

- [4] Минаков А.А., Мягков А.В., Зайцев И.А., Веселаго В.Г. – Изв. АН СССР, серия физическая, 1987, т. 51, № 6, с. 1062–1066.
- [5] Пшеничников А.Ф., Шлиомис М.И. – Изв. АН СССР, серия физическая, 1987, т. 51, № 6, с. 1067–1072.
- [6] Райхер Ю.Л., Шлиомис М.И. – ЖЭТФ, 1974, т. 67, в. 9, с. 1060–1073.
- [7] Гилев В.Г. В кн.: Статические и динамические свойства магнитных жидкостей. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987, с. 61–64.
- [8] Агабекян Э.М., Иванов А.Г. – Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, в. 24, с. 1512–1516.

Поступило в Редакцию
28 мая 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 20 26 октября 1988 г.

СТИМУЛИРОВАНИЕ СОБИРАТЕЛЬНОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ОКСИДАХ ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Д.Т. Алимов, В.Я. Гольдман,
В.Л. Журавский, С.А. Убайдуллаев,
А.Х. Хайдаров

В ряде работ [1, 2] отмечается влияние электрического поля на поверхностные диффузионные процессы. В частности, электрическое поле изменяет темп протекания химической реакции [1], известен также эффект спекания поликристаллических слоев кремния в условиях нагрева границ зерен электрическим током [2], однако, как будет показано ниже, действие электрического поля распространяется и на процесс собирательной рекристаллизации.

В настоящей работе сообщается об управляющем действии электрического поля на процесс формирования поликристаллической структуры при высокотемпературном химическом синтезе оксида на поверхности металла. Изучалась термохимическая реакция окисления кобальта в воздухе атмосферного давления. Опыты проводились при температуре 1250 К, когда на поверхности кобальта образуется оксид со стехиометрическим составом CoO [3]. Нагрев мишени осуществлялся излучением CO_2 -лазера мощностью 100 Вт, причем излучение направлялось на мишень металлическим зеркалом, которое одновременно являлось одной из обкладок конденсатора, создающего электростатическое поле напряженностью 0...10 кВ·см⁻¹. Второй обкладкой служил сам металлический образец. Обе поверхности образца после окончания окисления фотографировались с помощью металлографического микроскопа. По микрофотографиям строились распределения зерен по размерам. Используя в качестве опорного

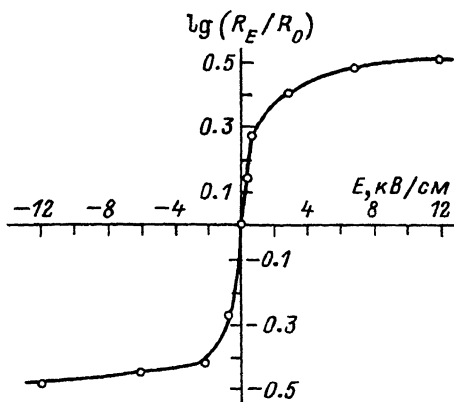


Рис. 1. Изменение среднего размера зерна поликристалла при рекристаллизации в электрическом поле E — R_E и R_0 — средние размеры зерен поликристалла в электрическом поле и при его отсутствии.

окисел с той стороны мишени, которая не подвергалась действию поля, были измерены относительные изменения средних размеров

$\frac{R_E}{R_0}$ зерен под действием поля. Число зерен ($2 \cdot 10^3$), измеренных на каждой из микрофотографий, было достаточным для обеспечения точности определения величины R не хуже 10%. Результаты эксперимента приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что приложение внешнего электрического поля позволяет в значительных пределах изменять средний размер зерен. Причем, если зеркало является положительным электродом по отношению к образцу, то наблюдается увеличение, в обратном случае — уменьшение размера. Заметим, что даже небольшие, порядка 10^2 В·см⁻¹ напряженности поля приводят к заметному (100–200%) изменению размера зерен. В дальнейшем процесс быстро выходит на насыщение. Надо отметить, что ранее в [4] было показано, что нагрев одной из сторон мишени лазером и возникающие при этом градиенты температур не приводят к столь большим, как в данных опытах, сдвигам функции распределения, поэтому полученные результаты нельзя отнести к специфике лазерного нагрева.

Прямые измерения электрического поля, протекающего через оксидный слой во время окисления позволяют сделать вывод об отсутствии внутренних объемных электрических полей и, как следствие, объемного электромассопереноса, рассмотренного в [1]. В этих условиях возможна концентрация поля вблизи различных неоднородностей, и объяснение наблюдаемого эффекта, на наш взгляд, заключается в следующем. Спекание — термоактивационный процесс [5], его интенсивность I зависит, в частности, от разности

свободных энергий атомов в соседних зернах ΔH и от энергии активации ΔE перехода атома через границу зерна (ГЗ):

$$I = \Delta N \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right).$$

В свою очередь $\Delta E = \Delta E_0 + \Delta E_e$, где ΔE_0 обусловлено структурным разупорядочением ГЗ, а ΔE_e — электронная составляющая барьера (переносчики массы CoO — однократно заряженные вакансии кислорода [3]). Величина ΔE_e для ГЗ отлична от нуля при высоких температурах для ряда полупроводников, в том числе оксидов. Согласно [6], электрическое поле E_{\perp} , перпендикулярное плоскости ГЗ, вызывает перезаселение локальных уровней ГЗ, что приводит к искривлению энергетического профиля вблизи ГЗ, причем

$$\Delta E_{e,2} = \frac{\varkappa}{8\pi en} \left(\frac{2\pi q}{\varkappa} \pm \frac{enE_{\perp}}{q} \right).$$

Здесь q — плотность заряда на ГЗ, n — концентрация свободных носителей в объеме зерна, e — заряд электрона, \varkappa — диэлектрическая проницаемость. Знаки „+” и „-” соответствуют изменению величины барьера на различных сторонах ГЗ. Вероятность диффузии отрицательно заряженных атомов в направлении, совпадающем с направлением поля, уменьшается, в противоположном — увеличивается.

Сказанное выше относилось к ГЗ, находящейся между одной парой зерен. Для изменения среднего размера зерна необходимо изменить скорость коалесценции, т.е. чтобы для любой пары зерен поле стимулировало перенос из малого зерна в большое (либо наоборот, для замедления коалесценции). В эксперименте вектор электрического поля направлен перпендикулярно поверхности образца, поэтому наличие E_{\perp} всецело определяется наклоном ГЗ. При случайном распределении наклонов ГЗ электрическое поле хаотически стимулировало бы перенос из малых зерен в большие и наоборот, что не повлияло бы на скорость спекания.

Согласно экспериментальным наблюдениям, наклон ГЗ не случаен, а именно, большие зерна на границе „подложка-окисел” имеют тенденцию к уменьшению вблизи поверхности окисла, малые — к увеличению. Причина такой геометрии роста зерен связана, как нам представляется, с неодинаковой скоростью спекания зерен на поверхности оксида и в его объеме. Неодинаковость обусловлена различными поверхностными и объемными кинетическими константами атомов, неравновесным распределением дефектов по толщине во время роста оксида. Разница в скоростях коалесценции на поверхности кристалла и в его объеме была обнаружена экспериментально в наших исследованиях (рис. 2). Средний наклон ГЗ, отсчитываемый от нормали к поверхности, изменяется в пределах 15–25°. Такое распределение приводит к тому, что вектор электрического поля всегда пересекает ГЗ по направлению из малого зерна в большое, либо наоборот. Таким образом, электрическое поле вызывает пере-

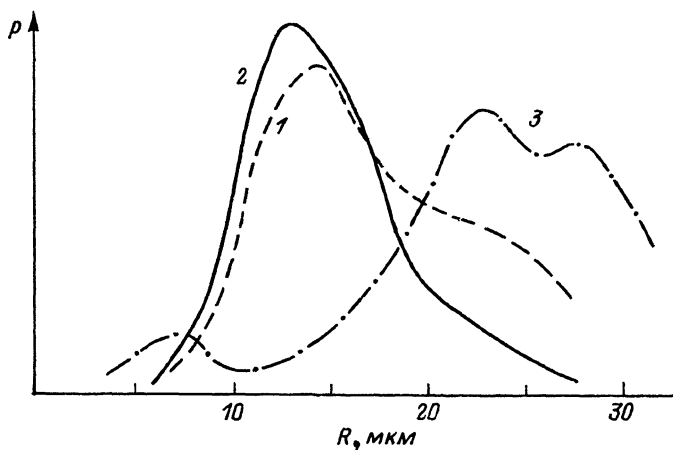


Рис. 2. Распределение зерен окисла по размерам. 1 - на внешней поверхности окисла, 2 - в промежуточном сечении, 3 - на границе „окисел-металл“. Обозначения: ρ - концентрация зерен данного размера в поликристалле; R - размер зерна.

распределение энергетического спектра кристалла, увеличивая и уменьшая барьеры на разных сторонах каждой из ГЗ. Такое „периодическое“ изменение барьеров приводит также к изменению величины $\Delta H = \Delta H_0 + \Delta h$, $\Delta h = \Delta E_{e1} - \Delta E_{e2}$.

Итак, появляется принципиальная возможность эффективного управления средним размером зерна поликристаллического окисла путем воздействия электрического поля.

Результаты данной работы хорошо согласуются с нашими выводами о том, что наблюдаемое воздействие света различных длин волн на кинетику роста окисла и формирование его свойств связано с возмущениями в электронной подсистеме кристалла [7].

Л и т е р а т у р а

- [1] Бункин Ф.В., Зон Б.А., Лаврищев С.В., Лукьянчук Б.С., Шафеев Г.А. - Препринт ИОФАН СССР, № 268, 1986, 30 с.
- [2] Okamoto K., Suzunaga H. - Appl. Phys. Lett., 1983, v. 42, N 9, p. 809-811.
- [3] Третьяков Ю.Д. Химия нестехиометрических окислов. - М.: Изд-во МГУ, 1974, 364 с.
- [4] Алимов Д.Т., Бобырев В.А., Бункин Ф.В., Журавский В.Л., Лукьянчук Б.С., Мо-

розова Е.А., Убайдуллаев С.А., Хабидуллаев П.К. - ДАН СССР, 1984, т. 279, в. 4, с. 871-876.

- [5] Бокштейн Б.С., Бокштейн С.З., Жуковичкий Л.А. Термодинамика и кинетика диффузии в твердых телах. М.: Металлургия, 1974. 280 с.
- [6] Матаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках. М.: Мир, 1974. 463 с.
- [7] Алимов Д.Т., Журавский В.Л., Тюгай В.К., Хабидуллаев П.К. - Изв. АН СССР, сер. физ., 1987, т. 51, в. 6, с. 1170-1179.

Поступило в Редакцию
27 июля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 20 26 октября 1988 г.

ЭФФЕКТ ФИЗО КАК СРЕДСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ЦИРКУЛЯЦИИ СКОРОСТИ В СРЕДЕ

Б.Я. Зельдович, В.С. Политов

Современная гидро- и газодинамика решает большой круг вопросов, связанных с пространственными сложными течениями и их структурными исследованиями. Примером таких течений являются закрученные и вихревые потоки жидкостей и газов в определенных стесненных условиях (ядерные энергетические установки, камеры сгорания и др.) [1, 2]. В экспериментальных исследованиях подобных течений широко используются оптические методы, как весьма информативные и обеспечивающие возможности бесконтактных измерений. Однако при этом особенно остро стоит проблема невозможности измерений скорости и циркуляции скорости [3-5].

В настоящей заметке мы хотим обратить внимание на то, что для измерения скорости и ее циркуляции в оптически прозрачной среде можно использовать эффект Физо. Он состоит в том, что при распространении света по движущейся среде (например, жидкости в неподвижном сосуде) возникает поправка к длине волнового вектора света [6].

$$k = \frac{\omega_0}{c} n(\omega_0) - \frac{\omega}{c} \left[n \frac{d(n\omega)}{d\omega} - 1 \right] \frac{(\vec{V} \vec{m})}{c}. \quad (1)$$

Здесь $n(\omega)$ - показатель преломления, $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$ - частота, c и λ - соответственно скорость и длина волны света в вакууме, \vec{m} - единичный вектор в направлении распространения света, \vec{V} - локальный вектор скорости среды. Если по среде с некоторым рас-