

Определение электромиграционных параметров металлических проводников на основе проведения ускоренных испытаний

С.О. Сафонов^{1,2}, М.Г. Путря², С.В. Фоминых¹

¹ОАО «Ангстрем-Т» (г. Москва)

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Determination of Electromagnetic Parameters of Metallic Conductors Based on Performed Accelerated Testing

S.O. Safonov^{1,2}, M.G. Putrya², S.V. Fominykh¹

¹JSC «Angstrom-T», Moscow

²National Research University of Electronic Technology, Moscow

Предложен новый метод определения электромиграционных параметров – энергии активации и показателя плотности тока. Для проведения испытаний использовались многослойные металлические проводники TiN/Al–Si(1%)/TiN с пассивирующим слоем SiO₂. Разработанный метод позволяет ускорить и удешевить процесс проведения электромиграционных испытаний за счет отказа от корпусирования образцов и использования высокотемпературных климатических камер.

Ключевые слова: электромиграция; металлизация; надежность; энергия активации.

A new method for determining the electromigration parameters – the activation energy and the current density exponent has been proposed. The multi-layer conductors TiN/Al–Si(1%)/TiN for the tests with SiO₂ passivation layer have been used. The method permits to accelerate and to reduce the price of electromigration tests due to the lack of need for packing the samples and for using the high temperature climatic chambers.

Keywords: electromigration, metallization, reliability, activation energy.

Введение. Прогнозирование надежности металлических проводников интегральных схем – одна из ключевых проблем в современной микроэлектронике. На надежность оказывает влияние множество конструктивных и технологических факторов: геометрическая форма и химический состав проводника, его расположение в многослойной структуре интегральной схемы, тип и толщина межслойного диэлектрика, температура, влажность и т.д. Энергия активации характеризует совокупное влияние этих факторов на срок службы металлизации. Поэтому неверная оценка энергии активации может привести к неоправданному занижению рассчитываемых надежностных

характеристик, одной из которых является медиана наработки до отказа t_{50} [1]. Данная величина статистическая и вычисляется с помощью уравнения Блэка:

$$t_{50} = Aj^{-n} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \quad (1)$$

где A – постоянная; j – плотность тока; n – показатель степени плотности тока; E_a – энергия активации; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Для оценки надежности металлических проводников необходимо определить значения энергии активации E_a , показателя степени плотности тока n и постоянной A . Существует несколько методов для нахождения значений E_a и n [2, 3], в которых используется классический алгоритм проведения испытаний. Для определения энергии активации E_a вычисляют среднее время наработки до отказа t_{50} по крайней мере при трех различных значениях температуры и постоянной плотности тока j . В этом случае значение E_a определяют по наклону прямой. На графике по оси ординат откладывается $\ln t_{50}$, а по оси абсцисс – $1/T$. Для вычисления показателя степени плотности тока n определяют значения среднего времени наработки до отказа t_{50} по крайней мере при трех различных значениях плотности тока и постоянной температуре, которая поддерживается с помощью климатической камеры. На графике по оси ординат откладывается $\ln(t_{50})$, а по оси абсцисс – $\ln(j)$. Значение n определяют по наклону прямой. Общим недостатком данного метода является применение высокотемпературных климатических камер и необходимость корпусирования тестовых структур.

Цель настоящей работы – разработка и апробация метода, обеспечивающего определение значений энергии активации и показателя степени плотности тока без проведения испытаний корпусированных тестовых структур в высокотемпературных климатических камерах.

Описание метода. Суть предлагаемого метода заключается в том, что для определения значений среднего времени наработки до отказа t_{50} проводят (без использования внешнего источника тепла) электромиграционные испытания, при которых нагрев тестовых структур на пластине осуществляется за счет саморазогрева протекающим током [4, 5]. В этом случае значение температуры проводника T при испытаниях задается с помощью протекающего тока j , поэтому изменение значения температуры приведет к изменению тока j . В связи с этим для определения параметров A , n , E_a достаточно использовать всего лишь три условия для измерений: $(j_1; T_1)$, $(j_2; T_2)$, $(j_3; T_3)$, где j_1, j_2, j_3 – различные значения плотности тока, а T_1, T_2, T_3 – различные значения температуры. В итоге получаем систему уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} t_{50_1} = Aj_1^{-n} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT_1}\right), \\ t_{50_2} = Aj_2^{-n} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT_2}\right), \\ t_{50_3} = Aj_3^{-n} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT_3}\right). \end{cases} \quad (2)$$

Разделив первое уравнение в системе (2) на второе и взяв натуральный логарифм от обеих частей, получим выражение для n :

$$n = \left[\ln \left(\frac{t_{50_1}}{t_{50_2}} \right) - \frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \left[\ln \left(\frac{j_2}{j_1} \right) \right]^{-1}. \quad (3)$$

Разделив первое уравнение на третье в системе (2) и подставив в него полученное для n выражение (3), предварительно взяв натуральный логарифм от обеих частей, получаем выражение для E_a :

$$E_a = k \frac{\ln \left(\frac{t_{50_1}}{t_{50_3}} \right) \cdot \ln \left(\frac{j_2}{j_1} \right) - \ln \left(\frac{t_{50_1}}{t_{50_2}} \right) \cdot \ln \left(\frac{j_3}{j_1} \right)}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_3} \right) \cdot \ln \left(\frac{j_2}{j_1} \right) - \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \cdot \ln \left(\frac{j_3}{j_1} \right)}. \quad (4)$$

Значение параметра A можно определить из любого уравнения системы (2) при использовании найденных значений n и E_a , например:

$$A = t_{50_1} j_1^n \left[\exp \left(\frac{E_a}{kT_1} \right) \right]^{-1}. \quad (5)$$

Плотность тока j_i ($i = 1, 2, 3$) для каждого значения t_{50_i} определяется как медиана задаваемых значений плотностей тока для каждого значения температуры T_i .

Уравнения (3)–(5) представляют собой систему, позволяющую рассчитать значения электромиграционных параметров A , n , E_a с использованием всего лишь трех условий для измерений, что позволяет снизить время испытаний и повысить их достоверность и информативность.

Эксперимент. Испытания на надежность (электромиграционные испытания) проводились на составных металлических проводниках TiN/Al-Si(1%)/TiN с пассивирующим слоем SiO₂. Исходные данные испытаний следующие: топологическая длина проводники $L = 800$ мкм, топологическая ширина $W = 1,2$ мкм, толщина $H = 0,7$, мкм, температура испытаний равна 270, 300, 350 °С. В работе [1] представлены электрическая схема и алгоритм проведения ускоренных испытаний тестовых структур на пластине. Их общее число разделено на три части, для каждой из которой установлено значение эффективной температуры испытаний. Постоянная температура определялась из диапазона 150–400 °С согласно рекомендациям [4]. Критерием отказа и окончания измерений выбрано 0,5%-ное увеличение сопротивления, так как при больших величинах на значения E_a и n может оказать влияние рост и перераспределение уже образовавшихся дефектов [6].

Для получения достоверных данных в расчетах учтено отклонение геометрических размеров металлического проводника от номинального значения, возникающее в процессе его формирования. Значение плотности тока определяется по формуле

$$j = \frac{I}{S} = \frac{I}{WH}, \quad (6)$$

где j – плотность тока, мА/мкм²; I – электрический ток, мА; S – площадь поперечного сечения проводника, мкм²; W – ширина проводника, мкм; H – толщина проводника, мкм.

С учетом отклонения ширины металлического проводника от номинального значения (рис.1) уравнение (6) для расчета плотности тока можно переписать в следующем виде:

$$j = \frac{I}{S_{offset}} = \frac{I}{(W - W_{offset})H},$$

где S_{offset} – площадь поперечного сечения проводника с учетом отклонения по ширине, мкм^2 ; W_{offset} – отклонение ширины проводника от номинального значения, мкм .

Значение W_{offset} определяется из уравнения для поверхностного сопротивления проводника:

$$R_s = \frac{R(W - W_{offset})}{L},$$

где R – электрическое сопротивление, Ом; L – длина проводника, мкм .

Для определения W_{offset} использовались две тестовые структуры с размерами W_1, L_1 и W_2, L_2 и сопротивлениями R_1, R_2 соответственно. Тогда для двух структур в одном слое металлизации имеем

$$R_s = \frac{R_1(W_1 - W_{offset})}{L_1} = \frac{R_2(W_2 - W_{offset})}{L_2}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) получаем отклонение ширины проводника от номинального значения:

$$W_{offset} = \frac{W_1 R_1 - W_2 R_2}{R_1 - R_2}.$$

Для повышения достоверности расчетных данных значение W_{offset} определялось путем электрических измерений на дополнительно сформированных структурах. При $L = 800$ мкм получены следующие значения отклонения ширины от номинального значения: тест 1 – $W_1 = 1,2$ мкм ; тест 2 – $W_2 = 3,6$ мкм .

Значения t_{50} определялись из графиков логарифмически нормального распределения измеренных времен наработки на отказ для каждой температуры испытаний (рис.2). Для обработки результатов проведена линейная экстраполяция методом наименьших квадратов. По горизонтальной оси отложено время отказа структур в логарифмическом масштабе, по вертикальной оси – доля числа отказов p [7, 8]. Пересечение линии экстраполяции с горизонтальной осью есть медианное время отказов t_{50} .

Рассчитанные значения t_{50} и медианы плотности тока j с учетом W_{offset} для трех значений температуры измерения представлены в табл.1. Как и следовало ожидать, с повышением плотности разогревающего тока время испытаний снижается.

Данные табл.1 позволяют определить искомые параметры из формул (3)–(5): $E_a = 0,492$ эВ; $n = 2,6385$; $A = 1,338 \cdot 10^{23}$ ч. Рассчитанные значения энергии активации хорошо согласуются с полученными в других работах для алюминиевых проводников с аналогичными составом и структурой (табл.2).

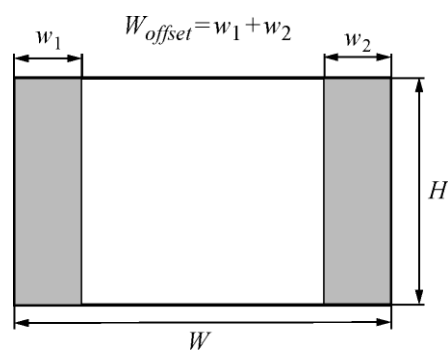


Рис.1. Поперечное сечение металлического проводника ($W_{offset} = w_1 + w_2$ – отклонение ширины металлического проводника от номинального значения W)

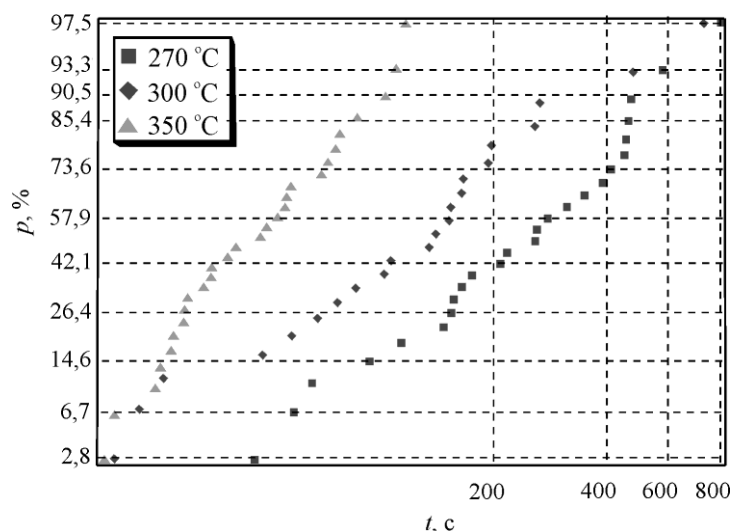


Рис.2. График логарифмически нормального распределения времени наработки до отказа металлических проводников при трех различных температурах испытаний

Таблица 1

Значения параметров электромиграционных испытаний

Параметр испытаний	Температура, °C		
	270	300	350
Медианное время t_{50} , с	223,5	114,3	45,82
Медиана плотности тока j , мА/мкм ²	110,3	115,45	120,59

Таблица 2

Значения энергии активации для тонкопленочных алюминиевых проводников

Металлизация	Энергия активации, эВ	Литературный источник
Al	0,4–0,5	[9]
Al-3%Si-2%Cu/W	0,68	[10]
Al/TiN	0,55	[11]
Al	0,6	[12]
Al(Cu)	0,7	[12]
Al-1,8%Si	0,31	[13]
Al-0,3%Si	0,32	[13]

Заключение. Предложен метод определения величины энергии активации E_a и показателя плотности тока n в уравнении Блэка на тестовых структурах, сформированных на пластине. Эффективность метода и достоверность полученных результатов позволяют отказаться от применения высокотемпературных климатических камер и необходимости корпусирования испытуемых образцов. Это существенно снижает временные и материальные затраты на процесс разработки высоконадежной металлической разводки интегральных схем.

Литература

1. Сафонов С.О., Беспалов В.П., Голишиников А.А., Путря М.Г. Оценка надежности алюминиевой металлизации интегральных схем при проведении ускоренных электромиграционных испытаний при постоянной температуре // Изв. вузов. Электроника. – 2014. – № 3 (107). – С. 21–29.
2. Federspiel X. Electromigration testing and evaluation apparatus and methods // Patent 1978371A, European patent, G 01 R 31/28. – Date of publication 08.10.2008.
3. JESD63. Standart method for calculating the electromigration model parameters for current density and temperature. – EIA/JEDEC. – February, 1998. – P. 35. – URL: <http://www.jedec.org/> (дата обращения: 07.03.2005).
4. JESD61A.01. Isothermal electromigration test procedure. – EIA/JEDEC. – October, 2007. – P. 40. – URL: <http://www.jedec.org/> (дата обращения: 14.07.2011).
5. JESD33B. Standard method for measuring and using the temperature coefficient of resistance to determine the temperature of a metallization line. – JEDEC. – February, 2004. – URL: <http://www.jedec.org/>, (дата обращения: 13.06.2013).
6. Doan J.C., Bravman J.C., Flinn P.A., Marieb T.N. The relationship between resistance changes and void volume changes in passivated aluminum interconnects // IEEE Annual International Reliability Physics Symposium. – 1999. – 37th, Cat. No. 99CH36296. – P. 206–212.
7. Канур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем: пер. с англ. / Под ред. И.А. Ушакова, Е.Г. Коваленко. – М.: Мир, 1980. – 608 с.
8. Reliability wearout mechanisms in advanced CMOS technologies / A.W. Strong, E.Y. Wu, R.-P. Vollertsen et al. // IEEE-Wiley. – 2009. – Ch. 7. – P. 565–589.
9. Lloyd J.R. Electromigration in integrated circuit conductors // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1999. – Vol. 32. – № 17. – P. R109–R118.
10. Hu C.K., Small M.B., Ho P.S. Electromigration in Al(Cu) twolevel structures: effect of Cu and kinetics of damage formation // J. Appl. Phys. – 1993. – Vol. 74. – № 2. – P. 969–978.
11. Blech I.A. Electromigration in thin aluminum films on titanium nitride // J. Appl. Phys. – 1976. – Vol. 47. – № 4. – P. 1203–1208.
12. Frye R., Liu K., Aung K.O., Chelvam M.P. Electromigration measurements in thin-film IPD and eWLB interconnections // ECTC IEEE. – 2012. – 62nd. – P.1304–1311.
13. Van Gorp G. J. Electromigration in Al films containing Si // Appl. Phys. Lett. – 1971. – Vol. 19. – № 11. – P.476–478.

Статья поступила
19 сентября 2014 г.

Сафонов Сергей Олегович – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем (ИЭМС) МИЭТ, инженер-технолог ОАО «Ангстрем-Т» (г. Москва).
Область научных интересов: металлизация, надежность ИС.
E-mail: ivernely@inbox.ru

Путря Михаил Георгиевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры ИЭМС МИЭТ, декан факультета электроники и компьютерных технологий МИЭТ. *Область научных интересов:* технология СБИС и плазменная обработка микроструктур.

Фоминых Сергей Васильевич – кандидат физико-математических наук, начальник отделения квалификации и надежности ОАО «Ангстрем-Т» (г. Москва). *Область научных интересов:* надежность ИС, квалификационные испытания, электромиграция.