

الفصل الرابع

أساسيات التداخل الضوئي

Principles of Interferometry

١/٤ - مقدمة :

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

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

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \quad \text{لكن:}$$

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

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

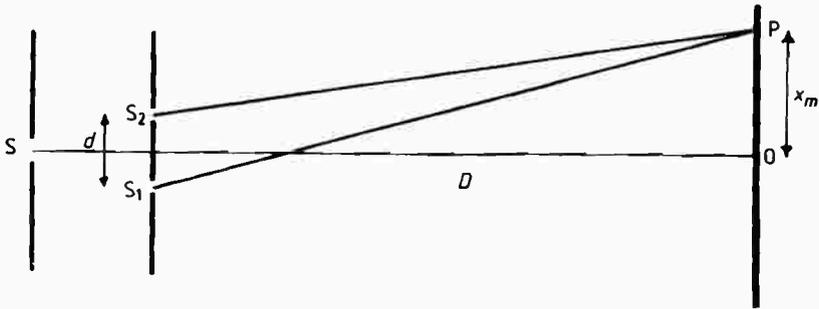
حيث Δt زمن الترابط ، $\Delta \nu$ اتساع خط الطيف بوحدات التردد .

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

وحتى نستطيع أن نجد وصفا مناسباً 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_2, P_1 فى المجال . ولا بد أن نتوقع أن هذا المقياس يرتبط ارتباطاً وثيقاً بحدّة هذب التداخل الضوئى التى تحدث عند التقاء الذبذبات الناتجة من نقطتين . وأن نتوقع كذلك تكون هذب تداخل ضوئى حادة عندما يكون الارتباط المتبادل بينهما كبيراً . مثال ذلك : عندما يخرج الضوء عند P_2, P_1 من مصدر ضوئى صغير جداً له مدى طيفى محدود ، ونتوقع عدم تكون هذب تداخل ضوئى فى غياب هذا الارتباط المتبادل بين النقطتين ، ومثال ذلك : عندما تستقبل P_2, P_1 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 هذب 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 λ m عند $(\delta = 2m\pi)$ حيث m تساوى صفرا ، ١ ، ٢ ، ٣ ،

وتتكون هدب تداخل ضوئي مضيئة ، وتظهر على الحائل (شكل رقم ١/٤) على

مسافة X_m من النقطة O إذ :

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

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

وفي كل مقاييس التداخل الضوئي المذكورة سابقا يتبع توزيع الشدة الضوئية قانون

مربع جيب التمام cosine square law ، وتكون الهدب على مسافات متساوية من بعضها

وهي هدب لا يقتصر تكونها على مستوى واحد في الفراغ أي تتكون في أي مستوى أمام

الفتحتين وينص قانون مربع جيب التمام على الآتي :

$$I = 4 I_0 \text{Cos}^2 \delta/2$$

حيث I_0 هي شدة كل من الموجتين . ويوضح الشكل رقم (٢/٤) توزيع الشدة الضوئية

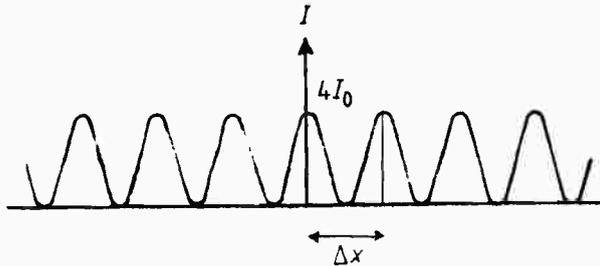
النتيجة من التداخل الضوئي الثنائي .

وتتكون هدب التداخل الضوئي المعتمة عند :

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

والمسافة بين كل هدبتين مضيئتين أو معتمتين متاليتين (Δx) كما هو موضح في الشكل

رقم (٢/٤) .

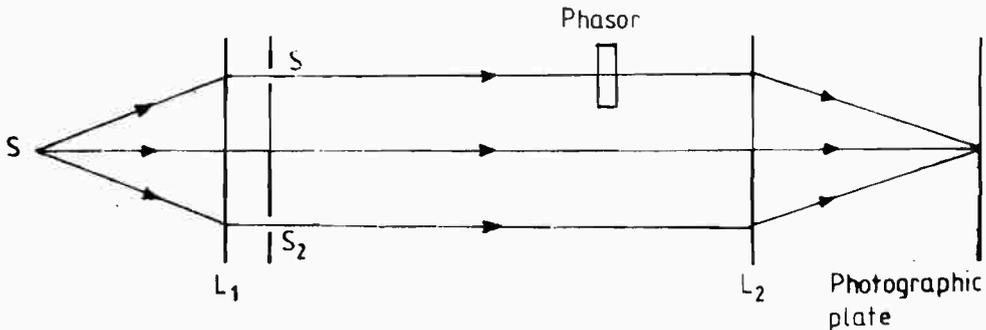


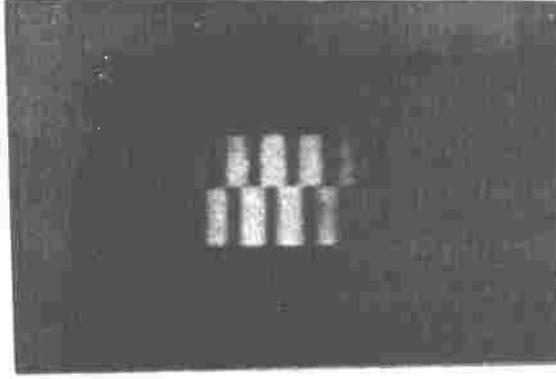
شكل رقم (٢/٤) : توزيع الشدة الضوئية في حالة هدب التداخل الضوئي الثنائي .

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

ويوجد مثال آخر لهدب التداخل الضوئي الناتجة من تقسيم جبهة الموجة وذلك في جهاز رالي Rayleigh's refractometer حيث ينقسم الضوء الصادر من مصدر ضوئي خطي 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 في وسط phasor وينتج عن ذلك حدوث فرق في الطور بين الشعاعين ، وتتكون هدب تداخل ضوئي على شكل خطوط مستقيمة في المستوى البؤري للعدسة L_2 كما هو موضح في الشكل رقم (٢/٤) . ولتحديد مركز هذا النظام يستخدم مصدر ضوئي أبيض white light source للحصول على الهدبة الصفيرية zero order fringe وتظهر المجموعتان وتسجلان ، وفي نفس الوقت يغطي كل منهما نصف مجال الرؤية ، كما هو موضح في الشكل رقم (٤/٤) .

شكل رقم (٢/٤) : جهاز رالي الذي يقوم على التداخل الضوئي





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 الأخر 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 A, C متوازيين ، وعند تجميعهما عند المستوى البؤرى لعدسة تنتج هدب تداخل ضوئى بالانعكاس حيث إنهما مترابطان . وكذلك فإن الشعاعين اللذين يتركان السطح السفلى عند النقطتين B, D 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 إلى جزئين ، أحدهما يمر فى الاتجاه $\rightarrow BE$ والآخر يأخذ المسار $\rightarrow BCD$ ، وحيث إن الموجة تصل إلى النقطة D فإن الشعاع الآخر $\rightarrow BE$ 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 . وبالتالي فإننا نعى بفارق 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 (٥/٤) :

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

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 إلى B والمنعكس عندها شريحة / هواء (film / air) .

ويكون شرط تكون هدبة مضيئة عند الانعكاس هو :

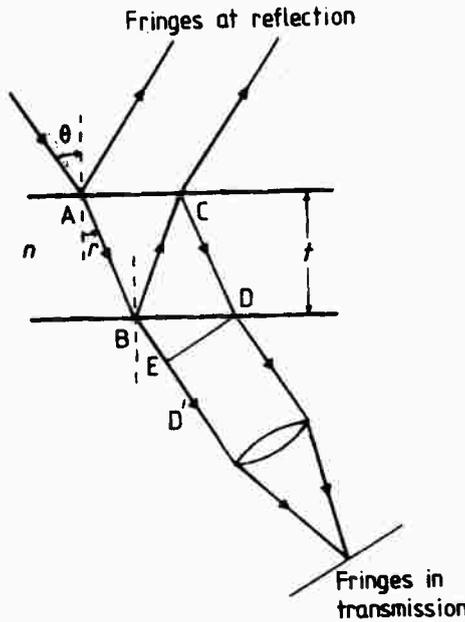
$$\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda = 2nt \cos r.$$

ويكون التغير فى الطور عند الانعكاس عند السطح الفاصل شريحة / هواء مساويا للصفر . وبإضافة 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 في الشكل رقم (٥/٤) . وعندما تكون θ ثابتة فلا بد من تغير قيمة t للحصول على هدب تداخل ضوئي متتابعة الرتبة . وتسمى هذه الهدب بهدب تساوي السمك fringes of equal thickness ، وهي محددة الموقع في الفراغ بالقرب من مقياس التداخل . وفي حالة إسفين ضوئي هوائي air wedge مضاء بحزمة متوازية من الأشعة أحادية طول الموجة وبزاوية سقوط مقدارها θ تتكون هدب تداخل ضوئي على هيئة خطوط مستقيمة توازي حافة الإسفين الضوئي . وفي حالة السقوط العمودي تتكون الهدب في مستوى محدد الموقع وقريب جدا من الإسفين الضوئي .

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

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



شكل رقم (٥/٤) : 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 لكي 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 ضوئى من شعاعين من الضوء مستقطبين فى مستويين متوازيين .

ج- 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 .

٤/٤/١- 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 المتجه 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 تعطىها المعادلة الآتية لاية زاوية انكسار r_e

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

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

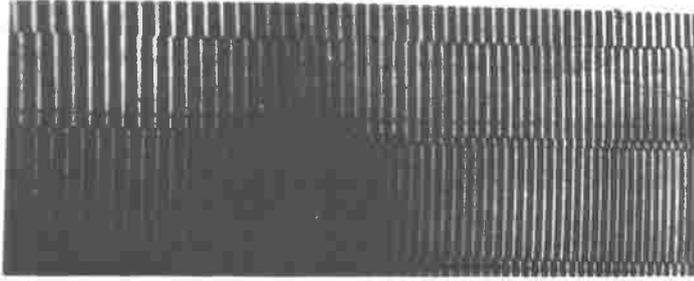
$$\delta_1 = 2n_0 t \cos r_0$$

$$\delta_2 = 2n_e' t \cos r_e$$

وذلك بإهمال الانحراف فى المعادلة الأساسية .

وعند مركز كل من النظامين أى أنه فى حالة $\ominus = 0$ ، $(n_e' = n_0)$ لا يحدث انفصال بين المكونين الذين لهما نفس رتبة التداخل والذين ينتميان لكل من النظامين . ويزيادة الزاوية \ominus نجد أن قيمة n_e' تبتعد بانتظام عن n_0 ، ويحدث الانفصال عند قيمة مضيئة لزاوية مقدارها \ominus .

وتتكون هدب التداخل الضوئى بسهولة باستخدام شريحة رقيقة تم انفلاتها حديثا من نوع جيد من فولجويبايت الميكا ، وتفضض الميكا بتغطية كل من سطحها بطبقة رقيقة من الفضة انعكاسيتها R تساوى ٨٠٪ وذلك بالتبخير الحرارى . ويتم الحصول على هدب تساوى الرتبة اللونية - انظر Tolansky, 1948 - الموضحة بالشكل رقم (١/٤) ، باستخدام مطياف الانحراف الثابت . ونلاحظ عدم وجود ازواجية لهذب التداخل التى تنتج عن الانكسار المزوج ، يؤكد ذلك أن عينة ميكا الفولجويبايت يمكن أن تعتبر بلورة أحادية المحور uniaxial crystal .



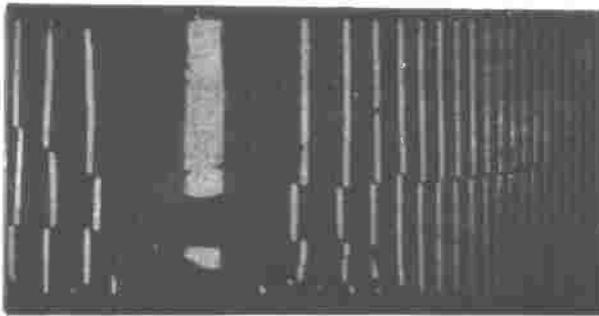
شكل رقم (٧/٤) هذب تساوى الرتبة اللونية الناتجة من شريحة من بلورة أحادية المحور

هذب قداخل تساوى المماس :

يتم تشكيل العينة بثيها لكى تصبح على شكل نصف إسطوانة ، ويسقط عليها حزمة متوازية من الضوء أحادى طول الموجة ، وتتكون هذب على شكل خطوط مستقيمة توازى محور هذه الإسطوانة على لوح حساس موضوع عموديا على محور الإسطوانة مارا بالمركز ٥ . ونلاحظ هنا أن زوايا سقوط الأشعة المتوازية تتغير من صفر درجة عند المركز إلى زاوية تقارب ٩٠° ، وهذه هى هذب تساوى ميل المماس fringes of equal

Tolansky and Barakat, 1950 - tangential inclination. والشكل رقم (٧/٤)

يوضح الهذب الناتجة .



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

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

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

$$(Barakat, 1958) \quad n_o > n_e$$

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 يفصل عادة إلى شعاعين مستقطبين فى مستويين
متعامدين وينتشران بسرعتين مختلفتين قليلا عن بعضهما وفى اتجاهين مختلفين أيضا ،
فإن الأشعة المتعددة والمكونة نتيجة انعكاس كل من الشعاعين تكون مجموعتين من هذب
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 معامل 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 محوره n_p و n_g ،
والقطاع الدائرى :

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

وكذلك :

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

والقطاع على هيئة قطع ناقص :

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

$$n^2 = n_g^2 - \sin^2 \Theta \left(\frac{n_g^2}{n_p^2} - 1 \right) \quad \text{ولذلك فإن :} \quad (4.2)$$

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

وبذلك تتكون مجموعتان من هذب التداخل الضوئي لايعتمد إحداهما على الأخرى ، مستقطبين في 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) ، (٢/٤) بمعامل انكسار n متغير مع زاوية Θ كما هو فى المعادلة رقم (٢/٤) ومعامل الانكسار n يساوى n_g عندما تكون $\Theta = 0$ 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 الضوئي E التى تحقق المعادلة

الآتية :

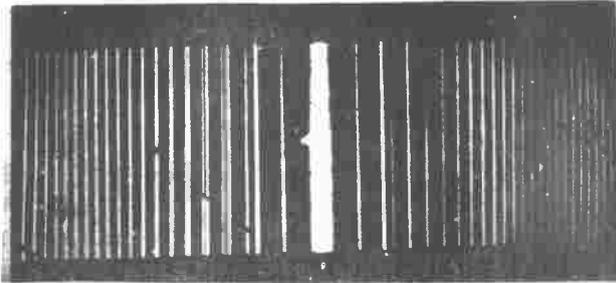
$$\sin E = n_p \left(\frac{n_g^2 - n_m^2}{n_g^2 - n_p^2} \right)^{1/2}$$

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 $E = \Theta$. 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 مستقطب polarising microscope ، وتلق شريحة رقيقة من هذه الميكا وتفضض من الوجهين ، وتشكل بعد ذلك علي هيئة إسطوانة فى اتجاه تقاطع المستوى الذى يحوى المحور الضوئى للبلورة 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 بلورة ثنائية

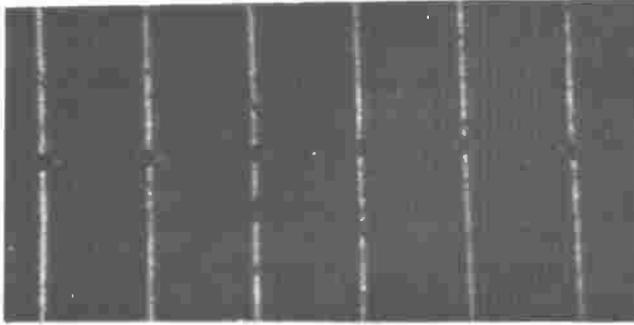
٤/٤/٣- حالة الألياف التركيبية ذات الانكسار المزدوج :

The case of synthetic fibre exhibiting birefringence :

عند غمر شعيرة من ألياف الأكريلان Acrilan fibres فى إسفين ضوئى مفضض Silvered wedge ، يحوى سائلا تم إضافته 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 فيزيو للتداخل الضوئي عند استخدام ضوء غير مستقطب وتظهر ازاحتان 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 الضوئي لتعيين معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف .



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

٥/٤- الهولوجرافيا والتداخل الضوئي الهولوجرافي :

Holography and holographic interferometry :

١/٥/٤- الهولوجرافيا : Holography

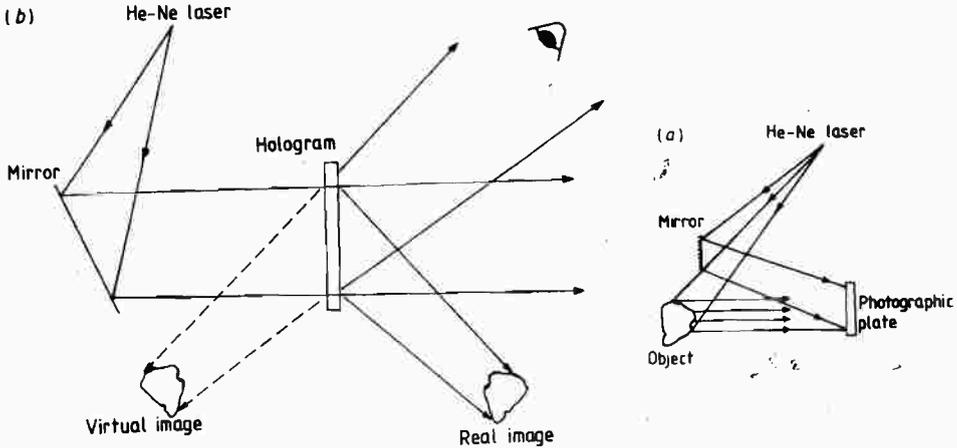
وضع « جابور Gabor » سنة ١٩٤٨ أسس الهولوجرافيا التي تسجل المعلومات الكاملة عن الموجة ، سعتها وطورها ، من المعروف أنه تسجل المعلومات عن سعة الموجة على الأفلام الحساسة كشدة ضوئية بينما تسجل معلومات طور الموجة عن طريق التراكب مع موجة مرجع مترابطة معها . وقد تم الحصول على الهولوجرام - الصور ذات الثلاثة أبعاد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

الشكل رقم (١٠/٤) النظام البصري لتكوين الهولوجرام . إذ تلتقى الموجات ذات السعة المركبة التي تترك الجسم $A_0 = a_0 \exp(iQ_0)$ مع الشعاع المرجع $A_r = a_r \exp(iQ_r)$ عند اللوح الحساس ، وتعطى المعادلة الآتية توزيع الشدة الضوئية $I(x,y)$ الناتجة :

$$I_{(x,y)} = |A_0 + A_r|^2 = (A_0 + A_r)(A_0^* + A_r^*) \\ = a_0^2 + a_r^2 + A_0 A_r^* + A_r A_0^*$$

٢/٥/٤ - التداخل الضوئي الهولوجرافي : Holographic interferometry

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

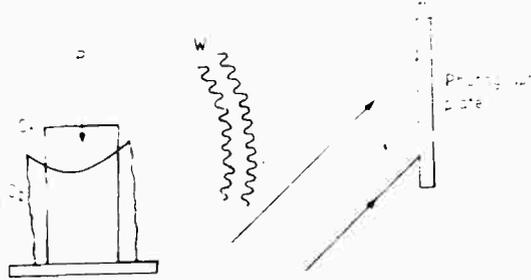


شكل رقم (١٠/٤) : رسم توضيحي لتسجيل الهولوجرام (a) وإعادة تكوين جبهة الموجة (b)

وعندما ترى العين صورة جسم في الثلاثة أبعاد نجد الهولوجرام يسجل التفاصيل الدقيقة عن الجسم مثل الشقوق والحواف وخشونة السطوح ذات بعد حوالي ١ ميكرومتر - انظر Denisuk 1978 .

ويعتبر التداخل الضوئي الهولوجرافي - holographic interferometry -
Ostrovsky et al. 1980, & Vest, 1979 واحد من أهم تطبيقات الهولوجرافيا التي تستخدم كأداة

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



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

وفي طريقة التصوير ثنائي التعريض double-exposure technique يتكون هولوجرام للجسم قبل تشويبه ، وبعد التشويه يعرض الهولوجرام مرة أخرى للضوء الذي يصل إليه من الجسم في وضعه الجديد ، وتكون النتيجة وجود موجات متراكبة وتكون هدب تداخل ضوئي تحمل معلومات عن الازاحات التي نتجت عن تشويه الجسم . أى التغير في طول المسار الضوئي والتغير في معاملات الانكسار - مثل الذي يحدث في النفق الهوائي والعمليات المشابهة - يعطى نماذج تداخل ضوئي مماثلة . ويمكن إجراء قياس التغير في المسافات بهذه الطريقة بدقة تصل إلى $\frac{1}{\lambda}$ من الميكرومتر أو أقل .

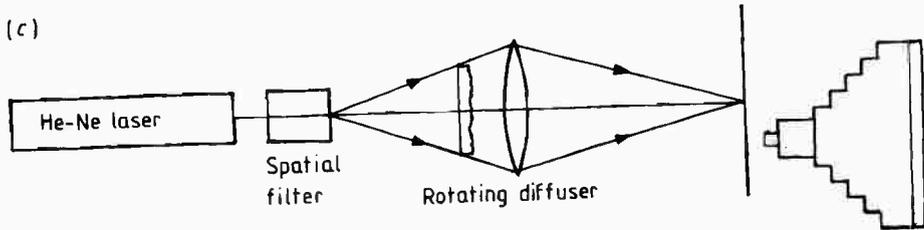
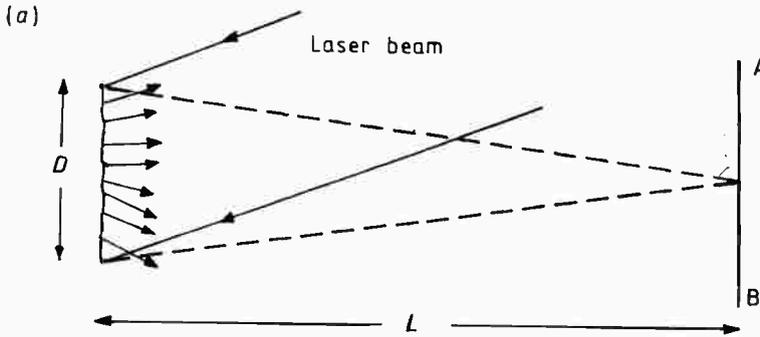
ويجد التداخل الضوئي الهولوجرافي تطبيقات في مجال الايروديناميكي aerodynamics حيث يستخدم في دراسة سريان الموانع حول الأجسام المختلفة .

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

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

المضاء تكون نتيجة تداخل الموجات التي تنشأت من النقط المختلفة فى المنطقة المضاء من السطح ، ويختلف طور هذه الموجات باختلاف الارتفاعات على السطح الخشن . ويعتمد النموذج الفراغى spatial pattern ودرجة تباين البقعية 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 $\langle \delta \rangle$ للبقية الضوئية الناتجة من سقوط حزمة من الأشعة الضوئية ذات طول موجى λ على مساحة مستديرة قطرها D :

$$\langle \delta \rangle = 1.2 L/D$$


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

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

وتعتبر العناصر المسنولة عن تشتت الضوء التي تساهم في التداخل الضوئي 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 في الصورة الأولى مزاحة عدة ميكرومترات قليلة عن الصورة الثابتة ، ويتوفر دائما علاقة ترابط بين النموذجين . وتسمى هذه الطريقة بالتصوير ثنائي التعريض للبقيعات الضوئية ، *Doube-exposure speckle photography* ، وتستخدم بكثرة طرق تصوير البقيعات الضوئية والتداخل الضوئي الناتج عنها لقياس سرعات الموائع - Barker and Fourney, 1977, Iwata et al. 1978 - Simpkins and Dudderer 1978, Barakat et al. 1987 .

وتستخدم أيضا في 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 . وفي هذه الطريقة يوجه شعاع ليزر نبضي ($\lambda = 6940$ أنجستروم) من خلال فتحة ضيقة ثم يتم زيادة مساحة مقطع حزمة الأشعة لتضئ مساحة ذات قطر ٢٠ ملليمتر على قرص الزجاج المصنفر الذي يدور حول مركزه . وتسقط نبضتان من أشعة الليزر على لوح حساس هبيباته دقيقة ذات قوة تحليل عالية ، والزمن بين كل نبضتين متتاليتين يساوي ٨٠٠ ميكروثانية . وبعد تظهير الفيلم الحساس يوضع في نظام ترشيح وتظهر مجموعة من هدب يونج *Young's fringes* ، وتعطى المعادلة الآتية العلاقة بين المسافة S التي تفصل أي هدبتين متجاورتين والإزاحة :

$$X = D / S$$

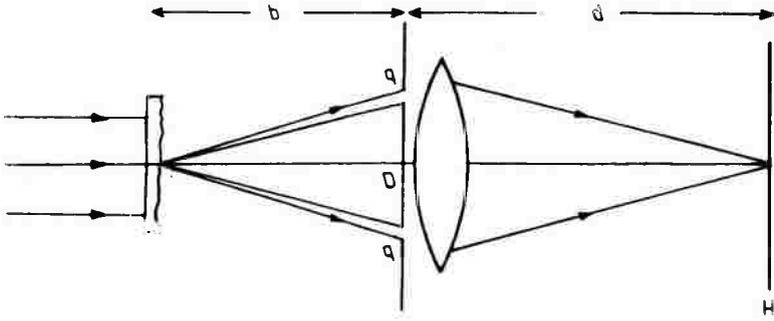
حيث D هي المسافة بين الفيلم الحساس والمستوى الذي يتم فيه الرؤية .

٢/١/٤- تداخل البقيعات الضوئية : Speckle interferometry

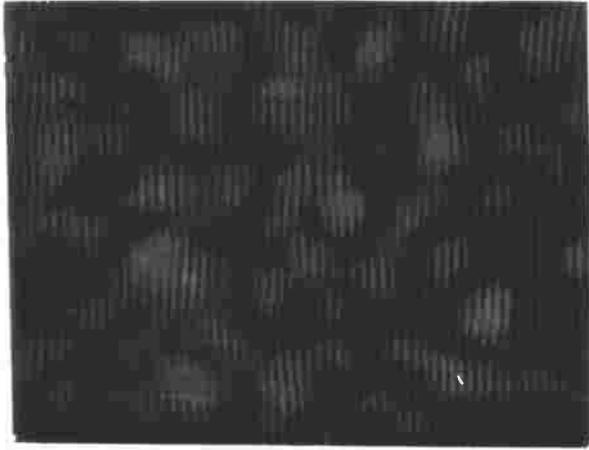
تم في التجربة التي قام بها جونز ويكس (Jones and Wykes 1983) في تداخل البقيعات الضوئية ، الحصول على هدب تداخل نتجت عن مجموعتان من البقيعات تربطهما

علاقة ترابط . نتج ذلك إما عن إزاحة بين المناطق المترابطة من نموذجي البقيعات أو وجود تغير في الطور بينهما . ويبين الشكل رقم (٤/١٢/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 ٢ مم تفصلهما مسافة قدرها ٢٠ مم ، 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 الشبكي مع إزاحة الجسم إزاحة تساوى ضعف البعد بين أية هدبتين متجاورتين تدخلان فى التكوين الشبكي grid spacing أى المسافة البينية لكل هدبتين متجاورتين . أعقب ذلك تسجيل البقيعات بعد إزاحة الجسم مضاعفات للمسافة البينية للشبكة أى ٢٨ و ٥٧ و ٧٦ 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 (٤/١٣) ويبين الشكل رقم (٤/١٤) التركيب الشبكي الذى تم تكوينه ويهدف 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 كمشئت . 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 البصري المستخدم في عملية الترشيح



شكل رقم (١٤/٤) : التركيب الشبكي المتكون باستخدام طريقة تداخل البقع

في حالة ماتكون إزاحة الجسم أقل من قطر البقعة ينبغي استخدام طريقة التداخل بين البقع القائمة على التعريض الثنائي . وفي هذه الحالة تكون أقل إزاحة مقاسة مساوية للمسافة البينية للشبكة المتكونة داخل البقعة ، هذه المسافة تساوي $\lambda P/D$ ، حيث D هي البعد بين الثقوب المتماثلين ، P بعد الجسم عن مستوى الثقوب .

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)