

03;04;05

Механизм образования углеродных пленок в разряде в скрещенных полях в неоне и аргоне

© А.В. Сасин, И.А. Чернов, Б.К. Игнатъев, С.Д. Вагнер

Карельский государственный педагогический университет, Петрозаводск
E-mail: sasin@kspu.karelia.ru

В окончательной редакции 11 февраля 2009 г.

Исследован процесс образования углеродных пленок в разряде в скрещенных полях в неоне и аргоне с цилиндрической геометрией электродов. Интерферометрическим способом измерено радиальное распределение толщины пленки на торцевой подложке. Предложена диффузионная модель образования пленок. Учтены процессы перезарядки ионов инертного газа и нагрев газа. Проведено сравнение экспериментальных данных с модельными расчетами.

PACS: 52.80.Sm, 81.15.Cd

Тонкие пленки из различных материалов широко используются в технике [1]. В частности, представляют интерес пленки, создаваемые из графита. При некоторых условиях структура этих пленок имеет алмазоподобный характер [2,3]. Одним из методов их получения является разряд в скрещенных полях. Этот тип разряда обладает высокой степенью ионизации газа и стабильностью. Это обеспечивает достаточную скорость роста пленок и их однородность. В известных нам работах, связанных с получением тонких углеродных пленок, отсутствует четкое количественное сравнение результатов эксперимента и теории. Целью данной работы является создание простой модели образования пленок и сравнение расчетов, основанных на ней, с экспериментальными данными.

Для получения пленок использовался макет с системой коаксиальных электродов, представленный на рис. 1. Пленки формировались путем распыления внешнего электрода — катода. С целью исключения загрязнения пленок оба электрода были выполнены из графита. Подложкой служила стеклянная или кремниевая пластинка, установленная на шлифе. Такая конфигурация позволяла помещать в разрядный проме-

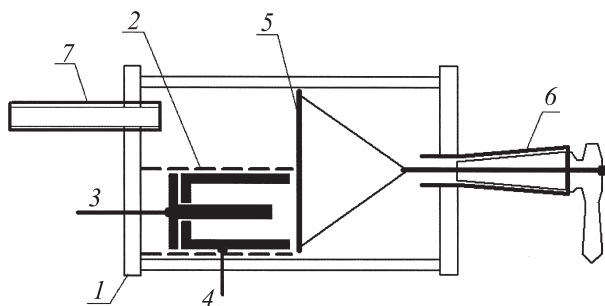


Рис. 1. Макет: 1 — стеклянный баллон, 2 — экран из стекла, 3 — анод, 4 — катод, 5 — подложка, 6 — шлиф для поворота подложки, 7 — откачка.

жуток различные участки подложки. Пленки формировались в режиме постоянного тока. Макет устанавливался в соленоиде таким образом, чтобы разрядный промежуток находился в его центре, в области однородного магнитного поля, величина которого составляла 15 мТ.

В основу модели были положены следующие предположения:

1) атомы углерода появляются в разрядном промежутке вследствие эрозии катода под действием бомбардировки положительными ионами [4] и быстрыми атомами газа, образовавшимися в результате процесса перезарядки [5];

2) осаждение углерода на подложку происходит в результате диффузии атомов в газе; атомы углерода оседают на аноде и на подложке;

3) коэффициент прилипания атомов углерода к аноду и подложке равен единице;

4) имеет место неоднородный нагрев газа [6,7].

Так как катод и анод обладают цилиндрической симметрией, то уравнение диффузии и граничные условия записываем в цилиндрических координатах. На рис. 2 приведены система координат и обозначения основных параметров разрядного промежутка.

Время формирования пленки в режиме постоянного тока значительно больше времени установления диффузионного потока атомов углерода после включения разряда (около 10^{-3} с), поэтому можно считать плотность потока постоянной величиной. При этом имеем стационарную задачу.

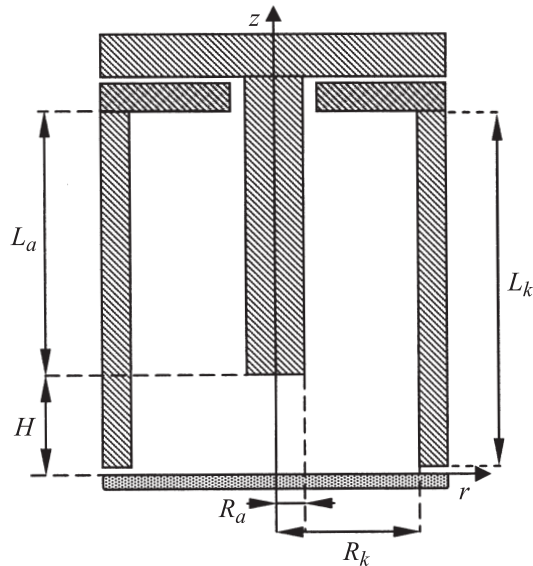


Рис. 2. Разрядный промежуток. L_a, R_a — длина и радиус анода; L_k, R_k — длина и внутренний радиус катода; H — расстояние от торца анода до подложки. $L_k = 54$ мм, $R_k = 9.5$ мм, $L_a = 45$ мм, $R_a = 2.5$ мм, $H = 10$ мм.

Уравнение диффузии соответственно имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(D(T(r)) \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} D(T(r)) \frac{\partial c}{\partial r} + D(T(r)) \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

где $c(r, z)$ и $D(T)$ — концентрация и коэффициент диффузии атомов углерода в газе. Коэффициент диффузии бинарных смесей рассчитывался в соответствии с кинетической теорией [8]. Распределение температуры по радиусу $T(r)$ считаем линейным. Температуру газа непосредственно у поверхности анода считаем равной комнатной температуре, а температура у поверхности катода была измерена термопарой. Ее значение, при условиях получения пленок, составило величину 120° С. Эта величина использовалась в расчетах. Учет зависимости температуры от z (по высоте катода) за счет нагрева торцевой части катода приводит лишь

к несущественным изменениям (в пределах нескольких процентов). Поэтому температуру по высоте электродов считаем постоянной.

На оси цилиндра — условие симметрии:

$$\frac{\partial c}{\partial r}(0, z) = 0, \quad z \in [0, H]. \quad (2)$$

На распыляемой поверхности (на катоде) задаем плотность потока

$$D(T(r)) \frac{\partial c}{\partial r}(r, L_k) = D(T(R_k)) \frac{\partial c}{\partial r} = \frac{(1 + \delta)\gamma j}{e},$$

$$r \in [R_a, R_k], \quad z \in [0, L_k], \quad (3)$$

где j — плотность разрядного тока, γ — коэффициент распыления (отношение числа выбиваемых атомов углерода к числу падающих ионов и атомов газа), δ — коэффициент перезарядки иона в собственном газе (отношение числа быстрых атомов газа, достигших катода после перезарядки, к числу ионов), e — заряд иона. Оценка показывает, что длина свободного пробега иона газа, соответствующая процессу перезарядки [4], в несколько раз меньше толщины катодного слоя; таким образом, большая часть ионов в пределах катодного слоя испытывает перезарядку. Поэтому коэффициент δ примем равным единице. При этом пренебрегаем эмиссией электронов под действием ионов, последние считаем атомарными и однозарядными. На аноде и подложке, где распыленное вещество оседает, наложим условия

$$c(R_a, z) = c(r, 0) = 0, \quad z \in [H, L_k], \quad z \in [0, R_k], \quad (4)$$

т.е. оседает все вещество. Решение этой краевой задачи позволяет определить поток на подложке и вычислить толщину пленки как функцию времени и радиальное распределение толщины пленки по радиусу.

Толщина пленки рассчитывалась в предположении плотной упаковки (простая кубическая кладка).

Для определения толщины пленок использовалась интерференционная картина, получаемая в отраженном свете при длине волны 546 nm. Она имела четкую круговую симметрию и содержала от двух до двадцати интерференционных колец, в зависимости от пропущенного заряда. На рис. 3 приведена интерференционная картина для двух

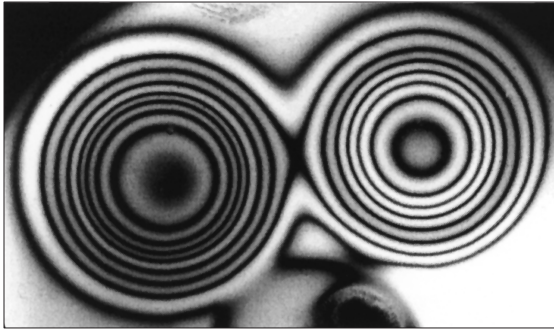


Рис. 3. Интерференционная картина пленок на кремниевой подложке при $\lambda = 546 \text{ nm}$, $q = 30 \text{ C}$, ток 20 mA (слева), 5 mA .

пленок, полученных при одинаковой величине прошедшего заряда q и различных токах в неоне. Эксперимент показал, что основным фактором, определяющим распыление, является заряд, пропущенный через разрядный промежуток, при этом зависимость от тока незначительна (рис. 4, *a*).

На рисунке приведено расчетное распределение толщины пленки по радиусу для эффективного коэффициента распыления 0.7 и $q = 30 \text{ C}$.

На рис. 4, *b* экспериментальные кривые распределения толщины пленок по радиусу, полученных при различных давлениях p и одинаковом пропущенном заряде и токе в аргоне, сравниваются с расчетными, полученными при различных значениях коэффициента распыления γ . Кривая для большего давления соответствует меньшему эффективному коэффициенту распыления γ . Возможной причиной изменения эффективного γ является обратный возврат атомов углерода на поверхность катода. При большем давлении этот эффект должен проявляться сильнее.

На рис. 4, *c* сопоставлен радиальный ход толщины пленок для двух газов. Опыт показывает, что при сравнимых давлениях и пропущенных зарядах эффективность распыления поверхности катода в неоне значительно больше.

Предложенная модель образования углеродных пленок с цилиндрической геометрией электродов охватывает основные аспекты процессов

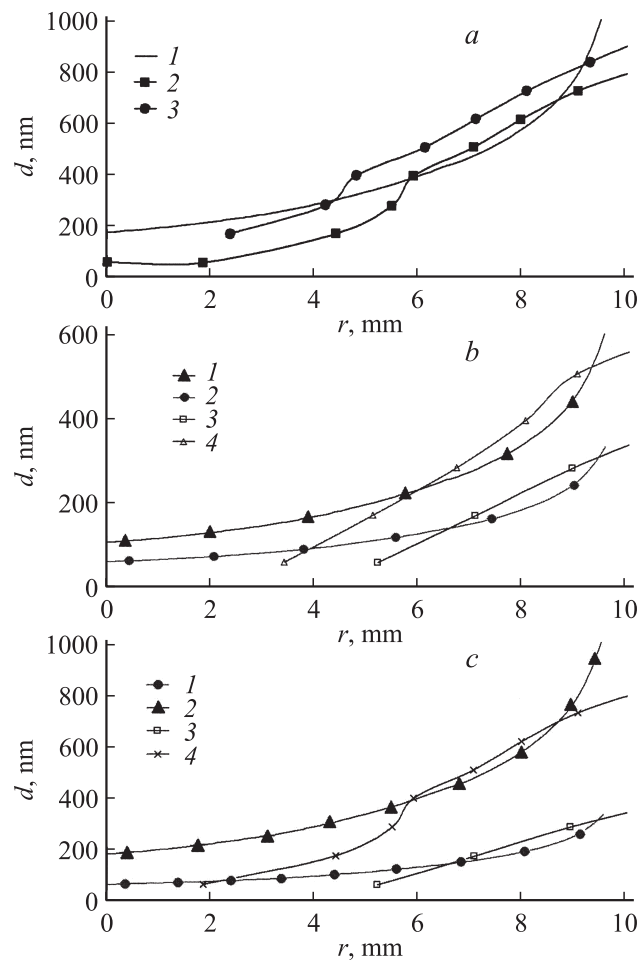


Рис. 4. Распределение толщины пленок по радиусу: *a* — в неоне: 1 — модель, $\gamma = 0.7$, $q = 30$ С; 2 — $I = 20$ mA, $q = 30$ С, $p = 0.2$ Torr; 3 — $I = 5$ mA, $q = 30$ С, $p = 0.2$ Torr. *b* — в аргоне при различных давлениях: 1 — модель, $\gamma = 0.3$, $q = 48$ С; 2 — модель, $\gamma = 0.15$, $q = 48$ С; 3 — $I = 20$ mA, $q = 48$ С, $p = 0.16$ Torr; 4 — $I = 20$ mA, $q = 48$ С, $p = 0.04$ Torr. *c* — для двух газов (неон и аргон): 1 — модель, $\gamma = 0.15$, $q = 48$ С; 2 — модель, $\gamma = 0.7$, $q = 30$ С; 3 — аргон, $I = 20$ mA, $q = 48$ С, $p = 0.16$ Torr; 4 — неон, $I = 20$ mA, $q = 30$ С, $p = 0.2$ Torr.

образования пленок и в достаточной мере согласуется с экспериментальными данными.

Список литературы

- [1] Серов И.Н., Бельская Г.Н., Коцеев С.В., Марголин В.И., Мошников В.А., Чеснокова Д.Б. // Сб. докл. 15 Межд. симп. „Тонкие пленки в оптике и электронике“. Харьков: НИЦ ХФТИ, „Константа“, 2003. С. 14–18.
- [2] Вагнер С.Д., Игнатъев Б.К., Калининская Т.В., Платонов А.А., Ковалевский В.В. // Матер. Всерос. науч. конф. по физике низкотемпературной плазмы ФНТП — 2004. Петрозаводск, 2004. Т. 1. С. 186–191.
- [3] Плесков Ю.В. Электрохимия алмаза / Рос. акад. наук, Ин-т электрохимии им. А.М. Фрумкина. М.: Едиториал УРСС, 2003. 101 с.
- [4] Бурманский И.Ю., Рогов А.В. // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 1. С. 120–122.
- [5] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.
- [6] Знаменский А.Г., Марченко В.А. // ЖТФ. 1998. Т. 68. В. 7. С. 24–32.
- [7] Stephen M. Rossnagel // IEEE Transactions on plasma science. 1990. V. 18. N 6. P. 878–882.
- [8] Гирифельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М., 1961. Гл. 9.