

06;13

Особенности роста пленок в тлеющем разряде с убегающими электронами

© С.П. Зинченко, А.П. Ковтун, Г.Н. Толмачев

Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону

E-mail: tres-3@mail.ru

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Поступило в Редакцию 16 июля 2013 г.

При напылении пленок в газовом разряде с пучком убегающих электронов впервые обнаружено аномальное поведение интенсивности отраженного от пленки на подложке зондирующего оптического излучения после выключения разряда. Интерпретация этого явления дается в рамках двухслойной модели роста пленки на подложке: в ходе напыления на поверхности пленки образуется оптически однородный поверхностный слой неизвестной природы, который полностью распадается после выключения разряда.

Способ синтеза пленок в разряде с убегающими электронами является одностадийным и позволяет получать пленки с высоким структурным совершенством [1]. В такой схеме напыления подложка располагается в зоне релаксации электронов с энергией от единиц до сотен электрон-вольт, формирующихся в темном катодном пространстве в режиме их убегания [2]. Известно [3], что электроны с энергией 10–2000 eV могут оказывать существенное влияние на состояние поверхности материала. Например, нагрев поверхности до температуры отжига материала пленки с последующим его структурным упорядочением, электронно-стимулированная десорбция [4,5] могут приводить к образованию дефектов или к разрушению материала, изменению химического состава и морфологии поверхности и т.д.

Исходя из вышесказанного, можно предположить, что в ходе напыления пленок в разряде с убегающими электронами состояние поверхности растущей пленки, как наиболее подверженной воздействию пучка электронов, может быть специфичным и отличаться от состояния материала в объеме пленки. Эти особенности синтеза требуют более детального изучения и могут способствовать пониманию механизмов осаждения пленок на подложку в такого типа разряде.

С нашей точки зрения, наиболее подходящим и доступным для решения этой задачи методом является зондирование пленки оптическим излучением в текущем режиме [6]. В качестве измеряемого параметра в ходе напыления пленки в разряде и после его выключения использовалась временная зависимость интенсивности отраженного от структуры пленка–подложка лазерного излучения ($\lambda = 0.640 \text{ nm}$) *P*-поляризации (кривая отражения). Отраженное излучение несет в себе информацию о таких важных параметрах материала пленки, как показатели преломления и поглощения и ее толщины.

Для нанесения оксидных пленок на подложки использовался процесс распыления в разряде сегнетоэлектрических ($\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x})\text{T}_x\text{O}_3$) и металлических мишеней (Cd, Fe, Zn) в атмосфере кислорода при давлениях 0.2–1 Torr. Технология роста пленок в разряде с убегающими электронами описана в [1]. В качестве подложек использовались поликор, ситалл или кремний. При использовании любых комбинаций из вышеперечисленных материалов мишени и подложки были получены качественно схожие результаты с незначительными количественными различиями, поэтому ниже мы остановимся на мишени из кадмия и железа, где нижеописанные эффекты проявляются наиболее ярко.

На рис. 1 приведены типичные зависимости интенсивности отраженного оптического излучения от пленки CdO в ходе ее роста в разряде и после прекращения напыления. До выключения разряда кривая отражения имела классический осциллирующий вид, связанный с ростом пленки.

Необычным оказалось поведение отраженного сигнала после выключения разряда: вместо ожидаемого прекращения осцилляций в кривой отражения (или незначительных отклонений за счет остывания пленки) наблюдаются существенные изменения интенсивности отражения с характерными временами порядка минуты. Это указывает на то, что после выключения разряда в системе пленка–подложка продолжают развиваться процессы, уже не связанные с разрядом, но именно им обусловленные. Наиболее характерные особенности этих изменений после выключения разряда можно сформулировать следующим образом. На участках кривой отражения уменьшения (увеличения) коэффициента отражения его значение после выключения разряда становится значительно больше (меньше), а в некоторых случаях может превышать (быть ниже) даже его значения в точках экстремумов кривой отражения, характерных для стационарного процесса напыления. Указанные

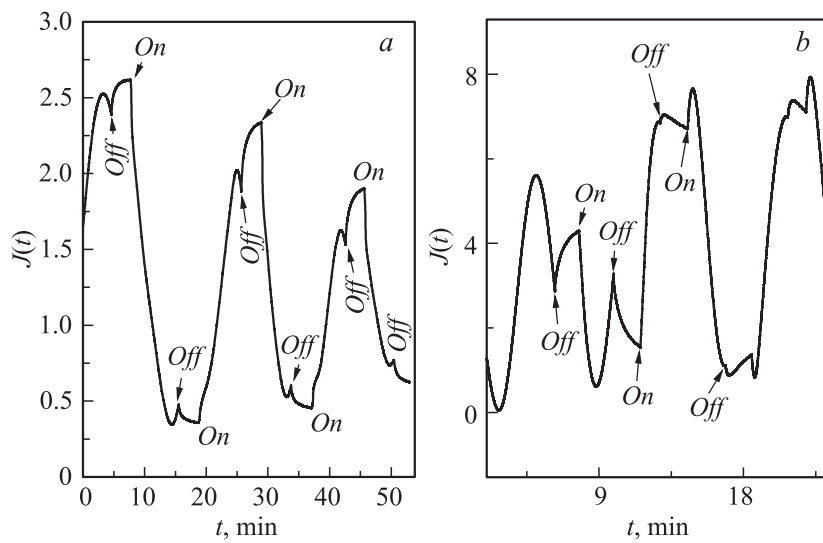


Рис. 1. Характерный вид кривых отражения зондирующего излучения в ходе напыления пленок Fe–O на поликремне (а) и CdO на кремнии (b) в режиме включения–выключения разряда; *On* — момент включения разряда; *Off* — момент выключения разряда.

особенности в рамках изменений толщины пленки при ее охлаждении объяснить нельзя. Следует отметить, что обнаруженные эффекты становятся более ярко выраженными при уменьшении давления газа или увеличении тока разряда, что указывает на определяющую роль в формировании особенностей убегающих электронов, релаксация которых напрямую зависит от давления и приложенного к разряду напряжения [2].

Мы полагаем, что приведенные особенности после выключения разряда являются результатом интерференционных явлений в многослойной структуре. Полученные экспериментальные кривые получают качественную интерпретацию в следующей модели напыления пленки. В ходе напыления структура на подложке является неоднослойной (пленка на подложке), а двухслойной: пленка с некоторым оптическим однородным поверхностным слоем (ПС) на подложке. ПС образуется на поверхности пленки при включенном разряде. Состояние ПС на поверх-

ности пленки неустойчиво и характеризуется собственным временем распада τ . После выключения разряда ПС исчезает (плазма разряда, питавшая ее, распадется), например, в ходе распада ее в окружающую среду или перехода материала ПС в пленку. Полагая скорость роста толщины ПС за счет разряда g , результирующая скорость роста ПС удовлетворяет простейшему кинетическому уравнению:

$$\frac{dh_S(t)}{dt} = g - \frac{h_S(t)}{\tau}. \quad (1)$$

Здесь присутствуют два феноменологических параметра: g — скорость роста ПС, определяемая разрядными условиями; τ — характерное время распада ПС.

Окончательно из уравнения (1) толщины пленки $h_{F(t)}$ и поверхностной структуры $h_S(t)$ в двухслойной модели роста пленки во время ее напыления и после выключения разряда описываются следующими выражениями:

$$h_S(t) = \begin{cases} g\tau + [h_S(t_1) - g\tau] \exp\left(-\frac{t-t_1}{\tau}\right), & t_1 \leq t \leq t_2; \\ h_S(t_2) \exp\left(-\frac{t-t_2}{\tau}\right), & t_2 \leq t \leq t_3; \end{cases}$$

$$h_F(t) = \begin{cases} h_F(t_1) + V_F(t - t_1), & t_1 \leq t \leq t_2; \\ h_F(t_2), & t_2 \leq t \leq t_3. \end{cases} \quad (2)$$

В этих формулах t_1 , t_2 и t_3 — соответственно моменты включения, выключения и последующего включения разряда. Коэффициент отражения вычисляется по известным формулам [7]. Интенсивность отраженного сигнала пропорциональна коэффициенту отражения от двухслойной структуры с оптически однородными изотропными слоями:

$$J(t) = AR(\psi_F(t), \psi_S(t); \varepsilon_F, \varepsilon_S, \vartheta, p). \quad (3)$$

Здесь p — параметры, которые характеризуют подложку. Фазы, куда входят толщины слоев, представлены в обычном виде [7]:

$$\psi_j(t) = 2\pi \frac{h_j(t)}{\lambda} \sqrt{n_j^2 - k_j^2 - \sin^2 \vartheta + 2in_j k_j}; \quad j = F, S. \quad (4)$$

На рис. 2 в рамках предложенной модели приведена схема формирования кривой отражения до и после выключения разряда (момент

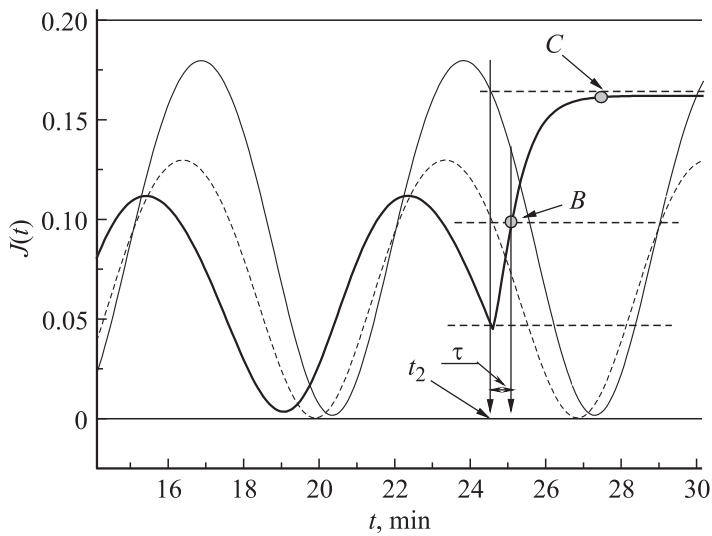


Рис. 2. Схема формирования кривой отражения (жирная линия) до и после выключения разряда. Модельные параметры: пленка ($n_F = 2.5$; $k_F = 0$) на подложке из кремния ($n_{Si} = 3.9$; $k_{Si} = 0.02$), на поверхности которой существует аморфный слой SiO_2 с константами $n_{SiO} = 1.56$, $k_{SiO} = 0$; $h_{SiO} = 10$ nm. Сверху пленки расположен поверхностный слой с максимальной толщиной $g\tau = 10$ nm и с оптическими условными коэффициентами $n_S = 2$, $k_S = 2.5$; угол падения зондирующего излучения Н-поляризации 78° , длина волны зондирующего излучения 640 nm, скорость напыления пленки $V_F = 19$ nm/min, характерное время распада шубы после выключения разряда $\tau \cong 0.5$ min. Эти параметры ориентировочные и близки к реальным при осаждении пленки CdO на кремний.

времени t_2): толстая линия — кривая отражения до выключения разряда ($t < t_2$) с ПС толщиной $h_S = 10$ nm и после выключения ($t > t_2$) в ходе распада ПС. Тонкая линия представляет собой гипотетическую кривую отражения без ПС до и после выключения разряда. Согласно этой кривой значение коэффициента отражения в момент отключения разряда (t_2) является асимптотикой кривой отражения с ПС ($h_S = 10$ nm) после выключения разряда (точка C). Пунктирная линия описывает кривую отражения от гипотетической пленки, на которой существует постоянный ПС с толщиной в e раз меньшей максимальной

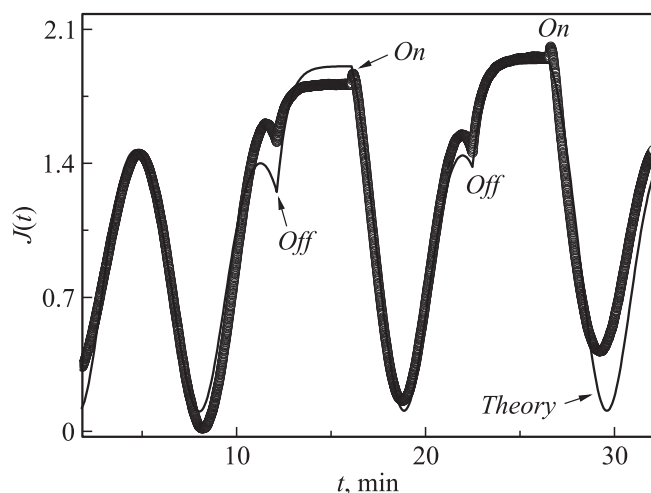


Рис. 3. Соответствие экспериментальной кривой отражения — жирная линия и теоретической — тонкая линия. Параметры модели приведены в подписи к рис. 2.

($h_S = g\tau/e \approx 3.7 \text{ nm}$). Коэффициент отражения в точке выключения разряда, соответствующий этой кривой, позволяет определить характерное время распада ПС τ после выключения разряда (точка B).

На рис. 3 на примере напыления CdO на кремнии иллюстрируется качественное соответствие кинетической модели экспериментальной кривой отражения. Для простоты взята кривая отражения с тремя осцилляциями, прерыванием разряда через 0.5 min после достижения максимума интенсивности и включения разряда через 4 min после выключения. С нашей точки зрения, достигается качественное соответствие кинетической модели роста пленки под ПС экспериментальной кривой отражения.

Таким образом, при напылении пленок в тлеющем газовом разряде с убегающими электронами обнаружено anomalous поведение интенсивности отраженного оптического зондирующего излучения от растущей на подложке пленки после выключения разряда. Приведенные особенности являются результатом интерференционных явлений в многослойной структуре и получают качественную интерпретацию в рам-

ках двухслойной модели роста пленки на подложке: в ходе напыления на поверхности пленки формируется некоторый оптически однородный поверхностный слой, который распадается после выключения разряда с характерным временем порядка минуты. Возникновение поверхностного слоя мы связываем с пучком электронов, формирующимся в темном катодном пространстве в режиме их убегания.

Список литературы

- [1] Мухортов В.М., Головки Ю.И., Маматов А.А., Толмачев Г.Н., Бирюков С.В., Масычев С.И. // Труды Южного научного центра РАН. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2007. Т. 2. С. 224.
- [2] Бакаев А.А. Исследование эффективности формирования убегających электронов в различных типах поперечных разрядов: Автореф. дис.... канд. физ.-мат. наук. Ростов-на-Дону, 2003. С. 21.
- [3] Еловииков С.С. // СОЖ. 1999. № 10. С. 100–107.
- [4] Вудраф Д., Делчар Т. Современные методы исследования поверхности. М.: Мир, 1989. 568 с.
- [5] Луцик Ч.Б., Луцик А.Ч. Распад электронных возбуждений с образованием дефектов в твердых телах. М.: Наука, 1989. 263 с.
- [6] Зинченко С.П., Ковтун А.П., Толмачев Г.Н. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 10. С. 66–72.
- [7] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 620 с.