

УДК 621.383.032

АНАЛІЗ ОПТИЧНИХ ВТРАТ В ПОЛІКРЕМНІЄВИХ ХВИЛЕВОДАХ

А.Р. Варцаб'юк

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка 57,
e-mail: vartsabiuk@gmail.com*

Проведено аналіз втрат при передачі сигналів у полікремнієвих хвилеводах; наведено методи, за допомогою яких можуть бути покращені характеристики хвилеводів. Розглянуті методи експериментального визначення оптичних втрат у хвилеводах.

Ключові слова: *кремнієвий хвилевод, оптичні втрати, експериментальні методики, нерівність поверхні.*

Втрати під час передачі в інтегрованих полікремнієвих хвилеводах відбуваються в результаті двох причин:

- поглинання і розсіювання в серцевині;
- поверхневе розсіювання, спричинене нерівностями поверхні.

У перших полікремнієвих хвилеводах оптичні втрати були великими внаслідок 25 нм нерівностей (верхньої) поверхні хвилеводів. Проте оптичні втрати були зменшені після планаризації поверхні хімічно-механічним поліруванням [1]. Якщо осаджувати аморфний кремній і проводити його відпал для отримання полікремнію, то можна отримати поверхню з нерівністю близько 4 нм. Більшість оптичних втрат в таких хвилеводах приписувалися до втрат серцевини. У результаті експерименту було встановлено, що коли товщина полікремнієвої серцевини зменшується з 1 до 0,2 мкм, втрати зменшуються на 10 дБ/см внаслідок витискання моди з хвилевода [1].

Нерівність поверхні та оптичні втрати. Нерівність поверхні тут визначена як нерівність верхньої частини поверхні хвилевода. Основними джерелами нерівності верхньої і нижньої частини поверхні хвилевода є:

- межі зерен, які спричиняють нерівність поверхні (відповідно до росту зерен);
- нерівності, спричинені нерівністю підкладки.

Той факт, що морфологія поверхні полікремнію пов'язана з розмірами зерен, був використаний Лі [2] для того, щоб довести, що розміри зерен полікремнію можуть бути легко визначені за допомогою атомно-силового мікроскопа. Розміри зерен, отримані за цим методом, порівнювалися з тими, що були отримані в поперечному перерізі просвітлюючої електронної мікроскопії, та вказувалося на їх ідентичність [3].

В інших системах матеріалів подібні ефекти також простежуються. Щоб уникнути таких великих втрат використовують аморфний матеріал

з широкою забороненою зоною. При цьому вплив нерівності поверхні на втрати в хвилеводі зменшується [4].

Щоб зменшити оптичні втрати замість полікристалічного може бути використаний монокристалічний матеріал (наприклад кремній-наізоляторі (КНІ), отриманий методом SmartCut) або аморфний широкозонний матеріал, такий як нітрид кремнію або оксид кремнію. Поверхні цих матеріалів є більш гладкими, через відсутність меж зерен.

Якщо використання полікристалічного матеріалу неможливо уникнути, можна зменшувати величину втрат серцевини варіюванням товщини хвилевода. Інший метод – використання надзвичайно якісного полікремнію. Такий матеріал може бути створений за допомогою швидкого термічного відпалу (RTA) полікремнію за високої температури. В такій структурі малий розмір зерен призводить до меншої, але швидшої зміни нерівності в поверхні.

Експериментальне визначення оптичних втрат. Для експериментальної оцінки оптичних втрат в хвилеводах можуть бути використані такі методи: зменшення довжини (вкорочення), метод скріпки, метод вимірювання добротності кільцевого резонансу, резонанс Фабрі-Перо.

Зменшення довжини (вкорочення). Цей метод є простим. Він включає підготовку зразка, вимірювання його передачі, обрізання його для зменшення довжини і, відповідно, збільшення передачі та повторне вимірювання. Варіацією цього методу є підготовка декількох зразків різної довжини. Щоб отримати статистично суттєві результати і вивести середнє значення на розсіюючих ділянках, на кожному зразку проводяться виміри для декількох хвилеводів (зазвичай 20). Отримані дані передачі виводяться на шкалі навпроти довжини зразка (децибелах). Ця шкала прив'язана до шкали потужності вхідного випромінювання лазера. Нахил цієї лінійної регресії і є втратами в децибелах на одиницю довжини, а відрізок описує втрати зв'язку.

Ця техніка широко описана в літературі [3]. Такий метод легкий та зрозумілий, проте він має декілька серйозних недоліків. По-перше, вимірювання передачі хвилевода після вкорочення одного зразка триває декілька днів, що призводить до недостатнього контролю експерименту. По-друге, за одночасного проведення і підготовки і вимірювання декількох зразків, наявною буде нестача контролю з точки зору підготовки зразків. Для прикладу, якість граней зразка може варіюватися від зразка до зразка. І останнє. Цей метод потребує великих затрат часу, оскільки вимагає ретельні підготовки великого числа граней.

Метод скріпки. В цьому методі частково усунені недоліки попереднього методу. Типова схема показана на рис. 1. Якщо основна ідея методу зменшення довжини (вкорочень) полягає у створенні хвилеводів різної довжини на одному зразку, то у методі скріпки заснований на тому факті, що в хвилеводах з великою різницею показників заломлення втрати згинів дуже малі. Це дозволяє розмістити декілька хвилеводів з радіусами згинів 25 мкм на одному кристалі. Крім того, якщо число згинів є сталим у кожній структурі, тоді оптичні втрати через згини мо-

жуть бути систематично виключені. За методом скріпки вимірювання передачі проводяться для кожного з хвилеводів, 5 або 10 хвилеводів кожної довжини. Використовується метод регресії, подібний до того, який використовується в методі вкорочення; отримані дані відкладаються на шкалі у децибелах, відповідно до довжини зразка. Кут нахилу лінійної регресії виражає втрати в децибелах на одиницю довжини, а відрізок – втрати зв'язку.



Рис. 1. Схема методу скріпки.

Основною перевагою методу скріпки є те, що використовується лише один зразок і грані поліруються лише один раз, що означає кращий контроль якості граней, ніж у методі вкорочення. Основним недоліком цього методу є те, що можуть використовуватись лише одномодові пристрої (до двох поляризацій). Причиною цього є те, що метод скріпки використовує коліна (згини) для зміни довжини хвилеводів на одному кристалі. Багатомодові хвилеводи показали б дуже велику варіацію, тому що потужність, яка передається через коліна багатомодових хвилеводів сильно залежить від способу, яким проводилося збудження.

Визначення оптичних втрат за допомогою кільцевого резонансу. Втрати хвилевода можуть бути знайдені за допомогою визначення зміни добротності Q_l його кільцевого резонансу, який відбувається в мікроскопічному кільці (рис. 2). Q_l – міра того, наскільки добре кільце зберігає свою енергію від втрат, викликаних поглинанням та розсіюванням. Оптичні втрати залежать від зміни добротності його кільцевого резонансу, що відбувається в мікроскопічному кільці. Точні деталі такого визначення потребують детального аналізу кільцевих резонаторів. Відомо

[3], що добротність кільця пов'язана з коефіцієнтом поглинання таким співвідношенням:

$$Q_l = \frac{\beta}{\alpha}, \quad (0.1)$$

де $\beta = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}$ – стала поширення в цьому середовищі, n_{eff} – ефективний показник заломлення середовища. Тоді

$$Q_l = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda \alpha}. \quad (0.2)$$

Отже, для коефіцієнта поглинання хвилевода отримаємо:

$$\alpha = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda Q_l}. \quad (0.3)$$

Зазначимо, що число, визначене у такий спосіб буде завищене, оскільки втрати вигнутої секції хвилевода вищі, ніж прямої.

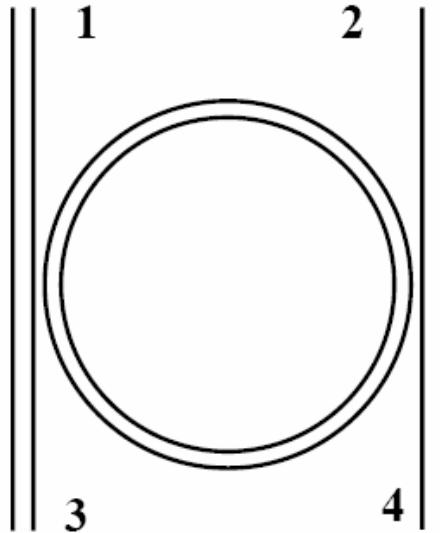


Рис. 2. Схема однорівневого мікротрітника

Аналіз інтерференційних ліній Фабрі-Перо. Грані хвилевода відіграють роль дзеркал. Таким чином, якщо грані нормальні до хвилеводів, то хвилевід відіграє роль порожнини резонатора Фабрі-Перо. Розкладання випромінювання за довжиною хвилі в хвилеводі з добре відполірованими гранями дає інтерференційні лінії Фабрі-Перо. Повний діапазон вимірювань (FSR) або дистанція від максимуму до максимуму резонансу резонатора Фабрі-Перо в першому наближенні

$$FSR = \frac{\lambda^2}{2nL}, \quad (0.4)$$

де L – довжина порожнини (в даному випадку, хвилевода), n – показник заломлення порожнини. Відбиваюча здатність межі розділу може бути обчислена виразом

$$R = \left(\frac{n_0 - n_{eff}}{n_0 + n_{eff}} \right)^2, \quad (0.5)$$

де n_0 - показник заломлення середовища, з якого випромінювання потрапляє в хвилевід.

Відбиваюча здатність кремнієвого, нітридного та SPARROW хвилеводів, обчислена за цим виразом, становить 20%, 6,7% та 4% відповідно. Інтерференційні лінії Фабрі-Перо можуть бути зведені до мінімуму в пристроях інтегральної оптики. Це може бути здійснено за допомогою антивідбиваючих покриттів чи кутових граней. З іншого боку, інтерференційні лінії Фабрі-Перо можуть бути корисними для визначення втрат в хвилеводі. Якщо хвилевід без втрат, співвідношення мінімуму інтенсивності до максимуму інтенсивності інтерференційних ліній дорівнює нулю. Якщо є втрати, відбита хвиля не може повернутися назад без ослаблення і, таким чином, відношення мінімуму інтенсивності до максимуму інтенсивності інтерференційних ліній збільшується. Може бути доведено, що з двома ідентичними гранями з коефіцієнтом відбивання R , коефіцієнт поглинання може бути обчислений як

$$\alpha = \frac{1}{L} \ln \left(R \frac{1 + \sqrt{\frac{P_{min}}{P_{max}}}}{1 - \sqrt{\frac{P_{min}}{P_{max}}}} \right), \quad (0.6)$$

де P_{min} та P_{max} – мінімум та максимум інтенсивності інтерференційних ліній.

Висновки. Таким чином, визначено, що найбільший вплив на оптичні втрати в полікремнієвих хвилеводах має нерівність поверхні хвилевода та його геометричні розміри. Із зменшенням серцевини хвилевода та нерівності поверхні втрати зменшуються. Наведені методи даю змогу визначити оптичні втрати в інтегральних хвилеводах з високою точністю.

Література

1. Black Marcie. Loss in polysilicon waveguides. Master's thesis, MIT, 1995.
2. Lee K. K., Lim D. R., Luan H-C, Agarwal A., Foresi J. S. and Kimerling L. C. The effect of size and roughness on light transmission in a si/sio2 waveguide: Experiments and model. Submitted to App. Phys. Lett., 2000.
3. Liao Ling. Low loss polysilicon waveguides for silicon photonics. Master's thesis, MIT, 1997.
4. Tien P.K.. Light waves in thin films and integrated optics. Applied Optics, 10(11):2395, 1971.

**TRANSMISSION LOSSES IN INTEGRATED SILICON
WAVEGUIDES AND METHODS OF THEIR EXPERIMENTAL
DEFINITION**

Vartsabiuk A. R.

*PreCarpathian National University by V. Stefania
Ivano-Frankivs'k, Shevchenko Street, 57, Ivano-Frankivs'k, 76000, Ukraine.*

In article the analysis of transmission losses in polysilicon waveguide have been carried out, methods by means of which characteristics of waveguides can be improved are given. Methods of experimental definition of optical losses in waveguides are considered.

Keywords: *silicon waveguide, optic losses, experimental technique, surface roughness.*