

## Висновок

Моделювання електричних характеристик наноелектронних транзисторів необхідне під час апробації нових матеріалів, конструкцій і для адаптації до моделей схем, а також для масового виробництва нанотранзисторів. Глибше розуміння фізичних процесів в цій області розкриє величезні потенціальні можливості цього типу транзисторів. Аналізуючи роботи, які пропонуються для моделювання електричних характеристик нанотранзисторів, бачимо, що найбільше відповідає функція Гріна для неврівноважених процесів, оскільки для них можна отримати розв'язок рівняння Пуассона і Шредінгера.

1. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки. – М.: Мир, 1989. 2. Ford C., Washburn S., Buttiker C., Knodler C. *Phys. Rev. Lett.* 62,1998, 2724–27 p. 3. Datta S. *Nanotechnology*, 15, 2004, 433–451 p. 4. Fulton T., Dolan G. *Phys. Rev. Lett.*, 59,1987, 109–112 p. 5. Altmeyer S., Hamidi A., Spangenberg B., Kurz H., J. *Vac. Sci. Technol.*, B14, 1996, 4034–4037. 6. Klizing K., Dorda G., Pepper M. *Phys. Rev., Lett.*, 48, 1980, 494–497 pp. 7. Tsui D., Stormer H., Gossard A. *Phys. Rev., Lett.*, 48, 1982, 1559–1562 p. 8. Buks E., Schuster R., Heiblum M., Umansky V. *Nature* 391, 1998, 871–874 p. 9. Sondora K., Taniguchi K., Hamaguchi C. *IEEE Trans Electron Devices*, 1991, 2662–2668 pp. 10. Sond J., Park Y. *IEEE Trans Electron Devices*, 43, 1996, pp. 1870–1875. 11. J. Tersoff. *Phys. Rev. Lett.*, vol. 52, 465–568, 1984. 12. S. Wind, J. Appenzeller, R. Martel, V. Derycke, P. Avouris. *Appl. Lett*, vol. 80, pp. 3817–3819, 2002. 13. Datta S. *IEDM. Techn. Dig.* – 2002. 14. Zhibin Ren, Ramesh Venugopal, S. Goasguen, S. Datta, M. Lundsfrom. *IEEE Trans Electron Dev.*, vol. 50, pp.1914–1925, 2003. 15. Svizhenko A., Anantan M., Govindan T. et. *el J. Appl. Phys.*, vol. 91, p. 2343, 2002.

УДК: 385.832

М.Й. Николишин

Національний університет "Львівська політехніка "

## ОЦІНКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ПЛОЩ МІКРООБ'ЄКТІВ СКАНУЮЧИМ ОПТИЧНИМ МІКРОСКОПОМ

© Николишин М.Й., 2008

**Розглянуто оцінку функціонування скануючого оптичного мікроскопа, а також його точності під час вимірювання площ мікрооб'єктів. Для покрокового сканування досліджуваного об'єкта, яке використовується у скануючому оптичному мікроскопі, проаналізовано чинники, що впливають на точність вимірювання.**

**Estimation of scanning optical microscope functioning is reviewed as well as its precision at microobjects squares measuring. Factors, influencing to the measuring precision at specimen under investigation step scanning used in scanning optical microscope are analyzed.**

### Вступ

Сутність функціонування скануючого оптичного мікроскопа (СОМ) полягає у покроковому просвітлюванні сфокусованим світловим променем досліджуваного об'єкта – деякої скляної пластинки, на якій зафіксовано досліджуваний мікрооб'єкт (МО) або сукупність МО біологічного та (чи) небіологічного походження.

Відтак частина енергії світлового променя відбивається, частина поглинається досліджуваним об'єктом (ДО), а частина проходить наскрізь, створюючи з протилежного боку сукупність елемен-

тарних світлових плям (ЕСП), енергетична яскравість яких є меншою за яскравість падаючого променя на величину поглинутої об'єктом енергії. Ця сукупність розміщених у певному порядку ЕСП формує зображення МО, що знаходяться на пластинці ДО. Порядок розміщення ЕСП визначається розгорткою світлового променя. Для покрової рядкової розгортки ЕСП розміщуються послідовно одна за одною на віддалі, не більшій від свого діаметра.

### Основна частина

Енергетична яскравість кожного ЕСП характеризується поглинанням світлової енергії у точці своєї локалізації на поверхні досліджуваного об'єкта. Поглинута кожною точкою поверхні енергія є різною не тільки для різних МО, але і в межах поверхні окремого МО, внаслідок чого вихідна сукупність ЕСП стає яскравісно рельєфною. Виділяються яскравісно рельєфні множини ЕСП, що відтворюють: зображення МО; образ середовища, в якому знаходиться МО; зображення, утворені іншими факторами.

ЕСП фіксують за величиною, що пропорційна до енергетичної яскравості, тобто за амплітудою електричного сигналу  $U_{\text{сп}}$ , який утворюється на виході фотоелектронного помножувача (ФЕП) за дії на його вході ЕСП. Електричний сигнал амплітудою  $U_{\text{сп}}$  порівнюється з деякими, наперед заданими значеннями  $U_{\text{п1}}$  і  $U_{\text{п2}}$ . За перевищення  $U_{\text{п1}}$  і неперевищення  $U_{\text{п2}}$  величина  $U_{\text{сп}}$  фіксується як корисний сигнал, для якого визначаються координати, значення амплітуди, кореляція з попередніми ЕСП тощо.

Розглянемо можливі випадки, коли за умови  $U_{\text{п1}} \leq U_{\text{сп}} \leq U_{\text{п2}}$  вважається, що ЕСП не належить МО. Це відбувається тоді, коли амплітуда шумового викиду перевищить значення  $U_{\text{п1}}$ , або коли амплітуда флуктуацій світіння скануючого світлового променя не досягне значення  $U_{\text{п2}}$ . Можливий також випадок, коли  $U_{\text{п1}} > U_{\text{сп}} > U_{\text{п2}}$  і ЕСП також не вважається елементом МО. Як проявляється вплив перелічених вище факторів на функціонування СОМ і яку частку недостовірності вони вносять у вимірювання параметрів МО проаналізуємо на імовірнісній моделі.

На рис. 1 зображено вихідні розподіли густин імовірностей амплітуд шуму  $W_{\text{ш}}(U)$ , суміші сигналу і шуму  $W_{\text{сш}}(U)$  та флуктуацій світлового променя  $W_{\text{ф}}(U)$ .

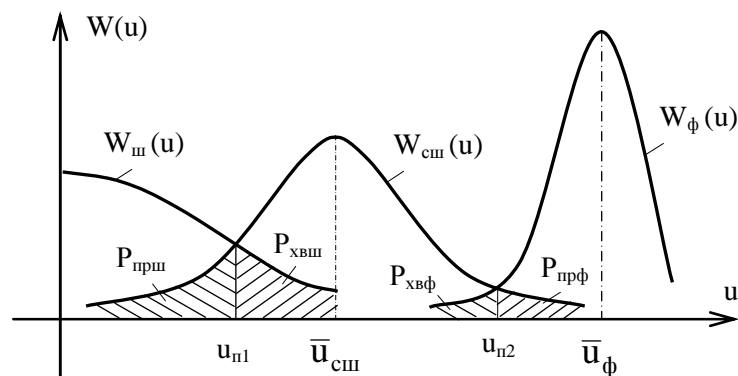


Рис. 1. Розподіли густин імовірностей амплітуд:  $W_{\text{ш}}(U)$  – шуму;  $W_{\text{сш}}(U)$  – суміші сигналу і шуму;  $W_{\text{ф}}(U)$  – флуктуацій світлового променя

Флуктуації світлового променя зумовлюються як неоднорідністю структури люмінофору електронно-променевої трубки, що створює цей промінь, так і оптичною неоднорідністю скляної пластинки, на якій знаходяться МО, а також оптичною неоднорідністю зв'язаного з пластинкою середовища. Чинниками шумів є функціонування ФЕП, функціонування підсилювачів корисного сигналу та інших пристроїв опрацювання електричних сигналів.

Відтак після необхідних перетворень та підсилення результуючої суміші на вході порогових пристроїв електричної частини СОМ діє суміш корисного електричного сигналу і шуму та флуктуації світлового променя джерела. Подальше опрацювання діючої суміші повинно забезпечити ефективне розділення корисних та хибних складових. Тому значення порогових рівнів  $U_{п1}$  та  $U_{п2}$  вибираються так, щоб похибки визначення необхідних параметрів МО були мінімальними. Використовуються критерії, що враховують цінність апостеріорних імовірностей, чим забезпечується мінімум пропусків корисного сигналу як внаслідок ідентифікації його з шумом і флуктуаціями світлового променя, так і хибного сприймання цих складових як корисного сигналу.

Апостеріорна імовірність похибки функціонування СОМ визначається як

$$P_x = P_{прш} + P_{хвш} + P_{хвф} + P_{прф}, \quad (1)$$

де  $P_{прш} = \int_0^{U_{п1}} W_{сш}(u) du$  – апостеріорна імовірність пропуску корисного сигналу, що виникає внаслідок неперевикнення ним значення  $U_{п1}$ ;

$P_{прф} = \int_{U_{п2}}^{\infty} W_{сш}(u) du$  – апостеріорна імовірність пропуску корисного сигналу, що виникає внаслідок перевищення ним значення  $U_{п2}$ ;

$P_{хвш} = \int_{U_{п1}}^{\infty} W_{ш}(u) du$  – апостеріорна імовірність хибного сприймання, зумовленого ототожненням корисного сигналу з шумом;

$P_{хвф} = \int_0^{U_{п2}} W_{ф}(u) du$  – апостеріорна імовірність хибного сприймання, зумовленого ототожненням корисного сигналу з флуктуаціями світлового променя.

Відповідно до розподілів рис. 1 апостеріорна імовірність правильного функціонування СОМ визначається як

$$P_{пф} = \int_{U_{п1}}^{U_{п2}} W_{сш}(u) du. \quad (2)$$

За відомих апіорних імовірностей наявності і відсутності МО в межах досліджуваного об'єкта одержимо повні ймовірності правильного функціонування та похибки, які можна використовувати для оцінки функціонування СОМ разом з критерієм їх вибору.

Як визначальний фактор, доцільно використати критерій мінімального середнього ризику  $\bar{R}$ . Згідно з різною ціною  $r$  хибних апостеріорних імовірностей одержимо

$$\bar{R} = r_{прш} \cdot P_{прш} + r_{прф} \cdot P_{прф} + r_{хвш} \cdot P_{хвш} + r_{хвф} \cdot P_{хвф}, \quad (3)$$

де  $r_{прш}$  – ціна ситуації пропуску корисного сигналу внаслідок взаємодії його з шумом;

$r_{прф}$  – ціна ситуації пропуску корисного сигналу внаслідок взаємодії його з флуктуаціями світлового променя;

$r_{хвш}$  – ціна ситуації хибного сприймання, зумовленого ототожненням сигналу з шумом;

$r_{хвф}$  – ціна ситуації хибного сприймання, зумовленого ототожненням сигналу з флуктуаціями світлового променя.

Розглянемо вимірювання площ мікрооб'єктів і оцінку точності, враховуючи детерміновані та імовірнісні складові. Для покрокового просвічування взірця світловим променем, що існує у нашому випадку, вимірювання площі доцільно здійснювати сумуванням площ ЕСП, які покривають поверхню МО. Належність зафіксованих ЕСП до поверхні одного і того самого МО виявляється порівнянням їх координат між собою. Коли значення зафіксованих координат не відрізняються між собою більше ніж на крок сканування, вважається, що вони належать до поверхні одного і того самого МО. Зафіксованим ЕСП вважається тоді, коли електричний сигнал від нього за амплітудою перевищує значення  $U_{п1}$  і не перевищує значення  $U_{п2}$ , тобто коли  $U_{п1} < U_{сп} < U_{п2}$ , площа ЕСП –  $S_{сп}$  стає складовою площі МО –  $S_{мо}$ :

$$S_{мо} = \sum_{i=1}^{N_{сп}} S_{спi}, \quad (4)$$

де  $N_{сп}$  – кількість ЕСП, електричний сигнал від яких є більшим за  $U_{п1}$  і меншим за  $U_{п2}$ .

Легко зрозуміти, що незмінність форми і площі ЕСП під час сканування МО забезпечить вищу точність вимірювання площі МО. Найпростішою формою ЕСП є коло, яка, однак, у покроковому скануванні створює неопроміновані ділянки, що значно погіршують точність вимірювання площі МО. Ці неопроміновані ділянки позначимо як  $S_{но}$ , утворюються вони між положеннями суміжних рядків покрокового сканування (рис. 2).

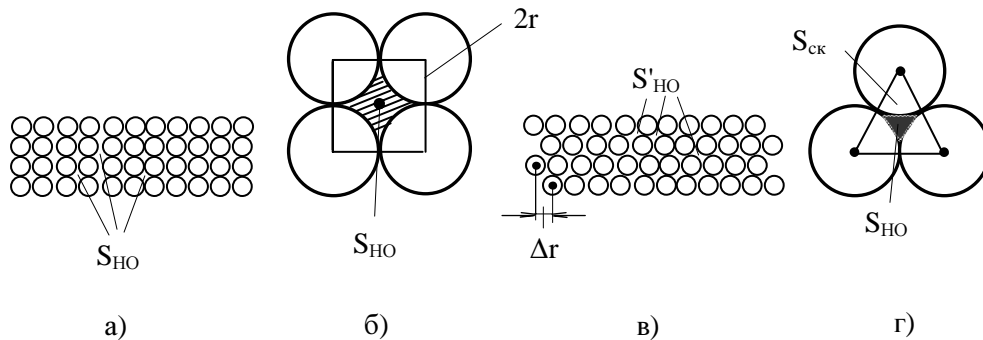


Рис. 2. Неопроміновані ділянки площ МО за покрокового сканування світловим променем круглого перерізу: а, б – за стабільної рядкової розгортки; в, г – за нестабільної рядкової розгортки

За формою вони дещо відрізняються між собою за стабільної і нестабільної рядкової розгортки світлового променя. Значення їх площ можна визначити через параметри ЕСП і врахувати як регулярну складову похибки вимірювання. Для стабільної розгортки площа  $S_{но}$  визначається як

$$S_{но} = 4r^2 - \pi r^2 = \pi r^2 \left( \frac{4 - \pi}{\pi} \right) = S_{сп} \left( \frac{4}{\pi} - 1 \right), \quad (5)$$

де  $r$  – радіус ЕСП;  $S_{сп}$  – площа ЕСП.

Для нестабільної розгортки:

$$S'_{но} = S_{\Delta} - 3S_{ск} = r^2 \sqrt{3} - \frac{\pi r^2}{2} = S_{сп} \left( \frac{\sqrt{3}}{\pi} - \frac{1}{2} \right), \quad (6)$$

де  $S_{ск} = \frac{\pi r^2}{6}$  – площа сектора;  $S_{\Delta} = \frac{(2r)^2 \cdot \sqrt{3}}{4}$  – площа рівностороннього трикутника, що утворюється внаслідок зсуву суміжних рядків.

З врахуванням неопромінованих ділянок площа МО дорівнює

$$S_{мо} = \sum_{i=1}^{N_{сп}} S_{спi} + \sum_{i=1}^{N_{но}} S_{но}, \quad (7)$$

де  $N_{но}$  – кількість неопромінованих ділянок в межі площі МО.

Третя і четверта складові, що формують значення вимірюваної площі  $S_{MO}$ , мають імовірнісний характер, зумовлений частинним перекриттям опромінюваних  $S_{СП}$  і неопромінюваних  $S_{НО}$  ділянок краєм мікрооб'єкта. Залежно від форми МО, його локалізації на поверхні скляної пластинки, стабільності розгортки світлового променя на його форми і багатьох інших імовірнісних чинників площі цих ділянок можуть додаватися, тобто збільшувати або відніматися, тобто зменшувати вимірювану площу  $S_{MO}$  порівняно з її істинним значенням. Додавання чи віднімання частини значень  $S_{СП}$  до вимірюваної  $S_{MO}$  визначаються амплітудою електричного сигналу відповідної ЕСП. Це значення  $U_{СП}$  порівнюється із значення порогових рівнів  $U_{n1}$  та  $U_{n2}$ . Коли значення  $U_{СП}$  є недостатнім для перевищення  $U_{n1}$  або таким, що перевищує  $U_{n2}$ , то уся площа  $S_{СП}$  віднімається від вимірюваної площі МО, зменшуючи істинне її значення на якусь частину свого значення залежно від форми перекриття. В протилежному випадку відбувається навпаки, внаслідок чого істинне значення площі  $S_{MO}$  збільшується на якусь частину  $S_{СП}$ . Як бачимо, врахувати під час визначення  $S_{MO}$  значення таких площ, які потрапили на межу МО, можна тільки імовірно. Тому у наступних співвідношеннях значення  $S_{СП}$ , що потрапили на край МО, (позначимо їх  $S_{КСП}$ ) і значення  $S_{НО}$  (позначимо їх  $S_{КНО}$ ) будуть відтворювати математичні сподівання, які ближчі до істини за великого співвідношення довжини периметра МО до поперечного розміру ЕСП та неопромінюваних ділянок, або відношення площ  $S_{MO}/S_{СП}$ .

Кількість неопромінюваних ділянок  $N_{НО}$ , що знаходиться в межах поверхні МО, корелюється з кількістю ЕСП, тобто з  $N_{СП}$ . Для простих геометричних форм значення  $N_{НО}$  можна віднайти аналітично, однак практична цінність такого результату зводиться нанівець апіорною невизначеністю локалізації МО, розподілу фрагментів з  $U_{СП} < U_{n1}$  і  $U_{СП} > U_{n2}$ , нестабільністю сканування, відхиленням форми МО від класичної тощо. Значно простішим є спосіб практичного визначення коефіцієнта пропорційності між  $N_{СП}$  та  $N_{НО}$  і алгоритмічної реалізації значення сумарної площі  $S_{MO}$  після визначення  $N_{СП}$ ,  $N_{НО} = k_{НО} \cdot N_{СП}$ . Аналогічно встановлюються коефіцієнти пропорційності між  $N_{СП}$  та  $N_{КСП}$  і  $N_{КНО}$  – значеннями опромінюваних та неопромінюваних площ, що знаходяться на краю МО.

Остаточна площа МО визначається так:

$$S_{MO} = \sum_{i=1}^{N_{СП}} S_{СПi} + \sum_{i=1}^{N_{НО}} S_{СПi} \left( \frac{4}{\pi} - 1 \right) + \sum_{i=1}^{N_{КСП}} k_{КСП} \cdot S_{СПi} + \sum_{i=1}^{N_{КНО}} k_{КНО} \cdot S_{СПi} \left( \frac{4}{\pi} - 1 \right), \quad (8)$$

де  $N_{КСП}$  – кількість ЕСП, що розміщені на краю МО і частково його перекривають;  $N_{КСП} = k_{КСП} \cdot N_{СП}$ ,  $N_{КНО}$  – кількість неопромінюваних площ, які частково перекривають поверхню МО;  $N_{КНО} = k_{КНО} \cdot N_{СП}$ ;  $k_{КСП}$  – коефіцієнт, що враховує ту частину площі  $S_{СП}$ , яка належить площі поверхні МО;  $k_{КНО}$  – коефіцієнт, що враховує ту частину площі і неопромінюваної ділянки, яка належить поверхні.

За рівноімовірнісного розподілу межі МО по поверхні ЕСП, а також по неопромінюваних ділянках, які потрапляють на край поверхні мікрооб'єкта, вважається, що кількість ЕСП та неопромінюваних площ, що додаються і віднімаються від площі МО, дорівнює 0,5. Врахувавши цю обставину у виразі (8), а також використавши залежності коефіцієнтів пропорційності  $k_{НО}$ ,  $k_{КПС}$  і  $k_{КНО}$  від співвідношення  $S_{MO}/S_{СП}$  (рис. 3), розраховуємо значення  $S_{MO}$  за стабільної розгортки скануючого променя. Відносну похибку визначення площ МО за різних співвідношень  $S_{MO}/S_{СП}$  проводимо за виразом:

$$\delta\% = \frac{|S_{MO} - \bar{S}_{MO}|}{\bar{S}_{MO}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

де  $S_{MO}$  – площі МО, визначені за виразом (8) за виміряних  $N_{СП}$  і  $S_{СП}$ ;  $\bar{S}_{MO}$  – істинні значення площ МО.

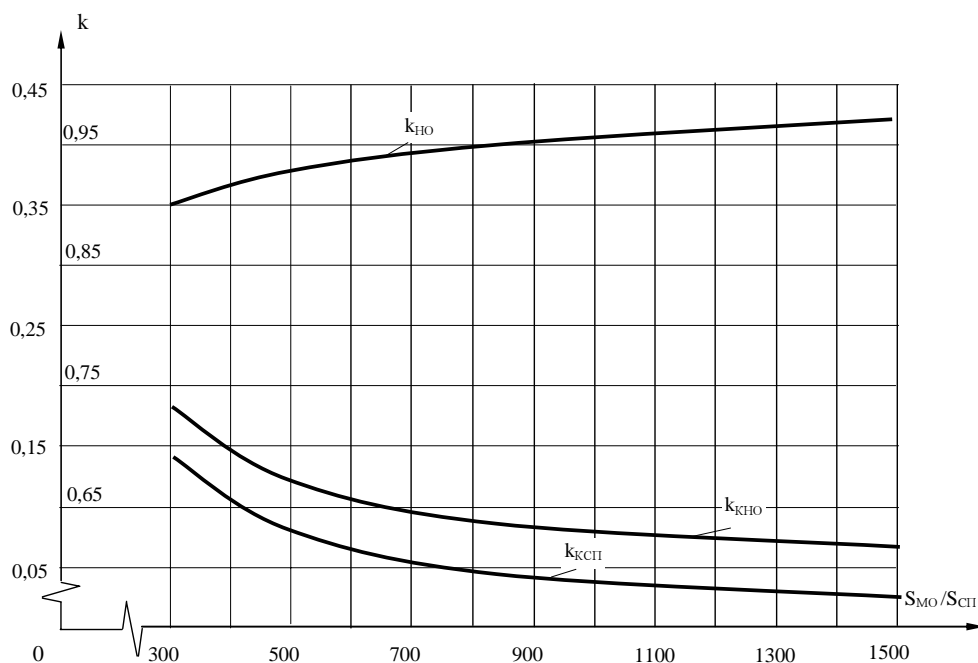


Рис. 3. Залежності коефіцієнтів пропорційності від співвідношення  $S_{MO}/S_{СП}$  для круглих форм мікрооб'єкта і скануючої світлової плями

Результати розрахунку свідчать про те, що похибка зменшується від 10 % за співвідношення

$$\frac{S_{MO}}{S_{СП}} \geq 100 \text{ до } 0,3\% \text{ за } \frac{S_{MO}}{S_{СП}} \geq 1000.$$

### Висновок

Запропоновані якісні показники функціонування СОМ, а також оцінка точності визначення площ мікрооб'єктів мають імовірнісний характер. Під час визначення площ мікрооб'єктів з метою зменшення похибки вимірювання доцільно враховувати розподіли опромінюваних та неопромінюваних ділянок, що розміщені на межі поверхні мікрооб'єкта.

1. Грицьків З.Д., Шклярський В.І. Визначення яскравості ЕПТ скануючого оптичного мікроскопа з урахуванням шумів // Вісник НУ «Львівська політехніка». – 2001. – № 428. – С. 54.
2. Грицьків З.Д. Электронно-лучевые трубки высокой разрешающей способности и их применение. – М.: Радио и связь, 1989. – 104 с.
3. Грицьків З.Д. Прикладні телевізійні системи: Навч. посібник. – Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2003. – 180 с.