

способа целесообразно подбирать время обработки на контрольных образцах ПП, изготовленных по действующему на предприятиях ТП. При этом полученные результаты позволят значительно уменьшить число экспериментов и снизить трудоемкость разработки ТП ионной очистки.

Таким образом, ионная обработка ПП позволяет обеспечить воспроизводимость качества сварочного соединения за счет стабилизации и изменения режимов термокомпрессионной сварки расщепленным электродом, а также увеличить процент выхода годных для операций монтажа выводов кристаллов БИС на ПП.

#### Список использованной литературы

1. *Иванов-Есипович Н.К.* Физико-химические основы производства радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. пособие для вузов. М., 1979. 205 с.
2. *Арский В.Н.* Контактная сварка деталей в электронной промышленности // *Обзоры по электрон. технике.* Сер. Технология и организация производства. Оборудование. 1973, Вып. 15 (131). 78 с.
3. *Ивановский Г.Ф., Петров В.И.* Ионно-плазменная обработка материалов. М., 1986. 232 с.
4. *Данилин Б.С., Киреев В.Ю.* Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М., 1987. 264 с.

Поступила в редколлегию 15. 04. 92

УДК. 621.328.8:658.524

*Н.М.ПРИЩЕПА, канд. техн. наук, доц.*

#### МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Предложен метод оптимизации технологических процессов, отличающихся большой длительностью производственного цикла, дрейфом основных показателей — критериев годности изделий производства — и большим числом неуправляемых технологических факторов. Метод был опробован для оптимизации технологического процесса производства интегральных микросхем и показал значительную эффективность.

Одним из основных показателей (откликом) производства является процент выхода годных интегральных микросхем (ИМС), соответствующих техническим условиям.

Исследования, проведенные на производстве, позволяют предположить, что функция отклика унимодальна, однако в результате постоянно изменяющихся условий производства — технологических факторов (ТФ) наблюдается значительный дрейф основных параметров — критериев годности ИМС. Следовательно, технологический процесс (ТП) производства ИМС можно рассматривать как нестационарный, в результате которого поверхность отклика совершает перемещения. Поэтому в проблеме управления ТП явно просматриваются две задачи: отыскание оптимальных условий и адаптационное

управление процессом. Однако возможности проведения экспериментов в промышленных условиях ограничены допустимыми границами варьирования ТФ, большой длительностью производственного цикла и большим числом неуправляемых ТФ.

С учетом особенностей ТП производства ИМС основные положения предлагаемого подхода к решению задач оптимизации направлены на определение условий квазистационарности процесса и несмещенных оценок коэффициентов влияния управляемых ТФ, а также на расчет линейного приближения градиента в центре фазы исследований и определение оптимальных условий ТП.

Решение поставленных задач возможно на основе следующих положений.

1. На небольшом интервале времени сезонным дрейфом ТП можно пренебречь, если оптимизацию проводить с нескольких точек факторного пространства, внутри которого предполагается наличие оптимума (параллельная процедура).

2. Оптимальные условия ТП выбираются в окрестности пересечений линейных приближений градиентов, рассчитанных из центров начальных фаз исследований.

3. Для уменьшения дисперсии эксперимента в условиях ограниченного числа экспериментов необходимо увеличивать объем факторного пространства посредством включения существенных неуправляемых, но контролируемых ТФ.

4. Для расчета линейных эффектов факторов применяется сложный план эксперимента, полученный композицией ортогонального плана для управляемых и произвольного плана для неуправляемых переменных.

5. Обработку экспериментальных данных можно выполнять только с применением ЭВМ по специальным алгоритмам (например, сокращенный метод Дулиттла).

Предложенный метод оптимизации опробовался для различных ТП, в том числе и для решения задачи увеличения процента выхода годных МОП ИМС. Предварительные исследования процесса позволили сделать вывод, что при заданных условиях ТП значительное число кристаллов ИМС бракуется по значению сопротивления канала открытого транзистора  $r_{от}$ . На это сопротивление оказывают влияние фотолитографическая длина канала  $L_{ф}$ , пороговое напряжение  $U_0$ , глубина областей стока (истока)  $x_{дл}$  и др. В свою очередь, если области стока (истока) выполняются способом диффузии, то  $x_{дл}$  зависит от ТФ диффузии, важнейшими из которых являются температура  $T_1$  и длительность процесса  $t_1$  первой стадии.

Оптимизация ТП проводилась в пространстве двух управляемых ТФ первой стадии диффузии бора ( $T_1$ ,  $t_1$ ) и двух неуправляемых параметров ТП ( $L_{ф}$  и  $U_0$ ). Следовательно, оптимизация всего ТП на данном этапе проводилась посредством оптимизации процесса диффузии, локализованного в технологической цепи.

С целью уменьшения дисперсии эксперимента и ускорения решения задачи была оценена возможность провести оптимизацию с двух крайних точек ограниченного факторного пространства. Для этого была использована модель ТП диффузии по  $x_{дл}$  (см. рисунок).

При увеличении глубины диффузии будет уменьшаться сопротивление канала открытого транзистора  $r_{от}$ . А поскольку частная цель оптимизации — уменьшить  $r_{от}$ , то смещение процесса в сторону повышения температуры и увеличения длительности не вызывает опасений уменьшения процента выхода.

Факторное пространство первой стадии диффузии ( $T_1, t_1$ ) было разбито на четыре сектора. Во втором и четвертом секторах проводились начальные фазы исследований. Поскольку процесс диффузии управляем, то чтобы ускорить оптимизацию, были выбраны значительные интервалы варьирования факторов. Это позволило надежно и быстро (2—3 цикла) выделить основные факторы и определить направление крутого восхождения по каждому сектору. Поверхность отклика  $x_{дл}$  является плоскостью, возвышающейся в направлении увеличения  $T_1$  и  $t_1$ . Градиенты уменьшения  $r_{от}$  по секторам будут параллельны или близки к параллельным, а направления градиентов процента выхода годных кристаллов будут встречными и пересекутся, так как это связано с различным механизмом брака в крайних точках исследуемого факторного пространства по причине пробивного напряжения стока.

Во втором и четвертом секторе были проведены опыты начальных фаз исследований. Каждая фаза состояла из четырех циклов. В цикле по условиям каждого опыта изготавливалась одна партия микросхем. Основные параметры ТП и электрические параметры микросхем измерялись и обрабатывались по общей методике проведения исследований. Расчет эффектов факторов  $L_{ф}$ ,  $U_0$ ,  $T_1$  и  $t_1$  проводился первый раз после вторых циклов, а затем после третьего (с учетом всех трех циклов) и после четвертого (с учетом всех четырех циклов) по программе пошаговой множественной регрессии. В табл. 1 приведены обобщенные расчеты циклов первой фазы четвертого сектора по  $r_{от}$ .

Температура процесса оказывает значительное влияние на сопротивление канала открытого транзистора  $r_{от}$ . Во всех циклах температура выделялась как значимый фактор (возможно, было принять решение уже после 2-го цикла), а другие факторы оставались незначительными при  $\alpha = 0,05$ . В четвертом цикле температура  $T_1$  и длительность процесса  $t_1$  были выделены как значимые факторы (при  $\alpha = 0,05$   $t_{кр} = 2,179$ ).

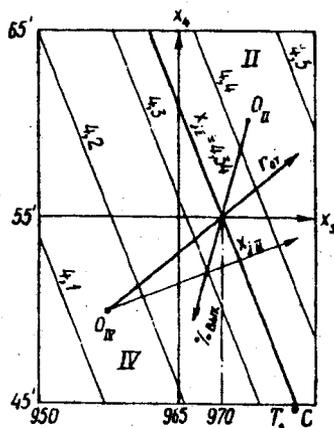


Таблица 1. Обобщенные данные

Номер цикла	Номер переменной	Фактор	$\bar{M}$	S	Номер введенной переменной	SS <sub>ш</sub>
1—2	1	$r_{от}$	82,5	8,7	3	469
	2	$L_{ф}$	13,5	0,8	2	28,9
	3	$T_1$	957,5	8,0	5	3,9
	4	$t_1$	50,0	5,3	4	0,3
	5	$U_0$	4,4	0,27	—	—
3	1	$r_{от}$	82,6	8,2	3	548,9
	2	$L_{ф}$	13,6	0,6	2	57,7
	3	$T_1$	957,5	7,8	5	9,6
	4	$t_1$	50,0	5,2	4	4,0
	5	$U_0$	4,4	0,22	—	—
4	1	$r_{от}$	81,8	8,6	3	576,7
	2	$L_{ф}$	13,7	0,7	4	184,6
	3	$T_1$	957,5	7,75	2	23,3
	4	$t_1$	50,0	5,2	5	0,03
	5	$U_0$	4,5	0,25	—	—

Примечание.  $\bar{M}$  — среднее значение; S — среднее квадратическое отклонение; SS<sub>общ</sub> — общая сумма квадратов отклонений; SS<sub>ш</sub> — сумма квадратов, сокращенная на данном шаге;  $K_{кор}$  — множественный коэффициент корреляции; F — расчетное значение критерия Фишера; S<sub>ош</sub> — стандартная ошибка оценки; t — расчетное значение критерия Стьюдента.

Поскольку градиентный метод оптимизации неинвариантен к системе координат, было выполнено ортогональное преобразование переменных. Линейную модель в пространстве нормированных переменных  $x_3(T_1)$  и  $x_4(t_1)$  можно записать как

$$r_{от} = 82,29 - 6x_3 - 3,39x_4.$$

Для уменьшения  $r_{от}$  необходимо в центре области рассчитать линейное приближение градиента и в направлении наискорейшего спуска выполнить опыты по приближению к оптимуму. Поскольку оба коэффициента отрицательны, то для уменьшения  $r_{от}$  необходимо увеличить температуру и длительность процесса. Для шага температуры T процесса 2,5° С координаты дальнейших опытов в направлении линейного приближения градиента в центре фазы четвертого сектора представлены в табл.2. Известно, что с увеличением глубины диффу-

по первой фазе (четвертый сектор).

$SS_{\text{общ}}$	$K_{\text{кор}}$	$F$	$S_{\text{ош}}$	$\hat{a}_i$	$S_i$	$t$
534	0,937	43,3	3,29	-0,835	0,156	-5,324
	0,960	34,6	2,9	3,194	1,593	2,004
	0,956	20,4	—	Незначимый	—	—
	0,945	11,6	—	»	—	—
	—	—	—	—	—	—
741	0,861	28,6	4,4	-0,75	0,17	-4,523
	0,895	20,3	4,05	4,00	2,04	1,694
	0,891	13,1	—	Незначимый	—	—
	0,881	9,0	—	»	—	—
	—	—	—	—	—	—
1118,4	0,718	14,9	6,2	-0,8	0,17	-4,58
	0,811	13,9	5,4	-0,68	0,26	-2,59
	0,810	9,4	—	Незначимый	—	—
	0,792	6,5	—	»	—	—
	—	—	—	—	—	—

зии уменьшается  $r_{\text{от}}$ . Поэтому, двигаясь по поверхности отклика глубины диффузии  $x_{\text{дл}}$  в направлении крутого восхождения, можно обеспечить эффективное уменьшение длины канала МДП транзистора. Поверхность отклика  $x_{\text{дл}}$  является плоскостью, и линейное приближение градиента будет перпендикулярным линиям равного уровня  $x_{\text{дл}}$  (см. рисунок).

Направления быстрого уменьшения сопротивления  $r_{\text{от}}$  и увеличения  $x_{\text{дл}}$  не совпадают. Это может быть следствием недостаточного количества циклов в фазе. В результате направление дальнейших опытов определено не точно. На пятом шаге оптимизации (табл.2) рассчитанные условия первой стадии диффузии по модели  $r_{\text{от}}$  должны быть  $T_1 = 970^\circ \text{C}$ ,  $t_1 = 55$  мин, а по модели  $x_{\text{дл}}$  -  $T_1 = 970^\circ \text{C}$ , и  $t_1 = 52,5$  мин. Центр второй фазы выберем с учетом обеих моделей:  $T_1 = 970^\circ \text{C}$  и  $t_1 = 55$  мин. Аналогичный анализ был проведен по первой фазе второго сектора.

Таблица 2. Условия опытов в направлении крутого восхождения по  $r_{от}$

Переменные	Модель $r_{от}$		Модель $x_{II}$	
	$x_3$	$x_4$	$x_3$	$x_4$
Основной уровень	957,5	50	970	55
Интервал варьирования	7,5	5	20	10
Верхний уровень	965	55	990	65
Нижний уровень	950	45	950	45
$\hat{a}_i$	-6,0	-3,395	0,236	0,092
Значение $\hat{a}_i$ , умноженное на интервал варьирования	-45	-16,975	4,712	0,92
Шаг при изменении $x_3$ на 2,5	-2,5	-0,942	2,5	0,487
Округленное значение шага	-2,5	-1,0	2,5	0,5
<i>Опыты в направлении крутого спуска</i>				
Центр фазы	957,5	50	957,5	50
1	960	51	960	50,5
2	962,5	52	962,5	51
3	965	53	965	51,5
4	967,5	54	967,5	52
5	970	55	970	52,5

Примечание. В данных условиях  $x_{II} = 4,34$ ;  $r_{от} = 70,6$ . В опытах в направлении крутого спуска для точки 5 учитывались величины  $\hat{y}_1 = 68,9$ ,  $\hat{y}_2 = 4,33$ .

Фазы исследований во втором и четвертом секторах были дополнены экспериментами в точках  $T_1 = 950^\circ \text{C}$ ,  $t_1 = 65$  мин и  $T_1 = 980^\circ \text{C}$ ,  $t_1 = 45$  мин. По результатам экспериментов был сформирован план, близкий к  $D$ -оптимальному, и проведена совместная обработка. Уточненное линейное приближение градиента в центре факторного пространства первой стадии диффузии  $T_1 = 965^\circ \text{C}$ ,  $t_1 = 55$  мин было рассчитано по линейной модели

$$r_{от} = 70,67 - 12,78x_3 - 4,88x_4,$$

и было еще раз уточнено направление крутого спуска по  $r_{от}$ . По результатам анализа была подтверждена правильность выбора центра второй фазы исследований с координатами  $T_1 = 970^\circ \text{C}$ ,  $t_1 = 55$  мин.

Поскольку основная задача оптимизации ТП — повышение процента выхода, то соответствующий анализ первых фаз второго и четвертого секторов был проведен по проценту выхода годных микросхем. Линейные приближения градиентов по проценту выхода для второго и четвертого секторов показаны на рисунке. Центр второй фазы по проценту выхода совпадает с центром по сопротивлению  $r_{от}$ .

Вторая фаза исследования вокруг точки с координатами  $970^\circ \text{C}$  и 55 мин не выявила преимущественного направления возрастания процента выхода годных ИМС, но полученные результаты были лучше, чем при

других сочетаниях ТФ. Сопротивление открытого транзистора было близко к расчетному и наблюдался устойчивый процент выхода годных кристаллов. Эти условия первой стадии диффузии были выбраны в качестве оптимальных.

Из проведенных исследований следует, что для определения направления смещения поверхности отклика относительно ранее выбранного центра настройки достаточно было восьми опытов, а для точного определения нового центра настройки — 16 опытов.

Поступила в редколлегию 25.03.92

УДК 621.396.6

Н.М.ПРИЩЕПА, канд. техн. наук, доц.,  
С.Н.ДЕМЕНИН, инж.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА НАДЕЖНОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Проведены экспериментальные исследования влияния оптимизации технологического процесса диффузии при формировании областей истока и стока МОП транзистора на основные электрические параметры и надежность микросхемы.

С целью оценки влияния оптимизации технологического процесса (ТП), выразившейся в изменении условий проведения ряда технологических операций, на надежность МОП интегральных микросхем (ИМС), были проведены сравнительные испытания ИМС, изготовленных до оптимизации и в оптимальных условиях ТП. На испытания было поставлено 90 шт. ИМС, изготовленных до оптимизации, и 315 шт. ИМС, изготовленных в оптимальных условиях ТП. Все ИМС предварительно прошли полный производственный цикл и были приняты представителем заказчика.

Программа предусматривала ускоренные испытания с переменной нагрузкой до  $1,5 U_{н.н}$  при трех температурных режимах: 25, 125 и 140°C. Схема испытаний показана на рис. 1. По оси абсцисс отложена реальная длительность испытаний  $t_n$  и длительность  $t_{пр}$ , приведенная к нормальным условиям с учетом коэффициентов ускорения. По оси ординат показано отношение испытательного напряжения, подаваемого на сток МОП транзистора, к номинальному. В процессе испытаний на затвор транзис-

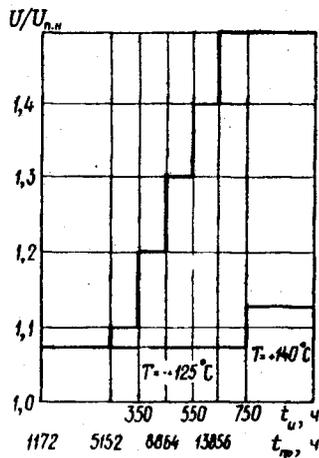


Рис. 1