

الفصل الثالث

مقدمة عن تركيب الألياف

An Introduction to Fibre Structure

يتناول الفصل الثالث الموضوعات الآتية : طرق فحص تركيب الألياف ، الخصائص الضوئية المتباينة Optical anisotropy للألياف الطبيعية والتركيبية والألياف المرتبة جزيئاتها ترتيبا منتظما تلك التي تتميز بقيمة عالية للانكسار المزدوج highly oriented fibres ، والتركيب الطبقي للألياف التركيبية والألياف البصرية .

١/٣- طرق فحص تركيب الألياف :

Methods of investigating the structure of fibres

فيما يلي قائمة بالطرق المختلفة المستخدمة لهذا الغرض :

- أ- الميكروسكوب الضوئي .
- ب- الميكروسكوب الإلكتروني الماسح .
- ج- الميكروسكوب الإلكتروني النافذ .
- د- حيود الأشعة السينية .
- هـ- أطياف الأشعة تحت الحمراء .
- و- التداخل الضوئي الثنائي .
- ز- التداخل الضوئي المتعدد عند النفاذ وعند الانعكاس .

ويمكن للقارئ عند استخدام الميكروسكوب الضوئي والميكروسكوب الإلكتروني أن يرجع إلى المراجع في هذه المجالات مثل: Stoves (1957), Françon (1961), Meredith and Hearle (1959), and Wells (1974)

ويتميز الميكروسكوب الإلكتروني الماسح بقوة تحليل فراغية spatial resolution كبيرة وعمق مجاله depth of field ، ولذلك فإنه يوفر معلومات تفصيلية عن المعالم التركيبية

للألياف . ويمكن الحصول على معلومات عن بروفيل معامل الانكسار بالنسبة للألياف البصرية بتعريض إحدى نهايتي الشعيرة للتآكل etching باعتبار أن معدله يعتمد على مكونات الشعيرة في المواضع المختلفة .

وعندما يزود الميكروسكوب الإلكتروني الماسح بمطياف الأشعة السينية القادر على فصل مناسب الطاقة ، يمكن الحصول على معلومات كمية عن التأثيرات الناتجة من التغيرات في تركيب الشعيرة من المرجعين الآتين :- (Wells (1974) & Kita et al, (1971) .

وبمقارنة خصائص شدة الأشعة السينية الناتجة من فحص شعيرة لعينة عيارية ، يمكن تعيين مكونات الشعيرة من العناصر التي لايزيد رقمها الذري عن الرقم الذري للبريليوم (Burrus et al., 1973) .

وسوف يتناول الفصلان الخامس والتاسع نظرية النظم البصرية للتداخل الضوئي الثنائي وتكوينها وأنواع ميكروسكوبات التداخل وتطبيقاتها لتعيين الخواص الضوئية للألياف المستخدمة في المنسوجات وكذلك للألياف البصرية المستخدمة في التراسل الضوئي .

كما سيتناول الفصل السادس نظرية هدب التداخل الضوئي المتعدد عند النفاذ وعند الانعكاس وتكوينها وخصائصها وتطبيقاتها لتعيين الخواص الضوئية للألياف الطبيعية والتركيبية والبصرية .

٢/٣- تباين الخواص الضوئية في الألياف :

Optical anisotropy in fibres

١/٢/٣- الألياف الطبيعية والتركيبية : Natural and synthetic fibres

عندما يمر شعاع ضوئي أحادي طول الموجة ومستقطبا استوائيا خلال نظام من الجزيئات المرتبة ، فإنه يعاني انكسارا ، نتيجة تفاعل الضوء مع المادة . ويختلف هذا التفاعل باختلاف المتجه الكهربى electric vector للشعاع الضوئي الساقط والمستقطب استوائيا . ولهذا المتجه الكهربى اتجاهان هما :

١- في اتجاه محور الشعيرة .

٢- في الاتجاه العمودى عليه .

وتعرف المادة في هذه الحالة بأنها متباينة الخواص الضوئية optically anisotropic ويكون لها انكسار مزدوج - أى قيمتان لمعامل الانكسار ، أحدهما للضوء المستقطب في اتجاه مواز لمحور الشعيرة والآخر في الاتجاه العمودي عليه - ويقاس الانكسار المزدوج birefringence بالفرق بين قيمتي معاملي الانكسار المذكورين . وتتركب الألياف الطبيعية والتركيبية من جزيئات انتظمت في سلاسل طويلة ، تقع على امتداد محور الشعيرة ، وتكون السلاسل في بعض الألياف موازية تماما في أغلبها للمحور ، وتفقد هذه الصفة في ألياف أخرى .

وتختلف الخصائص الضوئية للألياف باختلاف اتجاه انتشار الأشعة بالنسبة لمحور الشعيرة ، ويصل الاختلاف في هذه القيم إلى الحد الأقصى عند استخدام ضوء مستقطب في اتجاه مواز للمحور وفي الاتجاه العمودي عليه ، وتوجد علاقة مباشرة بين الخصائص الضوئية للألياف والخصائص الضوئية للجزيئات المكونة لهذه الألياف ، إذ أن التفاعلات الداخلية بين الجزيئات المتجاورة المكونة لهذه الألياف ضئيلة للغاية ويكون معامل انكسار مادة الشعيرة للضوء المستقطب في أى اتجاه مساويا لمجموع خصائص الجزيئات المكونة لهذه الألياف في نفس الاتجاه (Bunn, 1949) ولدراسة الخواص الضوئية للألياف يستخدم ضوء مستقطب في اتجاه مواز لمحور الشعيرة وكذلك في الاتجاه العمودي عليه ، وتوجد عدة طرق لتعيين معامل انكسار الألياف من بينها طريقة الحد الفاصل لبيك (Becke line) وطرق التداخل الضوئي .

وتعطى طريقة الحد الفاصل لبيك معامل انكسار القشرة الخارجية للشعيرة التي قد تختلف في تركيبها عن الأجزاء الداخلية للشعيرة (Hartshorne and Stuart, 1970) ، وفي طريقة بيك تغمس الشعيرة في سائل معروف معامل انكسار مادته يوضع على شريحة زجاجية ، ويظهر خط مضى عند الحد الفاصل للشعيرة والسائل . وبملاحظة هذه الظاهرة بميكروسكوب ضوئي نجد أن هذا الخط المضى يتحرك في اتجاه الوسط نو معامل الانكسار الأعلى وذلك عند رفع العدسة الشينية للميكروسكوب قليلا ، أى بزيادة البعد بين الشعيرة والعدسة الشينية ويمكن دراسة أنواع الألياف المختلفة والتي لها معاملات انكسار متباينة باستخدام مجموعة سوائل لها معاملات انكسار عيارية . ويختفى الخط المضى عندما

يتساوى معاملا انكسار السائل والشعيرة ، ويسمى هذا السائل بسائل المضاهاة matching liquid ويعين معامل انكسار الشعيرة للضوء المستقطب أحادى طول الموجة المستخدم . والانكسار المزدوج للألياف (birefringence Δn) يساوى الفرق بين معاملي الانكسار n^{\parallel} في اتجاه محور الشعيرة ، n^{\perp} في الاتجاه العمودى عليه :

$$\Delta n = n^{\parallel} - n^{\perp}$$

ويتطبيق طرق التداخل الضوئى الثانى والمتعدد - التى سنتناولها فى الفصلين الخامس والسادس - يمكن تعيين معاملات انكسار لب الشعيرة core وقشرتها cladding ، وكذلك معاملات الانكسار المزدوج لها Δn_c ، Δn_s لب الشعيرة وقشرتها على الترتيب .

وقدم "Kuhn and Grün" ١٩٤٢ أول نظرية تربط بين التركيب الجزيئى للبوليمرات أحادية المحور البصرى uniaxially oriented polymers وخصائها الضوئية الناتجة من تباين خصائصها التركيبية . وعند سحب الألياف التركيبية من مصهور بعض البوليمرات عن طريق الانبثاق من ثقب دقيقة يتم تكوين هذه الألياف وتكون فى أغلبها متماثلة isotropic الخواص الفيزيائية ، ونعنى بذلك ثبوت خصائصها وعدم تغيرها مع الاتجاه داخل الشعيرة ، ثم يتم سحب هذه الألياف ميكانيكيا للحصول على ألياف قوية تصلح للاستخدام فى الأغراض الصناعية ، وتكتسب هذه الألياف المسحوبة خصائص ضوئية وميكانيكية غير متماثلة (anisotropy) ، وتعتمد درجة عدم التماثل على مقدار الشد المستخدم فى السحب . وتعطى قيم معاملات الانكسار المتوسطة n_a^{\parallel} ، n_a^{\perp} والانكسار المزدوج المتوسط Δn_a للألياف معلومات هامة ومميزة يتم على أساسها توصيف هذه الألياف .

معاملات الانكسار واستقطابية الروابط الكيميائية

Refractive indices and bond polarisability

إن لتعيين الخواص الضوئية المتباينة للألياف أهمية كبيرة ، حيث تقدم هذه الخواص معلومات عن درجة انتظام الجزيئات بالنسبة لمحور الشعيرة ، ويؤدى ذلك إلى التعرف على تأثير المعاملات الكيميائية والميكانيكية على الألياف وتقييمها . ولهذه المعلومات ارتباط كبير فى ابتكار طرق حديثة لضبط الجودة فى كثير من الصناعات . ولقد قدم "Denbigh"

١٩٤٠ طريقة لتقييم الخواص المتباينة للجزيئات molecular anisotropy تعتمد على مفهوم استقطابية الروابط الكيميائية وعلى حساب القيمة الاستقطابية لكل رابطة في جميع أنواع الروابط الكيميائية الموجودة في تركيب معين ، وفي معالجته لهذا الموضوع اعتبر "Denbigh" أن كل رابطة كيميائية لها استقطابيتها ، وأن استقطابية الجزيئات هي حصيلة تجميع إسهام جميع هذه الروابط . وتسمح هذه الطريقة بحساب معامل الانكسار لمركب ما . ولايجمع متوسط استقطابية كل رابطة عندما تكون لها اتجاهات مختلفة كما هو الحال في البلورات متباينة الخواص anisotropic ، إذ أنه من الضروري في هذه الحالة إدخال الاختلاف في الاتجاه في الاعتبار باستخدام مجسم على شكل قطع ناقص يدور حول أحد محوريه الأساسيين ellipsoid polarisability .

وتعطى المعادلة الآتية - Bunn, 1961 - الاستقطابية α في اتجاه معين لـ polarisability ellipsoid لجزئ متعدد الذرات :

$$\alpha = \sum \alpha_L \cos^2 \theta + \sum \alpha_T \sin^2 \theta$$

وتجمع لكل الروابط . حيث θ هي الزاوية بين الرابطة والاتجاه المعين ، α_T ، α_L هما الاستقطابية الطولية والعرضية على الترتيب .

وتتطبق هذه المعادلة على حالة بلورة حيث يمكن حساب الاستقطابية في اتجاه أساسي . ويحسب معامل الانكسار في هذا الاتجاه من الاستقطابية باستخدام معادلة Lorentz : Lorenz

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \frac{M}{d} = \frac{4}{3} \pi N \alpha_K$$

حيث n معامل الانكسار المناسب n^{\parallel} أو n^{\perp} أو n ، M الوزن الجزيئي لكل وحدة طول ، d كثافة المادة ، N عدد أفوجادرو ، α_K معامل الاستقطابية لوحدة كاملة متكررة في سلسلة البوليمر .

ولقد حسب "Hamza and Sikorski" (١٩٧٨) معاملات الانكسار والانكسار المزوج لألياف الـ Poly (p-phenylene terephthalamide) (PPT) باستخدام النموذج الجزيئي لهذا البوليمر الذي قدمه "Northolt" (١٩٧٤) وقيم استقطابية الروابط الكيميائية التي قدمها "Denbigh" (١٩٤٠) و "Bunn and Daubeny" وذلك بالتعويض في صيغة Lorentz-Lorenz .

٢/٢/٣- الألياف التي انتظمت أغلب جزئياتها في سلاسل موازية لمحور الشعيرة : Highly oriented fibres

تتبع ألياف الـ PPT المذكورة في الفقرة السابقة مجموعة الألياف المرتب أغلب جزئياتها ترتيباً منتظماً ، وبالتالي تتميز بقيمة عالية للانكسار المزدوج . ويمكن للشعيرة التي لها معامل إجهاد tensile modulus أعلى من 40 GN m^{-2} أن تصنف على أنها ألياف ذات ترتيب عال للجزئيات . ويتضح طبقاً لهذا التحديد أن ألياف النسيج التقليدية والمتضمنة ألياف النايلون ذات قوة الشد العالية high-tenacity ، وألياف البولى استر لاتدخل ضمن هذه المجموعة من الألياف .

وتعطي الدراسات التي قدمها "Keller" (١٩٦٨) على بلورة البوليمر والتي توضح قابلية البوليمر لتكوين بلورات ذات سلاسل مطوية folded - chain تعطي مفهوماً واضحاً للعلاقة بين التركيب الدقيق للبلورات وخواصها الفيزيائية . ومن أمثلة الألياف العضوية ذات قوة التحمل العالية الـ high-performance organic fibres نجدتها في ألياف الـ PPT .

ونذكر هنا الكفلار والتاورون وهى أسماء تجارية لألياف الـ PPT . ولألياف الكفلار ٤٩ خواص فيزيائية متميزة، فمثلاً لها قوة شد عالية ومنحنى الإجهاد - الانفعال لهذه الألياف يمثل خط مستقيم ويوضح سلوكاً مرناً (elastic) عند تمديد extension صغير جداً . وحيث إن ألياف الكفلار ٤٩ لها قوة شد نسبية - نسبة قوة الشد إلى وزنها النوعى - متميزة ، فإنها تستخدم كدعامات reinforcement للمواد المتراكبة composite materials .

واقدم استخدم " Carter and Schenk " (١٩٧٥) حيود الأشعة السينية والقياسات الضوئية - معامل الانكسار المزدوج - لربط الخواص الفيزيائية لهذا النوع من الألياف مع تركيبها ، وتوجد علاقة وثيقة بين معامل الإجهاد وترتيب الجزئيات حول المحور فى هذه الألياف . واستخدمت حيود الأشعة السينية عند قيم الزوايا الكبيرة (High-angle) لدراسة الترتيب المنتظم للنظام الشبكي lattice order .

وعين "Northolt" (١٩٧٤) أبعاد وحدة الخلية لألياف الـ PPT على أساس أنها أحادية الميل monoclinic وفيها :

$$. a = 0.719 \text{ nm}, b = 0.518 \text{ nm}, c = 1.29 \text{ nm and } \gamma = 90^\circ$$

وقدم "Dobb and McIntyre" (١٩٨٤) دراسة تفصيلية عن تركيب ألياف الـ PTT وخصائصها الفيزيائية .

وتقدم قيم معاملات الانكسار n^{\parallel} و n^{\perp} طريقة مناسبة لمعرفة ترتيب الجزيئات في اتجاه محور الشعيرة وفي الاتجاه العمودى عليه ، بينما تقدم قيم معاملات الانكسار المزوج طريقة لتقييم درجة انتظام وتقارب وتباعد الجزيئات في كل منطقة من مناطق الألياف متباينة الخواص الضوئية . وغالبا ما تضاف هذه القياسات الضوئية إلى نتائج طرق الفحص الأخرى باستخدام حيود الأشعة السينية والميكروسكوب الإلكتروني وطيف الأشعة تحت الحمراء لتعطى صورة متكاملة عن تركيب الألياف .

ولقد حسب "Hamza and Sikorski" (١٩٧٨) قيم معاملات الانكسار والانكسار المزوج لألياف الـ PPT ، واستخدما ميكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا مع الضوء الأبيض والضوء أحادى طول الموجة المستقطب في الاتجاهين ، الموازى لمحور الشعيرة والعمودى عليه - انظر الفصلين الخامس والتاسع - وقيست معاملات الانكسار والانكسار المزوج لألياف الكفلار ٤٩ باستخدام سائل معامل انكساره $n_L = 1.656$ وضوء أحادى طول الموجة ، وكانت النتائج كالاتى :

$$n^{\parallel} = 2.267, n^{\perp} = 1.605 \text{ and } \Delta n = 0.662$$

وذلك عند طول الموجة $\lambda = ٤٦٥$ نانومتر . ويلاحظ أن قيمة الانكسار المزوج عالية جدا بالمقارنة بالألياف الأخرى التقليدية .

وناقش المؤلفان النتائج النظرية والتجريبية لمعاملات انكسار مادة الكفلار . ويعطى الجول رقم (١/٣) قيم معاملات الانكسار n والانكسار المزوج Δn لبعض الألياف الطبيعية والتركيبية .

جدول رقم (١/٣) : معاملات الانكسار n^{\parallel} , n^{\perp} والانكسار المزدوج Δn لبعض الألياف

الطبيعية والتركيبية :

Fibre	n^{\parallel}	n^{\perp}	Δn	Reference
Cotton	1.578	1.532	0.046	Preston (1933)
Ramie and flax	1.596	1.528	0.068	preston (1933)
Viscose rayon	1.539	1.519	0.020	Preston (1933)
Viscose rayon (skin)	1.5563	1.5282	0.0281	Faust (1952)
(core)	1.5536	1.5304	0.0234	Faust (1952)
Viscose rayon (skin)	1.5453	1.5226	0.0227	Barakat and Hindeleh (1964)
(core)	1.5441	1.5247	0.0194	
Wool	1.557	1.547	0.010	Hartshome and Stuart (1970)
Polyethylene	1.574	1.522	0.052	Hartshome and Stuart (1970)
Polypropylene	1.530	1.496	0.034	Hartshome and Stuart (1970)
Acilan	1.517	1.519	-0.002	Barakat and El-Hennawi (1971)
Acilan	1.511	1.514	-0.003	Hartshome and Stuart (1970)
Nylon 6	1.575	1.526	0.049	Hartshome and Stuart (1970)
Nylon 6 (skin)	1.5533	1.5448	0.0085	Hamza <i>et al</i> (1985b)
(core)	1.5512	1.5430	0.0082	Hamza <i>et al</i> (1985b)
Nylon 66	1.578	1.522	0.056	Hartshome and Stuart (1970)
Terylene	1.706	1.546	0.160	Hartshome and Stuart (1970)
Dralon	1.5201	1.5234	-0.0033	Hamza <i>et al</i> (1985b)
Kevlar 49	2.267	1.605	0.662	Hamza and Sikorski (1978)

٣/٢- التركيب الطبقي للألياف التركيبية :

Layer structure in synthetic fibres

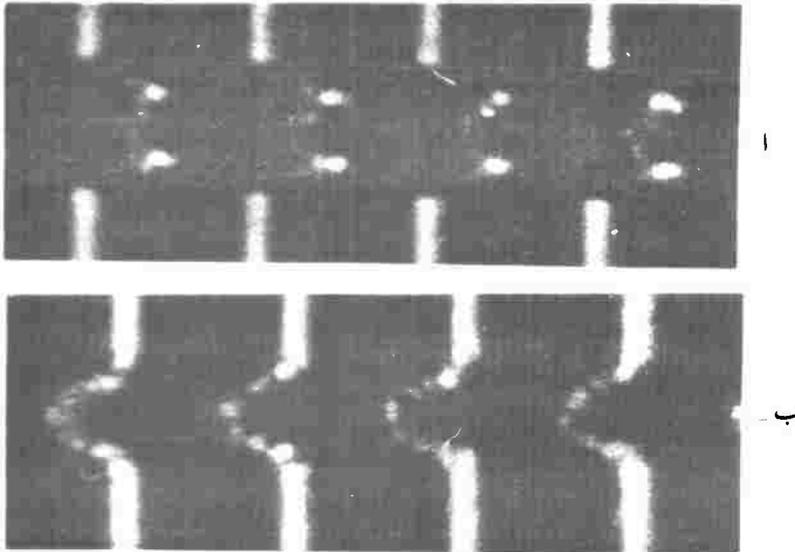
استخدم "Hamza and Kabeel" (١٩٨٦) هذب التداخل الضوئي المتعدد لفيوز لقياس معاملات الانكسار والانكسار المزدوج لألياف البولي بروبيلين . وقيست إزاحات هذه الهذب في الطبقات المختلفة التي تكون الألياف غير المسحوبة undrawn وعين معامل الانكسار لكل طبقة . ويبين الشكل (١/٣) صورة هذب التداخل الضوئي المتعدد لفيوز عند النفاذ لألياف البولي بروبيلين ، واستخدم في هذه التجربة ضوء مستقطب أحادي طول الموجة $(\lambda = ٥٤٦,١$ نانومتر) يتذبذب في مستوى (أ) مواز لمحور الشعيرة ، (ب) عمودي على محورها . ولإجراء هذه التجربة استخدم مسطحان ضوئيان مفضضان ، يميل أحدهما على الآخر ويحصران بينهما سائلا (معامل انكسار مادته $١,٥٠١٥$ عند درجة حرارة $٢٢,٥$ م) غمرت فيه شعيرة . ولوحظ وجود ثلاث طبقات تكون الشعيرة ظهرت من تتبع هذب التداخل الضوئي عبر الشعيرة .

ونقتصر هنا على ذكر نتائج تعيين معاملات الانكسار والانكسار المزوج لكل من الثلاث طبقات فقط ، حيث إن تطبيق نظرية هذب التداخل الضوئي المتعدد لفيوزو على الألياف متعددة الطبقات سوف ترد بالتفصيل فى الفصل السادس . ويحتوى الجدول رقم (٢/٣) على قيم معاملات الانكسار والانكسار المزوج لكل طبقة من طبقات ألياف البولى بروبيلين باستخدام ضوء ذات طول موجه $\lambda = 66.1$ نانومتر عند درجة حرارة 22.5°C ، ومنه يتضح أن أنصاف أقطار الطبقات الثلاث هى :

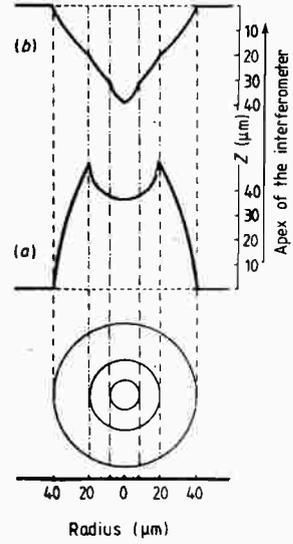
$$r_1 = 36.3 \mu\text{m}, \quad r_2 = 18.8 \mu\text{m} \quad \text{and} \quad r_3 = 9.6 \mu\text{m}.$$

حيث r_1 هى نصف القطر الخارجى للشعيرة .

وكما هو موضح فى الفصل السادس الأتى فإن كل طبقة تساهم فى إزاحة الهدبة التى مقدارها Z خلال المقطع العرضى للشعيرة والممتدة بمقدار X مقاسة من منتصف الشعيرة ، وتظهر على شكل نصف قطع ناقص على المستوى (X, Y) ، حيث تتكون هذب التداخل الضوئي . ويبين الشكل رقم (٢/٣) إزاحة الهدبة عند استخدام الضوء أحادى طول الموجة ، ويتذبذب فى كلا الاتجاهين الموازى والعمودى على محور الشعيرة على الترتيب .



شكل رقم (١/٣) : هذب التداخل المتعدد عبر ألياف البولى بروبيلين ، ويوضح وجود التركيب الطبقي للشعيرة على هيئة ثلاث طبقات باستخدام ضوء أحادى الطول الموجى ويتذبذب (أ) فى مستوى مواز لمحور الشعيرة ، (ب) فى مستوى عمودى على محورها (من Hamza and Kabeel, 1986)



شكل رقم (٢/٣) : منحنى تغير إزاحة الهدبة مع البعد عن مركز الشعيرة باستخدام ضوء يتلذب في مستوى (أ) موازى لمحور الشعيرة (ب) عمودى عليه (من Hamza and Kabeel, 1986)

جدول رقم (٢/٣) : اقيم معاملات الانكسار والانكسار المزوج للطبقات المكونة لألياف البولى بروبيلين عند استخدام ضوء أحادى طول الموجة عند ١,٤٦,٥ نانومتر ودرجة حرارة ٢٢,٥ م° :

(Hamza and Kabeel 1986)

The mean refractive indices and mean birefringence of the fibre †	Refractive indices and birefringence of fibre layers †											
	First layer (outer layer)			Second layer			Third layer (core)					
Refractive index of liquid †, n_L	n_a^{\parallel}	n_a^{\perp}	Δn_a	n_1^{\parallel}	n_1^{\perp}	Δn_1	n_2^{\parallel}	n_2^{\perp}	Δn_2	n_3^{\parallel}	n_3^{\perp}	Δn_3
1.5015	1.5028	1.5001	0.0027	1.5032	1.5007	0.0025	1.5015	1.5000	0.0015	1.5014	1.4995	0.0019

+ The error in measuring n_L using an Abbe refractometer is ± 0.0002 .

+ The error in n^{\parallel} and n^{\perp} is ± 0.0007 .

٢/٣- تركيب الألياف البصرية : The structure of optical fibres

١/٢/٣- أنواع الألياف البصرية : Types of optical fibres

تتركب شعيرة الألياف البصرية فى أبسط صورها من إسطوانتين من زجاج السيليكا مختلفتين فى الإشابة ومتحدتين فى المحور كما هو موضح فى الشكل رقم (٢/٣) ، وهو

عبارة عن شعيرة ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة step-index . ويعنى بذلك أن المنحنى الذى يمثل تغير معامل الانكسار عبر الشعيرة لهما وقشرتها core and cladding ، يتميز بثبات قيمة معامل انكسار لب الشعيرة بالإضافة الى ثبات معامل انكسار قشرتها ، وإن معامل إنكسار مادة لب الشعيرة أكبر من معامل انكسار مادة قشرتها ، وتحتوى معظم الألياف البصرية على أكثر من طبقتين .

ويوضح الشكل رقم (٤/٣) شعيرة بصرية ذات لب متغير معامل الانكسار ، محاطة بقشرة معامل انكسارها ثابت القيمة ثم غطاء أو سترة Jacket بلاستيكية لحماية الشعيرة من الخدش ومسببات الإتلاف الأخرى .

وتسمى الألياف المثلثة فى الشكل رقم (٤/٣) بالألياف البصرية متدرجة معامل الانكسار (GRIN) graded index ، حيث يتناقص معامل انكسار لب الشعيرة على امتداد نصف القطر كلما بعد الموضع عن مركز الشعيرة ، وتكون أقصى قيمة لمعامل الانكسار عند محور الشعيرة .

ويوضح الشكل رقم (٥/٣) المقطع العرضى وبروفيل معامل الانكسار لبعض أنواع الألياف البصرية وكذلك أبعاد لب وقشرة الشعيرات .
وفيما يلي أنواع الألياف البصرية :

أ- ألياف ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة ، وهى عبارة عن إسطوانة من مادة عازلة وضعت فى الهواء ، رقم (أ) فى الشكل (٥/٣) .

ب- ألياف بصرية عديدة المنوال ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة ، « رقم (ب) فى الشكل (٥/٣) ».

ج- ألياف بصرية وحيدة المنوال ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة ، « رقم (ج) فى الشكل (٥/٣) » .

د- ألياف بصرية يأخذ فيها بروفيل معامل الانكسار الشكل W ، ويحاط لب الشعيرة بقشرتين ، الداخلية معامل انكسارها n_1 والخارجية معامل انكسارها n_2 ، حيث $n_1 < n_2$ « رقم (د) فى الشكل (٥/٣) » .

هـ- ألياف بصرية متدرجة معامل الانكسار وعديدة المنوال ، وفيها معامل انكسار لب

الشعيرة $n(r)$ يتغير بتغير البعد r عن مركز الشعيرة طبقا للمعادلة :

$$n^2(r) = n^2(0) \left[1 - \Delta_1 \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]$$

حيث

$$\Delta_1 = \frac{\Delta^2}{n^2(0)} = \frac{n^2(0) - n_1^2}{n^2(0)}$$

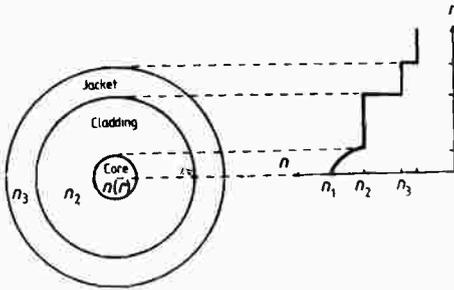
وتأخذ α القيم : $1.5 < \alpha < 2.5$

وتكون أعلى قيمة لمعامل الانكسار $n(r)$ عند محور الشعيرة ، وهذه الألياف ممثلة في

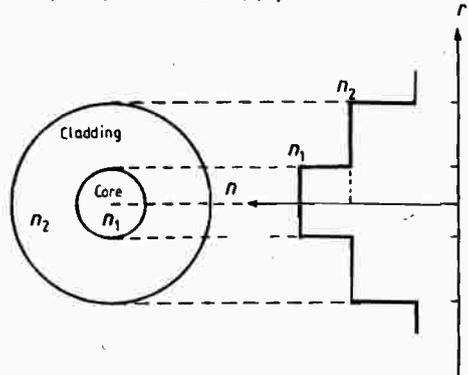
رقم (هـ) في الشكل (٥/٣) .

و- ألياف بصرية ذات لب متدرج معامل الانكسار ، ويأخذ فيها بروفيل معامل الانكسار

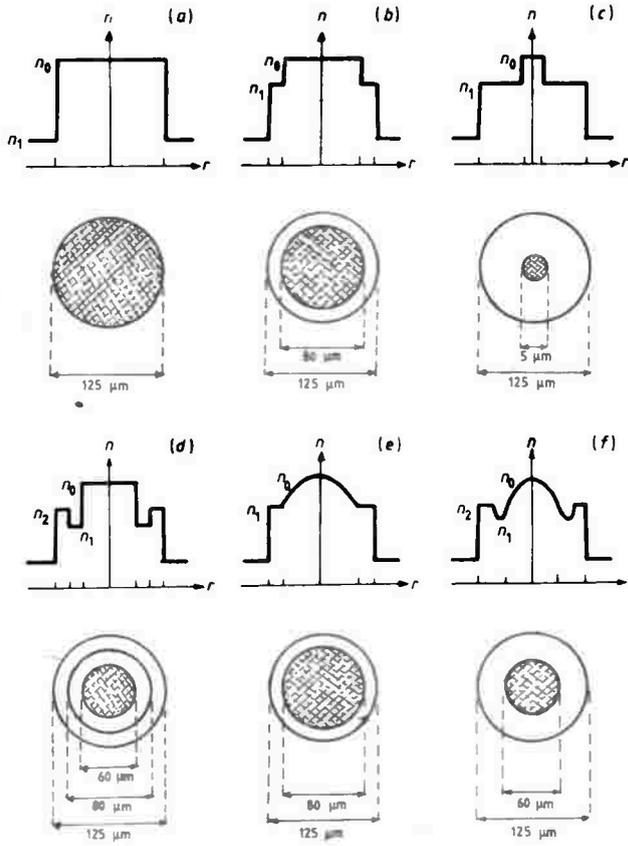
الشكل W ، « رقم (و) في الشكل (٥/٣) » .



شكل رقم (٤/٣) : مقطع عرضي لشعيرة ذات بروفيل متدرج لمعامل انكسار لبها يوضح شكل تغيره وثبات معامل انكسار قشرتها .



شكل رقم (٣/٣) : مقطع عرضي لشعيرة ذات بروفيل معامل انكسار من بدرجة واحدة توضح ثبات معامل انكسار لب الشعيرة وقشرتها .



شكل رقم (3/5) : مقاطع عرضية وأبعاد وبروفيل معامل الانكسار لأنواع مختلفة من الألياف البصرية (From Costa, 1980).

وتحدد البارامترات الآتية خصائص الألياف البصرية ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة : step-index :

نصف قطر لب الشعيرة (a) ، الاتساع العددي (NA) numerical aperture الذي يعرف بالمعادلة :

$$NA = \sqrt{n_0^2 - n_1^2}$$

حيث n_0 معامل انكسار مادة لب الشعيرة ، n_1 معامل انكسار مادة قشرة الشعيرة .

وترتبط قيمة الاتساع العددي بأقصى زاوية قبول maximum acceptance للأشعة الداخلة للشعيرة بالبارامتر V الذي تعطيه المعادلة :

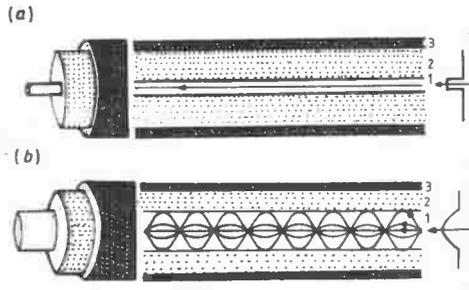
$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \left(n_0^2 - n_1^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

حيث λ هي طول موجة الضوء .

وفى الواقع العملى تكون قيم Δ أقل بكثير من الواحد الصحيح وغالبا ماتساوى ٠.٢ . أو أقل .

والألياف البصرية عديدة المنوال هي موجهاً للموجة التى تحتوى على عدة مناويل للانتشار ، وتكون لهذه المناويل أو النهج مجالات لها توزيع نورى ، وعند تجمعها تحصل على توزيع أى مجال مسموح به داخل الشعيرة ، ويبين الشكل رقم (٦/٣) مسار الموجات الضوئية فى هذه المناويل .

وتوجد ثلاث مناطق تمثل اللب والقشرة والسترة البلاستيك على الترتيب ، ويوضح الشكل (أ) شعيرة وحيدة المنوال بينما يوضح الشكل (ب) شعيرة متدرجة معامل الانكسار وعديدة المنوال .



شكل رقم (٦/٣) انتشار الموجات الضوئية فى (أ) شعيرة وحيدة المنوال ذات بروفيل معامل انكسار من درجة واحدة (ب) شعيرة متدرجة معامل الانكسار وعديدة المنوال .

٣/٣-٢ الخصائص التركيبية للألياف البصرية :

Compositional characteristics of optical fibres

تكون الألياف البصرية المستخدمة فى التراسل الضوئى - غالبا - من نوعين أولهما وحيد المنوال والآخر متدرج معامل انكسار لهما ومتعددة المنوال . وفى النوع الأخير يتكون

لب الشعيرة من زجاج السيليكا المشاب ببعض العناصر فيتغير معامل انكسار أكسيد السيليكون ($n_0 = 1.450$ at $\lambda = 1.0 \mu\text{m}$) بإشابهته بمواد مثل أكاسيد الجرمانيوم والفسفور والبورون - Rigtterink, 1975 .

فالإشابه بالجرمانيوم . (MacChensey et al., 1974) أو الفوسفور - Payne and- Gambling 1974 - ترفع قيمة معامل انكسار أكسيد السيليكون ، أما الإشابة بالبورون فتخفض هذه القيمة - French et al., 1973 .

وتوجه الألياف البصرية الموجات الضوئية إذا كانت مادة لبها ذات معامل انكسار أكبر من معامل انكسار مادة قشرتها - Marcuse, 1972 - لذلك فإن معظم الألياف البصرية تتكون من قشرة من أكسيد السيليكون النقي ولب ازاد معامل انكساره بإشابهته بأكسيد الجرومانيوم أو الفوسفور أو في بعض الألياف تشاب مادة القشرة بأكسيد البورون لتقلل معامل انكسار مادتها بالنسبة للبا غير المشاب .

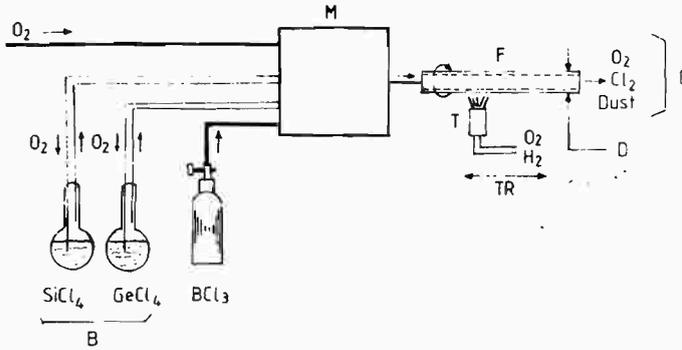
وتلعب مواد الإشابة دورا هاما ، حيث إنه بزيادة تركيز هذه المواد تزيد زاوية القبول acceptance angle للشعيرة وكذلك الاتساع العددي numerical aperture لها . ومن ناحية أخرى فإن زيادة مواد الإشابة تزيد من التغيرات في تركيب المادة وينتج عن ذلك فقد (في الضوء) عن طريق مسببات التشتت ، كما ينتج صعوبات تكنولوجية في عملية تكوين الشعيرة نتيجة اختلاف في الخواص الفيزيائية للبا الشعيرة عن الخواص الفيزيائية للقشرة - Marcuse and Presby, 1980 - ويصل الفرق في معاملات الانكسار بين اللب والقشرة في الألياف المشابة بالجرمانيوم إلى 0.02 ، وتقوم صناعة الألياف البصرية ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة ، وكذلك متدرجة معامل الانكسار على استخدام الطريقة الكيميائية المعدلة ، وذلك بترسيب الأبخرة MCVD - Mac Chensey et al., 1974

وفي عام (1979) تم الحصول على ألياف يصل فيها الفقد إلى 0.2 ديسيبل لكل كيلومتر 0.2 dB km^{-1} عند الطول الموجي $\lambda = 1.05 \text{ ميكرومتر}$ - Miya et al., 1979 - وتتضمن طريقة الـ MCVD عمليتين : أولاهما : إنتاج قوالب (preform) ذات تركيب معين ، ويتكون من لب وقشرة لها مواصفات الشعيرة وبأقطار تتراوح بين 0.5 و 3 سم وطول بضعة سنتيمترات ، ثم إنتاج الشعيرات عن طريق سحبها من هذه القوالب باستخدام فرن

كهربائى . ويكون قطر مقطع هذه القوالب هو حوالى ٧ ملليمتر أو يزيد ، بينما قطر الشعيرة يساوى ١٢٥ ± ١ ميكرومتر .

وحيث إننا بصدد دراسة الخواص التركيبية للألياف البصرية فمن المفيد إعطاء فكرة عن الطريقة الكيميائية المعدلة لتحضير هذه الألياف بترسيب الأبخرة MCVD - (شكل رقم ٧/٣) - وفى هذه الطريقة يتم تركيب أنبوية من الكوارتز على مخروطة glass-working lathe تدار ببطء ، بينما تتساقب المواد المتفاعلة (كلوريد السيليكون $SiCl_4$ ومواد الإشابة $GeCl_4, BCl_3$) يحملها تيار من الأكسجين . ويستخدم لهب الأوكسى هيدروجين لترسيب وصهر طبقات المواد فى نفس الوقت ، وذلك بتحريكه على امتداد الأنبوية الخارجية ، وترسب حوالى خمسين طبقة بتكرار إمرار اللهب .

ولتحضير ألياف بصرية ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة يثبت تركيز مادة الإشابة لكل الطبقات المرسبة ، بينما فى حالة الألياف البصرية متدرجة معامل الانكسار فيزداد تركيز مواد الإشابة مع زيادة عدد الطبقات ، وتؤدي إلى انخفاض قيمة معامل الانكسار مع زيادة البعد عن المحور . وفى نهاية العملية ترفع درجة حرارة اللهب فيحدث انصهار للأنبوية collapse ونحصل على القوالب الجامدة . وتسحب الألياف من القوالب فى المرحلة الأخيرة .



شكل رقم (٧/٣) : رسم تخطيطى يوضح عملية التحضير بالطريقة الكيميائية المعدلة بترسيب الأبخرة (MCVD) ، حيث F أنبوية من الكوارتز المنصهر ، D طبقة مرسبة من الزجاج ، M مقاييس توضح انسياب الغازات flow meters ، B بورقان ، T موقد ، TR اتجاه حركة الموقد .

ولاختبار تركيب الطبقات المكونة للقالب استخدم "Marcuse and Presby" (١٩٨٠) الميكروسكوب الإلكتروني الماسح لفحص نهاية الشعيرة بعمل نحر (تاكل) etching لها ، وكانت نتيجة هذا الفحص احتفاظ الشعيرة بنفس التركيب الطبقي لها ، وأفاد المؤلفان بأن سمك كل طبقة في حالة الألياف التي فحصت أقل من طول الموجة ، وبالإضافة إلى أن قيمة معامل الانكسار غير ثابتة في كل طبقة من الطبقات .

وكذلك درست الخواص التركيبية للقوالب والألياف البصرية المحضرة بالطريقة الكيميائية المعدلة بترسيب الأبخرة MCVD-1975-Presby et al. - وذلك بطريقة التداخل الضوئي باستخدام شريحة على شكل قرص من الشعيرة interferometric slab method التي سيرد شرحها في الباب الخامس - وباستخدام الميكروسكوب الإلكتروني الماسح .

وقد افاد المؤلفون أن التركيب الناتج من عملية الترسيب يوجد في جميع العمليات المتتابة ويظهر في الشعيرة بالإضافة إلى وجود انخفاض في معامل الانكسار عند مركز الشعيرة central dip . ويرجع الاحتفاظ بنفس بروفيل معامل الانكسار في الشعيرة التي سحبت من القالب ببروفيل معامل الانكسار القوالب ، وذلك نتيجة أن معامل الانكسار يزداد تبعاً لدالة خطية مع تركيز مواد الإشابة في القالب وب نفس الطريقة .

كما درست شريحة عرضية من القالب preform ذات سمك يساوي حوالي ١٠ ملليمتر باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئي ، وحضرت عينات مماثلة من الشعيرات للفحص باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئي والميكروسكوب الإلكتروني الماسح (Burrus and Standly, 1974) ، ونتج عن هذه الدراسة وجود التركيب الطبقي في القالب preform الذي أمكن الاستدلال عليه عند استخدام ميكروسكوب التداخل الضوئي والإلكتروني الماسح .

وأظهرت هذب التداخل الثنائي لشريحة من قالب الشعيرة - Presby et al., 1975 - preform هذب التداخل الضوئي على هيئة خطوط مستقيمة ومتوازية في قشرة الشعيرة التي هي من مادة السيليكا النقية المصهورة ، مما يؤكد تجانس مادتها ، يلي ذلك طبقة من البوروسيليكات معامل انكسار مادتها أقل من معامل انكسار مادة القشرة . وتمنع هذه الطبقة وصول أية مواد غريبة إلى لب الشعيرة وانتشارها . ويتم ترسيب مادة لب الشعيرة

بزيادة معدل سريان كلوريد الجرومانيوم $Ge Cl_4$ الذى ينتج عنه ازدياد محتوى أكسيد الجرومانيوم $Ge O_2$ ، ومن ثم زيادة فى معامل الانكسار طرديا مع زيادة سمك المادة المشابة .

ولقد قام presby ومجموعته بزيادة عدد مرات ترسيب كلوريد الجرومانيوم $Ge Cl_4$ إلى ١١ مرة ينتج عنها بروفيل معامل انكسار لب الشعيرة يتبع مسار قطع مكافئ اعتبارا من القشرة حتى مركز الشعيرة . وأوضحت خريطة صور التداخل الضوئى التركيب الطبقي داخل لب الشعيرة الناتج من كل رحلة ترسيب . وكانت نتيجة قياس الفرق فى معامل انكسار مادة القشرة وأعلى قيمة لمعامل انكسار لب الشعيرة عند محورها يعطى قيمة Δn تساوى ٠.٠١٦ . كما أفاد المؤلف أن قدرة ميكروسكوب التداخل الضوئى على فصل المعالم الدقيقة لم تكن كافية لتحديد طبقات لب الشعيرة كلا على حدة . ولقد استخدم المؤلف ميكروسكوب ألكترونى ماسح لتحديد هذه الطبقات .

جدير بالذكر أن بركات ومجموعته - Barakat et al., 1988 - باستخدام هذب التداخل الضوئى المتعدد أمكن أن يحددوا طبقات لب الشعيرة متدرجة معامل الانكسار ويعينوا سمك كل طبقة ومعامل انكسار مادتها . مما يوضح قدرة هذب التداخل الضوئى المتعدد على تحديد المعالم التركيبية الدقيقة بالمقارنة بهذب التداخل الضوئى الثنائى - وبين الشكل (٨/٣) صورة هذب التداخل الضوئى موضحا بها التركيب الطبقي لللب الشعيرة - ووجد أن الشعيرة تتركب من طبقات متعاقبة لها معاملات انكسار متزايدة بشكل تدريجى ، حيث $n(r)$ تظل قيمتها ثابتة لسمك الطبقة Δr ، ولكنها تتبع العلاقة المعروفة التى تربط $n(r)$ مع المسافة من مركز لب الشعيرة r

$$n(r) = n_0 \left[1 - 2 \Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{1/2} \quad 0 \leq r \leq a \quad (3.1)$$

حيث a نصف قطر لب الشعيرة .

وكذلك فإن Δ تعطىها المعادلة :

$$\Delta = (n^2(o) - n^2(a)) / 2 n^2(o)$$

و α هو بارامتر يحدد شكل بروفيل معامل الانكسار .

وقد تم دراسة هذا البروفيل في الألياف متدرجة معامل الانكسار GRIN نظريا وأكدت النتائج تجريبيا من صور التداخل الضوئي . وقسم نصف قطر لب الشعيرة إلى طبقات أو مناطق عددها m وعرض كل منها Δr وتمثل نصف قطر الطبقة m

$$0 = r_0 < r_1 < r_2 \dots < r_{m-1} < r_m = a$$

$$(r_m - r_{m-1}) = \frac{a}{m} = \Delta r = \text{constant.}$$

ويتبع معامل الانكسار العلاقة :

$$n(r) = n_{r0} > n_{r1} > \dots > n_{rm} = n_a = n_{\text{clad}}$$

وكذلك فإن :

$$n(r) = f(r)$$

هي المعادلة الأساسية للـ شعيرة في الألياف الـ GRIN .

ويمكن استنتاج قيم r_m لجميع قيم m من المعادلة (٣-١) وقيمة إزاحة الهدبة الناتجة من عدة طبقات m المكونة للـ شعيرة ، بالإضافة إلى قشرة الشعيرة يعطى بالتجميع summation ، وتشارك كل طبقة بنصف قطع ناقص الطول النصفى لمحوريه الأساسيين semi-principal axis هما :

$$\left\{ r_f, \frac{4 \Delta Z}{\lambda} (n_{\text{clad}} - n_f) r_f \right\}, \left\{ a, \frac{4 \Delta Z}{\lambda} (n_{r_{m-1}} - n_{\text{clad}}) a \right\}, \\ \left\{ r_{m-1}, \frac{4 \Delta Z}{\lambda} (n_{r_{m-2}} - n_{r_{m-1}}) r_{m-1} \right\}, \dots$$

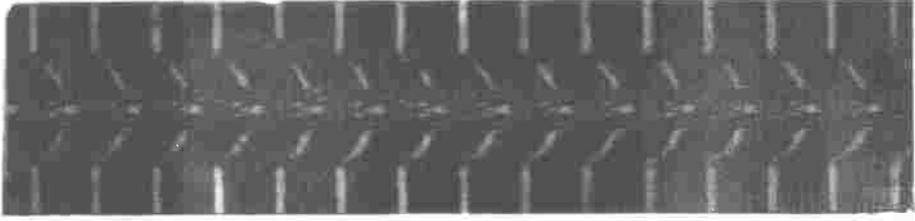
كما هو موضح في الفصل السادس .

والشكل (٣/٨) يبين صورة التداخل الضوئي المتمدد لشعيرة من الألياف الـ GRIN سمكها $t_f = 125 \pm 1 \mu\text{m}$. وتظهر الهدب على شكل خطوط مستقيمة ومتوازية وهي توازي حافة الإسفين الضوئي wedge المكون من مسطحين ضوئيين مفضضين يميل

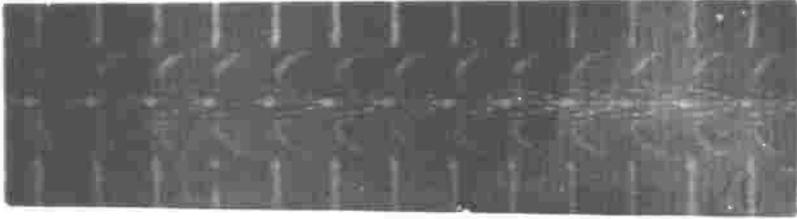
أحدهما على الآخر ، ويحصران بينهما سائلا غمرت فيه الشعيرة ، وكانت المسافة بين كل هديتين متتاليتين هي ΔZ . وعندما تعبر الهدبة السطح الفاصل بين السائل وقشرة الشعيرة تتبع مسارا على شكل جزء من قطع ناقص (ماعدا حالة تساوى معامل انكسار السائل مع معامل انكسار مادة قشرة الشعيرة $n_L = n_{clad}$ حيث تستمر الهدبة فى نفس الاتجاه) . وعندما تعبر الهدبة منطقة لب الشعيرة فإنها تظهر مراحل متقطعة discontinuities ومتتابة ، وينتج ذلك عن التغير المفاجئ فى بروفيل معامل الانكسار للطبقات المتتابة المحتوية على نسب معينة من مواد الإشابة ، ويلاحظ أن هذا التقطع فى الهدب يوجد فقط فى منطقة لب الشعيرة ولجميع رتب التداخل الضوئى التى تظهر خلال هذا اللب وعلى طول الشعيرة . ويظهر هذا التأثير باستخدام سوائل لها معاملات انكسار n_L مختلفة (شكل ٨/٣ ب) ، وتسمح هدب التداخل الضوئى فى المستوى X,Z - حيث تتكون الهدب - بحساب كل من $\Delta n, \alpha$ بطريقة الـ - Barakat et al., (1985) invariance - ويوضح الشكل (٨/٣) بروفيل معامل الانكسار متعدد الدرجات . ويحدد امتداد كل طبقة من صورة التداخل الضوئى فى المستوى (X,Z) بإسقاط جزء الهدبة على المحور X ، ووجد أن :

$$r_m - r_{m-1} = \Delta r = 0.1a = 2.5 \mu m$$

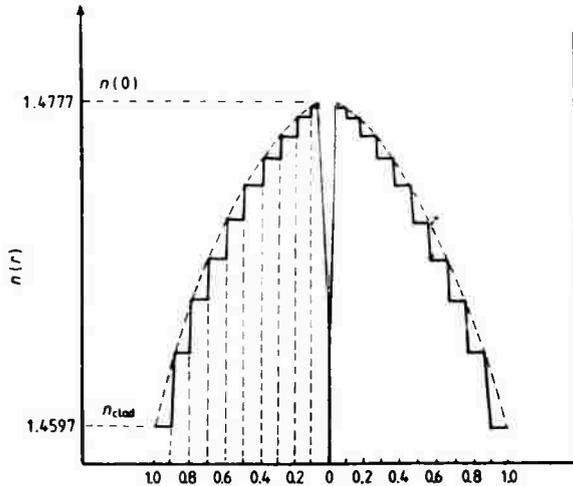
ونصف قطر لب الشعيرة (a) يساوى ٢٥ ميكرومتر $m = 10$ ، $(n_{r_{m-1}} - n_{r_m})$ ، تقل نحو المركز فى درجات كل منها يساوى ٠.٠٠٢٠ . . .



ب



شكل رقم (٨/٣) : خريطة هدب التداخل الضوئي المتعدد وفيه تم فصل وتحديد الطبقات المكونة لب الشعيرة للشعيرات متدرجة معامل انكسار لبها وكان سمك الشعيرة ٢٢ مساريا ١٢٥ ميكرون ، ونصف قطر لبها ٢٥ ميكرون ، ومعامل انكسار قشرتها ١,٤٥٩٧ ، عند طول موجي ٥٤٦١ أنجستروم ، معامل انكسار سائل الفم $n_L = 1,٤٦٢٣$ للصورة (أ) ، ١,٤٥٨٨ ، للصورة (ب) .



شكل رقم (٩/٣) : يوضح بروفيل لب الشعيرة متدرجة معامل الانكسار ويظهر فيها الشكل الهرمي المتدرج وكذلك انخفاض معامل الانكسار عند مركز الشعيرة ، $\Delta n = 0,١٨$.

References

- Barakat N and El-Hennawi H A 1971 *Textile Res. J.* **41** 391
- Barakat N, El Hennawi H A and El-Diasti F 1988 *Appl. Opt.* **27** 5090
- Barakat N, Hamza A A and Goneid A S 1985 *Appl. Opt.* **24** 4383
- Barakat N and Hindeleh A M 1964 *Textile Res. J* **34** 581
- Bunn C W 1949 The optical properties of fibres in "Fibre Science" ed. J M Preston (Manchester : The Textile Institute) pp 144-57
- 1961 *Chemical Crystallography - An Introduction to Optical and X-Ray Methods* (Oxford : Oxford University Press) pp 304-22
- Bunn C W and Daubeny P 1954 *Trans. Faraday Soc.* **50** 1173
- Burrus C A , Chinnock E L, Gloge D, Holden W S, Tingue Li, Standley R D and Keck D B 1973 *Proc. IEEE* **61** 1498
- Burrus C A and Standley R D 1974 *Appl. Opt.* **13** 2365
- Carter G B and Schenk V T J 1975 Ultra-high modulus organic fibres in "Structure and Properties of Oriented Polymers" ed. I M Ward Ch. 13 (London : Applied Science) pp 454-92
- Costa B 1980 The optical fibre in "Optical Fibre Communication", Technical Staff of CSELT (New York : McGraw-Hill) pp 1-46
- Denbigh K G 1940 *Trans. Faraday Soc.* **36** 936
- Dobb M G and McIntyre J E 1984 *Adv. Polym. Sci.* **60/61** 61
- Faust R C 1952 *Proc. Phys. Soc.* **B65** 48
- Françon M 1961 *Progress in Microscopy* (Oxford : Pergamon)
- French W G, Pearson A D, Tasker G W and MacChesney J B 1973 *Appl. Phys. Lett.* **23** 338
- Hamza A A and Kabeel M A 1986 *J. Phys. D : Appl. Phys.* **19** 1175
- Hamza A A and Sikorski J 1978 *J. Microsc.* **113** 15
- Hamza A A, Sokkar T Z N and Kabeel M A 1985 a *J. Phys. D: Appl. Phys.* **18** 1773
- 1985b *J. Phys. D: Appl. Phys* **18** 2321
- Hartshorne N H and Stuart A 1970 *Crystals and the Polarizing Microscope* (London : Edward Arnold) pp 556-88
- Keller A 1968 *Rep. Prog. Phys.* **31** 623
- Kita H, Kitano I, Uchida T and Furukawa M 1971 *J. Am. Ceramic Soc.* **54** 321

- Kuhn W and Grün F 1942 Kolloidzchr. 101 248**
- MacChesney J B O, Connor P B and Presby H M 1974 Proc. IEEE 62 1280**
- Marcuse D 1972 Light Transmission Optics (New York : Van Nostrand Reinhold)**
- Marcuse D and Presby H M 1980 Proc. IEEE 68 668**
- Meredith R and Hearle J W S 1959 Physical Methods of Investigating Textiles (New York : Interscience).**
- Miya T, Terunuma Y, Hosaka T and Miyashita T 1979 Electron. Lett. 15 106**
- Northolt M G 1974 Europ. Polym. J. 10 799**
- Payne D N and Gambling W A 1974 Electron. Lett. 10 289**
- Presby H M, Standley R D, MacChesney J B and O'Connor P B 1975 Bell Syst. Tech. J. 54 1681**
- Preston J M 1933 Trans. Faraday Soc. 29 65**
- Rigterink M D 1975 Tech. Dig. Topical Meet. Optical Fibre Transmission Jan. 7-9, Williamsburg, VA**
- Stoves J L 1957 Fibre Microscopy (London : National Trade Press)**
- Wells O C 1974 Scanning Electron Microscopy (New York : McGraw-Hill).**