

8. *Murphy D., Mauersberger K.* // Int. Journ. Mass Spectr. Ion Proc. — 1987. — 76, N 1. — P. 85-93.

9. *Шаген П.* Электронно-оптические преобразователи с канальным электронным умножением. — В кн.: Достижения в технике передачи и воспроизведения изображений / Под ред. Кейзана Б. Пер. с англ., Т. 1. — М.: Мир, 1978. — С. 13-84.

Рукопись поступила 16.10.90

А. А. Майоров

*(Институт аналитического приборостроения АН СССР,
Ленинград)*

**РАЗРАБОТКИ УСТАНОВОК
МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ
В НТО АН СССР**

Эпитаксиальная технология давно приобрела важное значение в физике и технике полупроводников и в настоящее время, по-видимому, определяет прогресс в таких областях, как микро- и оптоэлектроника. Ее разновидность — технология молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), в основе которой лежит процесс взаимодействия атомных или молекулярных пучков тепловой энергии на монокристаллической подложке, поддерживаемой при определенной температуре. Пучки получают посредством испарения элементов или соединений в сверхвысоком вакууме. С созданием гетероструктур на основе соединений $A^{III}B^V$ и их твердых растворов удалось реализовать преимущества эпитаксиальной технологии, особенно МЛЭ, в конкретных приборах. Созданы быстродействующие высокочастотные элементы типа биполярных транзисторов на гетеропереходах, лазеры с квантовой потенциальной ямой в активном слое. Разработана технология получения твердых микроволновых элементов с использованием МЛЭ. Рядом американских и японских фирм налажен выпуск быстродействующей памяти и НЕМТ-транзисторов. Производятся элементы с эффектом Ганна и полевые транзисторы с низким уровнем шумов, ведутся работы по использованию МЛЭ для создания структур в интегральной акустоэлектронике, оптоэлектронике и других областях. Кроме конкретных, уже освоенных промышленностью приборов, технология МЛЭ дает возможность создавать развитые эпитаксиальные структуры с толщинами слоев в несколько десятков ангстрем, модулированным легированием и сверхрешеткой, исследование которых открывает новые области в физике твердого тела, такие как физика систем с пониженной размерностью с совершенно новыми электронными, оптическими свойствами и свойствами переноса. Высокие научные и практические результаты реализации техно-

логии МЛЭ стали возможными благодаря серьезным усовершенствованиям аппаратуры МЛЭ, проведенным в последние годы приборостроительными фирмами. При сравнительной концептуальной простоте самого метода, оборудование для его реализации является одним из наиболее сложных, что предъявляет соответствующие требования к его изготовителям. Ведущие западные фирмы, работающие в этом направлении, в острой конкурентной борьбе выпустили на международный рынок уже несколько поколений установок молекулярно-лучевой эпитаксии различного назначения. К сожалению, известные ограничения, накладываемые координационным комитетом по торговле с социалистическими странами (КОКОМ), не позволяют советским научным и промышленным организациям в полной мере воспользоваться громадным опытом, накопленным этими фирмами за последние двадцать лет.

В этой связи совершенно необходимым для СССР явилось проведение собственных опытно-конструкторских разработок аппаратуры для молекулярно-лучевой эпитаксии и освоение ее промышленного выпуска.

В Научно-техническом объединении АН СССР работы по созданию аппаратуры для молекулярно-лучевой эпитаксии соединений $A^{III}B^V$, предназначенной для решения научно-исследовательских и технологических задач, были начаты в 1984 году.

Несмотря на концептуальную простоту, МЛЭ являются одной из самых сложных технологий с точки зрения оснащения и оборудования. Подтверждением этому явилась необходимость создания в НТО АН СССР с момента начала работ по МЛЭ ряда новых технологических процессов, в частности:

1) разработана технология высокотемпературного вакуумного ($1500-2000\text{ }^\circ\text{C}$, $P < 10^{-6}$ мм рт. ст.) отжига деталей из титана, молибдена, пиролитического нитрида бора;

2) разработана технология и сконструировано оборудование для изготовления изделий из сверхчистого пиролитического нитрида бора (PNB). К началу разработки установок МЛЭ в СССР практически не изготавливался PNB приемлемого качества. Этот материал, имеющий низкую упругость пара при высоких температурах, используется в МЛЭ для изготовления тиглей и конструктивных деталей, работающих при высоких температурах. В НТО АН СССР была разработана и внедрена хлоридная технология изготовления изделий из PNB. По физическим характеристикам и чистоте материал, изготовленный в НТО АН СССР, удовлетворяет требованиям, предъявляемым для получения высококачественных эпитаксиальных структур;

3) создана практически безотходная технология обработки деталей из нитрида бора, включающая механические и термические операции и учитывающая анизотропию физико-механических свойств этого материала;

4) разработаны и внедрены технологии электрохимического травления, очистки и промывки вакуумных деталей;

5) разработана и внедрена технология "чистой" сборки элементов и узлов установок МЛЭ.

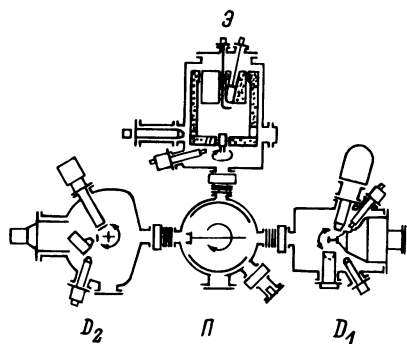


Рис. 1. Компонентная схема установки молекулярной эпитаксии ЭП1303

Одной из важнейших проблем является получение сверхвысокого вакуума ($<10^{-10}$ мм рт. ст.) чистого спектрального состава. Поскольку имелась возможность использования в качестве основного конструкционного материала вакуумных камер нержавеющей стали невакуумной плавки со сравнительно высоким газовыделением из стенок, основными путями получения необходимого вакуума являлись: использование сверхвысоковакуумных насосов большой производительности; длительный высокотемпературный прогрев камер при высоком вакууме; высокотемпературный отжиг большинства деталей, входящих в конструкцию камеры; отсутствие в ростовой камере источников нагрева и газовыделения, не участвующих непосредственно в процессе роста (системы диагностики); эффективный теплоотвод от работающих молекулярных источников и минимальное газовыделение из нагретого держателя подложек.

Не менее важной является проблема надежности устройств, обеспечивающих проведение процесса эпитаксии. Так как процесс создания сложной сверхструктуры может занимать во времени от нескольких часов до нескольких суток, проблема эта становится первостепенной. Это касается механизмов нагревания, вращения подложек и их перезарядки. Качество процесса эпитаксии определяет также надежное и точное измерение температур подложки и тигля, стабильная работа средств контроля, таких, как квадрупольный масс-спектрометр, датчик Байярда-Альперта, дифрактометр быстрых электронов. Высокие требования предъявляются к надежности управляемых заслонок. Конструкция их должна обеспечивать не менее 10 000 срабатываний без выхода из строя с временем срабатывания 0.1–0.3 с. Важную роль в обеспечении процессов эпитаксии играет надежная, безаварийная работа силовой электроники и компьютерных систем.

Перечисленные требования были учтены при конструировании установок молекулярно-лучевой эпитаксии.

К настоящему времени в НТО разработано 6 модификаций установок: ЭП1301, ЭП1302, ЭП1303, ЭП1201, ЭП1202, ЭП1203, отличающихся конструкцией ростовых камер, молекулярных источников, систем перезарядки, наличием или отсутствием средств диагностики поверхности выращенных слоев, а также компоновкой.

Независимо от конструкции ростовых камер, в состав любой из них входят:

блок из 8 молекулярных источников, 8 заслонок и азотная криопанель;

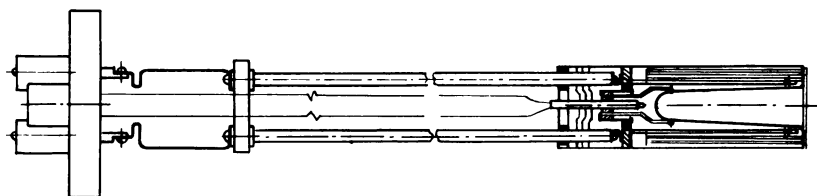


Рис. 2. Молекулярный источник установок ЭП1202, ЭП1203 и ЭП1303

дифрактометр быстрых электронов;
 манипулятор образца;
 квадрупольный масс-спектрометр;
 ионизационный датчик потоков;
 магниторазрядный и титановый сублимационный насосы;
 шибер стыковки с системой перезарядки;
 датчики остаточного давления;
 смотровые окна.

Имеется возможность установки гелиевого криогенного насоса, разработанного специально для систем МЛЭ.

Ростовая камера первой разработанной в НТО установки МЛЭ ЭП1301 (рис. 1) имела форму усеченной призмы, выбранной в целях удобства размещения функциональных узлов. В последующих разработках ростовая камера выполнена сферической, что существенно снизило газовыделение из стенок и улучшило технологичность системы.

Важнейшими элементами установок МЛЭ являются источники молекулярных пучков. Принцип их действия прост и основан на испарении расходуемого материала из нагретого до определен-

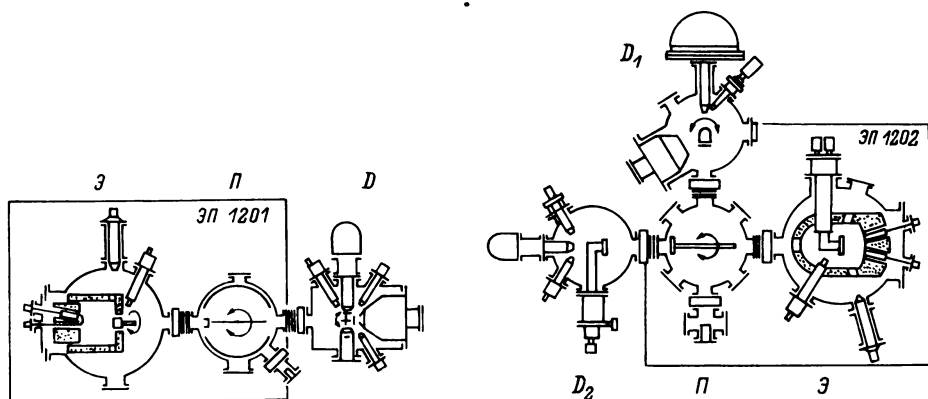


Рис. 3. Компонентная схема установки молекулярной эпитаксии ЭП1302

Рис. 4. Компонентная схема установки молекулярной эпитаксии ЭП1303

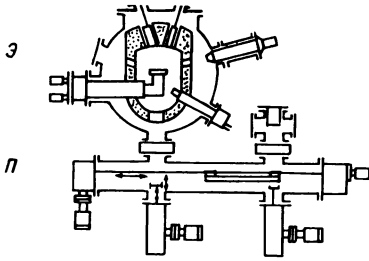


Рис. 5. Компонентная схема установки молекулярной эпитаксии ЭП1203

ной температуры тигля (ячейка Кнудсена). Вместе с тем необходимость получения спектрально чистых молекулярных потоков предъявляет жесткие требования к конструкции источников и применяемым материалам. Так, например, в последнем варианте источника (рис. 2), разработанном для установок ЭП1201, 1203, 1303, для получения требуемых характеристик выращиваемых пленок использовано 7 танталовых экранов, отожженных в вакууме при $T = 2000^\circ\text{C}$, и конусный тигель из пиролитического нитрида бора, отожженный в вакууме при $T = 1600^\circ\text{C}$.

Максимальная рабочая температура тигля составляет 1250°C при мощности нагревателя 200 Вт. Точность поддержания температур тигля и подложки не хуже $\pm 0.5^\circ\text{C}$.

Важная роль в ростовой камере принадлежит манипулятору образца: он должен принять подложку от манипулятора перезарядки, закрепить ее в правильном положении относительно молекулярных пучков, точно удерживать подложку в этом положении или, если это необходимо, обеспечить ее вращение. По мере эксплуатации выпущенных установок МЛЭ манипулятор образца постоянно совершенствовался. В результате этой работы удалось существенно упростить кинематику и повысить надежность механизмов, входящих в состав установок ЭП1202, 1203, 1303. Примененный в этих установках байонетный захват образца дал возможность снизить требования к точности совмещения осей манипуляторов и облегчить проведение операции передачи образца.

Во всех разработанных установках МЛЭ держатель образца рассчитан на подложку диаметром 40 мм. Однако в конструкции установки ЭП1203 предусмотрена возможность быстрой модернизации на подложку диаметром 76 мм.

Характерной особенностью разрабатываемой в НТО АН СССР аппаратуры МЛЭ является ее оснащенность средствами диагностики выращенных структур. Так, в состав первой разработанной установки ЭП1301 (см. рис. 1) входили два диагностических модуля D_1 и D_2 , через систему перезарядки образца Π соединенных с ростовой камерой \mathcal{E} . В первом из этих модулей были реализованы методики сканирующей электронной Оже-спектроскопии, дифракции медленных электронов (ДМЭ) и вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС), во втором модуле можно было осуществлять диагностику поверхности методом электронной спектроскопии с угловым разрешением при возбуждении рентгеновским излучением, синхротронным излучением или электронным ударом.

В следующем варианте — установке ЭП1302 (рис. 3) имеется один диагностический модуль D , являющийся модернизацией

модуля D_1 предыдущей системы. В комплектации ростовой модуль Э — камера перезарядки П выпускалась самостоятельная модель ЭП1201 только для ростовых экспериментов.

В установке ЭП1303 (рис. 4) возможности диагностики расширены введением в модуль D_1 методики рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (ЭСХА) с полусферическим энергоанализатором дополнительно к сканирующей электронной Оже-спектроскопии и ДМЭ. Методика ВИМС вынесена в отдельный модуль D_2 .

Как и в случае установки ЭП1302 возможен выпуск только ростовой части установки в комплектации модулей роста Э и перезарядки П (установка ЭП1202).

В настоящее время выпускается установка МЛЭ ЭП1203 (рис. 5), имеющая магистральную систему перезарядки образцов в отличие от радиальной во всех предыдущих системах. Установка имеет возможность наращивания как дополнительными модулями роста, так и диагностической аппаратурой. Система автоматизации установки на базе ЭВМ типа „КОМПАН“ и электронной аппаратуры, выполненной в стандарте VME, позволяет проводить процессы программированного роста эпитаксиальных структур.

Рукопись поступила 12.11.90