

Ю.Ю. Жигуц¹, В.Д. Рудь², В.Ф. Лазар³

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»¹

Луцький національний технічний університет²

Мукачівський державний університет³

ТЕХНОЛОГІЯ НАПИЛЕННЯ ПЛІВОК НАНОСЕКУНДНИМИ ЛАЗЕРНИМИ ІМПУЛЬСАМИ

Для оптимізації технологічного процесу ефективного застосування ексимерних лазерів для потреб плівкових технологій необхідні дані про основні параметри пари, що конденсується на підкладку. Властивості плівок, отриманих розпиленням мішені наносекундними лазерними імпульсами та властивості парової фази виявилися практично не дослідженими. У той же час, мас-спектрометричні та зондові дослідження парової фази дають змогу визначити низку важливих параметрів конденсації. Результатом проведених таких робіт стала розробка технології формування періодичних структур при опроміненні мішені цугом лазерних імпульсів, який забезпечує отримання якісних гетерогенних структур.

Ключові слова: цуги, лазерні імпульси, мішень, фаза, напилення, періодичні структури.

Ю.Ю. Жигуц, В.Д. Рудь, В.Ф. Лазар

ТЕХНОЛОГИЯ НАПЫЛЕНИЯ ПЛЕНОК НАНОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Для оптимизации технологического процесса эффективного применения эксимерных лазеров для нужд пленочных технологий необходимы данные об основных параметрах пара, который конденсируется на подложку. Свойства пленок, полученных распылением мишени наносекундных лазерными импульсами и свойства паровой фазы оказались практически не исследованы. В то же время, масс-спектрометрические и зондовые исследования паровой фазы позволяют определить ряд важных параметров конденсации. Результатом проведения таких работ стала разработка технологии формирования периодических структур при облучении мишени цугом лазерных импульсов, который обеспечивает получение качественных гетерогенных структур.

Ключевые слова: цуги, лазерные импульсы, мишень, фаза, напыление, периодические структуры.

Yu. Zhiguts, V. Rudj, V.F. Lazar

TECHNOLOGY OF SPRAYING LAMINAS WITH NANOSECOND LASER PULSES

In order to optimize the technological process of efficient use of excimer lasers for the needs of laminas technologies, information is needed on the main parameters of the vapour, which condenses on the substrate. However, the properties of films obtained by sputtering the target with nanosecond laser pulses and the properties of the vapour phase have not been studied in practice. At the same time, mass-spectrometric and probe studies of the vapour phase make it possible to determine a number of important condensation parameters, optimize the deposition process itself, and clarify the understanding of the physics of evaporation of complex targets. The work resulted in the development of a method for the formation of periodic structures upon irradiation by a train of laser pulses, which ensures the production of qualitative sublattice structures.

Keywords: pulse group, laser pulses, target, phase, sputtering, periodic structures.

Вступ. Застосування лазерів з модульованою добротністю, які генерують відтворювані гігантські імпульси тривалістю 10-40 нс, викликало низку досліджень параметрів лазерної плазми, які нелінійно залежать від густини потужності лазерного випромінювання. Крім цього ідея розігрівання речовини до термоядерних температур за допомогою лазерного випромінювання, стимулювала подальші дослідження плазми, яка утворюється при опроміненні конденсованих речовин потоками високоінтенсивного випромінювання [1,2]. Питома частка досліджень, присвячених емісійним процесам при цих густинах потужності набагато менша, хоча результати досліджень дії лазерного випромінювання густиною потужності 10^8 - 10^{10} Вт/см² на поверхню вже застосовуються в напівпровідниковій технології, при обробці металів і стекло, в мас-спектрометрії, лазерному напиленні плівок [3].

Формулювання проблеми. Таким чином, можливості лазерної мас-спектрометрії для дослідження структури поверхні твердого тіла ще повністю не розкриті. При цьому висока частота слідування імпульсів ЛПМ (лазера на парах міді) вносить свої особливості в характер іонної емісії, які необхідно детально дослідити.

Аналіз останніх досліджень. Для оптимізації технологічного процесу напилення плівок необхідна інформація про основні параметри пари, що конденсується на підкладку. Однак, в небагатьох попередніх працях, в яких досліджувались властивості плівок, отриманих розпиленням мішені наносекундними лазерними імпульсами, властивості парової фази практично не

досліджувались. В той же час, мас-спектрометричні та зондові дослідження парової фази дають змогу визначити ряд важливих параметрів конденсації, оптимізувати сам процес осадження, внести ясність в розуміння фізики випаровування складних мішеней [3-9]. Після аналізу стану перерахованих вище проблем була сформована мета даної роботи.

Постановка проблеми. У сучасній мікроелектроніці важливе місце займають методи отримання періодичних тонкоплівкових структур, засновані на рідкофазній, газофазній, молекулярно-пучковій епітексії. Отримані періодичні структури (дзеркала м'якого рентгенівського діапазону) при багатоетапному лазерному осадженні плівок з швидкістю 5-10 Å/імпульс. При цьому структури утворюються за тривалий час, що накладає досить жорсткі вимоги до вакууму в робочих установках $p \leq 10^{-9}-10^{-10}$ Торр. Для підвищення технологічності процесу отримання багат шарових структур, зниження вимог до вакуумних умов нами запропонований і реалізований спосіб створення таких періодичних структур за допомогою цугу лазерних імпульсів.

Спосіб можна реалізувати при виконанні двох основних вимог: забезпечення ідентичних умов вибухового випаровування в матеріалі з імпульсів в цузі та забезпечення почергового поступлення пари на підкладку, що характеризується геометрією розміщення мішеней і режимом випаровування з чітко обмеженими енергетичними спектрами емітованих компонент.

Мета дослідження. Розробити спосіб формування періодичних структур на поверхні мішені при опроміненні цугом лазерних імпульсів, який забезпечує отримання якісних гетерогенних структур.

Теоретичні і експериментальні дослідження. В роботі [4] відмічалось, що при застосуванні для напилення плівок лазерів з модуляцією добротності суттєво знижується температура епітаксії. При цьому параметри пари біля підкладки досягають екстремальних значень, що характеризується високими густинами, напірними тисками, швидкостями конденсації та імпульсами. Наслідком цього є значний енерговклад осаджуваних компонентів у підкладку, порівняний або навіть переважаючий її початкову енергію. Як вказують експерименти, при певних умовах напилення наносекундними лазерними імпульсами може спостерігатися ревіпаровування напилених плівок, конденсація через рідку фазу та інше. Характерний час енерговкладу в підкладку при цьому складає $\tau \approx 10^{-5}-10^{-6}$ с. Ефект енерговкладу в підкладку компонентами лазерної плазми при цьому є еквівалентним її нагріву лазерним імпульсом мікросекундної тривалості. В цьому випадку можна скористатися методикою розрахунку кінетики випаровування матеріалу під дією лазерного випромінювання.

Розглянемо процес випаровування мішені наносекундними лазерними імпульсами в діапазоні густин потужності $Q=10^6-10^{10}$ Вт/см² [2]. Характерною особливістю такого випаровування є діаграма направленості розльоту компонент з тілесним кутом $\Omega=1$ ср і високий коефіцієнт трансформації (η) енергії лазера (E_0) в кінетичну енергію випарених часток $\eta \approx 0,7$.

При цьому густину потоку енергії часток, конденсованих на відстані L від мішені можна представити у вигляді

$$Q = \frac{\eta \cdot E_0}{\Omega \cdot L^2 \cdot \tau} = 0,7 \frac{E_0}{\Omega \cdot L^2 \cdot \tau}, \quad (1)$$

де η – коефіцієнт трансформації енергії імпульсу лазера E_0 , τ – час осадження конденсованих часток.

Розглянемо процеси, що проходять при $L < L_1$. Цікавий випадок відповідає умові, коли швидкість осадження перевищує швидкість теплової хвилі. Неважко показати, що цьому випадку відповідає

$$L \leq L_0 = \left[\frac{E^2 m^3}{3\rho^2 \sigma \cdot E_{med} \left(\frac{1}{\sqrt{E_{min}}} - \frac{1}{\sqrt{E_{max}}} \right)} \right]^{\frac{1}{5}} \approx L_1 \left[\frac{\lambda_2 \cdot m}{E_{med}} \right]^{\frac{1}{5}} < L, \quad (2)$$

де E – енергія лазерного імпульсу, L_1 – відстань до мішені 1, E_{med} – середня енергія компонент плазми, E_{min} та E_{max} – мінімальна та максимальна енергія компонент лазерної плазми з масами молекул m , σ – коефіцієнт температуропровідності, λ_2 – питома теплота випаровування, ρ – густина конденсату,

Розглянемо характер зміни β при $L_0 < L < L_1$. Вираз (2) справедливий для значень наближених до $L \leq L_1$. Значення β при $L \approx L_0$ можна наближено оцінити з умови незначного зростання V_2 в діапазоні $L_0 \leq L < L_1$ і зростання швидкості конденсації $V_1 = \frac{\Delta h}{\tau} \sim \frac{1}{L^3}$ за кубічною залежністю.

В результаті:

$$\beta_{L=L_0} = \frac{V_2}{V_1} \sim L^3 = \frac{\beta_{L=L_1}}{L_1^3} L_0^3 = \frac{E_{med}}{m\lambda_2} \left(\frac{m\lambda_2}{E_{med}} \right)^{\frac{6}{5}} = \left(\frac{m\lambda_2}{E_{med}} \right)^{\frac{6}{5}} \approx 1. \quad (3)$$

На рис. 1 представлена встановлена залежність коефіцієнта ревіпарування плівок $\beta = \beta(L)$.

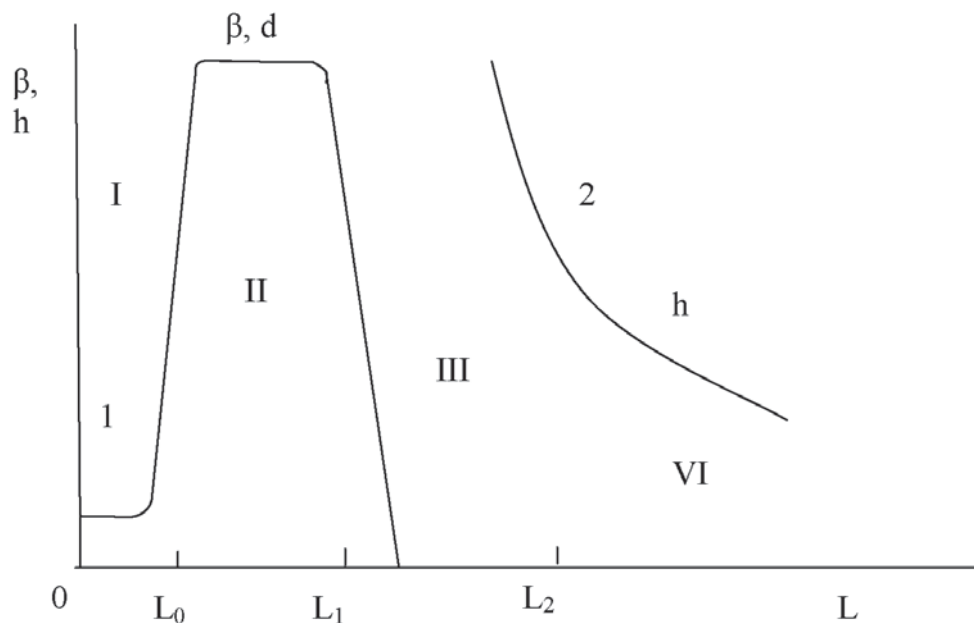


Рис. 1. Залежність коефіцієнта ревіпарування плівок β (1) та товщини осадженого за імпульс шару h (2) в залежності від відстані мішень-підкладка L , зони I-IV послідовно визначають зону досягнення максимального значення коефіцієнта β , зону стабільного значення β (тобто зону ревіпарування), зону стрімкого зменшення β та зону зменшення товщини осадженого шару у залежності від L , де d – кількість осаджених молекул за імпульс

Як слідує з (2), значення $\beta \approx 1$ при $L=L_0$ відповідає ревіпаруванню з ефективною теплою випарування $\lambda_2 = \frac{E_{med}}{m}$, що відповідає відсутності теплообміну між конденсатом та підкладкою і супроводжується відбиттям пари від підкладки. Таким чином, в залежності від L можна виокремити такі зони (рис. 1), що відповідають відбиванню (I), ефективному ревіпаруванню (II), плавленню (III) та пониженню температури епітаксії (IV). Аналітичні розрахунки і експериментальні результати підтверджуються при напыленні шаруватих структур періодичним лазерними імпульсами. Характерні значення L_0, L_1, L_2 , наприклад для типових умов розпылення кремнієвої мішені $E_0=3$ Дж, $q=10^9$ Вт/см² ($E_{min}=10$; $E_{max}=200$ еВ) для $L_0=0,24$, $L_1=0,84$, $L_2=2$ см.

При всіх режимах напылення для $d < 6-7 \text{ \AA}/\text{імпульс}$ ($L > 7-8$ см) параметри середнього порядку в одержаних плівках осцилюють із зміною кута надходження пари на підкладку.

Найбільш оптимальним з точки зору реалізації «вибухового» механізму випарування і збереження хімічного складу є режим випарування наносекундними імпульсами з $q=(1-5) \cdot 10^8$ Вт/см², а також режим напылення цугом ≈ 10 імпульсів субмікросекундної тривалості.

Висновки. 1. При густині потоку лазерного випромінювання $q=10^8-10^{10}$ Вт/см² та імпульсному і імпульсно-періодичному опроміненні мішені діє «вибуховий» характер

випаровування з діаграмою направленості ~ 1 ср. 2. Енерговнесок компонент лазерної плазми може призводити до зниження температури епітаксії, ревіпаровування, відбивання компонент плазми. 3. При опроміненні мішені цугом імпульсів перші 10-15 імпульсів викликають «вибухове» випаровування до якого додається термічний потік, викликаний наступними імпульсами в цузі.

Список використаних джерел:

1. McClung, F.G. Giant optical pulsations from ruby / F.G. McClung, R.W. Hellward // J. Appl. Phys. 1962. – V. 33. P. 828 – 830.
2. Басов, Н.Г. Условия разогрева плазмы излучением оптического генератора / Н.Г. Басов, О.Н. Крохин // ЖЭТФ. 1964. – Т. 46. – С. 171 – 174.
3. Попов, В.К. Мощные эксимерные лазеры и новые источники когерентного излучения в вакуумном ультрафиолете / В.К. Попов, // УФН. 1985. – Т. 147. – Вып. 3. – С. 587 – 604.
4. Канцырев, В.Л. Имплантация в кремний излучением мощного KrF лазера / В.Л. Канцырев, Н.В. Морозов, Б.А. Ольшвангер и др. // Письма в ЖТФ. – 1991. – Т. 17. Вып. 2. – С.56. - 61.
5. Земсков, К.И. Усилители яркости изображений в оптических системах / К.И. Земсков, М.А. Казарян, Г.Г. Петраш// Труды ФИАН. – 1991. – Т. 206. – С. 1-62.
6. Hutt, K.W. Laser initiated electron avalanches observed in a laser microprobe mass spectrometer / K.W. Hutt, E.R. Wallach // J. Appl. Phys. – 1989. № 66 (5). P. 127 -130.
7. Быковский, Ю.А. Ориентированная кристаллизация тонких пленок, полученных с помощью лазера / Ю.А. Быковский, А.Г. Дудолодов, В.П. Козленков и др. // Письма в ЖЭТФ. – 1974. – № 20. – С. 304 - 306.
8. Опачко, И.И. Особенности использования лазерной плазмы в физических экспериментах / И.И. Опачко // УФЖ. – 1979. – Т. 24. – № 6. – С. 766 - 773.
9. Вобицкий, Я.В. Приближенный расчет динамики рядовых превращений при лазерном облучении полупроводников / Я.В. Вобицкий, С.А. Осередько // VI конф. по процессам роста и синтеза полупроводниковых кристаллов и пленок. – Новосибирск. – 1982. – Т. 1. – С. 12 - 13.

Рецензент

проф., док. фіз.-мат. наук,
професор кафедри електронних систем
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,
заслужений працівник науки і техніки України

Опачко Іван Іванович