

ефективними, оскільки ще не повністю виявлені і вивчені чинники впливу на характеристики випромінювальних тіл, не мають належного розвитку математичні моделі та експериментальна база досліджень просторових характеристик променистих потоків фотомедичних випромінювачів, що разом утруднює, а у деяких випадках унеможливує розвиток принципів і методів керування ними, не дає змоги ефективно використовувати можливості наявних та розробки нових альтернативних НВ та засобів стабілізації їх випромінювання, необхідної для відтворення програм інформаційних фотомедичних технологій.

1. Скрипнюк З.Д. *Сучасний стан і перспективи розвитку інформотерапії* // *ИиНТ*. –1997. – №1. –С. 24–27.
2. <http://www.informother.htm>.
3. Готра З.Ю., Кожухар О. Т., Чучман І.Р. *Створення фотостимулів некогерентного випромінювання у приладах оптичного лікування* // *Сб. науч. трудов "Электроника и св." по матер. Міжн. наук. техніч. конфер. "Проблемы физической и биомедицинской электроники". Вып. 4. Ч.2.* – К., 1998. – С. 344–347.

УДК 621.793.1

З.А. Шандра

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра електронних приладів

ОПТИМІЗАЦІЯ ТОВЩИНИ РОЗПИЛЕНИХ ПЛІВОК ДЛЯ КОМІРКИ ПЕННІНГА

© Шандра З.А., 2004

Подано результати моделювання наплення тонких плівок в комірці Пеннінга з секційним анодом, визначено вплив геометрії пристрою розпилення на рівномірність плівок по товщині.

In this work give the optimization of sputtered film thickness distribution on planar surfaces results for Penning's cell.

Вступ

Іонне розпилення широко використовується для нанесення тонких плівок різних матеріалів, зокрема тугоплавких металів. З систем розпилення найпоширеніші магнетронні системи, які володіють високою продуктивністю наплення. Різні варіанти побудови магнетронних розпилювальних систем відрізняються формою катодів. Вибір форми катодів визначається необхідністю отримання рівномірних по товщині плівок на великих площах підкладки.

У плоскій магнетронній розпилювальній системі мішень найінтенсивніше розпилюється у вузькій кільцеподібній області, що призводить до появи нерівномірності осаду по товщині. Ця кільцеподібна область є також джерелом високоенергетичних заряджених частинок, які бомбардують підкладку і впливають на структуру плівок у ділянках підкладки, що розташовані над зоною інтенсивного розпилення, а також призводять до рерозпилення плівки. Для усунення цих недоліків підкладку намагаються розташувати під кутом до мішені, однак водночас знижується продуктивність процесу.

Із розпилювальних систем магнетронного типу певні переваги мають системи пеннінговського типу, або комірки Пеннінга. В цих системах підкладка розташована збоку від зони горіння розряду і перпендикулярно до мішені. Розряд Пеннінга внаслідок відсутності розжареного катода, можливості отримувати достатньо великі розрядні струми за низьких тисків газу застосовується в техніці високовакуумних насосів та манометрів, електронних та іонних гармат [1],

в технології тонких плівок [2]. Основні характеристики цього розряду досліджені для системи електродів, у якій розряд зосереджений усередині анода. Виявлено, що залежно від індукції магнітного поля та тиску газу спостерігаються високовольтна та високострумова форми розряду [3], розподіл струму по поверхні катодів є нерівномірним з максимумом у центрі катодів. Характеристики розряду значною мірою зумовлені геометрією електродів, зокрема, відстанню між катодами [4].

З використанням комірки Пеннінга були отримані тонкі надпровідникові плівки ітрій-барієвої кераміки $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ з критичною температурою переходу 84 К [5]. Недоліком такої комірки є значна залежність рівномірності плівки по товщині від відстані підкладки – катода. Для покращання рівномірності плівок було запропоновано застосування додаткових електродів, які зроблені із матеріалу катодів [6]. Подаючи на ці електроди від’ємний потенціал, можна регулювати швидкість нарощування плівки в різних точках підкладки і отримувати потрібний профіль плівки по товщині.

Експериментальна установка

Комірка Пеннінга з секційним анодом показана на рис. 1. Вона являє собою два мідні круглі катода 1 діаметром 55 мм, розташовані паралельно на відстані 40 мм, і циліндричного мідного анода 2 з п’яти ізолюваних секцій довжиною по 5 мм. Вся конструкція розміщена на суцільному ізоляторі 3. Магнітне поле створювалось кільцевими постійними магнітами 4 із самарій-кобальтового сплаву. Індукція магнітного поля на поверхні катодів 0,2 Т, в центрі між катодами над середньою анодною секцією вона становила 0,04 Т. Магніти з катодами охоплюються екранами 5 для запобігання розрядів на корпус вакуумної установки. Екрани і анод з’єднувались з корпусом, додатний полюс джерела живлення розрядного струму подавався на корпус. Потенціал секцій анода відносно катода задається другим джерелом живлення.

Для визначення основних характеристик розряду вся комірка розміщувалась в кварцовій трубі 6, у стінку якої вмонтований мідний зонд 7 діаметром 1 мм і довжиною 5 мм. Досліджуючи напilenня плівок, замість кварцової труби встановлювали тримач підкладок.

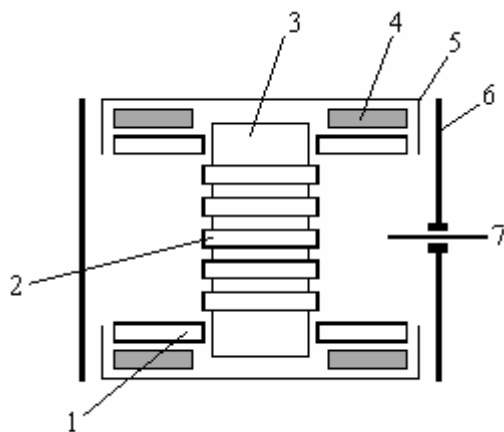


Рис. 1. Комірка Пеннінга з секційним анодом

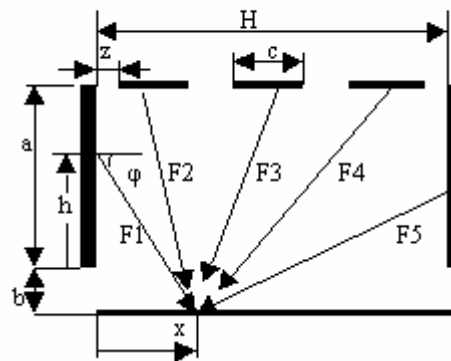


Рис. 2. Геометрична модель комірки Пеннінга

Моделювання розпилення

Для оптимізації розподілу плівок по товщині розглянемо одновимірний випадок, тобто розподіл товщини по осі системи між катодами. Це дає змогу визначити вплив таких розмірів, як відстані між катодами, висоти катодів, відстані до підкладки, ширини анодних секцій та їх розташування. На ґрунті загальноприйнятого підходу припустимо, що розподіл емітованих (розпилених) частинок за напрямками виходу підпорядкований косинусному закону: $F(\varphi) = F_0 \cdot \cos \varphi$, де F_0 – потік частинок, що виходять по нормалі до поверхні, визначається коефіцієнтом катодного розпилення, енергією і струмом іонів. Також в першому наближенні

припустимо однорідність струму по всій поверхні катодів та анодних секцій та прямолінійність руху емітованих частинок (тиск газу під час розряду – в межах $0.3 \div 0.7$ Па).

Геометричну модель для підрахунків подано на рис.2. Позначення розмірів: **H** – відстань між катодами; **a** – висота катодів; **b** – відстань до підкладки; **c_n** – ширина анодної секції; **z_n** – відстань від анодної секції **c_n** до катода(**n**-номер секції); **φ** – кут виходу емітованих частинок.

Згідно з моделлю, в точку **x** на підкладці надходять потоки емітованих частинок F1 і F5 з катодів і потоки F2, F3, F4 з анодних секцій. Кут виходу частинок залежить від координати **x** і місця виходу з катода по висоті, від номера секції і точки виходу в межах певної секції. Отже, повний потік $F(x) = F1+F2+F3+F4+F5$. Послідовність визначення цих потоків є ідентичною, тому розглянемо цю процедуру для потоку F1.

Елементарний потік $dF1(\varphi) = F1_0 \cdot \cos(\varphi)d\varphi$. Визначимо $\cos(\varphi)d\varphi$ через геометричні розміри комірки для змінної **h**:

$$\sin(\varphi) = (h + b) \cdot [x^2 + (h + b)^2]^{-\frac{1}{2}},$$

$$d \sin(\varphi) = \cos(\varphi)d\varphi = x^2 \cdot [x^2 + (h + b)^2]^{-\frac{3}{2}} dh,$$

$$dF1(x) = F1_0 \cdot \frac{x^2}{\sqrt{[x^2 + (h + b)^2]^3}} dh.$$

Проінтегруємо цей вираз. Межі інтегрування визначаємо із умови, що при **h=0** F1(φ)=0, якщо **h=a** F1(φ)=F1(x).

$$\int_0^{F(x)} dF(\varphi) = F1_0 \cdot \int_0^a \frac{x^2}{\sqrt{[x^2 + (h + b)^2]^3}} dh.$$

Поділимо ліву і праву частини виразу на F1₀ і виконаємо аналіз для нормованого потоку $f1(x) = F(x)/F1_0$:

$$f1(x) = x^2 \cdot \int_0^a \frac{1}{\sqrt{[x^2 + (h + b)^2]^3}} dh.$$

Ідентично визначаються і всі інші складові потоку f(x):

$$f5(x) = (H - x)^2 \cdot \int_0^a \frac{1}{\sqrt{[(H - x)^2 + (h + b)^2]^3}} dh,$$

$$f(x)_n = (a + b)^2 \cdot \int_0^{c_n} \frac{1}{\sqrt{[(a + b)^2 + (x - z_n - c_n)^2]^3}} dh.$$

Результати моделювання з використанням системи Mathcad для різних співвідношень між розмірами a,b,c,H подано на рис.3–5.

Аналіз результатів

Відстань до підкладки. Як видно із рис.3, при розташуванні підкладки безпосередньо на комірці в центрі підкладки спостерігається провал по товщині (якщо **H=5** см, він становить понад 10 % від максимальної товщини). Зі збільшенням відстані між катодами ця неоднорідність зростає. Віддалення підкладки від катодів покращує рівномірність плівки в центрі, але різко зростає неоднорідність по периферії підкладки, а також зменшується продуктивність наплення.

Висота катодів. Для аналізу була взята комірка з **H=5** см і відстанню до підкладки **b=0,08** см. Найбільший вплив висоти катодів на рівномірність плівок спостерігається в діапазоні значень висоти від **a=0,5**см до **a=1,8** см (рис. 4). Якщо **a>4** см і **H=5** см, в центрі підкладки з'являється

потовщення, для його усунення потрібно збільшувати відстань між катодами. Для $H=5$ см оптимальним можна вважати висоту катодів $a = 2,6-2,9$ см, але треба зауважити, що біля катодів рівномірність плівки падає.

Вплив анодних секцій. Аналіз здійснювався для комірки з такими параметрами: $H=6$ см, $a=2$ см, $b=0,08$ см. Як видно із рис. 5, при відключенні всіх секцій (крива 1) товщина в центрі менша, ніж по краю підкладки. Цю неоднорідність можна усунути підключенням середньої секції (крива 2), але треба підбирати розмір секції c , щоб в центрі не виникло потовщення. Підключення крайніх секцій, що розташовані симетрично відносно центра, призводить до збільшення продуктивності процесу, разом з тим, в центрі підкладки з'являється потоншення плівки (крива 3). Під'єднання до крайніх секцій середньої з відповідним підбором її розмірів вирівнює товщину в центрі, і продуктивність буде максимальною. З погляду отримання рівномірної по товщині плівки на максимальній довжині підкладки доцільно вибрати варіант з використанням однієї середньої секції і підбором її розмірів та режиму розпилення.

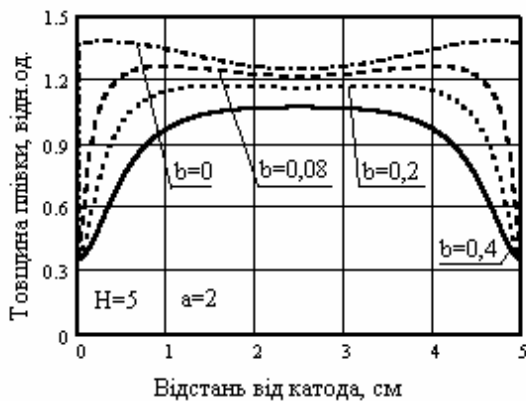


Рис. 3. Вплив відстані до підкладки на рівномірність плівок

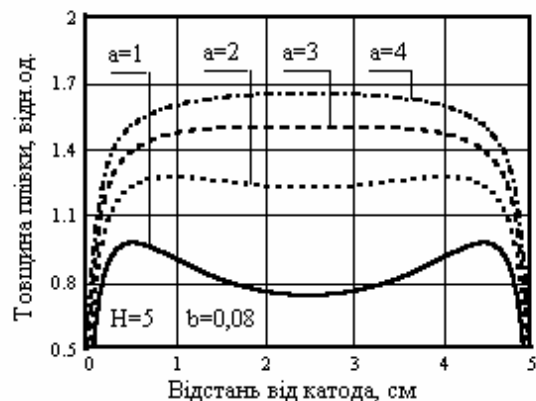


Рис. 4. Вплив висоти катодів на рівномірність плівок

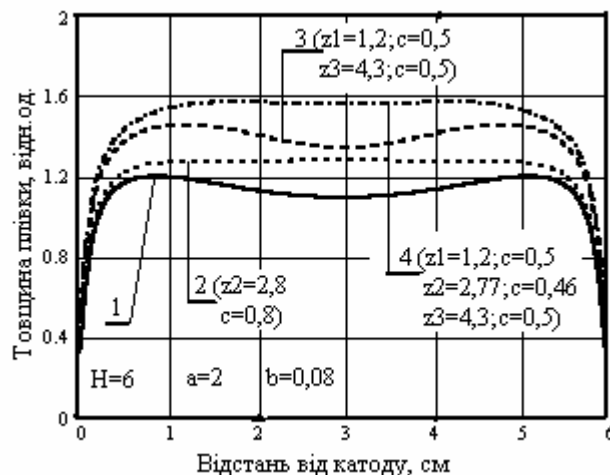


Рис. 5. Вплив анодних секцій на рівномірність плівок:
1 – секції відключені; 2 – підключена середня секція;
3 – підключені крайні секції; 4 – підключені всі секції

Висновки

Моделювання напilenня плівок в комірці Пеннінга показує, що, підбираючи такі розміри, як висота катодів, відстань до підкладки, ширина анодної секції та її розташування можна отримати рівномірну по товщині плівку для заданого розміру підкладки. Оптимізувати ці розміри треба з

урахуванням потрібної продуктивності процесу, яка визначається відповідним технологічним процесом.

1. Габович М.Д., Плешивец Н.В., Семашко Н.Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза. М., 1986.
2. Битнер Л.Р., Ведерников В.А., Данилина Т.И., Маняхина Г.В., Шандра З.А. // Изв. ВУЗов. Физика, № 12, 1976. – С.11–15.
3. Крейнделъ Ю.Е. Плазменные источники электронов. – М., 1977.
4. Баберцяи Р.П., Бадалян Э.С., Егназарян Г.А., Тер-Геворкян Э.И. //ЖТФ, №9, 1998. – С.29–32.
5. Агафонникова Е.В., Шандра З.А. Сверхпроводимость: физика, химия, техника // №1, 1992/ – С. 123–127.
6. Шандра З.А. // Вісник ДУ “Львівська політехніка”, 1999, №382. – С.56–60.

I. Bolshakova¹, V. Brudnyi², V. Boiko³, N. Kolin³,
M. Kumada⁴, C. Leroy⁵, D. Merkurisov³

¹Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,

²Siberian Physical Technical Institute, Tomsk, Russia,

³Obninsk Branch State Research Center “Karpov Institute of Physical Chemistry”, Obninsk, Russia,

⁴NIRS, Chiba-shi, Japan,

Laboratoire R.-J.A. Leversque University of Montreal, Canada

THE RADIATION HARDNESS OF MAGNETIC SENSORS AND DEVICES IN EXTREME CONDITIONS OF IRRADIATION WITH HIGH NEUTRON FLUXES

© Bolshakova I., Brudnyi V., Boiko V., Kolin N.,
Kumada M., Leroy C., Merkurisov D., 2004

The radiation hard magnetic field sensors are based on indium antimonide semiconductor compound microcrystals. The tests performed have shown the high stability of their characteristics under irradiation with reactor neutrons up to very high fluences of $10^{16} \div 10^{18}$ n·cm⁻². The magneto-measuring facility has been built with measurement channels of high accuracy of 0.01%.

Introduction

Experiments on the direct measurements of Hall sensors directly during their irradiation have not been performed up to this time. This is related with a series of difficulties in conducting such experiments. First of all, it is necessary to locate the magnet as a magnetic induction source in the neutron reactor channel. Besides, it is necessary to provide the control of the magnet parameters under the reactor neutrons irradiation. And finally, it is necessary to provide the measurement instrumentation which allows the amplification and protection of the measured signals from noises on the distance of several dozens of meters.

The results of investigations of the neutron irradiation influence on the characteristics of indium antimonide semiconductor material for sensors were reported previously [1]. However, all these previous investigations were indirect and were carried out in several stages. First, the measurements of characteristics of the samples were performed in the laboratory environment using hall measuring benches. Then, samples were transferred to the nuclear research center, where they were exposed to the neutron fluence. At the next stage, the samples was held in “quarantine” under radiation monitoring until the induced radioactivity decreased to the radioactive background standard. Only after that the samples under the investigation were returned to the laboratory, where were performed the measurement and analysis of