

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 23

12 декабря 1990 г.

05.3; 11

© 1990

## АВТОВОЛНОВОЙ ПРОЦЕСС ОКИСЛЕНИЯ ПЛЕНОК ЖЕЛЕЗА

В.Г. М я г к о в, Г.И. Ф р о л о в

Известно, что процесс изотермического окисления металлов проходит перпендикулярно поверхности окисления и зависимость толщины окисной пленки от времени для начальной стадии процесса определяется теорией Кабрерра-Мотта, которая при различных условиях приводит к разным законам окисления [1, 2]. В зависимости от некоторого контрольного параметра (пространства параметров) химическая система может переходить из одного устойчивого состояния в другое, к предельному циклу, или выходить на стохастический режим. Такими контрольными параметрами для обычного окисления металлов являются температура окисления  $T_0$  и скорость нагрева поверхности  $\gamma = \frac{\partial T}{\partial t}$ . Подобные эффекты, относящиеся к явлению самоорганизации, широко распространены в окислительных химических реакциях [3, 4], однако в окислении металлов наблюдались лишь при воздействии на него лазерного излучения [5].

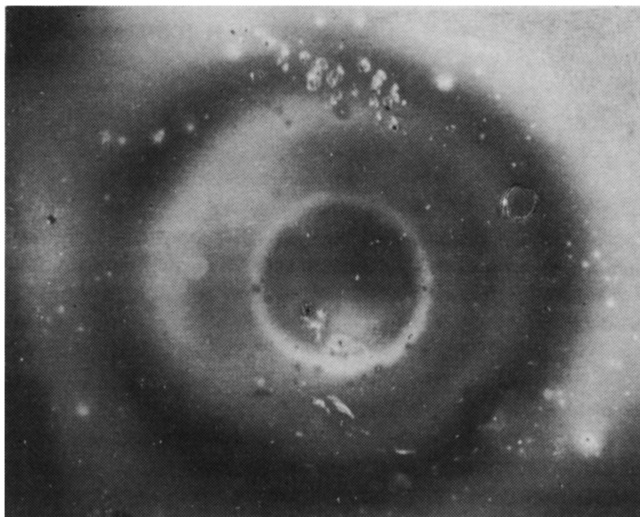


Рис. 1. Вид поверхности окисленной пленки железа.

Обнаружена и описывается в работе новая кинетика окисления пленок железа при быстром нагреве. В опытах использовались пленки железа толщиной  $1000 \text{ \AA}$ , полученные методом вакуумного или катодного напыления на стеклянной подложке. Линейные размеры подложки составляют  $24 \times 24 \times 0.1$  мм. Образцы окислялись в атмосфере воздуха при различных температурах. При малых значениях  $\zeta$  („печной“ нагрев) кинетика окисления пленок железа соответствует известной ранее [1, 2]. Однако при температуре более  $380 \text{ }^\circ\text{C}$  и мгновенном нагреве процесс окисления радикально менялся: в районе центра пленки возникал зародыш окисла, из которого как из центра концентрическими окружностями происходят волны окисления пленки, рис. 1. Распространение волнового фронта проходит со скоростью порядка  $1 \text{ см/сек}$  и успевает пройти 3–4 волны, после чего волновой процесс заканчивается, так как пленка окисляется полностью. Реже центры окисления возникали на углах пленки или ее сторонах. В отличие от работы [5], в которой температурная подставка была с  $T > 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  и для возникновения волн окисления использовалось лазерное излучение, в нашем случае окислительный процесс начинался при более низких температурах и центр окисления возникал спонтанно. Исследуемый автоволновой процесс определяется тем, что толщина окисной пленки не остается постоянной, а изменяется со временем и расстоянием от центра. Так как каждой толщине окисной пленки соответствует свой цвет, то наблюдаемый волновой процесс окисления окрашен во все цвета радуги. Длина волны окисления тоже не остается постоянной, а увеличивается от центра, поэтому волны не догоняют друг друга и не сталкиваются. Если возникают две волны с центрами на концах

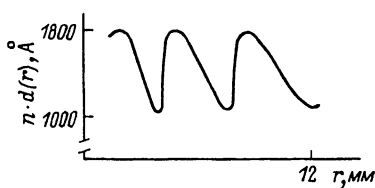


Рис. 2. Динамика изменения толщины окисла в зависимости от расстояния до центра автоволнового процесса.

пленки, то фронты этих волн при взаимодействии не отражаются друг от друга. Такого типа автоколебания распространены и в колебательных химических процессах, в частности, в реакции Белоусова-Жаботинского. В отличие от других автоколебательных процессов для таких колебаний используют термин „ведущий центр“. Колебательный характер определен прежде всего тем, что со временем не только увеличивается толщина окисла по закону Кабрера-Мотта, но и растет скорость сублимации окисла. Таким образом, его толщина становится периодической функцией времени и расстояния. Это легко наблюдать из интерференционной картины, которая сопутствует процессу окисления. Амплитуда колебания толщины окисла равняется  $(\lambda_K - \lambda_\Phi)/4n$ , где  $\lambda_\Phi$  и  $\lambda_K$  — длины волн фиолетовой и красной частей оптического спектра,  $n$  — показатель преломления окисла. По интерференционной картине строился график зависимости толщины окисла от расстояния до центра автоволнового процесса (рис. 2). Из рис. 2 видно, что длина волны колебаний толщины пленки не является постоянной, а растет с удалением от центра. Центр данного автоволнового механизма определен геометрией пленки, в нем в первую очередь достигается температура, необходимая для начала окисления.

Автоволновой процесс окисления железа носит экзотермический характер и проходит с большим энерговыделением. На это указывает тот факт, что стеклянные подложки плавятся в районе центра автоволнового процесса. Для оценки температуры волнового фронта на его пути наносились контрольные пленочные слои с известной температурой плавления, размеры которых были  $1 \times 1$  мм при толщине  $500 \text{ \AA}$  (алюминий  $T_{\text{пл}} = 660^\circ\text{C}$ , серебро  $T_{\text{пл}} = 960^\circ\text{C}$ ). После прохождения волны окисления поверхности этих слоев изучались в оптическом микроскопе. Из анализа этих поверхностей делается вывод, что они не только плавятся, но и погружаются в расплавленный окисел. Электронномикроскопическими исследованиями установлено, что окисная пленка представляет собой смесь фаз  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ . Так как температура плавления этих фаз  $\sim 1500^\circ\text{C}$ , то следует ожидать, что температура фронта окисления будет той же величины. Чтобы изменить характер теплоотвода, пленки железа приготавливались на стеклянных подложках

толщиной 1 и 2 мм, а также использовались железные фольги толщиной 40 мкм. В обоих случаях волновой процесс окисления оставался, хотя и переставал быть колебательным, то есть процесс окисления соответствовал волнам переключения. Это связано с тем, что происходит значительная диссипация энергии экзотермической реакции окисления и температура фронта падает ниже температуры, необходимой для сублимации оксида.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] A t k i n s o n // Rev. Mod. Phys. 1985. N 57. С. 437-470.
- [2] О к и с л е н и е металлов. Т. 1 / Под редакцией Ж. Бенара. Металлургия, 1968. С. 499.
- [3] П о л а к Л.С., М и х а й л о в А.С. Самоорганизация в неравновесных физико-химических системах. М.: Наука, 1983. С. 285.
- [4] Колебания и бегущие волны в химических системах / Под редакцией Филда, М. Бургера. М.: Мир, 1988. 720 с.
- [5] Б у н к и н Ф.В., К и р и ч е н к о Н.А., Л у к ь я н ч у к Б.С. // УФН. 1982. № 138. С. 45-94.

Институт физики  
им. Л.В. Киренского  
СО АН СССР,  
Красноярск

Поступило в Редакцию  
8 октября 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 23

12 декабря 1990 г.

05; 06.2

© 1990

МОДЕЛЬ КАНАЛИРОВАНИЯ ИОНОВ БОРА  
ПРИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНОМ ИОННОМ ЛЕГИРОВАНИИ  
КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

А.Ф. Б у р е н к о в, Ф.Ф. К о м а р о в,  
С.А. Ф е д о т о в

Высокоэнергетичная ионная имплантация легирующих примесей в кристаллы кремния является перспективным методом создания трехмерных микроэлектронных структур, привлекающим в последнее время внимание различных исследовательских групп. Согласно данным некоторых недавних экспериментов ([1] и др.), глубинные профили распределения примеси, полученные методом ионной имплантации с энергией порядка 10-100 МэВ, значительно отли-