

# КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

*Досліджені процеси іонізації та осадження металів і напівпровідників на площинну підкладку в області мікровістря скануючого тунельного літографа, зроблені оцінки продуктивності методу формування наноструктур для квантових елементів обчислювальної техніки.*

© А.І. Золот, О.М. Клочко,  
2003

УДК 621.382

А.І. ЗОЛОТ, О.М. КЛОЧКО

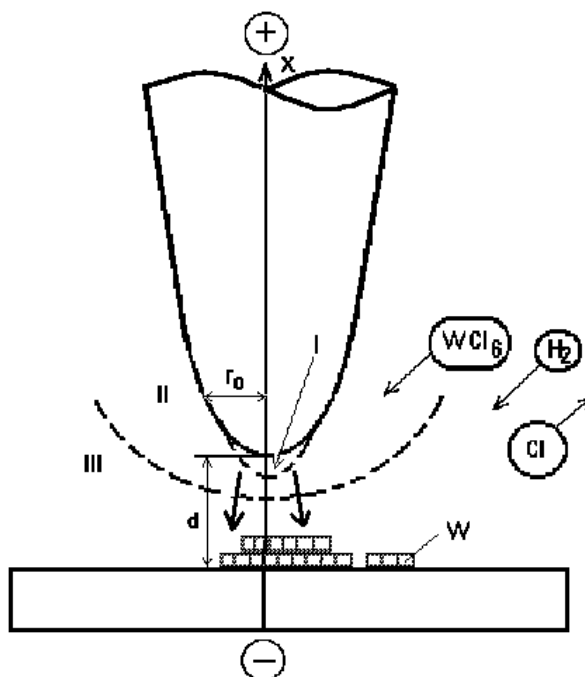
## ФОРМУВАННЯ НАНОРОЗМІРНИХ СТРУКТУР ДЛЯ КВАНТОВИХ ПРИЛАДІВ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Кількість робіт в галузі квантової теорії інформації та квантових обчислювань приймає за останній час лавинного характеру, з'являються й експериментальні роботи. Це в свою чергу сприяє узагальненню та більш глибокому сприйняттю основ самої квантової теорії та її зв'язків з квантовою теорією інформації.

Квантові методи виконання обчислювальних операцій з квантовими елементами (квантитами, або quantum bits), а також передачі та обробки інформації, вже починають втілюватись в реально функціонуючих експериментальних приладах, що стимулює зусилля по розробці та побудові квантових процесорів – нового напрямку в галузі обчислювальної техніки [1,2].

Багатьох проблем при формуванні нанорозмірних та молекулярних структур, використовуваних для розробки і конструювання елементів квантових процесорів, а саме: варіантних структур з нанорозмірними крапками та нитками, фотонних кристалів інтегрованих в єдину матрицю, оптоелектронних та електронно-оптичних перетворювачів та інших, можуть бути вирішені при застосуванні такого технологічного інструменту, як скануючий тунельний літограф (СТЛ). Суттю такого технологічного методу є те, що для формування наноструктур в сфері мікровістря СТЛ у робочий об'єм камери з газом-носієм воднем подається хлор- або фтористовмісткісні гази  $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{SiF}_4$ ,  $\text{WCl}_6$  [3,4] з метою їх іонізації та подальшого осадження на напівпровідникову підклад-

ку в сильному електричному полі. При цьому іонізація електричним полем не поділяє молекули на складові частини. Ця обставина дозволяє забезпечити стійку роботу вістря без його хімічного руйнування активними газами, а також відвід газових продуктів реакції системою вакуумної відкачки. На рисунку схематично показаний механізм руху матеріалу на підкладку біля вістря та продуктів реакції (HCl, HF). Біля робочої частини вістря можливо виділити, з точки зору напруженості електричного поля, три основних характерних зони. Перша зона найближча до вістря (одиноці ангстрем) характеризується іонізацією молекул робочого газу, у даному випадку, гексахлориду вольфрама  $WCl_6$ . Друга характерна зона розташована на відстані приблизно  $10r_0$  ( $r_0$ - радіус вершини вістря) від вістря. В цій зоні відбувається захват електричним полем нейтральних молекул робочого газу та їх поляризація. Далі за другою зоною розташована третя зона з відносно слабим електричним полем, де відбувається хаотичний рух нейтральних молекул. Безпосередньо біля вістря, у першій зоні, коли напруженість електричного поля дорівнює значенню іонізації молекули ( $E=10$  В/нм) [3], електрони за рахунок ефекту тунелювання відриваються від нейтральної поляризованої частки, в результаті чого з'являється позитивний іон:



РИСУНОК

Після закінчення процесу іонізації потужне електричне поле швидко розділяє електрони та іони. Позитивні іони зосереджуються на підкладці, яка має мінусовий потенціал, а електрони спрямовуються до аноду. Температура напівпровідникової підкладки утримується в межах 300-400 °С, що необхідно для забезпечення високої адгезії та умов гетероепітаксії наносимого матеріалу. Іони досягнувши гарячої підкладки вступають в хімічну реакцію:



Із зони нанесення вольфраму НСІ виводиться системою відкачки. Температура підкладки може змінюватись, однак повинна бути нижче температури взаємодії нейтральних молекул  $\text{WCl}_6$  з воднем.

Якщо забезпечити вістря рух в вертикальному та горизонтальному напрямках відносно підкладки, тобто застосувати сканування, можна сформувати островки монокристалічного  $\text{W}$ ,  $\text{Si}$  або  $\text{W}_x\text{Si}_y$  [3] необхідної форми та розмірів (від десятків  $\text{\AA}$  до сотен нанометрів) з подальшим формуванням активних областей квантових елементів з гранично малою геометрією.

Теоретично вираз для середнього часу існування свободних малих молекул у електричному полі з напруженістю  $E$  має вигляд [3]:

$$t = 10^{-16} \cdot \exp(0,68 F_i^{3/2} / E), \quad (3)$$

де  $F_i$  – енергія іонізації.

Час існування або іонізації молекул  $t$  необхідно враховувати з метою пошуку продуктивності  $P$ , котра може бути також знайдена експериментально і має вираз:

$$P = f(N_g, n_o, t), \quad (4)$$

де  $N_g$  – концентрація молекул газу на межі поділу I-ї та II-ї зони;  $n_o = 10^{15} \text{ 1/см}^2$  – кількість атомів осадженого матеріалу в одному монослої площію  $1 \text{ см}^2$ .

Час формування металевого острівка при нерухомому вістрі, відомій товщині та періоді кристалевій ґратки у напрямку  $X$ :

$$T = h / aP, \quad (5)$$

де  $a$  – період кристалевій ґратки у напрямку  $X$ ;  $h$  – товщина шару.

Коли треба нанести лінію напівпровідника або металу, або іншу фігуру, необхідно знайти швидкість руху вістря  $V_d$  в напрямку поверхні підкладки. Для цього необхідно знати продуктивність системи  $P$ , товщину шару та геометричні розміри робочої області вістря

$$V_d = 2r_o/t = 2kr_o aP/h, \quad (6)$$

де  $k = \mathbf{B}/r_0$  – коефіцієнт форми п'ятна, відображаючий залежність радіуса п'ятна  $\mathbf{B}$  від радіуса вістря  $r_0$ .

Таким чином, продуктивність системи  $P$  залежить безпосередньо від напруженості електричного поля  $E$ , від часу іонізації молекул  $t$ , а також від концентрації газу в робочій камері. Відповідно наведеній інформації, суттєвим обмеженням у збільшенні продуктивності системи є кінцева величина  $t$ . Крім цього, як видно на рисунку, молекула газу, потрапляючи в зону II, спрямовується до вістря, а потім, тільки після іонізації, рухається до підкладки, таким чином закінчує складний та довгий маршрут, що суттєво обмежує продуктивність всього технологічного процесу. Підвищення значення  $E$  за рахунок зменшення радіуса скруглення вістря  $r_0$  до декількох ангстрем дало б можливість збільшити продуктивність процесу, але технологія формування вістрів обмежує цю можливість.

**Висновки.** Запропонований метод газозафазного осадження металевих та напівпровідникових шарів у потужному електричному полі біля мікровістря на площинну підкладку дає можливість отримувати елементи та наноструктури з розмірами в одиниці нанометрів.

Продуктивність технологічного процесу залежить від величини напруженості електричного поля, часу іонізації нейтральних молекул робочого газу та його концентрації біля вістря.

1. *Від гетеролазера до квантового комп'ютера* / О.В. Палагін, В.І. Осінський, А.І. Золотопуп та ін. // Комп'ютери у Європі. Минуле, сучасне та майбутнє: Пр. міжнар.симп., К.: 5-9 жовтня, 1998. – С. 437 - 451.
2. *Валиев К.А., Кокин А.А.* Квантовые компьютеры: надежды и реальность. – 2001.– 352 с.
3. *Бродай И., Мерей Дж.* Физические основы микротехнологии. – М.: Наука, 1985. – 496 с.
4. *Васько А.Г., Ковач С.К.* Электрохимия тугоплавких металлов. – Киев: Техніка, 1983. – 160 с.

Одержано 01. 07. 2002