

Класифікація оптичних волокон

Відповідно до ГОСТ 26793-85, який дійсний в Україні, всі ОВ розділяються на групи (за типом випромінювання, що поширюється у волокні), на підгрупи (за типом профілю показника заломлення) і на види (за матеріалом серцевини і оптичної оболонки).

Розрізняють наступні групи оптичних волокон:

- 1 – багатомодові ОВ;
- 2 – одномодові ОВ без збереження поляризації випромінювання;
- 3 – одномодові ОВ із збереженням поляризації випромінювання.

Група багатомодових волокон ділиться на дві підгрупи:

- 1 – із ступінчатим профілем показника заломлення;
- 2 – із градієнтним профілем показника заломлення.

Залежно від матеріалів серцевини і оболонки ОВ підрозділяються на наступні види:

- 1 – серцевина і оболонка кварцеві;
- 2 – серцевина кварцева, а оболонка полімерна;
- 3 – серцевина і оболонка з багатокомпонентного скла;
- 4 – серцевина і оболонка з полімерного матеріалу;
- 5 – інші.

Виготовлення кварцевих оптичних волокон

Технологічний процес виготовлення оптичних волокон на основі кварцевого скла поділяється на два етапи:

- 1 етап – Виготовлення заготовки.
- 2 етап – Витягування волокна.

На першому етапі виготовляється заготовка, яка являє собою скляний стержень довжиною приблизно 1 метр і діаметром 10...80 мм. Для цього використовуються декілька методів:

- 1) внутрішнє осадження з газової фази на внутрішній поверхні кварцевої трубки:
 - модифіковане хімічне осадження з газової фази;
 - плазмове хімічне осадження з газової фази;
- 2) зовнішнє осадження з газової фази на зовнішній поверхні стержня;
- 3) осьове осадження з газової фази на торці стержня.

На другому етапі кінець заготовки розм'якшують в печі і тягнуть з нього волокно. При витягуванні волокна не відбувається змішування окремих шарів, а відбувається, виражаючись математичною мовою, перетворення подібності: якщо діаметри серцевини і оболонки заготовки

відносилися як один до десяти, то так воно буде і у витягнутому волокні. Витягування світловодів проводиться в дуже чистих приміщеннях, таких як при виробництві мікросхем.

Після того, як волокно остигне, на нього наноситься захисна полімерна плівка. Захисна плівка призначена для захисту волокна від механічних впливів і від навколишнього середовища, перш за все від водню і води. Річ у тому, що вода прискорює ріст тріщин, а водень, дифундуючи всередину волокна, підвищує коефіцієнт затухання. Проте, найкраще можуть захистити скло тільки два покриття: металеве і вуглецеве. Зараз японські фірми починають покривати склоподібним вуглецем кожне волокно окремо.

Отримання кварцевого скла

Оптичні хвилеводи для комунікацій складаються в основному з кварцевого скла (двоокис кремнію SiO_2) із світловодною волоконною серцевиною, яка легується домішками германію і фосфору для збільшення показника заломлення, і оптичною оболонкою, яка може легуватися бором або фтором для зниження показника заломлення. Унікальна придатність SiO_2 для виготовлення надчистого, надпрозорого кварцевого скла ґрунтується не тільки на його низькому внутрішньому поглинанні, але й на тому, що кварцеве скло, з домішками або без, може бути отримано осадженням з чистої і однорідної газової суміші.

Перевага методів осадження з газової фази полягає в тому, що матеріал з рідкого стану випаровується при майже постійній температурі, а побічні домішки, які знаходяться в рідині не випаровуються, а випаровується лише необхідний матеріал. Тому матеріал стає набагато чистішим в газоподібній фазі, ніж у рідкій фазі, що дозволяє створення чистих шарів. Якщо матеріал вибраний правильно, температура випаровування може трохи змінюватись, і в цьому випадку газоутворенням можна легко керувати.

Поетапна перегонка гарантує, що кремнієві хлориди, що виділяються в процесі хлорування, одержані в надчистій формі. Вони відділяються від металевих хлоридів типу хлористого заліза. Кремнієві хлориди використовуються, наприклад, для виготовлення кремнію з високою чистотою для напівпровідників.

9.2.2. Методи виготовлення заготовок оптичного волокна

Для виготовлення заготовки оптичного волокна використовуються різні методи:

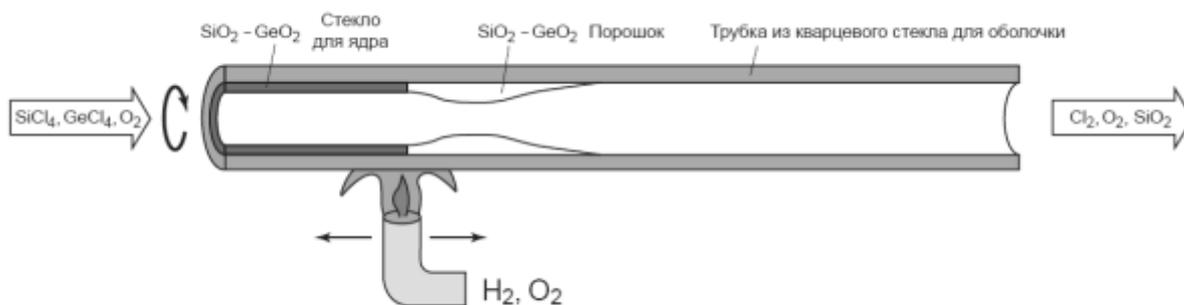
- 1) внутрішнє осадження з газової фази на внутрішній поверхні кварцевої трубки:
 - модифіковане хімічне осадження з газової фази;
 - плазмове хімічне осадження з газової фази;
- 2) зовнішнє осадження з газової фази на зовнішній поверхні стержня;
- 3) осьове осадження з газової фази на торці стержня.

Внутрішнє осадження з газової фази

Вперше про метод хімічного осадження з газової фази (Chemical vapor deposition – CVD) було повідомлено науково-дослідними лабораторіями Corning Glass Works і Bell Telephone (MCVD – modified chemical vapor deposition – модифікований метод хімічного осадження з газової фази).

У цьому методі суміш SiO_2 наноситься шарами – починаючи з шару скла для оболонки оптичного волокна і закінчуючи шаром серцевини волокна – на внутрішній стороні трубки (рис.), що

обертається, нагрітої до 1600°C зовнішнім пальником.

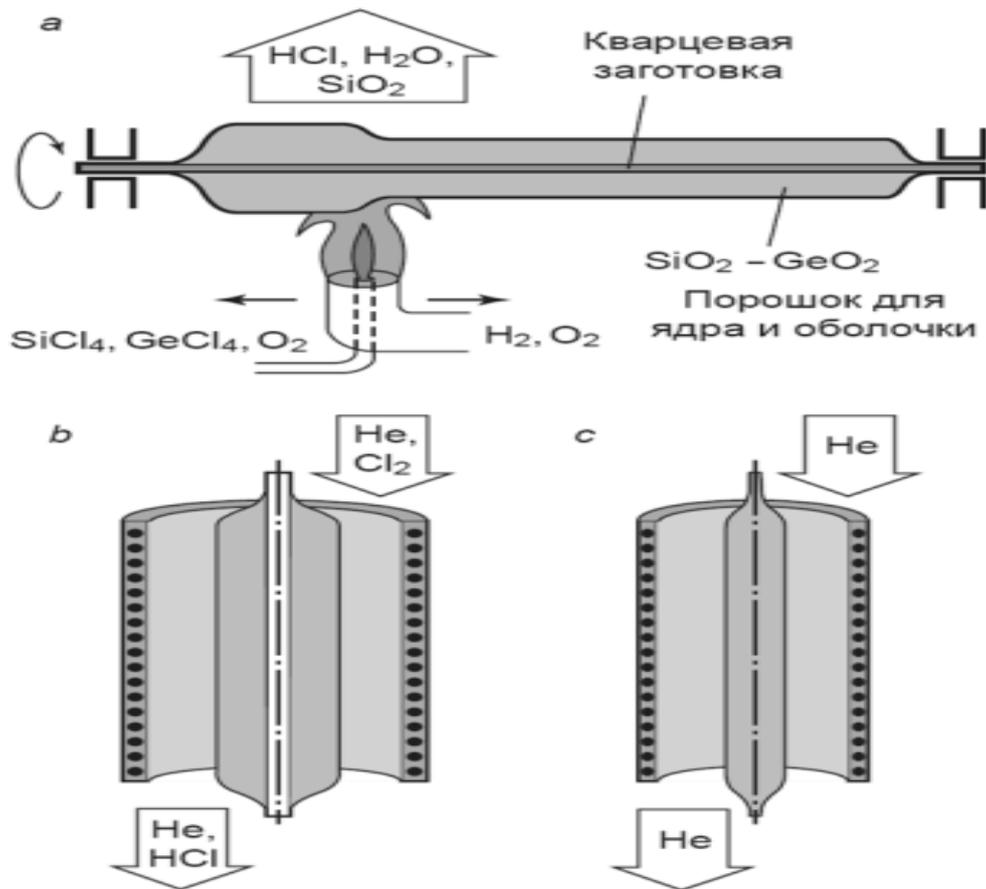


Оскільки кожен дискретний шар наноситься один на одного, то при нагріванні вони одночасно спікаються, щоб сформуватися у тверде скло. Це відбувається під дією пальника, шляхом переміщення його по трубці у напрямі викиду газу, оплавляючи шари кварцу, нанесені перед пальником.

Уявіть собі подібність токарного верстата, в якому на місце різця встановлений киснево-водневий пальник. У верстат затискається скляна трубка і через неї на першому етапі пропускається хлорид кремнію і кисень (насправді склад суміші складніший). У гарячій зоні навпроти пальника синтезується оксид кремнію. Утворюються бульбашки окислу, які дрейфують з гарячої області в холоднішу і прилипають до стінки. Цей процес називається термофорезом, він чудово описується і пояснюється кінетичною теорією.

Зовнішнє осадження з газової фази

Інший метод, яким користується фірма Corning, є метод зовнішнього осадження (на відміну від першого – внутрішнього): скло осідає на вогнетривкий стержень прямо з полум'я пальника, куди подаються хлориди вихідних речовин.



Оскільки осадження відбувається в атмосфері полум'я, в такому матеріалі залишається багато води, отриманої в результаті окислення водню. Тому, після того, як центральний стержень виймають, доводиться продувати заготовку хлором, який екстрагує воду. І лише після цього заготовка склється.

Перераховані вище три фази процесу, а саме: осадження на вогнетривкий стержень, сушіння і склування – відбуваються послідовно. Тому кожна фаза може бути оптимізована окремо, що дозволяє досягнути високої швидкості осадження матеріалу.

Крім того, швидкість осадження збільшується, оскільки поверхня підкладки збільшується з кожним наступним шаром, що є позитивним коефіцієнтом у збільшенні відносної швидкості процесу. Висока продуктивність нанесення (4,3 г/хв) відповідає продуктивності 5 км/год.

Осьове осадження з газової фази

У третьому методі, розробленому японськими фірмами, серед яких NTT, "Sumitomo" та ін., реалізована складніша конструкція. Заготовка росте із затравки, яка розташована на певній відстані над полум'ям пальника і має складну шарову структуру, як у рулета.

У середину полум'я подають суміш хлоридів германію і кремнію, потім шар буферного газу, потім тільки хлорид кремнію для чистого скла, потім знову буферний газ і, врешті-решт, на краю пальника, кисень з воднем – те, що, власне кажучи, і горить.

Речовина осідає на тільки що створену в цьому ж процесі поверхню. Проте, відстань до цієї поверхні повинна бути строго фіксованою, тому заготовка постійно відсувається від полум'я пальника.

Таким методом можна виготовляти заготовки, яких вистачає на декілька тисяч кілометрів волокна, а в принципі, процес може бути безперервний – у міру виготовлення заготовки з неї ж можна витягати волокно. На сьогодні це єдиний метод, що дозволяє реалізувати виробництво безперервного оптичного волокна.

Витягування оптичного волокна

Отримана в ході першого етапу заготовка піддається безконтактному витягуванню при температурі 2000-2100°C для того, щоб отримати волокно з геометрією і оптичними властивостями первинного зразка. Температура плавлення кварцу – приблизно 1900°C. Чим вужча високотемпературна зона створена для плавлення кварцу, тим краще. Основна вимога до волокна, яке витягується при сталій швидкості в низько конвекційній пічній атмосфері, однорідність діаметру волокна.

Крім того, необхідно вжити заходи, щоб не допустити виникнення центрів нагріву (графіт або окисел цирконію), які можуть виникнути від забруднення поверхні скла, оскільки будь-які сторонні домішки, які існують на гарячій поверхні шару утворюють мікротріщини, які приводять до порушень однорідності шару. Витягнуте волокно повинно мати достатню механічну міцність, щоб витримати навантаження при використанні.

Зовнішній діаметр волокна вимірюється безконтактним методом з допомогою пристрою, який використовує світлодіод. Вимірне значення зовнішнього діаметру волокна поступає до механізму, який контролює швидкість витягування волокна і тим самим підтримує постійний зовнішній діаметр волокна.

Температура поверхні заготовки і оптичного волокна залишається високою протягом всього процесу, тому легко можуть виникнути поверхневі тріщини та інші дефекти, оскільки пил і вологість легко можуть потрапити на поверхню. Для уникнення цього, відразу після отримання волокна на його поверхню наноситься полімерна оболонка. З цією метою інструмент для нанесення покриття розташовується біля нагрівальної печі. М'яка пластмасова смола використовується для магістрального покриття, щоб запобігти збільшенню мікрозгинів. Зовнішній діаметр магістрального покриття 0,25-0,4 мм. У деяких випадках поверх м'якої пластмаси додатково наносять шар твердішої пластмаси.

Виготовлення полімерних оптичних волокон

Перші полімерні волокна були розроблені в 1960-их рр. Однак, через великі оптичні втрати (~1000 дБ/км), на той час вони не могли конкурувати з іншими середовищами передачі, зокрема з кварцевими волокнами, які характеризувалися значно меншими оптичними втратами. На протязі 1970-их рр. було зменшено оптичні втрати у полімерних волокнах до рівня 125 дБ/км на довжині хвилі 650 нм. Кварцеві волокна на той час вже мали втрати значно нижчі за 1 дБ/км на довжинах хвиль 1300 нм та 1550 нм і були наявні на ринку у великій кількості та за низькою ціною. Цифрові системи передачі з високою швидкістю в основному використовувались в системах дальнього зв'язку. У локальних комп'ютерних мережах використовувались в основному мідні кабелі, які повністю задовольняли такі системи, в яких швидкість передачі даних не перевищувала 10 Мбіт/с. Не було ніякої потреби в оптичних середовищах для передачі даних з великими швидкостями на короткі віддалі, тому розробка полімерних волокон була пригальмована на багато років. На початку 1990-их рр. компанія Nöcht взагалі припинила виробництво всіх полімерних волокон.

Матеріали для полімерних волокон

Основним матеріалом для виготовлення серцевини полімерних волокон на сьогодні є поліметилметакрилат (ПММА). Для спеціальних застосувань, серцевина волокна може бути виготовлена з полістиролу (ПС) або полікарбонату (ПК). ПС є дуже крихким матеріалом. Однак, він має високу прозорість в порівнянні з іншими матеріалами. ПК характеризується кращою термостійкістю, що дозволяє використовувати його в умовах підвищених температур, проте, коефіцієнт затухання оптичного випромінювання в ньому значно вищий ніж у ПММА. В порівнянні з ПММА, ПК має значно кращий опір до періодичних згинів при малих радіусах згину.

Пошук матеріалів для полімерних волокон зосереджений, з одного боку – на мінімізації оптичного затухання, а з іншого боку – на матеріалах, які є стійкими до високих температур і, водночас, мають мале затухання.

Методи виготовлення ступінчастих полімерних волокон

Процес виготовлення полімерних оптичних волокон як правило складається з 4-ьох етапів:

- 1) очистка вихідних матеріалів;
- 2) полімеризація;
- 3) формування геометрії волокна;
- 4) нанесення оптичної оболонки.

Очищення вихідного матеріалу мономеру є надзвичайно важливим для отримання волокон з малими оптичними втратами. Найбільш поширеними причинами забруднень у вихідних матеріалах є:

- стабілізатори додані до матеріалу для запобігання передчасної полімеризації;
- побічні продукти виробництва мономерів;
- вода, метал і частинки пилюки.

На протязі полімеризації ланцюгоподібні макромолекули (= полімери) створюються з багатьох окремих молекул (= мономерів). Цей процес потребує добавок, таких як ініціатори та регулятори полімеризації. Через високі вимоги до чистоти полімеру, дуже важливим є вибір такої процедури, яка потребує мінімально можливої кількості цих домішок. Так само забруднення від апаратури має підтримуватись мінімальним на протязі всього процесу. Послідовність хімічної реакції показана на рис.9.7 на прикладі ПММА, де n – ступінь полімеризації, тобто число зв'язаних мономерів.

Витягування волокна із заготовки

Ця процедура подібна до тої, яка використовується при виготовленні кварцевих волокон. Спочатку виготовляється заготовка, напр., використовуючи метод видавлювання. Заготовка складається з полімерного циліндру, який концентрично покритий оболонкою. Ця заготовка розігрівається до температури, при якій можна витягувати з неї волокно. Повний процес здійснюється в однократному режимі і є відносно дорогим. Даний метод може бути використаний для витягування волокон із серцевиною з полістиролу.

Метод однократного видавлювання

У вакуумі мономер вводиться у полімеризаційний контейнер шляхом перегонки. Після цього у такий самий спосіб вводиться ініціатор та регулятор полімеризації. Полімеризація відбувається у контейнері при температурі 180°C. Після завершення полімеризації контейнер герметично закривається і полімерна маса видавлюється через вихідний отвір (форсунку) шляхом подачі азоту під тиском. Як тільки волокно виходить через форсунку, відразу наноситься оптична оболонка. Через однократність процесу, даний метод не дозволяє виготовляти довгі волокна.

Метод неперервного видавлювання

Установка дозволяє виготовляти полімерне волокно безперервно. В нагрітому об'ємі реактора суміш полімеру, ініціатора і регулятора полімеризації попередньо полімеризується на 80%. Після цього ця суміш закачується в екструдер, в якому витягується газ, а остаточний мономер відвідним каналом повертається назад в реактор для попередньої полімеризації. На виході екструдера полімер видавлюється через форсунку, яка надає волокну його геометричну форму. Другий екструдер використовується для нанесення оболонки.

Метод формування з розплаву

У цьому методі полімер спочатку розплавлюється, а потім видавлюється через філь'єр (багатоканальний мундштук). Деякі отвори у філь'єрі використовуються для геометричного формування волокон, інші – для завантаження полімерної оболонки. У такий спосіб отримується вже готове волокно з покриттям. Використовуючи філь'єр з декількома отворами, можна одночасно виготовляти декілька волокон. Цей ефективний процес дозволяє дуже високі швидкості витягування, але така система є надзвичайно дорогою.

У всіх методах описаних вище, волокно піддається розтягу після геометричного формування, при якому полімерним молекулам надається спеціальна орієнтація. Цей процес надає волокну необхідний діаметр і має вирішальний вплив на механічні властивості волокна, напр., міцність на розтягування.

Методи виготовлення градієнтних полімерних волокон

Для виготовлення полімерних волокон з градієнтним профілем спочатку як правило виготовляють заготовку з бажаним профілем і діаметром до 50 мм, з якої потім тягнуть волокно необхідного діаметру. Для формування градієнтного профілю використовуються різні процеси:

- 1) метод поверхневої гелевої полімеризації;
- 2) центрифугування;
- 3) фотохімічні реакції;
- 4) видавлювання багатьох шарів.

Метод поверхневої гелевої полімеризації

Цей метод був розроблений професором Koike з Keio University. У цьому методі спочатку виготовляється трубка з ПММА. Трубка виготовляється шляхом обертання скляного реактора зі швидкістю 3000 об/хв при температурі 70°C, який частково заповнений метилметакрилатом (ММА). Процес полімеризації має місце на швидкостях 50 об/хв і температурі 95°C, і триває

приблизно 24 години. Після цього, готова трубка заповнюється сумішшю двох різних мономерів М1 (високий показник заломлення і великі молекули) і М2 (нижчий показник заломлення і менші молекули). Спочатку внутрішня стінка ПММА трубки трохи розріджується в пічці, розігрітій до 80°C. Це призводить до утворення шару гелю і прискорює полімеризацію. Менші молекули М2 можуть легко дифундувати в цей шар гелю, таким чином концентрація М1 збільшується в напрямку до середини. Профіль показника заломлення формується у відповідності з результируючим градієнтом концентрації. Після того, як заготовка виготовлена, з неї витягують волокно при температурі 190-280°C.

Метод центрифугування

Даний метод використовує різницю в густині різних мономерів для створення профілю показника заломлення з допомогою відцентрових сил у швидкому відцентровому процесі. Виготовлення заготовки проводиться у два етапи. Як тільки трубка заповнена сумішшю мономерів, градієнтний профіль формується при кімнатній температурі. Після цього збільшується температура, щоб почалась полімеризація. Обертання продовжують на протязі всього процесу. Швидкість обертання становить 50000 об/хв. Весь процес триває приблизно 24 години. Після того, як заготовка буде готова, з неї тягнуть волокно.

Фотохімічне формування профілю

В даному методі ПММА легують ((4-N,N-диметиламінофеніл)-N'-фенілнітрон). При експонуванні УФ випромінюванням (380 нм), показник заломлення зменшується на 0,028. Експерименти проводились з плівкою товщиною декілька мікрометрів. Волокна даним методом ще не виготовлялись. Проблемою є глибина проникнення випромінювання, яка є значно меншою ніж радіус волокна. Однак, цей процес є цікавим, оскільки дозволяє виготовляти волокна безперервно і швидко.

Метод видавлювання багатьох шарів

Даний метод використовує декілька екструдерів для формування волокон з багатоступінчастим профілем показника заломлення. Такі волокна виготовляють Науково-Дослідний Центр (Твер, Росія) та компанія Mitsubishi Rayon.

Виготовлення оптичних волокон з багатокомпонентного скла

Для виготовлення оптичних волокон з багатокомпонентного скла використовується метод подвійного тигля. Цей метод є найдешевший і простий в реалізації, але при цьому отримуються волокна нижчої якості. З допомогою даного методу виготовляють як правило багатомодові волокна із ступінчастим профілем показника заломлення.

Спочатку виготовляються скляні стержні, одні з показником заломлення серцевини, інші з показником заломлення оболонки. Ці стержні подаються у два концентричні тиглі, розміщені в печі. Скло серцевини подається у внутрішній тигель, а скло оболонки у зовнішній тигель. По мірі надходження стержнів в тиглі піч їх нагріває і розріджує, перетворюючи на розплавлене скло. Внизу подвійного тигля є невеликий отвір, через який протягується волокно.

Виготовлення кварцевих волокон з полімерною оболонкою

Даний метод подібний до методу подвійного тигля. Однак, тут використовується тільки один тигель, з допомогою якого витягують кварцеву серцевину оптичного волокна. Як тільки серцевина

готова, вона відразу пропускається через екструдер, в якому покривається полімерною оболонкою.
Швидкість виготовлення волокна даним методом становить приблизно 100 м/хв.