

1. Wilson R.G. // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 73(5). P. 2215.
2. Комаров Ф.Ф., Леонтьев А.В., Григорьев В.В., Гранько С.В. // Вестн. НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. 2000. № 1. С. 75.
3. Комаров Ф.Ф., Леонтьев А.В., Гранько С.В. и др. // Вестн. Белорус. ун-та. 1999. № 3. С. 16.
4. Ziegler J.P., Biersack J.P., Littmark U. Stopping and Ranges of Ions in Solids. New York, 1985.

Поступила в редакцию 17.11.2000.

**Деркач Александр Николаевич** – инженер-технолог НПО «Интеграл».

**Гранько Сергей Владимирович** – инженер-технолог НПО «Интеграл».

**Комаров Фадей Фадеевич** – член-корреспондент НАН Беларуси.

**Леонтьев Александр Викторович** – кандидат физико-математических наук.

**Сугакова Татьяна Евгеньевна** – инженер-технолог НПО «Интеграл».

УДК 538.97.405

ЧЕСЛАВ КАРВАТ (ПОЛЬША)

## УСТАНОВКА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ СЛОЕВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИОННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

A novel type of the apparatus for disposition of layers by the dynamic ion-beam mixing and ion-beam assistance is treated. The main functional features of this system are discussed.

Процесс ионной имплантации, обеспечивающий получение слоев с заданными свойствами, предъявляет к параметрам ионного пучка ряд требований. Наиболее существенными из них являются энергия ионов, плотность ионного тока и ее равномерность по облучаемой поверхности. Плотность ионного тока определяет как время, необходимое для набора заданной дозы имплантации, так и мощность, выделяемую на имплантированной поверхности. В случае больших плотностей тока мощность, выделяемая на единицу поверхности, достигает нескольких Вт·см<sup>-2</sup>, что может привести к значительному росту температуры имплантированного материала и неконтролируемым изменениям его физических свойств.

Допустимая неоднородность плотности ионного тока на имплантируемой поверхности обусловлена принятой технологией проведения исследований и в случае ионного перемешивания не должна превышать 10 % [1]. В промышленных установках для достижения такой неоднородности необходимо применять механическое сканирование облучаемой поверхности или электростатическую развертку пучка ионов. На представленной далее исследовательской установке при обработке поверхности диаметром до 50 мм была предпринята попытка получения однородного пучка без его развертки. Для достижения этой цели сделаны изменения конструкции ионного источника, а также проведена оптимализация распределения потенциалов на элементах ионно-оптической системы.

### Тестирование параметров работы установки

Установка ионного перемешивания (рис. 1) состоит из следующих основных узлов: ионно-оптического, служащего для создания и формирования ионного пучка [2, 3]; держателя образцов с регулируемой температурой (80–600 К); прецизионного источника атомов, осаждаемых на обрабатываемой поверхности; системы электропитания установки; вакуумной системы; системы контроля электрических свойств обрабатываемой поверхности [4].

В установке с целью повышения безопасности обслуживания и обеспечения контроля электрических параметров наносимых слоев камера с образцами находится под потенциалом земли. В связи с этим элементы питания ионного источника и ускорительной системы находятся под высоким потенциалом. В установке применено питание из сети, а для ее изоляции от

высокого напряжения использован сепарационный трансформатор 220 В/220 В с изоляцией обмоток 150 кВ. Ионный источник с холодным полым катодом [2, 3] запитан стабилизированным высоковольтным блоком питания 35 кВ/5 мА. Для его изоляции от источника 600 В/1 А использован сепарационный трансформатор 220 В/220 В с изоляцией обмоток 50 кВ. Окончательное ускорение ионов происходит под действием высоковольтного источника питания с одноступенчатым трансформатором, однополупериодным полупроводниковым выпрямителем и сглаживающим конденсатором. Максимальные параметры высоковольтного блока питания 150 кВ/15 мА.

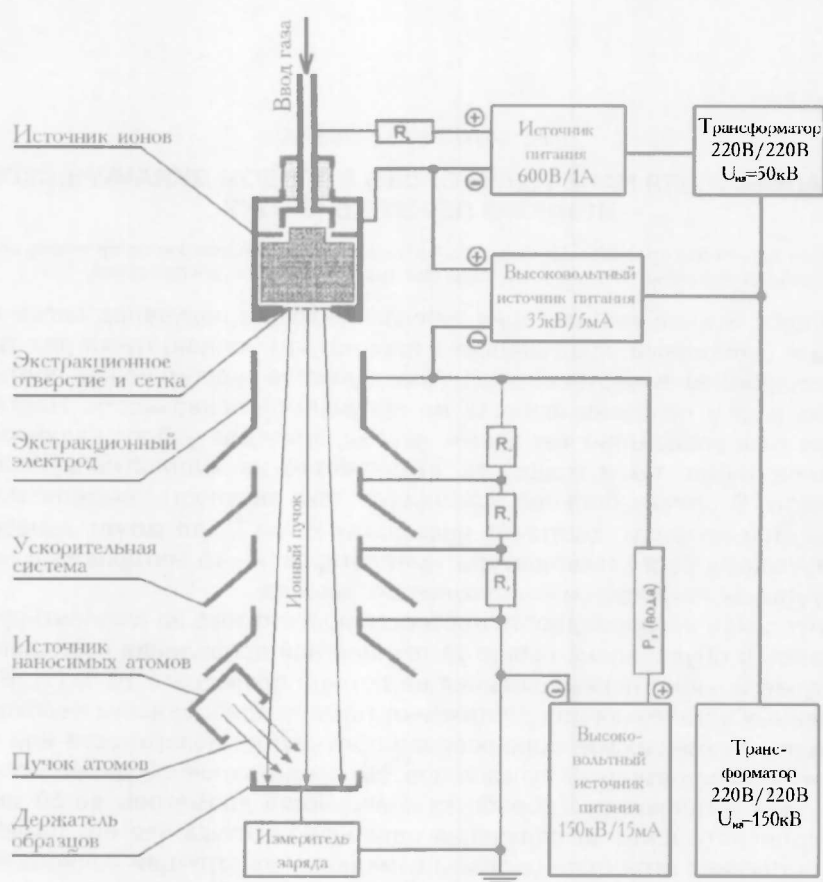


Рис. 1. Схема и основные узлы установки динамического ионного перемешивания

На этапе запуска установки использованы экстракционные отверстия диаметром  $S_0 = 10$  и  $5,5$  мм, которые можно было закрыть сеткой с прозрачностью около 60 %. Измерения ионного тока проводились непосредственно на держателе образцов. Измерения распределения плотности ионного пучка по его сечению осуществлялись подвижным зондом с цилиндром Фарадея. Диаметр измерительного отверстия равен 5 мм. Точность проведенных измерений  $\sim 10$  %.

Были определены зависимости ионного тока на держателе образцов  $I_d$  от потенциала экстракционного электрода  $U_{эк}$  для разных диаметров экстракционного отверстия  $S_0$  и расстояний экстракционного электрода от источника ионов  $d_0$ .

Заслуживает внимания факт относительно слабой зависимости величины ионного тока от величины потенциала экстракционного электрода  $U_{эк}$



особенно для расстояния  $d_0=15$  мм. Такая характеристика ионно-оптической системы позволяет обеспечить управление в широких пределах формой пучка и соответственно плотностью ионного тока в нем с сохранением почти постоянной величины ионного тока, что является положительным качеством системы.

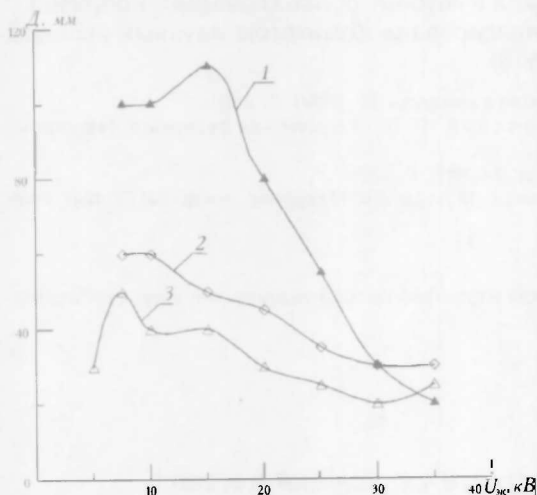


Рис. 2. Зависимость диаметра пучка ионов  $D_0$ , измеренная в области держателя образцов, от потенциала экстракции  $U_{эк}$  для различных диаметров отверстия источника ионов  $S_0$  и расстояния источник-экстракционный электрод  $d_0$ .  
 1 –  $S_0=10$  мм,  $d_0=15$  мм,  $U_{и}=50$  кВ (с сеткой); 2 –  $S_0=5,5$  мм,  $d_0=15$  мм,  $U_{и}=50$  кВ (с сеткой); 3 –  $S_0=5,5$  мм,  $d_0=25$  мм,  $U_{и}=50$  кВ (с сеткой)

Рис. 2 представляет зависимость ширины ионного пучка  $D_0$  от величины потенциала экстракционного электрода  $U_{эк}$ . Измерения проведены с помощью подвижного зонда на расстоянии около 1 м от источника ионов в месте, где расположен держатель образцов. При измерениях величины  $U_{эк}$  поддерживалось постоянное напряжение  $U_y=50$  кВ. Энергия ускоренных ионов определялась суммой напряжений на экстракционном электроде  $U_{эк}$  и ускоряющей системе  $U_y$ :

$$E_j = e(U_{эк} + U_y).$$

Как видно из рис. 2, диаметр пучка при некоторых условиях может достигать 100 мм. Однако исследования его однородности показали, что только центральная часть диаметром 50 мм соответствует требова-

ниям 10 %-й неоднородности и может быть использована для обработки материалов.

Для реализации главной функции установки – динамического ионного перемешивания – вблизи держателя образцов расположен прецизионный источник атомов, осаждаемых на обрабатываемую поверхность материала (см. рис. 1).

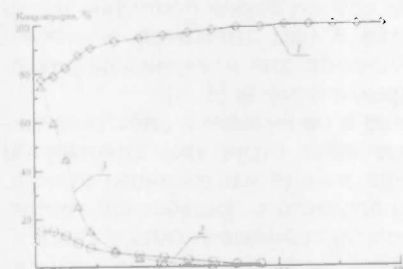


Рис. 3. Распределение по глубине атомов Cu (1), N (2) и Au (3) в образце меди, модифицированном динамическим ионным перемешиванием

В первых экспериментах по динамическому перемешиванию использовался источник ионов золота. Для оценки качества работы установки проводилось динамическое перемешивание атомов золота на образце меди. В качестве перемешивающих были выбраны ионы молекулярного азота  $N_2^+$ . С поверхностного слоя обработанного образца был снят спектр резерфордовского обратного рассеяния (RBS). Анализ спектра RBS позволил установить распределение химических элементов по глубине об-

разца (рис. 3).

Видно, что верхний слой медного образца под действием динамического перемешивания был обогащен атомами золота на глубину около 150 нм. В условиях эксперимента соотношение потоков атомов золота и молекул азота составляло около 0,3. В этих условиях процесс динамического перемешивания протекает с высокой эффективностью, поскольку на поверхности меди не образуется слой золота.

Проведенные исследования работы установки показали ее высокую стабильность и качество при нанесении слоев методом динамического ионного перемешивания. Анализ распределения химических элементов по глубине обрабатываемого материала свидетельствует о высокой степени проникновения атомов наносимого материала в глубину обрабатываемого образца.

Работа была частично профинансирована Комитетом научных исследований Польши (грант № 8Т10В01618).

1. Комаров Ф. Ф. Ионная имплантация в металлы. М., 1990. С. 216.
2. Кищак К., Мончка Д., Жуковский П. В. // Вакуумная техника и технология. 1992. Т. 2. № 5-6. С. 43.
3. Kiszczak K. // Nukleonika. 1999. Vol. 44. № 2. P. 137.
4. Карват Ч., Жуковски П., Козак М. и др. // III Междунар. конф. ВИТТ. Мн., 1999. Т. 2. С. 141.

Поступила в редакцию 30.11.2000.

**Карват Чеслав** – кандидат технических наук (Люблинский технический университет, Республика Польша).

УДК 621.315.592

А.Н. АКИМОВ, Л.А. ВЛАСУКОВА, В.А. БЫКОВСКИЙ, В.Ф. ШОХ

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОТЖИГА НЕЙТРОННОЛЕГИРОВАННОГО АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ С ПОМОЩЬЮ СЕЛЕКТИВНОГО ТРАВЛЕНИЯ

The structure transformations in neutron-transmutation doped GaAs during the isochronal annealing have been investigated using selective etching and electrical measurements. The rearrangements of impurity-defect system of radiated with thermal neutrons high fluences crystals under the annealing in the range of temperatures 300–500 °C have been analyzed.

Улучшение параметров нейтроннолегированного арсенида галлия требует подробной информации о протекающих в облученных кристаллах при термообработке процессах отжига радиационных дефектов и вторичного дефектообразования, которую получают методами фотолюминесценции и емкостной спектроскопии [1–3]. Однако данные методы малоэффективны при изучении кристаллов сразу после облучения или на ранних стадиях отжига (при температурах ниже 400–450 °C) из-за высокого уровня радиационных повреждений в таких объектах. В этом случае более пригодны методы прямого наблюдения структурных дефектов. К ним относится, в частности, селективное травление, успешно применяемое для изучения дефектообразования в кристаллах, облученных быстрыми ионами [4, 5].

В настоящей работе селективное травление в сочетании с электрофизическими измерениями использовано для изучения структуры кристаллов нейтроннолегированного GaAs и ее изменений в ходе изохронного отжига. Использовались полученные по методу Чохральского с жидкостной герметизацией расплава кристаллы двух типов: нелегированные *p*-типа с концентрацией носителей заряда  $\sim 1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (далее – низкоомные) и полуизолирующие (ПИ) с удельным сопротивлением  $\rho > 10^7 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Низкоомные образцы облучались флюэнсом тепловых нейтронов  $6 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ , обеспечивающим суммарную концентрацию донорных примесей Se и Ge, равную  $1.6 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . ПИ-кристаллы облучались флюэнсами тепловых нейтронов от  $1 \times 10^{16}$  до  $9.7 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ . Соотношение плотностей потоков тепловых и быстрых ( $E > 0,1 \text{ МэВ}$ ) нейтронов в канале ядерного реактора  $\phi_{\text{тн}}/\phi_{\text{б}}$  составляло 10. Вырезанные из одного слитка контрольные и облученные образцы отжигались в потоке водорода в течение 10 мин в области температур 300–800 °C (низкоомные образцы) и 100–800 °C (ПИ-образцы) с шагом в 50°. После каждого этапа отжига травлением в полирующем растворе ( $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=3:1:1$ ) удалялся слой поврежденного материала толщиной

