

ОПТИМІЗАЦІЯ ЛАЗЕРНОЇ ПОВЕРХНЕВОЇ ОБРОБКИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ З МЕТОЮ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИРАТ**SEMICONDUCTOR MATERIALS LASER SURFACE PROCESSING OPTIMISATION FOR MINIMIZATION OF POWER INPUTS**

Анотація. Показано, що в умовах розвиненої поверхні напівпровідникових матеріалів теплову обробку можна проводити скануючим рухом лазерного променя. Запропоновано алгоритм швидкого вибору траєкторії сканування, який забезпечує мінімізацію енерговитрат і часу обробки, одночасно забезпечуючи її повноту.

Summary. It is shown, that in conditions of the semiconductor materials advanced surface thermal processing can be carried by scanning movement of a laser beam. The algorithm of a fast choice of a trajectory of scanning which provides minimization of power inputs and time of processing, providing, at the same time, his completeness is offered.

Широке застосування лазерної поверхневої обробки в електронній промисловості обумовлено покращенням експлуатаційних властивостей матеріалів, пов'язане зі зміною структурного стану, фазового чи хімічного складу поверхневих шарів. Лазерна технологія обробки напівпровідникових матеріалів відрізняється високою локальністю, імпульсним характером і селективністю дії на оброблювані елементи. Це дозволяє успішно використовувати її при кристалізації аморфних тонких плівок напівпровідників, які отримують шляхом термічного випаровування у вакуумі [1]. Досить ефективним є лазерний відпал в атмосфері водню аморфних плівок вузькозонних напівпровідників, які застосовуються в детекторах ІЧ-діапазону [2]. Імплантаційну обробку імпульсною лазерною плазмою з іонами Fe⁺ монокристалічної поверхні Si(100) застосовують при створенні тонких плівок силіцидів заліза, використовуваних в оптоелектронних приладах [3]. Ще одним напрямом використання лазерної обробки є відпал електрично активних дефектів на поверхні напівпровідникових матеріалів, які виникають при іонній імплантації та інших технологічних операціях. Крім того лазерна технологія дозволяє вирішувати проблеми створення інтегральних мікросхем, в яких на одному кристалі, окрім „інтелектуальних” сенсорів (smart sensor), розташовуються також і силові елементи (smart power), які обробляють сигнали зовнішніх впливів [4].

Основним недоліком застосування лазерної обробки напівпровідникових матеріалів є те, що через локальні розміри зони термічної дії лазерного пучка, часто складну конфігурацію поверхні таке нагрівання не може провадити по всій поверхні об'єкта одночасно, і доводиться вдаватися до скануючої обробки рухомим лазерним променем [5].

Управління таким процесом носить оптимізаційний за часом характер, оскільки процедура високоінтенсивного нагрівання досить енергоємна, а іноді й небезпечна, перевага від зменшення часу обробки очевидна. Зменшення може бути досягнуте завдяки такій організації процесу, яка б максимально запобігала марній витраті тепла, його розповсюдженню від оброблюваної ділянки без використання для наступної обробки сусідніх ділянок, тобто завдяки ефективній стратегії опромінювання. Такі підходи в літературі не описані.

Тому метою даної статті є пошук оптимальних рішень зниження енерговитрат на поверхневу термічну обробку за рахунок дослідження і розробки нової стратегії енергозбереження та доведення її ефективності для поверхневої лазерної обробки.

При цьому виникає проблема вибору оптимізаційних параметрів обробки (траєкторії та швидкості переміщення опромінювача), які забезпечать задане нагрівання матеріалу за мінімальних витрат енергоносіїв.

Для повного опису технологічного процесу необхідно задати (вибрати) початкову точку опромінювання, обчислити швидкість переміщення променя з початкової точки як вектор-функцію часу і точку закінчення обробки, яка визначається, виходячи з заданого критерію її повноти.

Температурне поле оброблюваного таким способом об'єкта відрізняється неоднорідністю і нестационарністю. Тому в роботі були прийняті такі допущення.

У першому допущенні безупинний рух джерела замінили переривчастим: з позиції на позицію, з витримкою часу τ_{ij} над кожною точкою O_{ij} , яка є геометричним центром відповідної позиції, і миттєвим переміщенням із точки в сусідню ортогонально розташовану точку (рис. 1).

В другому допущенні рух джерела дозволяється тільки уздовж ортогональних напрямків, паралельних сторонам оброблюваного прямокутника.

Третє допущення визнавало закінченням обробки в загальному випадку неоднчасне нагрівання всіх точок A_{ij} , що знаходяться на одній нормалі до оброблюваної поверхні на глибині z під точками O_{ij} ($O_{ij} - A_{ij} = z \forall i, j$), до температури $T_{обр}$.

Четверте допущення полягає в тому, що незалежно від розташування і часу роботи джерел, температурне поле має вигляд множини еквітемпературних півсфер з центрами в точках обробки O_{ij} .

П'яте допущення: будь-яке поточне становище поля температур під будь-якою точкою O_k розглядається як результат нагрівання за інших рівних умов тим же точковим джерелом тепла, який постійно знаходиться над точкою O_k , за період від деякого минулого моменту часу τ_{ok} до поточного моменту τ_{nk} .

Цільовою функцією оптимізації є сумарний час τ_{Σ} , витрачений на обробку усіх $K = m \times n$ точок поверхні,

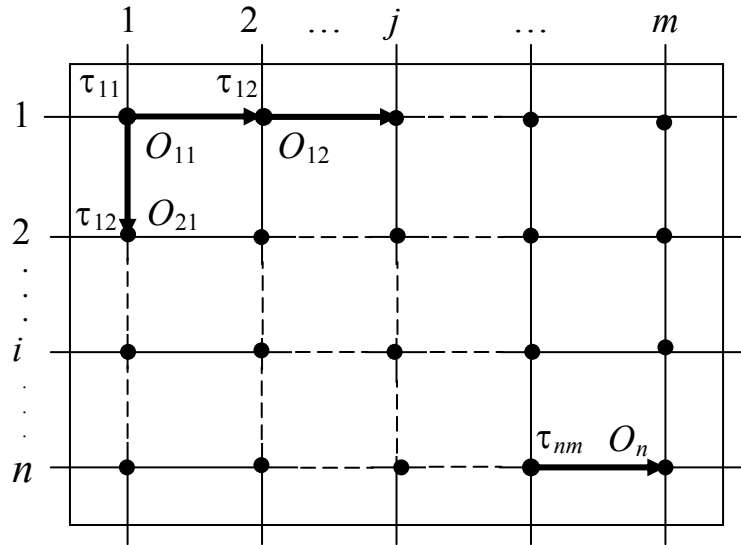


Рисунок 1 – Схема до вибору траєкторії переміщення джерела тепла

$$\tau_{\Sigma} = \sum_{k=1}^K \tau_k \quad (1)$$

У кожній точці в загальному випадку (крім крайніх і кутових, див. рис. 1) є чотири ортогонально розташовані «сусідки». Таким чином, на кожному кроці оптимізації, у першу чергу, необхідно вибрати один з чотирьох напрямків подальшого переміщення. Ця кількість може бути зменшена, якщо точка розташована на краю чи в куті оброблюваної поверхні або якщо деякі із сусідніх точок вже оброблені.

Після відсівання таких точок критерієм подальшого вибору напрямку в пропонованому методі є переміщення на сусідню позицію, в якій температура контрольної точки на момент вибору максимальна, що дозволяє ефективно використовувати для термообробки цієї позиції тепло, накопичене за рахунок внутрішнього теплообміну теплопровідністю при обробці інших позицій.

Розглянемо тепловий баланс обробки. «Корисна» частина тепла, передана тілу, яке нагрівається, йде на термообробку зони під джерелом. При цьому інша частина тепла розсіюється в сусідні зони і стає втраченою. Якщо ж деяку частку втраченої частини встигнути використати в майбутньому при обробці сусідніх зон, до того, як вона остаточно розсіялася, то вона «повертається» у корисну частину, стає «псевдовтраченою». Чим більше такого «псевдовтраченого» тепла вдається зберегти для загальної обробки, тим меншими будуть витрати на весь процес у цілому.

Розрахунок нагрівання контрольної точки від джерела здійснювали за формулами для точкового безупинного джерела тепла з наступними початковими умовами: початкова температура однакова; на нескінченному віддаленні температура дорівнює початковій. Вихідна розрахункова формула для цих умов має наступний вигляд [6]:

$$T = T_0 + \theta_1 \frac{q}{\lambda z}; \quad \theta_1 = \frac{1}{4\pi} \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{Fo_1}}, \quad (2)$$

де T_0 – початкова температура навколишнього середовища;

q – потужність випромінювання застосовуваного типу лазера;

λ – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу;

z – задана глибина прогріву, на якій знаходиться контрольна точка;

$\operatorname{erfc}(u) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-u^2} du$ – функція помилок Гаусса. Функція змінюється від 1, коли $u = 0$, до

0, коли $u \rightarrow \infty$ (практично, коли $u > 2,7$, оскільки $\operatorname{erfc}(2,7) = 0,0001$);

$FO_1 = \frac{a\tau_1}{z^2}$ – безрозмірний час Фур'є, протягом якого джерело знаходиться над контрольною

точкою;

a – коефіцієнт температуропровідності оброблюваного напівпровідникового матеріалу.

Для розрахунку τ_Σ за (1) час обробки τ_k кожної k -ї точки визначали з виразу:

$$\tau_k = [\tau_k(T_0 \rightarrow T_{\text{іад}}) - \tau_k(T_0 - T_k)],$$

де $\tau_k(T_0 \rightarrow T_{\text{обр}})$ – час нагрівання k -ї точки від початкової температури T_0 до заданої температури обробки $T_{\text{обр}}$;

$\tau_k(T_0 \rightarrow T_k)$ – час нагрівання k -ї точки від початкової температури T_0 до температури на кінець k -ї ітерації T_k .

Час $\tau_k(T_0 \rightarrow T_{\text{обр}})$ – величину, загальну для всіх точок, визначити відносно легко, оскільки температура $T_{\text{обр}}$ задана. Цей час розраховували за неявною формулою

$$T_{\text{обр}} = T_0 + \frac{q}{4\pi\lambda z} \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{a\tau_{k(T_0 \rightarrow T_{\text{обр}})}}} \quad (3)$$

методом підбору.

Час $\tau_{k(T_0 \rightarrow T_k)}$, взагалі різний для кожної k -ї точки, визначити набагато складніше, оскільки для цього спочатку необхідно розрахувати температуру T_k . Логіка такого розрахунку будувалася за наступними допущеннями. До моменту прийняття рішення про напрямок переміщення обрана контрольна точка піддавалася впливу теплового потоку від одного джерела, яке розташовувалося в різних точках і працювало там у різні періоди часу. Відповідно до принципу елементарної суперпозиції такий вплив заміняли на роботу різних по розташуванню нерухомих джерел, дія яких складалася з урахуванням реального часу їхньої роботи.

Після визначення T_k можна, ґрунтуючись на п'ятому допущенні, продовжити розрахунок необхідного часу догрівання точки A_k , що лежить на глибині z під точкою O_k , від температури T_k , яку вона набула до τ_{nk} від дії джерела на сусідніх позиціях, до температури $T_{\text{обр}}$. Для цього, розв'язуючи задачу, зворотну (3) для $T = T_k$, знайдемо інтервал часу $\tau_{nk} - \tau_{0k}$, потім розв'язуючи пряму задачу (3) для $T = T_{\text{обр}}$ – інтервал $\tau_{0k} - \tau_{\text{обр}k}$, і, нарешті, віднімаючи від другого інтервалу перший, – шуканий час «догрівання» $\tau_{\text{обр}k} - \tau_{nk}$.

При розрахунку попереднього нагрівання кожної k -ї точки рухоме джерело тепла заміняється N_k нерухомими, працюючими в різний час і в різних місцях, а кожне з N_k джерел – двома елементарними джерелами, які починають роботу в різний час і продовжують роботу до нескінченності. Отже загальна кількість таких джерел складає $2N_k$.

Ефективність запропонованого методу порівняно, наприклад, з методом повного перебору можливих варіантів траєкторії опромінювача, витікає з таких міркувань. Нехай поверхня, яка підлягає обробці, згідно з першим допущенням покрита K позиціями і відповідно K точками із номерами 1; 2; ... ; k ; ... ; K . Цільова функція – сумарний час обробки (2) є дискретною функцією перестановок K точок з множини K :

$$\tau_\Sigma = f(\{x_1; x_2; \dots; x_K\}), \quad (4)$$

де $\{x_1; x_2; \dots; x_K\}$ – K -перестановка, утворена з неповторюваних елементів – номерів точок покриття. Загальна кількість перестановок з K по K дорівнює $K!$. Для будь-яких реальних випадків моделювання теплової обробки – це дуже велике число. З урахуванням попарної зв'язності елементів аргументу в (4) (переміщення здійснюється тільки на одну з двох чи трьох сусідніх точок) реальна кількість можливих перестановок-аргументів знаходиться між нижньою $p(K, K) = K \cdot 2^{K-2}$ і верхньою $p(K, K) = K \cdot 3^{K-2}$ оцінками. Це теж дуже великі числа. Наприклад, для покриття 10×10 точок нижня оцінка складає приблизно $3,2 \cdot 10^{31}$ варіантів реальних перестановок, що виключає повний їх перебір.

Для того, щоб довести ефективність описаної стратегії мінімізації енергетичних витрат реалізовували комп'ютерні експерименти з виконанням моделювання поверхневої теплової обробки покриттям із $10 \times 10 = 100$ точок. На першому етапі експерименту за формулою (3) розраховували час $\tau_{k(T_0 \rightarrow T_k)}$ нагрівання однієї позиції до $T_{обр}$. Максимально можливий сумарний час нагрівання $\tau_{\Sigma_{max}}$ визначали за умови, що після обробки кожної позиції давати об'єкту цілком охолонути до $T_0 = 300$ К. На другому етапі визначили час обробки $\tau_{\Sigma_{min}}$, отриманий в результаті застосування запропонованого методу оптимізації.

На третьому етапі було виконано 1000 розрахунків часу обробки, в яких напрямок переходу на чергову зв'язану позицію визначався випадковим чином. Той факт, що жоден з 1000 розрахунків не дав результат, більший, ніж $\tau_{\Sigma_{max}}$, і менший, ніж $\tau_{\Sigma_{min}}$, з необхідною для технічних застосувань точністю доводить, що обраний алгоритм дійсно є оптимальним.

Таким чином запропонована стратегія оптимізації параметрів технологічного процесу поверхневої лазерної обробки полягає в постійному пошуку напрямку переміщення опромінювача в бік антиградієнта температур від поточної оброблюваної точки поверхні, а комп'ютерним експериментом доведено, що застосування такої стратегії дозволяє значно скоротити час поверхневої обробки і мінімізувати енерговитрати. Крім того розрахунком за допомогою комп'ютерної моделі визначено, що у випадку центральносиметричної поверхні, яка підлягає обробці, оптимальною точкою початку такої обробки є центр симетрії з наступним рухом від цієї точки по спіралі.

Література

1. Лозовский В.Н., Лунин Л.С., Попов В.П. Зонная перекристаллизация градиентом температур полупроводниковых материалов. – М.: Металлургия, 1987. – 232 с.
2. Леонтьев П.А., Хан М.Г., Чеканова Н.Т. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 142 с.
3. Импульсная имплантация ионов при лазерной абляции материалов / В.Е. Кошманов, А.Л. Смирнов, В.Ю. Фоминский и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2003. – № 2. – С. 37 – 51.
4. Искандер-Заде З.А., Касимов Ф.Д., Исмаилова С.А. Косвенный лазерный нагрев поликристаллического кремния для получения активных элементов микросхем // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2002. – № 4 – 5. – С. 40 – 42.
5. Балан С.А., Савельева О.С., Трофименко Е.Г. Оптимизация поверхностной тепловой обработки // Труды Одесского политехнического университета. – Одесса, 2001. – Вып. 1(13). – С. 114 – 113.
6. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. – М.: Высшая школа, 1973. – 298 с.