الفصـــل الرابع

أساسيات التداخل الضوئى

Principles of Interferometry

١/٤- مقدمة :

سوف نتناول هنا حالة التغير فى السعة وفى الطور للموجات عند نقطتين P_1, P_2 فى مجال موجى wavefield نتجت عن مصدر ضوئى ممتد ينبعث عنه أطوال موجية ليست متساوية تماما إنما تتمركز حول طول موجى واحد extended quasi-monochromatic source ، ونفترض أن هذا المجال الموجى موجود فى الفراغ ، وأن P_1, P_2 تبعدان عن بعضهما بمسافة تساوى عدة أطوال موجية . فإذا كانت النقطتان P_1, P_2 قريبتين من بعضهما فإن التغيرات فى سعة الموجات عند هذه النقط وكذلك التغيرات فى الطور ترتبط كل منها بالأخرى . ومن المنطقى أن نفترض أن النقطتين P_1, P_2 قريبتان من بعضهما إلى الحد الذى يكون فيه الفرق فى المسار (PD) من النقطة S حيث $(PD = SP_1 - SP_2)$ يكون صغيرا بالمقارنة بالطول الموجى المتوسط $\bar{\lambda}$، وتكون التغيرات عند P_1, P_2 متساوية عمليا . وكذلك يوجد علاقة بين هذه التغيرات حتى فى الحالة التى تكون النقطتان P_1, P_2 منفصلتين بمسافة أكبر ، بشرط أن يكون فرق المسار PD لجميع النقط الموجودة على المصدر الضوئى لايزيد عن طول الترابط l_c Coherent length .

$$l_c = C \Delta t = \frac{C}{\Delta \upsilon}$$

لكن:

$$\frac{\Delta \upsilon}{\upsilon} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda}$$

$$\Delta \upsilon = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \upsilon = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \cdot \frac{C}{\lambda} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda^2} .C$$

$$I_c = \frac{(\bar{\lambda})^2}{\Delta \lambda}$$

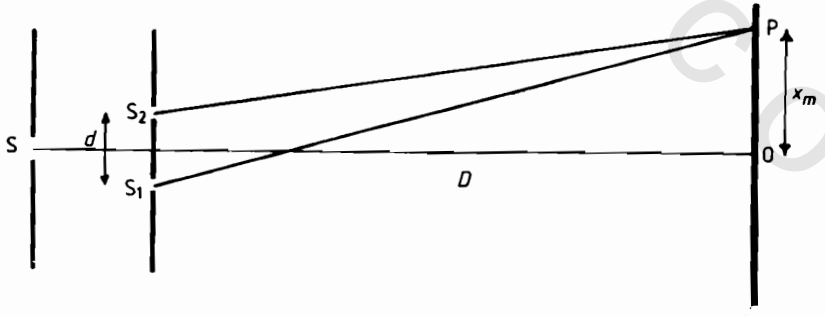
حيث Δt زمن الترابط ، $\Delta \upsilon$ اتساع خط الطيف بوحدات التردد .

وبذلك نصل إلى مفهوم منطقة الترابط region of coherence حول أى نقطة P فى المجال الموجى .

وحتى نستطيع أن نجد وصفا مناسبا لمجال موجى نتج عن مصدر ضوئى محدود ينبعث عنه أطوال موجية متعددة ، فإنه من المرغوب فيه إدخال مقياس للارتباط المتبادل الذى يوجد بين الذبذبات عند النقط المختلفة P_1, P_2 فى المجال . ولابد أن نتوقع أن هذا المقياس يرتبط ارتباطا وثيقا بحدة هدب التداخل الضوئى التى تحدث عند التقاء الذبذبات الناتجة من نقطتين . وأن نتوقع كذلك تكون هدب تداخل ضوئى حادة عندما يكون الارتباط المتبادل بينهما كبيرا . مثال ذلك : عندما يخرج الضوء عند P_1, P_2 من مصدر ضوئى صغير جدا له مدى طيفى محدود ، ونتوقع عدم تكون هدب تداخل ضوئى فى غياب هذا الارتباط المتبادل بين النقطتين ، ومثال ذلك : عندما تستقبل P_1, P_2 ضوء من مصدرين مختلفين .

٢/٤- تقسيم جبهة الموجة : Division of wavefront

توجد عدة طرق لتقسيم جبهة الموجة إلى جزئين وإعادة اتحادهما عند زاوية صغيرة . ومن أمثلة ذلك : تكوين هدب التداخل الضوئى فى تجربة الشق المزدوج ليونج Young's experiment ومرآة فرنل Fresnel mirror ومنشور فرنل الثنائى Fresnel biprism، وفى جميع هذه الحالات يتبع الشعاعان المنبعثان من نفس المصدر مسارين مختلفين ، يختلف طول أحدهما عن الآخر ، ويسمح لهما بالالتقاء مرة أخرى (شكل رقم ١/٤) .



شكل رقم (١/٤) : تجربة الشق المزدوج ليونج . S مصدر ضوئى وحيد الطول الموجى .

ونحصل على فرق الطور δ بين شعاعين من المعادلة :

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ (Path difference)}$$

ويكون فرق المسار مساويا $m\lambda$ عند ($\delta = 2m\pi$) حيث m تساوى صفرا ، ١، ٢ ، ٣، ....

وتتكون هدب تداخل ضوئى مضيئة ، وتظهر على الحائل (شكل رقم ١/٤) على مسافة X_m من النقطة O إذ :

$$X_m = m\lambda \ D/d$$

حيث d هى المسافة بين الفتحتين S_1, S_2, D هى المسافة بين الحائل وهاتين الفتحتين.

وفى كل مقاييس التداخل الضوئى المذكورة سابقا يتبع توزيع الشدة الضوئية قانون مربع جيب التمام cosine square law ، وتكون الهدب على مسافات متساوية من بعضها وهى هدب لايقتصر تكونها على مستوى واحد فى الفراغ أى تتكون فى أى مستوى أمام الفتحتين وينص قانون مربع جيب التمام على الآتى :

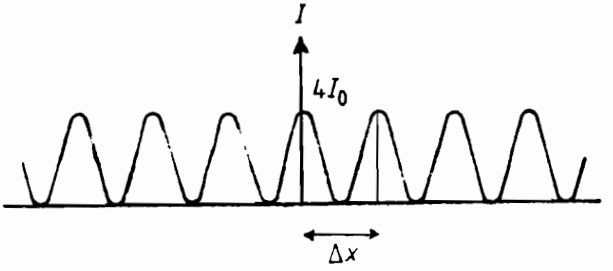
$$I = 4 I_o \cos^2 \delta/2$$

حيث I_o هى شدة كل من الموجتين . ويوضح الشكل رقم (٢/٤) توزيع الشدة الضوئية الناتجة من التداخل الضوئى الثنائى .

وتتكون هدب التداخل الضوئى المعتمة عند :

$$X = (m + \frac{1}{2}) \lambda \ D/d$$

والمسافة بين كل هدبتين مضيئتين أو معتمتين متتاليتين (Δx) كما هو موضح فى الشكل رقم (٢/٤) .

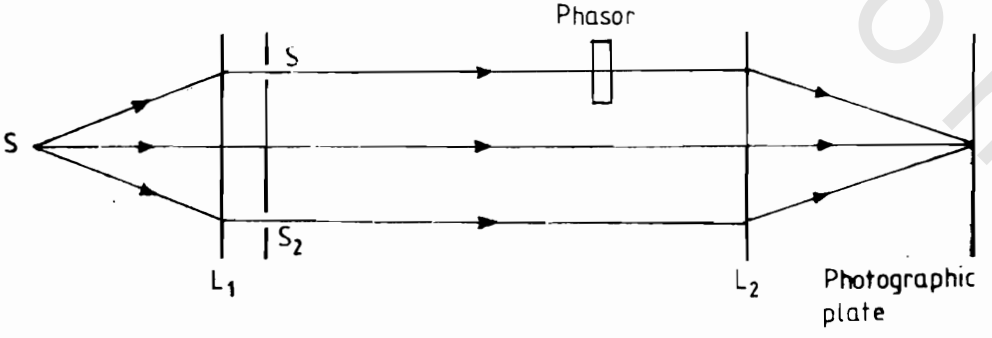


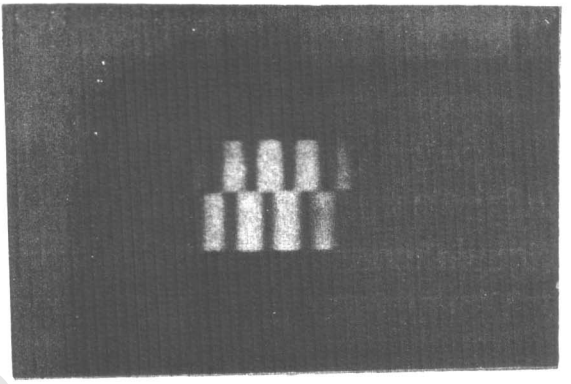
شكل رقم (٢/٤) : توزيع الشدة الضوئية فى حالة هدب التداخل الضوئى الثنائى .

وتنقص درجة تباين هدب التداخل الضوئى visibility of fringes بزيادة فرق المسار الضوئى ، حيث إن المصدر لايمكن أن يكون أحادى طول الموجة تماما . وتختفى درجة التباين visibility عند رتب التداخل الضوئى التالية بعيدا عند النقطة O (شكل رقم ١/٤) عندما يزيد فرق المسار الضوئى عن طول الترابط coherent length لهذا المصدر الضوئى .

ويوجد مثال آخر لهدب التداخل الضوئى الناتجة من تقسيم جبهة الموجة وذلك فى جهاز رالى Rayleigh's refractometer حيث ينقسم الضوء الصادر من مصدر ضوئى خطى linear source وتتكون حزمة متوازية من الأشعة بواسطة العدسة L_1 وتنقسم جبهة الموجة عند مرورها بفتحتين S_1, S_2 بينهما مسافة ، ويتبع الشعاعان مسارين متساويين تماما ، ولكن أحد هذين الشعاعين يمر فى وسط phasor وينتج عن ذلك حدوث فرق فى الطور بين الشعاعين ، وتتكون هدب تداخل ضوئى على شكل خطوط مستقيمة فى المستوى البؤرى للعدسة L_2 كما هو موضح فى الشكل رقم (٣/٤) . ولتحديد مركز هذا النظام يستخدم مصدر ضوئى أبيض white light source للحصول على الهدبة الصفرية zero order fringe وتظهر المجموعتان وتسجلان ، وفى نفس الوقت يغطى كلٌ منهما نصف مجال الرؤية ، كما هو موضح فى الشكل رقم (٤/٤) .

شكل رقم (٣/٤) : جهاز رايلى الذى يقوم على التداخل الضوئى





شكل رقم (٤/٤) : هدبة التداخل ذات الرتبة الصفرية (لتفسير تكونها يرجع إلى الأساس النظرى)

٣/٤ تقسيم السعة : Division of amplitude

لطريقة التداخل الضوئى بتقسيم السعة نفس الأهمية التى لطريقة تقسيم جبهة الموجة وذلك فى التطبيقات العملية . وعندما يسقط شعاع من الضوء على شريحة رقيقة معامل انكسار مادتها n وسطحاها متوازيان وموضوعة فى الهواء ، فإن جزءا من سعة الموجة الساقطة ينعكس عند السطح الأول أى هواء / شريحة ، وينفذ الجزء الباقى خلال الشريحة بعد انكساره ليقابل السطح الآخر للشريحة ، كما هو موضح فى الشكل رقم (٤-٥) . وعند النقطة B يحدث انعكاس عند السطح الفاصل شريحة / هواء ، وينفذ جزء من الضوء على امتداد الشعاع BE . ويمر جزء آخر خلال الشريحة ليصل إلى السطح العلوى حيث يحدث انعكاس عند السطح الفاصل شريحة / هواء ، وينفذ جزء عند النقطة C . ويترك الشعاعان السطح العلوى عند النقطتين C, A متوازيين ، وعند تجميعهما عند المستوى البؤرى لعدسة تنتج هدب تداخل ضوئى بالانعكاس حيث إنهما مترابطان . وكذلك فإن الشعاعين اللذين يتركان السطح السفلى عند النقطتين D, B يمكن تجميعهما عند المستوى البؤرى لعدسة لتكوين هدب تداخل ضوئى ثنائى عند النفاذ ، حيث إنهما أيضا مترابطان .

افرض أننا حسبنا فرق المسار الضوئى بين الشعاعين النافذين المتجمعين فى المستوى البؤرى للعدسة . فعندما يصل الشعاع المنكسر إلى النقطة B ينقسم إلي جزئين ، أحدهما يمر فى الاتجاه $\xrightarrow{BE}$ والآخر يأخذ المسار $\xrightarrow{BCD}$ ، وحيث إن الموجة تصل إلى النقطة D فإن الشعاع الآخر $\xrightarrow{BE}$ يصل إلى النقطة 'D حيث :

$$BD' = nBC + n\,CD$$

وهذان الشعاعان كانا فى البداية متحدين فى الطور وينبعان من النقطة B . وباستخدام عدسة يمكن تجميع هذين الشعاعين بطور كل منهما فى المستوى البؤرى لهذه العدسة . وبالتالى فإننا نعنى بفرق الطور عند النقطتين E,D . وحيث إن الموجتين عند D', D لهما نفس الطور ، فإن فرق الطور بين الموجتين عند النقطتين E, D تعطيه المعادلة الآتية ، كما يتضح من الشكل رقم (٤/٥) :

$$\frac{2\pi}{\lambda} ED' = \frac{2\pi}{\lambda} (nBC + nCD - BE) = \frac{2\pi}{\lambda} 2nt \cos r$$

وفى حالة هدبة مضيئة فى نظام التداخل الضوئى عند النفاذ يكون :

$$\frac{2\pi}{\lambda} 2nt \cos r = 2\,m\pi$$

$$m\lambda = 2nt \cos r$$

حيث m هى رتبة التداخل الضوئى .

وحيث إنه فى نظام التداخل الضوئى عند الانعكاس يحدث تغير فى الطور مقداره (π) درجة عند الانعكاس من السطح الفاصل هواء / شريحة ، فإن الشعاع المنعكس عند A يعانى تغيرا فى الطور مقداره π بالنسبة للشعاع النافذ إلي B والمنعكس عندها شريحة / هواء (film / air) .

ويكون شرط تكون هدبة مضيئة عند الانعكاس هو :

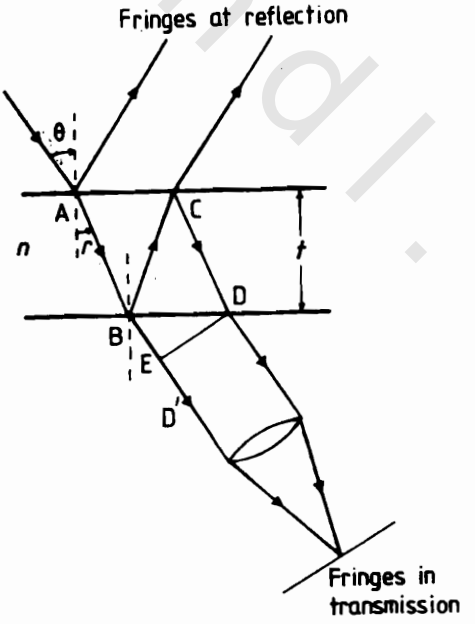
$$\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda = 2nt \cos r.$$

ويكون التغير فى الطور عند الانعكاس عند السطح الفاصل شريحة / هواء مساويا الصفر . وبإضاءة هذه الشريحة بضوء أحادى طول الموجة تتكون هدب تداخل ضوئى ذات رتب متتابعة عندما يكون سمك الشريحة t ثابتا ولكن بتغير زاوية السقوط Θ . وهذه الهدب متساوية فى قيم الزاوية Θ أى هدب متساوية الميل fringes of equal inclination ، وهى محددة الموقع وتتكون فى مستوى فى مالانهاية ، ويمكن تجميعها فى المستوى البؤرى لعدسة

، كما هو موضح فى الشكل رقم (٤/٥) . وعندما تكون Θ ثابتة فلابد من تغير قيمة t للحصول على هدب تداخل ضوئى متتابعة الرتبة . وتسمى هذه الهدب بهدب تساوى السمك fringes of equal thickness ، وهى محددة الموقع فى الفراغ بالقرب من مقياس التداخل . وفى حالة إسفين ضوئى هوائى air wedge مضاء بحزمة متوازية من الأشعة أحادية طول الموجة وبزاوية سقوط مقدارها Θ تتكون هدب تداخل ضوئى على هيئة خطوط مستقيمة توازى حافة الإسفين الضوئى . وفى حالة السقوط العمودى تتكون الهدب فى مستوى محدد الموقع وقريب جدا من الإسفين الضوئى .

وبصورة عامة تكون الهدب متساوية (nt) إذا كانت n تعتمد على الموقع وهى الهدب متساوية السمك البصرى fringes of equal optical thickness .

ويوجد مثال آخر على هدب التداخل الضوئى الناتجة من تقسيم السعة وذلك في مقياس التداخل الضوئى لميكسون Michelson interferometer . وفيه يتداخل شعاعان نتجا من تقسيم السعة بعد أن ينعكسا على مرآتين مستويتين ليأخذا فى النهاية نفس المسار ليلتقيا وتتكون هدب التداخل الضوئى .



شكل رقم (٤/٥) : هدب التداخل المتكونة عند النفاذ وعند الانعكاس الناتجة من تقسيم السعة .

٤/٤- تداخل الضوء المستقطب فى مستوى : Interference of plane polarised light

اكتشف " Fresnel and Arago " - انظر Tolansky, 1973 - بالتجربة القواعد المطلوبة لحزمتين ضوئيتين مستقطبتين لكى تعطى هدب تداخل وهذه القواعد هى :

أ- لايمكن أن نحصل على هدب تداخل ضوئى من شعاعين من الضوء مستقطبين فى مستويين متعامدين على بعضهما .

ب- يمكن أن نحصل على هدب تداخل ضوئي من شعاعين من الضوء مستقطبين فى مستويين متوازيين .

جـ- تتداخل حزمتان ضوئيتان مستقطبتان فى نفس المستوى إذا انبعثتا من نفس المصدر ، أى أنهما مترابطتان coherent .

سنتناول هنا حالات مبسطة لها علاقة بهذا الموضوع . والحالة الأولى هى حالة شريحة ذات مسطحين متوازيين من (١) مادة أحادية المحور uniaxial material و (٢) مادة ثنائية المحور biaxial material والحالة الثانية هى حالة الألياف الطبيعية والتركيبية التى لها انكسار مزدوج birefringence .

وينتج من القاعدة (ب) أن الأشعة المتعددة المستقطبة وذات الذبذبات فى نفس المستوى يمكن أن تتداخل لتعطى هدب تداخل ضوئى متعدد .

١/٤/٤- حالة بلورة أحادية المحور قطعت عمودية على المحور البصرى :

The case of a uniaxial crystal cut perpendicular to the optic axis :

إذا سقط شعاع على بلورة أحادية المحور ، فإنه يخرج منها منفصلا إلى شعاعين مستقطبين متعامدين - ماعدا حالة الشعاع الذى يمر على امتداد محور البلورة - :

أولا : الشعاع المعتاد أو المألوف ordinary ray ، وفيه تتذبذب مركبة المتجه الكهربى elec-tric vector عموديا على مستوى السقوط plane of incidence، ويكون معامل انكساره n_o ثابتا ولايعتمد على اتجاه الانتشار .

ثانيا : الشعاع الشاذ أو غير المألوف extra ordinary ray ، وفيه تتذبذب مركبة المتجة الكهربى فى مستوى سقوط الضوء ، ويتغير معامل الانكسار n'_e مع زاوية السقوط ، ويحتفظ معامل الانكسار بقيمة محددة n_e للضوء الساقط عموديا على المحور البصرى التى تعطيها المعادلة الآتية لاية زاوية انكسار r_e

$$\frac{1}{n'^2_e} = \frac{\cos^2 r_e}{n_0^2} + \frac{\sin^2 r_e}{n_e^2}.$$

وتعطى الأشعة المنعكسة المتعددة والناتجة من كل من الشعاعين المنكسرين مجموعة هدب تداخل ضوئى ، وإذا كانت δ_1, δ_2 هما فرق المسار فى الحالتين فإن :

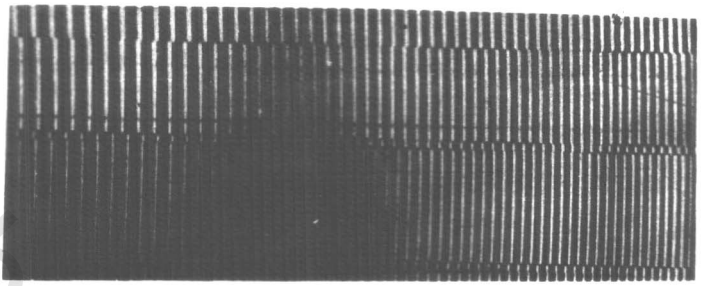
$$\delta_1 = 2n_0 t \cos r_0$$

$$\delta_2 = 2n'_e t \cos r_e$$

وذلك بإهمال الانحراف فى المعادلة الأساسية .

وعند مركز كل من النظامين أى أنه فى حالة Θ = صفر ، $(n_e' = n_o)$ لايحدث انفصال بين المكونين الذين لهما نفس رتبة التداخل والذين ينتميان لكل من النظامين . وبزيادة الزاوية Θ نجد أن قيمة n_e' تبتعد بانتظام عن n_o ، ويحدث الانفصال عند قيمة مضيئة لزاوية مقدارها Θ .

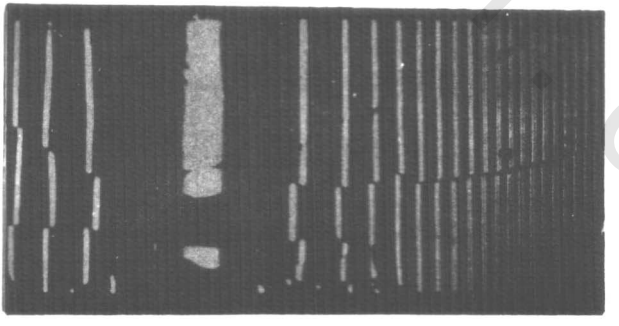
وتتكون هدب التداخل الضوئى بسهولة باستخدام شريحة رقيقة تم انفلاقها حديثا من نوع جيد من فولوجوبايت الميكا ، وتفضض الميكا بتغطية كل من سطحيها بطبقة رقيقة من الفضة انعكاسيتها R تساوى ٨٠٪ وذلك بالتبخير الحرارى . ويتم الحصول على هدب تساوى الرتبة اللونية – انظر Tolansky, 1948 – الموضحة بالشكل رقم (٦/٤) ، باستخدام مطياف الانحراف الثابت . ونلاحظ عدم وجود ازدواجية لهدب التداخل التى تنتج عن الانكسار المزدوج ، يؤكد ذلك أن عينة ميكا الفولوجوبايت يمكن أن تعتبر بلورة أحادية المحور uniaxial crystal.



شكل رقم (٦/٤) هدب تساوى الرتبة اللونية الناتجة من شريحة من بللورة أحادية المحور

هدب تداخل تساوى المماس :

يتم تشكيل العينة بثنيها لكى تصبح على شكل نصف إسطوانة ، ويسقط عليها حزمة متوازية من الضوء أحادى طول الموجة ، وتتكون هدب على شكل خطوط مستقيمة توازى محور هذه الإسطوانة على لوح حساس موضوع عموديا على محور الإسطوانة مارا بالمركز o . ونلاحظ هنا أن زوايا سقوط الأشعة المتوازية تتغير من صفر درجة عند المركز إلى زاوية تقارب ٩٠° ، وهذه هى هدب تساوى ميل المماس fringes of equal tangential inclination. - Tolansky and Barakat, 1950 . والشكل رقم (٧/٤) يوضح الهدب الناتجة .



شكل رقم (٧/٤) : هدب تساوى ميل المماس الناتجة من شريحة بللورة أحادية المحور

وبوضع منشور نيكول Nicol prism فى مسار الشعاع الساقط يمكن إثبات أن مجموعتين من الهدب تتذبذبان فى مستويين متعامدين ، وتتكون المجموعة الخارجية بالشعاع

الذي يتذبذب متجهة الكهربى عموديا على مستوى السقوط أى الشعاع المعتاد ، وذلك لأن ميكا الفولوجوبايت عبارة عن بلورة سالبة negative crystal أى أن :

$$n_o > n_e \quad \text{(Barakat, 1958)}$$

٢/٤/٤- حالة بلورة ثنائية المحور قطعت عمودية على اتجاه منصف الزاوية الحادة بين المحورين

The case of a biaxial crystal cut perpendicular to the acute bisectrix :

حيث إن أى شعاع يسقط على بلورة ينفصل عادة إلى شعاعين مستقطبين فى مستويين متعامدين وينتشران بسرعتين مختلفتين قليلا عن بعضهما وفى اتجاهين مختلفين أيضا ، فإن الأشعة المتعددة والمتكونة نتيجة انعكاس كل من الشعاعين تكون مجموعتين من هدب التداخل الضوئى. ويفرض ان δ_1, δ_2 هما فرق المسار الضوئى فى حالة النظامين ينتج أن :

$$\delta_1 = 2n^{\perp} t \cos r'$$

$$\delta_2 = 2n^{\parallel} t \cos r''$$

حيث :

$$\sin \Theta = n^{\perp} \sin r' = n^{\parallel} \sin r''$$

$n^{\perp}$, $n^{\parallel}$ هما معاملا الانكسار فى حالة الشعاعين وعند زاوية سقوط معينة Θ .

افرض أننا أخذنا فى الاعتبار المستوى المحتوى على المحور البصرى ، فإن قطاع سطح الموجة بهذا المستوى يتكون من دائرة نصف قطرها n_m وقطع ناقص محوراه هما n_p , n_g والقطاع الدائرى :

$$\delta_1 = 2n_m t \cos r$$

وكذلك :

$$\delta_1^2 = 4t^2 \left(n_m^2 - \sin^2 \Theta \right) \qquad (4.1)$$

والقطاع على هيئة قطع ناقص :

$$\frac{1}{n^2} = \frac{\cos^2 r}{n_g^2} + \frac{\sin^2 r}{n_p^2}$$

وذلك فإن :

$$n^2 = n_g^2 - \sin^2 \Theta \left(\frac{n_g^2}{n_p^2} - 1 \right) \qquad (4.2)$$

وكذلك

$$\delta_2^2 = 4t^2 \left(n_g^2 - \frac{n_g^2}{n_p^2} \sin^2 \Theta \right) \qquad (4.3)$$

وبذلك تتكون مجموعتان من هدب التداخل الضوئى لايعتمد إحداهما على الأخرى ، مستقطبين فى اتجاهين متعامدين . تتبع المجموعة الأولى المعادلة رقم (١/٤) وهى ذات معامل انكسار n_m ثابت القيمة ، وتتذبذب عموديا فى مستوى السقوط . وتتبع المجموعة الثانية المعادلتين رقم (٢/٤) ، (٣/٤) بمعامل انكسار n متغير مع زاوية Θ كما هو فى المعادلة رقم (٢/٤) ومعامل الانكسار n يساوى n_g عندما تكون Θ = صفر حيث :

$$n_g > n_m > n_p$$

وبزيادة Θ تقل قيمة n وتأخذ القيمة n_m

عند زاوية سقوط تساوى القيمة الظاهرية لزاوية المحور الضوئى E التى تحقق المعادلة الآتية :

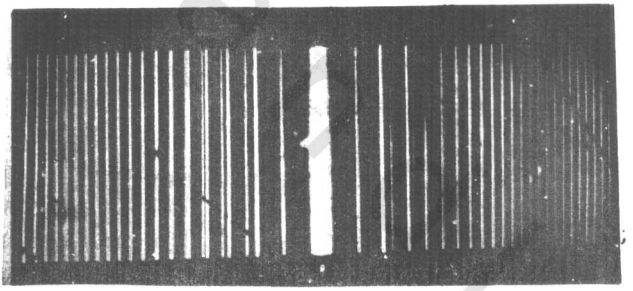
$$\sin E = n_p \left(\frac{n_g^2 - n_m^2}{n_g^2 - n_p^2} \right)^{1/2}$$

وتستمر قيمتها فى النقصان حتى تصل فى النهاية إلى القيمة n_p عند $(\Theta = \pi/2)$

يعنى ذلك أنه بدءا بزوايا سقوط صغيرة ، تكون الهدبة الخارجية هى التى تتذبذب فى مستوى السقوط ، ويقل الفرق بكل زوج من الهدب ينتمى لمجموعتى الهدب وله نفس رتبة التداخل ، يقل مع الزاوية Θ إلى أن يحدث تطابق عند $\Theta = E$. وبزيادة زاوية السقوط Θ عن E يبدأ الفرق فى الزيادة لكنه تكون الهدبة الداخلية هى التى تتذبذب فى مستوى السقوط .

وعلى الجانب العملى تختار عينة جيدة من مسكوفيت ميكا moscovite mica ، ويعين المستوى الذى يحتوى على المحور البصرى باستخدام ميكروسكوب مستقطبpolarising microscope ، وتفلق شريحة رقيقة من هذه الميكا وتفضض من الوجهين ، وتشكل بعد ذلك علي هيئة إسطوانة فى اتجاه تقاطع المستوى الذى يحوى المحور الضوئى البلورة مع سطح الانفلاق لها .

ويبين الشكل رقم (٤-٨) هدب تساوى ميل المماس equal tangential inclination ، ويكون النظامان مستقطبين فى مستويين متعامدين . وقبل حدوث التطابق بين الهدب تكون الهدبة الخارجية هى التى تنتمى إلى الشعاع الذى يتذبذب فى مستوى السقوط ، فى حين أنه بعد حدوث الانطباق تنتمى الهدب الداخلية إلى مثل هذا الشعاع الذى يتذبذب فى مستوى السقوط .



شكل رقم (٤/٨) : هدب تساوى ميل المماس المتكونة عند استخدام شريحة من بللورة ثنائية

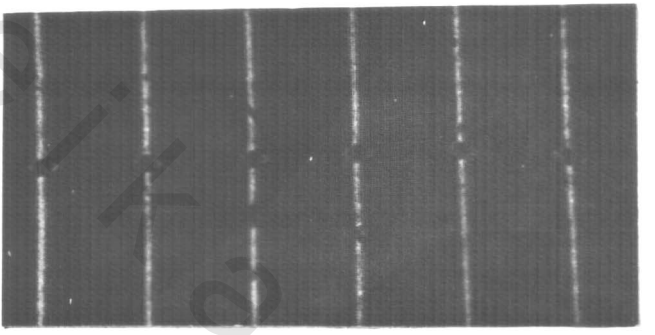
٤/٤/٣- حالة الألياف التركيبية ذات الانكسار المزدوج :

The case of synthetic fibre exhibiting birefringence :

عند غمر شعيرة من ألياف الاكريلان Acrilan fibres فى إسفين ضوئى مفضض Silvered wedge ، يحوى سائلا تم إضاءته باستخدام ضوء أحادى طول الموجة ، يسقط عموديا على مقياس التداخل الضوئى - فإنه تتكون هدب تداخل ضوئى عند النفاذ وعند الانعكاس .

ويبين الشكل رقم (٤-٩) هدب فيزو للتداخل الضوئى عند استخدام ضوء غير مستقطب وتظهر إزاحتان للهدبة الواحدة ، وذلك ناتج عن الانكسار المزدوج لألياف الاكريلان . Barakat and El-Hennawi, 1971-

ونذكر هنا هذا المثال فقط لتوضيح تداخل الموجات المستقطبة ، حيث إن الفصل السادس يتناول بالتفصيل طريقة تطبيق هدب التداخل الضوئى لتعيين معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف .



شكل رقم (٤/٩) هدب التداخل المتعدد عند النفاذ عبر شعيرة من ألياف الاكريلان

٤/٥- الهولوجرافيا والتداخل الضوئى الهولوجرافى :

Holography and holographic interferometry :

٤/٥/١- الهولوجرافيا : Holography

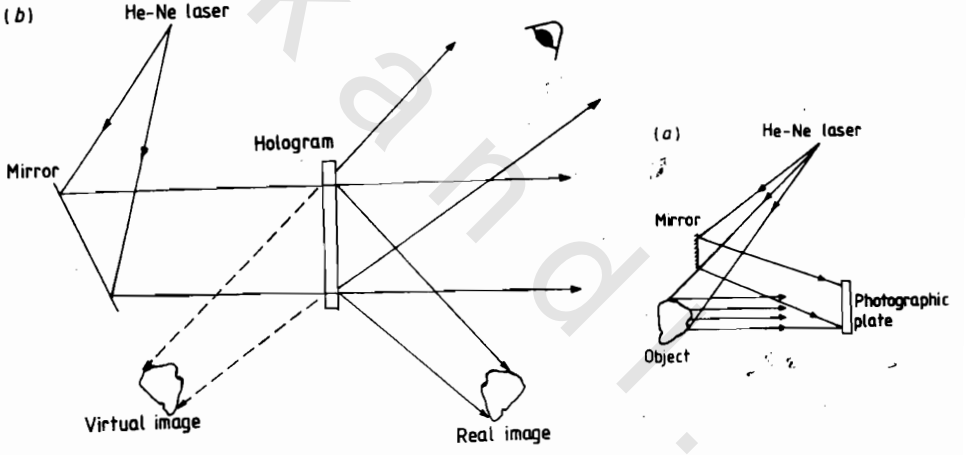
وضع « جابور Gabor » سنة ١٩٤٨ أسس الهولوجرافيا التى تسجل المعلومات الكاملة عن الموجة ، سعتها وطورها ، من المعروف أنه تسجل المعلومات عن سعة الموجة على الأفلام الحساسة كشدة ضوئية بينما تسجل معلومات طور الموجه عن طريق التراكب مع موجة مرجع مترابطة معها . وقد تم الحصول على الهولوجرام - الصور ذات الثلاثة أبعاد أو الصور المجسمة - عمليا عام (١٩٦٢) بعد اكتشاف أشعة الليزر . والهولوجرام هو نموذج للتداخل الضوئى يتكون من التقاء موجة حاملة للمعلومات عن الجسم مع موجة مرجع . ويبين

الشكل رقم (١٠/٤) النظام البصـــرى لتكوين الهولوجـرام . إذ تلتقى الموجـات ذات السـعة المركبة التى تترك الجسـم $A_O = a_O \exp(iQ_O)$ مع الشـعـاع المرجـع $A_r = a_r \exp(iQ_r)$ عند اللوح الحساس ، وتعطى المعادلة الآتية توزيع الشدة الضوئيـة $I(x,y)$ الناتجة :

$$I_{(x,y)} = |A_o + A_r|^2 = (A_o + A_r)(A_o^* + A_r^*)$$
$$= a_o^2 + a_r^2 + A_o A_r^* + A_r^* A_r$$

٤/٥/٢- التداخل الضوئى الهولوجرافى : Holographic interferometry

تنقسم تطبيقات الهولوجرافيا إلى قسمين أساسيين : أولهما يحتاج إلى تكون الصور فى ثلاثة أبعاد للرؤية بالعين ، والأخرى تستخدم فيها الهولوجرافيا كأداة للقياس .

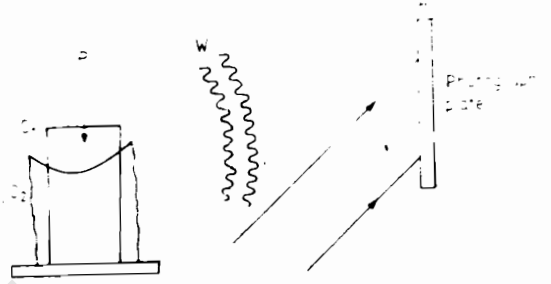


شكل رقم (١٠/٤) : رسم توضيحى لتسجيل الهولوجرام (a) وإعادة تكوين جبهة الموجة (b)

وعندما ترى العين صورة جسم فى الثلاثة أبعاد نجد الهولوجرام يسجل التفاصيل الدقيقة عن الجسم مثل الشقوق والحواف وخشونة السطوح ذات بعد حوالى ١ ميكرومتر – انظر Denisyuk 1978 .

ويعتبر التداخل الضوئى الهولوجرافى - holographic interferometry- واحد من أهم تطبيقات الهولوجرافيا التى تستخدم كأداة Ostrovsky et al. 1980, &Vest, 1979-

للقياس ، ويقدم الشكل رقم (١١/٤) الفكرة العامة عن هذه الطريقة ، ويستخدم فيها نفس اللوح الحساس H لتسجيل هولوجرامين للجسم أحدهما فى وضعه الأول O_1 والثانى فى وضعه الأخير O_2 ، ومثال ذلك نجده فى جسم تم تشويهه تحت تأثير إجهاد p .



شكل رقم (١١/٤) : يوضح تسجيل الهولوجرام بطريقة التعريض الثانى

وفى طريقة التصوير ثنائى التعريض double-exposure technique يتكون هولوجرام للجسم قبل تشويهه ، وبعد التشويه يعرض الهولوجرام مرة أخرى للضوء الذى يصل إليه من الجسم فى وضعه الجديد ، وتكون النتيجة وجود موجات متراكبة وتكون هدب تداخل ضوئى تحمل معلومات عن الازاحات التى نتجت عن تشويه الجسم . أى التغير فى طول المسار الضوئى والتغير فى معاملات الانكسار – مثل الذى يحدث فى النفق الهوائى والعمليات المشابهة – يعطى نماذج تداخل ضوئى مماثلة . ويمكن إجراء قياس التغير فى المسافات بهذه الطريقة بدقة تصل إلى $\frac{١}{١٠}$ من الميكرومتر أو أقل .

ويجد التداخل الضوئى الهولوجرافى تطبيقات فى مجال الايروديناميكى aerodynamics حيث يستخدم فى دراسة سريان الموائع حول الأجسام المختلفة .

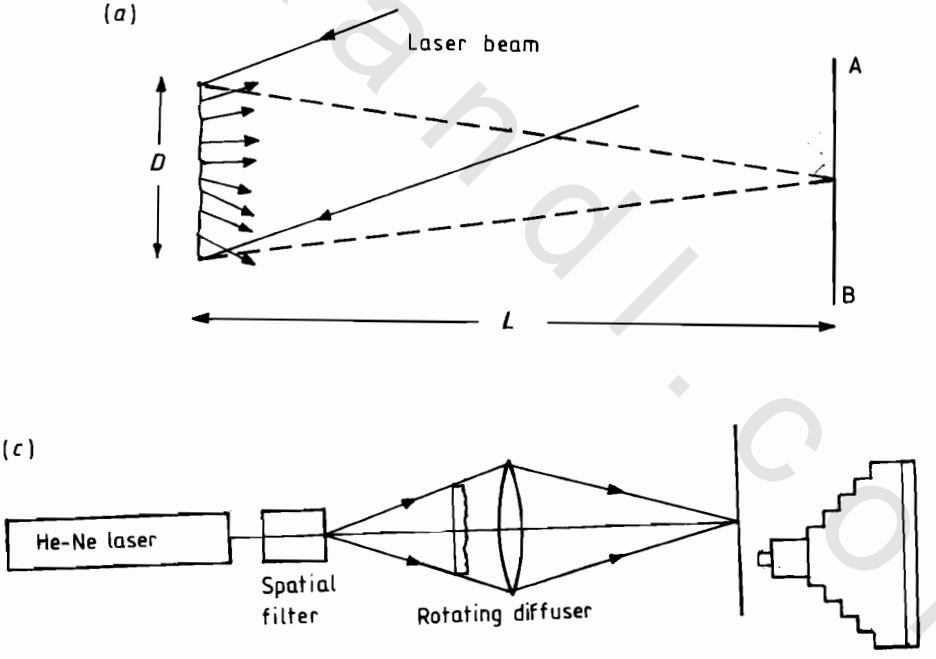
٦/٤– البقيعات الضوئية والتداخل الناتج عنها : Speckle and speckle interferometry

عندما يضاء سطح خشن بضوء مترابط ، فإن حزمة الأشعة المنعكسة تكون نموذجا عشوائيا random pattern من نقاط مضيئة ونقاط مظلمة تسمى بالبقيعات الضوئية (Françon, 1979) ، ويمكن تفسير هذه النماذج باستخدام مبدأ هيجنز Huygen's principle الذى ينص على أن شدة الضوء عند أى نقطة فى المجال

المضاء تكون نتيجة تداخل الموجات التى تنشتت من النقط المختلفة فى المنطقة المضاءة من السطح ، ويختلف طور هذه الموجات باختلاف الارتفاعات على السطح الخشن . ويعتمد النموذج الفراغى spatial pattern ودرجة تباين البقيعة الضوئية على النظام البصرى المستخدم لرؤيتها ، ودرجة ترابط الضوء المستخدم فى الإضاءة ودرجة خشونة السطح المضاء .

ويمكن ملاحظة البقيعات الضوئية عندما ينفذ شعاع ضوئى مترابط أحادى طول الموجة خلال جسم نصف شفاف ذى سطح خشن ، ويوضح الشكل رقم (١٢/٤) نظاما بصريا مبسطا لتسجيل البقيعات الضوئية عند الانعكاس . وتوجد هذه البقيعات فى كل الفراغ أمام الجسم الخشن والحائل AB . وتعطى المعادلة الآتية متوسط القطر $<\delta>$ للبقيعة الضوئية الناتجة من سقوط حزمة من الأشعة الضوئية ذات طول موجى λ على مساحة مستديرة قطرها D :

$$<\delta> = 1.2\ L/D$$



شكل رقم (١٢/٤) النظام البصرى المستخدم لتسجيل البقيعات الضوئية (لمزيد من التفاصيل يرجع الى المتن) .

حيث L هى المسافة بين السطح المضاء والحائل أو الفيلم الحساس .

وتعتبر العناصر المسئولة عن تشتت الضوء التى تساهم فى التداخل الضوئى المكون للبقيعات الضوئية عاملا هاما يحدد خصائص هذه البقيعات .

ولتصوير البقيعات الضوئية يضاء جسم له سطح خشن بحزمة من الأشعة الضوئية من مصدر مترابط مرتين ينتج عن ذلك نموذج للبقيعات المتكونة فى الصورة الأولى مزاحة عدة ميكرومترات قليلة عن الصورة الثابتة ، ويتوفردائما علاقة ترابط بين النموذجين . وتسمى هذه الطريقة بالتصوير ثنائى التعريض للبقيعات الضوئية ، Doube-exposure speckle photography ، وتستخدم بكثرة طرق تصوير البقيعات الضوئية والتداخل الضوئى الناتج عنها لقياس سرعات الموائع – Barker and Fourney, 1977, Iwata et al. 1978 Simpkings and Dudderer 1978, Barakat et al. 1987 .

وتستخدم أيضا فى قياس الإزاحات والإجهادات – Barker and Fourney, 1976 – وقد طبق "Barakat et al" (١٩٨٦) طريقة التصوير ثنائية التعريض للبقيعات الضوئية لقياس سرعة دوران سطح خشن على هيئة قرص من زجاج مصنفر . وفى هذه الطريقة يوجه شعاع ليزر نبضى (λ = ٦٩٤٠ أنجستروم) من خلال فتحة ضيقة ثم يتم زيادة مساحة مقطع حزمة الأشعة لتضئ مساحة ذات قطر ٢٠ ملليمتر على قرص الزجاج المصنفر الذى يدور حول مركزه . وتسقط نبضتان من أشعة الليزر على لوح حساس حبيباته دقيقة ذات قوة تحليل عالية ، والزمن بين كل نبضتين متتاليتين يساوى ٨٠٠ ميكروثانية . وبعد تظهير الفيلم الحساس يوضع فى نظام ترشيح وتظهر مجموعة من هدب يونج Young's fringes ، وتعطى المعادلة الآتية العلاقة بين المسافة S التى تفصل أى هدبتين متجاورتين والإزاحة :

$$X = D / S$$

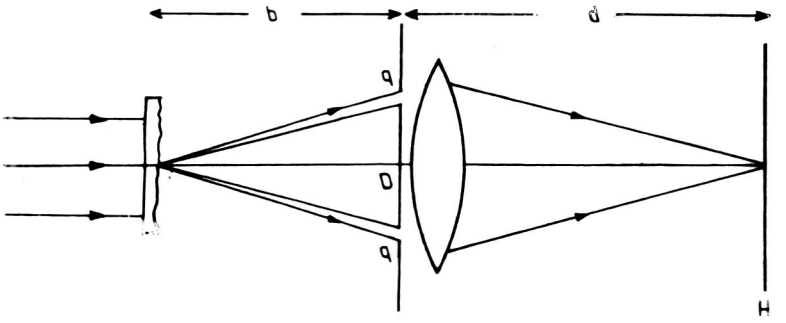
حيث D هى المسافة بين الفيلم الحساس والمستوى الذى يتم فيه الرؤية .

٢/٦/٤- تداخل البقيعات الضوئية : Speckle interferometry

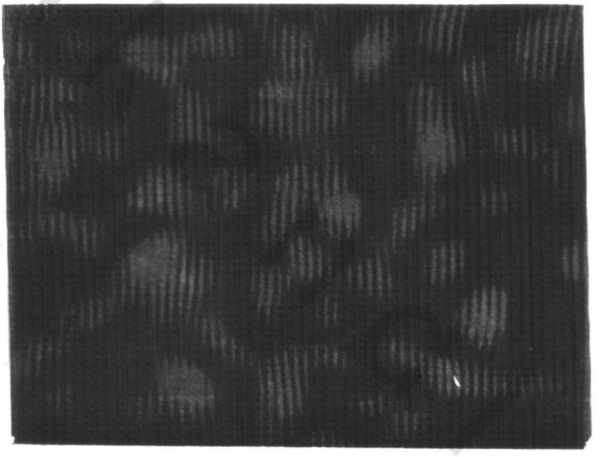
تم فى التجربة التى قام بها جونز ويكس (Jones and Wykes 1983) فى تداخل البقيعات الضوئية ، الحصول على هدب تداخل نتجت عن مجموعتان من البقيعات تربطهما

علاقة ترابط . نتج ذلك إما عن إزاحة بين المناطق المترابطة من نموذجى البقيعات أو وجود تغير فى الطور بينهما . ويبين الشكل رقم (١٢/٤/ب) النظام البصرى المستخدم فى تداخل البقيعات الضوئية ، وفيه يسمح لحزمة الأشعة المنبعثة من ليزر هيليوم – نيون بأن تسقط على سطح خشن من الزجاج المصنفر عن طريق ثقبين دائريين قطر كل منهما ٢مم تفصلهما مسافة قدرها ٢٠مم ، وتستخدم عدسة لتكوين صورة البقيعات الناتجة من الجسم ، بحيث تكون قوة التكبير مساوية للواحد الصحيح ، وينتج عن ذلك تركيب شبكى داخل البقيعات وقد وجد أن البعد بين أى هدبتين متجاورتين لهذا التركيب تساوى ٩,٥ ميكرون . يتم تسجيل صورتين للبقيعة المتكونة ومعها تركيبها الشبكى مع إزاحة الجسم إزاحة تساوى ضعف البعد بين أية هدبتين متجاورتين تدخلان فى التكوين الشبكى grid spacing أى المسافة البينية لكل هدبتين متجاورتين . أعقب ذلك تسجيل البقيعات بعد إزاحة الجسم مضاعفات للمسافة البينية للشبكة أى ٣٨ و٥٧ و٧٦ ميكرون ، وكان اتجاه الإزاحة موازيا للخط المستقيم الذى يصل بين الفتحتين ، وبعد تظهير اللوح الحساس الذى تم تعريضه مرتين يأخذ مكانه فى نظام الترشيح – كما هو موضح فى الشكل رقم (١٣/٤) ويبين الشكل رقم (١٤/٤) التركيب الشبكى الذى تم تكوينه وبهدف قياس الإزاحة ومن ثم السرعات .

من الأهمية بمكان ان نذكر المدى الذى تقع فيه الإزاحات التى يمكن قياسها بطريقة التعريض الثنائى باستخدام البقيعات الضوئية وباستخدام تداخل البقيعات الضوئية وعند استخدام الطريقة الاولى تكون أقل إزاحة مقاسة مساوية لأقل قطر δ للهدبة المتكونة من سطح خشن مستخدم كمشتت . ومن مواصفات النظام البصرى المستخدم نجد أن قيمة قطر البقيعة يساوى ١٠ ميكرون تقريبا . ولكى يمكن تسجيل مثل هذه البقيعات منفصلة عن بعضها عمليا ينبغى استخدام مستحلب له قوة تحليل عالية ، حيث يكون قطر حبيباته أقل من قطر البقيعة



شكل رقم (١٣/٤) : النظام البصرى المستخدم فى عملية الترشيح



شكل رقم (١٤/٤) : التركيب الشبكى المتكون باستخدام طريقة تداخل البقيعات

فى حالة ماتكون إزاحة الجسم أقل من قطر البقيعة ينبغى استخدام طريقة التداخل بين البقيعات القائم على التعريض الثنائى . وفى هذه الحالة تكون أقل إزاحة مقاسة مساوية للمسافة البينية للشبكة المتكونة داخل البقيعة ، هذه المسافة تساوى $\lambda P/D$ ، حيث D هي البعد بين الثقبين المتماثلين ، P بعد الجسم عن مستوى الثقبين .

References

Barakat N 1958 *J. Opt. Soc. Am.* **48** 92

Barakat N, El-Ghandoor H, Merzkirch W and Wernekink U 1988 *Exp. Fluids J.***6** 71

Barakat N and El-Hennawi H A 1971 *Textile Res. J.* **41** 391

Barakat N, Hamed A H and El-Ghandoor H 1987 *Optik* **76** 78

Barakat N, Merzkirch W and El-Ghandoor H 1986 *Optik* **74** 114

Barker D B and Fourney M E 1976 *Exp. Mech.* **18** 209

———— 1977 *Opt. Lett.* **1** 136

Denisyuk Yu N 1978 *Fundamentals of Holography* (Moscow: Mir) pp 116-18

Françon M 1979 *Laser Speckle and Applications in Optics* (New York : Academic)

Gabor D 1948 Nature **161** 777

Iwata K, Hakoshima T and Nagata R 1978 *Opt. Commun.* **25**

Jones R and Wykes C 1983 *Holographic and Speckle Interferometry* (Cambridge: Cambridge University Press)

Ostrovsky Yu I, Butusov M M and Ostrovskaya G V 1980 *Interferometry by Holography* (Springer Series in Optical Sciences) (Berlin : Springer) pp 73-5

Simpkins P G and Dudderer T D 1978 *J. Fluid Mech.* **89** 665

Tolansky S 1948 *Multiple-Beam Interferometry of Surfaces and Thin Films* (Oxford: Clarendon) p 126

————1955 *An Introduction to Interferometry* (London : Longmans, Green)

Tolansky S and Barakat N 1950 *Proc. Phys. Soc.* **63** 345

Vest C M 1979 *Holographic Interferometry* (New York : Wiley)