

الفصل الخامس

تطبيقات التداخل الضوئي الثنائي على الألياف

Two -beam Interferometry Applied to Fibrous Materials

١/٥ - مقدمة :

وضح فى أثناء دراسة تركيب الألياف فى الفصل الثالث أن معظم الألياف الطبيعية والتركيبية لها خاصية التباين الضوئي optical anisotropy ، وأن معاملات انكسار هذه الألياف للضوء المستقطب فى اتجاه محور الشعيرة (n^{\parallel}) وفى الاتجاه العمودى عليه (n^{\perp}) والانكسار المزوج (Δn) ، حيث $\Delta n = n^{\parallel} - n^{\perp}$ ، تمثل بارامترات تحدد الخواص الضوئية والتركيبية لهذه الألياف على المستوى الجزيئى . وتقدم هذه البارامترات معلومات مفيدة للباحثين ومنتجى ومستخدمى الألياف ، حيث تلعب دورا هاما فى معرفة طريقة تنظيم الجزيئات فى هذه الألياف . ويمكن تعيين هذه الخواص الضوئية باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئي الثنائي Two-beam interference microscope ، وتقدم هذه الطريقة معلومات كمية عن الخواص الضوئية لقشرة ولب الشعيرات غير المتجانسة heterogeneous fibres ، وكذلك يقدم ميكروسكوب التداخل الضوئي الثنائي معلومات عن تغير معاملات انكسار الألياف بتغير :

أ- طول موجة الضوء المستخدم .

ب- درجة الحرارة .

ج- قوة الشد الواقع على الشعيرة .

ويهدف هذا الفصل إلى شرح نظرية وتطبيق ميكروسكوبات التداخل الضوئي الثنائي

لدراسة الألياف فى الحالات الآتية :

١- ألياف ذات مقاطع عرضية منتظمة وغير منتظمة :

أ- الألياف المتجانسة .

ب- الألياف غير المتجانسة والتي يحتوى تركيبها على قشرة ولب ج- الألياف

متعددة الطبقات multilayer fibres .

٢- الألياف البصرية بنوعها GRIN, STEP .

وستتناول في الفصل السابع استخدام طرق التداخل الضوئي في تعيين تضاريس سطح الألياف ودرجة الملاسة وعدم الانتظام في نصف قطر الشعيرة على امتداد محورها . وتتقسم الأجسام بالنسبة للميكروسكوب الضوئي إلى أجسام تغير من سعة الموجة amplitude objects وأجسام تغير من طور الموجة phase objects . وفي الحالة الأولى تختلف الأجسام في درجة امتصاصها للضوء بالنسبة للوسط المحيط بها ، وبذلك توجد نسبة معينة من التباين بين الجسم والوسط المحيط به . أما الاجسام التي تغير طور موجة الضوء فلا تؤثر في الضوء الممتص لكنها تختلف عن الوسط المحيط بها نتيجة سمكها الضوئي optical thickness (nt) حيث n معامل انكسار المادة ، t قيمة سمكها . وتقوم ميكروسكوبات التداخل الضوئي في استخداماتها على فكرة الأجسام التي تغير طور الموجة phase objects .

وقد ابتكرت عدة ميكروسكوبات ضوئية كل منها يحتوى على مقياس تداخل ضوئي ثانى مثل مقياس ماخ وزندر Mach - Zehnder ونومارسكى Nomarski وميكروسكوب التداخل الضوئي المستقطب لبلوتا Pluta Polarising Interference Microscope والانترفاكو Interphako وميكروسكوب بيكر Baker ودايسون Dyson واينتز Leitz وزايس - لينيك Zeiss-Linnik .

ويحتوى الفصل التاسع على شرح تفصيلي للنظام البصرى ومسار الضوء وتكون صور التداخل الضوئي الثانى للأجسام باستخدام أنواع من هذه الميكروسكوبات . أما في هذا الفصل فسندرس نظرية وتطبيق هذه الميكروسكوبات لتعيين خواص الألياف مع التركيز على معاملات الانكسار للألياف ذات المقاطع العرضية المنتظمة وغير المنتظمة والمتجانسة التركيب وغير المتجانسة وكذلك استنباط بروفيل معامل الانكسار للألياف البصرية بنوعها STEP وال GRIN .

١/١/٥- الدراسات السابقة لتطوير وتطبيق طريقة التداخل الضوئي الثاني على الألياف النسيجية

Previous investigations and reviews of the literature on the development of interference microscopy and its application to textile fibre materials :

قدم « بلوتا Pluta » عام (١٩٨٢) فى كتابه باللغة البولندية عرضاً عن تطوير ميكروسكوبات التداخل الضوئي ابتداءً من تصميم جامن - لبييدف Jamin-Lebedev وسمت Smith ، وبلوتا Pluta . والميكروسكوبات التى تتبع نظام « ماخ وزندر-Mach Zehender » - يرجع إلى عرض وتلخيص لهذا الكتاب باللغة الإنجليزية قدمة «سيكورسكى Sikorski» عام (١٩٨٤) - كما شمل هذا الكتاب دراسة تفصيلية عن ميكروسكوبات التداخل الضوئي الثنائي متضمنة الميكروسكوبات التى تعمل بالضوء المنعكس ، وذكر المؤلف الأسباب التى دعت إلى تصميم ميكروسكوب بلوتا - Pluta, 1971, 1972 .
وقد استخدم Faust (١٩٥٦) ميكروسكوب سميث - بيكر Smith - Baker لتعيين التغير فى معاملات الانكسار لعينات غير متجانسة ضوئياً . وتم الحصول على مجموعة هذب عيارية فى الخلفية بإدخال شريحة من الكوارتز بين الشعيرة والمحلل analyser .
وطور "Mckee and Woods" (١٩٦٧) هذه الطريقة حيث تم الاستغناء عن شريحة الكوارتز .

واستخدم "McLean" (١٩٧١) ميكروسكوب ليتز Leitz للتداخل الضوئي الثنائي لتحليل التغيرات الشاذة فى معامل الانكسار المزوج لألياف البولى استر . وقيس معامل الانكسار المزوج لألياف الاكريلك acrylic fibres المشدودة فى جو من البخار وذلك عند نسب سحب مختلفة باستخدام ميكروسكوب زايس Zeiss Ultraphot للتداخل الضوئي Blakey et al., 1970 - والميكروسكوب التداخل الضوئي لبلوتا - Pluta, 1965, 1971, 1972 - القدرة على توفير مجال رؤيا متجانس أو هذب تداخل ضوئي مع انقسام عرضى للصورة Lateral image duplication ، وباستخدام هذا الميكروسكوب يمكن استنباط معلومات كمية عن معاملات الانكسار والانكسار المزوج لقشرة ولب شعيرات الألياف المختلفة .

واستخدم بلوتا - "Pluta" (١٩٧٢) هذا الميكروسكوب لدراسة بعض الألياف التركيبية .
كما استخدم "Hamza and Sikorski" (١٩٧٨) هذا النوع من الميكروسكوبات لتعيين

الخواص الضوئية لألياف الكفلار (PPT) ، وقاما بحساب استقطابية هذه الألياف باستخدام النموذج الجزيئي molecular model الذى قدمه "Northolt" (١٩٧٤) مع قيم استقطابية الروابط الكيميائية التى قدمها "Denbigh" (١٩٤٠) وكذلك "Bunn and Daubeny" (١٩٥٤) ، وباستخدام صيغة لورنتز - لورنز Lorentz-Lorenz حسب قيم معاملات الانكسار الأساسية لهذه الألياف ذات الانكسار المزدوج العالى .

وعين "Simmens" (١٩٥٨) الانكسار المزدوج للأجسام غير المنتظمة المقاطع العرضية .
واستخدم "Hamza" (١٩٨٠) ميكروسكوب بلوتا لقياس معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف غير المنتظمة المقاطع العرضية .

وعين "Zurek and Zakrzewski" (١٩٨٣) معاملات الانكسار والانكسار المزدوج لألياف القطن باستخدام ميكروسكوب بلوتا باتباع الطريقة التى قدمها "Hamza" (١٩٨٠) وقد أجرى هذان الباحثان هذه القياسات بوضع شعيرات القطن فى محلول له قوة تفرق عالية وتمت القياسات لطولين موجيين من الضوء ، ونتاجت صورتان للشعيرة كانت إحدهما نتيجة معامل الانكسار فى اتجاه محور الشعيرة (n^{\parallel}) والأخرى نتيجة معامل الانكسار فى الاتجاه العمودى عليه (n^{\perp}) . وهذه الطريقة هى نتيجة تزاوج طريقة "Simmens" (١٩٥٨) وطريقة بلوتا "Pluta" (١٩٦٥) The dual-wavelength method .

كما عالج "Dorau and Pluta" (١٩٨١) صعوبة القياس الدقيق للمسار الضوئى فى مجال التداخل الضوئى عند قياس إزاحات الهدب ، فعند استخدام ميكروسكوب بلوتا مع مستقطبات متعامدة يمكن الاستعانة بالضوء الأبيض للتعرف على الهدبة الصفرية Zero-order fringe واستخدام Hamza and co-workers ميكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا لدراسة ألياف البولى استر والكفلار وسليولوز الرايون النشادرى cuprammonium وألياف المركبات المزدوجة من مادتين bicomponent ذات المقاطع العرضية المنتظمة وغير المنتظمة لتعيين معاملات انكسارها والانكسار المزدوج Hamza (1986), Hamza and Abd El-Kader (1986), Hamza and El-Farahaty (1986), Hamza and El-Dessouki (1987) and Hamza et al., (1986).

وقد لخص « حمزة Hamza » عام (١٩٨٦) الأبحاث التي استخدم فيها ميكروسكوب التداخل الضوئي الثنائي لدراسة الألياف النسجية مع توضيح للطريقة المستخدمة ونوع الألياف ونتائج هذه الأبحاث .

٢/٥- نظرية ميكروسكوب التداخل الضوئي لبلوتا : Pluta microscope

يمثل هذا الجهاز ميكروسكوب تداخل ضوئي يمكن بواسطته الحصول على مجال رؤيا متجانس uniform أو هدب تداخل ضوئي تعبر صورتين منفصلتين للجسم تحت الفحص .

وقد طبق "Hamza" (١٩٨٠) هذا الميكروسكوب لقياس معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف ذات المقاطع العرضية العرضية غير المنتظمة ، ويتضمن قياس معامل الانكسار المتوسط للشعيرة . وقد أجريت هذه القياسات بالاستخدام التكاملي لكل من ميكروسكوب التداخل الضوئي لبلوتا والميكروسكوب الإلكتروني الماسح الذي تم بواسطته تعيين مساحة مقطع الشعيرات .

تعطى المعادلتان التاليتان فرق طول المسار الضوئي $\Delta \Gamma_{\perp}$, $\Delta \Gamma_{\parallel}$ بين العينة وسائل الغمر ، باعتبار أن معامل انكسار السائل هو n_L ، ومعامل انكسار الشعيرة المتوسط للضوء المستقطب استوائيا في اتجاه محور الشعيرة وفي الاتجاه العمودي عليه هما n_a^{\perp} , n_a^{\parallel} على الترتيب :

$$\Delta \Gamma_{\parallel} = (n_a^{\parallel} - n_L) t \quad (5.1)$$

$$\Delta \Gamma_{\perp} = (n_a^{\perp} - n_L) t \quad (5.2)$$

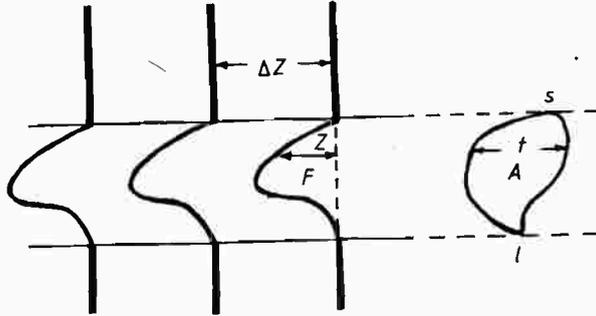
وتقاس قيم $\Delta \Gamma_{\perp}$, $\Delta \Gamma_{\parallel}$ بوحدات قياس الطول (المليمتر مثلا) ويقاس سمك الشعيرة (t) بنفس الوحدة .

وتعطى المعادلة (٥-٣) معامل الانكسار المزدوج المتوسط Δn_a :

$$\begin{aligned} \Delta n_a &= n_a^{\parallel} - n_a^{\perp} \\ &= (\Gamma_{\parallel} - \Gamma_{\perp}) / t. \end{aligned} \quad (5.3)$$

ويبين الشكل (١/٥) هدب التداخل الضوئي الثنائي عندما تعبر شعيرة ذات مقطع عرضي غير منتظم مساحته A - أو إحدى الصورتين الناتجتين من ميكروسكوب التداخل الضوئي الثنائي بالانكسار المزدوج - ويعطى فرق طول المسار الضوئي $\Delta \Gamma$ بالمعادلة :

$$\Delta \Gamma = \frac{Z}{\Delta Z} \lambda \quad (5.4)$$



شكل رقم (١/٥) : هدب التداخل عبر شعيرة غير منتظمة المقطع العرضي ومساحته A .

حيث Z هي مقدار إزاحة الهدبة عندما تعبر الشعيرة في اتجاه عمودي على محورها ، ΔZ هي المسافة بين هدبتين متتاليتين في منطقة السائل ، λ هي طول موجة الضوء المستخدم .

وعلى ذلك يمكن كتابة المعادلات الآتية :

$$\frac{Z^{\parallel}}{\Delta Z} = (n_a^{\parallel} - n_L) \frac{t}{\lambda} \quad (5.5)$$

$$\frac{Z^{\perp}}{\Delta Z} = (n_a^{\perp} - n_L) \frac{t}{\lambda} \quad (5.6)$$

$$Z^{\parallel} = t \frac{\Delta Z}{\lambda} (n_a^{\parallel} - n_L) \quad (5.7)$$

وبإجراء التكامل للمعادلة (٥-٧) في المنطقة $s \geq d \geq 0$ تنتج المساحة F المحصورة تحت

إزاحة الهدبة عندما تعبر الشعيرة :

$$\int_s^1 Z^{\parallel} dx = \frac{\Delta Z}{\lambda} (n_a^{\parallel} - n_L) \int_s^1 t dx \quad (5.8)$$

$$F^{\parallel} = \frac{\Delta Z}{\lambda} (n_a^{\parallel} - n_L) A$$

حيث A هو متوسط مساحة المقطع العرضي الشعيرة ، وتعطى المعادلات (٥-٩) ،
 (٥-١٠) (٥-١١) قيمة معاملات الانكسار المتوسط n_a^{\parallel} ، n_a^{\perp} والانكسار المزدوج المتوسط
 Δn_a :

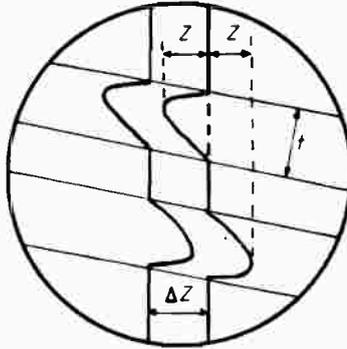
$$n_a^{\parallel} = n_L + \frac{F^{\parallel} \lambda}{\Delta Z A} \quad (5.9)$$

$$n_a^{\perp} = n_L + \frac{F^{\perp} \lambda}{\Delta Z A} \quad (5.10)$$

$$\Delta n_a = \left(\frac{F^{\parallel} - F^{\perp}}{\Delta Z} \right) \frac{\lambda}{A} \quad (5.11)$$

ويعتمد اتجاه إزاحة الهدبة عندما تعبر الحد الفاصل بين السائل والشعيرة على قيمة
 معامل إنكسار الشعيرة بالنسبة لمعامل انكسار سائل الغمر المستخدم . فهذب التداخل
 المستقيمة في منطقة السائل تزاوح إلى أعلى أو إلى أسفل عند عبورها للشعيرة .

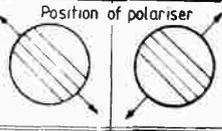
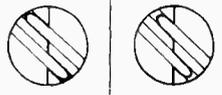
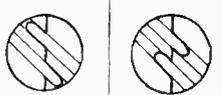
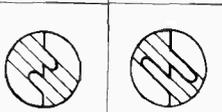
ويوضح الشكل رقم (٥/٢) هذب التداخل الضوئي ، وفيه تظهر صورة
 مزدوجة للشعيرة ظهرت فيها إزاحة الهدبة في اتجاهين متضادين . والجدير بالذكر أنه
 لزيادة دقة القياس يؤخذ في الاعتبار المسافة $2Z = (Z_1 + Z_2)$ بدلا من قياس الإزاحة Z
 في إحدى الصورتين فقط .



شكل رقم (٥/٢) : صورة مزدوجة لشعيرة سمكها a ، وإزاحة الهدب داخلها Z والبعد بين هذبتين
 متلتيتين ΔZ .

ويمكن استخدام الضوء احادى طول الموجة والضوء الأبيض مع ميكروسكوب بلوتا ،
 ويستخدم الأخير أساسا لتحديد موقع الهدبة الصفرية Acromatic fringe ، ويبين الشكل

رقم (٣/٥) هدب التداخل الضوئي عندما تعبر شعيرة متجانسة مغمورة فى سائل معامل انكساره n_L ، وقد ظهرت فى هذا الشكل الصورة المزدوجة للشعيرة .

| Condition | Analysar | Notes |
|-----------------------------------|---|---------------------------------|
| |  | |
| |  | After rotation fringe deviation |
| $n^{\parallel} > n^{\perp} > n_L$ |  | Not reversed |
| $n^{\parallel} > n_L > n^{\perp}$ |  | Reversed |
| $n_L > n^{\parallel} > n^{\perp}$ |  | Not reversed |

شكل رقم (٣/٥) : اتجاه إزاحة الهدب عبر شعيرة متجانسة معاملى انكسار مادتها n^{\parallel} , n^{\perp} مغمورة فى سائل معامل انكساره n_L .

وعند فحص شعيرات ذات مقطع عرضى دائرى تتكون من قشرة ولب تظهر هدب التداخل الضوئى كما فى الشكل (٤/٥) ، وفى حالة الشعيرة المتجانسة ذات المقطع العرضى الدائرى تظهر إزاحة الهدب على شكل نصف قطع ناقص لها أنصاف المحور الأساسيين (a & b) حيث :

$$a = r_f = t/2 \quad \text{and} \quad b = \delta Z \quad \text{at } x = 0 \quad (\text{Barakat, 1971})$$

والمساحة تحت إزاحة الهدبة المحصورة بين $x = +r_f$, $x = -r_f$ هى $F = \frac{\pi ab}{2}$.
بينما مساحة المقطع العرضى للشعيرة A يساوى $\pi t^2 / 4$ كما هو موضح بالشكل (٥/٥) .

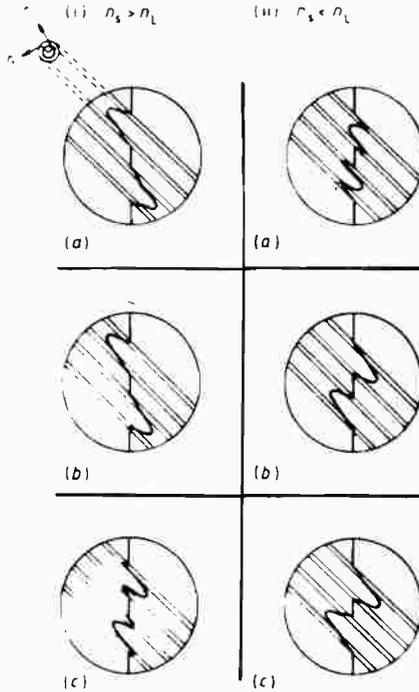
وبالتعويض في المعادلات (٩/٥) ، (١٠/٥) ، (١١/٥) ينتج أن :

$$n_a^{\parallel} - n_L = \frac{(\delta Z^{\parallel})_{x=0}}{\Delta Z} \frac{\lambda}{t}$$

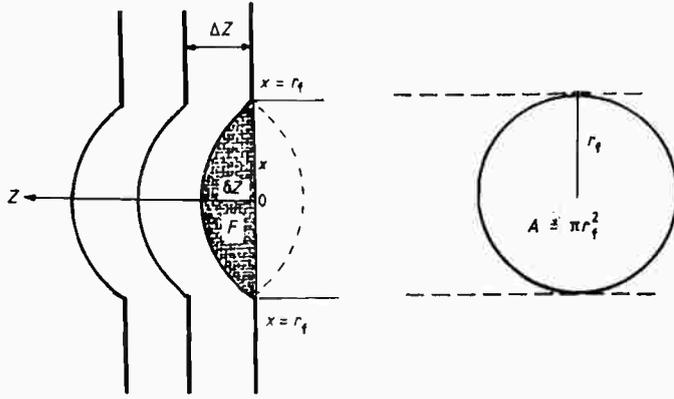
ونحصل على معادلة مشابهة في حالة n^{\perp} . وتعطى المعادلة الآتية معامل الانكسار

المزوج :

$$\Delta n_a = \frac{(\delta Z^{\parallel} - \delta Z^{\perp})_{x=0}}{\Delta Z} \frac{\lambda}{t}$$



شكل رقم (٤/٥) : صور مزوجة لشعيرة مغمورة في سائل معامل انكساره n_L باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئي المستقطب ويوضح شكل هدب التداخل الضوئي عبر شعيرة إسطوانية نصف قطر لبها r_C ومعامل انكسار مادته n_C ونصف قطر قشرتها r_S ومعامل انكسار مادته n_S . ويظهر في الشكل حالتان (١) عندما تكون $n_S > n_L$ ، (٢) عندما تكون $n_S < n_L$ ويوجد في كل حالة ثلاث احتمالات (١) $n_C > n_S$ (ب) $n_C = n_S$ (ج) $n_C < n_S$ (من Hamza, 1986).



شكل رقم (٥/٥) : هذب التداخل عبر شعيرة إسطوانية متجانسة .

وتستخدم هذه المعادلة في حالة مقياس التداخل الضوئي أحادي المسار .

وعند استخدام مقياس التداخل الضوئي ثنائي المسار كما في حالة غمر شعيرة متجانسة في سائل محصور بين مسطحين ضوئيين مفضضين يميل أحدهما على الآخر (Wedge) فتكون المعادلة كالآتي :

$$\Delta n_a = \frac{(Z^{\parallel} - Z^{\perp})_{x=0}}{\Delta Z} \frac{\lambda}{2t}$$

وعند فحص شعيرة متجانسة ذات مقطع عرضي غير منتظم باستخدام مقياس تداخل ضوئي ثنائي المسار تستخدم المعادلة :

$$n_a - n_L = \frac{F}{\Delta Z} \frac{\lambda}{2MA}$$

لتعيين معامل الانكسار المتوسط للشعيرة ، حيث M هي تكبير الصورة -

Sokker & Shahin, 1985, and Wilkes, 1985.

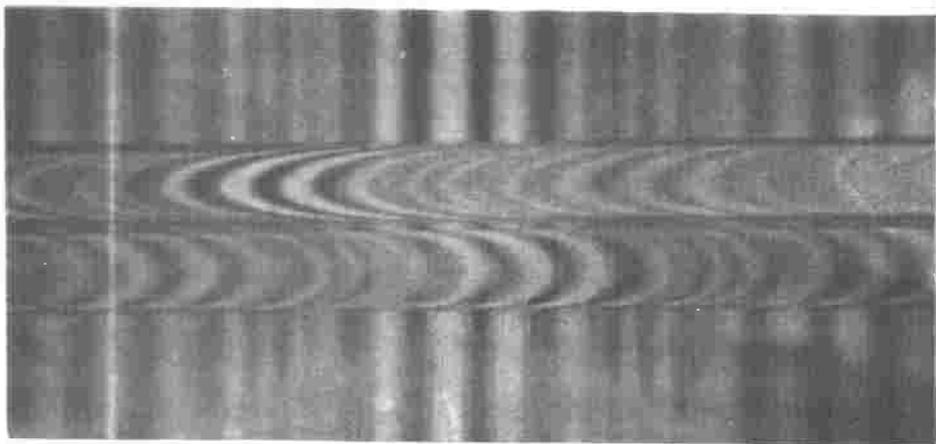
وتصل دقة قياس فرق طول المسار الضوئي باستخدام منشور ولاستون إلى حوالي 0.05λ حيث λ هي طول موجة الضوء المستخدم ، وعلى ذلك لايزيد الخطأ في تعيين معامل الانكسار والانكسار المزوج على $0.003 - 0.001$ ، وفي تعيين قطر شعيرة هو حوالي ١ ميكرومتر - (Pluta) (١٩٧٢) . وتوضح صور التداخل الضوئي microinterferograms

الآتية سلوك هذب التداخل الضوئى عندما تعبر الشعيرة وكيفية استخراج المعلومات من هذه الصور . وقد استخدم ميكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا وكذلك ميكروسكوب الانترفاكو Interphako لدراسة الألياف التركيبية . والصور الآتية هى حصيلة استخدام ميكروسكوب بلوتا فى دراسة ألياف البولى برويلين والكفلار والكورتل (ألياف عديد الأكرليك) .

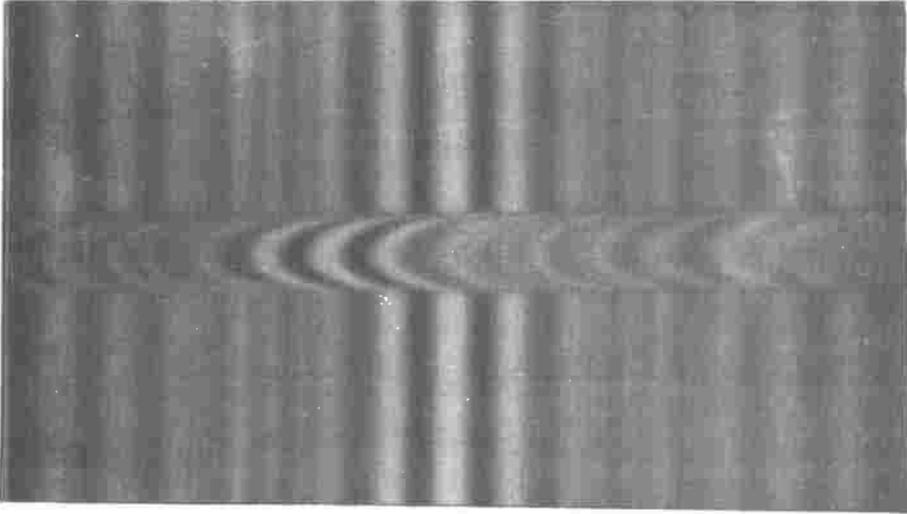
وقد استخدم ميكروسكوب الانترفاكو فى دراسة ألياف البولى إثيلين وألياف البولى استر ، ويبين الشكل (٦/٥/أ) صورتين للتداخل الضوئى لألياف البولى برويلين - نسبة سحب ٠,٢ - باستخدام ضوء أبيض مع ميكروسكوب التداخل الضوئى لتكوين صورة مزوجة (رقم أ) وصورة غير مزوجة تفاضلية تعطى الانكسار المزوج (رقم ب) .

ويبين الشكل (٧/٥) صورة هذب التداخل الضوئى لنفس الشعيرة باستخدام سائل معامل انكساره يساوى ١,٤٨٠٠ عندما يستخدم ضوء طول موجته $\lambda = ٥٤٦$ نانومتر .

ويبين الشكل رقم (٨/٥/أ) صورة غير مزوجة لألياف الكفلار ١٧ باستخدام الضوء الأبيض - لاحظ أن إزاحة الهدبة داخل الشعيرة تزيد على ثمانية عشر رتبة تداخل ضوئى . وفى الشكل رقم (٨/٥/ب) ظهرت الصورة المزوجة للشعيرة من ألياف الكفلار باستخدام الضوء أحادى طول الموجة ($\lambda = ٥٤٦$ نانومتر) من ميكروسكوب بلوتا .



شكل ٦/٥ (١)

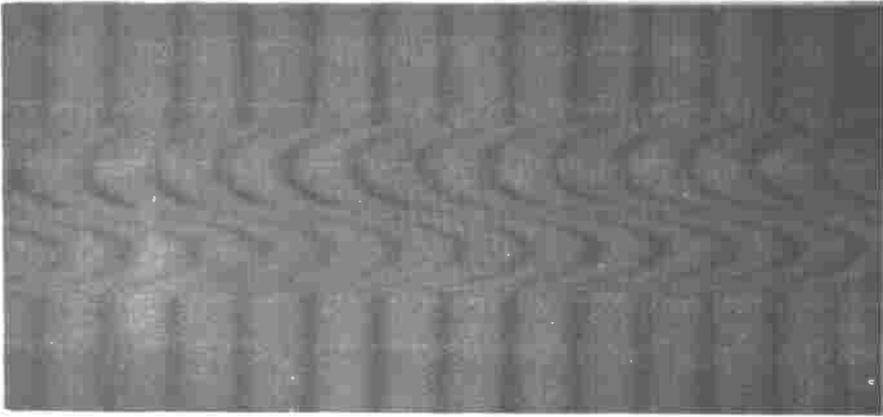


(ب)

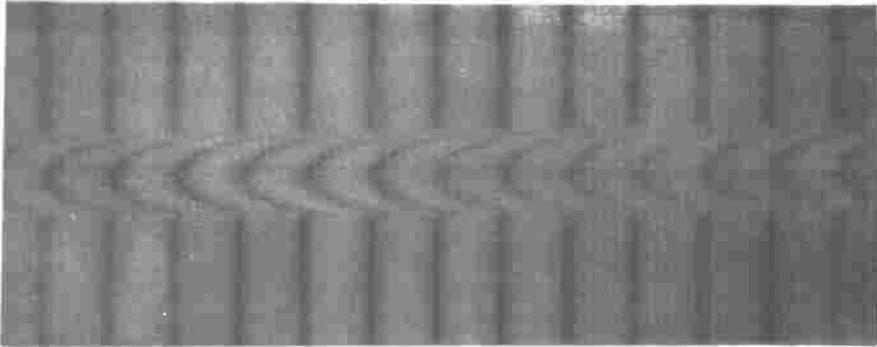
شكل رقم (٦/٥) : صور مزدوجة (أ) وصور غير مزدوجة تفاضلية (ب) تعطى الانكسار المزدوج لشعيرة البولى بروبيلين المشدودة بنسبة سحب ٥,٢ وذلك باستخدام ميكروسكوب بلوتا مع الضوء الأبيض وسائل معامل انكساره ١,٤٨٠٠ عند ١٧° م .

ويوضح الشكل رقم (٩/٥) صورة مزدوجة لألياف النايلون ٦ - منتج مصرى - باستخدام الضوء الأبيض مع ميكروسكوب بلوتا ، بينما يوضح الشكل رقم (١٠/٥) الصورة المزدوجة لألياف الكورتل باستخدام الضوء الأبيض مع ميكروسكوب بلوتا .

واستخدم ميكروسكوب الانترفاكو Interphako للتداخل الضوئى فى قياس معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف ، ويوضح الشكل رقم (١١/٥أ) صورة التداخل الضوئى لشعيرة من ألياف البولى إيثيلين ، باستخدام الضوء الأبيض الذى يتذبذب فى مستوى عمودى على محور الشعيرة ، بينما يوضح الشكل (١١/٥ب) صورة التداخل الضوئى لنفس الشعيرة عندما يستخدم ضوء أحادى طول الموجة ($\lambda = ٥٨٩,٣$ نانومتر) ، ويتذبذب فى مستوى مواز لمحور الشعيرة .

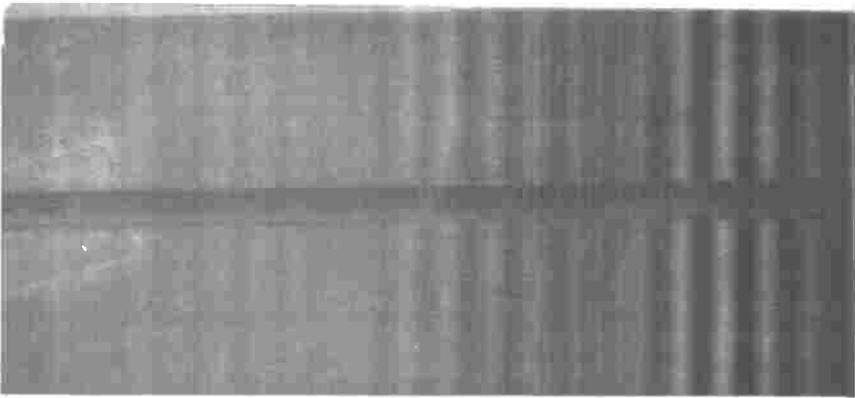


(ا)

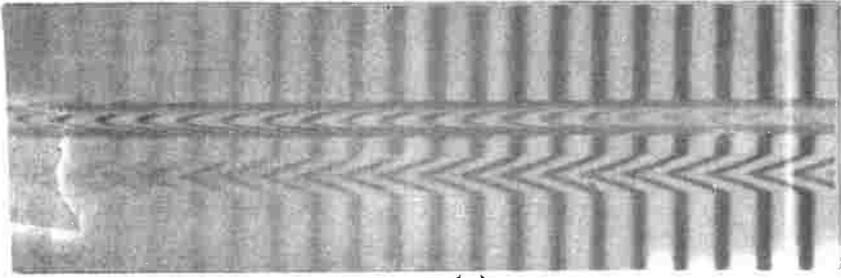


(ب)

شكل رقم (٧/٥) : يوضح الشكل السابق عند استخدام ضوء أحادي طول الموجة عند $\lambda = ٥٤٦$ نانومتر

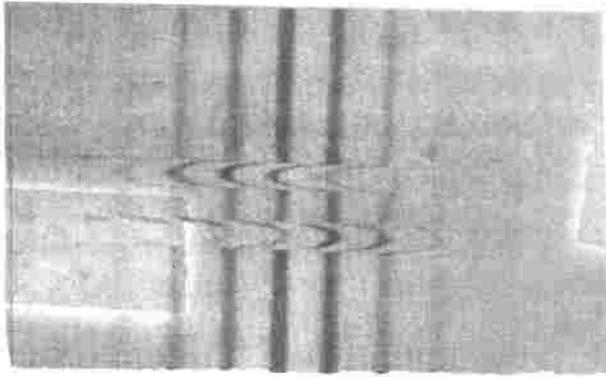


شكل ٨/٥ (ا)

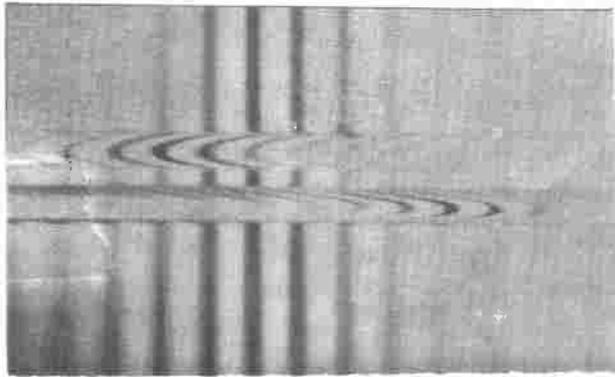


(ب)

شكل رقم (٨/٥) : (أ) صورة غير مزبوجة تفاضلية لشعيرة من ألياف الكفلار . ويلاحظ أن إزاحة الهدبة أكبر من إزاحة ١٨ رتبة (ب) صورة مزبوجة لنفس الشعيرة باستخدام ميكروسكوب بلوتا عند الطول الموجي $\lambda = ٥٤٦$ نانومتر .



شكل رقم (٩/٥) : صور مزبوجة لشعيرة نايلون ٦ باستخدام ميكروسكوب بلوتا مع الضوء الأبيض وسائل معامل انكساره $١,٥٠٨٠$ عند ١٥° م .



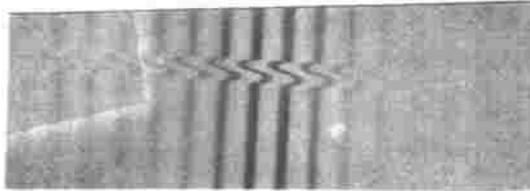
شكل رقم (١٠/٥) : صور مزبوجة لشعيرة من ألياف الكورتل باستخدام ميكروسكوب بلوتا وسائل معامل انكساره $١,٥٠٨٠$ عند ١٥° م .

ويوضح الشكل رقم (١٢/٥) صورة التداخل الضوئي لشعيرة من ألياف البولى استر باستخدام الضوء أحادى طول الموجة ($\lambda = 589.3$ نانومتر) الذى يتذبذب فى مستوى مواز لمحور الشعيرة (أ)، وفى الاتجاه العمودى عليه (ب) .

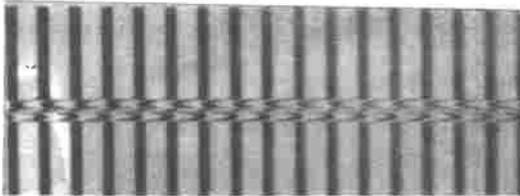
٣/٥- الانكسار المزدوج الجانبى للألياف : Lateral birefringence of fibres

أفاد "Morton and Hearle" (١٩٧٥) أن معاملات انكسار شعيرة للضوء قد تختلف من منطقة لأخرى عبر المقطع العرضى للشعيرة ، وتكون الألياف فى هذه الحالة متباينة الخواص الضوئية خلال هذا المقطع ، وبذلك يكون لها انكسار مزدوج جانبى Lateral birefringence .

وعين "Faust" (١٩٥٦) معاملات الانكسار n_a^{\perp} ، n_a^{\parallel} بطريقة التداخل الضوئى لألياف رايون الفسكوز - غير المشدودة - وذلك عند نقط مختلفة على امتداد قطر الشعيرة بدءاً من أحد حوافها إلى حافتها الأخرى .



(أ)

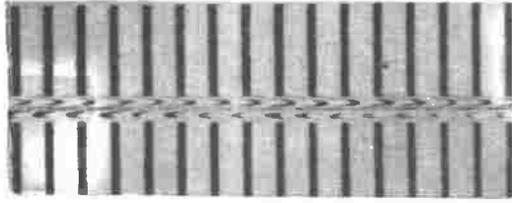


(ب)

شكل رقم (١١/٥) : (أ) هدب التداخل الضوئى عبر شعيرة من ألياف البولى إيثيلين باستخدام ميكروسكوب الانتزافاكو مع الضوء الأبيض الذى يتذبذب فى مستوى عمودى على محور الشعيرة (ب) صور مزدوجة لنفس الشعيرة عند استخدام ضوء أحادى طول الموجة عند $\lambda = 589.3$ نانومتر ويتذبذب فى مستوى مواز لمحور الشعيرة .



(i)



(ب)

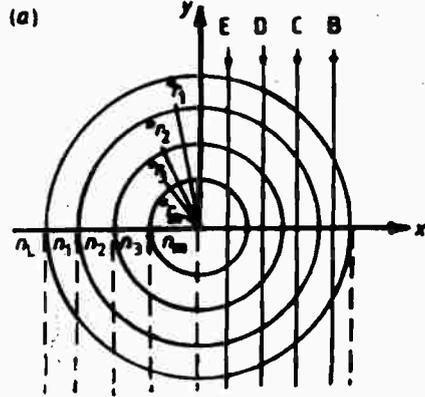
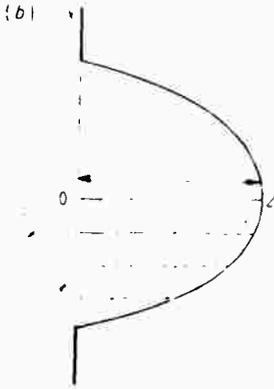
شكل رقم (١٢/٥) : هدب التداخل الضوئي عبر شعيرة من ألياف البولى استر باستخدام ميكروسكوب الانتزافكو مع ضوء أحادى طول الموجة عند $\lambda = 0.89, 3 \mu\text{m}$ نانومتر يتذبذب فى مستوى يوازى محور الشعيرة ، (ب) فى المستوى العمودى عليه (من Hamza, 1986)

يوجد "Faust" أن قيم n_a تكون ثابتة (فى حدود ± 0.0001) بينما قيم n_a^{\perp} تكون أعلى عند حواف الشعيرة عن قيمتها عند مركز الشعيرة بمقدار 0.0015 واستخدم Warner (١٩٨٣) ميكروسكوب التداخل الضوئى الثانى لبيتز Leitz لدراسة معامل الانكسار المزدوج الجانبي لألياف الكنلار .

وقام "Hamza et al" (١٩٨٩) بدراسة تحليلية لهذب التداخل الضوئى الثانى عندما تعبر شعيرة إسطوانية متعددة الطبقات ، وفيما يلى شرح لهذه الطريقة :

يوضح الشكل (١٢/٥) المقطع العرضى لشعيرة إسطوانية متعددة الطبقات (عدد طبقاتها m) ومنتظمة الشكل ومغمورة فى سائل معامل انكساره n_L ، وكان المقطع العرضى للشعيرة فى المستوى (x, y) ومعامل انكسار الطبقة رقم m هو n_m ، حيث n_1 هو معامل انكسار مادة قشرة الشعيرة ، $n_m = n_{\text{core}}$ هو معامل انكسار الطبقة الداخلية . ويعطى نصف قطر كل طبقة من طبقات الشعيرة بالمعادلة :

$$r_Q = (y_Q^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}, \quad Q = 1, 2, 3, \dots$$



شكل رقم (١٣/٥) : (أ) مقطع في شعيرة إسطوانية متمعددة الطبقات (ب) إزاحة الهدب في الشعيرة الإسطوانية

ويوضح الشكل (١/١٣/٥) مسار حزمة متوازية من الضوء أحادي طول الموجة ذات الطول الموجي λ سقطت موازية للمحور y . وتعطى المعادلة (١٢-٥) الفرق في طول المسار الضوئي (OPLD) $\Delta\Gamma$ خلال الشعيرة وسائل الغمر :

$$\begin{aligned} \Delta\Gamma = \text{OPLD} &= 2 \sum_{Q=1}^m (n_Q - n_{Q-1}) y_Q \\ &= 2 \sum_{Q=1}^m (n_Q - n_{Q-1}) (r_Q^2 - x^2)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (5.12)$$

ومن المعادلة (٤-٥) :

$$\frac{\lambda}{2\Delta Z} Z = \sum_{Q=1}^m (n_Q - n_{Q-1}) (r_Q^2 - x^2)^{\frac{1}{2}} \quad (5.13)$$

حيث ΔZ هي المسافة بين كل هديتين في منطقة السائل ، Z هي قيمة إزاحة الهدب المناظرة للقيمة x الواقعة على نصف قطر الشعيرة في المستوى x, z كما هو موضح بالشكل (١٣/٥) (ب).

وتعطى المعادلة رقم (١٤-٥) معامل الانكسار المزوج فى اتجاه نصف القطر radial birefringence لشعيرة متعددة الطبقات ذات مقطع عرضى منتظم :

$$Z^{\parallel} - Z^{\perp} = \frac{2 \Delta Z}{\lambda} \sum_{Q=1}^m (\Delta n_Q - \Delta n_{Q-1}) (r_Q^2 - x^2)^{1/2} \quad (5.14)$$

حيث Δn_Q تمثل قيمة معامل الانكسار المزوج للطبقة رقم Q .

وقيمة إزاحة الهدبة ($Z^{\parallel} - Z^{\perp}$) هى قيمة إزاحة الهدبة فى حالة صورة التداخل الضوئى غير المزدوجة non-duplicated باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئى - ميكروسكوب بلوتا مثلا .

ونحصل على الانكسار المزوج فى اتجاه نصف القطر radial birefringence لشعيرة مكونة من طبقتين (قشرة وب) بالتعويض فى المعادلة (١٤-٥) بالقيمة $Q = 2$. وفى حالة الشعيرة متعددة الطبقات وذات مقطع عرضى غير منتظم تأخذ المعادلة رقم (٨-٥) الصيغة رقم (١٥-٥) :

$$F = \frac{\Delta Z}{\lambda} \sum_{Q=1}^m A_Q (n_Q - n_{Q-1}) \quad (5.15)$$

حيث :

$$F = \int_{\alpha}^{\beta} Z dx \quad \text{and} \quad A = \int_{\alpha}^{\beta} t_Q dx.$$

ويمكن التوصل إلى هذه النتيجة بتكامل معادلة الشعيرة متعددة الطبقات ذات المقطع العرضى المنتظم للمنطقة $\alpha \leq x \leq \beta$ اذ ان $t_Q = y_Q$ ، وهى تعطى المساحة المحصورة تحت إزاحة الهدبة .

وفى عام (١٩٨٧) نشر " بلوتا Pluta " طريقة جديدة لتعيين معامل الانكسار المزوج للألياف الإسطوانية بوضع الشعيرة فى اتجاه قطرى diagonally بين مستقطبين متعامدين two crossed polarisers ومغمورة فى سائل . وعند إضاءة هذه الشعيرة بضوء أحادى طول الموجة مع ملاحظتها بميكروسكوب استخدم ضوء مستقطب إضاءة فتحة مستطيلة نحصل على نموذج للتداخل الضوئى من خلال شينية الميكروسكوب . وهذا

النموذج هو فى الواقع تعبير عن تطبيق تحولات فوريير فى البصريات optical Fourier transform وهو يقدم طريقة جديدة لتعيين الانكسار المزوج للألياف الإسطوانية . وذلك بالإضافة إلى إمكانية تعيين تفرق الضوء بواسطة الألياف وتغيره مع نصف قطر الشعيرة .

٤/٥- تطبيقات طرق التداخل الضوئى الثنائى على الألياف البصرية :

Applications of two-beam interferometric methods to optical fibres

يلخص الجدول رقم (١/٥) أسماء الباحثين الذين طبقوا طريقة التداخل الضوئى الثنائى لدراسة خواص الألياف البصرية ، وعلى وجه الخصوص بروفيل الألياف البصرية ذات لب معامل انكساره ثابت القيمة (STEP) ، و بروفيل الألياف البصرية ذات لب معامل انكساره يقل مع البعد عن مركز الشعيرة (GRIN) ، ويتضمن هذا الجدول الطرق التى اتبعها هؤلاء الباحثون ، وتم تجميع هذا الجدول من أعمال (Ghatak and Thyagarajan (1980), Okoshi (1982), Marcuse and Presby (1980).

١/٤/٥- طريقة التداخل الضوئى باستخدام شريحة على شكل قرص
اقتطع من الشعيرة : Interferometric slab method

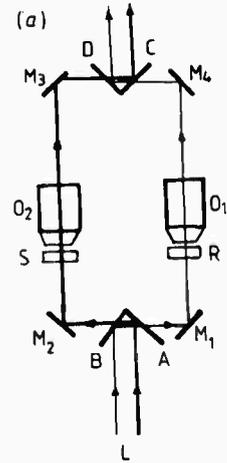
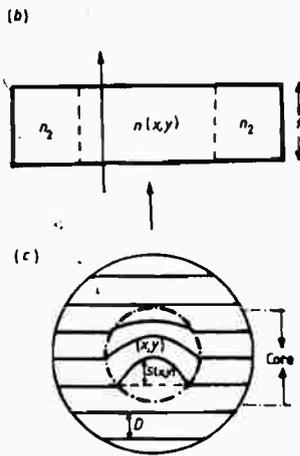
تحضر عينة القياس فى هذه الطريقة بقطع قرص slab رقيق ذى سمك يتراوح بين ٠,١ . ٠,٥ ملليمتر) من الشعيرة . ويتم صقل وجهى الشريحة ، حيث إن سمكها لا بد أن يكون ثابتا على امتداد مساحتها ويتغير لايزيد عن جزء من طول موجة الضوء المستخدم . وقياس بروفيل معامل انكسار الشعيرة يتم إدخال قرص الشعيرة فى المسار الضوئى لأحد أذرع ميكروسكوب تداخل ضوئى ، كما هو موضح فى الشكل (١/٤/٥) ، وتوضع شريحة عيارية متجانسة معامل انكسار مادتها n_2 فى مسار الضوء فى النراع الأخر لميكروسكوب التداخل الضوئى شكل رقم (١/٤/٥ ب) . فإذا فرضنا أن قرص الشعيرة المراد إجراء القياسات عليه وقرص الشعيرة العيارية كانا متماثلين وكانت المرأتان تميلان على بعضهما قليلا ، فإنه فى هذه الحالة تظهر هدب التداخل الضوئى على هيئة خطوط مستقيمة متوازية وثابتة البعد بين كل هدبتين متتاليتين ، وتتبع هذه الهدب قانون توزيع الشدة الضوئية للتداخل الثنائى .

ويوضع قرص الشعيرة المطلوب دراسته في أحد أنزاع مقياس التداخل الضوئي تظهر مجموعة هدب كما هو موضح بالشكل (١٤/٥/ج) ، وتعتمد إزاحة الهدبة $S(x,y)$ على موقعها في لب الشعيرة ، ويعتمد فرق الطور النسبي relative phase difference على التخلف في الطور phase retardation بين قرص الشعيرة تحت الفحص وقرص الشعيرة العيارى طبقا للمعادلة رقم (١٦-٥) .

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} (n(x,y) - n_2) t \quad (5.16)$$

$$\frac{2\pi}{D} = \frac{\psi}{S(x,y)} \quad (5.17)$$

حيث D تمثل المسافة بين كل هدبتين متوازيتين متتاليتين :



شكل (رقم ١٤/٥) : (أ) ميكروسكوب التداخل الضوئي ثنائي الأشعة ، أحادي المسار تمثل L حزمة الأشعة الساقطة M_1, M_2, M_3, M_4 مرآيا ، S القرص العيارى ، O_1, O_2 شينيتا الميكروسكوب ، A, B, C, D مرآيا نصف عاكسة . (ب) قرص سمك t لشعيرة متدرجة معامل إنكسار ليها ومعامل انكسار قشرتها n_2

(ج) هدب التداخل حيث إزاحة الهدبة $S(x,y)$ في اللب يعتمد على موقع القياس واحداثياته x,y كما هو موضح

Table 5.1 Interferometric determination of the optical properties of optical fibres.

| Authors | Methods | Results |
|--------------------------------|---|---|
| Rawson and Murray (1973) | Interference between light reflected at both ends of the fibre | Determination of graded-index fibre parameters, C_4 and C_6 , in $n^2(r) = n_0^2 (1 - \delta^2 r^2 + C_4 \delta^4 r^4 + C_6 \delta^6 r^6 + \dots)$ |
| Martin (1974) | Interferometric slab method using a Michelson-type interference microscope | Index profile |
| Presby and Brown (1974) | Interferometric slab method | Graded-index profile, accuracy in index data to a few parts in 10^4 and a spatial resolution of $2 \mu\text{m}$ |
| Cherin <i>et al</i> (1974) | Interferometric slab method using a Mach-Zehnder system (Leitz interference microscope) | Refractive index measurement of three Corning multimode optical fibres |
| Burris and Standley (1974) | Interferometric slab method | Viewing refractive index profiles and small-scale inhomogeneities in glass optical fibres |
| Burris <i>et al</i> (1973) | Interferometric slab method | Refractive index profiles of some low-loss multimode optical fibres |
| Stone and Burris (1975) | Interferometric slab method | Focusing effects in interferometric analysis of graded-index optical fibres |
| Presby and Kaminow (1976) | Interferometric slab method | Measured $dn/d\lambda$ for $0.5 < \lambda < 1.9 \mu\text{m}$ with accuracy of 1 part in 10^3 |
| Wonsiewicz <i>et al</i> (1976) | Interferometric slab method | Quick determination of index profiles by machine aided method for the interpretation of interferograms |
| Presby <i>et al</i> (1978) | Interferometric slab method using a two-beam single-pass interference microscope | Automatic index profiling |
| Shiraishi <i>et al</i> (1975) | Mach-Zehnder with light passing perpendicular to fibre axis | Index profile of graded-index fibres |
| Marhic <i>et al</i> (1975) | Two-beam transverse interference microscopy | Analytical expressions for OPLD for graded-index fibres with quadric index profile |
| Saunders and Gardner (1977) | Two-beam transverse interference microscopy | Index profile of graded-index. Determination of Δ and α of a fibre having a power law profile |
| Iga and Kokubun (1977, 1978) | Two-beam interference with light incident perpendicular to fibre axis | Graded-index profile, considering effect or refraction of the ray as it passes through the fibre |
| Kokubun and Iga (1977, 1978) | Two-beam interference with light incident perpendicular to fibre axis | They derived successive approximation formulae for calculating index profile |
| Iga <i>et al</i> (1976) | Differential interferometry (shearing). One beam is laterally shifted by a shearing device in a Mach-Zehnder interferometer : | Measurement of index distribution of focusing fibres |
| Boggs <i>et al</i> (1979) | Transverse profile automated with computer controlled video analysis | Index profile of graded-index |
| Presby <i>et al</i> (1979) | Rapid automatic index profiling of whole fibre samples | Index profile of graded-index |

$$(n(x,y) - n_2) = \frac{\lambda \psi}{2\pi t} \quad (5.18)$$

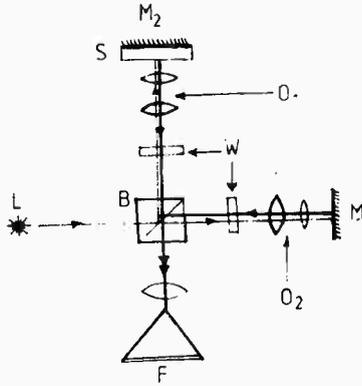
$$n(x,y) = n_2 + \frac{\lambda}{2\pi} \frac{2\pi S(x,y)}{Dt} = n_2 + \frac{\lambda S(x,y)}{Dt} \quad (5.19)$$

وتقاس قيمة ازاحة الهدبة بتسجيل صورة التداخل الضوئي على لوح فوتوغرافي ، ثم يستخدم ميكروسكوب يمكن تحريكه لقياس الأبعاد الدقيقة travelling microscope للقياس .

ويتطبيق المعادلة (١٩-٥) عند استخدام ميكروسكوب تداخل ضوئي عند النفاذ transmission-type تعبر الأشعة العينة مرة واحدة . أما في حالة ميكروسكوب التداخل الضوئي الذي يتبع نظام ميكلسون Michelson type والموضح في الشكل (١٥/٥) - Cherin, 1983 - حيث تمر الأشعة خلال العينة مرتين فيلزم تطبيق المعادلة الآتية :

$$\Delta n(x,y) = \frac{S(x,y) \lambda}{D} \frac{2}{t} \quad (5.20)$$

وتكون أقل قيمة لمقدار $S(x,y)$ يمكن فصلها فراغيا spatial resolution بهذه الطريقة هي $0.7 \mu\text{m}$ ودرجة الدقة في تعيين Δn تساوي $\pm 5 \times 10^{-4}$ (Martin, 1974) .



شكل (رقم ١٥/٥) : النظام البصري لقياس بروفيل معامل انكسار الألياف باستخدام مقياس التداخل الضوئي القائم على نظام ميكلسون . حيث L المصدر الضوئي ، B مجزئ الحزمة الضوئية ، O_1 ، O_2 شينيتا الميكروسكوب ، M_1 ، M_2 مرآتان ، S قرص الشعيرة ، W جهاز لإمالة جبهة الموجة Wavefront tilting .

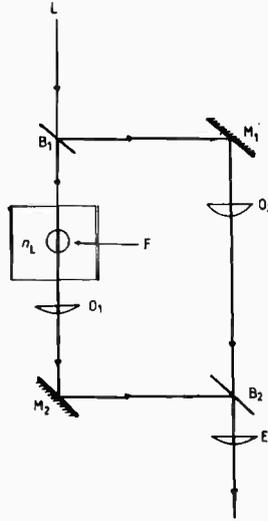
وتكون دقة القياس فى طريقة التداخل الضوئى باستخدام قرص من الشعيرة عمليا محدودة ومرتبطة بدقة الطريقة التى تستخدم لقياس سمك القرص ودرجة صقل وتوازى وجهى هذا القرص . كما أن هذه الطريقة إتلافية destructive للألياف ، وتحتاج إلى وقت طويل لتحضير العينات . ومصدر الخطأ الأساسى فى هذه الطريقة هو تأثير انحناء الأشعة أثناء مرورها بالقرص ، خاصة عندما يكون سمك القرص كبيرا وغير مصقول جيدا .
٥/٤/٢- تعيين بروفييل معامل الانكسار للألياف البصرية باستخدام هدب التداخل الناتجة من سقوط الضوء مستعرضا على الشعيرة :

Index profile of optical fibres from their interference patterns

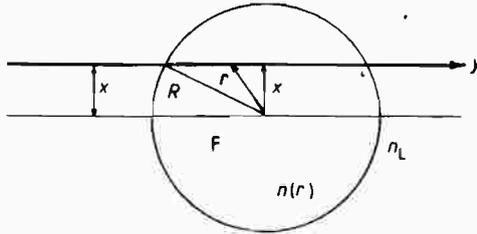
تم تطبيق طريقة التداخل الضوئى الثانى على الألياف بسقوط الضوء مستعرضا أى عموديا على محور الشعيرة . وفى هذه الطريقة توضع العينة فى أحد مسارى الضوء لقياس التداخل الضوئى لماخ وزندر Mach-Zahnder ، ويوضح الشكل (١٦/٥) النظام البصرى المستخدم .

وتعتبر الأشعة الشعيرة عمودية على محورها . وتمس الشعيرة فى محلول matching liquid معامل انكساره n_L يساوى معامل انكسار قشرة الشعيرة n_{clad} تقريبا . وفى هذه الحالة تمر الأشعة بون انكسار خلال قشرتها ، وبذلك يمكن تعيين الإزاحة فى طور الأشعة phase shift فى لب الشعيرة ، ويبين الشكل (١٧/٥) شعيرة مغمورة فى سائل مضاهاة - Shiraishi et al., 1975 .

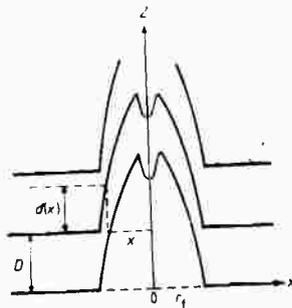
والشكل رقم (١٨/٥) لشعيرة منتظمة حول محورها ، حيث تمر الأشعة مستقيمة خلال هذه الشعيرة وتكون إزاحة الهدبة كما هو موضح بهذا الشكل .



شكل (رقم ١٦/٥) : مقياس التداخل لماخ وزندر باستخدام حزمة من الأشعة الضوئية ساقطة عمودية على محور الشعيرة ، يمثل L المصدر الضوئي ، M_1 ، M_2 مرآتان ، O_2 ، O_1 شبيبتان للميكروسكوب ، B_2 ، B_1 مجزان للحزمة الضوئية ، E عينية ، F شعيرة مغمورة في سائل مضاهاة .



شكل (رقم ١٧/٥) : شعيرة مغمورة في سائل مضاهاة حيث F تمثل الشعيرة $n(r)$ معامل انكسارها ، n_L معامل انكسار سائل المضاهاة .



شكل (رقم ١٨/٥) : هدب التداخل الضوئي عبر شعيرة نصف قطرها r_1 ، ويمثل محورها بالاتجاه Z .

وتعطي المعادلة رقم (٥-٢١) الزيادة في إزاحة طور الأشعة excess phase shift :

$$Q(x) = 2K \int_x^R \frac{\Delta n(r) r dr}{(r^2 - x^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.21)$$

حيث

$$\Delta n(r) = n(r) - n_L$$

و R هو نصف قطر قشرة الشعيرة :

$$Q(x) = 2\pi \frac{d(x)}{D}$$

حيث D هي المسافة بين هديتين متوازيتين متتاليتين ، d هي المسافة التي اختيرت ليتم

عندما القياس . وبذلك يكون :

$$d(x) = \frac{2D}{\lambda} \int_x^R \frac{\Delta n(r) r dr}{(r^2 - x^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.22)$$

وهي صيغة تكامل أبل Abel's integral ، ويمكن أن تحل بسهولة بتعكس أبل's Abel's

inversion كما سيأتي ذلك في الفصل الحادي عشر .

٥/٤/٢- طريقة التداخل الضوئي التفاضلي : Differential interferometry

طور إيجا ومجموعته "Iga et al" عام (١٩٧٨) مقياس التداخل الضوئي لماخ وزنبر

بإضافة جهاز قص shearing device يبنى داخل ميكروسكوب التداخل الضوئي ، ويوضح

الشكل (١٩/٥) مسار الضوء في مقياس التداخل الضوئي ، ويمكن ملاحظة نموذج التداخل

الضوئي الناتج من شعاعين مر كلاهما بالشعيرة . ويترافق أحد الشعاعين جانبا لمسافة

صغيرة s . وما يظهر كإزاحة الهدبة هو الفرق في الطور بين الشعاعين اللذين يمران خلال

الشعيرة عند x+s ، كما هو موضح بالشكل (٢٠/٥) .

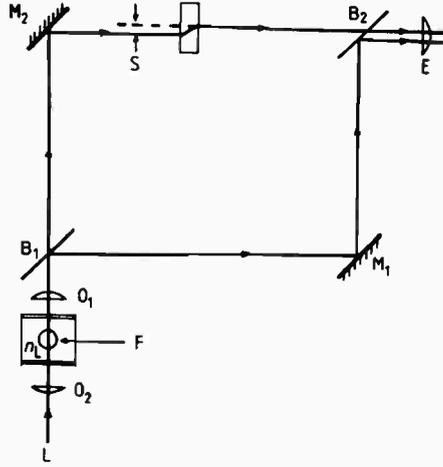
$$Q_s = Q(x+s) - Q(x)$$

وعندما تكون قيمة s صغيرة :

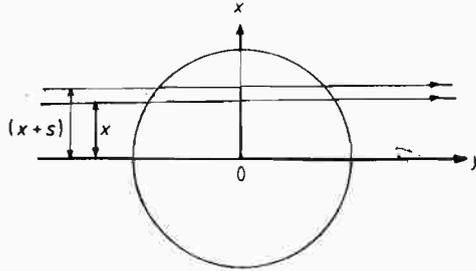
$$Q_s = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{Q(x+s) - Q(x)}{s} = \frac{d(Q(x))}{dx} s \quad (5.23)$$

نحصل على الإزاحة $ds(x)$ من المعادلة :

$$d_s(x) = \frac{D}{2\pi} \frac{d(Q(x))}{dx} s. \quad (5.24)$$



شكل (رقم ١٩/٥) : مقياس التداخل لماخ وزنجر القاص المستخدم في التداخل الضوئي التفاضلي
مكوناته كما في الشكل (١٦/٥) ويمثل S جهاز القص shearing .



شكل (رقم ٢٠/٥) : إسهام شعاعين في تكوين هدب التداخل التفاضلي الناتج من القص .

وبمقارنة المعادلة الأخيرة بمعادلة إزاحة الطور الإضافية في قرص عازل dielectric ذي

سمك d حيث :

$$Q = 2 \pi d/D$$

نجد أن :

$$d_s(x) = \frac{d(d(x))}{dx} s.$$

ونحصل على توزيع معامل الانكسار $n(r)$ باستخدام المعادلة (٢٥-٥) ، وفي هذه الحالة تكون طريقة التداخل الضوئي التفاضلي (shearing) differential هي طريقة مباشرة إذا ماقورنت بالمعادلة (٢٢-٥) .

$$\Delta n(r) = -\frac{\lambda}{\pi D_s} \int_r^R d_s(x) \frac{dx}{(x^2 - r^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.25)$$

References

- Barakat N 1971 *Textile Res. J.* **41** 167
- Blakey P R, Montgomery D E and Sumner H M 1970 *J. Textile Inst.* **61** 234
- Boggs L, Presby H M and Marcuse D 1979 *Bell Syst. Tech. J.* **58** 867
- Bunn C W and Daubeny P 1954 *Trans. Faraday Soc.* **50** 1173
- Burrus C A, Chinnock E L, Gloge D, Holden W S, Li T, Standley R D and Keck D B 1973 *Proc. IEEE* **61** 1498
- Burrus C A and Standley R D 1974 *Appl. Opt.* **13** 2365
- Cherin A H 1983 *An Introduction to Optical Fibres* (New York: McGraw-Hill)
- Cherin A H, Cohen L Q, Holden W S, Burrus C A and Kaiser P 1974 *Appl. Opt.* **13** 2359.
- Denbigh K G 1940 *Trans. Faraday Soc.* **36** 936
- Dorau K and Pluta M 1981a *Przegląd Wtórienniczny* **35** 70
- 1981 b *Przegląd Wtórienniczny* **35** 128
- Faust R C 1956 *Q.J. Microsc. Sci* **97** 569
- Ghatak A and Thyagarajan 1980 *Progress in Optics* vol XVIII ed. E Wolf (Amsterdam : North-Holland) pp 100-9.
- Hamza A A 1980 *Textile Res. J.* **50** 731
- 1986 *J. Microsc.* **142** 35
- Hamza A A and Abd El-Kader H I 1986 *Phys. Ed.* **21** 244
- Hamza A A and El-Dessouki T 1987 *Textile Res. J.* **57** 508
- Hamza A A and El-Farahaty K A 1986 *Textile Res. J.* **56** 580
- Hamza A A, Fouda I M and El-Farahaty K A 1986 *Int. J. Polym. Mater.* **11** 169

- Hamza A A, Kabeel M A and Shahin M M 1990 *Textile Res. J.* **60** 157
- Hamza A A and Sikorski J 1978 *J. Microsc.* **113** 15
- Iga K and Kokubun Y 1977 *Tech. Digest Int. Conf., IOOC Tokyo* p 403
 ——— 1978 *Appl. Opt.* **17** 1972
- Iga K, Kokubun Y and Yamamoto N 1976 *Record of Natl. Symp. Light Radio Waves, IECE Japan* paper S3-1
 ——— 1978 *Papers of Technical Group IECE Japan* no OQE 76-80
- Kokubun Y and Iga K 1977 *Trans. IECE Japan* E60 702
 ——— 1978 *Trans. IECE Japan* E61 184
- McKee A and Woods H J 1967 *J. R. Microsc. Soc.* **87** 185
- McLean J H 1971 *Textile Res. J.* **41** 90
- Marcuse D and Presby H 1980 *Proc. IEEE* **68** 6
- Marhic M E, Ho P S and Epstein M 1975 *Appl. Phys. Lett.* **26** 574
- Martin W E 1974 *Appl. Opt.* **13** 2112
- Morton W E and Hearle J W S 1975 *Physical Properties of Textile Fibres* (London: The Textile Institute) pp 573-8
- Northolt M G 1974 *Europ. Polym. J.* **10** 799
- Okoshi T 1982 *Optical Fibres* (London: Academic)
- Pluta M 1965 *Przegląd Włókienniczy* **19** 261
 ——— 1971 *Opt. Acta* **18** 661
 ——— 1972 *J. Microsc.* **96** 309
 ——— 1982 *Mikroskopia Optyczna* (Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe) (in Polish)
- Pluta M 1987 *J. Mod. Opt.* **34** 1451
- Presby H M and Brown W L 1974 *Appl. Phys. Lett.* **24** 511
- Presby H M and Kaminow I P 1976 *Rev. Sci. Instrum.* **47** 348
- Presby H M, Marcuse D and Astle H 1978 *Appl. Opt.* **14** 2209
- Presby H M, Marcuse D, Boggs L and Astle H 1979 *Bell Syst. Tech. J.* **58** 883
- Rawson E G and Murray R G 1973 *IEEE J. Quantum Electron.* QE-9 1114
- Saunders MJ and Gardner W B 1977 *Appl. Opt.* **16** 2369
- Shiraishi S, Tanaka G, Suzuki S and Kurosaki S 1975 *Record of Natl. Cnov., IECE Japan* **4** 239, paper 891
- Sikorski J 1984 *Proc. R. Microsc. Soc.* **19** 28 (Book review)

Simmens S C 1958 *Nature* 181 1260

Sokkar T Z N and Shahin M M 1985 *Textile Res. J.* 55 139

Stone J and Burrus C A 1975 *Appl. Opt.* 14 151

Warner S B 1983 *Macromolecules* 16 1546

Wilkes J M 1985 *Textile Res. J.* 55 712

Wonsiewicz B C, French W G, Lazay P D and Simpson J R 1976 *Appl. Opt.* 15 1048

Żurek W and Zakrzewski S 1983 *J. Appl. Polym. Sci.* 28 1277