

УПРАВЛЕНИЕ ТОЛЩИНОЙ ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

М.И. Маркевич¹⁾, А.С. Подольцев²⁾, Ф.А. Пискунов²⁾, А.М. Чапланов¹⁾

¹⁾Институт электроники НАНБ,

²⁾Институт тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАНБ, Минск, markevich@inel.bas-net.by

На основе математической модели исследуется образование оксидных пленок на поверхности металла. Показано, что увеличивая скважность импульсного воздействия, можно затягивать стадию окисления и наращивать оксидные слои большей толщины.

Введение

Лазерный нагрев, осуществляемый серией импульсов с определенной скважностью формирует существенно нестационарное температурное поле. При этом после окончания каждого импульса температура в пленке уменьшается, а толщина образовавшегося окисного слоя остается постоянной.

Таким образом, кинетика формирования окисного слоя в условиях нагрева серией лазерных импульсов имеет существенные особенности по сравнению с ранее рассмотренными случаями [1, 2]. Пленки хрома при нагревании на воздухе активно взаимодействуют с кислородом и азотом. Нитриды, которые образуются при взаимодействии, неустойчивы, и окончательным продуктом взаимодействия хрома с атмосферными газами является окисел Cr_2O_3 . В условиях лазерного взаимодействия образуется также Cr_2O_3 [1, 3].

Основная часть

Рассмотрим процесс окисления тонких металлических пленок на воздухе в процессе импульсно-периодического лазерного воздействия.

В модели учитывается поглощение лазерного излучения, процесс теплопроводности и окисления тонкой металлической пленки кислородом воздуха.

Математическая модель состоит из нестационарного одномерного квазилинейного уравнения теплопроводности с граничными условиями III рода и распределенным источником тепла за счет поглощения излучения по закону Бугера, а также обыкновенного дифференциального уравнения, описывающего кинетику роста тонких окисных пленок.

$$\rho(z) \cdot c_p(z) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(z) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + N(t) \cdot q(z)$$

$$q(z) = A \cdot E \cdot k_1 \exp(-k_1 \cdot z), \quad z < z_1$$

$$q(z) = 0, \quad z > z_1$$

$$N(t) = \Gamma(t - (i-1) \cdot \tau_0) \cdot \Gamma((i-1) \cdot \tau_0 + \tau_1 - t)$$

$$i = 1 \dots n$$

$$\frac{dh}{dt} = U_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_d}{KT}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{h_1}{h}\right) - \exp\left(-\frac{h_1}{h}\right) \right]$$

Граничные условия:

$$\left[\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right]_{z=0} = -\alpha_0 (T - T_0);$$

$$\left[\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right]_{z=l} = \alpha_1 (T - T_0);$$

Начальные условия при $t=0$

$$T = T_0, \quad h = h_{нач.}$$

где z - продольная координата, T - температура, t - время, k_1 - коэффициент поглощения, z_1 - продольная координата начала подложки, C_p - теплоемкость, λ - теплопроводность, ρ - плотность, l - толщина пленки и подложки, α_0 , α_1 - коэффициенты теплообмена на облучаемой поверхности и на обратной стороне пластины соответственно, которые учитывают вклад конвективной и лучистой составляющей теплообмена, T_0 - температура окружающего воздуха, E - плотность мощности излучения, τ_1 - продолжительность лазерного импульса, τ_2 - интервал между импульсами, $\tau_0 = \tau_1 + \tau_2$, Γ - функция Хевисайда, h - текущая толщина окисной пленки, E_d - энергия активации диффузии катиона металла в окисле, h_1 - некоторая характерная толщина ТОП, условно разделяющая области сильного и слабого влияния электрического поля на процесс окисления металла ($h_1 = h_0 T_0 / T$), где h_0 для широкого класса металлов от 6 - 10 нм, U_0 - скорость звука в твердом теле.

Уравнение, описывающее изменение толщины оксидного слоя под действием электрического поля в пленке, записано в предположении, что кислород для образования окисла поступает из воздуха, при этом скорость его диффузии сквозь пленку не ограничивает скорость роста оксидной пленки.

Расчеты проводились для импульсно-периодического лазерного воздействия для десяти импульсов с различной скважностью, длина волны излучения составляла 1,06 мкм, объектом исследования были пленки хрома толщиной 0,2 мкм, нанесенные на подложку СТБ-2, толщиной 100 мкм.

На рис. 1,а показано рассчитанное изменение температуры от времени на поверхности пленки хрома с величиной скважности, равной 1,2. Из графика видно, что поверхность пленки почти не успевает остыть в промежутке между импульсами. Такой режим нагрева и охлаждения обуславливает и соответствующий режим окисления.

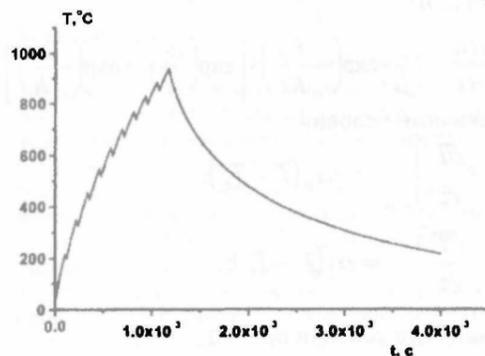


Рис. 1, а. Зависимость температуры от времени на поверхности пленки хрома: плотность мощности излучения $4,8 \cdot 10^3$ Вт/см², длительность импульса 10^{-4} с, скважность 1,2

Изменение толщины окисного слоя Cr₂O₃ от времени показано на рис. 1, б.

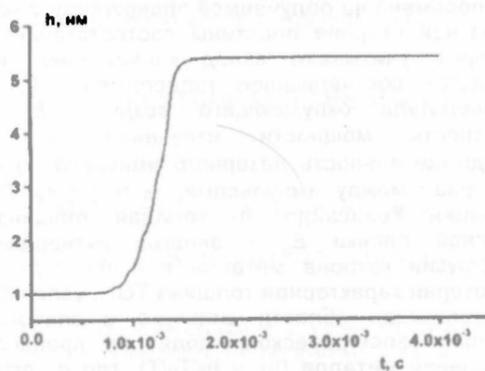


Рис. 1, б. Зависимость толщины окисного слоя от времени на поверхности пленки хрома: плотность мощности излучения $4,8 \cdot 10^3$ Вт/см², длительность импульса 10^{-4} с, скважность 1,2; $E_d=182,7$ кДж/моль

Из приведенной зависимости видно, что изменение толщины окисла со временем не носит явный ступенчатый характер, максимальная толщина образуемого окисла

не достигает 60 А. На стадии остывания толщина окисла возрастает незначительно. Характерно затягивание начальной стадии окисления, так как при низких температурах процесс окисления не активируется.

При дальнейшем увеличении скважности между импульсами время остывания между импульсами увеличивается (рис. 2, а). Это способствует лучшему прогреву подложки. Такие режимы обеспечивают ступенчатый характер окисления тонких металлических пленок хрома.

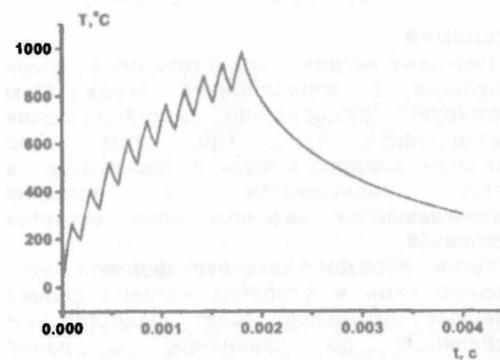


Рис. 2, а. Зависимость температуры от времени на поверхности пленки хрома: плотность мощности $5,5 \cdot 10^3$ Вт/см², длительность импульса 10^{-4} с, скважность 1,9

На рис. 2, б приведена зависимость изменения толщины окисного слоя от времени для длительности импульса 10^{-4} с и скважности 1,9.

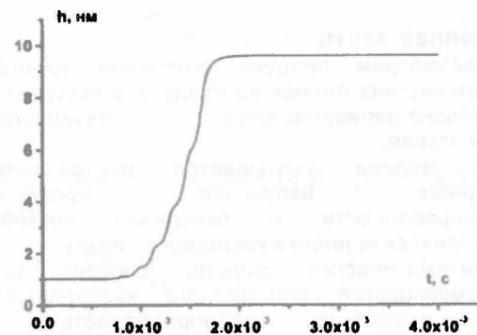


Рис. 2, б. Зависимость толщины окисного слоя от времени на поверхности пленки хрома: плотность мощности излучения $5,5 \cdot 10^3$ Вт/см², длительность импульса 10^{-4} с, скважность 1,9; $E_d=182,7$ кДж/моль

На полученной зависимости уже отчетливо проявляется ступенчатый характер процесса окисления. Нарастивание окисла при таком значении скважности происходит уже и на стадии остывания - в промежутках между импульсами. Вследствие этого толщина окисного слоя может нарастать до 10 нм, что при меньшей скважности не наблюдается.

Заключение

Таким образом, увеличивая скважность импульсного воздействия, можно затягивать стадию окисления и наращивать окисные слои большей толщины. Появляется возможность мягкого режима термоокисления при тех же длительностях импульса, но меньших плотностях мощности, благодаря импульсно-периодическому воздействию с определенной скважностью импульсов.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, грант Ф03-135.

Список литературы

1. Бункин Ф.В., Кириченко Н.А., Лукьянчук Б.С. Термохимические и термодинамические процессы в поле непрерывного лазерного излучения // Известия АН СССР, сер. Физ., т.47, №10, 1983, с. 2000-2015.
2. Володькина В.П., Крылов К.И., Либенсон М.Н., Прокопенко В.Т. Нагревание окисляющегося металла излучением CO₂-лазера // ДАН СССР, 1973, т. 210, №1. с. 66-69
3. Вейко В.П., Метев С.М. Лазерные технологии в микроэлектронике, София, изд-во Болгарской АН, 1991, с.363 с.

GROWTH CONTROL OF METAL OXIDE SURFACE FILM DURING PULSED LASER IRRADIATION

Marja Markevich¹⁾, Alexandr Podol'tsev²⁾, Fedor Piskunov, Arkadij Chaplanov¹⁾

¹⁾Institute of Electronics of BAS, 21 Logojsky Tr., 220090 Minsk, Belarus

²⁾Lykov Institute of heat-mass transfer of BAS, 24 Platonov Str., 220000 Minsk, Belarus

On the basis of an mathematical model, thin film oxide growth on the metal surface has been investigated. It was found that the oxidation stage duration and oxide film thickness can be controlled by on-off time ration of the laser Irradiation.