

Abstract

The study of the contact and static electricity of bodies is of practical interest, because they lead to the formation of the electric charge on the dust particles, when charging the wells and boreholes by granular explosives. Up to now, there is no rigorous theory of such phenomena and there is no developed mathematical apparatus to analyze them. This article describes a method of calculating the binding energy of the solid state of material (crystal), based on the concept of Lenard-Jones potential. The relation between the binding energy and the ionizing friction force was determined. Some regularities of explosives granules electrification during the charging of wells and boreholes by granular explosives were considered in the article. Crystalline structure of granules and its impact on their destruction were taken into account. The regularities of removal of dust produced by the interaction of explosives granules during the charging of wells and boreholes, and the impact of the fluid on the process of electrification of granules and conditions of additional electrification of particles in the well capacity during the charging were examined. The results obtained in the article allow the development of effective security measures during the pneumatic charging of wells and boreholes by granular explosives

Key words: granule, dipole, the dissociation energy, polarizing power of, electrification

Розглянуто питання технології лазерної підгонки параметрів плівкових елементів, які використовуються для створення прецизійних вимірювальних приладів та інтегральних схем

Ключові слова: тонкоплівкові елементи, лазерна підгонка, фотошаблони, інтегральні та гібридні схеми

Рассмотрены вопросы технологии лазерной подгонки параметров пленочных элементов, которые используются при создании прецизионных измерительных приборов и интегральных схем

Ключевые слова: тонкопленочные элементы, лазерная подгонка, фотошаблоны, интегральные и гибридные схемы

УДК 539.23:621.378.004.14

ПРЕЦИЗИЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ТОНКОПЛІВКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ

С.П. Новосядлий
 Доктор технічних наук, професор*
 Контактний тел.: (0342)-59-60-07
 E-mail: nsp@pu.if.ua

А.І. Терлецький
 Кандидат фізико-математичних наук, доцент*
 Контактний тел.: 099-193-04-69
 E-mail: andrei-terletsky@rambler.ru

О.Б. Фрик
 Інженер кафедри
 Контактний тел.: 095-634-04-52
 E-mail: manager@pu.if.ua

*Кафедра радіофізики і електроніки
 Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
 вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76025

1. Вступ

Плівкові елементи широко використовують у приладобудуванні та мікроелектроніці для створення ЕОМ, апаратури зв'язку, систем і засобів автоматизації, вимірювальних приладів та формування структур ВІС [1]. Технічною основою перерахованих приладів і пристроїв є спеціалізовані виробництва мікроелектроніки, такі як інтегральні схеми, гібридно-плівкові мікросборки, кварцеві резонатори та фільтри.

Технологія нанесення плівкових елементів базується на трьох основних групах процесів: 1) нанесення плівкових шарів; 2) формування топології

плівкових елементів; 3) забезпечення заданих електрофізичних параметрів та їх точності. Для цього використовують такі способи лазерної обробки плівок, як функціональне налаштування плівкових схем, п'єзокварцевих резонаторів, монолітних фільтрів і НВЧ-схем з розподіленими та зосередженими параметрами, корекція фотошаблонів лазерним ретушуванням, підвищення точності та стабільності резисторів і конденсаторів.

В даній статті висвітлено питання використання лазерів для формування зображень та обробки плівкових елементів у структурах інтегральних схем, зокрема активних RC-фільтрів, які формуються на основі тонко-

плівкової технології, а також аналіз точності плівкових елементів.

2. Теплофізичний аналіз стадії лазерного нагріву плівки [1, 2, 3, 9]

Розрахунки теплових режимів лазерного нагрівання плівки дають можливість відносно просто отримати області оптимальних значень параметрів взаємодії з прийнятною для інженерних розрахунків точністю. Процеси нагрівання плівок лазерним випромінюванням розглянуто в роботах [1, 2, 3], де перераховано обмеження та допущення для задач даного типу:

- залежність теплофізичних і оптичних сталих плівки (і підкладки) від температури дуже мала, тому масо-лінійний закон теплопровідності;

- випаровування не впливає на процес нагрівання плівки до температур $T < T_k$, за яких парціальний тиск пари є рівним зовнішньому тиску;

- тепловий контакт плівки з підкладкою є ідеальним, що означає рівність температур і теплових потоків на межі їх розділу;

- потужність виділення тепла в плівці рівномірна в перетині світлового пучка, незмінна від товщини плівки і постійна упродовж тривалої дії;

- розглядаємо випадки, коли $r_0 \gg \sqrt{a_1 \tau}$ (де r_0 - розмір світлової плями на поверхні плівки; a_1 - теплопровідність плівки; τ - тривалість дії), що дозволяє вважати задачу теплопровідності одномірною (прогрітий шар $\sqrt{a_1 \tau}$ в плівці хрому складає 10^{-2} см для $\tau = 10^{-3}$ с і 10^{-4} см для $\tau = 10^{-7}$ с.

За таких умов система рівнянь теплопровідності для плівки і підкладки з крайовими та початковими умовами (крайова задача) має вигляд:

$$\frac{\partial T_{1,2}}{\partial t} - a_{1,2} \frac{\partial^2 T_{1,2}}{\partial x^2} = \frac{q_{1,2}(x,t)}{\rho_{1,2} c_{1,2}}, \quad (1)$$

де густина поглинутого світлового потоку в плівці $q_{1,2}$ рівномірно розподілено за її товщиною h : $q = q_0 A_1 h$, а в підкладці $q_2 = q_0(1 - R_1 - A_1) \cdot \exp[-\alpha_2(x - h)]$.

Початкові умови при $t=0$ будуть $T_1(x) = T_2(x) = T_0$;

крайові умови для $x=0$ при $t=0$ є $\frac{\partial T_1}{\partial x} = 0$; для

$x=h$ $T_1(t) = T_2(t)$, $k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = k_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}$; а для $x \rightarrow 0$ $T_2(x) = T_0$.

За вказаних умов температура плівки однакова за товщиною і змінюється згідно закону [2]:

$$T_1(t) = q_0 \frac{\sqrt{a_2 t}}{k_2} \left[A_1 - D_1 \frac{\xi \cdot t}{1 - \xi \cdot t} \right] - \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} + \Psi F \left(\frac{1}{t} \right) \right] + \frac{q_0 D_1}{\alpha_2 k_2 (1 - \xi \cdot t)} \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \xi + F(\xi) \right] \tau_0, \quad (2)$$

де $\xi = \alpha_2 \sqrt{a_2 t}$; $\Psi = \rho_1 c_1 h / (\rho_2 c_2 \sqrt{a_2 t})$;

$F(s) = \exp(s^2) \operatorname{erfc}(s) - 1$; $\operatorname{erfc}(s)$ - функція додаткового інтегралу імовірності; α_2 - коефіцієнт затухання випромінювання в матеріалі підкладки; A_1 - поглинаюча здатність матеріалу плівки; D_1 - її пропускання; a , k - коефіцієнти температуропровідності і теплопровідності, відповідно; c - теплоємність; ρ - густина; індекс 1 відноситься до плівки, а 2 - до підкладки, T_0 - температура навколишнього середовища.

Для типових режимів нагрівання плівки із загального виразу (2) можна отримати важливі формули, які дають змогу визначити температуру плівки в будь-який момент часу протягом дії імпульсу, а також густину світлового потоку, необхідного для досягнення цієї температури (початкову температуру T_0 прийнято за 0°C):

		Тривалість імпульсу	
		$\tau < 100$ мкс $\Psi \gg 1$	$\tau > 100$ мкс $\Psi \ll 1$
1	Непрозора плівка і будь-яка підкладка	$T = \frac{q_0 A_1 t}{\rho_1 c_1 h}$ (3)	$T = \frac{2q_0 A_1 \sqrt{a_2 t}}{\sqrt{\pi} k_2}$ (4)
2	Напівпрозора плівка і:		
	- непрозора підкладка	$T = \frac{q_0 (A_1 + D_1) t}{\rho_1 c_1 h}$ (5)	$T = \frac{2q_0 (A_1 + D_1) \sqrt{a_2 t}}{\sqrt{\pi} k_2}$ (6)
	- слабопоглинаюча підкладка	$T = \frac{q_0 t}{\rho_1 c_1 h} \left(A_1 + \frac{4D_1 \alpha_2 \sqrt{a_2 t}}{3\sqrt{\pi}} \right)$ (7)	$T = 2q_0 A_1 \sqrt{a_2 t} + \frac{q_0 D_1 t \alpha_2}{\rho_2 c_2}$ (8)
3	Прозора плівка і:		
	- непрозора підкладка	$T = \frac{q_0 D_1 t}{\rho_1 c_1 h}$ (9)	$T = \frac{2q_0 D_1 \sqrt{a_2 t}}{\sqrt{\pi} k_2}$ (10)
	- слабопоглинаюча підкладка	$T = \frac{3}{4\sqrt{\pi}} \frac{q_0 D_1 t \alpha_2 \sqrt{a_2 t}}{\rho_0 c_1 h}$ (11)	$T = \frac{q_0 D_1 t \alpha_2}{\rho_2 c_2}$ (12)

3. Механізми локального видалення плівки під дією лазерного випромінювання [4, 6]

Контрольоване руйнування або видалення матеріалу плівки із зони дії лазерного випромінювання лежить в основі процесів лазерної підгонки електрофізичних параметрів електронних компонентів, літографії і розмірної обробки плівки. Існують дві моделі, які визначають режими лазерної обробки: 1) модель двофазного руйнування плівки; 2) феноменологічна модель.

Розглянемо процес двофазного руйнування. Температуру плівки T можна отримати із системи рівнянь теплопровідності для плівки і підкладки (1), враховуючи аналогічні припущення, за яких отримано вираз (2). Тоді густина поглинутого потоку в плівці q_1 і в підкладці q_2 визначається з урахуванням зменшення початкової товщини плівки h_0 в процесі руйнування:

$$q_1 = q_0 [1 - R(h)] \cdot \exp[-\alpha_1(x + \Delta h)], \quad (13)$$

$$q_2 = q_0[1 - R(h)] \cdot \alpha_2 \exp[\alpha_1(x - \Delta h) - \alpha_2(x - h_0)], \quad (14)$$

де $\Delta h = \int_0^t V_\Sigma dt$ - зміна товщини плівки в процесі руйнування; $V_\Sigma = V_\Pi + V_p$ - швидкість переміщення межі розділу конденсованої (розплаву) і парової фаз за рахунок випаровування V_Π і витіснення розплаву V_p .

Згідно з [2]

$$V_\Pi = P_T / [\rho \sqrt{\mu(2\pi RT)}], \quad (15)$$

де P_T - тиск насиченої пари за температури T , μ - молярна (атомна) маса речовини, що випарувалась, R - універсальна газова стала.

Тиск насиченої пари згідно рівняння Клаузіуса-Клапейрона [2]:

$$P_T = P_0 \frac{T}{T_0} \exp\left[\frac{L_B \mu}{\rho R T_0} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)\right], \quad (16)$$

де T_0 - температура, за якої тиск пари дорівнює величині P_0 , L_B - теплота випаровування матеріалу.

Середня по області лазерного опромінення (площею S) величина V_p зв'язана із швидкістю витoku розплаву ω через бічну поверхню (периметр Π) співвідношенням:

$$V_p = \omega \Pi / S, \quad (17)$$

$$\text{де } \omega = \frac{1}{h} \int_0^h U(\xi - l_p, y) dy - \text{складова швидкості руху}$$

розплаву в напрямку осі; l_p - середня довжина шляху розплаву в межах опроміненої зони.

Модель двофазного руйнування є досить складною для інженерних розрахунків, тому використовують спрощену феноменологічну модель, яка дозволяє просто та наочно здійснювати розрахунки режимів обробки.

Нехай задано середню в часі швидкість витoku розплаву із зони опромінення ω і швидкість випаровування \bar{V}_Π . Тоді зміну товщини шару розплаву можна описати рівнянням:

$$dh / dt = \bar{V}_\Pi + \omega \Pi (h_0 - h) / S. \quad (18)$$

Інтегруючи це рівняння за нульових початкових умовах, отримаємо закон зміни товщини плівки

$$h = (h_0 + l_0 \bar{V}_\Pi / \omega) (1 - \exp(-\omega t / l_0)). \quad (19)$$

Таким чином швидкість видалення плівки \bar{V}_Σ буде визначатись виразом:

$$\bar{V}_\Sigma = (\bar{V}_\Pi + \omega h_0 / l_0) \cdot \exp(-\omega t / l_0). \quad (20)$$

За таких умов повний час видалення плівки $t_{\text{вид}}$ товщиною h_0 складатиме

$$t_{\text{вид}} = \frac{l_0}{\omega} \ln\left(1 + \frac{h_0 \bar{V}_\Pi}{l_0 \omega}\right). \quad (21)$$

Із останніх виразів (19), (20) можна визначити співвідношення розплаву і пари в процесах руйнування

$$m_p / m_\Pi = \chi / \ln\left(1 + \frac{h_0 \omega}{l_0 \bar{V}_\Pi}\right), \quad (22)$$

де χ - параметр двофазного руйнування $\chi = h_0 \omega_p / (l_0 \bar{V}_\Pi)$, який характеризує відносний внесок випаровування та витіснення розплаву в руйнуванні плівки. Випаровуванню відповідає умова $\chi < 1$, яка виконується за умови великих доз опромінення та малих товщин. Для малих доз опромінення та великих товщин ($\chi \gg 1$) зростає роль руйнування плівки витісненням рідкої фази. Розрахунок показує, що для великих сил адгезії $\chi \approx (h_0^2 / l_0^2) \sqrt{q}$, а для режиму розвинутого руйнування $\chi \approx (h_0 / l_0) \exp(D \sqrt{q})$, де D - теплофізичний параметр.

4. Методи формування оптичного зображення під час лазерної обробки плівок [4, 5, 6, 7]

На сьогоднішній день в технології мікроелектроніки корегування топології фотошаблону та підгонку електричних параметрів компонентів інтегральних схем здійснюють за допомогою лазерного опромінення. Для формування конфігурації і розміру зони такого опромінення застосовують ряд оптичних методів. Розглянемо фізичні принципи, які лежать в їх основі.

В **контурно-променевому (фокусуєчому) методі** необхідне зображення формується шляхом послідовного опромінення заданого топологічного рисунку світловим пучком, зфокусованим за допомогою мікроб'єктива. Обхід заданого контуру здійснюється програмованим переміщенням робочого столу, на якому розміщена структура, або скануванням світлового пучка.

Основною перевагою методу є можливість концентрації всієї енергії випромінювання лазера на площині мінімальних розмірів, а недоліками - нерівність країв зображення та нерівномірність опромінення в межах зони дії лазера, яка обумовлена труднощами, пов'язаними з фокусуванням лазерного пучка і залежить від поперечного розподілу інтенсивності в ньому.

Оптичну схему **проекційного методу** зображено на рис. 1.

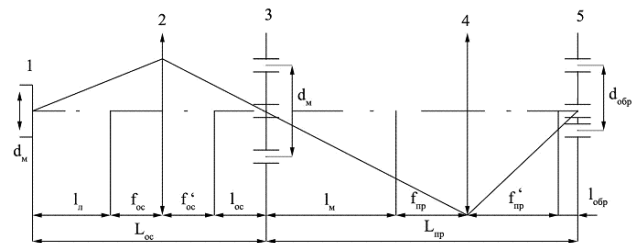


Рис. 1. Оптична схема проекційного методу формування зображень: 1-лазер; 2-освітлювальна система; 3-маска; 4-проекційна система; 5-зразок (оброблювана поверхня).

Вхідний пучок світла лазера 1 розширюється за допомогою освітлювальної оптичної системи 2 до розмірів маски-графарету 3, зменшене зображення якої будується за допомогою об'єктиву 4 на поверхні оброблюваного матеріалу 5. Основною перевагою проекційного методу обробки матеріалу плівки є можливість отримання зображення складної

конфігурації, яка повторюється із заданим зменшенням рисунка на масці; висока роздільна здатність і принципова можливість одночасної обробки значно більшої площі в порівнянні з фокальною плямою лазерної площадки.

Проекційний метод покладено в основу лазерних технологічних установок «Калан» і «Кизил». Основними недоліками, які обмежують застосування проекційного методу, є втрати енергії на масці та жорсткі вимоги до рівномірності освітлення всього поля маски, якого досягти досить важко.

В **контурно-проекційному методі** зображення синтезується шляхом послідовного обходу контуру світловим пучком спеціального перетину, який представляє собою мікропроекцію простого елемента, наприклад квадрата.

Даний метод має такі переваги: 1) незалежність розмірів загального поля зображення від роздільної здатності (розмірів елементів рисунку); 2) висока точність рисунка визначається можливістю отримання мінімальної нерівності краю; 3) висока роздільна здатність; 4) незначні втрати енергії в масці.

Розробка контурно-проекційного методу тісно пов'язана з появою серійних моделей імпульсних молекулярних лазерів на азоті. Властивості таких лазерів як випромінювачів в оптичних системах характеризуються перш за все малим діаметром пучка (< 3 мм) у лазерів типу ЛГИ-21, невеликою енергією в імпульсі (10^{-5} Дж), відносно високою частотою повторення імпульсів і довжиною хвилі ($\lambda = 0.34$ мкм), яка лежить в ультрафіолетовій області спектру, що є важливим для проекційної літографії.

В **контактному методі** зображення утворюється в результаті освітлення фотошаблону, щільно притиснутого до поверхні зразка. Суттєвими недоліками такого методу є швидке зношення фотошаблону, механічні пошкодження зразка при його щільному притисканні та дифракційні спотворення зображення при нещільному притисканні. У зв'язку з цим реальні значення роздільної здатності рисунку складають приблизно 2-10 мкм. Перспективним є використання прозорих фотошаблонів, за допомогою яких роздільну здатність можна підвищити до < 1.0 мкм.

В випадку використання лазера для освітлення фотошаблону треба враховувати дифракційні спотворення внаслідок когерентності і монохроматичності випромінювання.

Голографічну схему формування оптичних зображень зображено на рис. 2а. Хвиля когерентного (лазерного) випромінювання 5 освітлює реєстрований предмет - фотошаблон 1 і дзеркало 6. Випромінювання, розсіяне предметом і відбите дзеркалом, попадає на детектор - фотопластинку 3, де в результаті інтерференції базового 4 та предметного 7 пучків отримуємо голограму предмету. Якщо освітити фотопластинку зі зворотної сторони тим же базовим пучком (рис. 2б), то в результаті дифракції світла на голограмі в площині дійсного зображення відновлюється зображення предмета.

Голографічним методом можна формувати об'ємне зображення, а також наносити зображення не тільки на площину, але і на будь-яку поверхню складної форми. Запис і відновлення зображення може здійснюватись з різними довжинами хвиль, що дозволяє на етапі

відновлення проводити зменшення розмірів зображення. Голографія дозволяє забезпечити значно вищу роздільну здатність на площині зображення, ніж сучасні оптичні (лінзові) системи, здійснювати оптичну мультиплікацію зображення безпосередньо на структуру, відмовитися від трудомісткого виготовлення фотошаблону і підвищити точність суміщення.

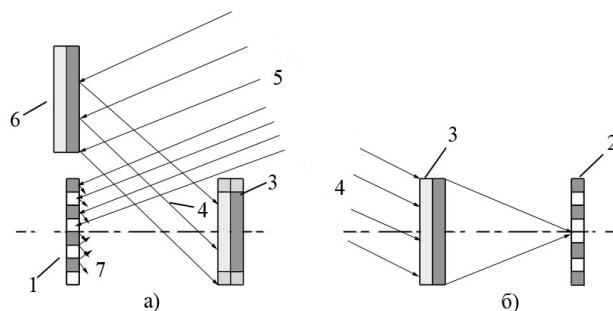


Рис. 2. Схема отримання голограми (а) і відтворення зображення (б): 1-реєстрований предмет; 2-відновлене зображення предмета; 3-детектор; 4-базовий пучок променів; 5-когерентне світло; 6-дзеркало; 7-предметний пучок

5. Аналіз точності та обґрунтування режимів лазерної обробки плівкових елементів [6, 7]

Дослідження питань точності є необхідною передумовою створення конкретних технологічних процесів і вибору раціональних областей застосування лазерної обробки плівкових елементів. У зв'язку з цим необхідно розглянути два аспекти: точність побудови оптичного зображення та точність його відтворення на тонкій плівці.

На точність або якість побудови оптичного зображення можуть впливати різні явища в оптичних системах обробки: дифракція світла, аберації, нерівномірність світлового потоку, спосіб утворення зображення. Найбільш сильно проявляються дифракційні спотворення зображень за рахунок дифракції світлового пучка на щілинах маски. Абераційні спотворення зображення, як правило, зумовлені недосконалістю оптичних систем, а також неточністю виставлення окремих елементів відносно оптичної осі опромінення [4, 5]. З огляду на це, вивчення точності оптичного зображення може бути проведене на базі досліджень явищ дифракції світла та аберації оптичних систем з урахуванням особливостей лазерного випромінювання.

Однак навіть високоякісне оптичне зображення може бути спотворене в процесі перенесення його на плівку, коли матеріал плівки в опромінених місцях нагрівається та руйнується. Найбільш важливими на цьому етапі є термічні, термохімічні та гідродинамічні спотворення рисунку. Особливо слід відмітити вплив на точність рисунку та чистоту зони обробки гідродинамічних явищ витікання рідкої фази.

Основні джерела похибок лазерної обробки тонких плівок проаналізовані нами і зведені в табл. 1 і 2.

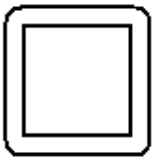
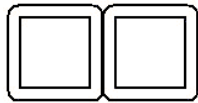
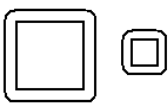
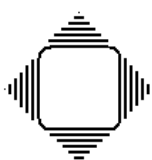
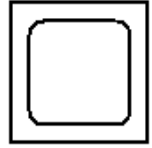
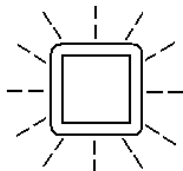
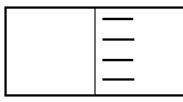
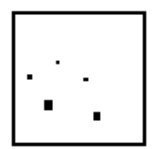
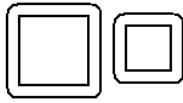
Відтворюваність результатів лазерної обробки є ще однією важливою характеристикою технологічного

процесу і залежить від ряду факторів, таких як нестабільність параметрів випромінювання лазера, зміна параметрів елементів оптичної систе-

ми, неточність встановлення і переміщення об'єкта (топології структури) в зону дії опромінювання, неоднорідність структури матеріалу, його зернистість.

Таблиця 1

Характеристики спотворень, пов'язаних з механізмом формування топології

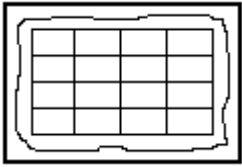
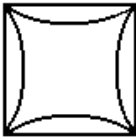
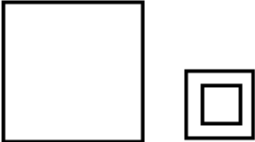
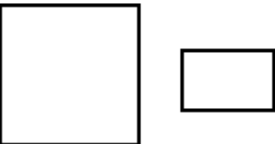
Вид спотворень	Зображення	Характер проявлення	Джерело	Величина спотворень при $\tau=10\text{нс}$	Спосіб зменшення
Термічні, термохімічні		Спотворення форми у вигляді заокруглень кутів	Нерівномірність температурного поля	$\sqrt{a\tau} \approx 10 \div 1$	Скорочення часу τ і зменшення виклику
		Спотворення форми і розмірів перемичок			
		Неоднакові відходи на великі і малі розміри	Залежність порогу руйнування від розмірів	-	
		Наявність перехідної зони меншої товщини	Неперервність температурного поля	$\sqrt{a\tau} \approx 10 \div 1$	
Гідродинамічні		Затікання кутів в елементах топології	Рух розплаву	10	Зменшення τ , h ; збільшення g , p
		Утворення валика	Витіснення розплаву	1	Зменшення g , h ; збільшення p , r
		Наявність слідів руйнування на сусідніх елементах			
Адгезійні		Нерівномірність випаровування, нерівність краю топології	Нерівномірність адгезії півки до підкладки	-	Покращення рівномірності адгезії
Нестабільність розмірів і форми рисунка		Зміна розмірів і форми елементів від зміни імпульсу	Нестабільність параметрів лазерного випромінювання	1	Підвищення стабільності параметрів лазерних імпульсів

В таблиці a - теплопровідність півки, τ - тривалість лазерного імпульсу, h - товщина півки, p -

величина перекриття, g - густина лазерного потоку.

Таблиця 2

Характеристики спотворень оптичного зображення під час лазерної дії на плівкові структури.

Вид спотворень	Характер спотворення	Джерело спотворення	Спосіб зменшення дії
<p>Дифракційні</p> 	Спотворення форми і розмірів, перерозподіл густини потоку	Неточність встановлення в площині зображення, обмеженість апертури проекційної системи	Контроль точності встановлення та розрахунок апертур
<p>Абераційні</p> 	Спотворення форми і розмірів	Аберация оптичних систем	Розрахунки абераций та юстування
<p>Нерівномірність світлового потоку</p> 	Неоднакове засвічування окремих ділянок топології	Нерівномірність випромінювання лазера, перерозподіл інтенсивності	Покращення рівномірності випромінювання лазера
Неодноразовість опромінювання всього поля зображення	Нерівність краю зображення	Неточність розміщення елементів зображення, неоптимальність форм	Вибір раціональних елементів зображення, юстування системи
<p>Нестабільність розмірів і форми зображення</p> 	Зміна розмірів і форми зображення від дії імпульсу до імпульсу лазера	Нестабільність розмірів (параметрів) випромінюваного променя	Стабілізація параметрів випромінювання оптичних елементів

6. Аналіз технологічних процесів лазерної обробки плівок в структурах інтегральних схем [7, 8, 9]

Технологічні процеси лазерної обробки плівок поділяються на дві групи: процеси підгонки електрофізичних параметрів плівкових електронних елементів і схем та процеси розмірної обробки для формування топології структур плівкових елементів. Сутність вказаних процесів в більшості випадків зводиться до видалення певних плівкових областей, тому різниця між цими процесами лежить не в області фізичних процесів технології, а в сфері вимог до результатів обробки та методів їх тестового контролю.

Будь-яка електрична схема після монтажу вимагає налаштування, яке забезпечує її нормальне функціонування. Необхідність такої операції викликана кінцевими значеннями допусків на елементи схеми. Існує два основних методи налаштування радіоелектронних схем: 1) за допомогою регулюючого елемента - в основному для схем на дискретних елементах; 2) шляхом технологічної операції підгонки параметрів електронних компонентів, який застосовується в мікроелектроніці. Підгонка плівкових елементів, здійснювана за допомогою лазера, забезпечує високу точність на-

лаштування, можливість використання зворотного зв'язку, вузьку локальність, безконтактність та мінімальний вплив на підкладку, а також високу безінерційність процесу.

Юстування плівкових резисторів. Опір плівкового резистора визначається згідно з формулою:

$$R = \rho L / (hB) , \tag{23}$$

де ρ - питомий опір матеріалу підкладки, h - товщина плівки, L - довжина, B - ширина резистора. Операція підгонки опору резистора здійснюється двома способами: 1) шляхом випаровування резистивного шару, що приводить до зміни його геометрії (розміри L , B або h); 2) таким нагріванням резистивного шару, який веде до зміни структури шару, а саме його питомого опору. Перший метод є більш прогресивним, оскільки піддається автоматизації, що і було використано в технології виготовлення активних RC - фільтрів серії K298 за допомогою промислового обладнання "Паук-2R" ВАТ "Родон".

Найбільш вживаними формами резисторів є прямокутна та трапецієвидна, а для їхньої підгонки використовують різні форми різів: X - різ вздовж ліній струму; Y - різ впоперек ліній струму, L - різ - комбінація X і

Y - різів; J - різ (рис.3). Варіанти підгонки закладаються ще на стадії проектування топології схеми. Зміну опору в процесі підгонки в залежності від орієнтації та виду розрізу можна оцінити такими формулами:

X - різ
- лінією:

$$\Delta R / R = lxd / LB, \quad (24)$$

- серією поодиноких отворів d :

$$\Delta R / R = md^2 / LB, \quad (25)$$

- накладанням m отворів d з перекриттям p :

$$\Delta R / R = pmd^2 / L(B-d), \quad (26)$$

$$Y - \text{різ } \Delta R / R = ly / (B-ly). \quad (27)$$

Точність підгонки може сягати 0.001 % і визначається стабільністю питомого опору, оскільки нагріваються також і периферійні по відношенню до розрізу області плівки, що може міняти її структуру.

В другому методі зміна опору резистора здійснюється без його руйнування: в сторону зменшення - шляхом лазерного відпалу дефектів (рекристалізації); в сторону збільшення - внаслідок окислення опроміненої лазером області. Було досліджено вплив опромінення імпульсного (1 мс) неодимового лазера на зміну (зменшення) опору резисторів, осаджених шляхом іонно-плазмового розпилення танталу за температур 400-600 К. Типові графіки залежності відносної зміни опору $|\Delta R|/R = (R_n - R_{n+1})/R_n$ від числа імпульсів n приведені на рис. 4. Із графіків видно, що діапазон зміни опору становить 0.1%, а середня зміна опору на імпульс близько 0.001%.

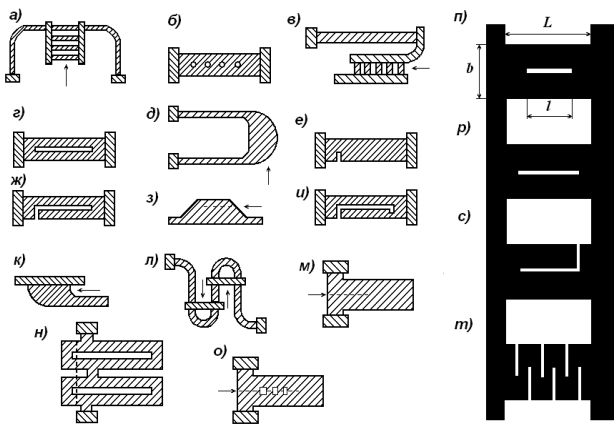


Рис. 3. Топологічні варіанти підгонки опорів тонкоплівочних резисторів із сплаву Р3710, опір і ТКО яких змінені лазерною обробкою: а, в, н, о - ступенева підгонка; д, з, к, л, м - плавка; б - одиницями отворами; г, п, р - Х-різ; е - Y-різ; ж, с - L-різ; и - J-різ

Лазерна підгонка також ефективна для юстування високоомних тонкоплівочних резисторів, сформованих на основі кермету РС3710, осадженого в аргонній плазмі устаткування "Ораторія-5". Це високостабільні

резистори з номіналом від 100 кОм до 50 МОм. Точність їх юстування лазерним променем сягає 0.001%. Стабільність таких резисторів зростає, якщо плівки формувати в аргонно-азотній плазмі, оскільки тоді в складі резистивної композиції формується фаза нітриду (Si_3N_4) або оксинітриду кремнію ($Si_xO_yN_z$). На рис. 5. представлено графік залежності опору керметних резисторів від кількості імпульсів лазера n .

Випробування активних фільтрів серії К298 показало, що резистори, термооброблені лазерним променем, мають вищу термостабільність порівняно з необробленими. Таку властивість резисторів було використано для юстування високовольтних операційних підсилювачів К140УД20 ("Каштан"), виготовлених за кремнієвою та тонкоплівковою технологіями.

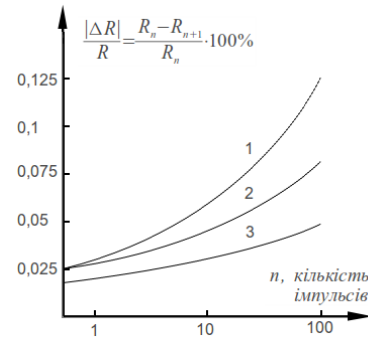


Рис. 4. Відносна зміна опору танталових резисторів від кількості імпульсів неодимового лазера: 1) плівка Та в аргонній плазмі; 2) плівка Та в азотній плазмі; 3) плівка Та, легована гольмієм в азотній плазмі

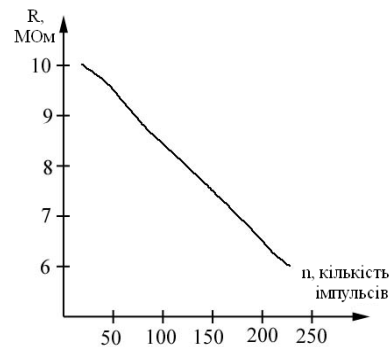


Рис. 5. Залежність опору керметних резисторів із сплаву РС3710 від кількості імпульсів лазерної термообробки

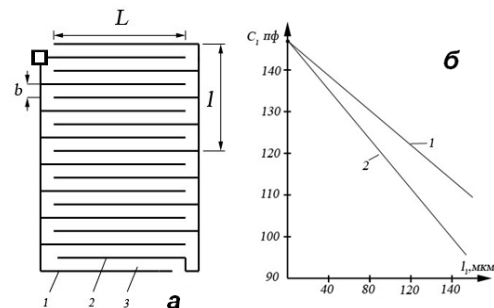


Рис. 6. Топологічна схема гребінкового конденсатора (а) і залежність його ємності від довжини розрізу l поперек електродів від числа перерізів (б). 1,2-обкладинки конденсатора, 3-підкладка діелектрика

Юстування ємностей плівкових конденсаторів. В гібридних інтегральних мікросхемах застосовуються два типи плівкових конденсаторів: планарні (плоскі) та щілинні (гребінкові). Лазерне юстування найбільш ефективно для щілинних конденсаторів, оскільки дозволяє ефективно регулювати ємність, не змінюючи температурного коефіцієнта ємності (ТКЄ). Такий щілинний конденсатор, топологічна схема якого зображено на рис. 6а, являє собою систему металевих провідників (обкладок) у вигляді двох гребінок, введених одна в одну. Ємність такого конденсатора визначається виразом:

$$C = \epsilon \epsilon_0 N L / b, \tag{28}$$

де ϵ і ϵ_0 - ефективна діелектрична проникність середовища і вакууму відповідно, N - число щілин між провідниками обкладинок довжиною L . Такі конденсатори виготовлялись за тонкоплівковою технологією із формуванням структури Ta-Ta₂O₅-Ni на ситалових підкладках СТ-50-1, заґрунтованих корундом Al₂O₃. Технологію лазерного юстування тонкоплівочних конденсаторів можна з успіхом використовувати для підгонки ємностей на основі оксиду кремнію, які використовуються в операційних підсилювачах для зміни смуги пропускання фільтрових схем.

Налаштування параметрів та формування структури НВЧ - схем.

Лазерний метод юстування є найефективнішим методом налаштування гібридних НВЧ-схем, особливо активних та пасивних елементів з розподіленими параметрами (мікросмужкових ліній). Як правило, в такому випадку необхідно забезпечити кратність довжин відрізків мікросмужкових ліній для отримання оптимальних значень опору ліній та довжини хвилі електромагнітного НВЧ-випромінювання.

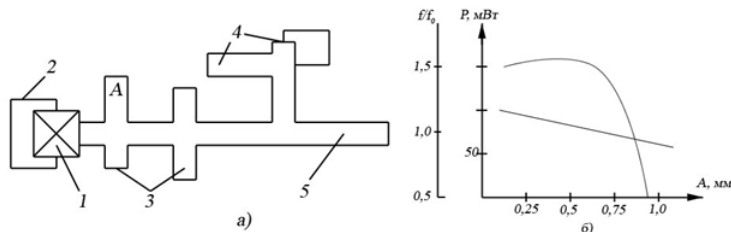


Рис. 7. Топологічна схема мікросмужкового генератора Ганна (а) та залежність потужності і частоти генератора від довжини відрізка А як юстованого елемента (б): 1 - діод Ганна, 2 - мідний тепловідвід, 3 - система шлейфів, 4 - ФНЧ, 5 - передаюча лінія, А - юстований відрізок

В якості прикладу розглянемо юстування гібридної інтегральної схеми генератора Ганна в мікросмужковому виконанні (рис. 7а). Схема виконана на полікоровій підкладці з діелектричною проникністю 50 і складається із безкорпусного діода Ганна 1, припаяного до мідного тепловідводу 2, гальванічно вирощеного на діелектричній підкладці, системи розімкннутих відрізків мікросмужкових ліній 3, які забезпечують створення на контактах діода Ганна оптимального опору, фільтра нижніх частот 4 для подачі живлення і відрізка передаючої лінії 5 для під'єднання генератора до навантаження.

Налаштування мікросхеми генератора Ганна за допомогою лазерного випромінювання проводилось шляхом зміни відрізка мікросмужкової лінії А. Зміна відрізка А від 1.2 мм до 12 мкм приводить до п'ятикратної зміни складової повного опору схеми, в той час, як реактивна складова змінюється лише на 20%. Це дозволяє дуже точно юстувати генератор Ганна на оптимальну потужність практично за незмінної частоти генерації в 25 ГГц.

Юстування кварцевих п'єзоелементів. Більшість методів юстування кварцевих резонаторів і фільтрів базується на різних видах обробки електродів п'єзоелемента. Найпоширенішими із них є: гальванічне нарощування електродів, вакуумне осадження плівок на поверхню електродів, юстування у високочастотному розряді, іонне очищення електродів, їх йодизація. Останнім часом значна увага приділяється методу юстування, який базується на зміні маси п'єзоелемента за рахунок локального випаровування матеріалу електрода сфокусованим лазерним променем (рис. 8). Таке юстування може виконуватись наскрізним або поверхневим випаровуванням матеріалу електрода чи безпосередньою зміною структури кварцевого резонатора за допомогою лазерного променя.

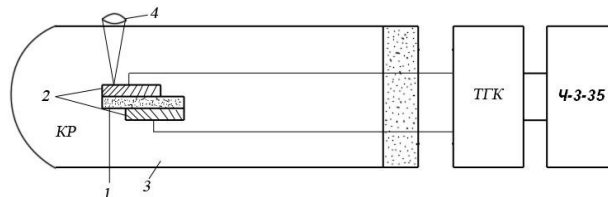


Рис. 8. Схема лазерного юстування частоти вакуумних кварцевих резонаторів: ТГК - еталонний кварцевий генератор, Ч - частотомір, КР - кварцевий резонатор, 1 - кварцева пластина, 2 - електроди, 3 - скляний балон, 4 - лазерний промінь.

Нами було проведено ряд експериментів на резонаторах з частотою 5-100 МГц, герметизованих в плоских скляних балонах, з дисковими п'єзоелементами \varnothing 7 мм на які нанесено електроди \varnothing 3.5 мм товщиною 200 нм. Діаметр лазерного променя складав 30 мкм. Опромінення чистого кварцу не впливало на зміну параметрів резонаторів, оскільки термічна дія променя була мінімальною, а зміна температури кварцу складала $\Delta T_{max} = AW / (\rho cv) = 1.05 \text{ }^\circ\text{C}$ (за умов: коефіцієнт поглинання $A = 1 - R - D = 0.07$, $R = 0.04$, $D = 0.89$, товщина кварцу 0.5 мм, $\lambda = 0.34$ мкм, $W = 10$ мкДж і $\tau = 10$ мс). Дослідження показали, що режим наскрізного випаровування електродів приводить до спаду добротності та збільшення еквівалентного опору, а в режимі поверхневого випаровування таких змін не спостерігається.

Основними причинами, які обмежують можливості такого юстування є: 1) недостатня адгезія частинок розплаву, які винесені із зони обробки, 2) локальне плавлення поверхні кварца зі зміною його структури, 3) зміна електрофізичних та механічних властивостей плівки матеріалу електродів в зоні дії лазерного променя.

7. Лазерна літографія [7, 9]

Розмірна обробка тонких плівок, а саме формування топології плівкових елементів, є більш складним завданням порівняно з юстуванням, оскільки до точності, стабільності та продуктивності процесу розмірної обробки пред'являються дуже жорсткі вимоги. Як правило, таку обробку здійснюють за допомогою оптичної літографії, яка є більш досконалим на сьогоднішній час методом. Лазерна літографія є більш перспективною, оскільки дозволяє контролювати процес формування топології ІС в реальному масштабі часу, забезпечує високу чистоту і прецизійність процесу, дає змогу виявляти та виправляти помилки в процесі формування топології шляхом введення зворотного зв'язку за розмірами.

Лазерні методи можна застосовувати не тільки для ретушування дефектів фотошаблонів, але і для оперативного корегування їх топології, додаючи чи видаляючи додаткові елементи шляхом мультиплікації зображень. Можливість оперативного корегування топології широко використовується для виготовлення постійних запам'ятовуючих пристроїв на ВІС. Для внесення в них одноразової інформації можна перепалювати плавкі перемички, або змінювати топологію на етапі виготовлення фотошаблону. Таку операцію, як правило, проводять методом лазерного випарування.

Задача виготовлення проміжних фотооригіналів (ПФО) – одна з найскладніших в субмікронній технології ВІС. Фотошаблони представляють собою одношарове металеве покриття із хрому чи хромового сплаву на прозорому оптичному склі К-8 з дуже складним рисунком - топологічною структурою прозорих і непрозорих елементів. До таких ПФО пред'являються дуже високі вимоги щодо роздільної здатності, точності, рівності краю, сумісності в комплекті, контрастності рисунку, які досягаються за умов достатньої оптичної густини та цілісності плівки в поєднанні з високою прозорістю скла. Процес виготовлення ПФО є багатоступеневим і складається з великої кількості фотохімічних операцій. Однак він може бути значно спрощений, якщо отримувати фотошаблон прямим випаруванням металізованого шару під дією лазерного випромінювання. Режим прямого випарування дає дуже високі результати стосовно роздільної здатності, яка, зазвичай, обмежена оптичними, термічними або гідродинамічними спотвореннями рисунку.

В основу формування топології плівкових елементів типу ПФО можуть бути покладені декілька різних схем лазерної обробки: контурно-променева (скануюча), проєкційна і контурно-проєкційна.

Найбільш перспективним для виготовлення ПФО субмікронних ВІС є проєкційний принцип побудови схем обробки фотошаблонів методом мультиплікації зображення. В зв'язку з вимогами високої роздільної здатності під час виготовлення ПФО масштаб проєкції маски на оброблювану поверхню вибирається в межах 1:40÷1:100. В такому випадку площа одночасно оброблюваної поверхні стає незначною. Так, використовуючи маски розміром 50×50 мм з мінімальним елементом 25 мкм і в масштабі 1:50 (0,2 мкм - 1 мкм на ФШ), можна одночасно опромінити площадку розміром 1×1 мм. В той же час типові розміри робо-

чого поля ПФО фотошаблонів структур ВІС складають 30×30 мм і більше. Враховуючи, що фотошаблон структури ВІС, як правило, представляє собою набір великого числа достатньо складних за насиченням і формою, але однакового розміру зображень порядку 1×1 мм (рис. 9), для виготовлення ПФО доцільно використати проєкційний метод одночасного випарування плівки хрому по рисунку цілого фрагмента з подальшим мультиплікуванням-розмноженням фрагменту шляхом відносного переміщення світлового лазерного пучка та заготовки ПФО. Фотографія ПФО, отримана таким чином на промисловому устаткуванні мультиплікації типу EM5009, показана на рис. 10.

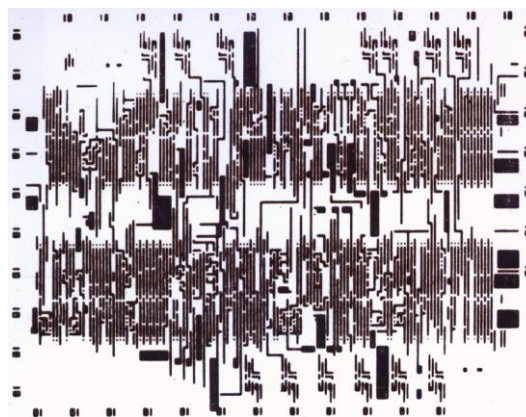


Рис. 9. Фотографія ПФО, отриманого контурно-проєкційним методом опромінення плівки хрому на підкладці із скла К-8

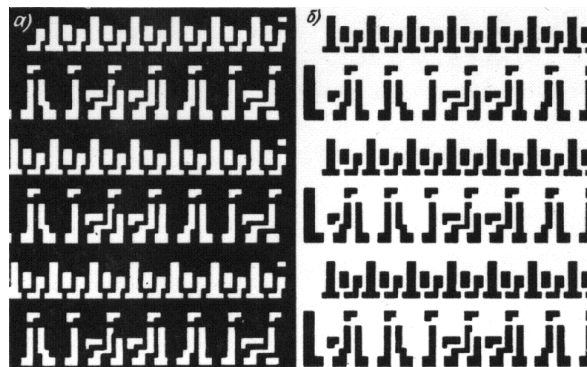


Рис. 10. Ділянка ПФО, отримана в проєкційній схемі мультиплікацією на плівці хрому, осадженій на склі К-8: а) методом прямого випарування лазером; б) методом окислення і проєкційної літографії

Для опромінення плівок хромового сплаву ВХ-2К товщиною 200 нм на скляній підкладці К-8 необхідна енергія порядку 0,1 Дж на виході лазера, якщо вважати, що тривалість імпульсу 10 нс, середнє відбивання протягом імпульсу 50%, втрати в оптичній системі 50% і втрати на фоторезистивну маску 50%. Таким параметрам відповідають лазери на неодимовому склі, які працюють в режимі модуляції добротності. Весь фотошаблон площею 30×30 мм може бути отриманий за 900 імпульсів випромінювання, що складає 900 с = 1,5 хв. для лазера з робочою частотою імпульсів 1 Гц.

8. Лазери для обробки плівок [3, 7]

Процеси лазерного юстування параметрів компонентів структур інтегральних схем та розмірної обробки плівок реалізуються за допомогою технологічних лазерних установок, які містять такі основні вузли: потужний лазер, оптичну систему для наведення випромінювання та спостереження за ходом і результатом процесу юстування (візуальний канал), робочий стіл для закріплення підкладки, систему керування столом і лазером [8, 9].

Лазер повинен забезпечувати генерацію випромінювання достатньої потужності на прийнятній для обробки плівкового шару довжині хвилі з необхідною продуктивністю та якістю обробки. Основні параметри лазера повинні відповідати таким умовам: 1) довжина хвилі випромінювання вибирається виходячи із забезпечення мінімального поглинання в області прозорості підкладки та максимального поглинання в області непрозорості плівки; 2) режим роботи лазера - імпульсний, для забезпечення мінімального нагрівання підкладки, яка повинна мати достатню для відведення тепла теплопровідність; 3) тривалість імпульсу τ повинна бути мінімальною, оскільки внаслідок зменшення τ зменшується глибина прогрітого шару в підкладці $x_{\text{гр}} \approx \sqrt{a\tau}$ і порогові густини енергії випаровування матеріалу плівки $Q^n \approx \sqrt{\tau}$, що призводить до зменшення

термохімічних спотворень топології під час обробки; 4) потужність випромінювання P повинна бути достатньою для випаровування матеріалу плівки, тобто перевищувати поріг його руйнування з урахуванням втрат в оптичній системі та на відбиття ($P = 10^3 \div 5 \cdot 10^4$ Вт); 5) частота повторення імпульсів F повинна забезпечити необхідну продуктивність; 6) лазер повинен забезпечувати високу рівномірність і стабільність випромінювання та експлуатуватись в автоматичному режимі.

З урахуванням цих вимог для обробки плівки широко застосовують такі лазери: АИГ:Nd (1.06 мкм), CO₂ (10.6 мкм), Ag (0.488 мкм), AlGaAs (0.82 мкм), GaAs (0.906 мкм), скло:Nd (1.06 мкм), He-Cd (0.442 мкм), He-Ne (0.63 мкм), Cu (0.57 мкм), ексимери Ar-Kr-F₂ (0.248 мкм), Ca (0.37 мкм).

9. Висновки

В статті висвітлено фізико-технологічні аспекти прецизійних лазерних процесів в технології формування структур інтегральних схем. Продемонстровано можливості використання лазерних технологій в НВЧ-техніці, п'єзо- та оптоелектроніці. Показано актуальність прецизійної обробки діелектричних плівок для інтегральної оптики та технології наноструктур.

Література

1. Вейко, В. П. Лазерная обработка пленочных элементов [Текст] / В. П. Вейко. - Л. : Гр. ЛИТМО, - 1980. - С. 36-45.
2. Вейко, В. П. Экспериментальное исследование кинетики лазерного нагрева тонких металлических пленок [Текст] / В. П. Вейко, Е. М. Табачник, Е. А. Тучкова // Электронная обработка материалов. - 1986. - №1. - С. 22-25.
3. Вейко, В. П. О разрешающей способности лазерной литографии на тонких металлических пленках [Текст] / В. П. Вейко, Е. А. Тучкова, Е. Б. Яковлев // Квантовая электроника. - 1984. - Т. 11. - №4. - С. 661-665.
4. Дмитриев, В. Г. Твердотельные лазеры на АИГ с преобразованием частоты [Текст] / В. Г. Дмитриев, М. Ф. Стельмах, О. Б. Чердиченко // Электронная промышленность. - 1981. - №5-6. - С. 19-28.
5. Карпман, И. Н. Ретушь и корректировка фотошаблонов интегральных схем [Текст] / И. Н. Карпман, Г. П. Суслов // Электронная техника. - 1975. Т. 3. - №4. - С. 101-106.
6. Вейко, В. П. Оптимальный режим формирования топологии рисунка при лазерной обработке пленок [Текст] / В. П. Вейко, И. Н. Карпман, М. Н. Либенсон // Квантовая электроника. - 1982. - Т. 9. - №11. - С. 2167-2172.
7. Антимиров, В. И. Лазерные технологии [Текст] / В. И. Антимиров, И. А. Кадомский, Е. А. Кусман, В. Е. Матюшков // Электронная промышленность. - 1981. - №5-6. - С. 145-146.
8. Новосядлий, С. П. Фізико-технологічні основи субмікронної технології ВІС [Текст] / С. П. Новосядлий // Івано-Франківськ : Сімік. - 2003. - 351 с.
9. Новосядлий, С. П. Лазерні технології в мікроелектроніці [Текст] / С. П. Новосядлий, О. Б. Фрик // Фізика і хімія твердого тіла. - 2010. - Т. 11. - №1. - С. 201-215.

Abstract

In the present article the questions of the laser using for the image generation and film elements treatment of the integrated circuit structures are reflected, the thermalphysic analysis of stage of the film laser heating and mechanisms of the local removal of films under laser radiation action are realized. Among the methods of forming of optical image the contour-radial (focusing), projection, contour-projection, contact and holographic methods are considered in detail. Considerable attention is devoted to the analysis of precision and ground of laser treatment modes of film elements. The row of technological processes of film laser treatment is considered in the structures of the integrated circuits, such as the adjustment of electro-physical parameters of film elements, the alignment of film resistors and condensers, the tuning of parameters and the forming of microwave circuits structures, and also the alignment of discrete quartz elements.

Considerable attention is devoted to the questions of laser lithography, namely to the forming of film elements topology and the making of photomasks by the image multiplication.

The results of original researches are resulted, which were conducted with the purpose of choice of the rational modes of film elements treatment for creation of industrial prototypes of integral and hybrid microcircuits.

Keywords: *thin film elements, laser adjustment, exactness and stability of parameters, integrated and hybrid circuits*

Представлено результати експериментальних досліджень параметрів власного магнітного поля електричних розрядів в умовах електроерозійної обробки множинним розрядом, який формується внаслідок магнітогідродинамічних процесів у робочій рідині міжелектродного проміжку

Ключові слова: *власне магнітне поле, електрична дуга, саморозщеплення дуги, багатодугова система, множина нестационарних розрядів*

Представлены результаты экспериментальных исследований параметров собственного магнитного поля электрических разрядов в условиях электроэрозионной обработки множественным разрядом, который формируется вследствие магнитогидродинамических процессов рабочей жидкости межэлектродного промежутка

Ключевые слова: *собственное магнитное поле, электрическая дуга, саморасщепление дуги, многодуговая система, множество нестационарных разрядов*

УДК 669.14.018.298.2

СОБСТВЕННОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ РАЗРЯДА ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

В. И. Носуленко

Доктор технических наук, профессор
Кафедра обработки металлов давлением*
Контактный тел.: (052) 239-04-19
E-mail: nosulenko_wi@mail.ru

П. Н. Великий

Ведущий инженер
Кафедра обработки металлов давлением*
Контактный тел.: (052) 239-04-29
E-mail: velikiy_pm@mail.ru

М. И. Москаленко

Ведущий инженер
Кафедра электротехники*
Контактный тел.: (052) 239-04-29

О. С. Чумаченко

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра экономики и организации производства
Контактный тел.: 050-454-94-25
E-mail: aldjana_flora@mail.ru

*Кировоградский национальный технический университет
пр. Университетский, 8, г. Кировоград, Украина, 25009

1. Введение

Исследование относится к прогрессивным процессам электрофизической обработки металлов – методам электроэрозионной обработки.

Электроэрозионный метод обработки (ЭЭО) токопроводящих материалов существенно расширил возможности современной технологии металлообработки и позволил: использовать для изготовления деталей машин и приборов новые высокопрочные материалы, обработка которых механическими методами вызывает значительные сложности, или вообще невозможная в связи с их высокой твердостью или вязкостью; создавать новые конструкции узлов и деталей сложных форм, которые невозможно выполнить средствами других технологий (внутренние криволинейные и спиральные отверстия, пазы, канавки и т.п.).

Электроэрозионная техника и технология благодаря уникальным возможностям прецизионной обработки пользуется спросом во всем мире, общепризнана, широко применяется в промышленности и продолжает интенсивно развиваться.

Для ЭЭО используют как нестационарные (традиционно), так и стационарные разряды. Способ размерной обработки стационарной электрической дугой (РОД) в поперечном потоке жидкости имеет на порядок большую производительность сравнительно с ЭЭО нестационарным разрядом, меньшие энергозатраты, эксплуатационные расходы, станки более дешевы [1]. Эта разновидность ЭЭО эффективна в условиях серийного производства. Однако, по качеству (точность, шероховатость) – ключевому показателю современных технологических процессов, поверхности, обработанные в условиях РОД, обычно соответствуют показателям черновых режимов ЭЭО