الفصـل الخامس

تطبيقات التداخل الضوئى الثنائى على الألياف

Two -beam Interferometry Applied to Fibrous Materials

٥/١- مقدمة :

وضح فى أثناء دراسة تركيب الألياف فى الفصل الثالث أن معظم الألياف الطبيعية والتركيبية لها خاصية التباين الضوئى optical anisotropy ، وأن معاملات انكسار هذه الألياف للضوء المستقطب فى اتجاه محور الشعيرة ($n^{\parallel}$) وفى الاتجاه العمودى عليه ($n^{\perp}$) والانكسار المزدوج (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 الضوئى الثنائى Two-beam interference microscope ، وتقدم هذه الطريقة معلومات كمية عن الخواص الضوئية لقشرة ولب الشعيرات غير المتجانسةheterogeneous fibres ، وكذلك يقدم ميكروسكوب التداخل الضوئى الثنائى معلومات عن تغير معاملات انكسار الألياف بتغير :

أ- طول موجة الضوء المستخدم .

ب- درجة الحرارة .

جـ- قوة الشد الواقع على الشعيرة .

ويهدف هذا الفصل إلى شرح نظرية وتطبيق ميكروسكوبات التداخل الضوئى الثنائى لدراسة الألياف فى الحالات الآتية :

١- ألياف ذات مقاطع عرضية منتظمة وغير منتظمة :

أ- الألياف المتجانسة .

ب- الألياف غير المتجانسة والتى يحتوى تركيبها على قشـرة ولب جـ- الألياف متعددة الطبقات multilayer fibres .

٢-الألياف البصرية بنوعيها GRIN, STEP .

وسنتناول فى الفصل السابع استخدام طرق التداخل الضوئى فى تعيين تضاريس سطح الألياف ودرجة الملاسة وعدم الانتظام فى نصف قطر الشعيرة على امتداد محورها .

وتنقسم الأجسام بالنسبة للميكروسكوب الضوئى إلى أجسام تغير من سعة الموجة amplitude objects وأجسام تغير من طور الموجة phase objects . وفى الحالة الأولى تختلف الأجسام فى درجة امتصاصها للضوء بالنسبة للوسط المحيط بها ، وبذلك توجد نسبة معينة من التباين بين الجسم والوسط المحيط به . أما الاجسام التى تغير طور موجة الضوء فلاتؤثر فى الضوء الممتص لكنها تختلف عن الوسط المحيط بها نتيجة سمكها الضوئى optical thickness (nt) حيث n معامل انكسار المادة ، t قيمة سمكها . وتقوم ميكروسكوبات التداخل الضوئى فى استخداماتها على فكرة الأجسام التى تغير طور الموجة phase objects .

وقد ابتكرت عدة ميكروسكوبات ضوئية كل منها يحتوى على مقياس تداخل ضوئى ثنائى مثل مقياس ماخ وزندر Mach - Zehnder ونومارسكى Nomarski وميكروسكوب التداخل الضوئى المستقطب لبلوتا Pluta Polarising Interference Microscope والانترفاكو Interphako وميكروسكوب بيكر Baker ودايسون Dyson وليتز Leitz وزايس – لنيك Zeiss-Linnik .

ويحتوى الفصل التاسع على شرح تفصيلى للنظام البصرى ومسار الضوء وتكون صور التداخل الضوئى الثنائى للأجسام باستخدام أنواع من هذه الميكروسكوبات . أما فى 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 بنوعيها الـSTEP والـ GRIN .

٥/١/١- الدراسات السابقة لتطوير وتطبيق طريقة التداخل الضوئى الثنائى 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 كتابة باللغة البولندية عرضا عن تطوير ميكروسكوبات التداخل الضوئى ابتداء من تصميم جامن – ليبيدف Jamin-Lebedev وسمث 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 الثنائى 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 ضوئيا . وتم الحصول على مجموعة هدب 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 الضوئى الثنائى لتحليل التغيرات الشاذة فى معامل الانكسار المزدوج لألياف البولى استر . وقيس معامل الانكسار المزدوج لألياف الاكريلك acrylic fibres المشدودة فى جو من البخار وذلك عند نسب سحب مختلفة باستخدام ميكروسكوب زايس Zeiss Ultraphot للتداخل الضوئىBlakey et - al., 1970 - وليكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا – Pluta, 1965, 1971, 1972 – القدرة على توفير مجال رؤيا متجانس أو هدب تداخل ضوئى مع انقسام عرضى للصورةLateral image duplication ، وباستخدام هذا الميكروسكوب يمكن استنباط معلومات كمية عن معاملات الانكسار والانكسار المزدوج 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 الجزيئى 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 حسبت 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 "Żurek 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 ، ونتجت صورتان للشعيرة كانت إحداهما 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 واستخدم 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 التى استخدم فيها ميكروسكوب التداخل الضوئى الثنائى لدراسة الألياف النسجية مع توضيح للطريقة المستخدمة ونوع الألياف ونتائج هذه الأبحاث .

٢/٥- نظرية ميكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا Theory of the Pluta microscpe :

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

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

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

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

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

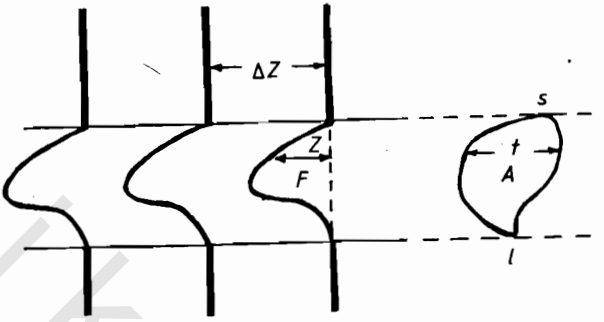
وتقاس قيم $\Delta\Gamma_{\parallel}$, $\Delta\Gamma_{\perp}$ بوحدات قياس الطول (المليمتر مثلا) ويقاس سمك الشعيرة (t) بنفس الوحدة .

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

$$\Delta n_a = n_a^{\parallel} - n_a^{\perp} = (\Gamma_{\parallel} - \Gamma_{\perp})/t. \qquad (5.3)$$

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

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



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

حيث Z هى مقدار ازاحة الهدبة عندما تعبر الشعيرة فى اتجاه عمودى على محورها ، ΔZ هى المسافة بين هدبتين متتاليتين فى منطقة السائل ، λ هى طول موجة الضوء المستخدم .

وعلى ذلك يمكن كتابة المعادلات الآتية :

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

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

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

وبإجراء التكامل للمعادلة (٥-٧) فى المنطقة $s \geq d \geq l$ تنتج المساحة F المحصورة تحت إزاحة الهدبة عندما تعبر الشعيرة :

$$\int_s^l Z^{II}\,dx = \frac{\Delta Z}{\lambda}(n_a^{II} - n_L)\int_s^l t\,dx \qquad (5.8)$$

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

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

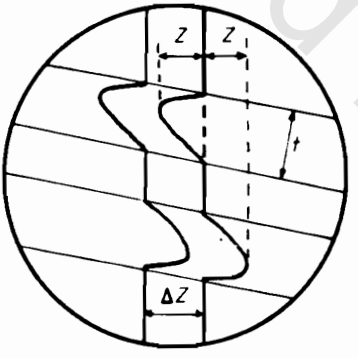
$$n_a^{\parallel} = n_L + \frac{F^{\parallel}}{\Delta Z}\frac{\lambda}{A} \qquad (5.9)$$

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

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

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

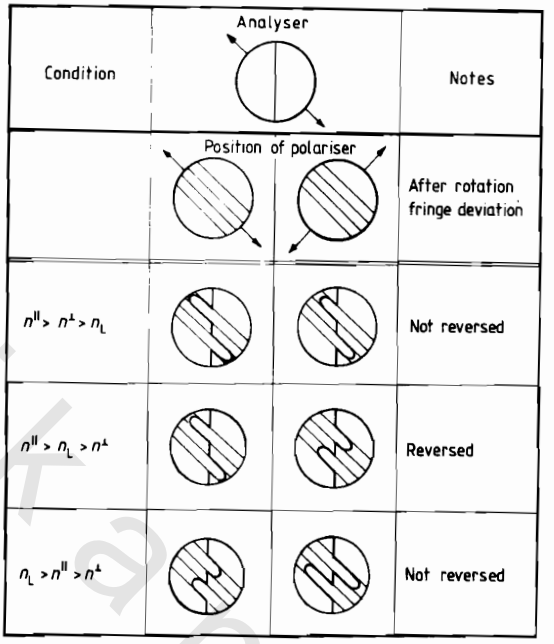
ويوضح الشكل رقم (٢/٥) هدب التداخل الضوئى ، وفيه تظهر صورة مزدوجة للشعيرة ظهرت فيها إزاحة الهدبة فى اتجاهين متضادين . والجدير بالذكر أنه لزيادة دقة القياس يؤخذ فى الاعتبار المسافة $2Z = (Z_1 + Z_2)$ بدلا من قياس الإزاحة Z فى احدى الصورتين فقط .



شكل رقم (٢/٥) : صورة مزدوجة لشعيرة سمكها t ، وإزاحة الهدب داخلها Z والبعد بين هدبتين متتليتين 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 الضوئى عندما تعبر شعيرة متجانسة مغمورة فى سائل معامل انكساره n_L ، وقد ظهرت فى هذا الشكل الصورة المزدوجة للشعيرة .



شكل رقم (٣/٥) : اتجاه إزاحة الهدب عبر شعيرة متجانسة معاملى انكسار مادتها $n^{\perp}, n^{\parallel}$ 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 :

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

والمساحة تحت إزاحة الهدبة المحصورة بين $x = +r_f, x = -r_f$ هى $F = \frac{\pi ab}{2}$.

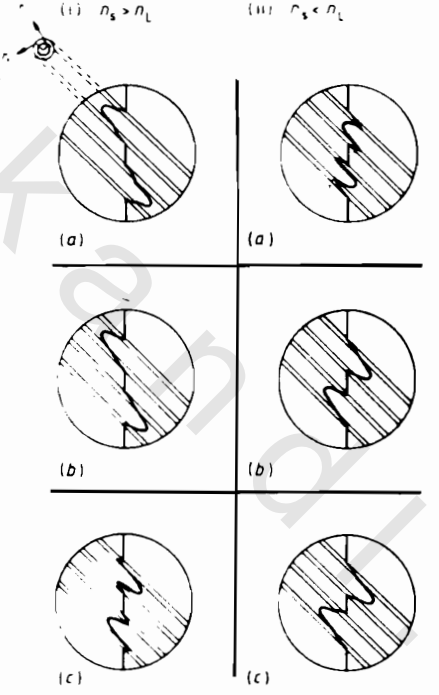
بينما مساحة المقطع العرضى للشعيرة A يساوى $\pi t^2 / 4$ كما هو موضح بالشكل (٥/٥).

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

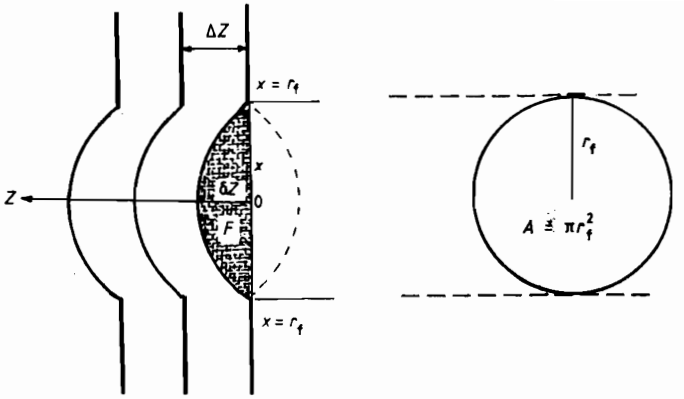
$$n_a^{\parallel} - n_L = \frac{(\delta Z^{\parallel})_{x=o}}{\Delta Z} \frac{\lambda}{t}$$

ونحصل على معادلة مشابهة فى حالة $n^{\perp}$. وتعطى المعادلة الآتية معامل الانكسار المزدوج :

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



شكل رقم (٤/٥) : صور مزدوجة لشعيرة مغمورة فى سائل معامل انكساره n_L باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئى المستقطب ويوضح شكل هدب التداخل الضوئى عبر شعيرة إسطوانية نصف قطر لبها r_c ومعامل انكسار مادته n_c ونصف قطر قشرتها r_s ومعامل انكسار مادته n_s . ويظهر فى الشكل حالتان (أ) عندما تكون $n_s > n_L$ ، (ب) عندما تكون $n_s < n_L$ ويوجد فى كل حالة ثلاث احتمالات (أ) $n_c > n_s$ (ب) $n_c = n_s$ (جـ) $n_c < n_s$ (من Hamza, 1986).



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

وتستخدم هذه المعادلة فى حالة مقياس التداخل الضوئى أحادى المسار .

وعند استخدام مقياس التداخل الضوئى ثنائى المسار كما فى حالة غمر شعيرة متجانسة فى سائل محصور بين مسطحين ضوئيين مفضضين يميل أحدهما على الآخر (Wedge) فتكون المعادلة كالاتى :

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

وعند فحص شعيرة متجانسة ذات مقطع عرضى غير منتظم باستخدام مقياس تداخل ضوئى ثنائى المسار تستخدم المعادلة :

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

لتعيين معامل الانكسار المتوسط للشعيرة ، حيث M هى تكبير الصورة –

Sokker & Shahin, 1985, and Wilkes, 1985.

وتصل دقة قياس فرق طول المسار الضوئى باستخدام منشور ولاستون إلى حوالى 0.05 λ حيث λ هى طول موجة الضوء المستخدم ، وعلى ذلك لايزيد الخطأ فى تعيين معامل الانكسار والانكسار المزدوج على ٠,٠٠٣ – ٠,٠٠١ وفى تعيين قطر شعيرة هو حوالى ١ ميكرومتر – (Pluta) (١٩٧٢) . وتوضح صور التداخل الضوئى microinterferograms

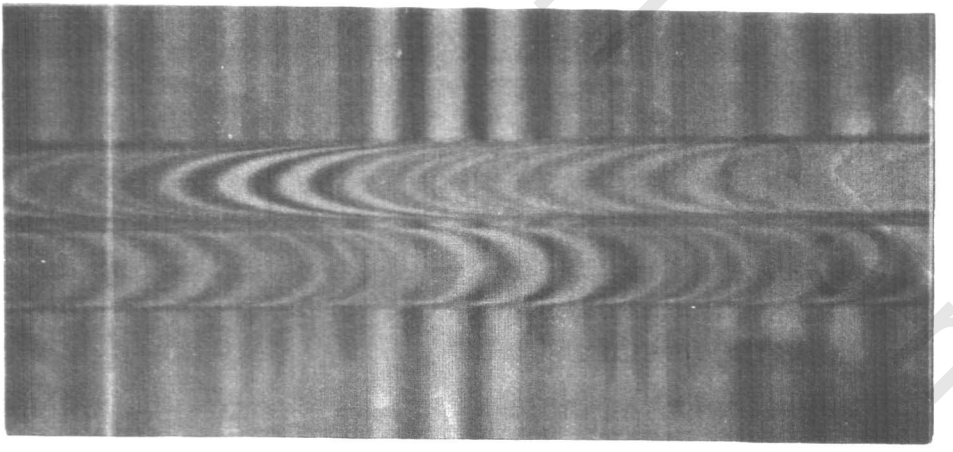
الآتية سلوك هدب التداخل الضوئى عندما تعبر الشعيرة وكيفية استخراج المعلومات من هذه الصور . وقد استخدم ميكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا وكذلك ميكروسكوب الانترفاكو Interphako لدراسة الألياف التركيبية . والصور الآتية هى حصيلة استخدام ميكروسكوب بلوتا فى دراسة ألياف البولى بروبيلين والكفلار والكورتل (ألياف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

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

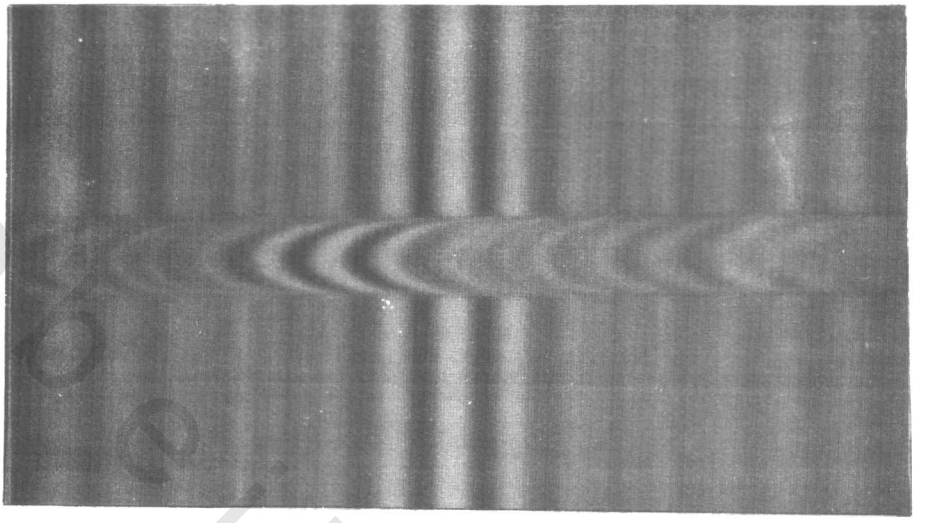
ويبين الشكل (٥/٧) صورة هدب التداخل الضوئى لنفس الشعيرة باستخدام سائل معامل انكساره يساوى ١,٤٨٠٠ عندما يستخدم ضوء طول موجته λ = ٥٤٦ نانومتر .

ويبين الشكل رقم (٥/٨/أ) صورة غير مزدوجة لألياف الكفلار ١٧ باستخدام الضوء الابيض - لاحظ أن إزاحة الهدبة داخل الشعيرة تزيد على ثمانية عشر رتبة تداخل ضوئى .

وفى الشكل رقم (٥/٨/ب) ظهرت الصورة المزدوجة للشعيرة من ألياف الكفلار باستخدام الضوء أحادى طول الموجة (λ = ٥٤٦ نانومتر) من ميكروسكوب بلوتا .



شكل ٥/٦ (ا)

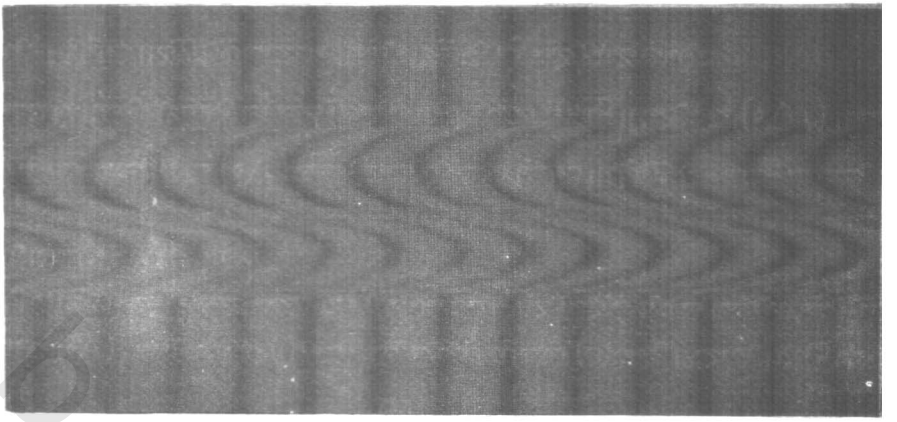


(ب)

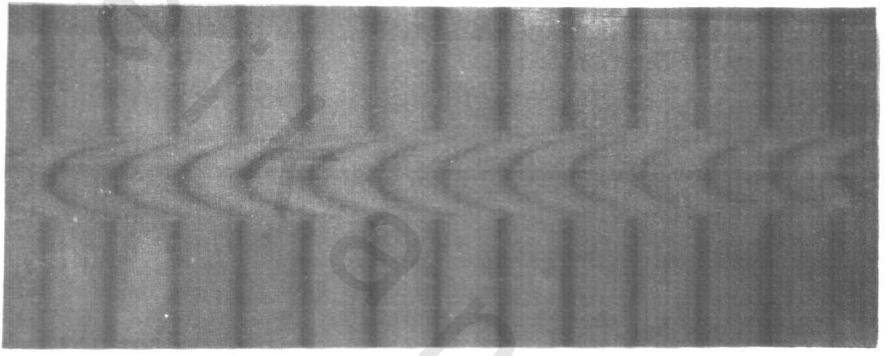
شكل رقم (٦/٥) : صور مزدوجة (أ) وصور غير مزدوجة تفاضلية (ب) تعطى الانكسار المزدوج لشعيرة البولى بروبيلين المشدودة بنسبة سحب ٥,٢ وذلك باستخدام ميكروسكوب بلوتا مع الضوء الأبيض وسائل معامل انكساره ١,٤٨٠٠ عند ١٧°م .

ويوضح الشكل رقم (٩/٥) صورة مزدوجة لألياف النايلون ٦ - منتج مصرى - باستخدام الضوء الابيض 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 (١١/٥/أ) صورة التداخل الضوئى لشعيرة من ألياف البولى إيثيلين ، باستخدام الضوء الأبيض الذى يتذبذب فى مستوى عمودى على محور الشعيرة ، بينما يوضح الشكل (١١/٥/ب) صورة التداخل الضوئى لنفس الشعيرة عندما يستخدم ضوء أحادى طول الموجة (λ = ٥٨٩,٣ نانومتر) ، ويتذبذب فى مستوى موازٍ لمحور الشعيرة .

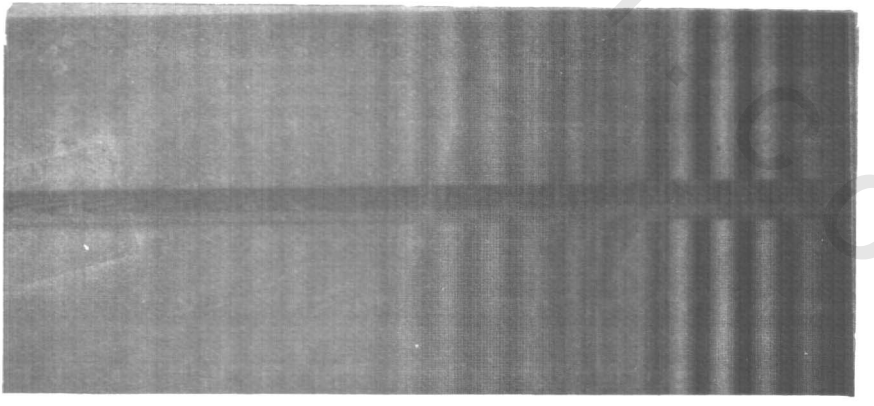


(أ)

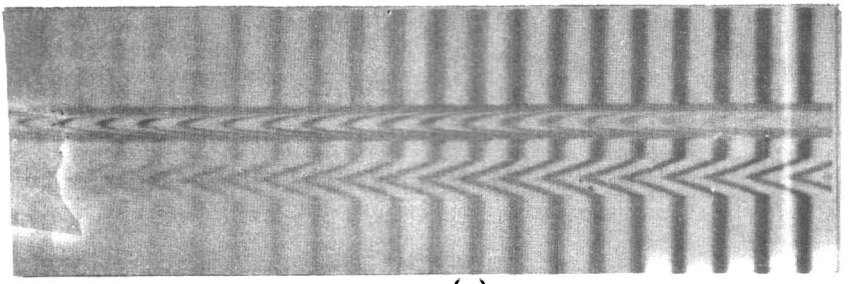


(ب)

شكل رقم (٧/٥) : يوضح الشكل السابق عند استخدام ضوء أحادى طول الموجة عند λ = ٥٤٦ نانومتر

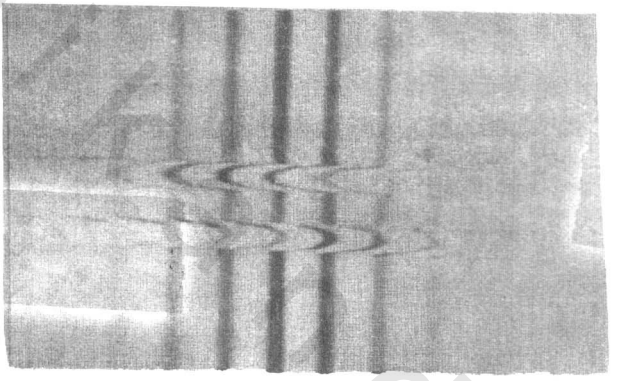


شكل ٨/٥ (أ)

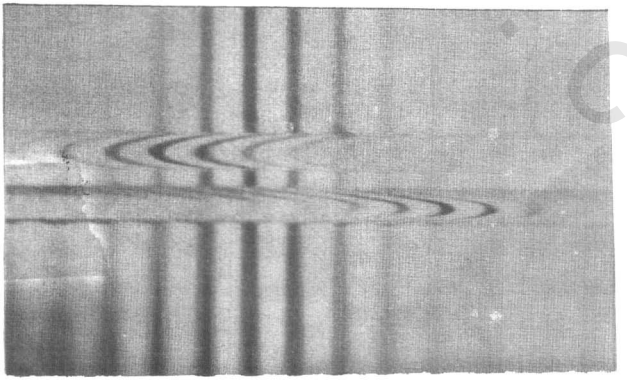


(ب)

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



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



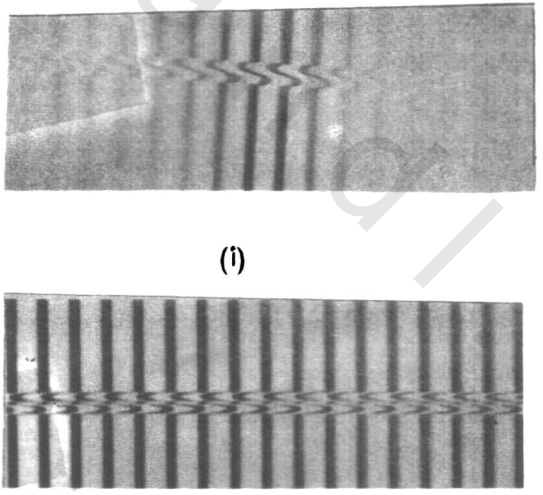
شكل رقم (١٠/٥) : صور مزدوجة لشعيرة من ألياف الكورتل باستخدام ميكروسكوب بلوتا وسائل معامل انكساره ١,٥٠٨٠ عند ١٥°م .

ويوضح الشكل رقم (١٢/٥) صورة التداخل الضوئى لشعيرة من ألياف البولى استر باستخدام الضوء أحادى طول الموجة (λ = ٥٨٩,٣ نانومتر) الذى يتذبذب فى مستوى موازٍ 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 .

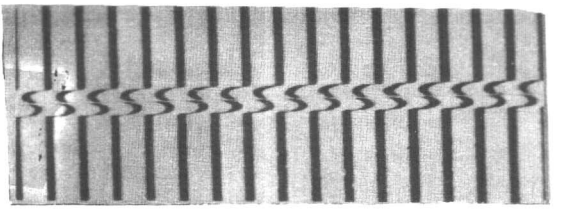
وعين "Faust" (١٩٥٦) معاملات الانكسار $n_a^{\perp}$, $n_a^{\parallel}$ بطريقة التداخل الضوئى لألياف رايون الفسكوز - غير المشدودة - وذلك عند نقط مختلفة على امتداد قطر الشعيرة بدءا من أحد حوافها إلى حافتها الاخرى .



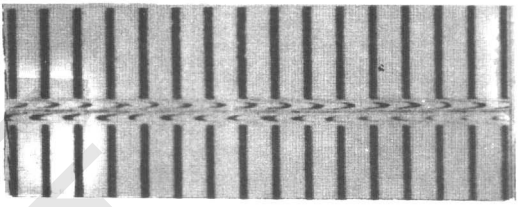
(أ)

(ب)

شكل رقم (١١/٥) : (أ) هدب التداخل الضوئى عبر شعيرة من ألياف البولى إثيلين باستخدام ميكروسكوب الانترفاكو مع الضوء الأبيض الذى يتذبذب فى مستوى عمودى على محور الشعيرة (ب) صور مزدوجة لنفس الشعيرة عند استخدام ضوء أحادى طول الموجة عند λ = ٥٨٩,٣ نانومتر ويتذبذب فى مستوى موازٍ لمحور الشعيرة .



(أ)



(ب)

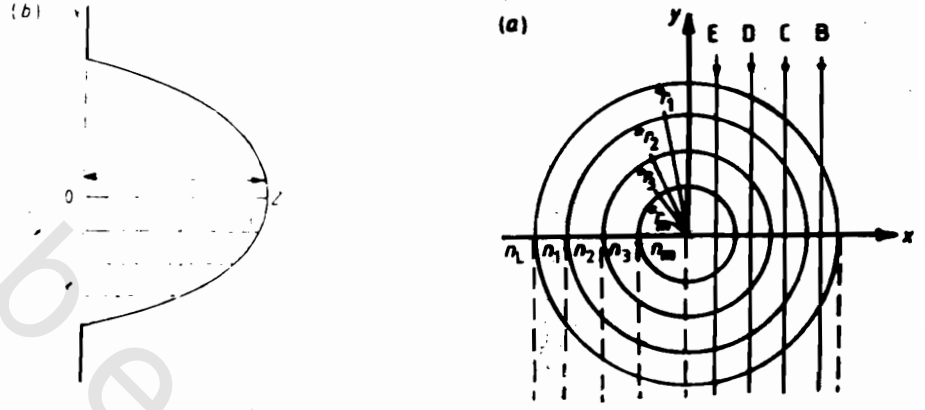
شكل رقم (١٢/٥) : هدب التداخل الضوئى عبر شعيرة من ألياف البولى استر باستخدام ميكروسكوب الانترفاكو مع ضوء أحادى طول الموجة عند λ = ٥٨٩,٣ نانومتر يتذبذب فى مستوى يوازى محور الشعيرة ، (ب) فى المستوى العمودى عليه (من Hamza, 1986)

ووجد "Faust" أن قيم $n_a^{\parallel}$ 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 الثنائى ليتز Leitz لدراسة معامل الانكسار المزدوج الجانبى لألياف الكفلار .

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

يوضح الشكل (١٣/٥/أ) 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 ، $n_m = n_{core}$ هو معامل انكسار الطبقة الداخلية . ويعطى نصف قطر كل طبقة من طبقات الشعيرة بالمعادلة :

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



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

ويوضح الشكل (٥/١٣/أ) مسار حزمة متوازية من الضوء أحادى طول الموجة ذات الطول الموجى λ سقطت موازية للمحور y. وتعطى المعادلة (٥-١٢) الفرق فى طول المسار الضوئى optical path length difference $\Delta\Gamma$ (OPLD) **خلال الشعيرة وسائل الغمر :**

$$\Delta\Gamma = OPLD = 2 \sum_{Q=1}^{m} (n_Q - n_{Q-1})\, y_Q$$

$$= 2 \sum_{Q=1}^{m} (n_Q - n_{Q-1})\, (r_Q^2 - x^2)^{1/2} \qquad (5.12)$$

ومن المعادلة (٥-٤) :

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

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

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

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

حيث Δn_Q تمثل قيمة معامل الانكسار المزدوج 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 غلى الانكسار المزدوج فى اتجاه نصف القطر radial birefringence لشعيرة مكونة من طبقتين (قشرة ولب) بالتعويض فى المعادلة (٥-١٤) بالقيمة Q = 2 .

وفى حالة الشعيرة متعددة الطبقات وذات مقطع عرضى غير منتظم تأخذ المعادلة رقم (٥-٨) الصيغة رقم (٥-١٥) :

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

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 $\alpha \le x \le \beta$ اذ ان $t_Q = y_Q$ ، وهي تعطى المساحة المحصورة تحت إزاحة الهدبة .

وفى عام (١٩٨٧) نشر " بلوتا Pluta " طريقة جديدة لتعيين معامل الانكسار المزدوج 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 إضاء فتحة مستطيلة نحصل على نموذج للتداخل الضوئى من خلال شيئية الميكروسكوب . وهذا

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

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

Applications of two-beam interferometric methods to optical fibres

يلخص الجدول رقم (٥/١) 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) ، وبروفيل 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).

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

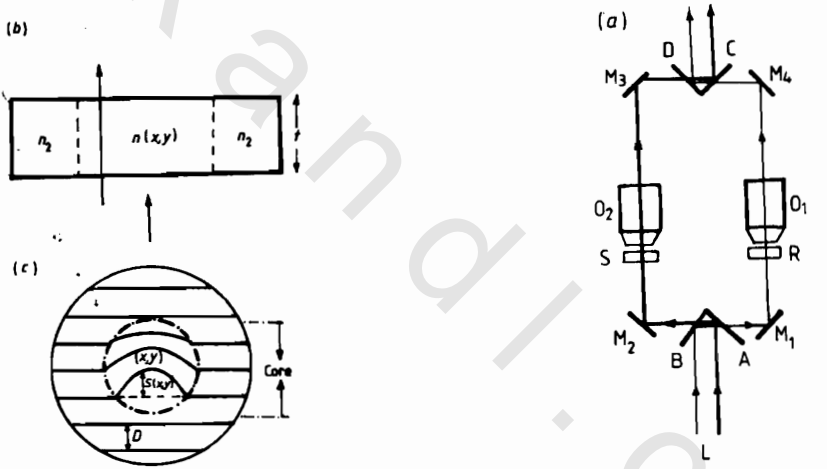
تحضر عينة القياس فى هذه الطريقة بقطع قرص slab رقيق ذى سمك يتراوح بين ٠,١ ، ٠,٥ ملليمتر) من الشعيرة . ويتم صقل وجهى الشريحة ، حيث إن سمكها لابد أن يكون ثابتا على امتداد مساحتها ويتغير لايزيد عن جزء من طول موجة الضوء المستخدم . ولقياس بروفيل معامل انكسار الشعيرة يتم إدخال قرص الشعيرة فى المسار الضوئى لأحد أذرع ميكروسكوب تداخل ضوئى ، كما هو موضح فى الشكل (٥/١٤/أ) ، وتوضع شريحة عيارية متجانسة معامل انكسار مادتها n_2 فى مسار الضوء فى الذراع الآخر لميكروسكوب التداخل الضوئى شكل رقم (٥/١٤/ب) . فإذا فرضنا أن قرص الشعيرة المراد إجراء القياسات عليه وقرص الشعيرة العيارية كانا متماثلين وكانت المرآتان 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 .

وبوضع قرص الشعيرة المطلوب دراسته فى أحد أذرع مقياس التداخل الضوئى تظهر مجموعة هدب كما هوموضح بالشكل (١٤/٥/جـ) ، وتعتمد إزاحة الهدبة $S_{(x,y)}$ على موقعها فى لب الشعيرة ، ويعتمد فرق الطور النسبى relative phase difference على التخلف فى الطور phase retardation بين قرص الشعيرة تحت الفحص وقرص الشعيرة العيارى طبقا للمعادلة رقم (٥-١٦) .

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

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

حيث D تمثل المسافة بين كل هدبتين متوازيتين متتاليتين :



شكل (رقم ١٤/٥) : (أ) ميكروسكوب التداخل الضوئى ثنائى الأشعة ، أحادى المسار تمثل L حزمة الأشعة الساقطة M_4, M_3, M_2, M_1 مـــرايا ، S القرص ، R القرص العيارى ، O_2, O_1 شيئيتا الميكروسكوب ، D, C, B, A . مرايا نصف عاكسة . (ب) قرص سمكه t لشعيرة متدرجة معامل إنكسار لبها ومعامل انكسار قشرتها n_2

(جـ) هدب التداخل حيث إزاحة الهدبة s (x,y) فى 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 $n^2(r) = n_0^2(1 - \delta^2 r^2 + C_4 \delta^4 r^4 + C_6 \delta^6 r^6 + \ldots)$
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 μm
Cherin *et al* (1974)	Interferometric slab method using a Mach-Zehnder system (Leitz interference microscope)	Refractive index measurement of three Corning multimode optical fibres
Burrus and Standley (1974)	Interferometric slab method	Viewing refractive index profiles and small-scale inhomogeneities in glass optical fibres
Burrus *et al* (1973)	Interferometric slab method	Refractive index profiles of some low-loss multimode optical fibres
Stone and Burrus (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 $0.5 < \lambda < 1.9$ μm with accuracy of 1 part in 10^5
Wonsiewicz *et al* (1976)	Interferometric slab method	Quick determination of index profiles by machine aided method for the interpretation of interferograms
Presby *et al* (1978)	Interferometric slab method using a two-beam single-pass interference microscope	Automatic index profiling
Shiraishi *et al* (1975)	Mach-Zehnder with light passing perpendicular to fibre axis	Index profile of graded-index fibres
Marhic *et al* (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 *et al* (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 *et al* (1979)	Transverse profile automated with computer controlled video analysis	Index profile of graded-index
Presby *et al* (1979)	Rapid automatic index profiling of whole fibre samples	Index profile of graded-index

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

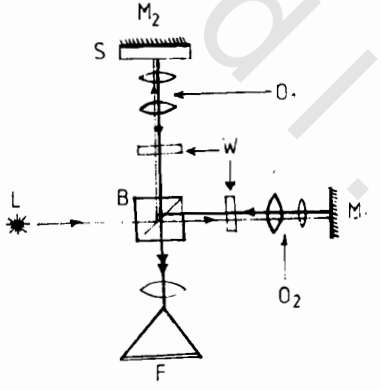
$$n (x,y) = n_2 + \frac{\lambda}{2\pi} \frac{2\pi S (x,y)}{D t} = n_2 + \frac{\lambda S (x,y)}{D t} \qquad (5.19)$$

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

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

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

وتكون أقل قيمة لمقدار S (x,y) يمكن فصلها فراغيا spatial resolution بهذه الطريقة هى 0.7 μm ودرجة الدقة فى تعيين Δn تساوى $\pm 5x\ 10^{-4}$ (Martin, 1974) .



شكل (رقم ٥/١٥) : النظام البصرى لقياس بروفيل معامل انكسار الألياف باستخدام مقياس التداخل الضوئى القائم على نظام ميكلسون . حيث L المصدر الضوئى ، B مجزئ الحزمة الضوئية ، O_2, O_1 شيئيتا الميكروسكوب ، M_2, M_1 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 إتلافيه 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 .

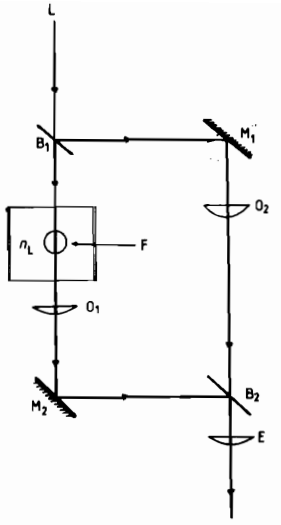
٥/٤/٢- تعيين بروفيل معامل الانكسار للألياف البصرية باستخدام هدب التداخل الناتجة من سقوط الضوء مستعرضا على الشعيرة :

Index profile of optical fibres from their interference patterns

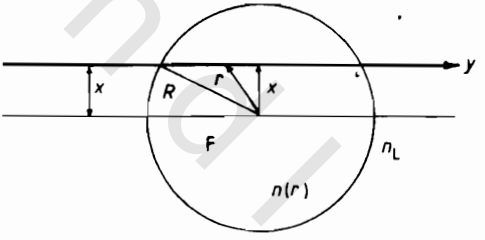
تم تطبيق طريقة التداخل الضوئى الثنائى على الألياف بسقوط الضوء مستعرضا أى عموديا على محور الشعيرة . وفى هذه الطريقة توضع العينة فى أحد مسارى الضوء لمقياس التداخل الضوئى لماخ وزندر Mach-Zahnder ، ويوضح الشكل (١٦/٥) النظام البصرى المستخدم .

وتعبر الأشعة الشعيرة عمودية على محورها . وتغمس الشعيرة فى محلول matching liquid معامل انكساره n_L يساوى معامل انكسار قشرة الشعيرة n_{clad} تقريبا . وفى هذه الحالة تمر الأشعة دون 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 .

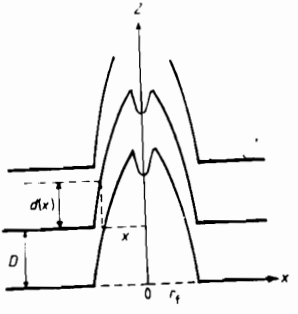
والشكل رقم (١٨/٥) لشعيرة منتظمة حول محورها ، حيث تمر الأشعة مستقيمة خلال هذه الشعيرة وتكون إزاحة الهدبة كما هو موضح بهذا الشكل .



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



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



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

وتعطى المعادلة رقم (٥-٢١) الزيادة فى إزاحة طور الأشعة excess phase shift :

$$Q(x)\ 2K \int_{x}^{R} \frac{\Delta n(r)\, r\, dr}{(r^2 - x^2)^{\frac{1}{2}}} \qquad (5.21)$$

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 هى المسافة بين هدبتين متوازيتين متتاليتين ، d هى المسافة التى اختيرت ليتم عندها القياس . وبذلك يكون :

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

وهى صيغة تكامل أبل Abel's integral ، ويمكن أن تحل بسهولة بتعاكس أبل Abel's inversion كما سيأتى ذلك في الفصل الحادى عشر .

٥/٤/٣- طريقة التداخل الضوئى التفاضلى : Differential interferometry

طور إيجا ومجموعته "Iga et al" عام (١٩٧٨) مقياس التداخل الضوئى لماخ وزندر بإضافة جهاز قص shearing device يبنى داخل ميكروسكوب التداخل الضوئى ، ويوضح الشكل (٥/١٩) مسار الضوء فى مقياس التداخل الضوئى ، ويمكن ملاحظة نموذج التداخل الضوئى الناتج من شعاعين مر كلاهما بالشعيرة . ويزاح أحد الشعاعين جانبا لمسافة صغيرة s . ومايظهر كإزاحة الهدبة هو الفرق فى الطور بين الشعاعين اللذين يمران خلال الشعيرة عند x ,x+s ، كما هو موضح بالشكل (٥/٢٠) .

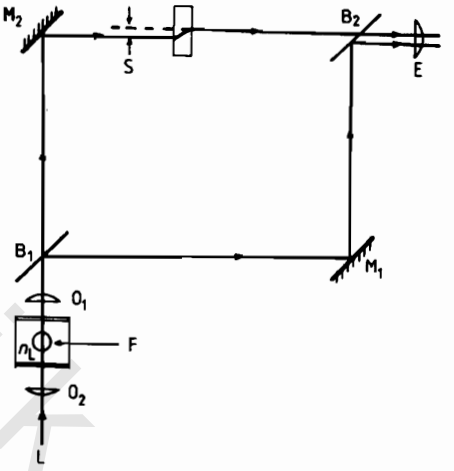
$$Q_s = Q(x + s) - Q(x)$$

وعندما تكون قيمة s صغيرة :

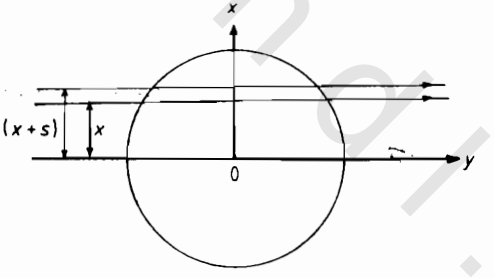
$$Q_s = \lim_{s \to 0} \frac{Q(x + s) - Q(x)}{s}\, s = \frac{d(Q(x))}{dx}\, s. \qquad (5.23)$$

نحصل على الإزاحة ds (x) من المعادلة :

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



شكل (رقم ٥/١٩) : مقياس التداخل لماخ وزندر القاص المستخدم فى التداخل الضوئى التفاضلى (مكوناته كما فى الشكل (٥/١٦) ويمثل S جهاز القص shearing .



شكل (رقم ٥/٢٠) : إسهام شعاعين فى تكوين هدب التداخل التفاضلى النتائج من القص .

وبمقارنة المعادلة الأخيرة بمعادلة إزاحة الطور الإضافية فى قرص عازل dielectric ذى 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 (٥-٢٥) ، وفى هذه الحالة تكون طريقة التداخل الضوئى التفاضلى differential (shearing) هى طريقة مباشرة إذا ماقورنت بالمعادلة (٥-٢٢) .

$$\Delta n\,(r) = -\frac{\lambda}{\pi D s}\int_{r}^{R} d_s\,(x)\,\frac{dx}{(x^2 - r^2)^{\frac{1}{2}}} \qquad (5.25)$$

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 *Przeglad Wtókienniczy* **35** 70

——— 1981 b *Przeglad Wtókienniczy* **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 Kokubum 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. IEEC Japan* E60 702
—— 1978 *Trans. IECE Japan* E**61** 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 *Przeglad Wtókienniczy* **19** 261
—— 1971 *Opt. Acta* **18** 661
—— 1972 *J. Microsc.* **96** 309
—— 1982 *Mikroskopia Optyczna* (Warszawa: Panstwowe 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 *Texile 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

obeikandl.com