

ЗБІЛЬШЕННЯ РІВНОМІРНОСТІ ЗА ТОВЩИНОЮ ПЛІВОК, ОДЕРЖАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ ВУП-5М

Проведені дослідження впливу відстані мішень–підкладка на рівномірність плівок за товщиною, осаджених методом магнетронного розпилення на установці ВУП-5М. Показано шляхи збільшення ефективності процесу розпилення та досягнення майже 100% рівномірності за товщиною плівок, нанесених на поверхню підкладки.

Investigation of influence target–substrate distance on thickness uniformity of thin films deposited by magnetron sputtering technique with setup VUP-5M has been performed. Ways to increase efficiency of sputtering method and achievement of almost 100% thickness uniformity of substrate settled on surface have been shown.

Ефективність процесу розпилення визначається насамперед малим часом осадження у перерахунку на одну підкладку і максимальною рівномірністю товщини плівки на всій поверхні підкладки. Відповідно до цього при конструюванні випаровувачів для випаровування речовини у вакуумних установках велике значення має знання характеристик випаровування, які істотно впливають на розподіл конденсованої речовини за товщиною. Оскільки в більшості випадків, при створенні різних мікроелектронних приладів, необхідно отримувати плівки заданої товщини, то очевидно, що важливим параметром випаровувача є площа поверхні підкладки, яка може бути покрита рівномірно плівкою однакової товщини. Закони розподілу плівки за товщиною, виведені на основі газокінетичної теорії випаровування для ідеалізованого випадку точкового випаровувача і випаровувача з малою поверхнею показують, що випаровування речовини відбувається нерівномірно в усіх напрямках, а переважно у напрямках, перпендикулярних до випаровуваної поверхні і залежить від відстані між випаровувачем та підкладкою. Це означає, що кількість речовини, яка осаджується на протилежну поверхню, залежить як від розміщення цієї поверхні відносно випаровувача, так і від відстані між ними, а також від форми і розмірів конкретного випаровувача (закони Ламберта-Кнудсена) [1].

Використовуючи закони випаровування, профіль товщини плівки може бути виведений не тільки для точкових випаровувачів і випаровувачів з малою поверхнею, а й для будь-якої форми поверхні підкладки та для будь-якого положення підкладки відносно випаровувача. Однак зазвичай

використовують плоскі підкладки і розташовують їх паралельно до ефективної площини випаровування.

Мета даної роботи – дослідження рівномірності товщини осадження плівок на підкладку стандартних розмірів, залежно від положення їх відносно випаровувача, одержаних методом магнетронного розпилення на установці ВУП-5М, та вдосконалення конструкції установки для підвищення ефективності процесу осадження за рахунок збільшення площі рівномірності плівок за товщиною та кількості підкладок, розміщених на підкладкотримачі в одному циклі розпилення.

Тонкі плівки різних напівпровідникових матеріалів, включаючи метали, виготовлялися методом магнетронного розпилення на установці ВУП-5М. В якості катодів випаровуваного матеріалу застосовувалися круглі диски діаметром 40 мм. Як підкладки використовувалися пластини з кремнію і сіталу. Перед використанням проводилося очищення їх в ацетоні марки ОСЧ. Відстань катод–підкладка h змінювалася від мінімальної величини 20 мм до 80 мм. Тиск робочого газу Ar або O_2/Ar у камері і потужність на катоді під час процесу розпилення підтримувалися сталими. Товщина одержаних плівок оцінювалася з допомогою інтерференційного мікроскопа Лінника МІІІ-4 і складала 1–2 мкм залежно від технологічних умов нанесення. Швидкість нанесення плівок визначалася матеріалом катода, відстанню катод–підкладка та параметрами режиму розпилення.

Оскільки при одержанні плівок за допомогою магнетронного розпилення на установці ВУП-5М випаровування матеріалу з катода відбувається з кільця кінцевої ширини, то для розрахунку роз-

поділу плівки за товщиною можна використати вираз, одержаний на основі законів випаровування, для тонкого кільцевого випаровувача [1]:

$$d = \frac{M}{\pi \rho h^2} \times \frac{1 + (l/h)^2 + (r/h)^2}{\left\{ \left[1 - (l/h)^2 + (r/h)^2 \right]^2 + 4(l/h)^2 \right\}^{3/2}}, \quad (1)$$

де M – випарувана маса, ρ – густина матеріалу плівки, h – відстань катод-підкладка, l – відстань від центра підкладки до будь-якої точки на підкладці, r – радіус кільця випаровувача.

Використовуючи товщину плівки в центрі підкладки d_0 при $l=0$

$$d_0 = \frac{M}{\pi \rho h^2} \cdot \frac{1}{\left[1 + (r/h)^2 \right]^2}, \quad (2)$$

легко описати рівномірність за товщиною на поверхні підкладки, яка отримується від тонкого кільцевого випаровувача. величиною, яка характеризує рівномірність плівки за товщиною, є відношення d/d_0 , що містить два параметри: відносну відстань від центра підкладки l/h і відносний радіус випаровувача r/h .

З рівняння (1) випливає, що при досить малому відносному радіусі випаровувача $(r/h)^2 \ll 1$, розподіл конденсату на поверхні підкладки буде збігатися з розподілом від одного точкового елемента поверхні випаровувача [2, 3]:

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1}{\left[1 + (l/h)^2 \right]^{3/2}}. \quad (3)$$

Вираз (3) засвідчує, що рівномірність конденсату на підкладці підвищується зі збільшенням відстані h . При $d/d_0=0,98$ (розкид за товщиною $\pm 1\%$) $l/h=0,114$. Це означає, що підкладка стандартних розмірів $60 \times 48 \text{ мм}^2$ повинна розташовуватися від випаровувача на відстані не менше 260 мм. Ефективність технологічного процесу напilenня при таких відстанях значно зменшується, оскільки швидкість осадження спадає внаслідок зменшення густини потоку випаровуваного матеріалу (для збільшення швидкості осадження і збереження рівномірності конденсату на підкладці необхідно значно збільшувати розміри випаровувача). Подібний розподіл рівномірності плівок за товщиною одержується і при використанні випаровувача з малою поверхнею, яка описується рівнянням [2, 3]:

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1}{\left[1 + (l/h)^2 \right]^2}. \quad (4)$$

Результати розрахунку розподілу за товщиною плівки від точкового, з малою поверхнею і тонкого кільцевого випаровувачів при застосованих нами відносних радіусах мішені та фіксованому положенні підкладки відносно мішені наведені на рис.1 суцільними лініями. Експериментальні результати позначені маркерами (на прикладі плівок Ni). Спостерігається добре узгодження між теоретично розрахованими і експериментально отриманими результатами.

З рис.1 видно, що істотне поліпшення однорідності плівок за товщиною на великій площі можна отримати тільки при використанні кільцевого випаровувача, радіус якого близький до відстані випаровувач-підкладка. Швидкість осадження й ефективність процесу при таких h досить високі. Найкраща рівномірність плівок за товщиною поблизу центра підкладки спостерігається при відносному радіусі $r/h=0,7-0,8$ (рис.1, крива 4). При збільшенні радіуса і сталій величині h , кількість речовини, що випаровується до центра підкладки, стає меншою, ніж кількість, що випаровується до периферії (рис.1, крива 3).

На основі експериментальних і розрахункових даних проведено розрахунок площі рівномірного покриття конденсатом підкладки стандартних розмірів, яка нерухома відносно мішені. При обраному радіусі тонкого кільцевого випаровувача 15 мм (стандартний розмір кільця випаровувача матеріалу магнетроном ВУП-5М) і оптимальному значенні $r/h=0,75$ площа, рівномірно покрита плівкою, дорівнює 452 мм^2 , що становить 16% від загальної площі підкладки. Цілком очевидно, що збільшити площу рівномірності плівки за товщиною можна пересуваючи підкладку паралельно до площини мішені.

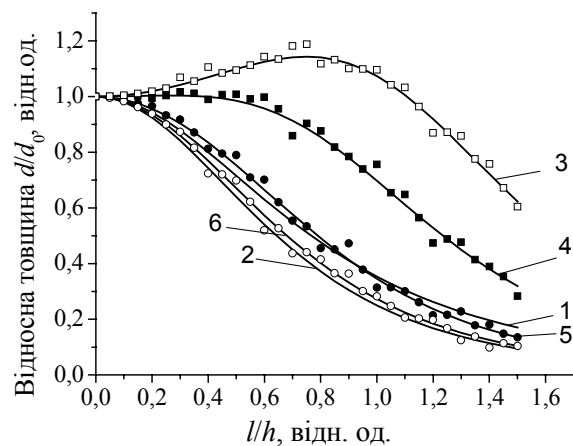


Рис.1. Розподіл плівки за товщиною для різних випаровувачів: точковий (1), з малою поверхнею (2), тонкий кільцевий при відносних радіусах $r/h=1$ (3), 0,75 (4), 0,375 (5), 0,188 (6). Маркерами вказані відповідні експериментальні результати.

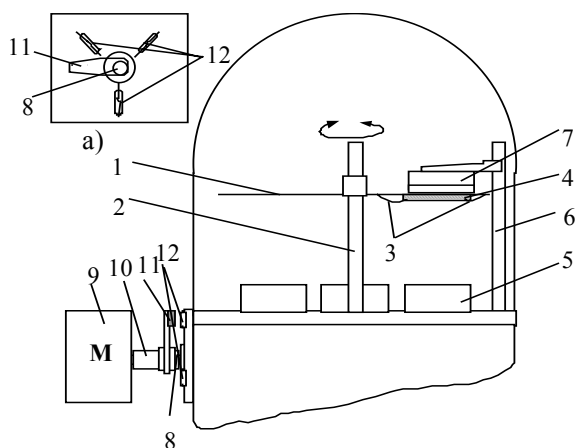


Рис.2. Кінематична схема модернізованої робочої вакуумної камери установки ВУП-5М: 1 – диск-підкладкотримач, 2 – центральний валик, 3 – пружинні затискачі, 4 – підкладка, 5 – випаровувач, 6 – додатковий стрижень, 7 – випромінювач тепла, 8 – вихідний валик, 9 – електродвигун, 10 – перехідна муфта (на вставці зображено розміщення постійного магніта 11 та герконових контактів 12).

З цієї метою вдосконалено конструкцію установки ВУП-5М, за рахунок встановлення у вакуумній камері плоского круглого диска-підкладкотримача 1 на центральному валику 2 та розміщеного ззовні, механізму його обертання (рис. 2). На диску за допомогою пружинних затискачів 3 закріплюються підкладки 4 так, щоб при обертанні диска вони здійснювали рух над випаровувачем (катодом) 5. На додатковому стрижні 6 встановлюється випромінювач тепла 7, який дозволяє контролювано нагрівати підкладкотримач з підкладками в межах від 30 до 350°C. Вихідний валик 8, з'єднаний з реверсивним електродвигуном 9 через перехідну муфту 10, приводить у рух центральний валик з диском-підкладкотримачем. На муфті 10 закріплений постійний магніт 11, який керує герконовими контактами 12 (рис.2, вставка а), що дає можливість з допомогою спеціально розробленої електричної схеми проводити неперервно як обертання диска-підкладкотримача, так і коливальні рухи навколо центральної вісі (валика), а також встановити (зупинити) підкладку над будь-яким одним із трьох магнетронів ВУП-5М.

При неперервному русі підкладки паралельно до площини мішені рівномірність товщини покриття площі підкладки збільшується на 34% і становить половину від усієї площі поверхні стандартної підкладки. Для досягнення зростання рівномірності товщини покриття плівкою всієї площі стандартної підкладки ($100 \pm 2\%$) при оптимальних умовах розпилення ($r/h=0,75$) треба було б збільшити діаметр мішені не менш ніж до 65 мм, що потребувало б підведення значно

більшої потужності до катода.

Оскільки конструкція промислової установки ВУП-5М не дає можливості проводити розпилення з мішеней, діаметром більше 40 мм, то для досягнення однакової рівномірності плівок за товщиною на всій поверхні підкладок необхідно зменшувати їхній розмір.

Якщо ж при даних технологічних умовах проводити розпилення на підкладки з шириною у два рази меншою (24 мм), то рівномірність за товщиною буде однаковою у будь-якій точці підкладки. Довжина підкладок при цьому лімітується тільки конструктивними особливостями підкладкотримача (кількістю підкладок, що можна розмістити на плоскому круглому диску-підкладкотримачі так, щоб при його обертанні вони здійснювали рух над мішенню паралельно її поверхні).

Отже, використання магнетронного розпилення для одержання рівномірних плівок за товщиною має істотну перевагу перед звичайним термічним випаровуванням, оскільки збільшити розмір випаровувачів у вигляді кільця або круглого тигля порівняно великого діаметра (≈ 65 мм) практично неможливо.

Висновки

Досліджено вплив відстані мішень-підкладка на рівномірність за товщиною плівок на поверхні підкладок, осаджених методом магнетронного розпилення на установці ВУП-5М. Показано, що на підкладці стандартних розмірів (48×60 мм²) можна досягнути однакової рівномірності покриття плівкою на 16% від усієї площі підкладки (без удосконалення установки) при оптимальних умовах осадження. Проведені конструктивні удосконалення ВУП-5М дають можливість збільшити рівномірність плівок за товщиною до 50% площі підкладки, а зменшення при цьому ширини підкладки у два рази (24 мм), з одночасним розміщенням на рухомому диску-підкладкотримачі більшої кількості підкладок, призводить до однакової рівномірності на всій площі осадження ($100 \pm 2\%$), що значно підвищує ефективність процесу розпилення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Технологія тонких плінок: Справочник: В 2 т. / Под ред. Л. Майссела, Р. Гленга. – М.: Сов. радио, 1977. Т 1.
2. Холлэнд Л. Нанесение тонких плінок в вакууме. – Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, 1963.
3. Парфенов О.Д. Технологія мікросхем. – М.: Высш. шк., 1986.