

В. И. БУДАРНЫХ, Л. М. ЛОГВИНСКИЙ, Ю. Е. НЕСТЕРИХИН,
Л. М. ОСТАПОВСКИЙ, В. Э. РЯБЧЕНКО, В. Г. ЦУКЕРМАН

(Новосибирск)

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВАРИАНТА
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ
МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ

Введение. Процесс синтеза полупроводниковых соединений и структур из молекулярных пучков, как и любой технологический процесс, зависит от многих факторов. Однако в сравнении с традиционными технологиями, типа жидкофазовой или газотранспортной, метод молекулярной эпитаксии (МЭ) допускает введение контроля процесса синтеза в реальном масштабе времени практически по всем параметрам: составу атмосферы ростовой камеры, составу и интенсивности молекулярных пучков (МП), температуре подложки и источников МП, кристаллографической структуре растущего эпитаксиального слоя и др. Так, например, интересный результат, полученный в работе [1], позволяет коррелировать отношение интенсивностей МП и кристаллографической структуры поверхности, наблюдаемой в процессе роста методом дифракции быстрых электронов, с типом проводимости эпитаксиального слоя.

Разработка технологии, основанной на использовании метода МЭ, уже сегодня достигла определенных успехов, особенно в области синтеза слоев и структур соединений типа $A_{III}B_V$. Методом МЭ получены совершенные эпитаксиальные слои различных составов, выявлены условия легирования эпитаксиальных слоев, созданы такие приборы, как диоды Ганна, варакторы, светодиоды и лазеры, фотоприемники. В [2, 3] описаны попытки роста простейших интегрально-оптических элементов: лазеров, соединенных с волноводом; линз и призм.

В то же время следует отметить, что большинство результатов явились только демонстрацией возможностей метода МЭ и не привнесли пока качественных или количественных достижений в свойства синтезированных структур. Отмечаемые почти во всех работах зеркальность поверхности выращиваемых слоев и возможность получения совершенных тонких и сверхтонких (до десятков ангстрем) эпитаксиальных слоев не привели к каким-либо серьезным результатам в решении задач микроэлектроники. И дело здесь не только в возможной идеологической неподготовленности в плане использования потенциала молекулярной эпитаксии. По-видимому, для полного использования возможностей, заложенных в методе, требуется не просто разработка технологии очистки поверхности, режимов роста, способов легирования и т. д., а создание технологии сегодняшнего уровня, обеспеченной оперативным контролем и управлением процессом во всех его стадиях, реализующей все прецизионные возможности метода. Речь идет о технологии, сопряженной с автомати-

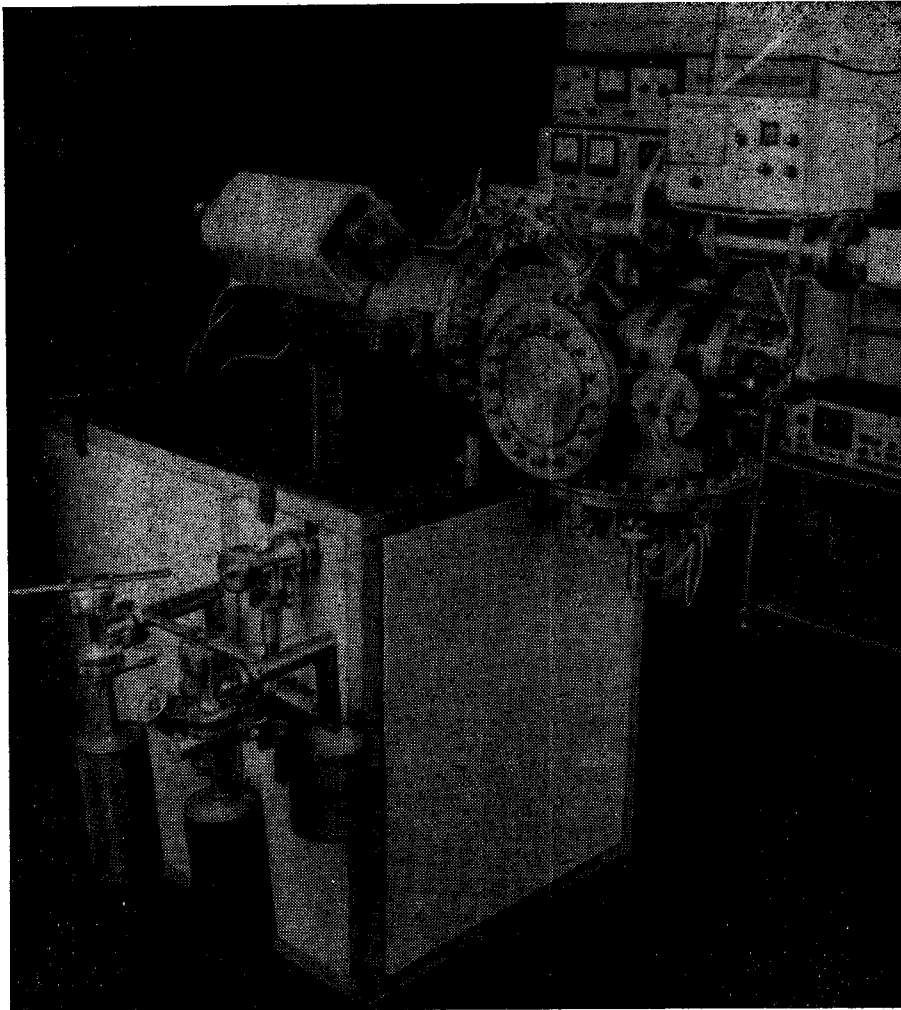


Рис. 1.

зированной системой контроля и управления. Демонстрацией потенциала такой системы явилась работа Л. Езаки по росту сверхрешеток [4].

Постановка задачи. Первые положительные результаты, полученные в работах по синтезу полупроводниковых соединений и структур методом МЭ, а также потенциальная перспективность метода для целей микроэлектроники вызвали интенсивные исследования целого ряда фирм и организаций по разработке и созданию установок МЭ.

Желание создать универсальную систему МЭ, замкнутую на себя, по крайней мере в вопросах синтеза слоев и анализа процессов на поверхности, привело к появлению, на наш взгляд, «перегруженных» установок. Примером тому может быть система МВЕ-500, выпущенная фирмой «Рибер» (Франция) [5]. Принятое впоследствии решение о разделении исследовательской и ростовой аппаратуры из-за невозможности их эффективной эксплуатации в одном объеме в различные, сообщающиеся между собой через шлюз камеры, т. е. создание многокамерных систем, — одновременно вынужденное и рациональное решение для лабораторных исследовательских установок [6]. Другой путь — изготовление простых, но отвечающих всем требованиям метода МЭ технологических систем,

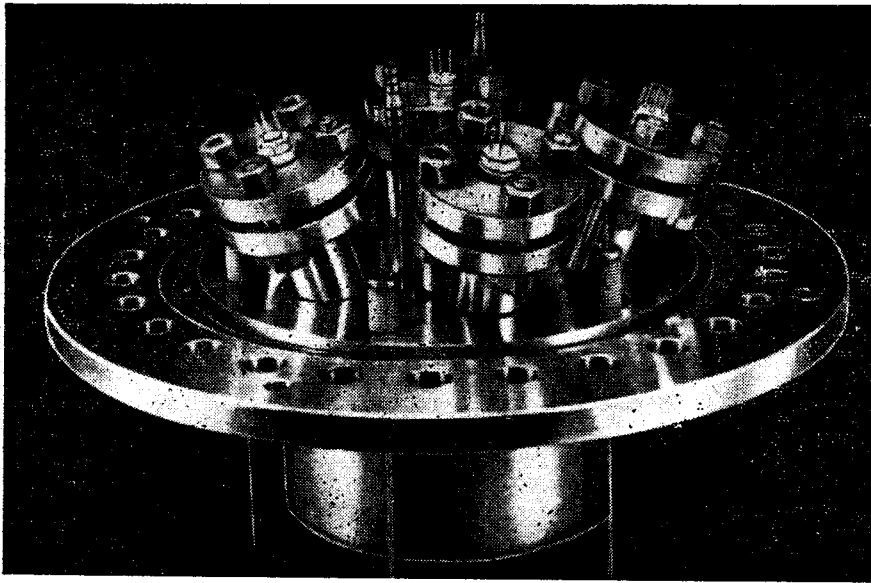


Рис. 2.

способных быть воспринятыми и в плане практического, производственного использования.

Нами были разработаны и созданы простые, относительно дешевые и экономичные установки для синтеза из МП эпитаксиальных слоев соединений типа $A_{III}B_V$. Установка, которую можно охарактеризовать как технологическую, обеспечивает возможность отработки режимов и рост полупроводниковых слоев и структур, развертывание автоматизированной системы контроля и управления и создание на этой базе алгоритмов и программ роста.

Вся аппаратура системы автоматизации выполнена в стандарте КАМАК. Использование стандарта КАМАК в данном случае предопределено и оправдано высокой способностью аппаратуры КАМАК к адаптации как к различным измерительным приборам и устройствам, так и к средствам вычислительной техники. Действительно, несмотря на уже имеющуюся сегодня ясность в том, какие параметры процесса МЭ следует контролировать, мы еще не в состоянии обозначить тот оптимальный способ их контроля, который обеспечил бы управление ростом. В то же время при проведении исследований в этом направлении с помощью аппаратуры КАМАК обеспечивается гибкость и универсальность системы автоматизации по отношению к любой замене или нововведению за счет дополнения или перестройки аппаратуры без изменения системы в целом [7].

Сверхвысоковакуумная технологическая установка. Общий вид установки приведен на рис. 1. Установка состоит из вакуумного поста и ростовой камеры. Предварительная откачка осуществляется сорбционными насосами типа ЦВА-4-4. После достижения с помощью магниторазрядных насосов типа НОРД-100 вакуума 10^{-5} — 10^{-6} Па установка прогревается при температуре 520—570 К, затем проводится чистовая откачка посредством магниторазрядных насосов типа МЭРН-150 и титанового сублимационного насоса до достижения давления в объеме 10^{-7} — 10^{-8} Па.

Весь цикл откачки установки занимает ~ 24 ч. Для сокращения этих непроизводительных потерь в настоящее время подготавливается к работе модернизированная установка, снабженная шлюзом.

Ростовая камера представляет собой сверхвысоковакуумный объем, включающий в себя следующие основные узлы и устройства: съемный фланец с размещенным на нем блоком из семи источников МП, манипулятор образцов, квадрупольный масс-спектрометр, ионную пушку. Кроме того, в ростовой камере имеется система независимых механических прерывателей, четыре оптических ввода, предусмотрена установка встраиваемого дифрактометра.

На рис. 2 приведен функциональный фланец с размещенным на нем блоком источников МП. Каждый источник имеет автономный фланец, снабженный тоководами. Источники расположены в отдельных отсеках, охлаждаемых жидким азотом, что исключает взаимное тепловое влияние. Расход жидкого азота не превышает 5 л/ч.

Собственно, источник МП (рис. 3) состоит из танталового нагревателя, закрепленного на алундовой основе, тигля, выполненного из нитрида бора, и системы танталовых экранов. В тигль вводится термopара, обеспечивающая контроль температуры. Потребляемая мощность при нагреве до 1200 К составляет около 30 Вт.

В установке используются сменные манипуляторы. Манипулятор представляет собой карусельный держатель для шести образцов. Он обеспечивает быструю установку каждого образца на место напыления или ионного травления. Каждая подложка закрепляется на отдельном молибденовом блоке. В центр блока введена термopара для контроля температуры во время роста или отжига. Манипулятор снабжен цилиндрическим экраном для защиты от запыления.

В качестве масс-анализатора используется фильтр масс от квадрупольного масс-спектрометра типа КМ-1. Общее давление в ростовой камере контролируется с помощью ионизационного манометра.

Система контроля, управления и регистрации. На рис. 4 приведена фотография пульта управления установкой МЭ. Схема автоматизированной технологической системы для роста полупроводниковых слоев методом МЭ изображена на рис. 5.

Первый вариант системы автоматизации обеспечивает выполнение первоочередных для технологической системы операций: контроля и управления температурными режимами источников МП и подложки, включения необходимого набора источников МП, регистрации состава атмосферы и давления в ростовой камере, контроля интенсивности МП.

Система автоматизации установки МЭ базируется на двух вычислительных машинах (ВМ) — управляющей («Электроника-100И») и инструментальной (NORD-10). Связь между ВМ осуществляется посредством последовательной линии передачи данных.

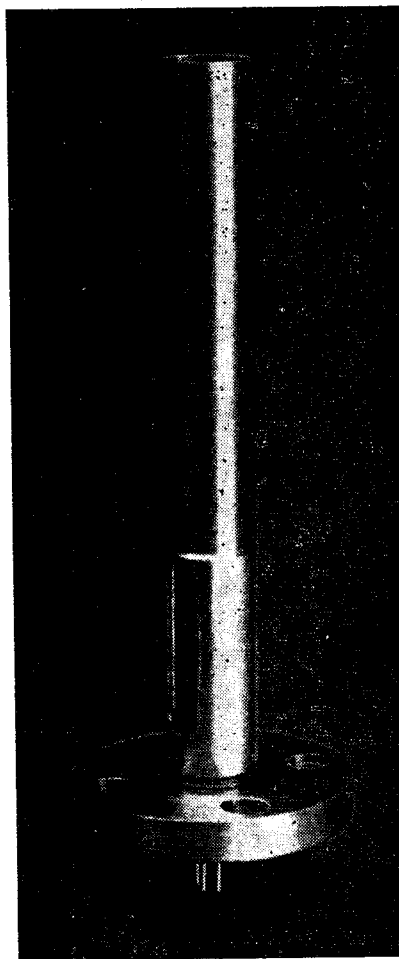


Рис. 3.

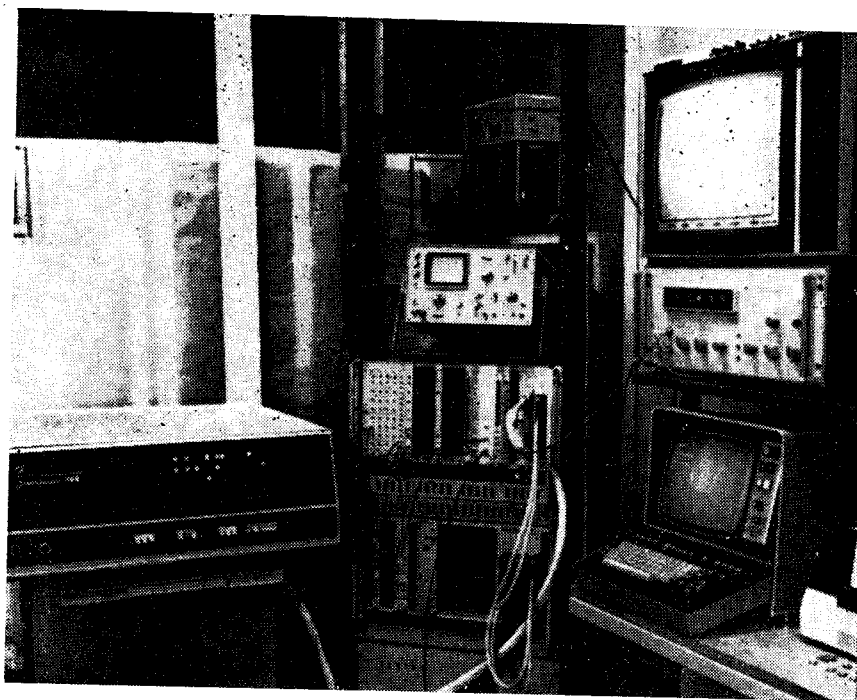


Рис. 4.

Модули КАМАК, размещенные в двух крейтах, обеспечивают сбор, предварительную обработку данных, контроль и программируемое управление процессом. В системе заняты такие модули КАМАК, как крейт-контроллер, коммутатор, АЦП, таймер, ЦАП, генератор, регистр данных, приводы телевизора и плоттера и др.

Для визуального контроля за ходом технологического процесса (температура, масс-спектры и др.) используются телевизионные дисплеи. На рис. 6, а, б приведены масс-спектры состава атмосферы ростовой камеры в режиме панорамного обзора: а — перед ростом, б — во время роста пленки арсенида галлия.

Диалог оператора с ЭВМ осуществляется с помощью алфавитно-цифрового дисплея «Videoton-340»; документация параметров процесса выполняется на АЦПУ типа DZM-180.

Рост пленок. Выявление режимов роста эпитаксиальных слоев, создание управляющих процессом программ базируются на расчетных и экспериментальных результатах. Проведенные исследования показывают, что после предварительной подготовки исходных веществ и подложек и загрузки их в ростовую камеру процесс выращивания эпитаксиальных слоев и структур соединений $A_{III}B_V$ методом МЭ может быть сведен к некоторым алгоритмам.

Перечислим основные положения, реализуемые в первом варианте автоматизированной системы:

- а) отжиг в вакууме подложек по заданному во времени температурному режиму,
- б) вывод на режим необходимых для данной композиции выращиваемой структуры источников МП,
- в) определение и задание карты времени и температурных режимов источников МП и подложки во время роста,
- г) задание соотношений интенсивностей МП,
- д) задание времени переключения заслонок и режимов для предустановки отработавших источников к очередному моменту включения.

е) задание необходимых для вывода и частоты вывода параметров процесса для документирования.

Нами были установлены режимы роста и экспериментально подтверждена их справедливость для некоторых соединений $A_{III}B_V$. В таблице приведен перечень выращенных эпитаксиальных слоев. В качестве подложек использованы подложки из арсенида и фосфида галлия различной проводимости и ориентации, в том числе GaAs типа АГЧ, АГЧТ, АГЧО, АГП, АГЧЦ и GaP типа ФГЧТ, ФГЧ ориентаций (100), (111).

Рост осуществлялся из отдельных для каждой компоненты выращиваемого состава источников МП при различных температурных режимах в зависимости от состава и скорости роста. Скорость роста изменялась в пределах 0,01—0,15 нм/с. Для слоев *n*-типа в качестве лигатуры использовался германий, для слоев *p*-типа — бериллий. Попытки вырастить *p*-GaAs, легированный Ge, успеха не принесли; результаты по росту полупроводящих слоев также пока отрицательные.

Толщины выращенных слоев изменялись в зависимости от продолжительности и скорости роста в пределах 0,1—1,5 мкм.

Выращенные слои имели совершенную кристаллическую и морфологическую структуру. На рис. 7 приведена электронограмма эпитаксиального GaAs, полученная дифракцией быстрых электронов на отражение. Рис. 8 — реплика с пленки GaAs, полученная на электронном микроскопе. Кристаллографическое и морфологическое совершенство гетероэпитаксиальных слоев с достаточно большим рассогласованием в параметре решетки, например GaAs и GaP, GaAs и InP, по-видимому, следует объяснять низкими температурами роста.

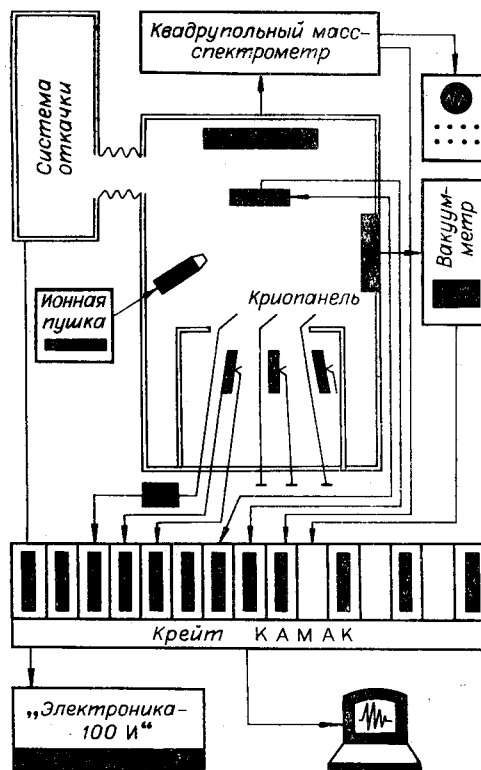


Рис. 5.

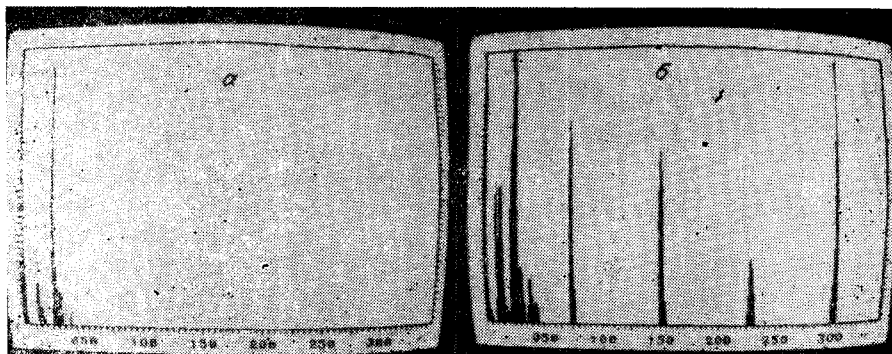


Рис. 6.

Тип подложки	Эпитаксиальный слой						
	Арсенид галлия				Фосфид галлия	Фосфид индия	Твердые растворы в системе фосфид галлия-фосфид индия
	n-тип	p-тип	Нелегированный	Полуизолирующий			
Арсенид галлия	+ [8]	+ [8]	+ [9]	-	+	+	+
Фосфид галлия	+	+	+	-	+	+	+

Примечание. + — получены совершенные эпитаксиальные слои; -- — не удалось вырастить.

Заключение. Изложенные в настоящей работе направление и характер проводимых исследований являются одним из вариантов построения автоматизированной технологической системы. Предварительные результаты показывают, что уже в том объеме, который был заложен в первую очередь описанной выше системы, могут быть получены практические положительные результаты. Необходимость в использовании системы автоматизации, носившая характер дорогостоящих удобств при росте бинарных соединений типа GaAs, с переходом к синтезу твердых раст-

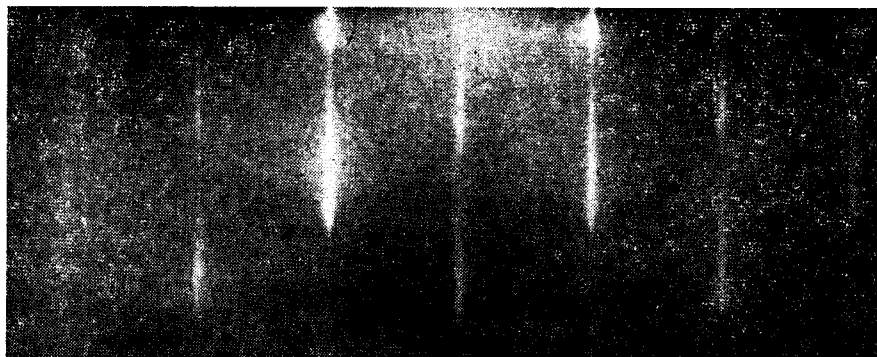


Рис. 7.

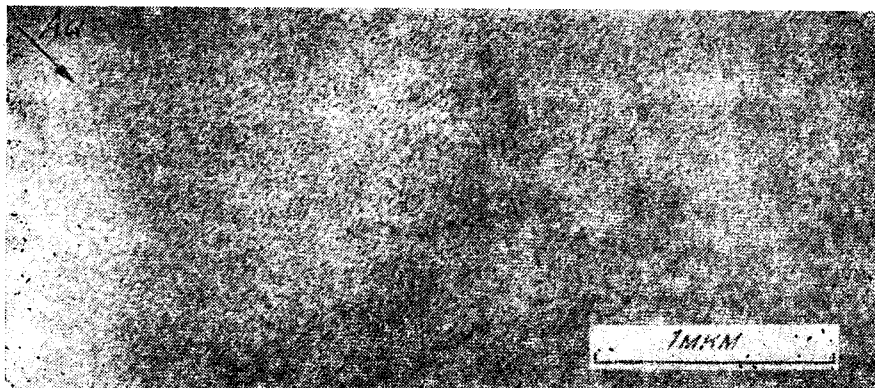


Рис. 8.

воров и многослойных структур становится очевидной. Для примера достаточно упомянуть вопрос о получении с высокой точностью состава твердых растворов типа $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ или многослойных гетероструктур субмикронных толщин $\sim 0,1$ мкм и меньше.

Использование в качестве базы для систем автоматизации аппаратуры, выполненной в стандарте и идеологии КАМАК, как показала практика, облегчает поставленную задачу — создание автоматизированной системы молекулярно-лучевой эпитаксии. Разработанный на сегодня набор программ и средств КАМАК обеспечивает сопряжение технологического эксперимента с автоматизированной системой контроля и управления. Возникающая в ходе работы потребность в дополнительных средствах сопряжения легко реализуется в рамках идеологии и стандарта КАМАК.

Исследования свойств синтезированных структур показывают, что созданная технологическая система, режимы роста и легирования обеспечивают воспроизводимое получение эпитаксиальных слоев GaAs, GaP и твердых растворов GaP—InP заданных составов и хороших электрофизических свойств.

В заключение авторы выражают благодарность Ю. Н. Золотухину, А. Н. Касперовичу, С. В. Бредихину, П. М. Песляку, В. И. Прокопенко, В. Н. Вьюхину — разработчикам системы управления на базе КАМАК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cho A. Y., Hayashi I. *P-n-Junction Formation During Molecular-Beam Epitaxy of Ge-Doped GaAs.*— J. Appl. Phys., 1971, vol. 2, N 11.
2. Cho A. Y., Arthur J. R. *Molecular Beam Epitaxy.*— Progress in Solid State Chem., 1975, vol. 10, p. 3, p. 157—191.
3. Miller B. I., McFee J., Martin R., Tien P. K. *Room-Temperature Operation of Lattice-Matched InP, Ga_{0,47}In_{0,53}As/InP Double-Heterostructure Laser Grown by Molecular Beam Epitaxy.*— Appl. Phys. Lett., 1978, vol. 33, N 1.
4. Ezaki L. E. *Computer-Controlled Molecular Beam Epitaxy.*— In: Proc. 6th Intern. Vacuum Congr., 1974.
5. Система производства и анализа эпитаксиальных пленок MBE-500.— Проспект фирмы «Рибер» (Франция), 1977.
6. Система производства и анализа эпитаксиальных пленок MBE-1000.— Проспект фирмы «Рибер» (Франция), 1979.
7. Что такое КАМАК? — Оперативный информационный материал. Новосибирск: изд. ИАВЭ СО АН СССР, 1978.
8. Алферов Ж. И. и др. *Получение пленок арсенида галлия методом молекулярной эпитаксии.*— В кн.: Труды II Всесоюз. конф. «Физические процессы в полупроводниковых гетероструктурах». Т. II. Ашхабад, 1978, с. 124—125.
9. Бударных В. И., Иванченко В. А., Логвинский Л. М., Рябченко В. Э. *Нелегированные пленки арсенида галлия, выращенные методом молекулярной эпитаксии.*— Письма в ЖТФ, 1979, вып. 5, № 1.

Поступила в редакцию 15 июня 1980 г.

УДК 621.315.592

Н. А. БЕРТ, А. Т. ГОРЕЛЕНКО, А. Г. ДЗИГАСОВ, С. Г. КОННИКОВ,
Т. Б. ПОПОВА, И. С. ТАРАСОВ, В. К. ТИБИЛОВ

(Ленинград)

ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ InGaAsP , ИЗОПЕРИОДИЧЕСКИЕ С InP

Известно, что для получения идеальных гетероструктур необходимо полное совпадение параметров решетки и коэффициентов термического расширения контактирующих материалов. Это условие в первом прибли-