаты экспериментальных исследований рассмотрены ниже.

Условия осаждения:  $T_{\text{подл}} = 550^\circ\text{C}$ ,  $t = 8$  мин, давление остаточных газов в ростовой камере  $P = 6 \cdot 10^{-3}$  Па.

Параметры ионного пучка: напряжение на блоке управляющего электрода  $U_{\text{БУЭ}} = 200$  В,  $I_{\text{БУЭ}} = 0,1$  мА; напряжение и ток на блоке ионного пучка  $U_{\text{БИП}} = 1000$  В,  $I_{\text{БИП}} = 45$  мА; напряжение и ток на блоке разряда  $U_{\text{БРП}} = 56$  В,  $I_{\text{БРП}} = 0,8$  А, напряжение и ток на блоке полого катода  $U_{\text{БПК}} = 320$  В,  $I_{\text{БПК}} = 0,4$  А.

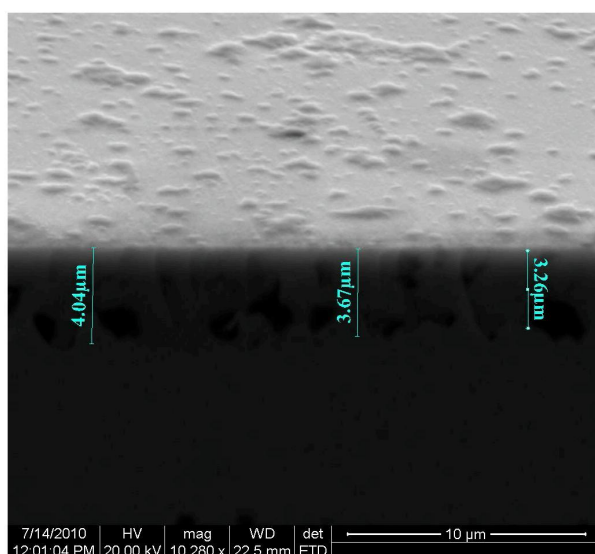


Рис. 3. Изображение скола эпитаксиальной пленки GaInPAs/GaAs, сделанное на растровом электронном микроскопе

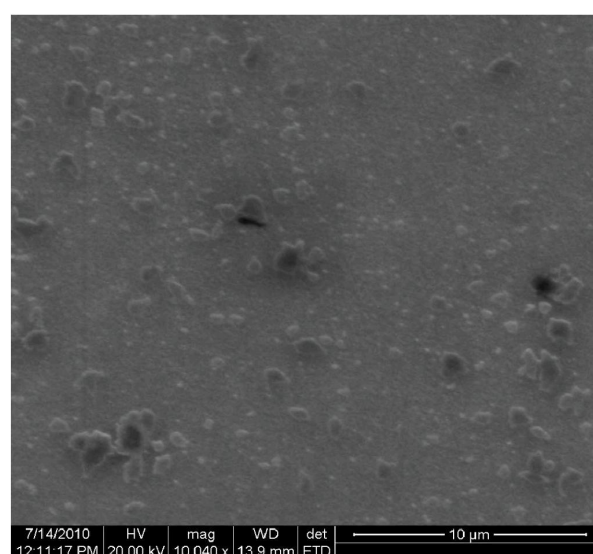
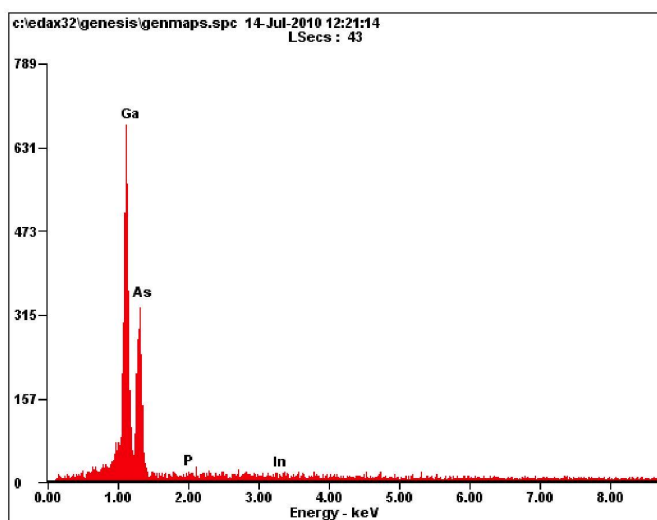


Рис. 4. Изображение поверхности эпитаксиальной пленки GaInPAs/GaAs, сделанное на растровом электронном микроскопе



а)

| Element | Wt %       | At %  |
|---------|------------|-------|
| PK      | 00.91      | 02.10 |
| InL     | 01.39      | 00.87 |
| GaK     | 47.55      | 48.96 |
| AsK     | 50.16      | 48.07 |
| Matrix  | Correction | ZAF   |

б)

Рис. 5. Результаты рентгеновского энергодисперсионного микроанализа:  
а – графическое изображение элементного состава полученного соединения;  
б – элементный состав полученного соединения

Изображение с растрового электронного микроскопа свидетельствует о наличии равномерной эпитаксиальной пленки толщиной примерно 3,6 мкм с четкой гетерограницей. На поверхности имеется наличие неоднородного массива квантовых точек и более крупных образований (островков), имеющих размеры порядка нескольких микрометров. Результаты рентгеновского микроанализа свидетельствуют о том, что состав выращенной эпитаксиальной пленки соответствует составу источника.

Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что технология ионно-лучевого осаждения весьма перспективна для получения многокомпонентных полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  и формирования на их основе полупроводниковых приборов. Дальнейшие эксперименты должны быть связаны с получением пятикомпонентных соединений, а также квантово-размерных структур.

#### **Библиографический список**

1. *Аброян, И. А.* Физические основы электронной и ионной технологии [Текст] / И. А. Аброян, А. Н. Андронов, А. И. Титов. – М. : Высшая школа, 1984.
2. *Розанов, Л. Н.* Вакуумная техника [Текст] / Л. Н. Розанов. – М. : Высшая школа, 1990.
3. *Технологический источник КЛАН-53М. Система электропитания СЕФ-53М. Система газоподдачи. Техническое описание. Инструкция по эксплуатации [Текст] / утв. Горчаров Л. А. – № 217-2009. ОО НПК «Платар». – М., 2009. – 31 с.*

УДК 004.312.46

### **СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИКОЙ**

**А.В. Осовский**

*Работа публикуется при поддержке РФФИ в рамках гранта 10-07-90713*

*Рассматривается схмотехническая реализация и преимущества схемы с программируемой логикой, реализующей высокоскоростную реконфигурацию наборов схем программируемой логики. Представлены результаты моделирования работы вычислительного устройства с программируемой логикой.*

**Ключевые слова:** *программируемая логика, вычислительные устройства с программируемой логикой, выполнение логических операций, моделирование.*

**Key words:** *programmed logic, computing devices with programmed logic, performance of logic operations, modeling.*

Развитие отечественных схмотехнических решений для информационных и телекоммуникационных систем имеет большое стратегическое значение. В настоящее время большинство схмотехнических решений в данной области, созданных зарубежными фирмами-производителями, не патентуется, а охраняется в режиме «ноу-хау». Такой подход, хотя и является отчасти оправданным коммерческий ответом на неправомерное копирование, однако в научном отношении тормозит развитие новых схмотехнических решений.