

программирования, рассчитанные на основе соотношений, предложенных М. Х. Холстедом для двух алгоритмов [6]. В таблице $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ — уровни языков прикладных программ, реализующих алгоритмы соответственно на Ассемблере с БПС, на Фортране с БПС, на Ассемблере с применением пакета подпрограмм для МПИ и на Ассемблере без применения дополнительных программных средств.

Заключение. В соответствии с полученными результатами использование БПС для САЭ на основе приборного интерфейса снижает уровень трудоемкости программирования, а следовательно, уменьшает время создания САЭ. Применение БПС позволяет пользователю не вникать в особенности сопряжения ЭВМ с САЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Interface System for Programmable Measuring Apparatus Byte — Serial Bit-Parallel IEC // Technical Committee 60.— Geneva, 1975.— N 22.
2. Бочарова Р. В., Вуколиков В. М., Лопатин В. И. и др. Опыт совместного использования аппаратуры в стандарте КАМАК и МЭК 625.1: Технические средства и особенности разработки программного обеспечения // Новости ИАИ.— 1986.— № 2.
3. Горсликов Н. И., Домарацкий А. Н., Домарацкий С. Н. и др. Логические соотношения в интерфейсных функциях прибора-приемника по стандарту МЭК // ИТЭ.— 1979.— № 1.
4. Горсликов Н. И., Домарацкий А. Н., Домарацкий С. Н. и др. Интерфейс для программируемых приборов в системах автоматизации эксперимента.— М.: Наука, 1981.
5. Бухаров М. Н. Применение концепции базовых программных средств для программирования систем реального времени на основе аппаратуры КАМАК // Тр. Международ. семинара по проблеме реализации комплексной программы научно-технического прогресса стран — членов СЭВ до 2000 года.— Кишинев: ЦАНИ И АН МССР, 1987.
6. Холстед М. Х. Начала науки о программах.— М.: Финансы и статистика, 1981.

Поступила в редакцию 24 мая 1988 г.

УДК 621.315.592.593.231

**С. В. ИВАНОВ, П. С. КОПЬЕВ, Б. Я. МЕЛЬЦЕР, А. Н. РАЕВ,
А. П. СОЛониЦЫНА, С. В. ШАПОШНИКОВ**

(Ленинград)

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ

В настоящее время молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ) является одним из наиболее перспективных технологических методов создания совершенных приборных гетероструктур для целей полупроводниковой микро- и оптоэлектроники и СВЧ-техники [1]. Однако исключительные возможности создания сложных приборных структур, предоставляемые методом МПЭ, как то: контроль и управление толщиной выращиваемой монокристаллической пленки с точностью до одного моноподаточного слоя, резкое (на протяжении 1-2 монослоев) и (или) плавное изменение ее состава и уровня легирования в широких пределах — не могут быть полностью реализованы без привлечения средств автоматизации. С одной стороны, средства автоматизации позволяют осуществлять одновременный контроль большого количества технологических параметров в соответствии с заданной программой непосредственно в процессе роста. С другой стороны, автоматизированная система с развитым программным обеспечением может помочь в выборе оптимальных техноло-

© 1990 Иванов С. В., Копьев П. С., Мельцер Б. Я., Раев А. Н., Солоницына А. П., Шапошников С. В.

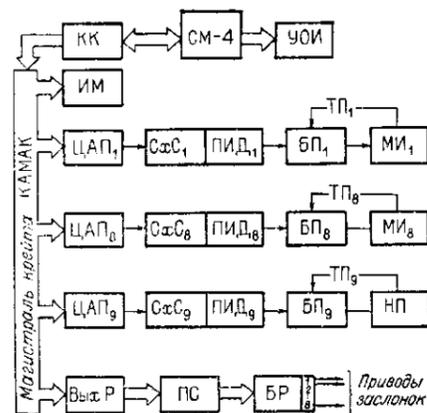


Рис. 1. Схематическое изображение аппаратных средств автоматизированной системы.

Модули КАМАК: КК — контроллер магистрали; ИМ — индикатор магистрали; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь; ВыхР — выходной регистр; СхС — схема согласования программируемого задатчика температуры; ПИД — ПИД-регулятор; БП — блок питания нагревателя молекулярного источника (МИ); МИ — нагреватель подложки; ТП — термомпарная обратная связь; ПС — преобразователь сигнала; БР — блок реле

гических режимов на основе создания непрерывно развивающейся от эксперимента к эксперименту базы данных и вводимых в нее физических моделей процесса роста. Требования воспроизводимости параметров многослойных структур от процесса к процессу также трудновыполнимо в отсутствие автоматизированной системы управления технологическим процессом.

Специфические технические особенности установок МПЭ: возможность независимого управления температурой источников молекулярных пучков и подложки, наличие индивидуальных заслонок, способных перекрывать любой молекулярный пучок за времена меньше времени роста одного монослоя, — позволяют создать чрезвычайно простую по структуре и надежную систему автоматизации.

Аппаратные средства автоматизированной системы. В данной работе описана автоматизированная система управления технологическим процессом МПЭ на основе контроля и управления температурой подложки и источников молекулярных пучков и положением индивидуальных заслонок источников. Схематическое изображение аппаратных средств представлено на рис. 1. Аппаратная часть описываемой системы реализована на базе мини-ЭВМ CM-4 и магистрально-модульной системы КАМАК.

При разработке системы управления температурой рассматривалось два варианта. Первый заключался в передаче сигнала обратной связи с термопары непосредственно через аналого-цифровой преобразователь в ЭВМ и управлении блоком питания нагревателя молекулярного источника через цифроаналоговый преобразователь с помощью программного температурного контроллера. Вторым способом основывался на замене ручного задатчика температуры прецизионного ПИД-регулятора (точность поддержания температуры $\sim 0,2^\circ\text{C}$) программируемым задатчиком, управляемым ЭВМ при сохранении термопарной обратной связи, замыкающейся в аналоговой части аппаратных средств. Вторым вариантом выбран в качестве основного на сегодняшний день, поскольку при сопоставимой точности поддержания температуры он обеспечивает чрезвычайно простой переход с ручного режима управления на автоматический и обратно, что значительно повышает надежность и безаварийность эксплуатации технологической установки.

Программируемый задатчик температуры (см. рис. 1) включает в себя высокостабилизированный 10-битовый цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) (погрешность выходного напряжения $\sim 0,05\% U_{\text{max}}$) и схему согласования выходного сигнала ЦАП со входом схемы регулирования температуры ПИД-регулятора. Схема согласования обеспечивает также настройку каждого программируемого задатчика на любой выбранный рабочий диапазон температур, внутри которого осуществляется автоматическое управление. Использование такого подхода позволило существ-

можно повысить точность установки температуры за счет уменьшения шага ее изменения до $0,5^\circ\text{C}$, что особенно важно для технологических материалов с высоким давлением паров (например, таких, как As).

Автоматическое управление температурой физического объекта предусматривает как точное поддержание температуры на заданном значении, так и прецизионное регулирование температуры по любому наперед заданному закону. Предельные скорости изменения температуры определяются только инерционностью физических объектов, в нашем случае молекулярных источников и держателя подложки. Из анализа переходных температурных характеристик источников, держателя подложки, полученных в ходе экспериментальной апробации автоматизированной системы, были определены максимальные скорости изменения их температуры (v_{max}), при которых отставание реального значения температуры от автоматически задаваемого не превышало $1,0^\circ\text{C}$. В зависимости от инерционности объектов управления эти максимальные скорости лежали в пределах $15\text{--}25^\circ\text{C}/\text{мин}$, что при характерных для МПЭ скоростях роста $0,6\text{--}1\text{ мкм}/\text{ч}$ позволяет использовать описываемую автоматизированную систему для создания практически всего спектра известных в настоящее время приборных структур микро- и оптоэлектроники. При использовании в процессе эпитаксиального роста скоростей изменения температуры $\leq v_{\text{max}}$ отпадает необходимость обратной связи термодатчика — ЭВМ.

Управление положением заслонок молекулярных источников осуществляется путем установления на выходном регистре слова состояния заслонок, в котором каждой заслонке соответствует один бит информации, и передачи преобразованного выходного сигнала в блок реле, осуществляющий непосредственное управление пневматическим приводом каждой заслонки.

В процессе разработки системы автоматизации также исследовалась возможность управления процессом эпитаксиального роста путем контроля интенсивностей молекулярных потоков базовых элементов (Al, Ga, As) квадрупольным масс-спектрометром (МС). Этот способ является наиболее прямым, поскольку позволяет контролировать ситуацию непосредственно вблизи поверхности растущей пленки [2, 3]. В частности, была разработана и создана автоматизированная система регистрации масс-спектров, включающая в себя 16-битовый цифроаналоговый преобразователь в качестве генератора развертки масс-спектрометра, усилители выходного сигнала с автоматическим подбором коэффициентов усиления и 12-битовый аналого-цифровой преобразователь выходного сигнала. Однако в процессе эксплуатации квадрупольного масс-спектрометра выяснились чисто физические проблемы, связанные: а) со сложностью выбора эталонного пика с неизменной в течение всего процесса эпитаксиального роста интенсивностью и б) с изменением соотношения пиков элементов III и V групп, регистрируемых масс-спектрометром из-за взаимного влияния потоков этих элементов в его ионизационной камере. Эти проблемы, наряду с принципиальными недостатками МС-систем обратной связи, такими, как невозможность управления температурами подложки, закрытых источников базовых элементов и вследствие слабой интенсивности потоков источников легирующих примесей, побудили нас отказаться от введения МС в цепь обратной связи и использовать его лишь как контрольное средство.

Следует также упомянуть очень перспективный электронно-лучевой метод автоматического контроля интенсивности и однородности молекулярных пучков, описанный в [4], а также систему автоматизации на основе регистрирующего дифрактометра быстрых электронов [5]. Однако эти методы так же, как и МС-метод, не являются универсальными.

Программное обеспечение. При создании системы программного обеспечения авторы стремились к тому, чтобы она в максимальной степени удовлетворяла требованиям адаптивности и эргономности. Под адаптивностью подразумевается настраиваемость системы на различные

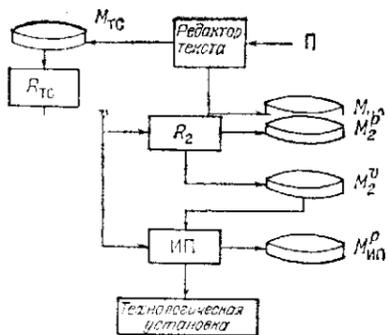


Рис. 2. Схема программного обеспечения на верхнем уровне.

Программные модули: $R_{ТС}$ — «Трансляция описания технической системы»; R_1, R_2 — предварительное моделирование, соответственно «Транслятор» программа роста; M_1^p, M_2^p и $M_{ИП}^p$ — протоколы работы соответственно «Транслятора», «Компоновщика» и исполнительной программы; Π — пользователь

целевые объекты, на изменения в конструкции технической системы и технологии процесса. Под эргономностью в данном случае понимаем наличие удобного

способа представления входной и выходной информации, достаточно подробных и в то же время легко обозримых сообщений о ходе процесса, позволяющих оператору адекватно реагировать на события, а также полной автоматизации расчетов. Выполнение указанных требований, помимо учета человеческого фактора, обеспечивает резкое повышение надежности системы и производительности труда.

Схема программного обеспечения на верхнем уровне представлена на рис. 2. Система состоит из четырех независимых частей, общающихся между собой посредством файлов-интерфейсов. Одна из частей — «Трансляция описания технической системы» (перевод во внутрисистемное представление текста «Описание технической системы») — стоит несколько особняком, остальные делятся на программы предварительного моделирования и исполнительную программу, непосредственно управляющую ростом структуры в режиме реального времени. Предварительное моделирование проводится в два этапа. На первом («Трансляция») входной текст переводится во внутрисистемное представление информации и с использованием файла «Описание технической системы» формируется точная модель технологических действий, которая помещается в строго форматированный текст-интерфейс между «Транслятором» и следующей частью — «Компоновщиком». «Компоновщик» переводит описание режимов роста с языка технологических действий на язык управляющих кодов. В результате получается программа технологического процесса. Любой из файлов-интерфейсов может также служить руководством для ручного управления технологическим процессом.

Любые дополнения системы, которые, возможно, потребуются в будущем, связанные с изменением представления о процессах роста и ее аппаратной части, легко вносятся в систему программного обеспечения без изменения ее структуры.

В известных авторам системах [6, 7] входными данными служит составленная вручную программа технологического процесса, сформулированная в виде абсолютных значений параметров процесса роста каждого слоя в отдельности. Характерной особенностью предлагаемого нами подхода является то, что в качестве входных данных выступает описание требуемого конечного результата эпитаксиальной структуры в терминах: базовый и примесный состав слоев, их толщины, атомная плотность, постоянная решетки, ориентация кристалла, а также, по обстоятельствам, такие условия роста, которые выгоднее определять вручную из эмпирических соображений, например температура подложки, скорость роста, пересыщение. Образец делится на слои по следующему принципу: а) на протяжении одного слоя состав его остается неизмен-

ным в смысле наличия или отсутствия химических элементов; б) концентрация каждого элемента изменяется в указанных пределах по заданному закону (константа рассматривается как частный случай закона изменения).

Как указано выше, входное описание требуемого результата транслируется на язык управляющих команд с привлечением:

- а) знаний о физических законах эпитаксиального роста;
- б) знаний о конструкции и составе технической системы, законах ее функционирования и откликах на управляющие воздействия;
- в) систематизированных и обобщенных знаний специалистов-технологов о способах обеспечения требуемых физических процессов (благодаря чему и в случаях, когда требуемая скорость реакции оператора превышает возможности человеческого организма, и в различных стрессовых ситуациях принимаются правильные решения (с точностью до правильности заложенных моделей), обеспечивающие надежность и повторяемость результатов).

Накопленный опыт позволил сделать заключение о полной непригодности в данном классе задач такого традиционного способа ввода информации, как пассивный диалог. Здесь используются слабо формализованные символьные тексты, составляемые на специально разработанном языке SDATA [8, 9], близком к профессиональному языку технологов. Тексты посредством экранного редактора помещаются в дисковые файлы, откуда считываются системой. При этом наблюдается существенный выигрыш в эргономности по сравнению с пассивным диалогом, а именно:

- а) оператор избавлен от необходимости монотонно отвечать на множество лишних вопросов, что быстро притупляет внимание и неизбежно приводит к ошибкам, особенно при больших объемах информации, характерных для МПЭ;
- б) существенно упрощается процесс обнаружения и исправления ошибок, как синтаксических, так и смысловых;
- в) если описания слоев одной структуры или даже полные описания разных структур отличаются друг от друга значениями небольшого количества параметров, а такие случаи весьма часты, легко образовать новый текст копированием ранее составленного с последующей коррекцией;
- г) автоматически образуется библиотека заданий, допускающая создание информационно-поисковой системы.

Язык SDATA, построенный для МПЭ, позволяет вводить в систему перечисленные выше параметры слоев. В тексте указываются также имена законов, по которым должны изменяться параметры. Сами зависимости в удобном для использования виде хранятся в специальных файлах. Допускается возможность либо явно указывать значения температур молекулярных источников и плотности молекулярных потоков, либо вычислять их автоматически.

Эргономность системы повышается также благодаря наличию аппарата, позволяющего описывать периодические структуры простой ссылкой на однократно описанную группу. Широко используется способ присвоения значений по умолчанию, при этом значение выбирается или из описания предыдущего слоя, или из общих соображений, верных для всего класса задач, или исходя из данной модификации технической системы.

В приложении содержится пример текста, соответствующего выраженной светоизлучающей двойной гетероструктуре, изображенной на рис. 3.

Описание технической системы формируется аналогично описаниям целевых объектов в виде текста на языке SDATA. В отличие от описаний требуемых результатов отдельных процессов в текст «Описание технической системы» собраны фактические знания, редко меняющиеся от процесса к процессу. В качестве примера можно назвать число задействованных молекулярных источников, названия химических элементов,

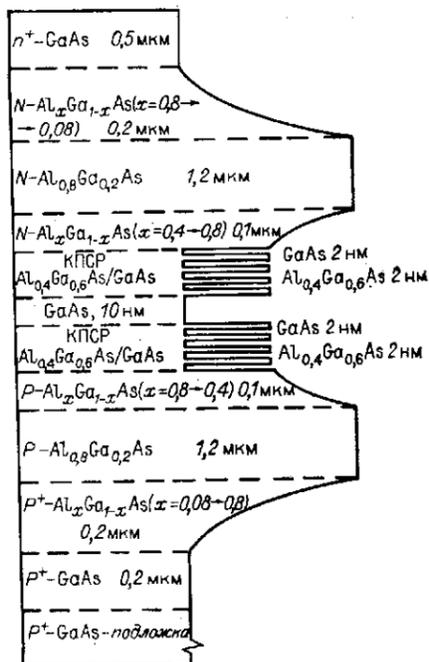


Рис. 3. Схематическое изображение зонной диаграммы излучательной двойной гетероструктуры с квантовой ямой, выращенной с использованием описываемой автоматизированной системы:
КПСР — короткопериодная сверхрешетка

в них содержащихся; характеристики законов функционирования технической системы, такие, как допустимые пределы изменения температур каждого источника, допустимая погрешность температуры; описания откликов на управляющие воздействия; значения параметров описания системы связи технологической установки с ЭВМ.

В «Описании технической системы» содержатся также описания стартовых и финальных режимов, автоматически настраиваемые на конкретные эпитаксиальные структуры.

Суть предлагаемого подхода состоит в том, что, несмотря на естественно существующую необходимость разделять выращиваемую структуру на слои, в процессе трансляции входных описаний

во внутрисистемное представление и компоновки программы процесса роста вся структура рассматривается как целое в единстве с технической системой, физическими законами процесса роста и технологическими приемами. Благодаря этому моделируемая структура проходит многократный разносторонний контроль на допустимость значений параметров, реализуемость технологических ситуаций, при автоматическом или полуавтоматическом разрешении конфликтов (например, при отсутствии сшивании температур источника на границе между слоями автоматически вводится добавочный псевдослой, в течении которого разрыв устраняется). При неразрывном единстве всех подобластей базы знаний каждая из них тем не менее сохраняет свою автономность, что делает достаточно простым процесс коррекции и (или) дополнения их содержимого. Такой подход сохраняется на всех уровнях системы, вплоть до отдельных операций по поддержанию рассчитанных режимов непосредственно в процессе роста, благодаря чему имеется возможность легко обучать систему таким приемам, как автоматический аварийный вывод технологической установки из рабочего режима или, по требованию оператора, остановка роста на неопределенное время с целью устранения неполадок, а также настраивать систему без изменения структуры программ на совершенно другой технологический процесс, например газофазную эпитаксию.

ПРИЛОЖЕНИЕ

NAME-EXP M4205.
DATE 26-APR-88
OPERATOR ИВАНОВ
COMMENT ДГС КЯ
LAYER 1
CONS GA
CONS AS
DOPING BE P 5.E + 18
WIDTH 2000. ANGS
VGROWTH 90.
OVERFLOW 2.

T SU 630.
T GA 380.
T AS 133.
T BE 320.
DENSITY 0.447E + 23
LAYER 2
CONS GA 0.9 0.2
CONS AL 0.1 0.8
CONS AS
DOPING BE P 5.E + 18 1.E + 18
WIDTH 2000. ANGS

```

VGROWTH 127.
T GA 380. 360. LINE45
T AL 335. 371. LINE45
T BE 320. 310. COSIN
LAYER 3
CONS GA 0.2
CONS AL 0.8
CONS AS
DOPING BE P 1.E + 18
WIDTH 1.2 MKM
VGROWTH 160.
LAYER 4
CONS GA 0.2 0.6
CONS AL 0.8 0.4
CONS AS
DOPING BE P 1.E + 18 1.E + 17
WIDTH 1000. ANGS
VGROWTH 145.
T GA 360. 380. LINE45
T AL 371. 363. LINE45
T BE 310. 290. COSIN
LAYER 5
CONS GA
CONS AS
WIDTH 20. ANG
VGROWTH 65.
LAYER 6
CONS GA 0.6
CONS AL 0.4
CONS AS
WIDTH 20. ANGS
VGROWTH 135.
LAYER 7 54
REPEAT 5 6 24
LAYER 55
CONS GA
CONS AS
WIDTH 100. ANG
VGROWTH 65.
LAYER 56
CONS GA 0.6
CONS AL 0.4
CONS AS
WIDTH 20. ANGS
VGROWTH 135.
LAYER 57
CONS GA
CONS AS
WIDTH 20. ANG
VGROWTH 65.
LAYER 58 105
REPEAT 56 57 24
LAYER 106
CONS GA 0.6 0.2
CONS AL 0.4 0.8
CONS AS
DOPING SI N 1.E + 17 7.E + 17
WIDTH 1000. ANGS
VGROWTH 145.
T GA 380. 360. LINE45
T AL 363. 371. LINE45
T SI 965. 978 COSIN
LAYER 107
CONS GA 0.2
CONS AL 0.8
CONS AS
DOPING SI N 7.E + 17
WIDTH 1.2 MKM
VGROWTH 160.
LAYER 108
CONS GA 0.2 0.9
CONS AL 0.8 0.1
CONS AS
DOPING SI P 5.E + 17 2.E + 18
WIDTH 0.2 MKM
VGROWTH 127.
T GA 360. 380. LINE45
T AL 371. 335. LINE45
T SI 978. 983. COSIN
LAYER 109
CONS GA
CONS AS
DOPING SI N 2.E + 18
WIDTH 5000. ANGS
VGROWTH 90.
FIN

```

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Board K. New unorthodox semiconductor devices // *Rep. Prog. Phys.*— 1985.— 48.— P. 1595.
2. Esaki L., Cheng L. L. Semiconductor superfine structures grown by computer controlled MBE // *Thin Solid Films.*— 1976.— 36.— P. 285.
3. Минчев Г. М., Прамагарова Л. Д. Болгарский проект установки молекулярно-пучковой эпитаксии // *Proc. of Intern. Symp. «Molecular Beam Epitaxy».*— DDR, Frankfurt/Oder, 1987.
4. Балаюк В. В., Краснов В. Ф., Рябченко В. Э., Тарасова И. В. Растровая диагностика атомарных потоков в установках молекулярно-лучевой эпитаксии // Новосибирск, 1983.— (Препр./ИАиЭ СО АН СССР; 204).
5. Herman M. A. Ultrahigh vacuum atomic layer epitaxy versus interrupted-molecular

- beam epitaxy: a comparison based on the surface kinetic processes // Proc. of Intern. Symp. «Molecular Beam Epitaxy».—DDR, Frankfurt/Oder, 1987.
6. Бударных В. И., Логвинский Л. М., Нестерихин Ю. Е. и др. Разработка технологического варианта автоматизированной системы молекулярно-лучевой эпитаксии // Автометрия.— 1980.— № 6.
 7. Мезин Н. Н. Система автоматизации модуля роста пленок установки молекулярно-пучковой эпитаксии // Научное приборостроение. Приборы и средства автоматизации.— Л.: Наука, 1987.
 8. Солоницына А. П. Целенаправленный подход к автоматизации технологического эксперимента // Тез. VIII Всесоюз. симп. «Эффективность и качество и надежность систем «человек — техника».— Тбилиси, 1987.
 9. Солоницына А. П. Интеллектуальный интерфейс и моделирование эксперимента по изготовлению гетероструктур // Алгоритмы и математическое обеспечение для физических задач.— Л.: ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР, 1987.

Поступила в редакцию 1 августа 1988 г.
