

разработка новых антенн и АФУ, удовлетворяющих требованиям автоматизированной пространственной и поляризационной адаптации. Весьма перспективны в этом отношении активные многополяризационные антенны и антенные решётки с цифровым формированием диаграмм направленности, в том числе – реализующие технологии управляемой сверхнаправленности [4].

Организационно-нормативное обеспечение модернизации предполагает, в частности, координацию усилий и средств всех заинтересованных организаций и участников процесса, внесение изменений в регламент радиосвязи (в том числе, с целью регламентации использования расширенных полос частот) и уточнение принципов формирования радиоданных ведомственных сетей КВ радиосвязи с целью создания пула частот коллективного пользования.

Приведены примеры практической реализации предложенных подходов в разработках Филиала ФГУП НИИР-СОНИИР [2-4].

#### Список использованных источников

1. Минкин М.А. Проблемы и перспективы модернизации и развития систем ДКМВ радиосвязи // Вестник СОНИИР. – 2006. №4 (14). – С.4-10
2. Бузов А.Л., Елисеев С.Н., Кольчугин Ю.И. и др. Автоматизированный комплекс технических средств для адаптивных радиолиний ДКМВ // Вестник СОНИИР. – 2006. - №1(11). – С. 27-32.
3. Кольчугин Ю.И., Минкин М.А. Вопросы разработки автоматизированного оборудования нового поколения для систем адаптивной радиосвязи диапазона ДКМВ // Вестник СОНИИР. – 2009. - №4 (26). – С.54-59.
4. Бузов А.Л., Юдин В.В. Использование эффекта сверхнаправленности в широкополосных приемных кольцевых антенных решетках // Электросвязь. – 2011. - №3. – С.10-14.

## РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ДИЛА-ГРОУВА ОКИСЛЕНИЯ КРЕМНИЯ

А.А. Айзикович, Ю.П. Демаков

Ижевский государственный технический университет, г. Ижевск

Окисление полупроводника необходимо для создания на его поверхности защитных тонких и прочных окисных пленок. В технологии кремниевых интегральных схем плёнки  $\text{SiO}_2$  получают искусственным путем. Окисление кремния – одна из самых часто повторяемых технологических операций при производстве современных интегральных схем. Полученная плёнка  $\text{SiO}_2$  имеет аморфную структуру. Искусственное окисление осуществляется в потоке сухого или увлажнённого кислорода,

пропускаемого через кварцевую трубу, нагреваемую токами высокой частоты. Пластины кремния помещаются в специальной лодочке внутри трубы.

Кинетика процесса окисления описывается моделью Дила-Гроува [1]. Авторы модели исходили из того, что процесс окисления и роста окисной плёнки идёт за счет адсорбции и последующей диффузии кислорода через окисел к поверхности кремния.

Согласно этой модели формула для расчёта толщины слоя окисла на поверхности монокристаллического кремния имеет вид:

$$z_0 = \frac{A}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{4B(t + \tau)}{A^2}} - 1 \right), \text{ м.} \quad (1)$$

В формуле (1) параметры  $A$  и  $B$  рассчитываются по формулам

$$A = 2D \left( \frac{1}{h} + \frac{1}{k} \right) = 2D \frac{h+k}{h-k}, \text{ м;} \quad (2)$$

$$B = \frac{2DC_0}{C_1}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (3)$$

где  $h$  – константа скорости растворения молекул окислителя в слое  $\text{SiO}_2$ , м/с;  $k$  – константа скорости химической реакции окисления кремния, м/с;  $D$  – коэффициент диффузии кислорода в растущем окисле, м<sup>2</sup>/с;  $C_0$  – концентрация молекул кислорода в газовой фазе, м<sup>-3</sup>;  $C_1$  – концентрация атомов кремния в слое  $\text{SiO}_2$ , м<sup>-3</sup> (для влажного окисления это количество в два раза больше).

Коэффициент  $\tau$  в формуле (1) рассчитывается по формуле

$$\tau = \frac{z_i^2 + A(T) \cdot z_i}{B(T)}, \text{ с,} \quad (4)$$

где  $z_i$  – начальное значение толщины окисла при  $t=0$ ;  $z_i=2$  нм для сухого  $\text{O}_2$ ,  $z_i=0$  для влажного  $\text{O}_2$ .

Возникает задача определения коэффициентов  $A$  и  $B$  в модели Дила-

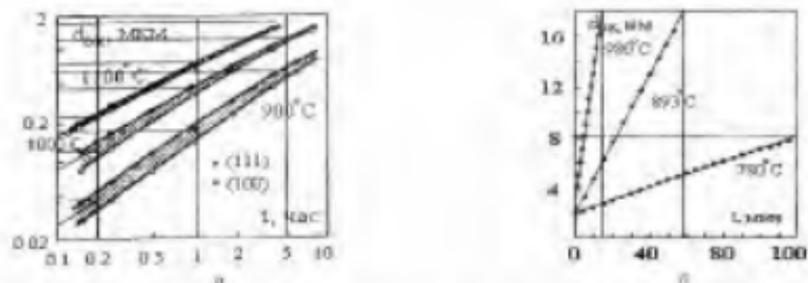


Рис. 1. Кинетика роста пленок двуокиси кремния [2]:

Гроува на основе имеющихся экспериментальных данных.

Представленные в работе [2] экспериментальные кинетические кривые роста плёнок  $\text{SiO}_2$  при получении тонких плёнок во влажном кислороде (при парциальном давлении паров воды  $8,5 \cdot 10^3$  Па, и сухого окисления кремния в реакторах атмосферного давления ( $P \approx 0,1013$  МПа), показаны на рис. 1, а и б, соответственно.

Анализ выражения (1), выполненный в [1], показывает, что при малых временах  $t$ , то есть при выполнении условия

$$\frac{4B(t+\tau)}{A^2} \ll 1 \text{ или } t+\tau \ll \frac{A^2}{4B},$$

выражение (1) при разложении в ряд примет вид

$$z_0 \approx \frac{A}{2} \left( 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{4B(t+\tau)}{A^2} - 1 \right) = \frac{B}{A} (t+\tau). \quad (5)$$

Следовательно, для малых времен окисления толщина окисла определяется постоянной скорости поверхностной реакции и прямо пропорциональна времени окисления.

При больших временах, то есть при выполнении условия

$$\frac{4B(t+\tau)}{A^2} \gg 1 \text{ или } t+\tau \gg \frac{A^2}{4B},$$

выражение (1) примет вид (единицей в скобках пренебрегаем):

$$z_0 \approx \frac{A}{2} \left( \sqrt{\frac{4B(t+\tau)}{A^2}} - 1 \right) = \sqrt{B(t+\tau)}. \quad (6)$$

Таким образом, на начальной стадии окисления толщина оксидной пленки увеличивается со временем по линейному закону (5), а при больших временах окисления зависимость толщины от времени (6) становится корневой.

Имеющиеся экспериментальные данные с учётом соотношений (4)-(6) позволяют рассчитать значения параметров  $A$  и  $B$  модели Дила-Гроува. Моделирование проводилось в среде Mathcad 14.

Коэффициент  $B$  на параболическом участке кинетической кривой можно рассчитать по формуле (6), воспользовавшись кинетическими кривыми, представленными на рис. 1, а для больших времён окисления ( $1,8 \cdot 10^4$  с) в атмосфере влажного кислорода (то есть при значении параметра  $\tau=0$ ).

На рис. 2 представлена температурная зависимость параметра  $B=f(1/T)$ , построенная в полулогарифмических координатах для температур

900, 1000 и 1100 °С. Представляется естественным, что параметр  $B$  зависит от температуры по закону Аррениуса:

$$B = B_0 e^{-\frac{W_B}{kT}}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (7)$$

где  $B_0$  – начальный коэффициент, являющийся характеристикой параметра при  $T=\infty$ ;  $W_B$  – энергии активации процесса, эВ;  $k=8,6173 \cdot 10^{-5}$  эВ/К – постоянная Больцмана;  $T$  – температура процесса окисления, К;  $e=2,7183$  – основание натурального логарифма.

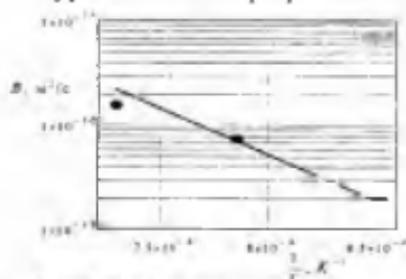


Рис. 2. График зависимости  $B=f(T)$   
 ● – эксперимент, — расчет

Согласно литературным данным [3] энергия активации  $W_B$  константы скоростей параболического участка при влажном и сухом окислении составляют 0,78 эВ и 1,23 эВ соответственно. Однако использование этих параметров не позволяет получить удовлетворительную аппроксимацию результатов, приведённых на рис. 1, а и б.

В нашем случае хорошие результаты при аппроксимации получаются при использовании данных [4], согласно которым энергия активации  $W_B$  процесса термического окисления кремния при атмосферном давлении составляет около 40 ккал/моль, то есть 1,735 эВ. При этом значение коэффициента  $B_0$  составило  $(5,16 \pm 01) \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с.

Значение коэффициента  $A_0$  при «влажном» окислении рассчитывалось по формуле (4), справедливой для малых времён окисления.

В этом случае по кинетическим кривым на рис. 1, а, предварительно определялись значения константы скорости линейного участка  $X_n=B/A_0$  при малых временах окисления, составляющих 360 с, а затем рассчитывались значения параметра  $A_0$ . Параметр  $X$  зависит от температуры по закону Аррениуса:

$$X = X_0 e^{-\frac{W_X}{kT}}, \text{ м/с},$$

где  $X_0$  – начальный коэффициент, являющийся характеристикой параметра при  $T=\infty$ ;  $W_X$  – энергия активации процесса, эВ.

Значения коэффициентов  $X_0$  и  $W_V$  для расчёта параметра  $X$  при различных условиях окисления приведены в табл. 1.

Величина параметра  $A_s$  при влажном окислении растёт с температурой по закону Аррениуса:

$$A_s = 2,42 \cdot 10^{-6} e^{\frac{11000}{T}} \text{ м.}$$

При температурах окисления 900... 1100 °С значение параметра  $A_s$  возрастает от 0,27 до 0,37 мкм.

Аналогичным образом определялось значение параметра  $A_c$  в случае окисления в атмосфере сухого кислорода. В этом случае использовались кинетические кривые рис. 1, б, полученные при температурах 780, 893 и 980 °С.

В отличие от «влажного», при «сухом» окислении значение параметра  $A_c$  практически не зависит от температуры и в диапазоне рабочих температур 780...980 °С его значение составляет  $3,3 \pm 0,3$  мкм. Лучшая аппроксимация достигается в предположении слабого роста параметра  $A_c$  с температурой  $T$  по линейному закону:

$$A_c = 9,6 \cdot 10^{-7} + T \cdot 2,0 \cdot 10^{-9} \text{ м,}$$

хотя эта оценка является статистически незначимой.

Из формулы (3) можно рассчитать значение коэффициента диффузии кислорода в двуокиси кремния по формуле:

$$D = \frac{B}{2(C_0 - C_s)} \text{ м}^2/\text{с} \quad (8)$$

Значения коэффициентов  $B_0$ ,  $A_0$ ,  $X_0$  и  $W$  для расчёта параметров  $A$  и  $B$  при той или иной температуре, полученные в результате анализа графиков, приведенных на рис. 1, а и б, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры окисления кремния

Параметр	Величина	Влажный (в присутствии H <sub>2</sub> O)	Сухой (O <sub>2</sub> )
Константа скорости параболического участка, $B$ , м <sup>2</sup> /с	$B_0$ , м <sup>2</sup> /с	$5,16 \cdot 10^{-10}$	$5,16 \cdot 10^{-10}$
	$W_B$ , эВ	1,735	1,735
Константа скорости линейного участка, $X$ , м/с	$X_0$ , м/с	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$6,93 \cdot 10^{-5}$
	$W_X$ , эВ	1,20	1,64
Константа линейного участка, $A$ , м	$A_0$ , м	$2,42 \cdot 10^{-6}$	$9,5 \cdot 10^{-7}$
	$W_A$ , эВ	0,22	$a = 2 \cdot 10^{-9}$ м/с

На рис. 3 представлены кинетические кривые окисления кремния, полученные в результате подстановки параметров  $A(T)$ ,  $B(T)$  из табл. 1 в выражение (1).

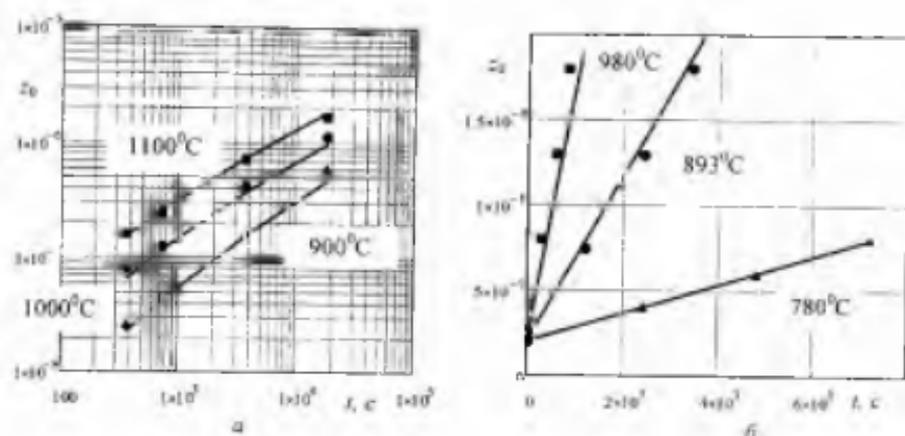


Рис. 3. Результаты моделирования кинетики роста плёнок двуоксида кремния: а – в атмосфере влажного кислорода; б – при сухом окислении. На графике: точки – экспериментальные результаты, линии – расчётные кривые

Значение параметра  $\tau$  при сухом окислении рассчитывалось по формуле (4).

Температурная зависимость  $\tau(T)$  для сухого окисления подчиняется соотношению

$$\tau(T) = 5,246 \cdot 10^9 \exp(-0,014 \cdot T),$$

где  $\tau$  принимает значения 2300...120 с в диапазоне температур 780...980 °C соответственно.

#### Список использованных источников

1. Deal B. E., Grove A. S. General Relationship for the Thermal Oxidation of Silicon // *Journal of Applied Physics*, 36 (12): 3770–3778.
2. Термическое окисление кремния. URL: [http://dssp.petrsu.ru/~KOF/OLD/phys/spesh/vlsi/okistern\\_a.html#oborud](http://dssp.petrsu.ru/~KOF/OLD/phys/spesh/vlsi/okistern_a.html#oborud) (дата обращения: 04.05.2011).
3. Richard C. Jaeger Thermal Oxidation of Silicon // *Introduction to Microelectronic Fabrication*. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.
4. Гаврилов Р.А., Скворцов А.М. Технология производства полупроводниковых приборов. – Л.: Энергия, 1968. – 240 с.