

Д.К. МЕЛКОНЯН

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТРАНЗИСТОРНОЙ СТРУКТУРЫ В МИКРОСХЕМАХ

Проведена экспериментальная оценка точности параметров интегральных микросхем по методу нерегулярного планирования экспериментов. Рассмотрен процесс формирования р-п перехода в транзисторной структуре. Осуществлен синтез приближенной модели диффузионного процесса, обеспечивающий удовлетворительную точность в необходимых диапазонах изменения параметров интегральных микросхем.

Ключевые слова: диффузионный процесс, электрофизические параметры, преобразование распределения случайных величин.

При завершении диффузионного процесса формирования р-п переходов с заданными технологическими параметрами получены структуры полупроводниковых приборов в микросхемах с многочисленными электрофизическими параметрами. Выявление функциональных зависимостей и количественных соотношений между упомянутыми параметрами с заданной точностью является главной задачей данной работы, решение которой даст возможность регулировать величину рассматриваемого параметра, используя обратную связь последнего с технологическими параметрами термического процесса диффузии.

Основными факторами для практической оценки точности параметров являются объем экспериментов N и точность законов преобразования случайных распределений полученных входных и выходных параметров.

Точность полученных при производстве микросхем параметров и объем вычислений на ЭВМ в процессе оптимизации заданных параметров, главным образом, зависят от использования точной и синтезированной математической модели рассматриваемого объекта.

Для составления математической модели транзисторной структуры необходимо предварительно определить состав входных и выходных параметров. То есть, возникает задача синтеза приближенной модели диффузионного процесса, которая обеспечивала бы необходимую точность в данном диапазоне изменения важнейших параметров транзисторной структуры.

Основные выходные параметры транзисторной структуры приведены в табл. 1.

Таблица 1

x_j	Металлургическая граница p-n перехода
R_s	Удельное поверхностное сопротивление диффузионного слоя n типа
$N_s(0,75x_j)$	Концентрация легирующей донорной примеси на глубине $x = 0,75x_j$

Р асчет микросхем проводится на конкретной совокупности технологических факторов.

На указанные выходные параметры влияют в основном факторы, приведенные в табл. 2. Причем модель удовлетворяет требуемой точности в диапазоне изменения этих параметров, фигурируемых в табл.2.

Таблица 2

2a	Ширина щели	(0,33±50,1) мкм
T ₁	Температура загонки	1200 ±50 °C
t ₁	Время загонки	45 ±5 15 с
T ₂	Температура разгонки	1100 ±5 50 °C
t ₂	Время разгонки	30 ±5 5 мин
N _s	Поверхностная концентрация донорной примеси	10 ²² ±5 0,5 10 ²⁰ см ⁻³
N _{сподл}	Концентрация примеси в подложке	10 ¹⁷ ±5 0,8 10 ¹⁷ см ⁻³

Рассмотрим математическую модель данного процесса. Исследуемая структура (рис.1б) представляет собой однородно легированную полупроводниковую подложку p типа с концентрацией акцепторной примеси N_{сподл}, в которой с помощью двухстадийной диффузии через щель в маскирующем окисле шириной 2a сформирован слой противоположного типа проводимости. Результирующее распределение легирующих примесей находилось с помощью специальной программы, предназначенной для расчета двумерного распределения примеси в локальном диффузионном слое, сформированном в результате проведения многоэтапного термического процесса. В программе учтены следующие высокотемпературные технологические операции: диффузия примеси из внешнего источника постоянной концентрации через щель в маскирующем окисле (загонка); перераспределение примеси при последующих термических процессах (разгонка, окисление, отжиг и др.). При формировании диффузионной структуры, рассчитываемой с помощью указанной программы, в качестве примесей, определяющих тип проводимости, допускается использовать бор, фосфор, мышьяк и сурьму. Для этих примесей также учитывается зависимость коэффициентов диффузии от температуры. Исследуемая структура и профиль распределения примеси для тестовой задачи приведены на рис.1.

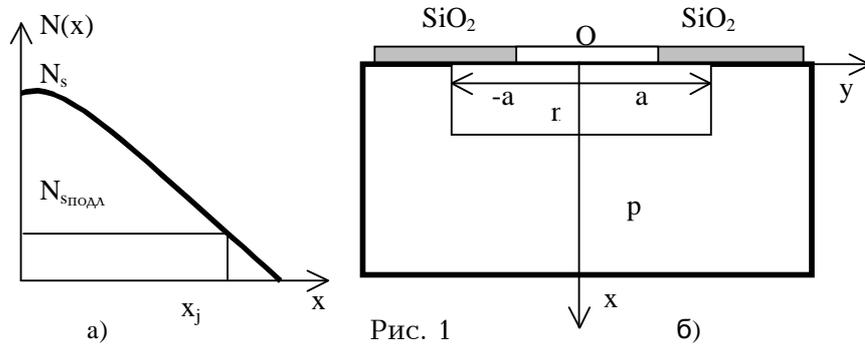


Рис. 1

Для расчета распределения каждой примеси применяется одна и та же математическая модель последовательных диффузионных процессов, обусловленных проведением указанных технологических операций, а именно: при вычислении распределения каждой отдельно взятой примеси анализируемая математическая модель представляет собой совокупность последовательно решаемых краевых задач для двумерного уравнения диффузии в изотропной среде:

$$\frac{dN_i}{dt} = D_i \left(\frac{d^2 N_i}{dx^2} + \frac{d^2 N_i}{dy^2} \right), \quad (1)$$

$$N_i(0, x, y) = N_{i-1}(t_{i-1}, x, y), \quad (2)$$

$$0 \leq t \leq t_i; 0 \leq x \leq L_{x_i}, 0 \leq y \leq L_{y_i},$$

$$\left[a_i D_i \frac{dN_i}{dx} - \beta_i W_i N_i \right]_{x=L_{x_i}} = \gamma_i N_i^0, \quad (3)$$

$$\frac{dN_i}{dy} \Big|_{y=0} = 0, \quad (4)$$

$$N_i(t, x, L_{y_i}) = 0, \quad (5)$$

$$N_i(t, 0, y) = 0, \quad (6)$$

где i — порядковый номер термической операции; t_i, t_{i-1} — время проведения текущей и предыдущей термических операций; $N_i(t_i, x, y), N_{i-1}(t_{i-1}, x, y)$ — распределение примеси по окончании текущей и предыдущей термических операций; D_i — коэффициент диффузии, являющийся известной функцией от температуры; x, y — пространственные координаты; t — время; L_{x_i} и L_{y_i} — размеры рассматриваемой подобласти вдоль осей координат x и y ; W_i — коэффициент испарения примеси; β_i, γ_i — коэффициенты, определяемые типом граничных условий на поверхности полупроводниковой структуры; N_i^0 — концентрация i -го внешнего источника.

Соотношение (2) задает начальное условие для уравнения диффузии, причем его правая часть представляет собой решение аналогичной краевой задачи для

предыдущей термической операции, или тождественно равна нулю (термическая операция загонки примеси), или задана функцией, полученной вне рассматриваемой математической модели.

Граничное условие (3) записано для поверхности полупроводниковой структуры: внутри щели оно учитывает испарение примеси с поверхности. Вне щели условие (3) имеет вид

$$D_i \frac{dN}{dx} - W_i N_i = 0, \quad x = L_{x_i} = 0; \quad a \leq y \leq L_{y_i}$$

и характеризует отражение примеси от маскирующего слоя окисла с коэффициентом испарения W_i .

Условие (4) учитывает симметрию задачи относительно оси y . Соотношения (5) и (6), в свою очередь, определяют краевые условия на периферии анализируемой подобласти распространения отдельной примеси.

Таким образом, полная точная математическая модель диффузионной структуры представляет собой совокупность краевых задач, каждая из которых состоит из различных сочетаний основного уравнения в частных производных (1) и условий (2)—(6).

Краевая задача (2)—(5) аппроксимировалась на равномерной вдоль осей координат x и y пространственной сетке. Полученная при этом система алгебраических уравнений решалась методом прогонки.

Метод статистического анализа микросхем допускает задание исходной статистической информации в формах, не требующих каких-либо предварительных сложных математических обработок и исследований. Для нашего случая формой задания исходной информации является комбинация таблиц и гистограмм. При этом часть величин корреляционной матрицы и коэффициенты корреляции, дополняющие корреляционную матрицу, вводятся на основании гипотетических соображений, либо по данным предварительных расчетов.

Другая особенность метода состоит в том, что современные программные средства позволяют сравнительно просто моделировать распределение по гауссовскому закону случайных величин (j с заданными математическими ожиданиями m_j и средними квадратическими отклонениями σ_j). В связи с этим решают известную задачу преобразования исходных случайных величин x_j , имеющих законы распределения (заданные в виде гистограмм), в общем случае отличные от гауссовского, в распределение по гауссовскому закону случайных величин (j).

Вид распределения примесей в результате решения описанной точной математической модели показан на рис. 1а.

Синтез математической модели формирования диффузионной структуры приведен в виде гистограмм рис 2 - рис 5, где использованы гауссовские законы распределения 4-х компонент вектора $x = [a, T1, t1, T2, t2, N_s, N_{\text{сподл}}]$, характеризующие средними значениями x_i и средними квадратическими отклонениями σ_{x_i} , приведенными в табл. 3.

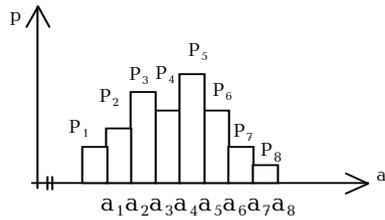


Рис.2.

$a_1 = 1162; \dots; a_9 = 1240$; $p_1 = 0.05$;
 $p_2 = 0.13$; $p_3 = 0.11$; $p_4 = 0.22$;
 $p_5 = 0.18$; $p_6 = 0.16$; $p_7 = 0.17$;
 $p_8 = 0.05$

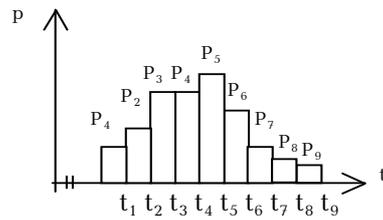


Рис.3.

$t_{1-1} = 35.6; \dots; t_{1-10} = 56.8$; $p_1 = 0.07$;
 $p_2 = 0.08$; $p_3 = 0.17$; $p_4 = 0.17$; $p_5 = 0.20$;
 $p_6 = 0.16$; $p_7 = 0.08$; $p_8 = 0.04$; $p_9 = 0.03$

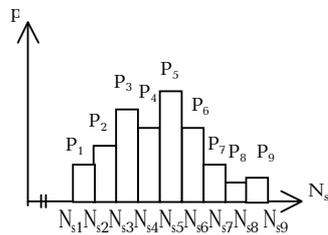


Рис.4

$N_{s-1} = 0.664$; $N_{s-10} = 1.435$; $p_1 = 0.05$;
 $p_2 = 0.1$; $p_3 = 0.17$; $p_4 = 0.15$; $p_5 = 0.24$;
 $p_6 = 0.14$; $p_7 = 0.08$; $p_8 = 0.03$; $p_9 = 0.04$

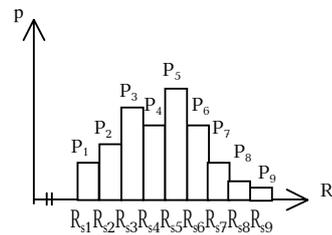


Рис.5.

$R_{s-1} = 2.6; \dots; R_{s-10} = 6.20$; $p_1 = 0.05$;
 $p_2 = 0.1$; $p_3 = 0.18$; $p_4 = 0.20$; $p_5 = 0.18$;
 $p_6 = 0.16$; $p_7 = 0.07$; $p_8 = 0.05$; $p_9 = 0.01$

Таблица 3

Параметр	$a, \text{мкм}$	$T1, ^\circ\text{C}$	$t1, \text{с}$	$T2, ^\circ\text{C}$	$t2, \text{мин}$	$N_s, \text{см}^3$	$N_{s\text{норм}}, \text{см}^3$
\bar{x}_j	0.33	1200	45	1100	30	$1 \cdot 10^{20}$	$1 \cdot 10^{17}$
σ_{xi}	0.167	16.67	5.0	16.67	1.67	$0.167 \cdot 10^{20}$	$0.167 \cdot 10^{17}$

Для каждого вектора x по точной математической модели на ЭВМ проводился расчет вектора $y = (x_j, R_s)$, значения которого приведены в табл. 5. Расчет каждого вектора y потребовал 1,5 мин. Гистограммы некоторых составляющих вектора X приведены на рис.2 - 4, а гистограмма составляющей R_s вектора y — на рис.5, где p_i - вероятности составляющих вектора x_i в заданном диапазоне изменения.

Далее проводится определение прямых и обратных законов преобразования исходных распределений в гауссовское, предложенного в [3], в результате чего устанавливается функциональная связь “новых” выходных параметров σ_{yi} с “новыми” входными параметрами η_i .

Параметры σ_{y_i} между собой не коррелированы, подчиняются гауссовским законам распределения, имеют нулевые математические ожидания и единичные средние квадратические отклонения. Параметры η_i также не коррелированы, и для них $m_{\eta_i} = 0$ и $\sigma_{\eta_i} = 1$, поэтому, как следует из теоремы о свертках, эта функциональная связь может быть только линейной. Следовательно, синтезированная по методу нерегулярного планирования экспериментов модель формирования базовой области имеет вид

$$\sigma_{y_1} = 0,09\eta_{x_1} + 0,01\eta_{x_2} + 0,02\eta_{x_3} + 0,85\eta_{x_4} + 0,08\eta_{x_5} + 0,18\eta_{x_6} - 0,21\eta_{x_7},$$

$$\sigma_{y_2} = 0,004\eta_{x_1} - 0,38\eta_{x_2} - 0,32\eta_{x_3} + 0,1\eta_{x_4} - 0,1\eta_{x_5} - 0,86\eta_{x_6} - 0,07\eta_{x_7}.$$

Использование данных уравнений совместно с законами преобразований позволяет для любого вектора x получить значение вектора y . В табл.5 приведен ряд векторов x , для которых по точной и синтезированной моделям рассчитаны векторы y .

Таблица 4

N п/п	Xj	Rs
1	1,6	5,19
2	1,8	3,47
3	1,6	4,11
4	2,2	4,15
5	1,6	3,49
...
96	2,0	2,87
97	1,8	3,83
98	1,8	4,36
99	1,6	4,00
100	1,8	4,15

Таблица 5

X _i	Точная модель		Синтезированная модель			
	xj	Rs	N = 100		N = 50	
X(1)	1,6	5,19	1,589	5,223	1,701	4,863
X(2)	1,4	3,74	1,509	3,714	1,617	3,853
X(3)	1,4	3,23	1,498	3,233	1,433	3,211
X(4)	1,4	4,23	1,480	4,139	1,643	4,194
X(5)	1,4	4,30	1,497	4,394	1,619	4,313
X(6)	1,4	4,26	1,385	4,160	1,445	4,253
X(7)	2,2	4,31	2,223	4,485	2,182	4,439

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Максимальная относительная ошибка, определяемая как $\Delta_j = (|y_{jT} - y_{jC}|) / y_{jT} \cdot 100\%$ (где y_{jT} — значение j-й составляющей вектора y , рассчитанное по точной модели; y_{jC} — значение j-й составляющей, рассчитанное по синтезированной модели для x_j), не превышает 7%, а для Rs — 4,5%.

Полученные результаты подтверждают удовлетворительную точность применяемого метода. Следует отметить, что расчет по синтезированной модели вектора y при любом векторе x на ЭВМ занимает всего около 0,2 с, в то время как расчет по точной модели требует 0,15 мин. С целью исследования влияния числа экспериментов N на результаты расчетов был проведен синтез модели при всех прежних условиях, но при $N=50$. Результаты расчетов приведены также в

табл.3, матрица коэффициентов синтезированной для этого случая модели — в табл.б.

Таблица 6

η_n	η_{x1}	η_{x2}	η_{x3}	η_{x4}	η_{x5}	η_{x6}	η_{x7}
σ_{y1}	0,18	-0,09	0,18	0,87	0,14	0,02	0,13
σ_{y2}	-0,03	-0,36	-0,20	0,22	0,04	-0,87	0,04
η_n	η_{x1}	η_{x2}	η_{x3}	η_{x4}	η_{x5}	η_{x6}	η_{x7}
σ_{y1}	0,18	-0,09	0,18	0,87	0,14	0,02	0,13
σ_{y2}	-0,03	-0,36	-0,20	0,22	0,04	-0,87	0,04

Из расчетных данных следует, что ошибка для x_j составляет 17%, для R_s — 6 %. Следовательно, при уменьшении N точность метода падает, однако даже при $N=50$ ее можно считать удовлетворительной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **David C. Kay & John R.** Levine Graphics File Formats. Second edition, Windcrest/McGray-Hill. 1995.-243 p.
2. **Devadas S., Ghosh A. and Keutrer K.** Logic Synthesis. McGrow-Hill series on computer engineering. - New York, 1994.-628p.
3. **Эйзен С., Афифи А.** Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ / Пер. с англ; Под ред. Г.П. Башарина.—М.: Мир,1998.-488 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 15.03.2003.

Դ.Կ. ՄԵԼԿՈՆՅԱՆ

ՏՐԱՆԶԻՍՏՈՐԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ՁԵՎԱՎՈՐՄԱՆ ՃՇՏՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ՄԻԿՐՈՍԽԵՄԱՆԵՐՈՒՄ

Տրված է ինտեգրալ միկրոսխեմաների պարամետրերի չափման ճշտության փորձնական գնահատական՝ տրանզիստորներում p-n անցման ձևավորման ճշգրիտ և սինթեզված մաթեմատիկական մոդելների օգտագործմամբ: Սինթեզված մոտավոր մեթոդն ապահովում է բավարար ճշտություն:

D.K. MELKONYAN

ESTIMATION OF TRANSISTOR STRUCTURE FORMATION ACCURACY IN MICROCIRCUITS

Experimental estimation of integral microcircuit parameter accuracy treated by a method of irregular experiment planning is given. P-n junction formation process in the transistor structure is viewed. An approximate model synthesis of diffusion process which provides satisfactory accuracy in necessary ranges for changing basis integral microcircuit parameters is realized.