

ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НАПЫЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

А. В. Дементьева, Л. Н. Морев
(Ленинград)

Выбор типа технологического процесса играет важную роль в направлении развития технологического оборудования для напыления гибридных интегральных схем (ГИМ), так как технологический процесс должен обеспечить выпуск микросхем, удовлетворяющих предъявляемым техническим требованиям при минимальных затратах. Основным критерием совершенства технологического процесса напыления при прочих равных условиях является время, необходимое для напыления одной годной микросхемы, так как стоимость распыляемых материалов и подложек мала по сравнению со стоимостью рабочего времени. Задачей данной работы является определение производительности технологических процессов напыления различных типов.

Тип технологического процесса определяется конструкцией подколпачного механизма. Поэтому целесообразно рассмотреть существующие конструкции подколпачных механизмов, все многообразие которых служит для осуществления технологических процессов трех типов: последовательного; последовательно-параллельного и специализированного типа.

Рассмотрим подколпачные механизмы для напыления ГИМ по технологии последовательного типа.

Подколпачный механизм с дискретным перемещением подложек, показанный на рис. 1а состоит из вращающегося диска с испарителями, электромагнитной заслонки, высоковольтных электродов, вращающегося диска с подложкодержателями, датчиков контрольно-измерительной аппаратуры, радиационного нагревателя, ввода вращения. Диск с подложкодержателями дискретно перемещается, выводя на позицию напыления очередную подложку. После напыления слой на первую подложку производит напыление слоя на вторую подложку и т.д. Испарители меняются по мере истощения испаряемого вещества.

Подколпачный механизм с непрерывным вращением подложек по конструкции аналогичен механизму, показанному на рис. 1а. В отличие от предыдущего механизма диск с подложкодержателями непрерывно вращается во время напыления со скоростью 60-120 об. в минуту. Датчики контрольно-измерительной аппаратуры располагаются на вращающемся диске. Выводы датчиков проходят через ось вращения диска.

Подколпачный механизм для напыления ГИМ без разгерметизации колпака показан на рис. 1б. В отличие от подколпачных механизмов с дискретным и непрерывным вращением подложек, данный механизм имеет вращающийся диск с масками, механизм точной установки масок под соответствующей подложкой и механизм подъема масок до плотного соприкосновения их с подложками.

Резистивные, диэлектрические и проводящие пленки напыляются из одного из испарителей через соответствующую маску. После напыления тонкопленочных слоев через все маски специальный механизм поворачивает верхний диск и устанавливает следующую подложку на позицию напыления и т.д. до полного напыления микросхем на всех подложках.

Характерным для этих трех типов подколпачных механизмов является последовательное напыление тонких пленок на подложки.

При напылении микросхем по первому технологическому процессу после каждой операции или группы операций производится контроль напыленных элементов. Подложки с бракованными элементами удаляются и следующий слой напыляется только на годные подложки. Эта операция приводит к повышению производительности подколпачного механизма. Однако, напыление с разгерметизацией приводит к увеличению брака за счет загрязнения и механических повреждений пассивных элементов во время контроля и межоперационного хранения.

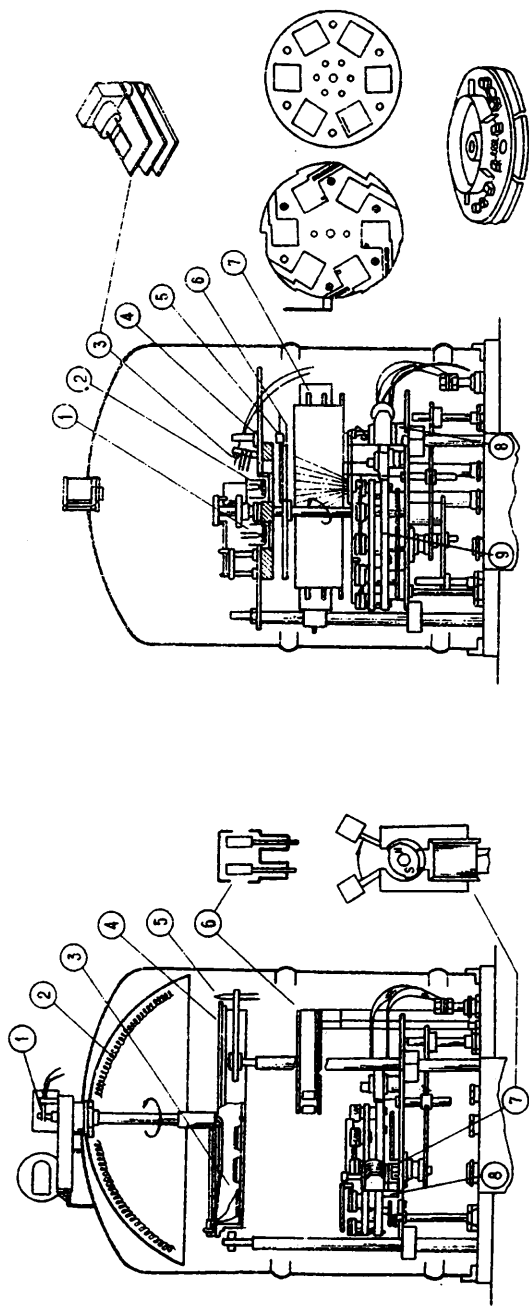


Рис. 1. Подключаемые механизмы, работающие по технологическому процессу последовательного типа

а) Механизм с дискретным и непрерывным вращением подложек: 1 - выводы свидетеля, 2 - радиационный нагреватель, 3 - свидетель, 4 - диск с подложкодержателями, 5 - термопара, 6 - высоковольтные электроды, 7 - заслонка, 8 - диск с испарителями.

б) Механизм для напыления без разгерметизации: 1 - предварительный нагреватель и термопара, 2 - основной нагреватель и термопара, 3 - кварцевый кристалл, 4 - диск с подложками, 5 - свидетель, 6 - диск с масками, 7 - высоковольтные электроды, 8 - электромагнитная заслонка, 9 - диск с испарителями.

Время, необходимое для производства серии пассивных элементов ГИМ частного применения, изготавливаемых с помощью подколпачного механизма с дискретным и непрерывным вращением подложек, рассчитывается по формуле:

$$T_+ = \frac{A}{\prod_{j=1}^k \alpha_j M q_t} \cdot \sum_{i=1}^k (T_{всп} + n T_1) \prod_{j=1}^{i-1} \alpha_j, \quad (1)$$

где A - количество микросхем в серии;

M - количество подложек, которые можно разместить в сечении камеры напыления;

$$A \gg M q_t;$$

q_t - коэффициент использования сечения камеры напыления;

k - количество слоев в микросхеме;

n - количество подложек в одной загрузке камеры;

α_j - процент выхода годных подложек после напыления j слоя;

T_1 - время напыления 1 слоя;

$T_{всп}$ - время вспомогательных операций.

$$T_{всп} = T_3 + T_{отк} + T_{и.о.} + T_p + T_o, \quad (2)$$

где T_3 - время зарядки масок и испарителей;

$T_{отк}$ - время откачки вакуумной системы;

$T_{и.о.}$ - время ионной очистки подложек;

T_p - время разогрева подложек;

T_o - время остывания подколпачного механизма.

Время, необходимое для производства пассивных элементов серии ГИМ, изготовленных с помощью подколпачного механизма без разгерметизации определяется по формуле:

$$T_+ = \frac{A}{\prod_{j=1}^k \alpha_j M q_t} (T_{всп} + n \sum_{i=1}^k T_i). \quad (3)$$

Рассмотрим подколпачные механизмы, предназначенные для напыления пассивных элементов по последовательно-параллельному технологическому процессу.

Подколпачный механизм для напыления однослойных пассивных элементов, показанный на рис. 2, обеспечивает непрерывное переключение подложек и предназначен для напыления танталовых пленок. Вакуумная система имеет входное и выходное отверстия,

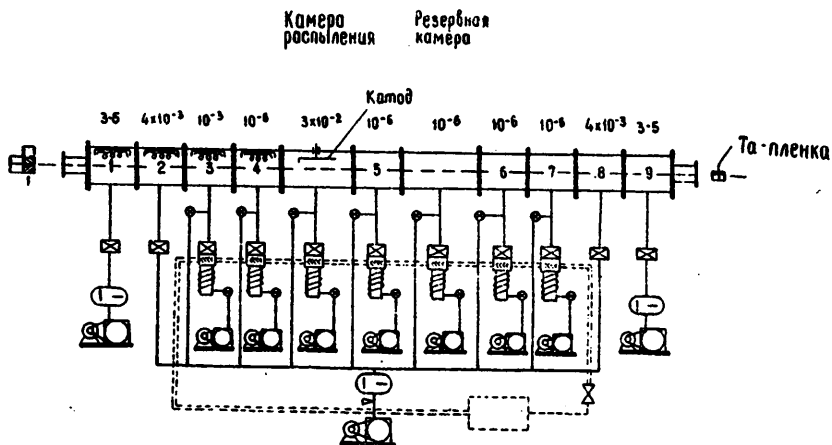


Рис. 2. Подколпачный механизм для напыления однослойных элементов по технологическому процессу последовательно-параллельного типа.

открытые прямо на атмосферу. Характерным для нее является отсутствие шлюзов, причем необходимая степень разряжения достигается за счет компенсации натекания через отверстия в камерах с помощью вакуумных насосов. Параметры камер показаны на рис. 2. Через эти отверстия проходит бесконечная металлическая лента, на которую устанавливаются подложкодержатели с подложками. Пройдя через ряд камер предварительной откачки, подложки нагреваются до требуемой температуры и попадают в распылительную камеру. В последующих камерах подложки остывают и выходят на атмосферу.

Подколпачный механизм для напыления пассивных элементов ГИМ без разгерметизации, показанный на рис. 3, состоит из неподвижного диска с масками, неподвижного комплекта испарителей и вращающегося диска с подложками. Напыление микросхем производится в следующей последовательности. Сначала на первую подложку напыляется первый слой. Диск с подложками перемещается на один шаг и производится одновременное напыление на подложку с первым слоем второго слоя, а на вторую подложку первого слоя. После второго шага диска происходит одновременное напы-

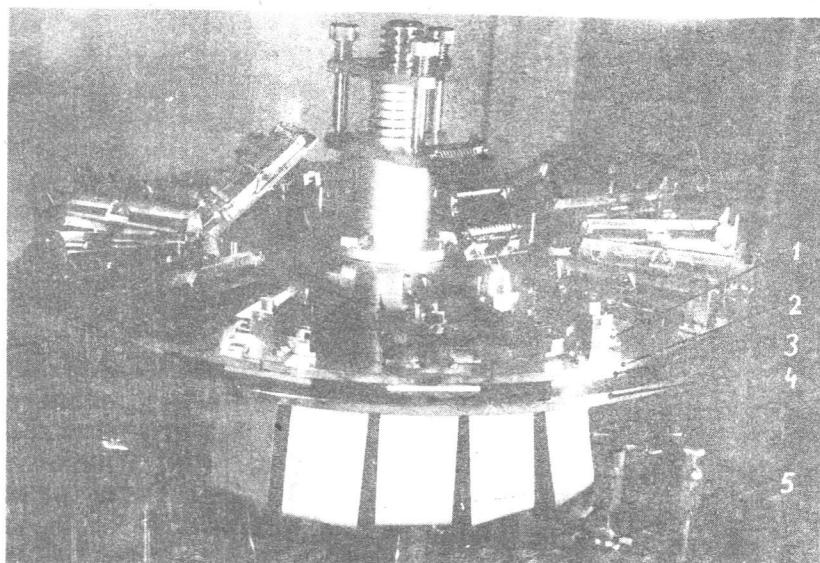


Рис. 3. Подколпачный механизм для напыления пассивных элементов ГИМ по технологическому процессу последовательно-параллельного типа: 1 - подложкодержатель; 2 - вращающийся диск с подложкодержателями; 3 - маскодержатель; 4 - неподвижный диск с маскодержателями; 5 - испарители.

ление на первую подложку третьего слоя, на вторую подложку второго слоя, а на третью подложку первого слоя и т.д. до напыления всех слоев на всех подложках.

Характерным для механизмов этого типа является напыление вещества на несколько подложек одновременно.

Время, необходимое для производства серии однослойных пассивных элементов ГИМ частного применения, изготовленных с помощью подколпачного механизма с непрерывным перемещением подложек, определяется по формуле:

$$T_{\text{н}} = \frac{\Delta}{\alpha_{\text{н}} M q_{\text{н}}} T_{\text{н}} + T_{\text{всп}}, \quad (4)$$

где $T_{всп}$ - время запуска вакуумной установки;

M_q - число подложек, находящихся одновременно в камере напыления.

В данном случае уменьшение времени, необходимого для напыления одной подложки, происходит за счет увеличения сечения потока напыляемого вещества.

Время, необходимое для производства серии пассивных элементов ГИМ частного применения, изготовленных с помощью подколпачного механизма без разгерметизации, определяется по формуле:

$$T_{\Pi} = \frac{A}{\prod_{j=1}^k \alpha_j M_q} (T_{всп} + \sum_{i=1}^{2k-1} T_{max_i}), \quad (5)$$

где T_{max_i} - время самой длительной операции напыления i -слоя.

Контроль параметров пассивных элементов производится после напыления всех слоев микросхемы и поэтому не влияет на сокращение времени её изготовления.

Процент выхода годных подложек определяется по формуле

$$\alpha = \prod_{i=1}^1 \alpha_i, \quad (6)$$

где α_i - процент выхода на отдельную операцию;

1 - число операций в технологическом цикле.

Подколпачные механизмы специализированного типа обычно не отличаются высокой производительностью, так как их основной задачей является достижение какого-то одного параметра. Примером может служить подколпачный механизм для напыления конденсаторов канальных фильтров с точностью $\pm 0,05$.

Для сравнения технологических процессов различных типов подсчитаем время, необходимое в каждом случае для напыления серии ГИМ. Возьмем следующие длительности времен, характерные для операций процесса напыления:

- | | |
|---|-------------|
| 1. Загрузка испарителей и смена масок | - 0,5 часа |
| 2. Откачка до форвакуума | - 0,5 часа |
| 3. Ионная очистка | - 0,2 часа |
| 4. Откачка до 10^{-5} мм рт.ст. | - 0,3 часа |
| 5. Разогрев подложки до 300°C | - 0,5 часа |
| 6. Напыление сопротивления | - 0,01 часа |

7. Термообработка сопротивлений	- 2 часа
8. Напыление проводников	- 0,01 часа
9. Напыление обкладок конденсатора	- 0,01 часа
10. Напыление диэлектрика	- 0,5 часа
11. Напыление обкладок конденсатора	- 0,01 часа
12. Защита (диэлектрик)	- 0,5 часа
13. Остывание подколпачного механизма	- 1 час.

Для упрощения предположим, что

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_4 = \alpha_6 = 1; \quad \alpha_3 = 0,5; \quad \alpha_5 = 0,3,$$

где α_1 - процент выхода 1 слоя.

Время, необходимое для напыления серии ГИМ по технологическому процессу последовательного типа с дискретным и непрерывным вращением подложек равно:

$$T_+ = \frac{A}{\prod_{j=1}^n \alpha_j M q_t} (7,92 + 11,52\alpha_3 + 5,8\alpha_5) = \frac{25,24 A}{\prod_{j=1}^n \alpha_j M q_t}$$

при $\alpha_3 = \alpha_5 = 1$.

Время, необходимое для напыления серии ГИМ по технологическому процессу последовательного типа без разгерметизации равно:

$$T'_+ = -\frac{A}{\prod_{j=1}^n \alpha_j M q_t} (T_{всп} + n \cdot \sum_{i=1}^n T_i) = \frac{21,24 A}{\prod_{j=1}^n \alpha_j M q_t}$$

Время, необходимое для напыления серии ГИМ по технологическому процессу последовательно-параллельного типа равно:

$$T_{||} = \frac{A}{\prod_{j=1}^n \alpha_j M q_{||}} (T_{всп} + k T_3 + T_{тер} + (k+2) T_5) = \frac{9,06 A}{\prod_{j=1}^n \alpha_j M q_{||}}$$

Найдем соотношение $\frac{T_+}{T_{||}}$ при 100% выходе годных подложек и при $\alpha_3 = 0,5$ и $\alpha_5 = 0,3$:

$$\frac{T_+}{T_{||}} = \frac{q_{||}}{q_+} \frac{25,24}{9,06} = 2,9 \quad \text{при } \alpha_3 = \alpha_5 = 1,$$

$$\frac{T_+}{T_{||}} = 1,45 \quad \text{при } \alpha_3 = 0,5, \quad \alpha_5 = 0,3.$$

Соотношение $\frac{q_{||}}{q_+}$ выбрано равным 0,9, так как плотность компоновки подложек в подколпачном механизме без перемещения

выше за счет уменьшения площади контрольных образцов для измерения сопротивления в момент напыления и кварцевых кристаллов для измерения толщины диэлектрика.

Из приведенных расчетов видно, что технологический процесс последовательно-параллельного типа особенно выгоден при большом проценте выхода годных подложек, а также при малых временах напыления слоев.

Однако, на современном уровне развития технологии изготовления тонкопленочных микросхем, процент выхода годных подложек низкий, поэтому целесообразно рассмотреть технологический процесс последовательно-параллельного типа с промежуточным контролем. Наиболее рационально разбить процесс напыления на четыре этапа:

- 1) напыление сопротивлений и проводников;
- 2) контроль номиналов сопротивлений;
- 3) напыление конденсаторов;
- 4) контроль номиналов конденсаторов.

Такое разделение позволяет отбраковать испорченные подложки после напыления сопротивлений с одной стороны и, кроме того, не нарушает технологический процесс накопления тонкопленочных элементов, тем самым уменьшая брак контрольных измерений.

$$T_{+II} = \frac{A}{\prod_{j=1}^k \alpha_j M q_{II}} \left\{ (T_{всп} + 2T_3 + T_{тер}) + \alpha_3(T + 6T_5) = \right. \\ \left. = \frac{8,02 A}{\prod_{j=1}^k \alpha_j M q_{II}} \right\},$$

$$\frac{T_+}{T_{+II}} = 0,9 \frac{25,24}{8,02} = 2,943.$$

Сравним производительность технологического процесса последовательно-параллельного типа с промежуточным контролем и без него.

В этом случае $T_{+II} = T_{II}$ при $5,02 + \alpha_3,6 = 9,06$, т.е. при $\alpha_3 = 0,66$. $T_{+II} > T_{II}$, при $\alpha_3 > 0,65$;

$$T_{+II} < T_{II}, \text{ при } \alpha_3 < 0,65.$$

Выбор типа технологического процесса связан с величиной выхода годных подложек. С известным приближением можно счи-

татъ, что на выход годных подложек влияет выход по сопротивлениям α_3 и конденсаторов α_5 . Условия равенства производительности технологических процессов различных типов может быть описано уравнением граничной линии:

$$x(y + a) = b,$$

где $x = \alpha_3$; $y = \alpha_5$; $1 \geq x > 0$; $1 \geq y > 0$; $a > 0$;
 a, b - константы, связанные с характеристиками вакуумной установки и напыляемых слоев.

При $k = 6$ $T_+ = T_{II}$, если $7,92 + 11,52\alpha_3 + 5,8\alpha_5 = 9,06$.

Технологический процесс последовательного типа (I) имеет большую производительность в случае, если $T_+ < T_{II}$ т.е.

$$\alpha_3(\alpha_5 + 2) < 0,19.$$

Технологический процесс последовательно-параллельного типа (II) имеет большую производительность в случае, если $T_+ > T_{II}$ т.е.

$$\alpha_3(\alpha_5 + 2) > 0,19.$$

На рис. 4 приведена номограмма для определения целесообразности применения того или иного типа технологического процесса.

Из номограммы видно, что при $\alpha_3 < 0,095$ большей производительностью обладает технологический процесс последовательного типа, при $\alpha_3 > 0,095$ большей производительностью обладает технологический процесс последовательно-параллельного типа. При $\alpha_3 < 0,66$ наибольшей производительностью обладает технологический процесс последовательно-параллельного типа с промежуточным контролем.

Выводы

Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

I. Технологический процесс последовательно-параллельного типа производства тонкопленочных микросхем имеет не только чисто-технологические преимущества, но и дает значительный выигрыш в производительности подколпачного механизма. Выигрыш тем больше, чем больший процент выхода имеет технология напы-

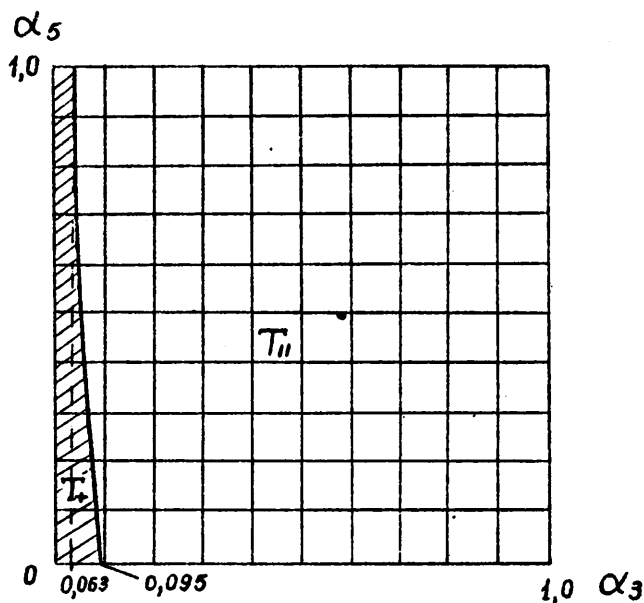


Рис. 4. Номограмма для определения типа технологического процесса.

ления пассивных элементов. При 100% выходе подложек производительность увеличивается в 2,9 раза по сравнению с технологическим процессом последовательного типа.

2. При выходе подложек меньше 65% становится более производительным технологический процесс последовательно-параллельного типа с промежуточным контролем.

3. При выходе подложек меньше 6,3% становится более выгодным технологический процесс последовательного типа.

Л и т е р а т у р а

1. G.W.A.Dummer, I.M.Robertson. British microelectronics data 1965-1966. Pergamon press.