

## НАГРЕВАНИЕ ПОДЛОЖКИ ПРИ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ ГОРЯЧЕЙ МИШЕНИ

© 2016 г. А.В. ЗАВЬЯЛОВ, А.А. МОРОЗОВА, В.И. ШАПОВАЛОВ

Государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург  
e-mail: vishapovalov@mail.ru

### Введение

При осаждении пленок методом магнетронного распыления применяют принудительное нагревание подложки [1]. Это увеличивает адгезию и позволяет управлять химическим составом и кристаллической структурой пленок. Однако фактическая температура подложек в процессе осаждения может оказаться выше на 50–200 °С [2]. При работе магнетрона с хорошо охлаждаемой мишенью дополнительное нагревание подложки происходит за счет [3]:

- кинетической энергии атомов осаждаемого материала;
- энергии, выделяемой при конденсации и кристаллизации;
- кинетической энергии нейтрализованных и отраженных от мишени атомов рабочего газа;
- энергии вторичных электронов с мишени;
- излучения разряда.

У такого магнетрона температура поверхности мишени не превосходит 300–500 °С. Ее можно считать холодной, поскольку при указанных температурах она незначительно влияет на нагревание подложки.

В последнее время изучают магнетроны с так называемой горячей мишенью, которые дают возможность значительно повысить скорость роста и качество пленок [4]. Ее охлаждение крайне неравномерно. Отвод тепла от краевой области происходит по элементам крепления. Центральная часть охлаждается менее интенсивно, главным образом за счет излучения, поэтому может быть нагрета вплоть до температуры плавления. При работе такого магнетрона излучение нагретой поверхности мишени должно вносить значимый вклад в нагревание подложки. В данной работе была исследована работа магнетрона с горячей титановой мишенью.

### Условия эксперимента

Эксперименты выполнены в вакуумной камере объемом  $7.8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ , оснащенной плоским магнетроном диаметром 160 мм, работающим на постоянном токе. Титановая мишень толщиной 1 мм была закреплена болтами на медной водоохлаждаемой плате с зазором 1 мм. Остаточное давление не превышало  $10^{-2}$  мТорр. Распыление проводили в среде аргона при давлении  $p = 5\text{--}10$  мТорр и плотности тока  $j = (5.5\text{--}14.4) \text{ мА/см}^2$ . Для изучения тепловых процессов на подложках использован термопарный датчик. Его чувствительным элементом служила медная пластинка  $10 \times 10 \text{ мм}^2$  и толщиной 1 мм. Пластинка закреплена на спае термопары хромель-копель с диаметром проводников 0.3 мм. Длина проводников термопары равна 500 мм, ее концы закреплены на медном стержне длиной 100 мм и диаметром 15 мм. В каждом эксперименте при заданных значениях  $p$  и  $j$  измеряли изменение температуры чувствительного элемента при работающем магнетроне. Погрешность эксперимента была не более  $\pm 10 \%$ .

Для упрощения вычислений в работе принято, что начальная температура подложки  $T(t = 0) = T_0 = 0$ .

### Обсуждение результатов

Кинетика нагревания подложки зависит от тепловых свойств материала мишени. На рис.1 для примера показаны экспериментальные зависимости, полученные при работе магнетрона с медной мишенью. Установлено, что для описания этих кривых с достоверностью 0.99 адекватна экспонента [2]:

$$T(t) \approx T_{\infty} [1 - \exp(-\alpha t)] \quad (1)$$

где  $T_{\infty}$  – предельная температура;  $\alpha$  – величина, определяющая скорость нагревания. Горячая медная мишень обеспечивает нагревание подложки с большей скоростью до более высокой температуры.

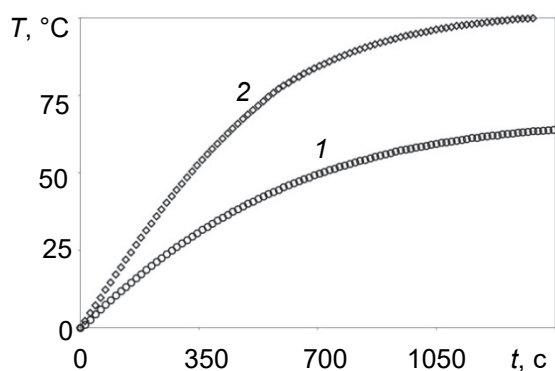


Рис. 1. Нагревание подложки при распылении холодной (1) и горячей (2) медной мишени при  $p_{Ar} = 9$  мТорр и  $j = 11$  мА/см<sup>2</sup>.

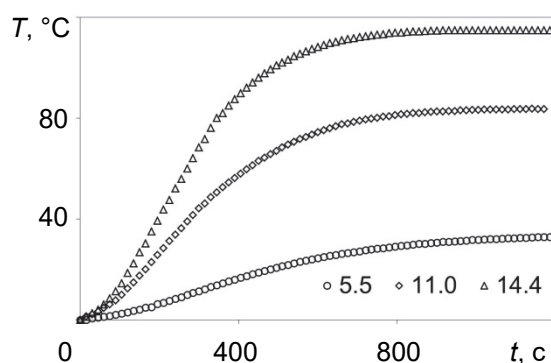


Рис. 2. Нагревание подложки при распылении горячей титановой мишени ( $p_{Ar} = 9$  мТорр, плотность тока в легенде указана в мА/см<sup>2</sup>).

Иной характер носит кинетика этого процесса при работе магнетрона с горячей титановой мишени (рис. 2). Быстрый нагрев медной мишени после включения магнетрона, сменяется для титановой мишени достаточно продолжительным нестационарным процессом. Все кривые на рис. 2 имеют точку перегиба. К этому моменту времени титановая мишень выходит в стационарный тепловой режим. Следует обратить внимание на то, что давление аргона не оказывало значимого влияния на процесс.

Таблица 1

Параметры выражения (2)

| $j$ , мА/см <sup>2</sup> | Режим | Параметры |           |           |
|--------------------------|-------|-----------|-----------|-----------|
|                          |       | $a_1$     | $a_2$ , с | $a_0$ , с |
| 5.5                      | I     | 4.53      | -959      | 159       |
|                          | II    | 3.76      | -265      | -121      |
| 11.0                     | I     | 5.45      | -680      | 112       |
|                          | II    | 4.60      | -147      | -114      |
| 14.4                     | I     | 5.76      | -609      | 93        |
|                          | II    | 4.86      | -91       | -145      |

Кинетические зависимости для титановой мишени на рис. 2 с достоверностью 0.999 аппроксимирует выражение:

$$T(t) \approx \exp\left(a_1 + \frac{a_2}{t + a_0}\right), \quad (2)$$

где параметры  $a_1, a_2$  и  $a_0$  зависят от плотности тока и характера производной  $d^2T/dt^2$ . В табл. 1 сведены эти значения для зависимостей на рис. 2, где цифрами I и II обозначены временные интервалы нестационарного  $d^2T/dt^2 < 0$  и стационарного  $d^2T/dt^2 > 0$  теплового режима работы мишени.

Численное дифференцирование зависимостей на рис. 2 (см. рис. 3) позволило с

помощью гауссовой аппроксимации (сплошные кривые на рис. 3):

$$\frac{dT}{dt} \approx A_0 + \frac{A_1}{\sqrt{\pi/2}\sigma} \exp\left[-2\left(\frac{t-t_0}{\sigma}\right)^2\right], \quad (3)$$

установить положения точек перегиба  $t_0$ . Значения параметров выражения (3) сведены в табл. 2.

Таблица 2

| Параметры выражения (3)  |           |             |                           |           |
|--------------------------|-----------|-------------|---------------------------|-----------|
| $j$ , mA/cm <sup>2</sup> | $A$ , K/c | $A_1$ , K·с | $\sigma$ , с <sup>2</sup> | $t_0$ , с |
| 5.5                      | 27        | 0.0064      | 485                       | 350       |
| 11.0                     | 83        | 0.0089      | 409                       | 244       |
| 14.4                     | 112       | 0.0093      | 322                       | 233       |

Нестационарность теплового режима горячей мишени служила источником нестационарности газового разряда. В режиме постоянного тока напряжение на разряде изменялось так, как показано на рис. 4.

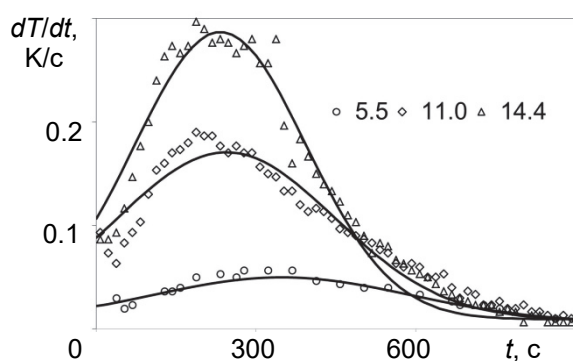


Рис. 3. Численные производные от зависимостей на рис. 2, сплошные линии – аппроксимация (плотность тока в легенде указана в mA/cm<sup>2</sup>)

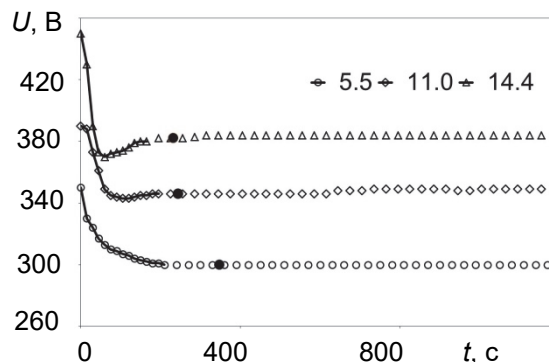


Рис. 4. Напряжение на разряде после включения магнетрона (черными точками обозначены точки перегиба  $t_0$  зависимостей на рис. 2 из табл. 2)

### Заключение

Изучение работы магнетрона с горячей титановой мишенью позволило установить, что после включения возникает начальный нестационарный режим работы, длительность которого зависит от плотности тока разряда. Этот процесс через несколько сотен секунд завершается разогревом мишени до постоянной температуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант 15-19-00076).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shapovalov V.I.* Nanopowders and Films of Titanium Oxide for Photocatalysis: A Review // *Glass Phys. Chem.* 2010, V. 36, No 2, P. 121–157.
2. *Shapovalov V.I., Komlev A.E., Bondarenko A.S., Baykov P.B., Karzin V.V.* Substrate heating and cooling during magnetron sputtering of copper target // *Phys. Lett. A.* 2016. V. 380, No 7–8, P. 882–885; doi: 10.1016/j.physleta.2015.12.021.
3. *Raman P., Shchelkanov I.A., McLain J., Ruzic D.N.* High power pulsed magnetron sputtering: A method to increase deposition rate // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2015. V. 33. P. 031304 (10 pages).
4. *Lapshin A.E., Levitskii V.S., Shapovalov V.I., Komlev A.E., Shutova E.S., Myl'nikov I.L., Komlev A.A.* Composition and Structure of Copper Oxide Films Synthesized by Reactive Magnetron Sputtering with a Hot Target // *Glass Phys. Chem.* 2016. V. 42, No 4. P. 359-362.