الفصل الخامس

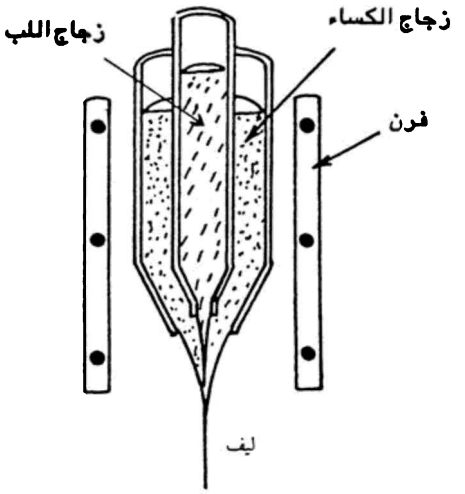
تصنيع الألياف البصرية
Manufacturing of Optical Fibers

تصنع الألياف البصرية بطرق عديدة مما يعطي فرصة لاختيار الأنسب منها للتحكم بخواصها البصرية والميكانيكية والهندسية كما يتيح للمصنع فرصة تصنيعها بسرعة وبكميات اقتصادية كبيرة. أياً كانت طريقة التصنيع المتبعة لابد في البداية من الحصول على تشكيلة أولية preform وهي عبارة عن قضيب زجاجي يحتوي على اللب والكساء مقطعة الجانبي مماثل لليف البصري غير أن حجمه كبير مقارنة بالليف المزمع تصنيعه . يسخن طرف من القضيب لدرجة حرارة عالية ويبدأ سحب الليف ويغطي بطبقة الحماية الأولية أثناء السحب وحيث أن معظم الألياف المصنعة حالياً من الزجاج فإن هذا الفصل سيكرس معظمه للتحدث عن تصنيع الألياف الزجاجية .

٥-١ انتاج التشكيلة الأولية من الزجاج الذائب Preform Production from Melted Glass

أول الطرق التي استخدمت لانتاج الألياف البصرية كانت تستخدم تشكيلة أولية تتكون من قضيب مصنع من زجاج السليكا عالي النقاوة لتكون لب الليف توضع داخل أنبوب مصنع من زجاج السليكا عالي النقاوة ويعامل انكسار أقل من اللب ليكون الكساء ويترك فراغ قليل جداً بين القضيب والأنبوبة الزجاجيين غير أن عيب هذه الطريقة يكمن في الجسيمات الصغيرة والتموجات بين سطح الأنبوب والقضيب التي تحدث توهيناً كبيراً مما دعى إلى البحث عن طرق أخرى لتجنب هذه المشكلة والحصول على ألياف بصرية بأقل فقد ممكن ، ومن هذه الطرق استخدام البوتقة المزدوجة حيث يتم التعامل مع مادة اللب ومادة الكساء وهما في الحالة المذابة بدلاً من الحالة الصلبة كما هو في الطريقة السابقة حيث يتم استخدام بوتقتين إحداهما تحمل المكونات الأساسية

للب والأخرى تحمل المكونات الأساسية للكساء في حالتهما المذابة كما هو في الشكل (٥-١).



الشكل (٥-١) انتاج الألياف بطريقة البوتقة المزدوجة

تتكون مادة اللب من الزجاج المركب عالي النقاوة مثل lead alkali silicate glass و sodium borosilicate glass وعند سحب الليف تتم تغطية اللب بالكساء وبالإمكان تصنيع ليف بمعامل انكسار متدرج بالانتشار diffusion أو التبادل الأيوني ion exchange بين اللب والكساء وتسمى طريقة (سلفوك selfoc).

يتراوح توهين الليف المصنع بهذه الطريقة بين 5 dB/km و 20 dB/km عند $\lambda = .85\mu m$ ولايقل قطر الليف عن 200 µm.

هناك طريقة ثالثة للحصول على التشكيلة الأولية لانتاج الألياف البصرية تتمثل في احضار قضيب من السليكا عالي النقاوة ليكون المادة الأساسية للب وعند تسخينه

وسحب الليف يغطي الليف المسحوب بطبقة من البلاستيك الشفاف ليكون الكساء . وله معامل انكسار أقل من اللب وبذلك نحصل على ليف لبه من الزجاج النقي وكساءه من البلاستيك الشفاف. يتراوح توهين هذا النوع من الليف بين 5 dB/km و 50 dB/km عند $\lambda = .85\ \mu m$ وقد تصنع ألياف بصرية من البلاستيك فقط حيث يصنع اللب والكساء من مواد بلاستيكية شفافة معامل انكسار اللب فيها أكبر من معامل انكسار الكساء غير أن توهين هذه الألياف عالٍ جداً لكثير من استخدامات الاتصالات وقد يتراوح بين 100 dB/km و 400 dB/km عند $\lambda = 2.6\ \mu m$.

لاحظنا في الطرق السابقة أن التوهين مرتفع مما يحد من استخدام الألياف المصنعة بتلك الطرق في أنظمة الاتصالات وفي البنود القادمة سنشرح الطرق المختلفة لتصنيع ألياف بصرية بتوهين قليل جداً .

٥-٢ إنتاج التشكيلة بتوسيب بخار الزجاج Preform Production by Glass Deposition out of the Vapor Phase

تستخدم طرق عديدة للحصول على تشكيلات أولية تصنع منها ألياف بصرية ذات توهين قليل تعتمد في مجملها على تراكم الزجاج خارجياً أو داخلياً . ففي طريقة تراكم البخار الخارجي يستخدم قضيب دوار كهدف لوضع الزجاج عليه أما في تراكم البخار المحوري فيتم وضع الزجاج على نهاية قضيب من زجاج السليكا . أو يتراكم البخار على السطح الداخلي لأنبوب من زجاج السليكا .

٥-٢-١ التوسيب بالتراكم الخارجي Outside Vapor Deposition

يتم انتاج التشكيلة الأولية بهذه الطريقة بالخطوتين التاليتين :

(١) يستخدم قضيب اسطواني من زجاج السليكا أو الألومينا Al_2O_3 أو الجرافين graphine إذ يوضع القضيب في مكينة خراطة تقوم بلفه وتحريكه طولياً بصفة مستمرة كما هو في الشكل (٥-٢) ، تسخن منطقة ضيقة من السطح الخارجي باستخدام موقد

يستخدم غاز الميثان أو البروبين أو خليط من غاز الأوكسجين والهيدروجين .

أثناء ذلك يمرر الأوكسجين النقي بمحاليل تحتوي المكونات الأساسية لتصنيع التشكيلة وغالباً ماتكون من كلوريد السليكا $SiCl_4$ أو كلوريد الجرمانيوم $Ge\ Cl_4$ ثم يمرر الأوكسجين ، مع الأبخره الناتجة من التفاعل المائي للمكونات الأساسية ، خلال الموقد لتترسب على سطح القضيب الدوار لتكون الطبقة الأولى لذلك التشكيل. ومعادلات التفاعل الكيميائي للمواد المستخدمة هي :

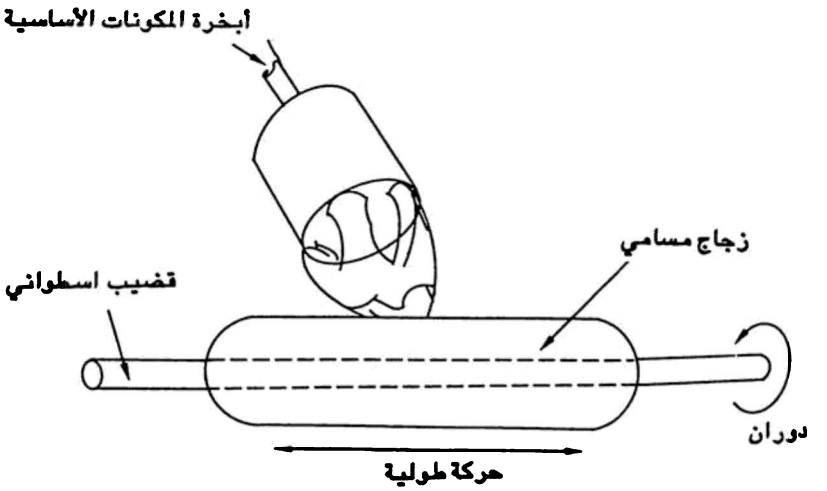
$$Si\ Cl_4 + 2\ H_2\ O \rightarrow SiO_2 + 4HCl$$

$$Ge\ Cl_4 + 2\ H_2\ O \rightarrow GeO_2 + 4HCl$$

تكون هذه المواد طبقات رسوبية على سطح القضيب الدوار وعند تحريكه طولياً للأمام والخلف تتكون تشكيلة أولية من الزجاج المسامي porous glass preform على شكل طبقات تطعم كل طبقة من السليكا بمكونات وتركيز يختلف عن الطبقة التي سبقتها وبذلك نحصل على أنبوبة يقل معامل الانكسار فيها كلما ازدادت سماكتها حتى تخلو الطبقات الأخيرة من المواد المضافة وتصبح الطبقات الأخيرة من مادة السليكا SiO_2 الكساء إذا كان الهدف هو الحصول على ليف بمعامل انكسار متدرج . أما إذا كان الليف بمعامل انكسار عتبي فتطعم مادة السيلكا بالمواد المضافة مثل GeO_2 طبقة بعد طبقة وبعد الحصول على السماكة المناسبة للب يوقف امداد مواد الاضافة ويستمر تكوين الطبقات الأخيرة من مادة السليكا لتكوين الكساء.

بعد تكوين الطبقات الكافية للب والكساء توقف العملية وتفصل الأنبوبة الاسطوانية المكونة من الجسيمات المترسبة soot عن القضيب الاسطواني.

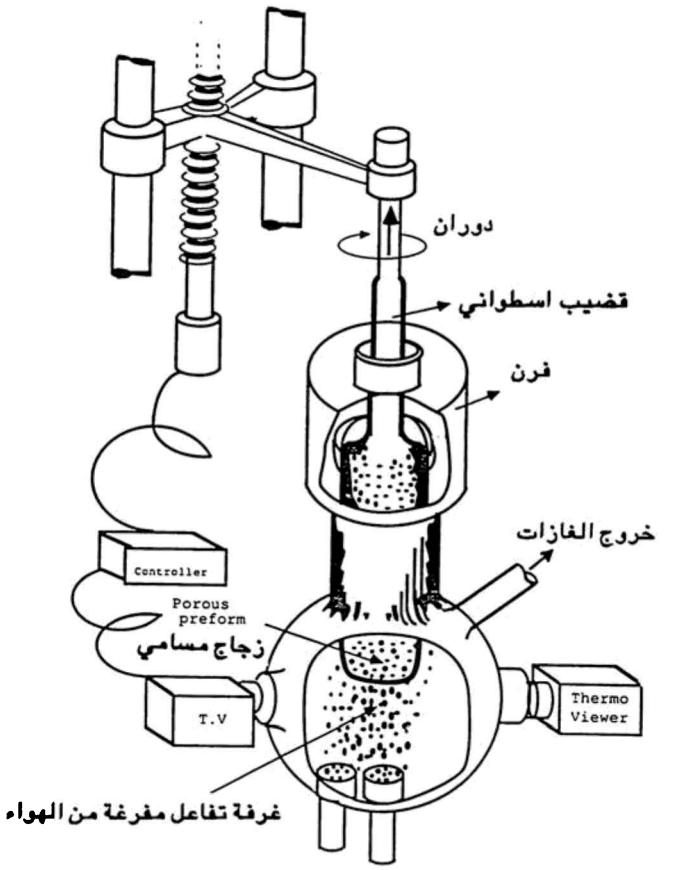
(٢) تسخن الأنبوبة على أجزاء segments طولية حتى درجة الذوبان وفي درجة حرارة تتراوح بين ١٤٠٠ م و ١٦٠٠ م تنهار أو تنكمش الأنبوبة ويتحول إلى قضيب زجاجي شفاف وصلب ولابد من تسخين الأنبوبة في جو مليء بغاز الكلور حتى يمنع تسرب أبخرة الماء والا سنحصل على ألياف بصرية ذات توهين مرتفع .



الشكل (٥-٢) تصنيع السليكا المطعمة بالتراكم الخارجي (OVD)

٥-٢-٢ الترسيب بالتراكم المحوري Vapor phase Axial Deposition

تستخدم هذه الطريقة التراكم المحوري لمادة السليكا والمواد المضافة على الجزء الأسفل من قضيب من السليكا. كما هو في الشكل (٥-٣) يتم دورانه وسحبه إلى أعلى بصفة مستمرة ويستخدم لهذا الغرض موقدين أو أكثر للتحكم في معامل انكسار اللب والكساء حيث تعتمد عناصر التحكم بمعامل الانكسار على درجة الحرارة وتركيب المواقد وبعدها عن القضيب وتوزيع كمية المواد المضافة. والمواد المضافة هي نفسها المستخدمة في تصنيع السليكا المطعمة بالتراكم الخارجي ، وتمر التشكيلة الأولية المسامية بفرن حلقي للحصول على تشكيلة أولية شفافة .تسخن التشكيلة الأولية بالفرن لتنكمش داخل جو مليء بغاز الكلورين حتى يمنع تسرب الرطوبة ، وكما أشرنا في طريقة التصنيع السابقة يمكن الحصول على ليف بصري بمعامل انكسار متدرج أو عتبي.



الشكل (٥-٣) طريقة الترسيب المحوري للحصول على تشكيلة أولية

٥-٢-٣ الترسيب بالتراكم الكيميائي المعدل Modified Chemical Vapor Deposition

تعتبر هذه الطريقة تعديلاً لطريقة التراكم الخارجي حيث تضاف المكونات من داخل أنبوب السليكا بدلاً من خارجه حيث تبدأ الخطوة الأولى بإحضار أنبوب سليكا ركب في مكينه خراطة تتولى تحريكه وتدويره طوليا كما في الشكل (٥-٤) . يتولى موقد يعمل بخليط من غازات الأوكسجين والهيدروجين تسخين الأنبوب وتمرر داخل الأنبوب في هذه الأثناء أبخرة كلوريد السليكا وهي المادة الأساسية لليف والمواد المضافة الأخرى مثل كلوريد الجرمانيوم $GeCl_4$ المحمولة بغاز الأوكسجين النقي المار

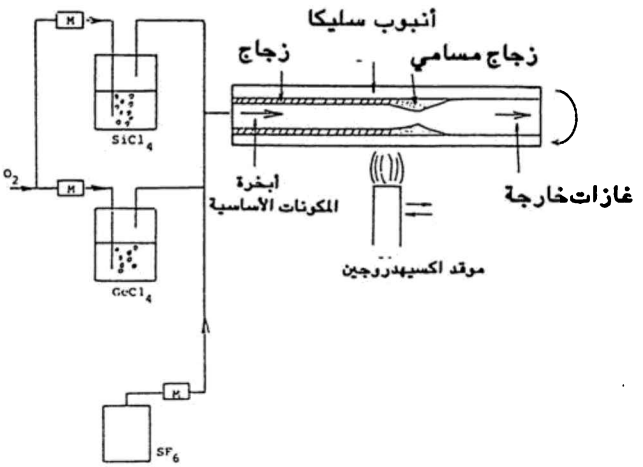
بمحاليل تحتوي على هذه المركبات الغازية ، يتحرك الأنبوب أفقيا وبالتوازي مع الموقد فيحدث تأكسد للمكونات الأساسية والمضافة داخل الأنبوب نظراً لوجود الأوكسجين كما هو في المعادلات التالية:

$$Si\ Cl_4 + O_2 \rightarrow SiO_2 + 2Cl_2$$

$$Ge\ Cl_4 + O_2 \rightarrow GeO_2 + 2Cl_2$$

يتراوح سمك الطبقات المترسبة من أوكسيد السليكا وأوكسيد الجرمانيوم بين 20 µm و 40 µm . يتم التحكم بمعامل الانكسار من خلال المواد المضافة وفي هذه الطريقة يزداد معامل الانكسار كلما ابتعدنا عن الجدار الداخلي للأنبوب. يشكل الأنبوب في هذه الحالة الكساء لليف المزمع صنعه .في الخطوة الثانية بعد تكوين الطبقات الكافية للتشكيلة الأولية يتم تسخين الأنبوب على أجزاء طولية فيتحول الأنبوب إلى قضيب زجاجي شفاف .

إذا كانت الغازات المستخدمة في هذه الطريقة خالية من الهيدروجين فإن الأنبوب لايحتاج إلى تجفيف كما في الحالات السابقة ولأن الغازات المستخدمة في الموقد تقع خارج الأنبوب فإنها لاتؤثر على اللب وكذلك المؤثرات الخارجية الأخرى .

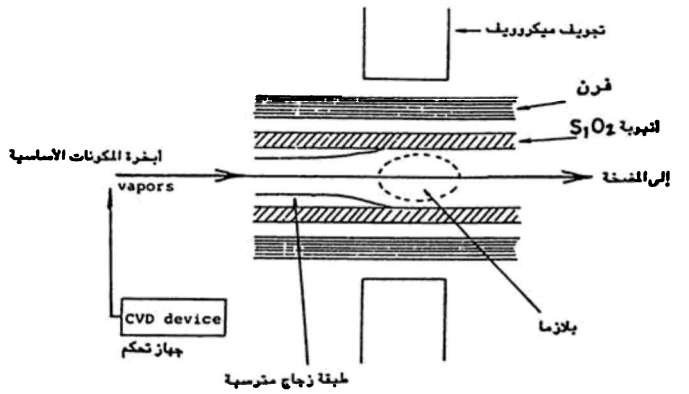


الشكل (٥-٤) طريقة تكوين التشكيلة الأولية بالتراكم الكيميائي المعدل

٥-٢-٤ الترسيب بالتراكم الكيميائي بالبلازما Plasma Chemical Vapor Deposition

يتبع في هذه الطريقة نفس الخطوات المتبعة في طريقة انتاج التشكيلة الأولية بالتراكم الكيميائي المعدل وتختلف عنها في طريقة التفاعل . ففي هذه الطريقة (الشكل ٥-٥) يتم تعرض الغازات لأشعة ميكروويف يتراوح ترددها بين 2GHz و4GHz فتتأين هذه الغازات إذا كان أنبوب السليكا تحت ضغط منخفض (10 torr) وعندما تتحد هذه الأيونات فإنها تطلق طاقة حرارية عالية تستخدم لإذابة المكونات داخل الأنبوب حيث تتفاعل الغازات مثل $Si\,Cl_4$ و$Ge\,Cl_4$ في جو مليء بالأوكسجين لتكوين طبقات من ثاني أوكسيد السليكا والمواد المضافة .

بما أن شعلة البلازما تتحرك بسرعة للأعلى وللأسفل داخل الأنبوب فبالإمكان تصنيع أكثر من ألف طبقة رقيقة مما يتيح الفرصة للحصول على تحكم جيد في تدرج معامل الانكسار .

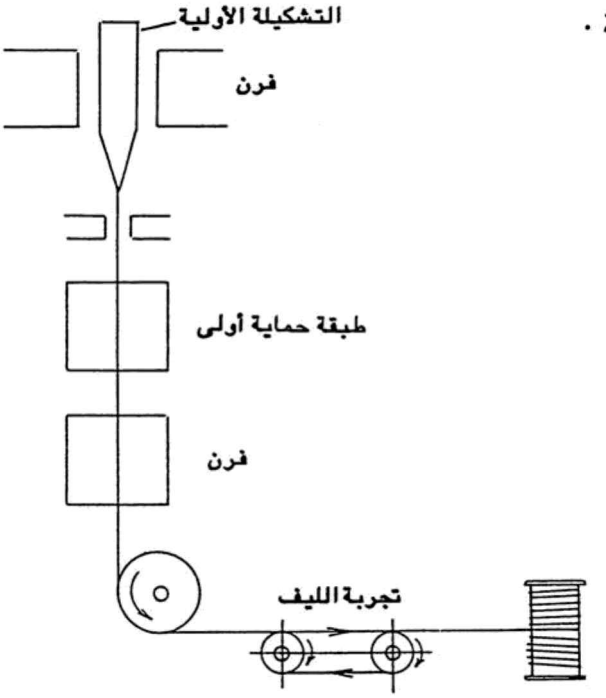


الشكل(٥-٥) تكوين التشكيلة الأولية بالتراكم الكيميائي بإستخدام البلازما

٥-٣ سحب الليف البصري Fiber Drawing

بعد تصنيع التشكيلة الأولية بإحدى الطرق الآنف ذكرها تركب على برج كما في الشكل (٥-٦) ، يوضع الحامل بوضع رأسي يتم التحكم فيه مع ميكانيكا تغذية .

يسخن الجزء الأسفل من التشكيلة الأولية حتى ٢٠٠٠ م حتى تبدأ السليكا بالذوبان حينها يبدأ سحب الليف ، وللحصول على قطر ثابت لليف لابد من سحبه بسرعة ثابتة (حوالي ٢٠٠ متر لكل ثانية) وتحكم دقيق في تغذية التشكيلة الأولية حتى تبقى تحت تأثير الحرارة العالية وتستمر السليكا بالذوبان ، ولابد من الإشارة إلى أن السليكا عند ذوبانها تصبح مطاطية يمكن سحبها وعلى الرغم من أن النسبة بين قطر التشكيلة الأولية وقطر الليف يبلغ ١ : ٣٠٠ فإن المنظر الجانبي لمعامل الانكسار وتناسب اللب والكساء يحافظ عليه طوال فترة السحب ونحصل على ليف بصري متجانس . تتم مراقبة سماكة الليف طول فترة السحب وبعد ذلك يغطي الليف بطبقة الحماية الأولى التي تحسن من قوة الليف وتحميه من الثني الموضعي microbending وتسهل التعامل معه بعد ذلك يمر الليف على مجموعة من البكرات ويتعرض لقوى شد لاختبار تحمله قبل أن يطوى على براميل اسطوانية .



شكل (٥-٦) آلة سحب وتغطية الألياف البصرية

٤-٥ الخلاصة Summary

أدى التعامل مع الألياف البصرية إلى معرفة خصائص هذه الألياف والتعرف على أسباب التوهين والتشتيت المختلفة مما مكن من إيجاد طرق مختلفة يتم بواسطتها التخلص من الشوائب والحصول على ألياف ذات نقاوة عالية وبمواصفات دقيقة جداً تلبي إحتياجات نظم الألياف البصرية . تطورت طرق التصنيع وأصبح بالإمكان تصنيع التشكيلة الأولية بالترسيب وعلى هيئة طبقات يبلغ سمكها بضع مايكرونات وبمعامل إنكسار حسب الطلب باستخدام محاليل ذات نقاوة عالية وفي أجواء محكمة.

الفصل الخامس

أسئلة

١ - ماهي أول الطرق التي استخدمت لتصنيع الألياف البصرية وماهي عيوبها ؟

٢ - أذكر خمس طرق استخدمت لتصنيع الألياف البصرية ؟

٣ - ماهي المواد التي تصنع منها الألياف ؟

٤ - ماهو الشرط الأساسي للحصول على ليف صالح للاتصالات ؟

٥ - ماهي ميزات إنتاج الليف بالنظام الكيميائي المعدل . قارن بينها وبين التراكم الكيميائي بالبلازما ؟

٦ - لماذا لاتصنع الألياف من مادة السليكا الخام مباشرة ؟

٧ - أذكر تركيب المواد المستخدمة للحصول على زجاج عالي النقاوة؟

٨ - لماذا يجب أن يكون معامل إنكسار اللب أكبر من معامل إنكسار الكساء ؟

٩ - هل هناك علاقة بين سرعة سحب الليف وسماكته ؟

١٠- عند أي الأطوال الموجية يحصل أعلى امتصاص لأيونات OH^- ؟