

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА РОСТ ЗЕРЕН В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ

В.В.Красильников, С.Е.Савотченко*, М.С.Прозорова

*Белгородский государственный университет, kras@bsu.edu.ru*** Белгородский региональный институт повышения квалификации и профессиональной переподготовки специалистов, savotchenko@hotmail.ru*

Предложена модель роста зерен в тонкой металлической пленке под действием равномерного потока падающих ионов инертного газа. Получено аналитическое решение, описывающее закономерность роста среднего размера зерен с увеличением дозы облучения и учитывающее взаимодействие атомов пленки с частицами потока, падающего на пленку. Согласованность модели с экспериментальными данными продемонстрирована на примере пленок золота и платины, облученных ионами аргона.

Ключевые слова: тонкие пленки, облучение, ионно-индуцированный рост зерен

The model of grain growth in thin metal films under uniform flow of inert gas incident ions is proposed. An analytical solution describing the pattern of growth of average grain size with increasing doses of radiation and taking into account the interaction of atoms in the film with the particles flux dropped on film is derived. Consistency of models with experimental data is demonstrated by the films of gold and platinum irradiated with argon ions.

Keywords: thin films, irradiation, ion-stimulated grain growth

Введение

Тонкие металлические пленки широко применяются в приборах с интегральными схемами, а также в высокочастотных приборах. Размеры соединений микросхем находятся в субмикронной области и сравнимы с размерами зерен в металлической пленке, в силу чего размеры зерен могут непосредственно влиять на электрические свойства микросхем. Времена ослабления электромиграции, которая происходит в тонких металлических соединениях интегрированных схем, связаны с распределением зерен по размерам. В этой связи технологически актуальной является проблема управления ростом зерна металлических пленок с целью оптимизации электрических свойств.

Одной из причин возможного изменения размера зерна является воздействие на пленки различного рода потоков частиц. Облучение ионами может привести к росту зерен уже при комнатной температуре. Это показано в работе [1], где в качестве объектов для экспериментов были взяты тонкие пленки Au и Pt (толщина 40 нм), полученные в результате конденсации на подложки NaCl при давлении порядка $5 \cdot 10^{-7}$ Торр. Пленки были подвергнуты облучению ионами Ar^+ при комнатной температуре с энергией 200 КэВ с плотностью тока порядка 1 мкА/см². Доза ранжировалась в пределах $5 \cdot 10^{14}$ — $8 \cdot 10^{14}$ $\text{Ar}^+/\text{см}^2$. Затем был произведен термический отжиг полученных тонких пленок при температурах 400, 470, 550 и 650°C в вакууме ($3 \cdot 10^{-7}$ Торр) в течение 30 мин. На рис.1. показаны электронно-микроскопические фотографии образцов до и после облучения, на которых видно заметное увеличение размеров зерен после облучения ионами аргона. Одним из важных результатов работы [1] является наблюдение зависимости увеличения размера зерна от дозы облучения, выходящей на насыщение.

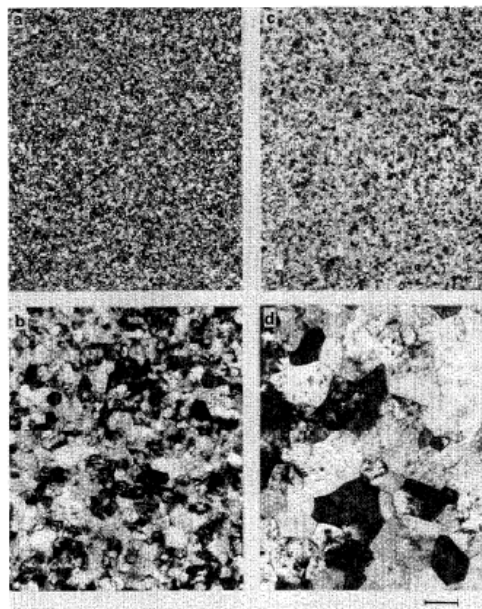


Рис.1. Светлопольное изображение поликристаллических пленок Au и Pt, облученных ионами Ar^+ (маркер — 100 нм) (a, b — Pt до облучения и после, соответственно; c, d — Au до облучения и после, соответственно) (фотографии взяты из работы [1])

Следует отметить, что аналогичные зависимости роста зерен под воздействием облучения с насыщением при больших дозах облучения, вообще говоря, нередкое явление. Так, аналогичные зависимости были получены в полимерных пленках, применяемых в производстве изготовления рентгеновских фильтров (см., напр., [2]).

Модель роста зерен в тонких пленках под воздействием облучения

В данной работе предлагается построение физической модели роста зерен в тонкой металлической пленке, происходящего в результате облучения ее

ионами инертных газов. При этом будем предполагать, что пространственное распределение зерен в пленочном образце является однородным. Сам процесс роста зерен под воздействием ионного облучения будем рассматривать в пространстве размеров.

Рассмотрим процесс роста зерен в тонкой пленке, обусловленный облучением, при условии, что на поверхность пленки падает поток ионов с небольшой энергией, такой, что в пленке не создается радиационных повреждений типа глубоких кратеров, а могут возникать лишь точечные дефекты и газовые микропузырьки. Ограничимся случаем, когда поток ионов равномерно распределяется по поверхности пленки.

Пусть $R(\tau)$ — средний размер зерен, растущий с дозой τ . Будем считать, что из экспериментов известны начальный средний размер зерен R_0 и средний размер зерен при достижении насыщения R_∞ , т. е. эти два параметра считаются определенными для рассматриваемых материалов. Предполагаем также, что скорость роста среднего размера зерен с накоплением дозы возрастает линейно с ростом интенсивности потока ионов, характеризуемого параметром β , и уменьшается пропорционально достигнутому при данной дозе среднему размеру зерен. Введем величину приведенного среднего размера зерен $R^* = R(\tau) - R_0$.

При вышеизложенных предположениях уравнение модели запишем в виде

$$\frac{dR^*}{d\tau} = \beta \left(1 - \frac{R^*}{R_\infty - R_0} \right). \quad (1)$$

Так как в начальный момент $R(0) = R_0$, то для уравнения (1) получается начальное условие

$$R^*(0) = 0. \quad (2)$$

Решение уравнения (1) при условии (2) имеет простой вид, который определяет закон роста среднего размера зерен с накоплением дозы:

$$R(\tau) = R_0 - (R_\infty - R_0) \exp\left(-\frac{\beta\tau}{R_\infty - R_0}\right). \quad (3)$$

Подчеркнем, что в (3) подлежащим определению является только один параметр β , представляющий собой эффективный объем, приходящийся на одну частицу потока, падающего на пленку, так как в предлагаемой модели R_0 и R_∞ должны браться из эксперимента. Фактически параметр β характеризует взаимодействие частиц потока с атомами матрицы пленки. В частности, на эффективный объем β должна оказывать большое влияние диффузионная подвижность атомов матрицы пленки, проявляющаяся в подвижности границ зерен. В связи с этим определение параметра β как характеристики атомной подвижности в материале пленки представляется весьма важным.

В качестве иллюстрации предлагаемой модели значения параметра β найдены методом наименьших квадратов и приведены в нижеследующей таблице, где также указаны соответствующие значения R_0 и R_∞ , взятые из работы [1], и величины достоверности аппроксимации r^2 . Близость r^2 к единице свидетельствует об удовлетворительном описании зависимостью (3) соответствующих экспериментальных данных работы [1].

Материал	R_0 , нм	R_∞ , нм	β , нм ³ /ион	r^2
Au	20	40	85	0,9796
Pt	17	130	11,5	0,9444

Зависимости среднего размера зерен от дозы, определяемые формулой (3), показаны на рис.2 применительно к экспериментальным данным работы [1], полученным для Au и Pt пленок, облученных ионами аргона. Обращает на себя внимание большое различие скоростей роста зерен в Au и Pt пленках и связанное с ним различие их размеров насыщения. В работе [1] этот факт объясняется различием в подвижностях атомов Au и Pt, причем атомы золота значительно более подвижны, чем атомы платины. В предлагаемой модели найденные значения параметра β , характеризующего эффективный объем, приходящийся на один ион падающего излучения, как раз и говорят о том, что подвижность Au атомов значительно больше, чем подвижность у Pt атомов (см. табл.).

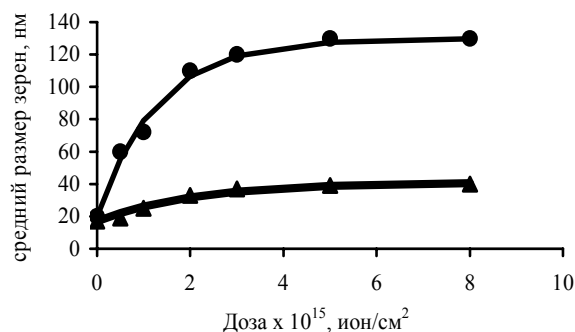


Рис.2. Зависимости среднего размера зерен от дозы Pt (треугольные маркеры) и Au (круглые маркеры) (экспериментальные точки взяты из [1]). Сплошные линии — графики теоретической зависимости (3) с соответствующими значениями параметров из табл.

Таким образом, в данной работе предложена физическая модель роста зерен по размерам в тонкой металлической пленке под действием равномерного потока падающих ионов инертного газа. Получено аналитическое решение, описывающее рост зерен по размерам с увеличением дозы облучения и учитывающее взаимодействие атомов пленки с частицами потока, падающего на пленку.

В заключение отметим, что изучение ионно-индуцированного роста зерен представляет собой интерес для решения проблем микроэлектроники в связи с возможностью контролировать размер зерна атермическим методом [3]. Размер зерна является важным фактором, определяющим электромиграционные характеристики тонкопленочных приборов.

1. Jian L.I., Liu J.C. and Mayer J.W. // Nuclear Instrument and Methods in Physics Research. 1989. В36. Р.306-311.
2. Митрофанов А.В., Карбань О.В., Сугоняко А., Любомска М. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. №7. С.30-38.
3. Abe H., Sasagawa K., Saka M. // Int. Fracture. 2006. V.138. №1. Р.219-240.