

ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМИГРАЦИИ

И. Г. Шалейко

В последнее время наблюдается устойчивая тенденция повышения производительности полупроводниковых приборов за счет уменьшения характерных размеров элементов интегральных микросхем и создания более плотноупакованных многоуровневых микроэлектронных структур. Тем самым на смену микро- и субмикроэлектронике приходит наноэлектроника. Это обуславливает возрастающую актуальность проблемы надежности элементов нано- и микроэлектроники и, как следствие, моделирования процессов их разрушения и расчета долговечности. Один из основных видов отказов в работе интегральных микросхем связан с электромиграцией вакансий (ионов) в проводящих элементах, вызывающей их разрушение. Электромиграция – это процесс массопереноса в результате перескоков атомов на границах зерен в поликристаллическом материале под действием электрического тока.

Современное представление о процессе электромиграции базируется на следующих предположениях:

1. Основной причина, приводящая к электромиграции, является структурная неоднородность проводника.
2. Присутствует аномальный перенос вещества – образуются тонкопленочные микротрещины либо наросты в местах, где есть нарушение электромиграционного потока.

Развитие микротрещин с течением времени приводит к изменению электросопротивления проводника, а следовательно, к росту локальной температуры, что ведет к росту электромиграционного потока. Таким образом, микротрещина может достаточно быстро развиваться во времени и привести к отказу (рис.1).

Сама по себе электродиффузия не может привести к отказу (расплаву, разлому дорожки). Для того чтобы возник отказ вследствие обрыва проводника, необходимо нарушение непрерывности ионного потока. Причинами такого нарушения являются:

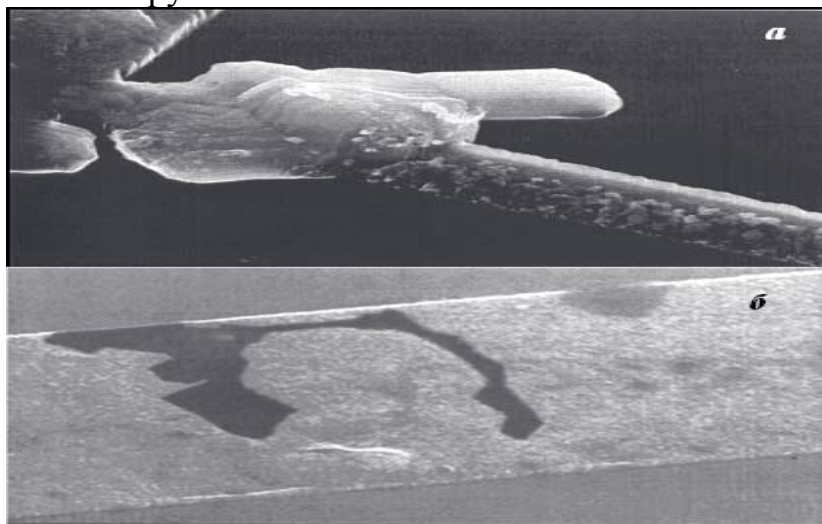


Рис.1. Нарушения проводника вследствие электромиграции:
а – наросты, б – микротрещины

- зернограницная структура проводника (несовпадение границ, по которым стекаются и отходят ионные потоки в каком-либо поперечном сечении проводника);
- контакт металлов с различными коэффициентами диффузии;
- контакт областей с различными температурами (процесс является термоактивированным).

Целью работы было исследование физико-статистической модели процесса электромиграции в тонкопленочной металлизации субмикронных СБИС методом имитационного моделирования.

Для проведения вычислительного эксперимента был использован следующий алгоритм моделирования:

- формирование методом Монте-Карло стохастической зернограницной структуры тонкопленочного проводника;
- расчет величины электромиграционного потока в сечениях тонкопленочного проводника;
- вычисление величины приращения трещины с учетом изменения сопротивления и температуры тонкопленочного проводника.

Используя программу Em_Model, было проверено распределение времени до отказа прибора на закон распределения. Для этого была сгенерирована выборка объемом 1000 элементов с исходными данными, соответствующим параметрам, используемым в современной субмикронной электронике. Для генерации времени работы до отказа было использовано эмпирическая зависимость, предложенная Дж. Блэком (рис. 2).

$$t = \frac{A}{J^n} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)$$

где A – это константа, основанная на перекрестной области соединения, J – плотность тока, E_a – энергия активации (0.7 эВ для зернограницной диффузии в алюминии), k – постоянная Больцмана, T – температура, n – фактор.

Методами Хи-квадрат и Колмогорова-Смирнова экспериментально полученное распределение было проверено на сходимость с нормальным, лог-нормальным, Диффузионно-Марковским законами распределения и с распределением Вейбулла. Наиболее схоже экспериментальное распределение с нормальным законом распределения и с распределением Вейбулла.

Преобразуя это выражение к линейному виду и решив регрессионное уравнение, можно получить зависимость параметров сопротивления (B, n) от параметров структуры системы, таких как: температура, плотность тока, ширина и толщина проводника. Параметры структуры изменялись в следующих пределах:

-Температура, $T=375 \div 475$ К

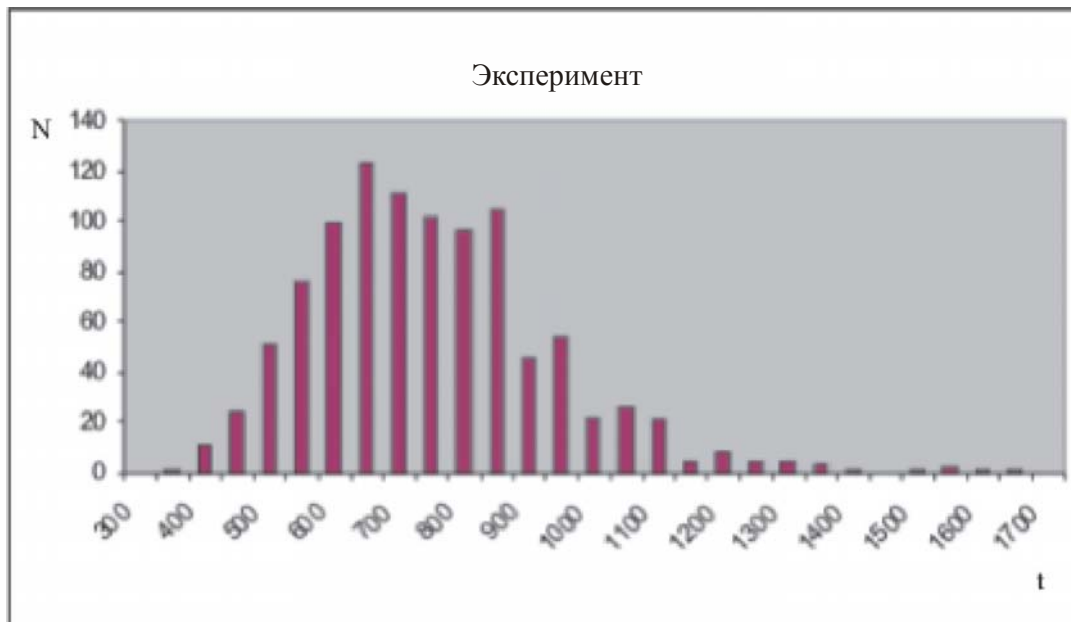


Рис.2. Гистограмма времени до отказа системы

-Ширина проводника: $w=0,3 \div 1$ мкм

-Толщина проводника: $h=0,3 \div 2$ мкм

-Плотность тока: $j=5 \div 50 \cdot 10^9$ А/м²

Полученные зависимости приведены в таблице.

Таблица

Зависимость параметров сопротивления (В, n) от параметров системы (ширины и толщины проводника, плотности тока, температуры)

	В	N
T	$B = 3E-51T^{18,118}$	$n = 0,0087T - 2,2864$
W	$y = 9E-05 \ln(x) + 0,0001$	$n = -0,4807w + 1,513$
H	$B = -8E-06h + 0,0001$	$n = -0,0844h + 1,1516$
J	$B = 0,0004e^{0,0638j}$	$n = 0,0112j + 1,1674$

Из проведенного анализа видно, что показатель степени имеет линейную зависимость от параметров структуры, а постоянная скорости процесса имеет более сложный характер: степенной и логарифмический.

В работе был изучен процесс электромиграции, алгоритм его протекания, изменения сопротивления и распределения температуры в пленке при протекании процесса электромиграции. В ходе вычислительного эксперимента проведены исследования и получены зависимости времени работы до отказа тонкопленочных проводников от параметров эксплуатационного режима, таких как плотность тока, температура и от параметров структуры при постоянном токе, таких как ширина и толщина проводника. Полученные зависимости хорошо согласуются с аналитической формулой Блэка, описывающей время работы до отказа.

Литература

1. *Black, J. R.* Electromigration – A brief survey and some recent results.// IEEE Transactions on Electronic Devices (April 1969), pp. 338-347.
2. *Black J.R.* Electromigration failure modes in aluminum metallization for semiconductor devices // Proc.IEEE.- 1969.- vol.57, № 9.- p.1587 – 1594
3. *Shoen J.M.* Monte Carlo calculations of structure - induced electromigration failure // J. Appl. Phys. 51(1). January 1980. P.513-521.
4. *Борздов В.М., Лабуда А.А., Молофеев В.М., Петрович Т.А.* Влияние структурных свойств тонких алюминиевых пленок на их надежность при электромиграции // Вакуумная техника и технология. 1994. Т. 4. № 4. С.56-58.
5. *Rodbell K.P., Rodriguez M.V., Ficalora P.J.* The kinetics of electromigration// J.Appl.Phys. Vol.61. № 8, 15 April 1987. P.2844-2848
6. *Blech I.A.* Electromigration in thin aluminum films on titanium nitride // J.Appl.Phys., 47, 4, pp. 1203-1208 (1976).