

УДК.621.359.7.

ПУТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПОСТРОЕНИЯ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ

А.И. Трубецкой

§ I. Введение

Развитие вычислительной техники в значительной степени сдерживается отсутствием технологических средств, с помощью которых можно было бы производить большее число элементов электронно-вычислительных машин с достаточно высокой плотностью упаковки и в масштабах, исчисляемых миллиардами штук. До последнего времени основным средством увеличения производительности ЭВМ было повышение рабочей частоты элементов. Это позволило достичь нескольких миллионов операций в секунду. Дальнейшее повышение производительности на этой основе наталкивается на все возрастающие трудности. При увеличении частоты приходится считаться с запаздыванием сигналов, т.е. растут требования к миниатюризации элементов. В то же время повышение производительности требует увеличения числа элементов, что еще больше усугубляет требования к размерам элементов. Кроме того, с увеличением числа элементов возрастает требования к их надежности, а миниатюризация практически делает невозможным их ремонт или замену.

Повышение производительности может быть достигнуто путем построения специализированных машин. Однако это, в свою очередь, увеличивает требования к скорости изготовления элементов.

Все это предъявляет к технологии изготовления элементов такие требования, на выполнение которых в ближайшем будущем трудно надеяться.

Для создания таких технологических средств требуется разработка новых принципов, которые можно было бы использовать в

производстве логических элементов, а также необходимо существенно пересмотреть логическую структуру самой вычислительной машины, которая в значительной степени упростила бы технологию по производству логических элементов. С целью удовлетворения этих требований, а именно: высокого быстродействия, простоты изготовления и возможности реализации любой структуры ЭВМ - в 1962 году в ИМ СО АН СССР был предложен один из путей реализации такой ЭВМ [1], названной вычислительной средой.

Вычислительная среда (ВС) при параллельном выполнении операций может обладать производительностью, равной  $10^9 - 10^{10}$  операций/сек при условии, что суммарное количество элементов в ВС будет составлять  $10^{10} - 10^{12}$  [1].

Работы, проводимые в ИМ СО АН под руководством Э.В. Евреинова, показали, что технологию изготовления ВС можно значительно упростить, принимая во внимание следующее:

1. Если ВС состоит из однородных элементов, то технология сводится к многократному воспроизведению одного и того же элемента и одних и тех же связей.

2. Если ВС допускает сравнительно высокий процент брака в процессе производства элементов, то бракованные элементы можно изолировать настройкой самой среды.

3. При снижении частоты рабочих элементов высокую производительность ВС можно поддерживать благодаря параллельной работе элементов среды.

4. ВС может реализовать любой тип ЭВМ, перенастраивая элементы с помощью специальных программ, таким образом, время затраченное на изготовление ВС порядка 3-5 лет, может быть оправдано, так как изготовленную часть машины можно использовать для решения специализированных задач.

Учитывая вышеперечисленное, можно создать технологию изготовления ВС за сравнительно короткий промежуток времени. Такой технологический процесс может быть реализован на базе достижений в микроэлектронике, которая позволяет значительно снизить габариты и вес машины, создать компактные функциональные блоки с минимальным количеством межэлементных связей, увеличить надежность и максимально автоматизировать процесс изготовления.

При создании среды объемом  $10^{10} - 10^{12}$  элементов к технологии предъявляется ряд требований:

1. Скорость изготовления элемента среды должна быть порядка  $3 \cdot 10^{-3}$  сек при изготовлении  $10^{10}$  элементов в течение 5 лет.

2. Процесс изготовления необходимо максимально автоматизировать, используя управляющие электронно-вычислительные машины.

3. Стоимость производства элемента и затраты на него материалов должны быть минимальны и не превышать 0,01 копейки, в противном случае затраты на изготовление такой среды могут оказаться экономически не выгодными.

4. Для повышения процента выхода годных элементов необходимо осуществлять непрерывный контроль элементов бесконтактным методом.

Технологическая проблема по созданию ВС, на наш взгляд, может быть разбита на несколько этапов:

1. Создание отдельных макетов ВС объемом  $10^5$  элементов.

2. Отработка всех необходимых технологических процессов и логической структуры на макете.

3. Нарастивание скорости производства элементов в количестве  $10^{10} - 10^{12}$  элементов в течение 3-5 лет.

Из всего вышеперечисленного вытекает необходимость тщательного выбора технологического метода, датчиков контроля и путей автоматизации. На протяжении ряда лет в ИМ СО АН СССР исследовались и апробировались наиболее перспективные технологии по производству элементов ВС, а также рассматривались варианты проектов, наиболее полно удовлетворяющих требованиям по созданию макетов ВС.

Один из вариантов рассмотрен в данной статье, в последующих статьях публикуется часть работ, выполненных лабораторией ИМ СО АН по данной теме.

## § 2. Оценка технологии изготовления элементов ВС

Разработка новых систем, содержащих большое количество элементов, вызвала необходимость исследовать все возможные средства решения так называемой проблемы возрастающих количеств. В настоящее время по этому вопросу в электронике намечалось несколько направлений.

1. Метод интегральных схем, который заключается в изготовлении на единой подложке системы соответствующим образом соединенных элементов, которая выполняет функцию определенной схемы.

Особенно многообещающими являются разработки в области полупроводниковых интегральных схем, подавляющее большинство ко-

торых изготавливают на основе кремния, используя сочетания различных технологических методов, включая осаждение и диффузию. Интегральные схемы резко снижают количество самостоятельных соединений и, поскольку системы элементов образуют единое целое, уменьшают количество физически разделяемых частей. Однако использование интегральной технологии для производства элементов ВС сопряжено с рядом трудностей, а именно:

1) диффузия длится в течение нескольких часов при температуре 1000 - 1300°C;

2) технологический процесс состоит из большого количества разнотипных операций, что порождает большие трудности его автоматизации;

3) все компоненты интегральных схем имеют большой процент паразитных связей, обусловленных компоновкой схем и несовершенством изоляции.

Таким образом, рассмотренные выше требования к скорости изготовления элементов ВС методом интегральных схем пока не реализуются.

2. Метод тонкопленочных схем состоит в формировании элементов из паров металлов или диэлектрика непосредственно в процессе их осаждения на стеклянной или керамической подложке. Однако пленочная технология, успешно создающая пассивные элементы, пока не в состоянии решить вопрос о создании активных элементов; работы в этой области находятся в стадии лабораторных исследований.

Предприняты (и довольно успешно) попытки создать комбинированную технологию изготовления схем из полупроводниковых приборов, выполненных на материале подложки, и пленочных элементов (изоляций, соединений, конденсаторов, сопротивлений и т.д.). Благодаря этому частично преодолен ряд возникших трудностей: уже начинает эффективно использоваться метод интегральных модулей на уровне крупных функциональных блоков, так как достигнутые успехи позволяют реализовать схему из 100-120 логических элементов в форме одного функционального модуля. Хотя эти две технологии изготовления полупроводниковых и тонкопленочных интегральных схем до сих пор считались независимыми, даже конкурирующими, тем не менее уже теперь признается, что будущее останется за синтезом таких двух способов.

Рассматриваемый метод из-за большого количества сменных масок, различных манипуляторов, загрязнения пленок различными примесями, поступающими из испарителей, отсутствия надежных ме-

тодов контроля и автоматизации технологического процесса еще довольно громоздок и требует больших затрат времени на подготовительные операции. Все эти факторы являются серьезным препятствием при создании технологии массового производства функциональных модулей.

В последние годы все больше внимания технологи уделяют электронным и ионным потокам [2], с помощью которых можно преодолеть трудности, которые сдерживают прогресс в интегральной электронике. Ценность электронно-лучевого метода состоит в возможности полностью изготавливать функциональные модули в едином технологическом процессе без применения масок и механических устройств. Особенно привлекательным в этом направлении работ является попытка использовать электронные и ионные потоки для иницирования на поверхности подложек, в зоне активации химических реакций, чтобы создать необходимый материал на подложке. Этот метод, по-видимому, позволил бы решить практически все задачи по созданию вычислительных сред, начиная от производства больших количеств элементов и кончая бесконтактными методами контроля готовых блоков среды. Кроме этого, электронно-лучевой метод обеспечивает:

- 1) создание пленок из тугоплавких металлов;
- 2) создание диэлектрических пленок путем высокочастотной ионной бомбардировки;
- 3) прецизионное вторичное плавление и рекристаллизацию;
- 4) окисление заданных участков схем, диффузию, сплавление и специальное формирование поверхности подложки (особенно эти преимущества сказываются при изготовлении активных и пассивных элементов в твердых телах);
- 5) простоту контроля и регулирования технологического процесса;
- 6) возможность автоматизации с единым замкнутым циклом и управлением с помощью вычислительной машины;
- 7) высокий уровень надежности технологического процесса;
- 8) гибкость с точки зрения выбора конструктивных решений.

Принятые в настоящее время в производстве определенного класса микросхем методы, основанные на применении гибридной технологии, надежнее и дешевле, чем электронно-лучевые методы, однако точность и производительность, достигнутая с помощью гибридной технологии почти исчерпана; кроме того, она порождает проблему разработки специальных методов соединения элементов, которая практически сводит к нулю все преимущества рас-

смаатриваемого способа и требует неоправданно больших затрат времени на создание действующего макета ВС. Электронно-лучевая технология в значительной мере лишена этих недостатков, и с ее помощью можно создать единый замкнутый технологический цикл. В этом смысле электронно-лучевая технология только начинает раскрывать свои возможности.

### § 3. Методы электронно-лучевой технологии

Электронно-лучевая технология развивается с помощью методов:

- 1) испарения материалов электронной бомбардировкой,
- 2) электронно-резистивного,
- 3) инициирования на подложке электронами и ионами химических реакций с целью получения необходимых компонент схемы.

Первый метод широко применяется для получения наиболее совершенных металлических и диэлектрических пленок путем испарения вещества электронной бомбардировкой, а также для создания нужных рисунков схем за счет испарения областей, облучаемых электронными пучками больших энергий.

Второй метод используется для получения прецизионных масок, применяемых далее в фоторезистивной технологии. Электронный луч может быть использован также в качестве активатора, изменяющего структуру вещества, скорости испарения и травления которого значительно отличается от неактивированной поверхности материала [3].

В последние годы в Институте математики СО АН СССР проводились работы по созданию технологии, использующей электронные и ионные потоки для инициирования химических реакций на поверхности подложки. Аналогичные работы ведутся и в других местах [4, 5, 6, 7]. Сущность этого метода электронного активирования заключается в том, что при взаимодействии заряженных частиц на поверхности подложки с потоками радикалов как источника вещества иницируется химическая реакция и создается пленка металла или диэлектрика непосредственно в зоне активирования. Этот метод обеспечивает пространственное разделение источника вещества и зоны реакции, точную дозировку вещества для получения пленки заданной толщины и, таким образом, обеспечивает управление локальными процессами формирования структуры пленки.

Минимальные размеры дискретных элементов определяются величиной зоны активирования, которая в пределе лимитируется явле-

нием дифракции. Действительно, теоретический предел минимального диаметра сфокусированных электронных пучков, определяемой дифракцией, может быть определен из выражения:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 \frac{e}{m} U}}$$

где  $\lambda$  - длина волны частицы;  
 $U$  - ускоряющее напряжение;  
 $h$  - постоянная Планка;  
 $e$  - заряд частицы;  
 $m$  - масса частицы.

Длина волны  $\lambda$  для электрона при  $U = 150$  кэВ будет равна  $\sim 1 \text{ \AA}$ . Таким образом, усовершенствование электронно-оптической системы позволит в будущем иметь сфокусированные потоки электронов диаметром  $100 - 10 \text{ \AA}$ . Если считать, что зона активации будет в 10 раз больше диаметра пучка активирующих частиц, то представляется возможным создавать рисунки схем размером в  $10^4 \text{ \AA}^2$ .

В одной из последних работ [5], примыкающей к этому направлению, в частности, было показано, что скорость роста пленки  $R$  можно определить из следующего выражения:

$$R = \pi \tau f Q A, \quad (1)$$

где  $\pi$  - число молекул, ударяющихся о поверхность (в  $\text{Å}^2$  за 1 сек);  
 $\tau$  - среднее время нахождения молекул на поверхности, сек;  
 $A$  - атомный объем ( $\text{Å}^3$ ) кремния;  
 $f$  - количество электронов, активирующих поверхность (на  $\text{Å}^2/\text{сек}$ );  
 $Q$  - эффективное сечение ( $\text{Å}^2$ ).

Из выражения (1) видно, что скорость роста пленки линейно зависит от  $\pi$  и  $f$ , а также от  $\tau$ , которое возрастает с понижением температуры подложки. Таким образом, варьируя вышеперечисленные параметры, можно достичь высоких скоростей наращивания пленок. Процесс образования пленок металлов и диэлектриков методом активации электронами и ионами, несмотря на кажущуюся простоту, требует тщательного подбора реагентов, выбора режимов активации и прецизионного контроля различных технологических параметров в технологическом цикле.

Было показано [5], что состав пленки из тетраэтилолова, получаемой активацией электронным лучом, в сильной степени зависит от температуры подложки, плотности электронного потока и т.д. Например, при температуре подложки  $40^\circ\text{C}$ , потоке электро-

нов  $7 \cdot 10^{15}$  молекул/см<sup>2</sup>-сек и плотности электронного пучка порядка  $6 \cdot 10^{15}$  электронов/см<sup>2</sup> пленка имела полимерную структуру с сопротивлением  $6 \cdot 10^7$  ом/см<sup>2</sup>, в то время как пленка, полученная при  $T \sim 10^0$ С и потоке  $6 \cdot 10^{11}$  молекул см<sup>2</sup>-сек и плотности электронного пучка порядка  $6 \cdot 10^{15}$  электронов/см<sup>2</sup>, пленка имела полимерную структуру и электрическое сопротивление  $7 \cdot 10^8$  ом/см<sup>2</sup>.

При анализе таких пленок под активированным слоем обнаруживается неразложившийся слой реагента (см. [5]). Осажденные пленки могут иметь различные оттенки, что, вероятно, свидетельствует о загрязнении пленок продуктами распада молекул реагента. Из вышеприведенных фактов следует вывод о необходимости жесткого контроля параметров технологического процесса.

#### § 4. Датчики контроля технологического процесса

Сложность технологического процесса требует разработки и внедрения наиболее современных методов контроля и управления, которые позволили бы контролировать не только начальные стадии процесса, но и вести наблюдения за ним на различных его этапах — от изготовления заготовок до выпуска готовых схем.

Однако следует иметь в виду, что приборы, выполняющие вышеперечисленные функции, должны тоже оснащаться автоматическими устройствами для пуска и поддержания постоянства их рабочих режимов и защиты таких приборов.

Создание комплекса измерительной аппаратуры для управления технологическим процессом выдвигает на первый план требования коренного повышения надежности и точности получения информации о самом процессе. Для получения высокой надежности необходимо уменьшить число технологических операций и обеспечить их тщательный контроль и автоматизацию. Очевидно, при разработке методов контроля нужно, во-первых, учитывать специфику технологии. Так как весь технологический процесс протекает в вакуумной камере, а возможности наблюдения и контроля за процессом крайне ограничены, то необходимо использовать только такие методы контроля, которые не нарушают технологического цикла, не вносят загрязнений и не требуют непосредственного контакта с изделием. Для выполнения этой задачи имеются уже достаточно хорошо изученные методы и приборы, применяемые в различных областях науки и техники. Это — приборы, использующие рассеянные электроны, инфракрасная техника, масс-спектрометрия, техника СВЧ и т.д.

Рассмотрим некоторые типы датчиков, применяемые для контроля и автоматизации при электронно-лучевой технологии.

1. Специфика изготовления микροэлектронных схем методом электронной активации требует контроля целого ряда газодинамических параметров в вакуумной системе, парциального состава, поступающего в рабочий объем реагента, а также величины парциального состава продуктов распада. Эксперименты показали, что эффективный контроль и управление газодинамикой процесса можно реализовать с помощью масс-спектрометра (МС) динамического типа. Масс-спектрометрический метод при описываемой технологии должен занять ведущее место в силу того, что он использует при анализе основное свойство вещества — массу молекулы или атома. Принцип действия динамического МС заключается в том, что, вследствие временной дисперсии, можно использовать переменные электрические поля так, что ионы различных масс, попадая в это поле, будут приобретать разную добавочную энергию. После этого в электрическом поле становится возможным их разделение.

Задача автоматического регулирования с помощью МС заключается в том, чтобы при всевозможных возмущениях поддерживать регулируемые параметры среды на таком уровне, при котором выполнялся оптимальный технологический процесс. Наиболее вероятные задачи, решаемые с помощью динамического масс-спектрометра в технологическом цикле, это:

- 1) непрерывный анализ остаточного газа в объеме;
- 2) контроль за отдельными компонентами примесей;
- 3) контроль и сепарация отдельных компонент рабочих реагентов;
- 4) контроль промежуточных и конечных продуктов реакций;
- 5) контроль за скоростью напыления пленок;
- 6) непрерывный контроль за интегральным давлением в объеме.

Масс-спектрометрические анализаторы должны отвечать требованиям, предъявляемым к высоковакуумным системам: должны быть изготовлены из материалов, имеющих малое газовыделение, допускать перегрев.

Кроме вышеперечисленных требований, МС, контролирующей технологический режим, должен обладать аналитическими характеристиками не хуже, чем МС, предназначенный для лабораторных исследований.

МС динамического типа описан в литературе [6,7,8]. Точность измерений и регулирования процессов, которые осуществляются с его помощью, зависит от стабильности и чувствительности электронной аппаратуры. МС динамического типа могут иметь следующие техниче-

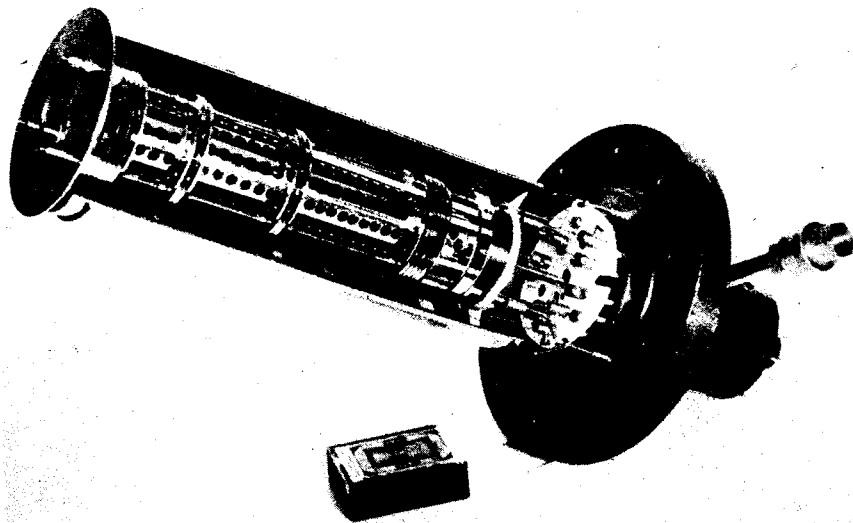


Рис. 1. Общий вид радио-масс-спектрометра на фланце.

кие характеристики:

- 1) рабочий диапазон по давлению  $P-10^{-3} - 10^{-8}$  тор;
- 2) чувствительность по парциальному давлению -  $10^{-10}$  тор;
- 3) разрешающая способность  $\frac{M}{\Delta M} \sim 100$ ;
- 4) быстрота анализа 0,1 секунда-спектр.

На рис. 1 изображено фото одного из видов РМС, имеющего вышеперечисленные технические параметры. На рис. 2 приведена осциллограмма а) масс-спектра остаточного газа; б) масс-спектра с напуском аргона.

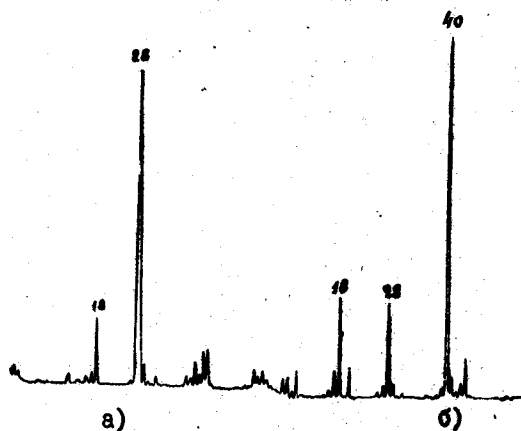


Рис. 2. Масс-спектр остаточного газа. Давление в камере  $2 \cdot 10^{-6}$  тор :  
 а) масс-спектр остаточного газа;  
 б) масс-спектр остаточного газа с напуском аргона.

2. Ввиду того, что размеры деталей устройств должны достигать величины порядка десятков микрон и менее, проверка качества их изготовления будет вызывать большие трудности. Задача контроля и правильности изготовления микросхем в процессе самого изготовления является не менее важной проблемой, нежели сам процесс изготовления. Возможным методом в решении этого вопроса будет бесконтактный метод.

Для этой цели наиболее перспективным, на наш взгляд, является использование инфракрасной техники и растровой микроскопии [9, 10, 11, 12, 13].

Оба эти метода, по нашему мнению, могут с успехом применяться и для контроля пленок в процессе их изготовления.

Так как при электронно-лучевой технологии процессы образования пленок протекают при строго определенных температурных режимах, то чрезвычайно важно знать и уметь контролировать температуру поверхности зоны, где эти процессы происходят. Приемлемым методом контроля температуры поверхности в данном случае является метод инфракрасной пирометрии, который позволяет замерить интегральное излучение как всей поверхности подложки, так и отдельных её участков. Если пренебречь обратным излучением, то моц-

ность, излучаемая с поверхности элемента при  $T^{\circ}\text{K}$ , будет:

$$W = \sigma \varepsilon T^4 \text{ ват/см}^2, \quad (2)$$

где  $\sigma = 5,66 \cdot 10^8 \text{ вт/см}^2 \cdot \text{град}^{\circ}\text{C}^0$ ;

$\varepsilon$  - излучательная способность поверхности.

Истинная температура тела может быть найдена из выражения:

$$T = \frac{T_p}{\sqrt{\varepsilon(T) \tau_i}},$$

где  $T_p$  - радиационная температура;

$\tau_i$  - коэффициент пропускания среды.

Таким образом, измеряя мощность, излучаемую поверхностью растущей пленки, можно судить о её температуре и принимать решения об оптимальности технологического процесса. Контроль температуры поверхности в технологическом агрегате может осуществляться с помощью специального радиационного пирометра суммарного излучения или пирометра спектрального отношения. Пирометр должен работать в вакуумной камере и обеспечивать контроль температуры в диапазоне  $30 - 500^{\circ}\text{C}$  с достаточно высокой точностью. В работах [14, 15] упоминается о радиометрическом пирометре, с помощью которого можно производить измерение распределения температуры на поверхности интегральной схемы.

Блок-схема такого прибора приведена на рис. 3.

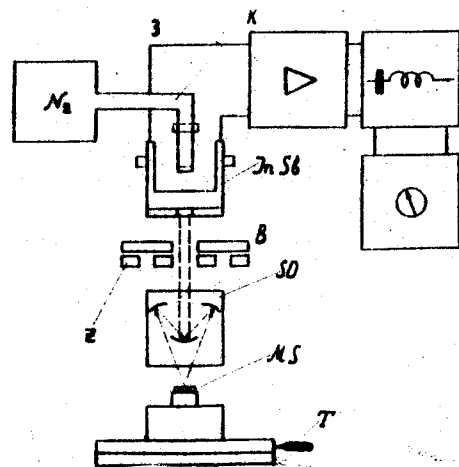


Рис. 3. Блок-схема прибора для измерения температуры микросхем:  $З$  - модулятор,  $К$  - кристалл,  $В$  - диафрагма,  $СО$  - оптическая система,  $МС$  - микросхема,  $Т$  - микрометрический столлик.

Характеристика ИК радиометра [15]:

- 1) разрешающая способность прибора по температуре  $0,5^{\circ}\text{C}$ ;
- 2) точность измерения температуры  $2^{\circ}\text{C}$ ;
- 3) динамический диапазон измеряемых температур от  $30^{\circ}\text{C}$  до  $500^{\circ}\text{C}$ ;
- 4) постоянная времени схемы измерения около 1 мсек.

Впоследствии представляется возможным использовать инфракрасное излучение для контроля готовых схем-

ных объектов. Дело в том, что ток, протекающий через узлы схемы, всегда вызывает нагрев цепей, которые начнут излучать инфракрасные потоки. Это излучение зависит от температуры детали и эмиссионной характеристики ее поверхности.

Экспериментально могут быть выбраны излучающие точки, содержащие информацию о состоянии практически всех элементов объекта контроля. Процесс локализации отказа сводится к сравнению полученного уровня радиации с эталоном. Обработка информации может вестись с помощью ЭВМ. Достоинством метода является то, что практически исключается воздействие измерительных цепей на технологический процесс.

3. Контроль правильности изготовления рисунка схемы непосредственно в технологическом цикле и отыскание в них неисправностей - задача столь же важная, сколь и трудная. Одним из наиболее эффективных методов в решении этого вопроса является использование поглощенных и вторичных электронов, возникающих на объекте в процессе сканирования электронным лучом, который может выполнять как технологические операции, так и зондирование подложки. Вторичные электроны, образованные электронным пучком, собираются электронной линзой и направляются на коллектор, где создается видеосигнал, который моделирует интенсивность электронного луча индикаторной электронной трубки. Развертка луча этой трубки синхронизована с разверткой электронного луча. Таким образом, получаемая картина представляет собой распределение интенсивности вторичной электронной эмиссии в различных частях испытуемого объекта.

Развертка луча на исследуемой поверхности производится при числе строк 625 и числе кадров в секунду 25. Разрешающая способность при исследовании интегральных микросхем может быть выше 10 мкм. Для этой цели могут быть использованы стандартные телевизионные устройства типа ПТУ-26. Система электронной растровой микроскопии должна обеспечить три вида контроля образца:

- 1) контроль распределения материала на поверхности подложки;
- 2) контроль геометрического рельефа на поверхности;
- 3) контроль потенциального рельефа.

Именно эти факторы заставляют применять этот метод для исследования интегральных схем в процессе их изготовления.

Схема получения информации о состоянии образца с помощью электронного луча показана на рис. 4.

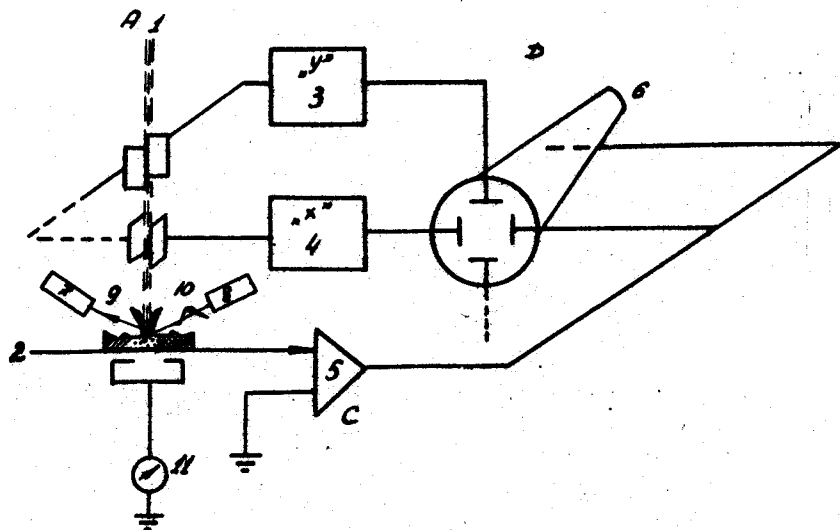


Рис. 4. Блок-схема устройства получения информации о состоянии образца с помощью электронного луча: 1-электронный луч; 2-полупроводник; 3-развертка "у"; 4-развертка "х"; 5-усилитель; 6- ЗНТ.

Из вышерассмотренных возможностей контроля отдельных этапов технологического цикла можно предположить, что в случае внедрения в технологический контроль датчиков масс-спектрометрии, инфракрасной пирометрии и методов растровой микроскопии можно осуществить выпуск функциональных модулей с большим процентом выхода годных изделий. Проверка микроузлов между различными этапами технологического процесса приводит к повышению их качества.

#### § 5. Пути реализации первого этапа по созданию ВС (макет $10^5$ )

Для создания макета вычислительной среды объемом  $10^5$  элементов, изготовленного методом электронно-лучевой активации, необходимо провести подготовительные работы, разработать весь комплекс инструментов и датчиков, обеспечивающих контроль технологического процесса. В качестве опытного варианта рассматривается макет среды, разработанный на пленочных криотронах. Известно [1,2,3], что для реализации элемента ВС криотрон наиболее перспективен, так как он имеет простую схему, наиболее надежен в работе и с его помощью можно реализовать всю логическую структуру вычислительной среды. Создание ВС с однородной структурой, т.е. из одних и тех же стандартных элементов и с одинаковой конфигурацией связей между ними, позволило существенно упростить технологический цикл, который сводится к многократному воспроизводству одного и того же элемента среды, причем одновременно можно создавать сравнительно большое количество таких элементов.

Вся работа по созданию макета ВС объемом  $10^5$  элементов разбивается на следующие этапы:

- 1) подготовительный, куда входит общая подготовка, создание инструмента и проверка технологии поверхностно-химических реакций, инициируемых электронными пучками;
- 2) стендовые испытания технологических режимов, разработка датчиков для контроля технологических процессов;
- 3) создание работающего макета технологического агрегата с целью получения отдельных элементов ВС;
- 4) отработка взаимодействия узлов агрегата и выбор режимов для создания макета ВС объемом  $10^5$  элементов;



5) окончательная доработка технологического агрегата для создания макетов ВС объемом более  $10^5$  элементов.

Результаты, полученные при выполнении некоторых этапов, представлены в работах настоящего сборника.

### § 6. Блок-схема установки для реализации макета ВС

Подобрав технологический режим и контрольно-измерительные датчики, можно спроектировать технологический агрегат, работающий по замкнутому циклу. При создании такой установки должна быть соблюдена необходимая точность: разрешающая способность и высокое быстродействие в создании элементов, получаемые методом активации электронами и ионами. Для этой цели применяется электронно-оптическая система, в которой с помощью конденсоров создается на подложке изображение рисунка шаблона. Этот шаблон с масштабом изображения от 1/10 до 1/20 отображается через уменьшающую линзу на подложку (рис.5). По сравнению с

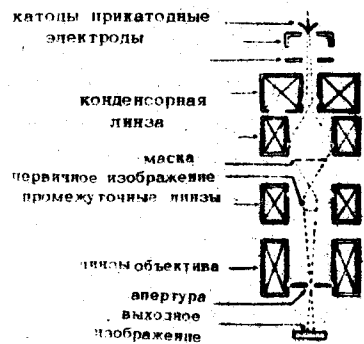


Рис.5. Оптическое устройство установки с высокой разрешающей способностью.

используются механические манипуляторы типа микропозиционеров. Все датчики контроля и узлы агрегата прошли стендовые испытания и находятся на стадии стыковки в единый технологический агрегат.

Кроме изготовления элементов ВС, установка с некоторыми переделками может быть использована для защиты поверхности микросхем, для изготовления прецизионных масок, для исследований физико-химических процессов на поверхности твердых тел, для

обработкой подложки с помощью электронного зонда данный способ позволяет создавать сложные рисунки схем без программных устройств путем простой замены шаблонов. Точность изображения определяется исключительно стабильностью системы: наблюдатель-линза-подложка. Разрешающая способность таких устройств лежит в пределах  $1 \text{ мк} - 0,1 \text{ мк}$  [16].

Режим проекции через шаблон является основным. Для смены шаблонов могут применяться микропозиционеры.

контроля готовых изделий бесконтактным способом и т.д. Таким образом, работы по созданию проекта агрегата найдут широкое применение в технологических процессах, применяемых в полупроводниковой промышленности и микроэлектронике.

В последнее время внимание специалистов в области автоматического управления все более сосредоточивается на системах, где основную роль играет УЭВМ.

В нашем случае, на первом этапе, будет более рационально подчинять "машинному" управлению контроль за "технологическими параметрами" (вакуумом, температурными изменениями, качественным и количественным составом подаваемых реагентов и т.д.). Процесс же создания самой схемы и контроль ее работы необходимо подчинить специальному видеоконтрольному устройству, управляемому физиком-оператором. По мере совершенствования технологии и описания ее математическим аппаратом все управление можно будет передавать УЭВМ, где вычислительная машина сама будет изменять установки регуляторов и непрерывно регистрировать состояние технологического процесса. Для создания программы потребуется тщательное изучение физики процессов и влияние на конечный продукт отклонений технологических параметров, а также разработка особой программы, предусматривающей соответствующие действия машины для различных аварийных ситуаций, которые могут повлечь за собой брак.

Таким образом, тщательный анализ работы технологического инструмента и контрольно-измерительных датчиков, а также разработка на их основе технологии микросхем являются предпосылкой для проектирования требуемого технологического устройства, которое способно было бы осуществить пуск, регулирование процессов и их контроль при изготовлении элементов ВС.

Предлагаемые способы отнюдь не исчерпывают всех возможностей управления и контроля в производстве микросхем. Скорее, их можно рассматривать как первые попытки в этом направлении, тем более, что сами эти способы еще очень мало приспособлены для практического применения.

На рис. 6 представлена схема макета установки

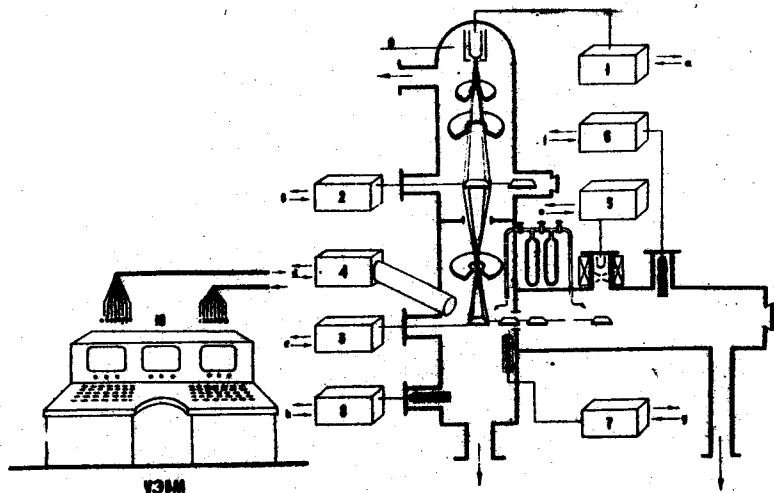


Рис.6. Схема макета установки: 1-блок питания электронной оптики; 2-микрораздвигатель для перемещения шаблона; 3-микрораздвигатель для перемещения подложки; 4-устройство для контроля температуры поверхности; 5-плазмотрон для получения ионного потока; 6 и 8-динамические МС; 7-видео-контрольное устройство; 9-электронно-оптическая система для получения электронного изображения схемы; 10-управляющая ЭВМ, соединенная с видеоконтрольным устройством и блоками управления технологического агрегата.

### Выводы

На основе анализа возможных путей реализации ВС можно сделать вывод, что ВС должна быть изготовлена в едином, полностью автоматизированном технологическом процессе. Несомненно, что идея ВС позволяет значительно упростить управление технологическим процессом, так как производство её сводится к многократному повторению одного и того же элемента. Для изготовления ВС с количеством элементов порядка  $10^{10}$  и более возникают значительные трудности по созданию технологических процессов, которые обеспечивали бы высокую плотность упаковки элементов, надежную защиту их от внешней среды, максимальный выход годных элементов и обеспечили бы наиболее в короткий срок их изготовление.

Проведенные исследования показали, что одним из реальных путей по преодолению этих трудностей является использование электронных и ионных потоков как инструмента нетеплового воздействия их на адсорбированные на подложке слои реагентов. При этом электронное изображение проектируется на поверхность образца.

Реализация такого технологического метода представляется по этапам:

- а) Исследование технологических процессов получения элементов схем и разработка датчиков контроля этих процессов.
- б) Создание опытного действующего макета технологического агрегата с целью получения отдельных функциональных блоков ВС и разработки технологического цикла.
- в) Окончательная разработка технологического агрегата работающего по замкнутому циклу.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Э.В. ЕВРЕЙНОВ, Ю.Г. КОСАРЕВ. Однородные универсальные вычислительные системы высокой производительности. Новосибирск, Изд-во "Наука" СО, 1966.
2. K.R. SHOULDERS. Publication number PB 174027 office of technical services (1960).
3. R.V. FISHER. J.Appl.Phys., 25, p. 894 (1954).
4. Я. де БУР. Динамический характер адсорбции. И.Л., Москва, 1962.
5. ОСИПОВ и др. Физико-технологические вопросы кибернетики, № 2, Киев, 1967.
6. R.W. CHRISTY. Formation of thin polymer films by electron bombardment. J.Appl.Phys., 31, p.1680 (1960).
7. R. FORD, H.N. KING. Mullard Research paper N 28. 1966.
8. А.И. ТРУБЕЦКОЙ, М.Я. ЦЕРБАКОВА. Радиочастотный МС. Изд-во Изв. СО АН СССР, 1957.
9. А.И. ТРУБЕЦКОЙ и др. Радиочастотный МС. Изд-во АН СССР, 1959.
10. N. SITLY. Advances in Electronics and Electron Physics, vol.21, 1965, p. 181-246.
11. Electronic Design, 1964, vol.12, N 10, p.71.
12. Electronic Design, 1965, vol.13, N 2, p.58.
13. Технический отчет ГКЭТ, 1963 "Изыскание методов измерения температур в технологических процессах изготовления микросхем".
14. Методы контроля, используемые в производстве микросхем. Обзор МЭП СССР, № 12, Москва, 1966.

15. Radio Mentor, 1963, Bd 29, N 3, S.209.

16. M. ARDENE von, HEISIG V. Z. angew.Phys., 1966, 21, N 3,  
p.237.

Поступила в редакцию

5.VI. 1968г.