

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Optical and Electrical Properties of AgGaS_2 and AgGaSe_2 / B. Tell, H.M. Kasper // Physical Review B. - 1971. - V. 4. № 12. - P. 4455–4459.
2. Photoluminescence study of AgGaSe_2 , $\text{AgGa}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{Se}_2$, and $\text{AgGa}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{Se}_2$ crystals grown by the horizontal Bridgman technique / Y. Cui [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2008. – V. 103. N 12. – P. 123514–1–9.
3. The refractive index of extraordinary ray for AgGaSe_2 crystal in 11–16 μm range / H.-W. Wang, M.-h. Lu // Optics Communications. – 2001. – V. 192. N 3. – P. 357–363.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕГМЕНТИРОВАННОЙ ФУНКЦИИ

Р. Диас¹, Д. А. Котов²

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,

ул. Петруся Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь,

¹⁾ *e-mail: diazr89@gmail.com,*

²⁾ *e-mail: kotov@bsuir.by*

Представлена математическая модель формирования профиля эрозии мишени круглой магнетронной распылительной системы. Разработанная модель основана на математическом описании функции по частям, которая делится на 3 функции: 2 экспоненты и парабола. Для проверки предложенной модели были сделаны измерения выработанной алюминиевой мишени диаметром 100 мм и толщиной 6 мм. Анализ результатов исследования показал, что погрешность расчетной модели не превышает 10,0 %.

Ключевые слова: магнетронное распыление; зона эрозии; экспоненциальная функция; квадратичная функция; плотность ионного тока.

MODELING OF MAGNETRON SPUTTERING SYSTEM USING SEGMENTED FUNCTION

R. Diaz, D. A. Kotov

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,

Petrusya Brovki st. 6, 220013 Minsk, Belarus,

Corresponding author: R. Diaz (e-mail: diazr89@gmail.com)

A mathematical model of modeling the erosion profile in magnetron sputtering is presented. The model is developed based on a mathematical description of the function by parts, which is divided into 3 functions: 2 exponents and parabola. To test the proposed model, measurements were made of an aluminum target with a diameter of 100 mm and a thickness of 6 mm. Analysis of the results of the study shows that the simulation error does not exceed 10.0%.

Key words: magnetron sputtering; zone of erosion; exponential function; quadratic function; density of ion current.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время магнетронное распыление является одним из лучших методов получения тонкопленочных структур. Процесс осаждения распылением позволяет наносить пленки из различных материалов в широком диапазоне изменения толщины от десятков нанометров до нескольких микрон.

Из-за его важности в промышленности большой интерес представляет разработка моделирования всего процесса магнетронного осаждения, для замены проб и ошибок, требующих значительных временных и материальных ресурсов. Кроме того, это позволило регулировать требуемые характеристики, такие как высокая равномерность толщины тонкой пленки, увеличение размера подложек, требуемая скорость осаждения, срок полезного использования мишени.

Целью работы – разработка методики моделирования зоны эрозии магнетронной системы с реальными параметрами процесса, что позволяет проводить расчеты с достаточной точностью [1].

МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТА

Равномерность эрозии мишени является актуальной проблемой магнетронного распыления, так как от этого зависит равномерность формируемого покрытия. Оценки с помощью компьютерного моделирования снижают экспериментальные затраты на повышение эффективности магнитной ловушки. Существуют разные методы определения профиля эрозии, в [2, 3] используют скорость эрозии мишени, в [4] используют расчетную модель, основанную на взаимосвязи между магнитным и электрическим полями. Эти модели дают хорошее приближение прогноза профиля эрозии, но имеют такой недостаток, как ограниченный учет факторов, влияющих на процесс распыления. Чтобы определить профиль эрозии мишени необходимо определить распределение плотности ионного тока над поверхностью мишени. Факторы, влияющие на эту зависимость в первом приближении трудно поддаются четкой интерпретации и, поэтому, на практике ее можно описать математическими функциями. Кривую распределения плотности ионного тока мы аппроксимировали с помощью функции по частям. Она состояла из двух экспоненциальных функций (f_1 и f_3) в левом и правом плечах распределения и перевернутой параболы (квадратичная функция) (f_2) в центральной части распределения. Данное распределение использует реальные параметры зоны распыления и тока разряда магнетрона и с достаточной точностью позволило математически описать распределение плотности ионного тока. При данном методе моделирования профиль распределения плотности ионного тока в зоне разряда задается аналитически с помощью формулы:

$$j_t(r_1) = \frac{I_t}{\pi(R_{max} + R_{min})^2} \frac{f(r_1)}{\int_0^\infty f(r_1) dr_1}, \quad (1)$$

где I_t – ток разряда магнетрона, R_{max} , R_{min} – максимальный и минимальный радиусы зоны эрозии мишени, $f(r_1)$ – функция распределения, которая имеет вид двух экспонент и параболы.

$$f(r_1) = \left\{ \begin{array}{ll} A_1 e^{-x/t_1} + C_1 & \text{для } |r_1| \leq R_1 \\ ax^2 + bx + c & \text{для } R_1 < |r_1| < R_2 \\ B_1 e^{-x/t_1} + D_1 & \text{для } |r_1| \leq R_2 \end{array} \right\} \quad (2)$$

где A_1, B_1 – начальные значения функции; t_1, τ_1 – коэффициенты пропорциональности; C_1, D_2 – коэффициенты перемены; a, b, c – параметры квадратичной функции; R_1, R_2 – радиусы, в которых функции объединены. На рисунке 1 показано расположение функции по частям.

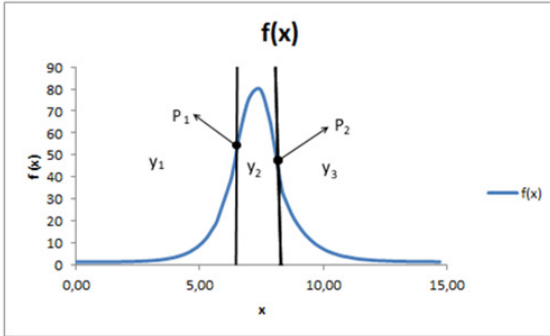


Рисунок 1. – График функции распределения ионного тока над поверхностью мишени

Кривые y_1 и y_3 являются экспоненциальными графиками, а y_2 – параболой; точки $P_1 (R_1, y_1)$ и $P_2 (R_2, y_2)$ представляют собой объединение между кривыми. Коэффициенты при $f(r_1)$ определялись путем измерения и анализа некоторых образцов с различными характеристиками, получая следующее: Радиус $\bar{R}$ максимальной эрозии мишени:

$$\bar{R} = \frac{R_{max} - R_{min}}{2}, \quad (3)$$

где R_{max} и R_{min} – максимальный и минимальный радиусы зоны эрозии мишени.

Радиусы R_1 и R_2 , где функции объединяются:

$$R_1 = \frac{R_{max} - R_{min}}{2,4}, \quad (4)$$

$$R_2 = \frac{R_{max} - R_{min}}{1,6} \quad (5).$$

Численные коэффициенты 2,4 и 1,6 получены эмпирически – путем измерений выработанных мишеней и соответствуют точкам перехода между кривыми разных функций, а численный коэффициент 2 соответствует средней точке полной функции.

Коэффициент пропорциональности для экспоненциальной функции определяется выражением:

$$t = \frac{R_1}{\ln \left(\frac{y_1 - C_1}{A_1} \right)}, \quad (6)$$

где y_1 – изображение R_1 ; C_1 – коэффициент перемены; A_1 – начальное значение функции. Изменение этих параметров будет определять форму кривой.

Параметры a, b и c являются параметрами квадратичной функции, они были получены математическими расчетами, для чего был принят график с максимальной точкой 1 (график, нормированный в относительных единицах):

$$a = \frac{y_1 - 1}{(R_1 - \bar{R})^2}, \quad (7)$$

$$b = 2 * a * \bar{R}, \quad (8)$$

$$c = a * \bar{R}^2 + 1. \quad (9)$$

Как показано в формуле (6) коэффициент пропорциональности для экспоненциальной функции определяется выражением:

$$r = \frac{R_2}{\ln\left(\frac{y_2 - D_1}{B_1}\right)}, \quad (10)$$

где y_2 – изображение R_2 ; параметры B_1 – начальное значение функции; D_1 – коэффициент перемены.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результат моделирования профиля эрозии мишени, полученной магнетронным распылением, с использованием модели функции по частям, показан на рисунке 2.

Оптимизация функции получается путем изменения начальных параметров и переменных параметров. Для проверки функции измерялась алюминиевая мишень диаметром 10 см и толщиной 0,6 см; на рисунке 3 представлена измеренная мишень, где линейка представляет среднюю ось, а точки представляют измеренное местоположение.

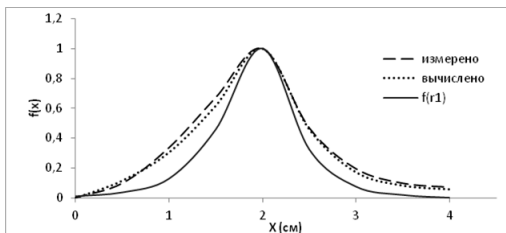


Рисунок 2 – Профили распределения зоны эрозии мишени, полученные в результате моделирования и экспериментальных измерений

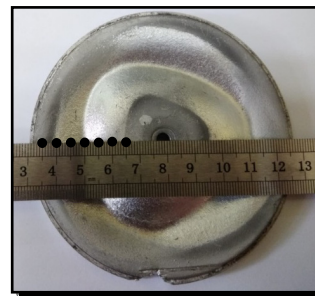


Рисунок 3– Алюминиевая мишень диаметром 10 см и толщиной 0.6 см

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана сегментированная модель, которая описывает профиль эрозии, позволяет повысить эффективность системы магнетронного распыления. Модель позволяет рассчитать профиль зоны эрозии, и таким образом, иметь возможность в дальнейшем предсказать форму осаждения слоев и их толщину. Анализ результатов исследования показывает, что погрешность не превышает (10 %). Однако модель нуждается в дальнейшей коррекции с целью адаптации ее применения на магнетронных распылительных системах различного размера и геометрии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Simulation of the sputtering process. In Reactive Sputter Deposition/ T. Ono, T. Kenmotsu, T. Muramoto. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. – 1-42 pp.
2. Computer simulation of film thickness distribution in symmetrical magnet magnetron sputtering / Q. H. Fan, X.H. Chen, Y. Zhang// Vacuum –1995.V. 46, № 3. –P. 229–232.

3. Kinetic and steady-state properties of magnetron sputter with three-dimensional magnetic field / С.Н. Shon [et al.] // Japanese journal of applied physics. – 1999. – V. 38. № 7S – P. 4440.
4. Прогнозирование эрозии мишени магнетронных распылительных систем/ Д.А. Голосов [и др]// ПФМТ. – 2010. – Т. 2, № 3. – С. 62–67.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ В ПЛАЗМЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Ю. В. Запорожченко, Д. А. Котов, С. А. Никитюк, Е. В. Яцевич, А. Н. Осипов

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки 6, 220013 Минск, Беларусь,
e-mail: yliyazaporozchenko@gmail.com*

Поверхность кремниевой пластины обрабатывалась в плазме при атмосферном давлении. Обработка в плазме диэлектрического барьерного разряда привела к значительному увеличению адгезии. Адгезия определялась на основе измерения коэффициента трения. Зависимость коэффициента трения кремния от режимов обработки изучалась с помощью атомно-силового микроскопа. Использование плазмы атмосферного разряда позволило быстро и качественно изменить свойства поверхности, не разрушая ее.

Ключевые слова: кремний; обработка поверхности; атмосферная плазма; повышение адгезии; коэффициент трения.

INVESTIGATION OF THE SURFACE OF MONOCRYSTALLINE SILICON AFTER PROCESSING IN A PLASMA OF A DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE AT ATMOSPHERIC PRESSURE

Y. V. Zaporozhchenko, D. A. Kotov, S. A. Nikitiuk, E. V. Yatsevich, A. N. Osipov

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
P. Brovki str. 6, 220013 Minsk, Belarus,
Corresponding author: Y. V. Zaporozhchenko (yliyazaporozchenko@gmail.com)*

The silicon wafer surface was treated by atmospheric pressure plasma. Atmospheric plasma improvement resulted in a significant increase in adhesion. The adhesion was measured as a coefficient of friction. The dependence of the friction coefficient of the silicon on the treatment modes was studied by the atomic force microscope. The use of the atmospheric discharge plasma made it possible to change the surface properties rapidly at low cost without destroying it.

Key words: silicon; surface treatment; atmospheric plasma; increase of adhesion; coefficient of friction.

ВВЕДЕНИЕ

Важную роль в науке и технике занимают процессы очистки поверхностей подложек и деталей различной природы, а также их модификация перед последующими