

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
المركز الجامعي العربي بن مهيدي بأم البواقي
معهد العلوم الدقيقة

الرقم التسلسلي :

أحاف / 0001

مذكرة مقدمة للحصول على شهادة ماجستير في الفيزياء
تخصص : مواد الالكترنيات الضوئية

الموضوع :

دراسة النظم العازلة المتعددة
الطبقات من أجل
تطبيقات في الالكترنيات الضوئية

مقدمة من طرف : بوشوارب وردة

أمام اللجنة :

رئيسا	المركز الجامعي لأم البواقي	أستاذ محاضر	م. م. مراد
مقررا	المركز الجامعي لأم البواقي	أستاذ محاضر	ع. محجوب
ممتحنا	المركز الجامعي لأم البواقي	أستاذ محاضر	م. ز. عباط
ممتحنا	جامعة قسنطينة	أستاذ محاضر	ن. عطاف

نوقشت الرسالة بتاريخ : 2004/ 12/15

05/A 64

شكرات

أشكر جزيل الشكر السيد محبوب عبد الحكيم أستاذ محاضر بالمركز الجامعي لأم البواقي،
نائب المدير المكلف بالدراسات ما بعد التدرج على توجيه هذا البحث وإسدائه النصائح البناءة،
كما أشكره على روحه العلمية وتفانيه في العمل فله مني أطيب المنى.

أسمى معاني التقدير والاحترام للسيد مراد محمود أستاذ محاضر بالمركز الجامعي لأم البواقي
الذي منحني الشرف لترأسه لجنة المناقشة.

الشكر الخالص للسيد زعباط مراد أستاذ محاضر بالمركز الجامعي لأم البواقي وعطاف نذير
أستاذ محاضر بجامعة قسنطينة أعضاء اللجنة .

وقفه إجلال وتقدير إلى والدي الكريمين وإلى كل أفراد أسرتي وأخص بالذكر أختي الصغرى
العزيزة كاميلا.

أتقدم بالشكر إلى كل أساتذتي وزملائي وأخص بالشكر الزميل رماش على النصائح
والتصويبات التي قدمها لي ، كذلك أشكر كل الصديقات وأخص بذلك الصديقة الغالية ر. أسماء.

أخيرا أشكر زميلاتي وزملائي بالثانوية وكل من ساعدني وكل من شجعني من قريب أو بعيد
ولو بكلمة.

Résumé :

Les systèmes multicouches diélectriques ont une grande importance dans les applications optoélectroniques.

Nous avons étudié en particulier les miroirs de Bragg, les filtres optiques et les couches antireflet à base de silice SiO_2 et de dioxyde de titane TiO_2 , déposés sur les substrats de silicium et de verre.

Le bût initialement fixé pour ce travail est de concevoir des modèles théoriques simulant les systèmes multicouches étudiés et permettant d'optimiser leurs performances avant de passer à l'étape de réalisation.

Les modèles mis aux points basés sur la théorie des milieux stratifiés permettent de calculer le facteur de réflexion pour différents systèmes multicouches diélectriques.

Nous avons aussi étudiés des couches à gradient d'indice déposés en une seule étape qui peuvent remplacer les systèmes classiques d'indices discrets avec les mêmes performances tout en évitant les problèmes d'interfaces.

Les modèles proposés, en utilisant des formulations mathématiques simples, permettent d'étudier des systèmes multicouches, complexes utilisés en optoélectroniques dans le bût d'améliorer leur qualités.

Mots-clés :

Miroir de Bragg – Filtre – couches antireflet – Indices discret – Gradient d'indice.

Abstract:

Dielectric multi-layer systems have a great importance in the opto-electronic applications particularly Bragg mirrors, optical filters and antireflection coating using Silicon dioxide SiO_2 and Titanium dioxide TiO_2 , deposited on Silicon and glass substrates.

This work initially aims at the conception of theoretical models which simulate the multi-layer systems studied and help optimizing their performances before technological realization step.

The models analyzed and studied in this work are based on the stratified mediums theory which permits the calculation of the reflection factor for different dielectric multi-layer systems.

We have also studied graded index layers which can successfully replace the classical systems with discrete index. Deposited in one step avoid interface problems.

The proposed models have permitted to use simple mathematics methods for studying complex multi-layer systems used in optoelectronics with improvement of their qualities.

Key words :

Bragg mirror – filter – antireflection coating – discrete index – gradient index.

الفهرس

الفهرس

الفهرس

المقدمة العامة

الفصل الأول : الدراسة النظرية

- 01 1.1- مقدمة عن استعمال الجمل المتعددة الطبقات في مجال الضوئيات
- 01 1.1.1- مرايا براغ
- 01 أ- مرايا براغ ثنائية الطبقات المتجانسة ذات قفز القرينة
- 07 ب- مرايا براغ الخليطة اللامتجانسة المتدرجة القرينة دوريا
- 09 1.2-I- المرشحات
- 09 أ- المرشحات ثنائية الطبقات المتجانسة ذات قفز القرينة
- 12 ب- المرشحات الخليطة الغير متجانسة المتدرجة القرينة دوريا
- 12 3.1-I- الأغشية المضادة للانعكاس
- 12 أ- أغشية مضادة للانعكاس كلاسيكية
- 17 ب- أغشية مضادة للانعكاس متدرج القرينة
- 17 ج- أغشية مضادة للانعكاس من السيليسيوم المسامي
- 19 2.I- الدراسة النظرية لانتشار موجة كهرومغناطيسية في الأوساط المتعددة الطبقات
- 19 1.2.I- المبادئ النظرية والعلاقات الأساسية
- 21 2.2.I- السطح الفاصل، الوسط المحيط/ المسند
- 21 أ- الاستقطاب العمودي S
- 22 ب- الاستقطاب الموازي P
- 24 3.2.I- الطبقة البينية ذات قرينة \tilde{n}_i (ورود مائل)
- 24 أ- الاستقطاب العمودي S
- 24 ب- الاستقطاب الموازي P
- 24 4.2.I- حملة متعددة الطبقات
- 27 3.I- الدراسة النظرية للأوساط الفعالة
- 28 1.3.I- تقريب الوسط الفعال لـ Bruggeman
- 28 2.3.I- تقريب الوسط الفعال لـ Bruggeman المكون من مادتين
- 29 أ- تطبيق BEMA على الخليط (SiO_2 ، هواء)
- 30 ب- تطبيق BEMA على الخليط (TiO_2 ، هواء)
- 30 ج- تطبيق BEMA على الخليط (TiO_2 ، SiO_2)

الفصل الثاني : النموذج النظري ومدى تحقيقه عمليا

- 31 1.II- نماذج الجمل متعددة الطبقات
- 31 1.1.II- مرايا براغ
- 31 أ- مرايا براغ ذات قفز القرينة
- 35 ب- مرايا براغ المتدرجة القرينة دوريا
- 40 2.1.II- المرشحات
- 40 أ- المرشحات ذات قفز القرينة
- 43 ب- المرشحات المتدرجة القرينة دوريا
- 47 3.1.II- الأغشية المضادة للانعكاس
- 47 أ- غطاء مضاد للانعكاس بطبقتين متجانستين ذات قفز القرينة
- 50 ب- غطاء مضاد للانعكاس متدرج القرينة
- 53 2.II- طرق ترسيب المواد المستعملة
- 53 1.2.II- ترسيب طبقات SiO_2 و TiO_2
- 53 أ- مبدأ الترسيب الكيميائي بمساعدة البلازما ECR
- 53 ب- ظروف الترسيب
- 55 2.2.II- ترسيب خليط SiO_2 و TiO_2 متدرج القرينة
- 56 3.II- التحقق من صلاحية النماذج
- 56 1.3.II- مرآة براغ ذات طبقة ثنائية
- 57 2.3.II- مرآة براغ ذات أربع طبقات ثنائية
- 57 3.3.II- مرآة براغ ذات أربع طبقات ثنائية
- 58 4.3.II- مرآة براغ ذات أربع طبقات ثنائية

الفصل الثالث : نتائج واستنتاجات

- 60 1.III- مرايا براغ
- 60 1.1.III- مرايا براغ ثنائية الطبقات المتجانسة ذات قفز القرينة
- 60 1.1.1.III- مرايا براغ ذات قفز القرينة على مسند من السيليسيوم
- 60 أ- تأثير عدد الطبقات الثنائية على المرآة
- 62 ب- تأثير تغير سمكي طبقتي المادتين على المرآة
- 64 ج- تأثير مسامية المادتين على المرآة
- 67 د- تأثير زاوية الورود
- 68 2.1.1.III- مرايا براغ ذات قفز القرينة على مسند من زجاج

المراجع
 الفقه
 الفقه الإسلامي

3.3.III - تأثير زاوية الورود على الظل	93
2.3.III - تأثير مساحة المبنى على الظل	89
1.3.III - تأثير شكل المبنى على الظل	86
3.III - الأثر الفيزيائي للظلال الناتجة عن المباني على المناخ المحلي	86
أ - تأثير زاوية المبنى على الظل	85
ب - تأثير اتجاه المبنى على الظل	85
3.2.III - تأثير زاوية الورود على الظل	85
2.2.III - تأثير مساحة المبنى على الظل	83
1.2.III - تأثير شكل المبنى على الظل	81
2.III - الأثر الفيزيائي	81
د - مقارنة اتجاه المبنى مع اتجاه الرياح	79
ج - تأثير زاوية المبنى على الظل	78
ب - تأثير اتجاه المبنى على الظل	78
أ - تأثير عدد النوافذ على الظل	77
2.1.III - الأثر الفيزيائي للظلال الناتجة عن المباني	76
د - تأثير زاوية الورود	75
ج - تأثير مساحة المبنى على الظل	72
ب - تأثير شكل المبنى على الظل	70
أ - تأثير عدد النوافذ على الظل	68

المقدمة العامة

المقدمة العامة :

الكثير من الأجهزة الميكروإلكترونية والإلكترونيات الضوئية أو الضوئيات تستعمل الطبقات الرقيقة كما هو حال ليزر أنصاف النواقل بتجويف عمودي وطبقات مضادة للانعكاس للخلايا الشمسية وكذلك المرشحات الضوئية. "الطبقة الرقيقة" هي عبارة عامة تشمل المواد العازلة، أنصاف النواقل والمعادن، سمكها محصور بين 1 nm و 100 nm. اختيار المواد المستعملة وكذلك تنظيم التراكم يعتمد على مجال التطبيق [1].

في هذا العمل تمنا الطبقات الرقيقة العازلة في الضوئيات وبالتحديد باستعمال المركبات SiO_2 ، TiO_2 على مساند من سيليسيوم وزجاج. من بين مختلف المواد العازلة المستعملة مادة TiO_2 منذ عرفت أنها ذات قرينة مرتفعة وشفافة في أغلبية الضوء المرئي وفي الأشعة تحت الحمراء القريبة، وتتميز بصلاية جيدة وتشكل ثنائي متكامل مع مادة SiO_2 التي تتميز بقرينة منخفضة وشفافة من الفرق بنفسجي إلى تحت الأحمر القريب [2].

مادتي السيليسيوم Si وأكسيد السيليسيوم SiO_2 كثيرة الاستعمال لأنها رخيصة الثمن وكذلك سهلة الاستعمال [3]. استعملت مادتي SiO_2 و TiO_2 في الجمل المتعددة الطبقات في إنتاج المركبات الضوئية مثل مرايا براغ والأغطية المضادة للانعكاس وكذلك في التجويفات الميكرونية وتجويفات Fabry pérot التي نعتبرها كمرشحات ضوئية [2,4,5,6].

في السنوات الأخيرة الكثير من الاهتمام لقيته مرايا براغ التي تستعمل فيها المواد العازلة بسبب إمكانياتها في تطبيقات الإلكترونيات الضوئية حيث عوضت مرايا براغ المشكلة بأنصاف النواقل [7]. مرايا براغ هي حمل متعددة الطبقات عاكسة جدا على شريط محدد لطول الموجة. أما المرشحات الضوئية فهي عبارة عن جملة مرآتي براغ وظيفتها تنقية أو إمرار إشعاع ذو طول موجة محددة خلال شريط انعكاس عريض. بالنسبة للأغطية المضادة للانعكاس عملها هو التقليل من عامل الانعكاس على مساند نصف ناقلة ذات قرينة مرتفعة.

مرايا براغ المولفة من تراكم طبقات عازلة ربع موجة بالتناوب لمادتين عازلتين ذات قرينتين مختلفتين لها أهمية كبيرة في تطبيقات الإلكترونيات الضوئية ويتحكم في وظيفتها عدد طبقاتها الثنائية والفرق بين قرينتي المادتين [5,8] وتسمى بمرايا ذات قفز القرينة. أيضا للمرشحات الضوئية وللأغطية المضادة للانعكاس ذات قفز القرينة أهمية كبيرة .

اقترح منذ عشرينين طبقات رقيقة عازلة خليطة غير متجانسة قرينتهما تتغير وفقا لدالة دورية مع سمكها [9] والتي سنسميها طبقات متدرجة القرينة دوريا. استعملت في المرايا والمرشحات والأغطية المضادة للانعكاس الطبقات المتدرجة القرينة بدل الطبقات الكلاسيكية [10] لأنها تسمح بتحقيق وظائف ضوئية جديدة وتحسين الوظائف الضوئية الموجودة. المرايا المتدرجة القرينة تؤدي إلى تجويد إمكانياتها مقارنة بالمرايا الكلاسيكية [11].

لترسيب مادتي SiO_2 و TiO_2 يمكن استعمال الترسيب الكيميائي بطور بخاري بواسطة بلازما الموجات الميكرونية PECVD باستعمال الرنين السيكلوتروني للالكترونات ECR. هذه الطريقة تسمح بتحقيق طبقات متغيرة القرينة وهي طريقة غير عنيفة تعطي نوعية جيدة من المواد [12,10,4]

باستعمال نماذج للجمل المدروسة نحسب الاستجابة الضوئية لهذه الجمل هذا الحساب يستعمل شكل مصغوف يركز على نظرية انتشار الموجة الكهرومغناطيسية في الجملة المتعددة الطبقات والتي تطبق كذلك على الأوساط المتدرجة مع اختبار تأثير الوسائط على الاستجابة الضوئية للجمل.

مثلا مرايا براغ حيث عدد الوسائط محددة بدورية التركيبية. هذه الطريقة يمكن تطبيقها في حالة الطبقات المتغيرة القرينة باستمرار، يكفي تقسيم الطبقة الدورية الغير متجانسة إلى خطوات مكيفة متجانسة [1] من تطبيقها مرايا براغ والمرشحات والأغطية المضادة للانعكاس.

إن عمليات المقارنة لتائجنا الحاسوبية بنتائج تجريبية سمحت لنا بالتحقق من صلاحية نماذجنا المقترحة.

هذا العمل مقسم إلى ثلاث أجزاء :

- **الفصل الأول** خصص لاستعمال الجمل المتعددة الطبقات في مجال الضوئيات ودرسنا منها : مرايا براغ، المرشحات والأغطية المضادة للانعكاس. تليها دراسة نظرية لانتشار الموجة الكهرومغناطيسية في الأوساط المتعددة الطبقات بشكلها المصغوف في ذو الاستعمال البسيط ثم دراسة نظرية للأوساط الفعالة — Bruggeman مرفوقة بتطبيقات .
- **الفصل الثاني** يتناول دراسة نماذج نظرية لتشبيه الاستجابة الضوئية للجمل المتعددة الطبقات المدروسة والموضحة بتسلسلات بيانية. ثم نصف طريقة الترسيب التي سمحت بتصنيع العينات المستعملة وهي طريقة الترسيب الكيميائي بطور بخاري PECVD المحفز بالرنين السيكلوتروني للالكترونات ECR. القياسات التجريبية المسجلة سمحت بالتحقق من صلاحية النماذج المقترحة.

- الفصل الثالث تمت فيه دراسة مفصلة لمختلف النتائج المحصل عليها للحمل المتعددة الطبقات التالية:

○ مرايا براغ ذات قفز القرينة على نوعين من المساند ماص من مادة السيليسيوم وشفاف من مادة الزجاج.

○ مرايا براغ ذات قفز القرينة المتدرجة على مسند من سيليسيوم.

○ مرشحات ضوئية بنوعيتها ذات قفز القرينة والمتدرجة القرينة على مسند زجاجي.

○ غطاء مضاد للانعكاس ذو طبقة ثنائية على مسند من سيليسيوم.

سمحت هذه الدراسة باستخلاص أحسن الظروف لتصنيع مرايا براغ، مرشحات والأغطية المضادة

للانعكاس ذات قفز القرينة أو المتدرجة القرينة دوريا.

الفصل الأول

الدراسة النظرية

1.I - مقدمة عن استعمال الجمل المتعددة الطبقات في مجال الضوئيات :

الجمل المتعددة الطبقات لها خواص ضوئية مختلفة حسب نوع التراكم. أهمية هذه التركيبات كبيرة لأنها تسمح بتحقيق وظائف ضوئية متنوعة : الأغطية المضادة للانعكاس ، المرايا ، المرشحات [1] .
تقوم دراسة الجمل المتعددة الطبقات من جهة على حساب الخواص الضوئية لتركيبية معطاة، ومن جهة على حل المسألة العكسية وهي ابتكار تركيبية لها خواص ضوئية محددة .
وسوف نقوم في هذه المذكرة بدراسة عدد من هذه الجمل متعددة الطبقات .

1.1.I - مرايا براغ :

مرايا براغ هي تركيبات متعددة الطبقات خاصة، ميزتها الرئيسية هي تقدم عامل انعكاس مرتفع بإمكانها الوصول إلى 100% في مجال معين لطول الموجة. هذا المجال ذو الانعكاس الكبير يتمركز حول طول موجة المرآة التي يرمز لها λ_0 .
وستتناول نوعان من المرايا :

أ- مرايا براغ ثنائية الطبقات المتجانسة ذات قفز القرينة :

مرآة براغ هي جملة متعددة الطبقات عبارة عن تراكم دوري لطبقات متناوبة من مادتين شفافتين في المجال الضوئي المدروس، ذات قرينتين مختلفتين ، هاتين المادتين عازلتين بحيث تحقق المرآة عامل انعكاس قريب من 1 يدل على تداخل بناء لموجات مستوية منعكسة على التوالي عند كل سطح فاصل بين الطبقات المكونة للمرآة.

الشرط الأساسي للحصول على مرآة براغ الرنانة عند طول موجة λ_0 هو أن الطريق الضوئي في ثنائي الطبقة يكون نصف موجة $(\frac{\lambda_0}{2})$.
أي تحقق :

$$n_1 d_1 + n_2 d_2 = \frac{\lambda_0}{2} \quad (1.I)$$

n_1 : قرينة المادة الأولى.

n_2 : قرينة المادة الثانية.

d_1 : سمك طبقة المادة الأولى.

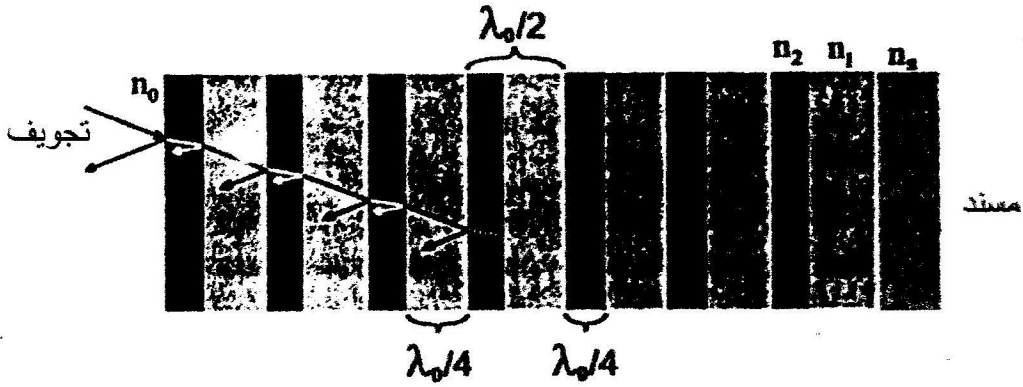
d_2 : سمك طبقة المادة الثانية.

فتراكم طبقات ربع موجة $(\frac{\lambda_0}{4})$ يقلص عدد الطبقات الضرورية للحصول على عامل انعكاس مرتفع [13].
 أي تحقق العلاقتين (3.I) و (2.I) التاليتين :

$$n_1 d_1 = \frac{\lambda_0}{4} \quad (2.I)$$

$$n_2 d_2 = \frac{\lambda_0}{4} \quad (3.I)$$

ونرفق هذه الدراسة بالشكل I.I والذي يتحقق فيه : $n_2 > n_1$



الشكل I.I : مخطط لمبدأ مرآة براغ [13].

- شريط الإيقاف $(\Delta\lambda_0)$:

عبارة عن مجال طول الموجة للمرآة المحيطة بـ λ_0 بحيث عامل الانعكاس قريب من الوحدة.

شريط الإيقاف (عرض القمة الرئيسية عند منتصف الارتفاع) وعامل الانعكاس عند طول موجة الرنين λ_0

يتعلقان بالفارق بين قرينتي المادتين المكونة للطبقات الثنائية [13].

ونوضح ذلك بالمثال الموالي المبين بالشكل 2.I.



الشكل : 2.I - أطياف انعكاس لتشيبيه الاستجابة الضوئية لأربع مرايا براغ [6].

ربع موجة لكل منها 15 دورة متركزة عند $\lambda_0 = 800 \text{ nm}$

مع اختلافها عن بعضها في نسب القرائن الضوئية :

$$\text{أ) } n_1 = 1.1, n_2 = 2$$

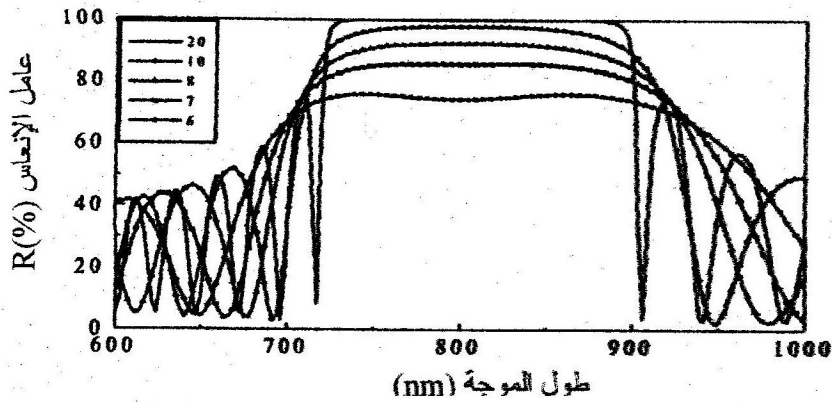
$$\text{ب) } n_1 = 1.2, n_2 = 1.9$$

$$\text{ج) } n_1 = 1.3, n_2 = 1.8$$

$$\text{د) } n_1 = 1.4, n_2 = 1.7$$

أي بمعنى نسبة قرينتي المادتين تحدد مميزات القمة الرئيسية (أقصى قيمة لعامل الانعكاس) ارتفاع وعرض القمة الرئيسية عند منتصف هذا الارتفاع .

يكون عامل الانعكاس قريب من 100% لما تكون القرائن الضوئية للمادتين مختلفة وكذلك عدد الطبقات يكون كبيرا [1]، ونوضح ذلك بالمثل الموالي المبين بالشكل 3.I.



الشكل 3.I : تأثير عدد الدورات على أطيايف الانعكاس المحسوبة لتركيبية : $n_2 = 1.8$ ، $n_1 = 1.3$ والتمركزة عند $\lambda_0 = 800 \text{ nm}$ [6].

في حالة تراكم ربع موجة يقدر معامل الانعكاس من أجل طول موجة λ_0 .

$$r(\lambda_0) = \frac{n_0 - n_s \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^{2L}}{n_0 + n_s \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^{2L}} \quad (4.I)$$

حيث : $n_1 < n_2$

L : عدد الطبقات الثنائية.

وشريط الإيقاف يقدر بالتقريب :

$$\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0} = \frac{4}{\pi} \arcsin \left(\frac{|n_2 - n_1|}{n_1 + n_2} \right) \quad (5.I)$$

العلاقتين (4.I) و (5.I) تؤكد صحة ما ذكرناه سابقا أي أن المرآة تكون فعالة لما يكون عدد طبقاتها كبير والمادتين المشكلتين للمرآة يكون فارق كبير بين قريتهما [13].

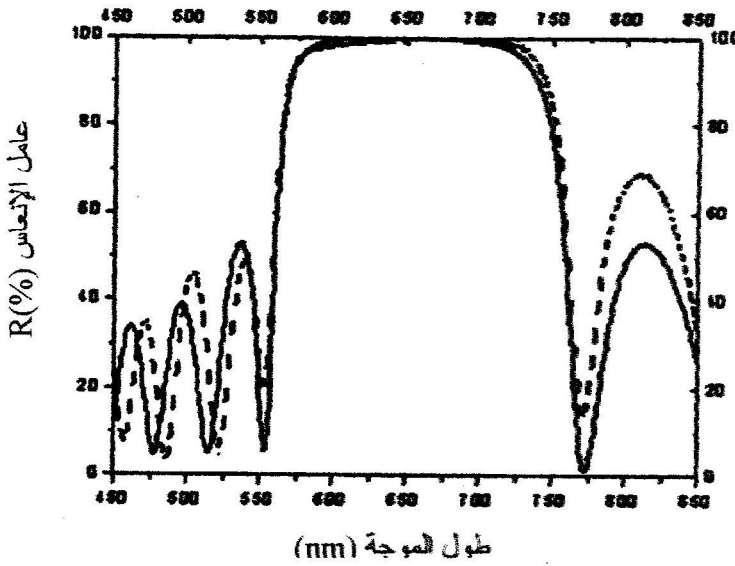
من أجل L كبير، معامل الانعكاس يصل إلى 100% من العلاقة (4.I) من أجل نسبة ثابتة $\frac{n_1}{n_2}$ عامل الانعكاس يزداد مع L وبشروط عدد الطبقات الثنائية، معامل الانعكاس يزداد بزيادة الفرق بين القريتين [6].

أثبتت الدراسات المنشورة أنه لعدد كاف من الطبقات الثنائية نصل إلى أكبر عامل انعكاس أعظمي R_{max} وأعرض شريط إيقاف $\Delta\lambda_0$ باستعمال طبقات ذات سمك ضوئي يساوي ربع موجة $\left(\frac{\lambda_0}{4}\right)$ [15,14,8,5,3,2].

إذا كان السمك الضوئي للطبقات يختلف عن ربع الموجة في المرآة مع تحقيق العلاقة (I.I) فإن قيمتي عامل الانعكاس الأعظمي R_{max} و $\Delta\lambda_0$ تكونان أقل من قيمتي R_{max} و $\Delta\lambda_0$ في حالة المرآة ذات الطبقات ربع الموجة [1].

تجدر الإشارة إلى الخسائر الضوئية للتركيب الناتجة عن خشونة الأسطح الفاصلة وكذا الامتصاص وهما عاملان يحددان عامل الانعكاس [6].

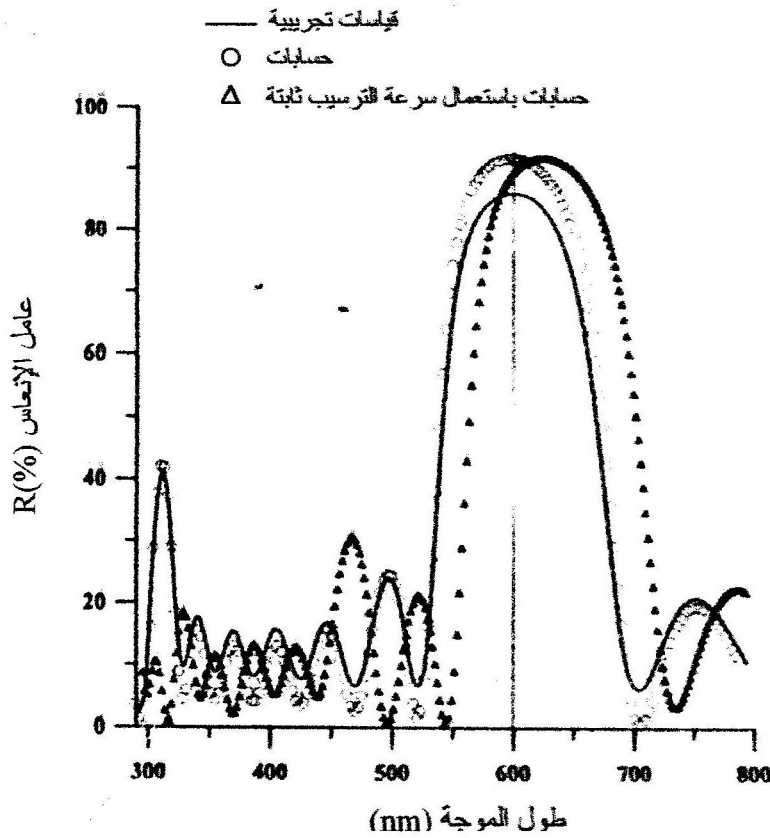
ولدينا أمثلة كثيرة على هذا النوع من المرايا التي تحصلنا عليها من مراجع، نقدم البعض منها في الأشكال التالية :



الشكل 4.I- طيف الانعكاس لمرآة براغ ذات سبع طبقات ثنائية $(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)$ سمك طبقاتها

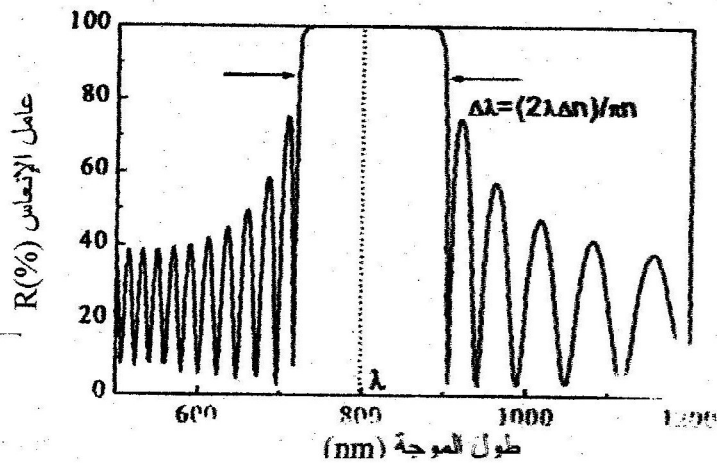
$$d_2 = 85 \text{ nm} , d_1 = 91 \text{ nm}$$

البيانات الممثلين بخط متقطع وخط مستمر هما على الترتيب البيانين التجريبي والحسابي. [5]



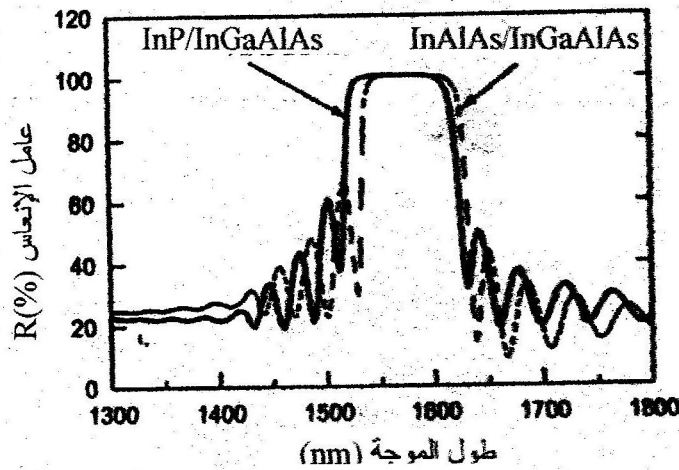
الشكل 5.I- بيانات أطياف انعكاس مرآة براغ ذات 14 طبقة (SiO₂/SiN_x) على مسند زجاجي.

حيث : $d(\text{SiN}_x) = 72 \text{ nm}$ ، $d(\text{SiO}_2) = 109 \text{ nm}$ [16].



الشكل 6.I- الاستجابة الضوئية المحصل عليها من مرآة براغ ذات 20 دورة ،

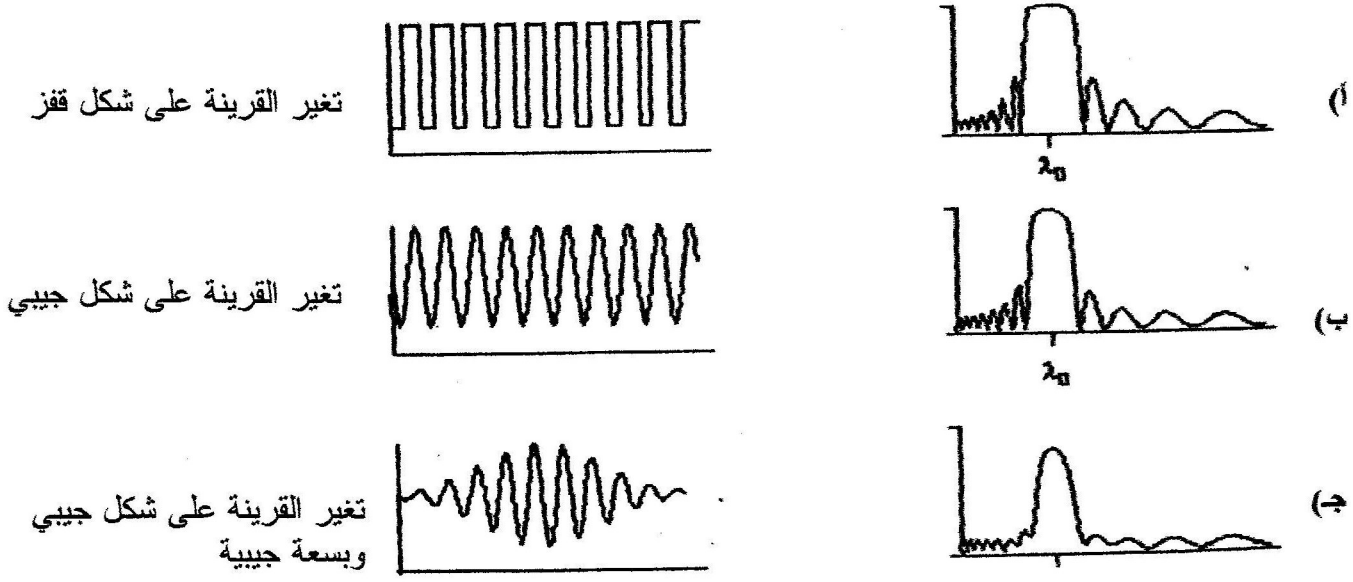
باستعمال السيليسيوم المسامي : $n_1 = 1.3, n_2 = 1.8$. متركزة عند $\lambda_0 = 800 \text{ nm}$ [6].



الشكل 7.I- بياني طيفي الانعكاس التجريبيين لمرايا براغ ذات 35 طبقة ثنائية (InP/InGaAlAs) و (InAlAs/InGaAlAs) المقاسة باستعمال Spectrophotomètre [17]

ب- مرايا براغ الخليطة اللامتجانسة المتدرجة القرينة دوريا:

هي طبقة خليطة لامتجانسة، قرينتها تتغير تدريجيا مع سمك المرآة بشكل دوري، هذا الخليط مكون من مادتين شفافتين في المجال الضوئي المدروس وعازلتين قرينتها مختلفتين. وعامل الانعكاس لهذه المرآة يتحدد بالفارق بين قرينتي المادتين والدالة الدورية وبعدها الدوريات لسمك المرآة، بحيث يمكننا أن نحصل في هذا النوع من المرايا على عامل انعكاس يقارب 100%. هذه المرآة قرينتها تتغير بشكل دالة دورية مع السمك أي على شكل تموجي ونوضح ذلك بالمثالين المبيين على الشكل التالي :

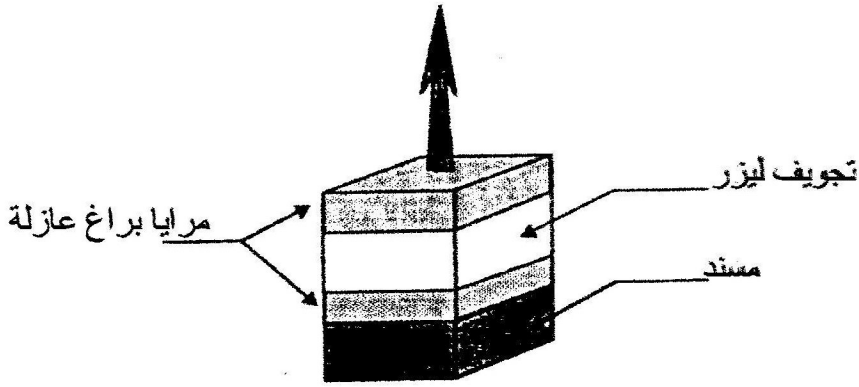


الشكل 8.I- أطيايف انعكاس لثلاث أنواع لمرايا براغ مختلفة [11]

وكمثال على المرايا المتموجة المستعملة التي تتألف من طبقة قرينتها الضوئية تتغير جيبيًا مع السمك [9]. إن تغير القرينة الضوئية تسمح بالحصول على عامل انعكاس 100% على مستوى شريط الإيقاف و 0% في الباقي عكس النوع السابق لمرايا براغ الثنائية الطبقات التي تقدم قمم ثانوية للانعكاس [11]. أجريت مقارنة بين خواص متعددة الطبقات المتجانسة والحليطة الغير متجانسة التركيبية أظهرت التقنيات المختلفة والتقريبية للتشخيص أن الجملة المتدرجة دوريا تظهر قوة ميكانيكية عالية وأكثر صلابة مقارنة بالتركيب ذات قفز القرينة [18].

- بعض استعمالات مرايا براغ :

هذه المرايا يمكن استعمالها في صناعة الليزر ذو الانبعاث العمودي والمبينة بالشكل 9.I. والتركيبية العمودية تسمح بتشكيل العديد من التجويفات جملة على نفس المسند .



الشكل : 9.I - مخطط يمثل تجويف ليزر ذو انبعاث عمودي محدد بمرايا براغ [1].

حديثًا طرح استعمال هذه المرايا في الصمامات الثنائية بتجويف ضيائي ذو انبعاث مرئي وهذه تسمح بتحقيق المعلقات (afficheurs) الملونة [1].

- المواد المستعملة :

المواد المختارة لتصنيع المرايا تعتمد على وظيفة هذه الأخيرة.

قرينة المسند لها علاقة بعامل انعكاس المرآة ، التطبيق يفرض على المسند (تجويف الليزر، طبقة مضادة للانعكاس...) من المفضل أن يكون شفاف في مجال الطيف المفيد للتركيب الذي ينتمي إليه، فالامتصاص عامة ظاهرة غير مرغوب فيها.

- أنواع المساند المستعملة هي :

- الزجاج.
- أنصاف النواقل.
- المواد العضوية.
- المعادن.

مساند أنصاف النواقل مستعملة في التطبيقات الميكروإلكترونية والإلكترونيات الضوئية [1].

أما المواد المستعملة في الطبقات فهي على نوعين :

- نصف ناقلة وعازلة :

من أنصاف النواقل المستعملة : GaN , $(\text{AlGa})\text{N}$, AlN , AlAs , $(\text{AlGa})\text{As}$, GaAs , InP , ...

من المواد العازلة : MgF_2 , ZnSe , Al_2O_3 , Si_3N_4 , TiO_2 , SiO_2 , MgO , ... [7]

I-1.2- المرشحات :

المرشحات هي تركيبات متعددة الطبقات وهي تقدم عامل انعكاس مرتفع يصل إلى 100% دون امتصاص خلال مجال عريض لطول الموجة، ويتخلل هذا المجال طول موجة الرنين λ_0 التي يسمح المرشح بإمرارها دون عكسها، فالمرشح وسيلة تسمح بانتقاء إشعاع ذو طول موجة معينة λ_0 . وتركيب المرشح شبيه بتركيب مرآة براغ، حيث المرشح عبارة عن مرآة براغ نحدث فيها تغييرا في دوريتها. وندرس نوعان هما :

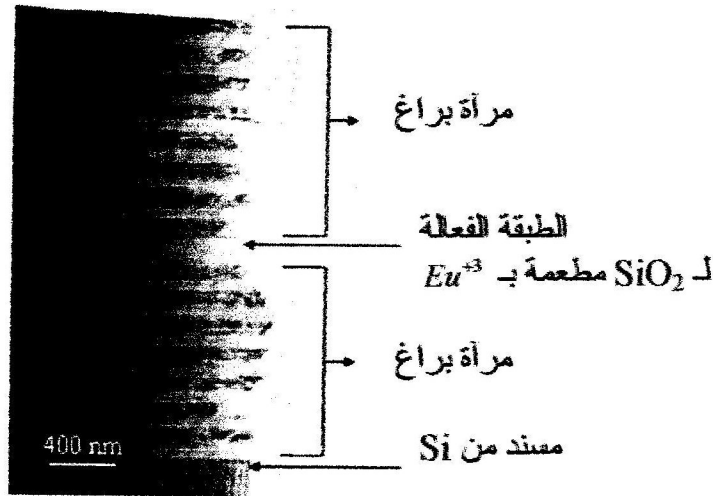
أ- المرشحات ثنائية الطبقات المتجانسة ذات قفز القرينة :

يمكننا أن نحصل على هذا النوع من المرشحات من مرآة براغ الثنائية الطبقات ومن نفس المادتين المكونة لهما، نضيف فوقها عدد معين من طبقات ثنائية أخرى لكن بسمكين للمادتين يختلفان عن السمكين السابقين للمرآة، أو بطريقة أخرى بإحداث تغيير في دورية المرآة بحيث نحدث تغييرا مفاجئا في سمك طبقة واحدة من الطبقات المكونة لها، مثلا يكون السمك الضوئي لهذه الطبقة نصف موجة بدل ربع موجة وباقي الطبقات الأخرى ربع موجة كذلك فإن تجويف الليزر عبارة عن مرشح.

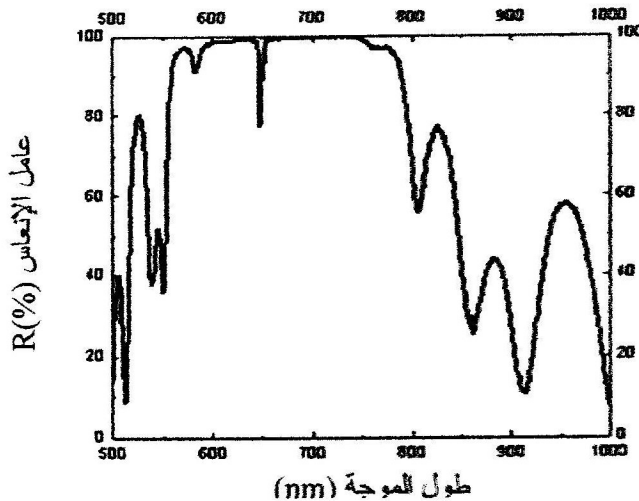
ونعطي مثالين على هذا النوع من المرشح :

– المثال الأول [5]: عبارة عن قياسات تجريبية

التجويف مكون من طبقة SiO_2 مطعمة Eu^{3+} نصف موجة تتواجد بين مرأتين متماثلتين كل واحدة مكونة من سبع طبقات ثنائية من مادتي SiO_2 و TiO_2 ، سمك طبقة SiO_2 88 nm وسمك طبقة TiO_2 82 nm وسمك طبقة SiO_2 المطعمة 170 nm. وهذا المرشح موضح بالشكل 10.I. نلاحظ هبوط حاد لعامل الانعكاس بشكل مفاجئ يتخلل شريط الإيقاف عند طول الموجة 650 nm حيث يكون المرشح في حالة رنين. والشكل 11.I يبين استجابته الضوئية.



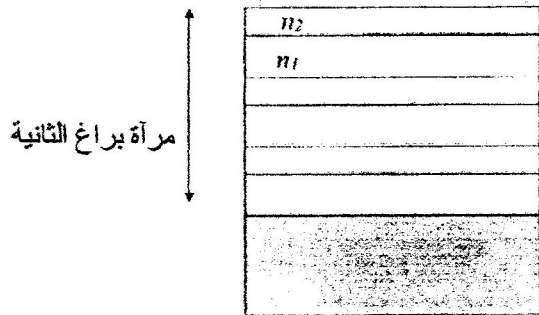
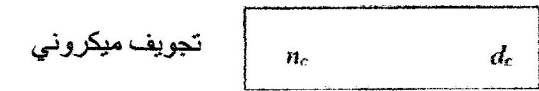
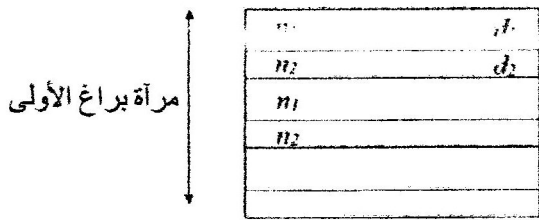
الشكل 10.I - صورة بمجهر الكتروني (TEM) لمقطع تجويف ميكروني. كل مرآة مصممة بسبع طبقات ثنائية بالتناوب طبقات SiO_2 (الطبقات الساطعة) و TiO_2 (الطبقات الداكنة). الطبقة الفعالة من مادة SiO_2 مطعمة بـ Eu^{3+} . [5]



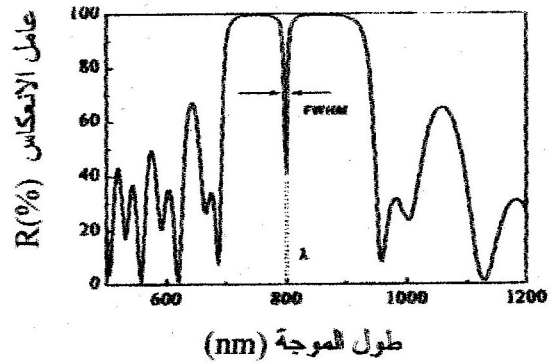
الشكل 11.I - طيف الانعكاس للتجويف الميكروني. طول موجة الرنين $\lambda_0 = 650 \text{ nm}$. [5]

- المثال الثاني : المرشح [6]: عبارة عن تشبيه حساسي

عبارة عن مرآتي براغ متقابلتين بينهما طبقة سمكها d_c وقرينته n_c وهي عبارة عن تجويف ميكروني (micro cavité). هذا المرشح ميم على الشكل 12.I حيث على اليسار (أ) نجد شكل لتركيب المرشح وعلى اليمين (ب) معطاة استجابته الضوئية.
فإن وجود طبقة عازلة لها قرينة وسمك يختلفان عن المميزة للمرآة يؤدي إلى اضطراب الدورية للمرآة مما يؤدي إلى هبوط في قيمة عامل الانعكاس.



(أ)



(ب)

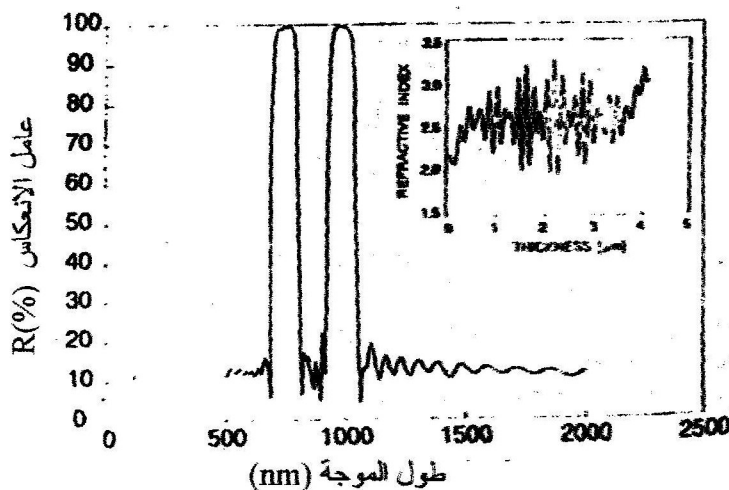
الشكل 12.I - أ - مخطط لتجويف ميكروني.

ب- تشبيه الاستجابة الضوئية لعامل الانعكاس لتركيبة Fabry-Pérot التي لها الوسائط التالية [6]:
 $n_1 = 1.3, d_1 = 154 \text{ nm}, n_2 = 1.8, d_2 = 111 \text{ nm}, n_c = n_2, d_c = 2 \cdot d_1$ ، عدد الطبقات الثنائية للمرآتين 6.

ب- المرشحات الخليطة الغير متجانسة المتدرجة القرينة دوريا:

يمكننا الحصول على مرشح من هذا النوع من مرآة براغ الخليطة الغير متجانسة والمتغيرة القرينة دوريا وفقا لدالة دورية معينة بإضافة طبقة خليطة غير متجانسة فوقها متغيرة القرينة دوريا وفقا لدالة أخرى تختلف نحن الأولى.

مثال [10]: هذا المرشح قرينته تتغير بشكل دالة جيبيية ذات سعة جيبيية.



الشكل 13.I- طيف انعكاس لمرشح متدرج القرينة، مرفوق ببيان تغير القرينة. [10]

نفس المواد المستعملة في مرايا براغ.

I-3.1- الأغشية المضادة للانعكاس :

لتطوير فعالية الخلايا الشمسية، نستعمل عموما أغشية مضادة للانعكاس تتوسط بين الهواء والمسند، التي تسمح برفع ربح التيار الضوئي إلى أكثر من 50% [19,20,21].

توجد الكثير من الأغشية المضادة للانعكاس ندرس منها :

أ- أغشية مضادة للانعكاس كلاسيكية :

الأغشية المضادة للانعكاس مرسبة طبقة واحدة أو عدة طبقات من الشائع استعمال طبقة واحدة ذات ربع موجة تتمركز على القيمة الأعظمية للطيف الشمسي، هذا النوع بسيط التصنيع يسمح بتقليص الخسائر الناتجة عن الانعكاس إلى 10% على المتوسط من أجل ربح تيار ضوئي يقدر بـ 40% [21,22].

ولتحسين فعالية الأغشية المضادة للانعكاس تستعمل تركيبات متعددة الطبقات [23,20]. تسمح بتقليص عامل الانعكاس إلى أقل من 1% في مجال معتبر من طول الموجة :

– غطاء مضاد للانعكاس مكون من طبقة واحدة على مسند زجاجي :

عامل الانعكاس لطبقة متجانسة على زجاج معطى بالعلاقة (6.I):

$$R_{film} = \frac{n^2(n_0 - n_s)^2 - (n_0^2 - n^2)(n^2 - n_s^2)\sin^2(2\pi nd / \lambda)}{n^2(n_0 + n_s)^2 - (n_0^2 - n^2)(n^2 - n_s^2)\sin^2(2\pi nd / \lambda)} \quad (6.I)$$

n_0 : قرينة الوسط المحيط.

n : القرينة الضوئية للطبقة.

d : سمك الطبقة.

n_c : القرينة الضوئية للمسند.

λ : طول الموجة.

بعدما كان عامل الانعكاس قبل وضع الغطاء المضاد للانعكاس.

$$R_{uncoated} = \left[\frac{n_0 - n_s}{n_0 + n_s} \right]^2 \quad (7.I)$$

بإمكاننا استنتاج ما يلي :

$$R_{film} \leq R_{uncoated}$$

من أجل :

$$n_0 \leq n \leq n_s \quad (8.I)$$

وكحالة خاصة : $R_{film} = 0$

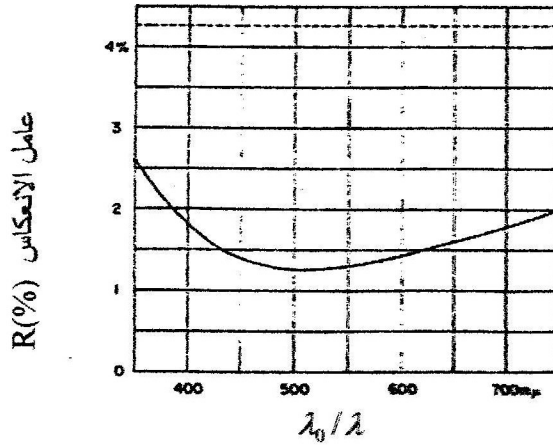
من أجل :

$$n = \sqrt{n_0 n_s} \quad (9.I)$$

$$\frac{2\pi nd}{\lambda} = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \dots$$

وكذلك

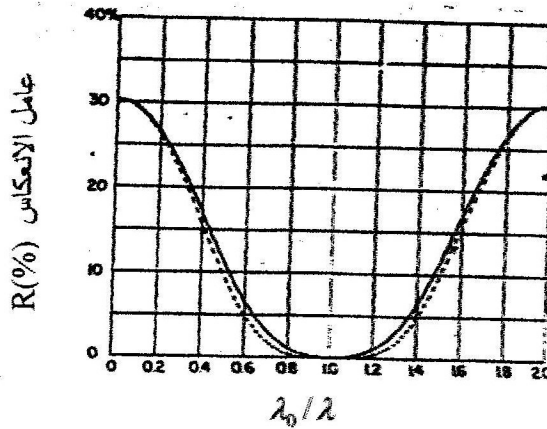
في هذه الحالة أنسب مادة يمكن استعمالها هي MgF_2 التي قرينتها : 1,38 ومن أجل الزجاج العادي $n \approx 1,5$ المستعمل كمسند (حسب الشكل 14.I) من أجل المساند ذات القرائن الكبيرة ،خصوصا $n \geq 1,38$ طبقة واحدة للغطاء المضاد للانعكاس تكاد تكون فعالة جدا [24].



الشكل 14.I - مقارنة بين عامل الانعكاس لغطاء مضاد للانعكاس أحادي الطبقة (خط مستمر) وعامل انعكاس مساحة غير مغطاة (خط متقطع)، $4n_1d_1 = 510 \text{ nm}$ ، $n_1 = 1.38$ ، $n_0 = 1$ ، $n_s = 1.52$ [24]

- غطاء مضاد للانعكاس مكون من طبقتين على مسند ذو قرينة مرتفعة [24]:
 طبقتين تقلل من نقائص الغطاء المكون من طبقة واحدة.
 مجموعة النوع I للأغطية (حسب الشكل 15.I) تحقق:

$$n_2 = n_1 \sqrt[3]{(n_s/n_0)} \quad (10.I)$$



الشكل 15.I - عامل انعكاس لطبقتين من مجموعة النوع I للأغطية على مسند ذو قرينة مرتفعة.

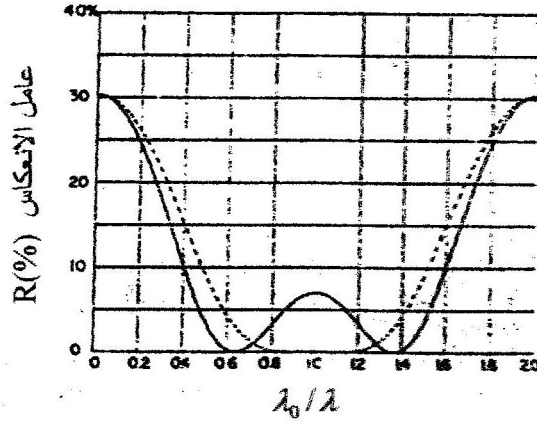
حيث $n_0 = 1$ ، $n_s = 3.45$ [24]

خط مستمر : $n_1 = 1.56$ $4n_1d_1 = \lambda_0$ خط متقطع : $n_1 = 1.38$ $4n_1d_1 = \lambda_0$

$n_2 = 2.896$ $4n_2d_2 = \lambda_0$ $n_1 = 2.56$ $4n_2d_2 = \lambda_0$

مجموعة النوع II من الأغشية (حسب الشكل 16.I) تحقق :

$$n_2 = n_s n_0 / n_1 \quad (11.I)$$



الشكل 16.I - عامل انعكاس لطبقتين من مجموعة النوع II للأغشية على مسند ذو قرينة مرتفعة.

حيث $n_0 = 1, n_s = 3.45$ [24]

خط متقطع : $4n_1d_1 = \lambda_0 \quad n_1 = 1.38$

خط مستمر : $4n_1d_1 = \lambda_0 \quad n_1 = 1.56$

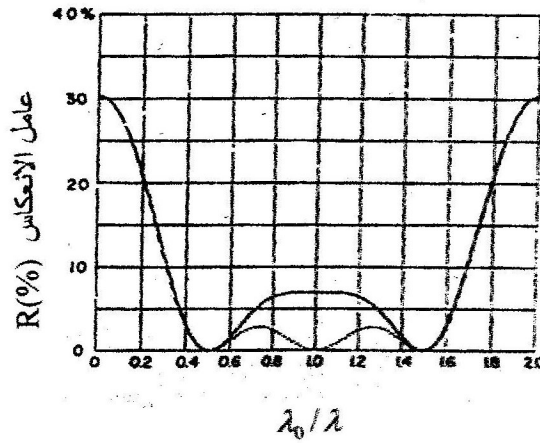
$4n_2d_2 = \lambda_0 \quad n_2 = 2.38$

$4n_2d_2 = \lambda_0 \quad n_2 = 2.21$

- غطاء مضاد للانعكاس مكون من ثلاث طبقات على مسند ذو قرينة مرتفعة [24]:
مجموعة النوع I للأغطية (حسب الشكل 17.I) تحقق العلاقتين التاليتين :

$$n_2 = \sqrt{n_s n_0} \quad (12.I)$$

$$n_3 = n_1 \sqrt{(n_s / n_0)} \quad (13.I)$$



الشكل 17.I - عامل انعكاس لطبقتين من مجموعة النوع I للأغطية على مسند ذو قرينة مرتفعة.

حيث $n_0 = 1, n_s = 3.45$ [24]

خط متقطع : $4n_1d_1 = \lambda_0 \quad n_1 = 1.38$

خط مستمر : $4n_1d_1 = \lambda_0 \quad n_1 = 1.56$

$4n_2d_2 = \lambda_0 \quad n_2 = 1.8574$

$4n_2d_2 = \lambda_0 \quad n_2 = 1.8574$

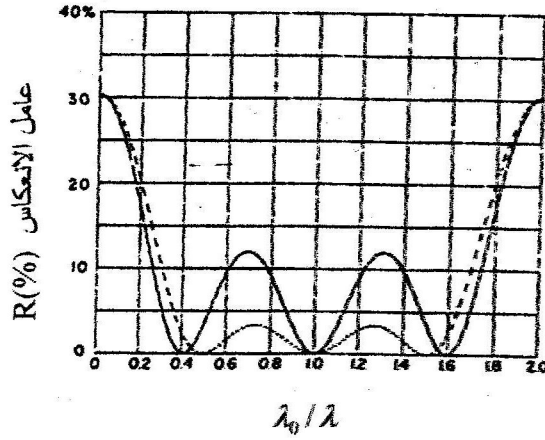
$4n_3d_3 = \lambda_0 \quad n_3 = 2.56$

$4n_3d_3 = \lambda_0 \quad n_3 = 2.896$

مجموعة النوع II للأغطية (حسب الشكل 18.I) تحقق العلاقتين التاليتين :

$$n_2 = \sqrt{n_s n_0} \quad (14.I)$$

$$n_3 = n_s n_0 / n_1 \quad (15.I)$$



الشكل 18.I - عامل انعكاس لطبقتين من مجموعة النوع II للأغطية على مسند ذو قرينة مرتفعة.

حيث $n_0 = 1, n_s = 3.45$ [24]

$$4n_1 d_1 = \lambda_0 \quad n_1 = 1.38 \quad \text{خط متقطع} \quad 4n_1 d_1 = \lambda_0 \quad n_1 = 1.56 \quad \text{خط مستمر}$$

$$4n_2 d_2 = \lambda_0 \quad n_2 = 1.8574 \quad 4n_2 d_2 = \lambda_0 \quad n_2 = 1.8574$$

$$4n_3 d_3 = \lambda_0 \quad n_3 = 2.5 \quad 4n_3 d_3 = \lambda_0 \quad n_3 = 2.21$$

ب- أغطية مضادة للانعكاس متدرجة القرينة :

وهي طبقات ضوئية لا متجانسة، حيث تتناقص فيها القرينة الضوئية بالتدرج من المسند إلى الوسط المحيط. حيث اقترحت منذ حوالي ثلاثون سنة [25].

نظريا إذا كانت القرينة الضوئية تتناقص باستمرار من المسند إلى الوسط المحيط، الانعكاس يصبح معلوما [26]، لكن للأسف هذا لم يتحقق عمليا لأن المواد ذات القرينة الضوئية الكبيرة عموما هي ماصة.

ج- أغطية مضادة للانعكاس من السيليسيوم المسامي :

إن وجود مسامات داخل السيليسيوم يؤدي إلى أن القرينة الفعالة للانعكاس تتناقص القرائن من 1,3 إلى 1,25، بينت في هذا النوع من المواد [28,27]. وهذا يسمح بصنع هذه الأغطية من السيليسيوم المسامي.

- عامل جودة الأغذية المضادة للانعكاس : كون القرينة الضوئية وأشعة الشمس وحساسية الخلايا الشمسية تتغير مع طول الموجة. فلمعرفة نوعية الأغذية المضادة للانعكاس لا بد من دراسة طيفية نستعمل فيها التيار الضوئي I_{ph} والمتوسط المرجح لعامل الانعكاس R_w .
- التيار الضوئي : يساوي جداء تركيز الإلكترونات أو الثقوب المتوالدة من جراء الإضاءة في الشحنة q من أجل وحدة زمن [30,29].

$$I_{ph} = \frac{Ne \cdot q}{t} \quad (16.I)$$

- الحساسية الطيفية :

- نعرف الحساسية الطيفية S هي نسبة كثافة التيار المجموع I_{ph} (التيار الضوئي) إلى كثافة الاستطاعة ϕ (الفيض الضوئي) من أجل كل طول موجة للإشعاع الضوئي [31,30,29].

$$S = \frac{I_{ph}}{\phi} \quad (17.I)$$

يمكننا كتابة الحساسية الطيفية كالتالي [29] :

$$S(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{\phi(\lambda)(1-R(\lambda))} \quad (18.I)$$

ϕ : الفيض الضوئي مقدر W/m^2

$$I_{ph}(\lambda) = S(\lambda) \cdot \phi(\lambda) \cdot (1-R(\lambda)) \quad (19.I)$$

يمكننا بسط الحساب للتيار الضوئي على كل الطيف الشمسي الموجود في المجال (300-1100) nm.

$$I_{ph} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{ph}(\lambda) d\lambda \quad (20.I)$$

من (19.I) و (20.I) نكتب :

$$I_{ph} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \cdot \phi(\lambda) \cdot (1-R(\lambda)) \cdot d\lambda \quad (21.I)$$

- عبارة المتوسط المرجح لعامل الانعكاس R_w :

المربوط بعامل الانعكاس والحساسية الطيفية والفيض الضوئي الساقط المعرف بالعلاقة :

$$R_w = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \cdot \phi(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \cdot \phi(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (22.I)$$

حيث استعملنا : $\phi = 1,5AM$

ويمكن أن نعبر عنه بالعلاقة :

$$Rw = \left(1 - \frac{I_{ph}}{I_{ph}(R=0)}\right) \quad (23.I)$$

2.I- الدراسة النظرية لانتشار موجة كهرومغناطيسية في الأوساط المتعددة الطبقات :

في هذا الجزء نعطي الوسائل والطرق الرياضية الضرورية التي تمكننا من دراسة ظاهرة الانعكاس الضوئي على تركيبة ذات وسائط ضوئية محددة.

على سبيل إثبات كفاية ترجمة العلاقات الرياضية التي تصف التركيبة وظاهرة الانعكاس عمليا. نحاول أن نعمل هذه الدراسة بطريقة بسيطة وواضحة بدءا بأبسط حالة وهي التركيبة المكونة من سطین هما : المحيط/المسند. ثم نطور الدراسة إلى تركيبات أخرى أكثر تعقيدا منها دراسة شاملة تدرس تركيبة مكونة من (m) طبقة باستعمال المصفوفات، نتبنى طريقة المصفوفات التي قدمها ABELES وطورها AZZAM et AL [32].

1.2.I- المبادئ النظرية والعلاقات الأساسية :

- تعريف وسط وحيد ونقط الاستقطاب :

نعبر وسطین نصف لا متناهيين متجانسين ونسيقين الأول هو الوسط المحيط ذو قرينة n_0 والثاني هو المسند وهو وسط ماص ذو قرينة مركبة \tilde{n}_1 .

القرينة الضوئية معرفة بمركبتين حقيقيتين n وتخيلية k على الترتيب.

تسمى قرينة الانكسار وقرينة الامتصاص [33].

$$\tilde{n}_1 = n - ik = \sqrt{\epsilon} \quad (24.I)$$

ϵ : ثابت العزل للوسط (أو سماحية العازل).

مستوى الورد هو المستوى الشامل لمحور انتشار الموجة الواردة والناظم على سطح المادة. مركبات شعاع الحقل الكهربائي معرفين لهذا المستوى [I].

يوجد نوعان من الاستقطاب، الاستقطاب العمودي ورمزه (S) وتكون فيه مركبة شعاع الحقل عمودية على مستوى الورد والاستقطاب الموازي ورمزه (P) في حالة مركبة شعاع الحقل موازية لمستوى الورد. نعتبر موجة مستوية وحيدة اللون، الحقل الكهربائي لها يعطي [34] :

$$E(Z) = E_i \cdot \exp(iKZ) + E_r \cdot \exp(-iKZ) \quad (25.I)$$

E_r ، E_i على الترتيب : سعتي المركبتين للحقل الواردة والمنعكسة.

من معادلات "ماكسويل" [35,34,33] لدينا :

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (26.I)$$

$$\vec{B} = \mu_0\vec{H} \quad (27.I)$$

وبالتالي :

$$\vec{B} = \frac{1}{\omega}(\vec{K}\wedge\vec{E}) \quad (28.I)$$

الانتشار وفقا للمحور OZ لذلك نكتب :

$$\vec{K} = \frac{\omega}{c}\vec{Z} \quad (29.I)$$

النبض له علاقة بالتواتر وتعطي :

$$\omega = 2\pi\nu \quad (30.I)$$

من (29.I) و (30.I) نجد :

$$\vec{K} = \frac{2\pi}{\lambda}\vec{Z} \quad (31.I)$$

ونعلم :

$$C^2 = \frac{1}{\epsilon_0\mu_0} \quad (32.I)$$

μ_0 : نفاذية الفراغ.

ϵ_0 : سماحية الفراغ.

وفقا لانتشار الضوء في اتجاه المحور OZ أو في الاتجاه المعاكس له ، عبارة الحقل المغناطيسي تعطي [36] :

$$H(Z) = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}}[E_i \exp(iKZ) - E_r \exp(-iKZ)] \quad (33.I)$$

أي :

$$H(Z) = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot E(Z) \quad (34.I)$$

إذا كان الوسط ذو قرينة \vec{n} العلاقة (34.I) تكتب :

$$H(Z) = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot E(Z) \cdot \vec{n} \quad (35.I)$$

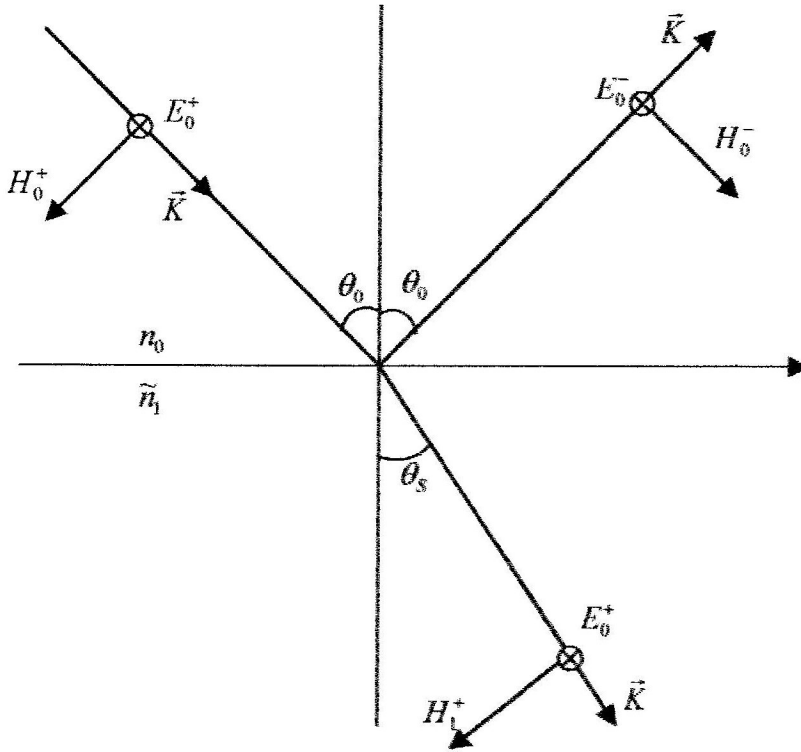
نعرف $y_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}}$: قبولية الفراغ.

نأخذ وحدة $H(Z)$ هي وحدة y_0 [33]

$$H(Z) = \vec{n} \cdot E(Z) \quad (36.I)$$

2.2.I - السطح الفاصل، الوسط المحيط/المسند :

أ- الاستقطاب العمودي S :



الشكل : 19.I - السطح الفاصل (الوسط المحيط/المسند) في حالة الاستقطاب S

: $n_0 = \tilde{n}_0$: لأن الوسط المحيط شفاف (غير ماص).

أما المسند يعتبر وسط نصف لا متناهي وقربته الضوئية \tilde{n}_s والمعرفة بالعلاقة (24.I).

الاستمرارية على السطح الفاصل للمركبات المماسية للحقول الكهربائية والمغناطيسية تسمح لنا بكتابة [36]

$$\begin{cases} E_0^+ + E_0^- = E_1^+ \\ -H_0^+ + H_0^- = -H_1^+ \end{cases} \quad (37.I)$$

وهذا يؤدي إلى :

$$\begin{cases} E_0^+ + E_0^- = E_1^+ \\ n_0 \cos \theta_0 (E_0^+ - E_0^-) = \tilde{n}_s \cos \theta_s E_1^+ \end{cases} \quad (38.I)$$

- عامل الانعكاس ومعاملات الانعكاس والانفاذية :

معامل الانعكاس لفرينيل المركب في حالة الاستقطاب S يعطي [37] :

$$r_s = \left[\frac{E_0^-}{E_0^+} \right]_S \quad (39.I)$$

معامل الإنفاذية لفرينل يعطي :

$$t_s = \frac{E_1^+}{E_0^+} \quad (40.I)$$

يمكننا كتابة r_s و r_i على الشكل :

$$r_s = \frac{n_0 \cos \theta_0 - \tilde{n}_s \cos \theta_s}{n_0 \cos \theta_0 + \tilde{n}_s \cos \theta_s} \quad (41.I)$$

$$t_s = \frac{2n_0 \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_0 + \tilde{n}_s \cos \theta_s} \quad (42.I)$$

ويعطي عامل الانعكاس بالعلاقة :

$$R_s = r_s r_s^* \quad (43.I)$$

جملة المعادلات (43.I) تكتب على الشكل المصفوفي :

$$\begin{pmatrix} E_0^- \\ E_0^+ \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{n_0 \cos \theta_0} \\ 1 & \frac{1}{n_0 \cos \theta_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ n_s \cos \theta_s \end{pmatrix} \quad (44.I)$$

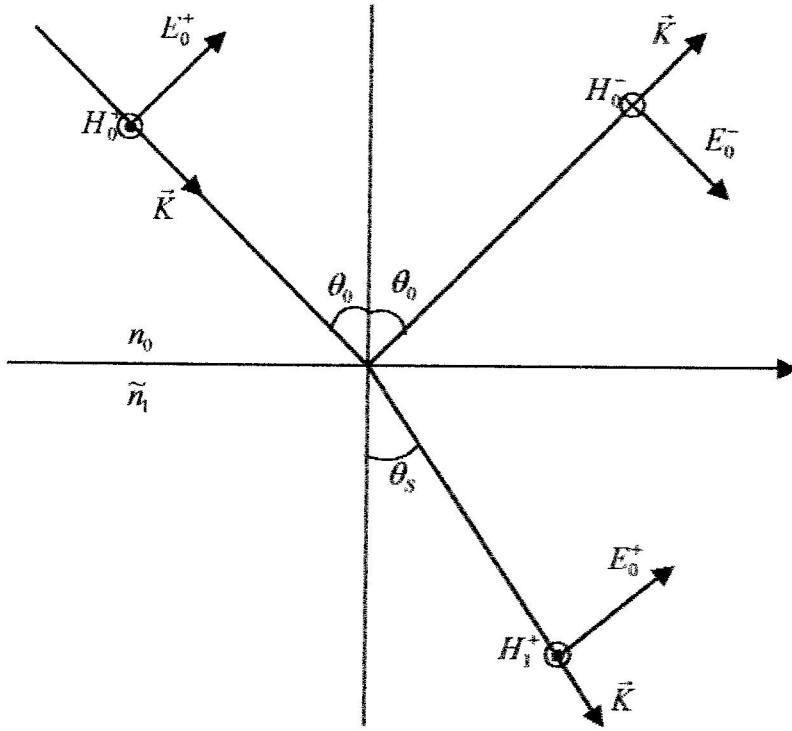
ب- الاستقطاب الموازي P :

تكتب شروط المرور عبر السطح الفاصل :

$$\begin{cases} E_0^+ + E_0^- = E_1^+ \\ H_0^+ - H_0^- = H_1^+ \end{cases} \quad (45.I)$$

وهذا يؤدي إلى :

$$\begin{cases} E_0^+ \cos \theta_0 + E_0^- \cos \theta_0 = E_1^+ \cos \theta_s \\ n_0 (E_0^+ - E_0^-) = \tilde{n}_s E_1^+ \end{cases} \quad (46.I)$$



الشكل 20.I- السطح الفاصل (الوسط المحيط/المسند) في حالة الاستقطاب P

من معادلات الوصل (46.I) عبارات r_p و t_p تكتب :

$$r_p = \frac{n_0 \cos \theta_s - \tilde{n}_s \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_s + \tilde{n}_s \cos \theta_0} \quad (47.I)$$

$$t_p = \frac{2n_0 \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_s + \tilde{n}_s \cos \theta_0} \quad (48.I)$$

ويعطي عامل الانعكاس بالعلاقة :

$$R_p = r_p r_p^* \quad (49.I)$$

المعادلات (46.I) يمكن كتابتها بشكل مصفوفات كالتالي :

$$\begin{pmatrix} E_0^- \\ E_0^+ \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{\cos \theta_0}{n_0} \\ 1 & \frac{\cos \theta_0}{n_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{n_s}{\cos \theta_s} \end{pmatrix} \quad (50.I)$$

ملاحظة :

من الكتابات المصفوفية السابقة، نلاحظ أن الحد الثاني مكون من مصفوفة وشعاع، المصفوفة تميز

الوسط المحيط ذو قرينة انكسار n_0 والشعاع يميز المسند ذو القرينة \tilde{n}_s .

3.2.I - الطبقة البينية ذات قرينة \tilde{n}_1 (ورود مائل) :

نضيف طبقة بينية بين الوسط المحيط والمسند، والمميزة بالوسائط الضوئية \tilde{n}_1 و d_1 وهما على الترتيب القرينة الضوئية والذي يكون عددا مركبا أو حقيقيا حسب الوسط إذا كان ماصا أو شفافا (غير ماص) وسمك الطبقة d_1 .

في الحالة العامة حيث يكون الضوء الوارد غير عمودي على السطح الفاصل فإنه تكون لدينا مرتبتين للحقل الكهربائي والمغناطيسي [36] ، الأولى مماسية والأخرى ناظمية. المعاملات $\cos\theta_1$ ، $\cos\theta_0$ و $\cos\theta_s$ (θ_0 هي زاوية الورد على السطح الفاصل) تظهر في العبارات لهذه المركبات حسب نوع الاستقطاب المدروس.

في جميع الحالات نصل إلى العبارات التالية :

أ- الاستقطاب العمودي S:

$$\begin{pmatrix} E_0^- \\ E_0^+ \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{n_0 \cos\theta_0} \\ 1 & \frac{1}{n_0 \cos\theta_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta & -\frac{i \sin\beta}{\tilde{n}_1 \cos\theta_1} \\ i\tilde{n}_1 \cos\theta_1 \sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \tilde{n}_s \cos\theta_s \end{pmatrix} \quad (51.I)$$

ب- الاستقطاب الموازي P :

$$\begin{pmatrix} E_0^- \\ E_0^+ \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{\cos\theta_0}{n_0} \\ 1 & \frac{\cos\theta_0}{n_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta & i \sin\beta \cos\theta_1 \\ \frac{i\tilde{n}_1 \sin\beta}{\cos\theta_1} & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{\tilde{n}_s}{\cos\theta_s} \end{pmatrix} \quad (52.I)$$

$$\beta = \frac{2\pi\tilde{n}_1 d_1}{\lambda} \cdot \cos\theta_1 \quad (53.I)$$

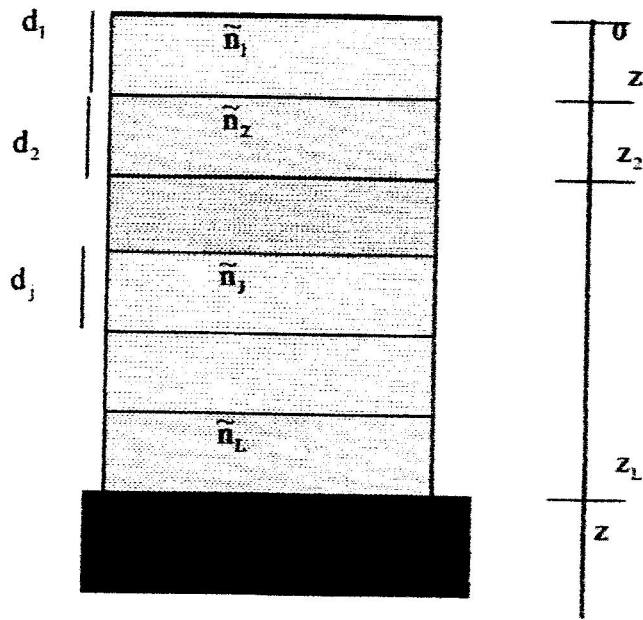
θ_1 : عبارة عن زاوية الانعكاس للموجة في الوسط ذو القرينة \tilde{n}_1 .

4.2.I - جملة متعددة الطبقات :

الجملة متعددة الطبقات هي تراكم طبقات متجانسة أو خليطة ذات أوجه مستوية ومتوازية والتي تستطيع تقلد خواص ضوئية جد مختلفة حسب نوع التراكم.

أهمية هذه التركيبات كبيرة لأنها تكمن في تحقيق وظائف جد مختلفة، مثل الأغشية المضادة للانعكاس، المرايا، المرشحات الضوئية [28].

دراسة الجمل المتعددة الطبقات يحتوي على دراسة الخواص الضوئية لتركيبية معطاة ونحدد تأثير هذه الخواص على ظاهرة انعكاس الضوء على سطح التركيبية.



الشكل: 21.I- تراكم L طبقة على مسند ذو قرينة \$n_s\$

- تعريف التركيبية :

نعتبر تركيبية متدرجة مشكلة من تنالي أسطح فاصلة مستوية ومتوازية توافق تراكم الطبقة 1، 2، 3، ...، j، ...، m ذات سمك \$d_j\$ محتواة بين الوسط المحيط والمسند [38,28].

محور الانتشار معرف بـ \$OZ\$، مبدأ الفواصل \$Z=0\$، وهو عند سطح التركيبية وكل سطح فاصل بين الطبقة \$z\$ و \$z+1\$ محددة بالفاصلة \$Z_j\$ كل طبقة يمكن أن تكون مميزة بمصفوفة \$M_j(d_j)\$ والعلاقة بين الحقول على سطح التركيبية (\$Z=0\$) والحقول عند السطوح الفاصلة :

التركيبية/مسند \$Z = Z_L\$ وهي كالتالي :

$$\begin{pmatrix} E(0) \\ H(0) \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^L \begin{pmatrix} \cos \beta_j & \frac{i \sin \beta_j}{\tilde{n}_j \cos \theta_j} \\ \tilde{m}_j \cos \theta_j \sin \beta_j & \cos \beta_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E(Z_L) \\ H(Z_L) \end{pmatrix} \quad (54.I)$$

فرق الطور لكل طبقة يعطي :

$$\beta_j = \frac{2\pi \tilde{m}_j d_j}{\lambda} \cos \theta_j \quad (55.I)$$

- المعادلات العامة في النمطين S و P:

من المعادلة (54.I) يمكن حساب عامل الانعكاس للتراكم، الحساب يدخل نسبة سعبي الحقلين الوارد والمنعكس.

كل حقل $E(Z_j)$ و $H(Z_j)$ يمكن أن تترجم أيها موضوعة فوق بعضها البعض في الوسط J للحقل الوارد E_j^+ والحقل المنعكس E_j^- .

نطبق شروط الاستمرارية للحقول المماسية للسطوح الفاصلة فنحصل على:

$$\begin{cases} E_0^+ + E_0^- = E(Z_j) \\ n_0 \cos \theta_0 (E_j^+ - E_j^-) = \frac{1}{\tilde{n}_j \cos \theta_0} H(Z_j) \end{cases} \quad (56.I)$$

الصيغة المصفوفية للمعادلة (46.I) يمكن كتابتها:

$$\begin{pmatrix} E_0^- \\ E_0^+ \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{\tilde{n}_j \cos \theta_0} \\ 1 & \frac{1}{\tilde{n}_j \cos \theta_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E(Z_j) \\ H(Z_j) \end{pmatrix} \quad (57.I)$$

باستثناء الحقلين الوارد والمنعكس عند السطح $Z=0$ نحقق المعادلة:

$$\begin{pmatrix} E_0^- \\ E_0^+ \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{n_0 \cos \theta_0} \\ 1 & \frac{1}{n_0 \cos \theta_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E(0) \\ H(0) \end{pmatrix} \quad (58.I)$$

ونعلم أن:

$$r = \frac{E_0^-}{E_0^+} \quad (59.I)$$

هذا الكسر يمكن حسابه بربط المعادلات (54.I) و (58.I).

- النمط S:

$$\begin{pmatrix} E_0^- \\ E_0^+ \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{\tilde{n}_0 \cos \theta_0} \\ 1 & \frac{1}{\tilde{n}_0 \cos \theta_0} \end{pmatrix} \prod_{j=1}^L \begin{pmatrix} \cos \beta_j & \frac{i \sin \beta_j}{\tilde{n}_j \cos \theta_j} \\ \tilde{m}_j \cos \theta_j \sin \beta_j & \cos \beta_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \tilde{n}_s \cos \theta_s \end{pmatrix} \quad (60.I)$$

بالماتلة نحصل على المصفوفة الشاملة في النمط P

- النمط P :

$$\begin{pmatrix} E_0^- \\ E_0^+ \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{\cos \theta_0}{n_0} \\ 1 & \frac{\cos \theta_0}{n_0} \end{pmatrix} \prod_{j=1}^L \begin{pmatrix} \cos \beta_j & \frac{i \sin \beta_j \sin \theta_j}{\tilde{n}_j} \\ \frac{i \tilde{n}_j \sin \beta_j}{\cos \theta_j} & \cos \beta_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{\tilde{n}_s} \\ \cos \theta_s \end{pmatrix} \quad (61.I)$$

تعطى β_j حسب العلاقة (55.I).

من أجل الطبقة رقم z نعرف :

θ_0 : زاوية ورود.

\tilde{n}_j : القرينة الضوئية.

β_j : فرق الطور بين طبقتين متجاورتين.

d_j : سمك الطبقة.

θ_j : الزاوية المحصل عليها باستعمال قوانين Snell-Descartes.

$$\tilde{n}_1 \sin \theta_1 = \tilde{n}_2 \sin \theta_2 = \dots = \tilde{n}_j \sin \theta_j = \dots = \tilde{n}_s \sin \theta_s = \dots \quad (62.I)$$

ومعامل الانعكاس لفرينيل في هذا النمط :

$$r_p = \left[\frac{E_0^-}{E_0^+} \right]_p \quad (63.I)$$

عوامل الانعكاس تكتب من أجل نمطي الاستقطاب حسب العلاقتين (43.I) و (49.I) مع العلم أن للضوء الغير مستقطب :

$$R(\lambda) = \frac{R_s(\lambda) + R_p(\lambda)}{2} \quad (64.I)$$

3.I - الدراسة النظرية للأوساط الفعالة :

لتنميط طبقة يكفي معرفة قرينة انكسارها وسمكها توجد كتب مرجعية تخصص فيها أجزاء للقارئ الضوئية لعدد كبير من المواد.

عموما معطيات مقدمة تمثل مواد متجانسة مأخوذة كمرجع .

إذا كانت المادة المدروسة هي خليط من عدة مواد أو إذا كان بسبب طريقة الترسيب، كثافته تختلف عن

المادة المرجعية فإنه يمكن حساب قرينته اعتمادا على طريقة التقريب للوسط الفعال (EMA) [13,1].

توجد العديد من طرق التقريب للأوساط الفعالة، نذكر منها [39] :

- طريقة Bruggeman

- طريقة Cauchy.

- طريقة Maxwell-Garnett [40].

نستعمل في دراستنا تقريب Bruggeman.

1.3.I - تقريب الوسط الفعال لـ Bruggeman :

في هذا التقريب دالة العزل للوسط الفعال نحصل عليها من ربط دوال العزل لكل مكون للوسط.

هذه الطريقة تعتبر أن الوسط عبارة عن خليط متجانس للعديد من المواد.

نعتبر أنه نسيق من رتبة أصغر من طول الموجة وكل مادة من المزيج تحافظ على دالة العزل الخاصة بها من

أجل المزيج المكون من L مادة ذو دوال عزل خاصة ϵ_n التقريب للوسط الفعال يكتب :

$$\sum_{n=1}^L f_n \frac{\epsilon_n - \epsilon}{\epsilon_n + 2\epsilon} = 0 \quad (65.I)$$

حيث :

ϵ : دالة العزل للوسط.

f_n : النسبة الحجمية للمادة n.

وسائط الـ EMA هي نسب حجمية للمواد المكونة للخليط ومجموع هذه النسب تساوي 1 [1].

2.3.I - تقريب الوسط الفعال لـ Bruggeman المكون من مادتين :

من أجل مادتين A و B ذات ثابت العزل ϵ_a و ϵ_b ولها النسب الحجمية على الترتيب f_a و f_b .

تقريب Bruggeman يعطي علاقة ثابت العزل ϵ كالتالي :

$$f_a \frac{\epsilon_a - \epsilon}{\epsilon_a + 2\epsilon} + f_b \frac{\epsilon_b - \epsilon}{\epsilon_b + 2\epsilon} = 0 \quad (66.I)$$

مع : $f_a + f_b = 1$

نستعمل القرائن الضوئية :

$$\epsilon = n^2 \quad (67.I)$$

من (66.I) و (67.I) نكتب العلاقة التالية :

$$f_a \frac{n_a^2 - n^2}{n_a^2 + 2n^2} + f_b \frac{n_b^2 - n^2}{n_b^2 + 2n^2} = 0 \quad (68.I)$$

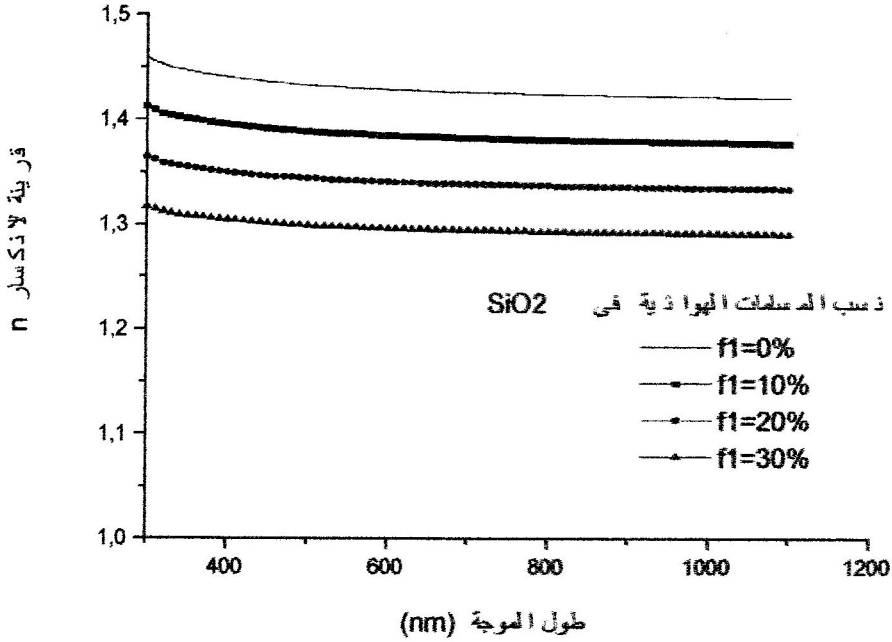
معلومية ثابتي العزل ϵ_a و ϵ_b للمادتين نستطيع حساب ثابت العزل ϵ للخليط [40,13,3,2].

ومن ثابت العزل ϵ نستعمل العلاقة (67.I) ونحسب القرينة الضوئية للوسط.

ولدينا ثلاثة خلاط كتطبيقات لطريقة BEMA التي سنستعملها في هذا العمل وهي كالتالي :

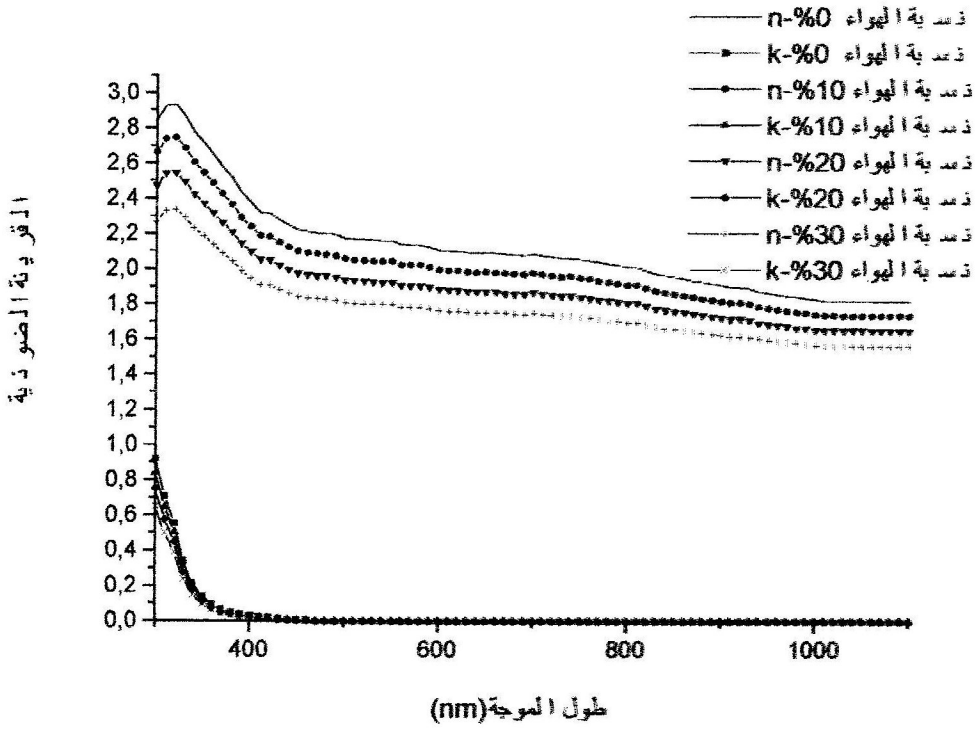
أ- تطبيق BEMA على الخليط (SiO_2 ، هواء) :

عادة يتشكل الخليط (SiO_2 ، هواء) عند ترسيب SiO_2 المسامي حسب النسب الحجمية للهواء نستطيع إيجاد قرائن انكسار الوسط للمجال الضوئي المستعمل باستعمال طريقة BEMA. أنظر الشكل 22.I.



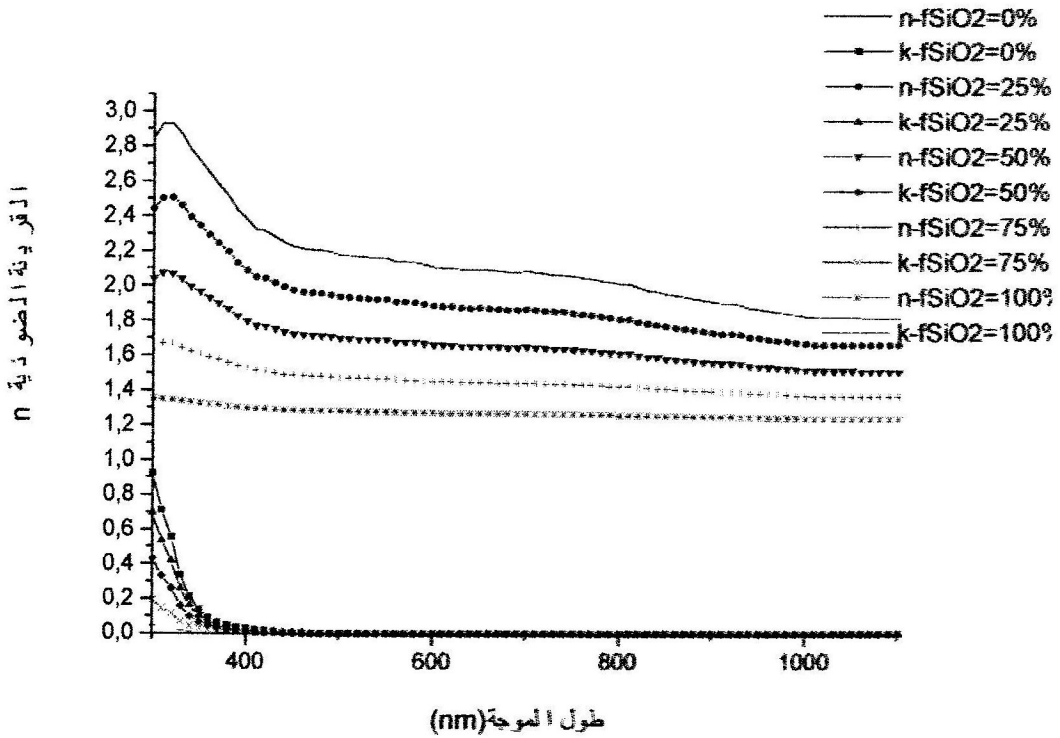
الشكل : 22.I- قرائن الانكسار لمادة SiO_2 .

ب- تطبيق BEMA على الخليط (TiO₂، هواء) : أنظر الشكل 23.I.



الشكل : 23.I - القرائن الضوئية لمادة TiO₂.

ج- تطبيق BEMA على الخليط (TiO₂، SiO₂) : أنظر الشكل 24.I.



الشكل : 24.I - القرائن الضوئية لخليط متجانس من مادتي SiO₂ و TiO₂.

الفصل الثاني

النموذج النظري ومدى تحقيقه عمليا

1.II- نماذج الجمل متعددة الطبقات :

بعدما درسنا في الفصل الأول العلاقات النظرية التي تسمح بدراسة مختلف الجمل المتعددة الطبقات (مرايا براغ، المرشحات، الأغشية المضادة للانعكاس). اخترنا فضاء Matlab 5.3 لكتابة برامجنا التي تسمح بحساب عامل الانعكاس R وكذلك رسم بيان R بدلالة طول الموجة (λ). هذه الوسيلة قوية وبسيطة الاستعمال وتسمح بالوصول إلى النتائج المرجوة بسرعة معتبرة .

1.1.II- مرايا براغ :**أ- مرايا براغ ذات قفز القرينة :**

إن عامل الانعكاس لهذا النوع من المرايا يتعلق بما يلي :

- زاوية الورود.

- المسند : في هذا النموذج استعملنا نوعان من المواد :

○ مسند ماص : وهو من مادة السيليسيوم.

○ مسند شفاف : وهو من مادة الزجاج.

حيث تتعلق قرينة المسند بطول الموجة.

- **الطبقات الثنائية :** من الضروري اختيار المادتين المشكلة للطبقات المتناوبة والمتجانسة أن يكون

هناك اختلاف في قرينتهما، وتكون المرآة ذات نوعية جيدة كلما كان الفارق بين قرينتي المادتين أكبر.

لذلك اخترنا مادتي أكسيد السيليسيوم SiO_2 وأكسيد التيتانيوم TiO_2 فهناك فارق بين قرينتهما إضافة إلى ذلك فهي تقريبا شفافتين في المجال الضوئي المستعمل.

قرينتي SiO_2 و TiO_2 تتعلقان بطول الموجة (λ).

فعامل الانعكاس يتعلق بالفارق بين قرينتي المادتين المشكلتين للطبقتين وكذلك بسمك كل طبقة حسب العلاقة (4.I).

وعند ترسيب مادة SiO_2 أو TiO_2 قد تكون المادة مكثفة أو مسامية وهذا يؤثر على قيم قرائن المادة ويجعلها تختلف عن القيم المرجعية للمادة.

كذلك عامل الانعكاس يتعلق بعدد الطبقات الثنائية.

نعتبر في دراستنا أن وسط المسند والوسط المحيط نصف لا متناهيين .

لحساب عامل الانعكاس R ورسم البيان $R(\lambda)$ نكتب برنامجا باستعمال فضاء Matlab 5.3 والذي يحتوي العمليات التالية :

- إدخال قرينة انكسار الوسط المحيط : $n_0 = 1$.
- إدخال زاوية الورود θ_0 التي تسمح بحساب زوايا الانكسار θ_1 في طبقة SiO_2 و θ_2 في طبقة TiO_2 و θ_s في المسند باستعمال قانون Snell-Descartes المعطى بالعلاقة (62.I).
- إدخال قرينة انكسار مادة المسند وقرائن مادتي SiO_2 و TiO_2 التي تتغير مع تغير طول الموجة، والقيم معطاة في الملحق I.
- حساب قرينة كل طبقة اعتبارا من قرينة SiO_2 و TiO_2 باستعمال تقريب الأوساط الفعالة — Bruggeman.
- حساب فرق الطور في كل من طبقتي SiO_2 و TiO_2 من العلاقة (55.I).
- حساب المصفوفات في حالة استقطاب S وهي : $M_{S0}, M_{S1}, M_{S2}, M_{SS}$ من العلاقات التالية :

$$M_{S0} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{n_0 \cos \theta_0} \\ 1 & \frac{1}{n_0 \cos \theta_0} \end{bmatrix} \quad (1.II)$$

$$M_{S1} = \begin{bmatrix} \cos \beta_1 & \frac{i \sin \beta_1}{\tilde{n}_1 \cos \theta_1} \\ \tilde{m}_1 \cos \theta_1 \sin \beta_1 & \cos \beta_1 \end{bmatrix} \quad (2.II)$$

$$M_{S2} = \begin{bmatrix} \cos \beta_2 & \frac{i \sin \beta_2}{\tilde{n}_2 \cos \theta_2} \\ \tilde{m}_2 \cos \theta_2 \sin \beta_2 & \cos \beta_2 \end{bmatrix} \quad (3.II)$$

$$M_{SS} = \begin{bmatrix} 1 \\ \tilde{n}_s \cos \theta_s \end{bmatrix} \quad (4.II)$$

ثم نحسب R_s بتطبيق العلاقات التالية على الترتيب : (43,I),(39,I),(60,I).

- حساب المصفوفات في حالة الاستقطاب P هي : $M_{P0}, M_{P1}, M_{P2}, M_{PS}$ من العلاقات التالية :

$$M_{P0} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{\cos \theta_0}{n_0} \\ 1 & \frac{\cos \theta_0}{n_0} \end{bmatrix} \quad (5.II)$$

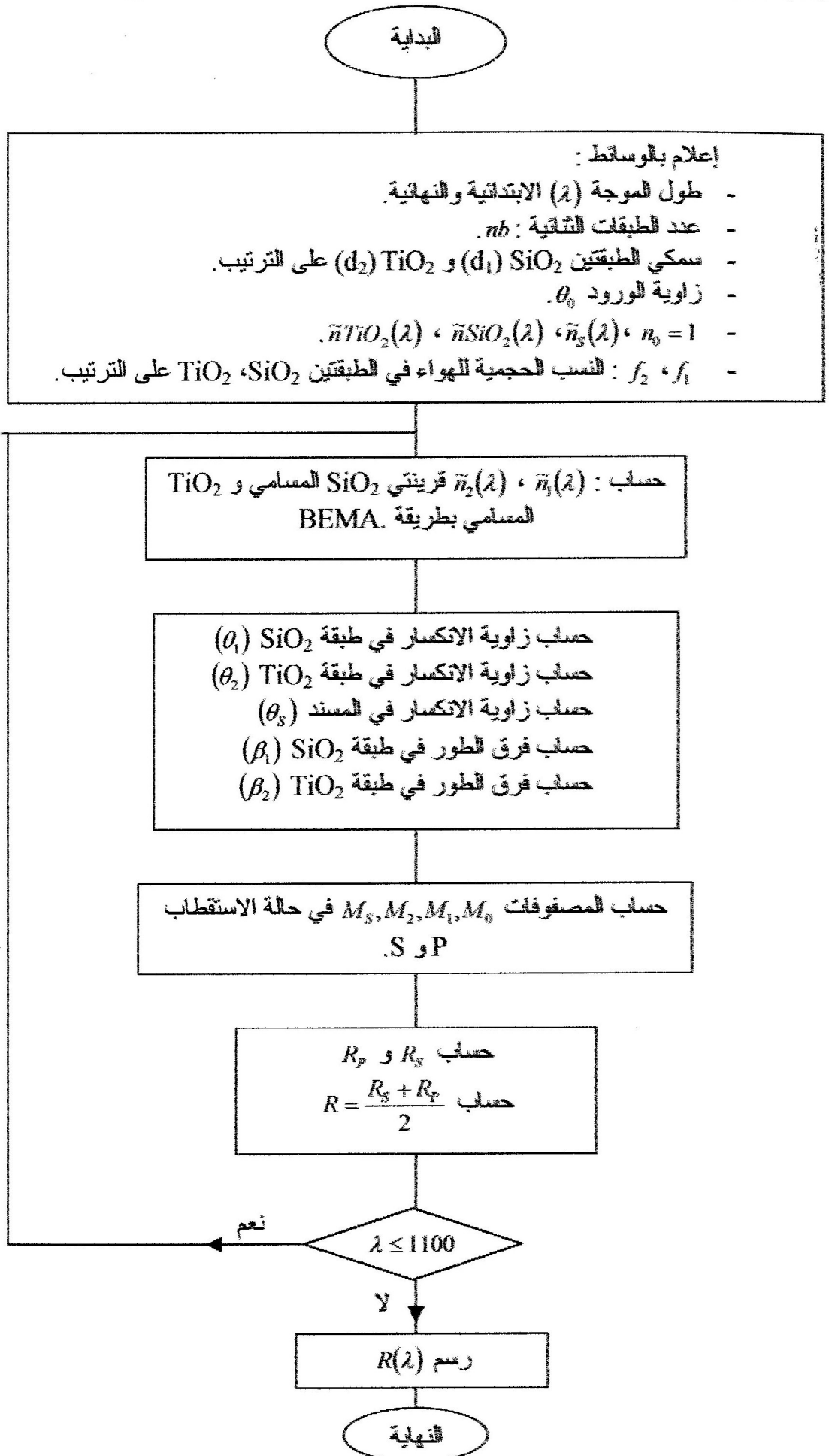
$$M_{p1} = \begin{bmatrix} \cos \beta_1 & \frac{i \sin \beta_1 \cos \theta_1}{\tilde{n}_1} \\ \frac{i \tilde{n}_1 \sin \beta_1}{\cos \theta} & \cos \beta_1 \end{bmatrix} \quad (6.II)$$

$$M_{p2} = \begin{bmatrix} \cos \beta_2 & \frac{i \sin \beta_2 \cos \theta_2}{\tilde{n}_2} \\ \frac{i \tilde{n}_2 \sin \beta_2}{\cos \theta_2} & \cos \beta_2 \end{bmatrix} \quad (7.II)$$

$$M_{ss} = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{\tilde{n}_s}{\cos \theta_s} \end{bmatrix} \quad (8.II)$$

ثم نحسب R_p بتطبيق العلاقات التالية على الترتيب : (61.I),(49.I),(63.I) .

- عامل الانعكاس R يتغير مع طول الموجة λ ويحسب من R_p و R_s بالعلاقة (64.I) .
- والتسلسل البياني يوضح الخطوات الأساسية للحساب ونوضحه كالتالي :



ب- مرايا براغ المتدرجة القرينة دوريا :

يستعمل هذا النوع من المرايا وذلك لتفادي أسطح التماس بين الطبقات الموجودة في مرايا براغ الثنائية الطبقات المكررة والتي عند ترسيبها تتشكل فيها شقوق تؤدي إلى إتلاف المرآة خاصة إذا تم ترسيب أكثر من طبقة ثنائية [13].

هذه المرآة قرينتها تتغير تدريجيا ودوريا ويعطى تركيز إحدى المادتين TiO_2 و SiO_2 في الخليط بشكل دالة دورية.

ومن الدوال الدورية التي استعملت حسب الناشر [9,11,18] هي الدالة الجيبية.

استعملنا الدالتين التاليتين :

$$Fa_a = ff + \frac{(f_0 - ff)}{2} \cdot \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi x}{X_p} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (9.II)$$

$$Fa_b = ff + \frac{(f_0 - ff)}{2} \cdot \left(1 + \exp \left(\sin \left(-\frac{2\pi x}{X_p} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \quad (10.II)$$

f_0 : النسبة الحجمية الكبرى لـ SiO_2 .

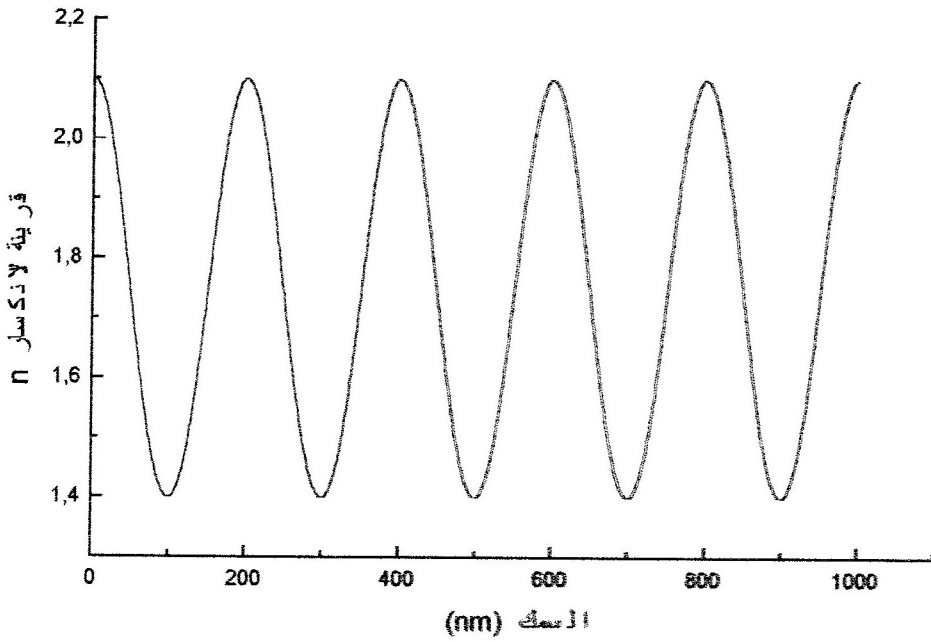
ff : النسبة الحجمية الصغرى لـ SiO_2 .

X_p : السمك الدوري للدالة الدورية (للجيبية)

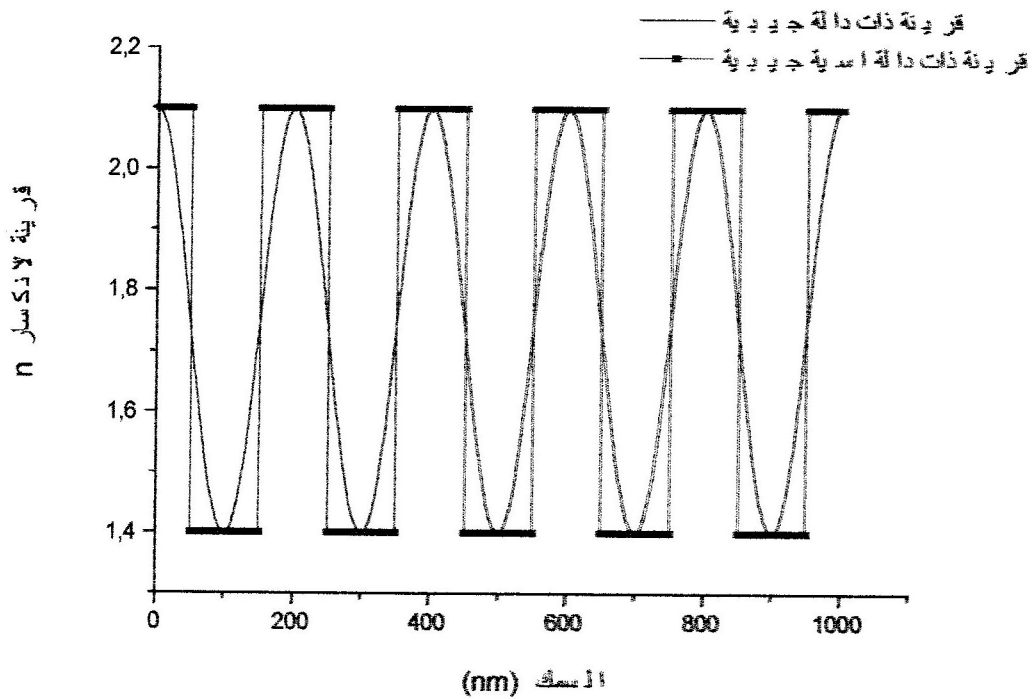
حيث أخذنا $f_0 = 100\%$ ، $ff = 0\%$ ، $X_p = 200nm$ ، $nSiO_2 = 1,4$ ، $nTiO_2 = 2,1$ عند طول الموجة

$\lambda_0 = 700nm$.

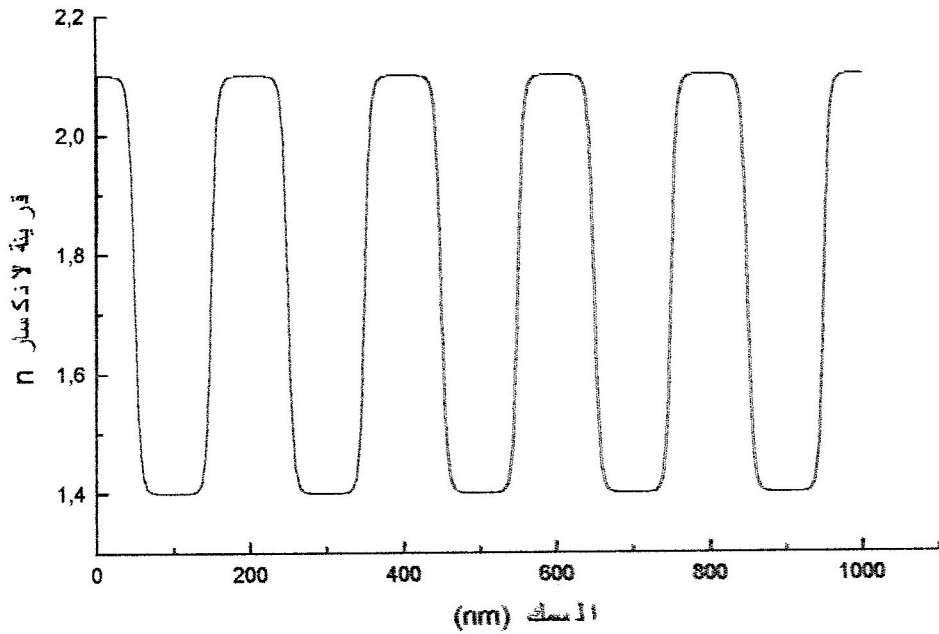
- الدالة الجيبية Fa_a المعطاة بالعلاقة (9.II) يانها موضح على الشكل 2.II وقارنا بيانيا بين تغير القرينة مع السمك في هذه المرآة المتدرجة والمرآة الثنائية الطبقات المتجانسة وذلك مبين بالشكل 2.II.
- الدالة الجيبية Fa_b المعطاة بالعلاقة (10.II) يانها موضح على الشكل 3.II وقارنا بيانيا تغير القرينة مع السمك في المرآتين المتدرجتين وفقا للدالتين الجيبية والأسية الجيبية وهذه المقارنة مبينة بالشكل 4.II.
- لتميط (تمذجة) هذه المرآة يقسم الخليط ذو السمك X_p إلى طبقات سمك كل واحدة X_p وعددها nbp ، كل طبقة تتغير فيها القرينة دوريا وفقا للدالة الدورية.



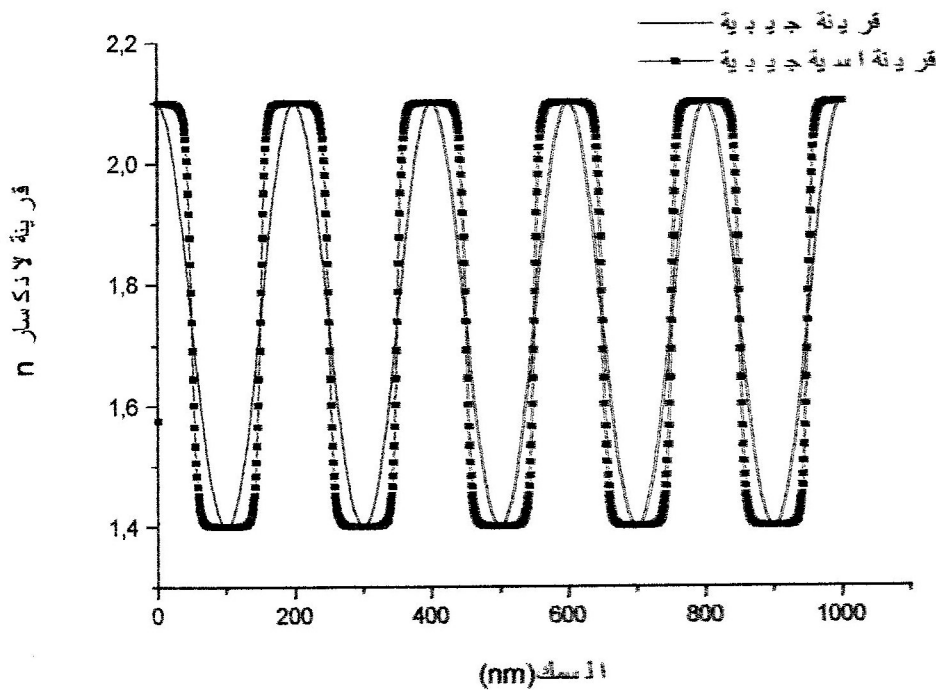
الشكل: 1.II - تغير قرينة انكسار طبقة خليط ($\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$) غير متجانس على شكل دالة جيبيية لمرآة براغ متمركزة عند $\lambda_0 = 700 \text{ nm}$ حيث : $f_0 = 100\%$ ، $ff = 0\%$.



الشكل: 2.II - مقارنة تغير قرينتي مرآتي براغ ، الأولى ذات قفز القرينة ($\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) والثانية متدرجة على شكل دالة جيبيية. المرآتين متمركزتين عند $\lambda_0 = 700 \text{ nm}$ ، حيث : $f_0 = 100\%$ ، $ff = 0\%$.



الشكل: 3.II- تغير قرينة انكسار طبقة خليط $(\text{SiO}_2\text{-TiO}_2)$ غير متجانس على شكل دالة لمرآة براغ متمركرة عند $\lambda_0 = 700 \text{ nm}$ حيث : $f_0 = 100\%$ ، $ff = 0\%$.



الشكل: 2.II- مقارنة تغير قرينتي مرآتي براغ (خليط $(\text{SiO}_2\text{-TiO}_2)$) متدرجتين ، الأولى جيبية والثانية أسية جيبية. المرآتين متمركزتين عند $\lambda_0 = 700 \text{ nm}$ ، حيث : $f_0 = 100\%$ ، $ff = 0\%$.

- تقسم كل طبقة إلى طبقات تحتية متجانسة سمكها d حيث تتغير قرينة الخليط تدريجيا بعد كل خطوة للسمك d .

- المسند المستعمل من مادة السليسيوم .

لحساب عامل الانعكاس ورسم البيان $R(\lambda)$ نكتب برنامجا باستعمال فضاء Matlab 5.3 والذي يحتوي العمليات التالية :

- إدخال زاوية الورود θ_0 التي نحسب بها زاوية الانكسار في المسند θ_s وذلك بتطبيق قانون Snell- Descartes المعطى بالعلاقة (62.I).

- حساب المصفوفات التالية :

• M_{po} من العلاقة (5.II).

• M_{so} من العلاقة (1.II).

• مصفوفة المسند M_{ps} من العلاقة (8.II).

• مصفوفة المسند M_{ss} من العلاقة (4.II).

حساب لكل طبقة تحتية متجانسة j : $M_{sj}, M_{pj}, \beta_j, \theta_j, \bar{n}_j$ كالتالي :

- حساب قرينة المزيج \bar{n}_j المكون من المادتين SiO_2 و TiO_2 اعتبارا من قرينتي المادتين وذلك باستعمال تقريب الأوساط الفعالة لـ Bruggeman وباستعمال الدالة الدورية للخليط.

- حساب زاوية الورود للمزيج باستعمال قانون Snell-Descartes حسب العلاقة (62.I).

- حساب فرق الطور للمزيج β_j باستعمال العلاقة (55.I).

- حساب المصفوفة M_{pj} من العلاقة التالية :

$$M_{pj} = \begin{pmatrix} \cos \beta_j & \frac{i \sin \beta_j \cos \beta_j}{\bar{n}_j} \\ \frac{i \bar{n}_j \sin \beta_j}{\cos \theta_j} & \cos \beta_j \end{pmatrix} \quad (11.II)$$

- حساب المصفوفة M_{sj} من العلاقة التالية :

$$M_{sj} = \begin{pmatrix} \cos \beta_j & \frac{i \sin \beta_j}{\bar{n}_j \cos \beta_j} \\ \frac{i \bar{n}_j \sin \theta_j \sin \theta_j}{\cos \beta_j} & \cos \beta_j \end{pmatrix} \quad (12.II)$$

- حساب R_p باستعمال العلاقات التالية على الترتيب : (49.I), (63.I), (61.I).

- حساب R_s باستعمال العلاقات التالية على الترتيب : (43.I), (39.I), (60.I).

- حساب عامل الانعكاس R بتطبيق العلاقة (64.I) مع رسم البيان $R(\lambda)$.

والتسلسل البياني يوضح الخطوات الأساسية للحساب الموضح كالتالي :

البداية

إعلام بالوسائط :

- طول الموجة الابتدائية (λ) والنهائية $f_0 = 100\%$ ، $ff = 0\%$ ، $n_0 = 1$
- السمك الدوري للجيبية (سمك الطبقة) : Xp
- عدد الأتوار الجيبية : nbp
- زاوية الورود ، d : سمك الطبقة التحتية . $\bar{n}a(\lambda)$: قرينة SiO_2 ، $\bar{n}b(\lambda)$: قرينة TiO_2 .

- حساب Xf (سمك الطبقة المتغيرة القرينة).

$$Xf = nbp \cdot Xp$$

- حساب المصفوفات : Mp_0 ، Ms_0 .

- حساب زاوية الانكسار في المسند (θ_s)

- حساب المصفوفات : Mps ، Mss .

- حساب قيمة الدالة Fa (النسبة الحجمية لـ SiO_2 في المزيج)

- حساب قيمة الدالة Fb حيث : $Fb = 1 - Fa$

- حساب قرينة المزيج $\bar{n}j$ باستعمال BEMA

- حساب زاوية الانكسار في المزيج : θ_r

- حساب فرق الطور في المزيج : β_r

- حساب المصفوفتين : Mpj و Msj للطبقة التحتية.

$x \leq Xf$

نعم

لا

حساب R و R_r و R_s

$\lambda \leq 1100$

نعم

لا

رسم $R(\lambda)$

النهاية

2.1.II- المرشحات :

أ- المرشحات ذات قفز القرينة :

إن عامل الانعكاس يتعلق بما يلي :

- زاوية الورود.

- المسند : استعملنا مسند شفاف من مادة الزجاج. حيث تتعلق قرينة المادة بطول الموجة.

- الطبقات الثنائية :

فوق المسند ترسب ثنائيات من مادتي SiO_2 و TiO_2 ، حيث توضع طبقة SiO_2 على المسندوفوقها طبقة ثانية من مادة TiO_2 سمكي الأولى d_{11} و الثانية d_{12} (كما في حالة المرايا المذكورة(II.I))، ويوضع عدد من هذه الثنائيات : nb_1 وأعلىها ترسب عدد من ثنائيات nb_2 من طبقات SiO_2 و TiO_2 على التناوب ذات السمكين d_{22}, d_{21} على الترتيب.

عند ترسيب المادتين قد تكون فيها فراغات هوائية يجب أخذها بعين الاعتبار لتأثيرها على قيمة قرينة انكسار المادة.

لحساب عامل الانعكاس R ورسم البيان $R(\lambda)$ نكتب برنامجا في فضاء Matlab 5.3 والذي يحتوي على :- إدخال قرينة انكسار الوسط المحيط : $n_0 = 1$.- إدخال قرائن المواد : مادة المسند ، SiO_2 و TiO_2 تتغير مع طول الموجة والقيم معطاة في الملحق I- حساب قرينة كل طبقة اعتبارا من قرينة SiO_2 و TiO_2 المرجعية باستعمال تقريب الأوساط الفعالة

لـ Bruggeman.

- إدخال زاوية الورود θ_0 التي تسمح بحساب زوايا الانكسار θ_1 في طبقة SiO_2 و θ_2 في طبقة TiO_2 و θ_s في المسند باستعمال قانون Snell-Descartes العلاقة (62.I).- حساب فرق الطور في كل من طبقتي SiO_2 و TiO_2 من العلاقة (55.I).

- حساب المصفوفات في حالة الاستقطاب S :

○ M_{s0} من العلاقة (1.II)

○ M_{ss} من العلاقة (4.II)

○ $M_{s_{11}}$ و $M_{s_{21}}$ من العلاقة (2.II)

○ $M_{s_{12}}$ و $M_{s_{22}}$ من العلاقة (3.II).

- لحساب R_s نطبق أولا العلاقة التالية :

$$\begin{bmatrix} E_0^- \\ E_0^+ \end{bmatrix}_S = \frac{1}{2} \cdot M_{s0} \cdot (M_{s_{22}} \cdot M_{s_{21}})^{nb2} \cdot (M_{s_{12}} \cdot M_{s_{11}})^{nb1} \cdot M_{ss} \quad (13.II)$$

بعدها نطبق العلاقتين على الترتيب (39.I) و (43.I).

- حساب المصفوفات في حالة الاستقطاب P :

○ M_{p0} من العلاقة (5.II).

○ $M_{p_{11}}$ و $M_{p_{21}}$ من العلاقة (6.II)

○ $M_{p_{22}}$ و $M_{p_{21}}$ من العلاقة (7.II)

○ M_{ps} من العلاقة (8.II)

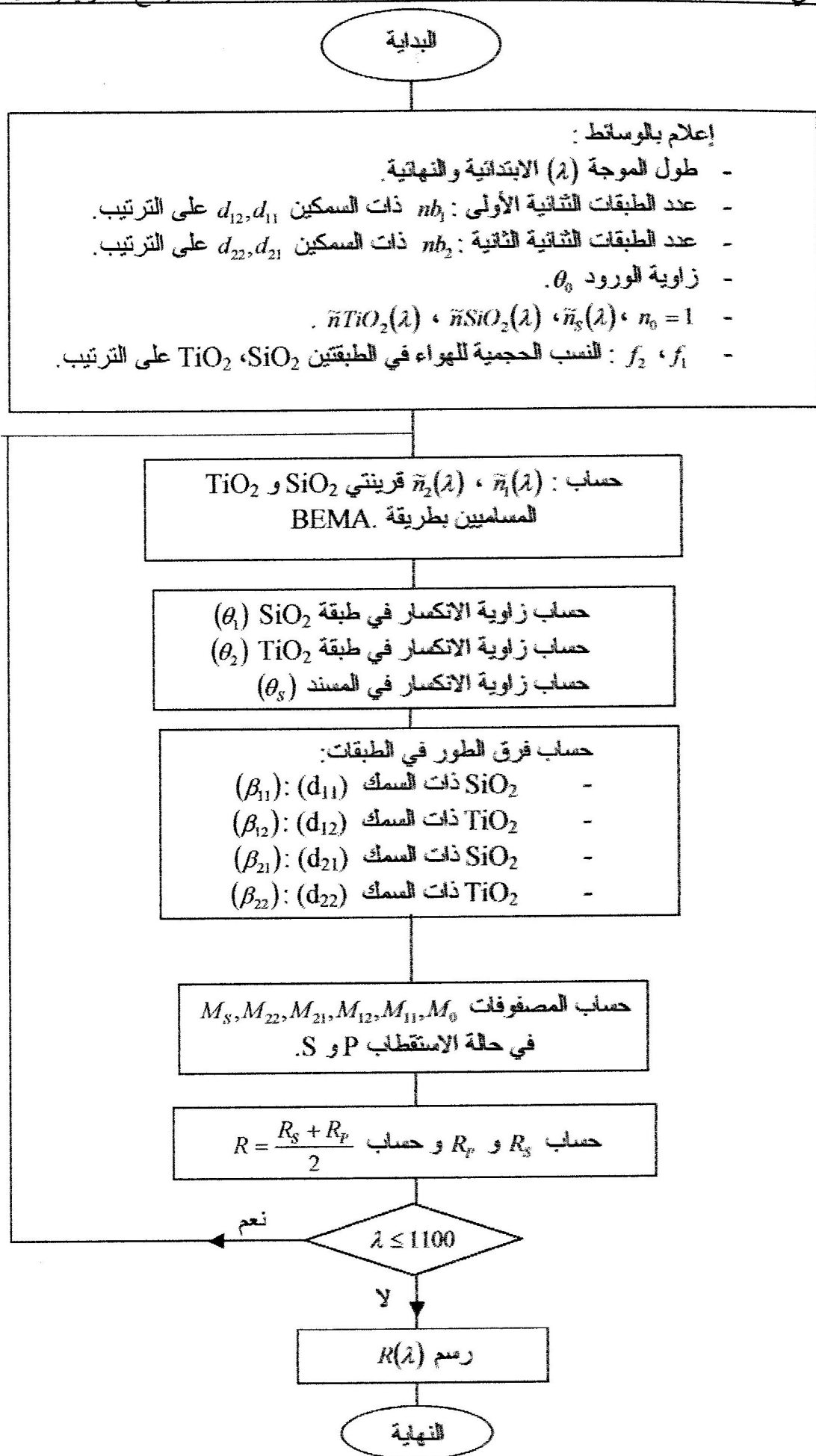
لحساب R_p نطبق العلاقة التالية :

$$\begin{bmatrix} E_0^- \\ E_0^+ \end{bmatrix}_P = \frac{1}{2} \cdot M_{p0} (M_{p_{22}} \cdot M_{p_{21}})^{nb2} \cdot (M_{p_{12}} \cdot M_{p_{11}})^{nb1} \cdot M_{ps} \quad (14.II)$$

بعدها نطبق العلاقتين على الترتيب (63.I) و (49.I).

- نحسب معامل الانعكاس R من العلاقة (64.I).

والتسلسل البياني يوضح الخطوات الأساسية للحساب كالتالي :



ب- المرشحات المتدرجة القرينة دوريا :

يستعمل هذا النوع من المرشحات وذلك لتفادي أسطح التماس بين الطبقات الموجودة في النوع ذو الشانتي الطبقات والتي عند ترسيبها تتشكل فيها شقوق تؤدي إلى إتلافها.

في هذا المرشح على المسند يرسب خليط أول من مادتي TiO_2 و SiO_2 ثم خليط آخر من نفس المادتين بحيث تتغير قرينة الخليط مع البعد عن المسند بشكل دالة دورية و كأحسن مثال نقول بشكل جيبيية على مرحلتين لكل خليط له دالة دورية، قد تكون دالتي الخليطين واحدة أو مختلفتين : Fa_2 ، Fa_1 .
فمن أمثلة هذه الدوال :

$$\begin{cases} Fa_1 = ff + \frac{f_0 - ff}{2} \cdot \left(1 + \left(\sin\left(\frac{2\pi x}{Xp_1}\right) - \frac{\pi}{2} \right) \right) \\ Fa_2 = ff + \frac{f_0 - ff}{2} \cdot \left(1 + \sin\left(\frac{2\pi x}{Xp_2}\right) \right) \end{cases} \quad (15.II)$$

استعملنا المرشح ذو الدالتين (15.II) حيث Fa_2 هي دالة الخليط الموضوع فوق المسند و Fa_1 هي دالة الخليط الآخر الموالي للوسط الخارجي (الهواء) حيث :

- f_0 : النسبة الحجمية الكبرى لـ SiO_2 .
- ff : النسبة الحجمية الصغرى لـ SiO_2 .
- Xp_1 : السمك الدوري للجيبيية الأولى.
- Xp_2 : السمك الدوري للجيبيية الثانية.

لتنميط هذا المرشح نقسم الخليطين ذو السمك Xf_1 ، Xf_2 إلى طبقات بحيث طبقة الخليط الأولى سمكها Xp_1 وللثاني Xp_2 وعدد الطبقات في كل خليط nbp .

تتغير قرينة الخليط تدريجيا ودوريا (جيبييا) في كل طبقة بحيث تتغير القرينة بعد كل خطوة للسمك d ، بحيث d يمثل سمك الطبقات التحتية المتجانسة، إضافة إلى ما ذكرناه سابقا تتحكم في قيمة عامل الانعكاس عدة عوامل منها:

- اختيار مادة المسند بحيث استعملنا مادة شفافة وهي مادة الزجاج.
- زاوية الورود θ_0 .
- الخليطتين المشكلتين للمرشح.

كتبنا برنامجا والهدف منه هو حساب عامل الانعكاس ورسم البيان $R(\lambda)$ والذي يحتوي على العمليات التالية :

- إدخال زاوية الورود θ_0 التي نحسب بها زاوية الانكسار في المسند θ_s وذلك بتطبيق قانون Snell- Descartes (62.I).

- نحسب المصفوفات التالية :

○ Mp_0 من العلاقة (5.II).

○ Ms_0 من العلاقة (I.II).

○ Mps من العلاقة (8.II).

○ Mss من العلاقة (4.II).

نجري حسابات من أجل كل طبقة تحتية ز:

- حساب قرينة الخليط الأول \bar{n}_r اعتبارا من قرينتي المادتين وذلك باستعمال تقريب الأوساط الفعالة لـ Bruggeman وباستعمال الدالة الدورية للخليط الأول.

- حساب زاوية الورود للخليط الأول θ_r باستعمال قانون Snell-Descartes المعطى بالعلاقة (62.I).

- حساب فرق الطور β_r من العلاقة (55.I).

- حساب المصفوفة Mp_{1r} من العلاقة (11.II).

- حساب المصفوفة Ms_{1r} من العلاقة (12.II).

- نفس العمليات الحسابية نجريها للخليط الثاني.

- حساب القرينة \bar{n}_{2r} باستعمال BEMA اعتبارا من الدالة الدورية Fa_2 .

- حساب زاوية الورود لهذا الخليط θ_{2r} من العلاقة (62.I).

- حساب فرق الطور β_{2r} من العلاقة (55.I).

- حساب المصفوفة Mp_{2r} من العلاقة (11.II).

- حساب المصفوفة Ms_{2r} من العلاقة (12.II).

- نحسب المصفوفتين الشاملتين للطبقتين الخليطتين بالعلاقتين :

$$Mp = \prod_{j=1}^L Mp_{1j} \cdot \prod_{j=1}^L Mp_{2j} \quad (16.II)$$

$$Ms = \prod_{j=1}^L Ms_{1j} \cdot \prod_{j=1}^L Ms_{2j} \quad (17.II)$$

ثم نحسب :

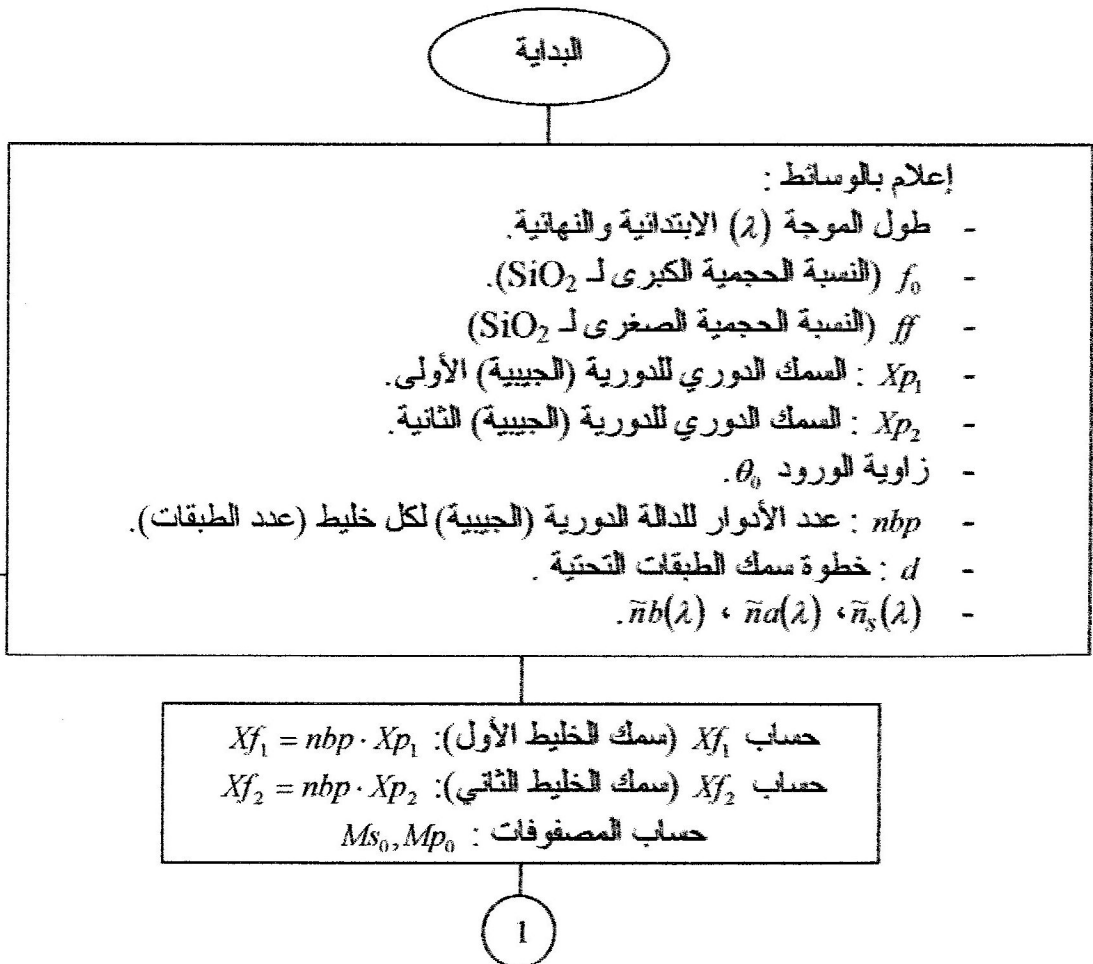
$$\begin{pmatrix} E_0^- \\ E_0^+ \end{pmatrix}_p = \frac{1}{2} \cdot Mp_0 \cdot Mp \cdot Mps \quad (18.II)$$

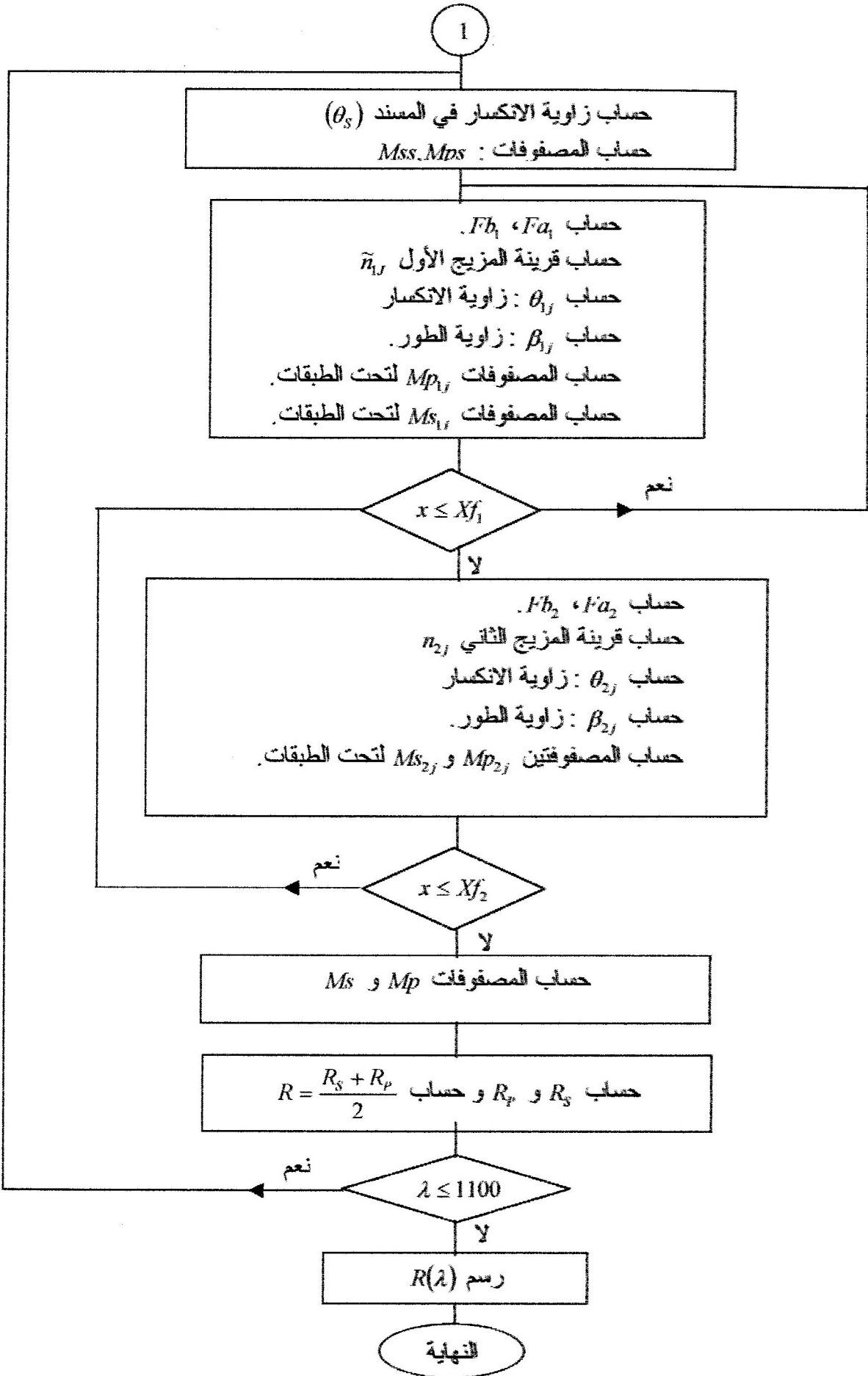
$$\begin{pmatrix} E_0^- \\ E_0^+ \end{pmatrix}_s = \frac{1}{2} \cdot Ms_0 \cdot Ms \cdot Mss \quad (19.II)$$

- نحسب عامل الانعكاس في حالة الاستقطاب P وذلك باستعمال العلاقتين على الترتيب (63.I) و (49.I).

- نحسب عامل الانعكاس في حالة الاستقطاب S وذلك باستعمال العلاقتين على الترتيب (39.I) و (43.I).

- نحسب عامل الانعكاس R من العلاقة (64.I) مع رسم البيان $R(\lambda)$.
والتسلسل البياني يوضح الخطوات الأساسية المذكورة للحساب ونوضحه كالتالي :





3.1.II - الأغشية المضادة للانعكاس :

أ- غطاء مضاد للانعكاس بطبقتين متجانستين ذات قعر القرينة :

إن عامل الانعكاس يتعلق بما يلي :

- إزاوية الورود .
- المسند : في هذا النموذج استعملنا مسند من مادة السيليسيوم Si حيث تتعلق قرينته بطول الموجة ، والقيم معطاة في الملحق I.
- الطبقات الثنائية : على المسند ترسب طبقة سمكها d_2 من مادة TiO_2 تليها طبقة سمكها d_1 من مادة SiO_2 لنتهي في الأخير إلى الهواء. فالقرينة تتناقص تدريجيا من وسط المسند مرورا بـ TiO_2 ثم SiO_2 وتنتهي بالوسط المحيط .
- مادتي TiO_2 و SiO_2 تقريبا شفافتين في مجال الطيف المستعمل، عند ترسيب المادتين TiO_2 و SiO_2 قد تتواجد فيهما فراغات وعليه فإن قرينتي المادتين قد تختلف قليلا عن القرينتين المرجعيتين للمادتين. فإن عامل الانعكاس له علاقة بسمكي الطبقتين ونوع المادتين المستعملتين وكذلك عدد الطبقات الثنائية وفي هذا النموذج نأخذ طبقة ثنائية واحدة للتبسيط :
- ولحساب عامل الانعكاس R ورسم البيان $R(\lambda)$ نكتب برنامجا والذي يشمل العمليات التالية :
- إدخال قرينة انكسار الوسط المحيط $n_0 = 1$.
- إدخال قرينة انكسار المسند و مادتي TiO_2 و SiO_2 المعطاة بالملحق I.
- حساب قرينتي مادتي الطبقتين \bar{n}_1 ، \bar{n}_2 اعتبارا من تقريب الأوساط الفعالة لـ Bruggeman .
- إدخال زاوية الورود θ_0 التي تسمح بحساب زوايا الانكسار θ_1 في طبقة SiO_2 و θ_2 في طبقة TiO_2 و θ_s في المسند باستعمال قانون Snell-Descartes (62.I).
- حساب فرق الطور في كل من طبقتي TiO_2 و SiO_2 من العلاقة (55.I).
- حساب المصفوفات في حالة الاستقطاب S التالية :

○ M_{s0} من العلاقة (1.II)

○ M_{s1} من العلاقة (2.II)

○ M_{s2} من العلاقة (3.II)

○ M_{ss} من العلاقة (4.II)

- حساب المصفوفات في حالة P التالية :

○ Mp_0 من العلاقة (5.II).

○ Mp_1 من العلاقة (6.II).

○ Mp_2 من العلاقة (7.II).

○ Mps من العلاقة (8.II).

- بحسب عامل الانعكاس Rp في حالة الاستقطاب P كالتالي :

$$\begin{pmatrix} E_0^- \\ E_0^+ \end{pmatrix}_p = \frac{1}{2} \cdot Mp_0 \cdot Mp_1 \cdot Mp_2 \cdot Mps \quad (20.II)$$

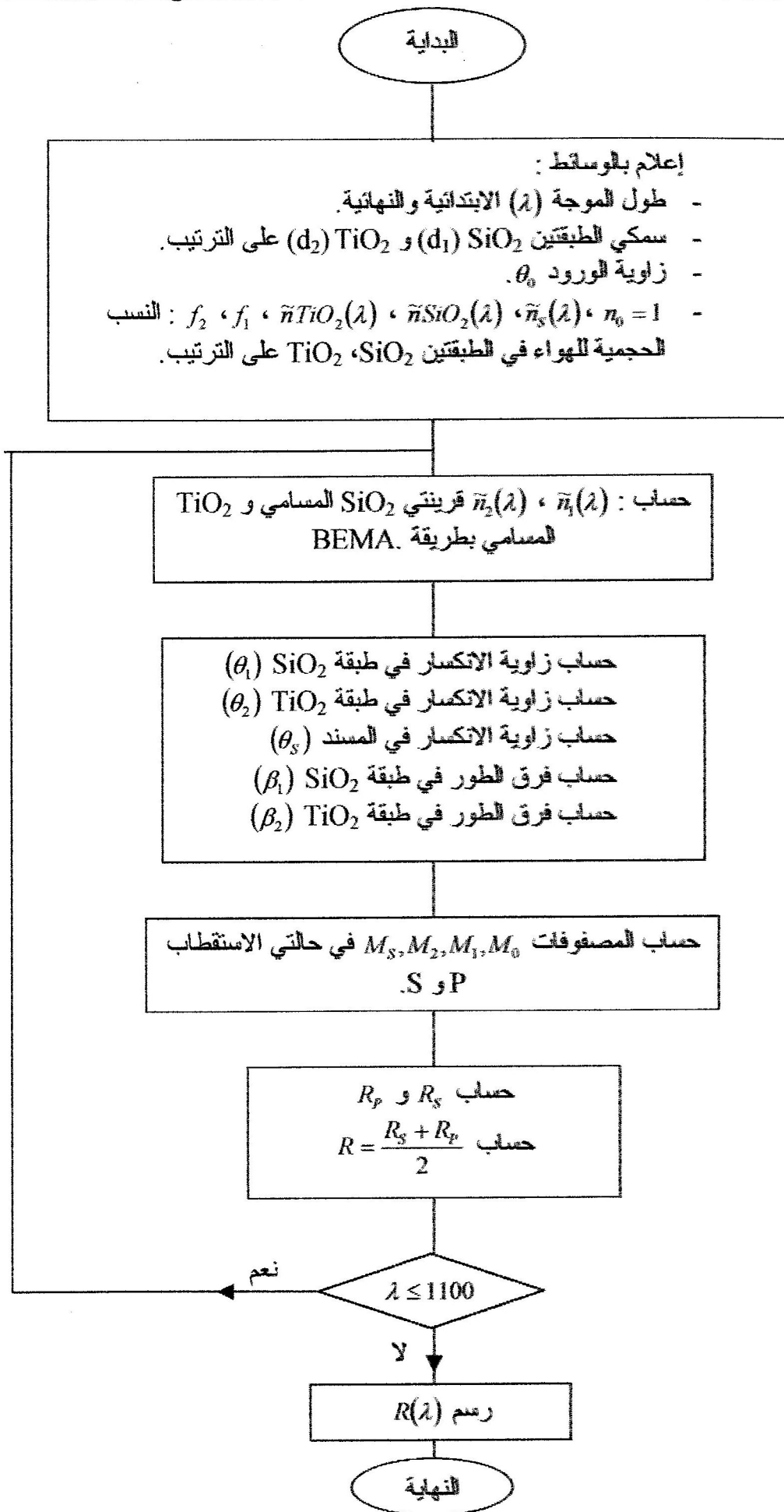
- بحسب عامل الانعكاس Rs في حالة الاستقطاب S كالتالي :

$$\begin{pmatrix} E_0^- \\ E_0^+ \end{pmatrix}_s = \frac{1}{2} \cdot Ms_0 \cdot Ms_1 \cdot Ms_2 \cdot Mss \quad (21.II)$$

ثم نطبق العلاقتين على الترتيب (39.I) و (43.I).

- نحسب عامل الانعكاس R من العلاقة (64.I) مع رسم البيان $R(\lambda)$.

والتسلسل البياني يوضح الخطوات الأساسية للحساب المين كالتالي :



ب- غطاء مضاد للانعكاس متدرج القرينة :

يستعمل هذا النوع لتفادي أسطح التماس بين الطبقات التي تؤدي إلى تشكل شقوق وإتلاف هذه الأغشية وكذلك لأجل تحسين نوعيتها من حيث تدرج قرينة المزيغ بحيث تتناقص من المسند مرورا بالمزيغ إلى الوسط المحيط.

والمزيغ الذي درسناه مكون من مادتي SiO_2 و TiO_2 الذي تتغير قرينته تدريجيا بالتناقص من سطح التلامس مع المسند إلى السطح الخارجي الملامس للهواء، حيث يعطى تركيز SiO_2 (Fa) بشكل دالة. مثال :

$$Fa = ff + \frac{f_0 - ff}{1 + \exp\left(\frac{x}{Kb}\right)} \quad (22.II)$$

Kb : ثابت يتغير من 1 إلى 20.

x : سمك طبقة الخليط.

f_0 : نسبة SiO_2 في المزيغ عند السطح الخارجي.

ff : نسبة SiO_2 في المزيغ عند السطح الفاصل بين المزيغ والمسند.

لتنميط هذا الغطاء تقسم طبقة الخليط إلى طبقات تحتية سمك كل واحدة d ، والطبقة التحتية متجانسة تكون فيها القرينة ثابتة.

تتغير قرينة الخليط بعد كل خطوة d تدريجيا.

المسند مستعمل من مادة السيليسيوم Si .

لحساب عامل الانعكاس R ورسم البيان $R(\lambda)$ نكتب برنامجا الذي يحتوي على العمليات التالية :

- إدخال زاوية الورود التي بها نحسب زاوية الانكسار في المسند θ_0 وذلك بتطبيق قانون Snell- Descartes (62.I).

- حساب المصفوفات التالية :

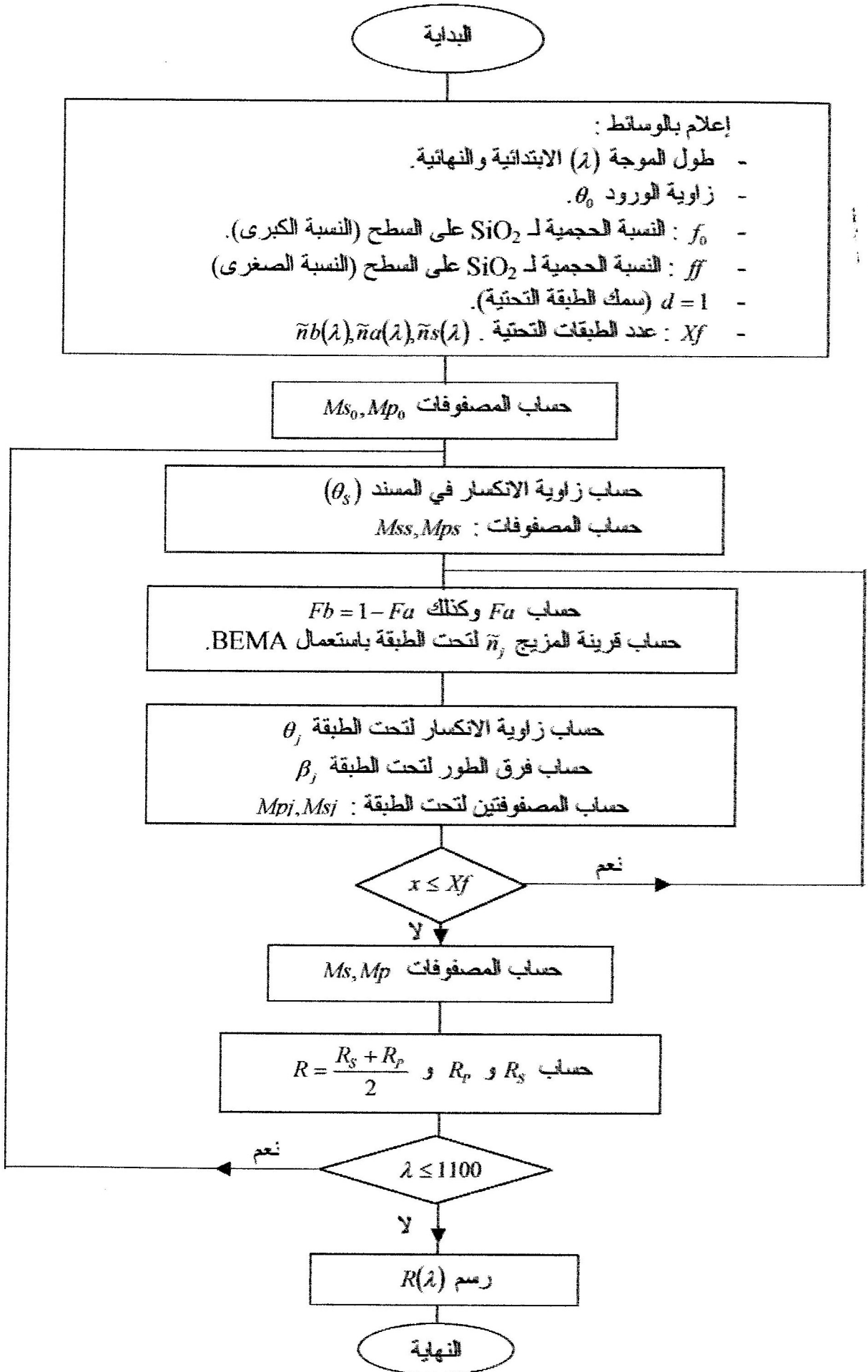
○ M_{po} من العلاقة (5.II)

○ M_{s_0} من العلاقة (1.II)

○ M_{ps} من العلاقة (8.II)

○ M_{ss} من العلاقة (4.II)

- حساب قرينة المزيج \bar{n} من قرينتي المادتين SiO_2 و TiO_2 وباستعمال الدالة (F/a) وكذلك تقريب الأوساط الفعالة لـ Bruggeman.
 - حساب زاوية الورود للمزيج θ باستعمال قانون Snell-Descartes.
 - حساب فرق الطور للمزيج β باستعمال العلاقة (55.I)
 - حساب المصفوفة Mp من العلاقة (11.II).
 - حساب المصفوفة Ms من العلاقة (12.II).
 - نحسب R_p باستعمال العلاقات التالية على الترتيب (61.I), (63.I) و (49.I).
 - نحسب R_s باستعمال العلاقات التالية على الترتيب (60.I), (39.I) و (43.I).
 - نحسب عامل الانعكاس R بتطبيق العلاقة (64.I) مع رسم البيان $R(\lambda)$.
- والتسلسل البياني يوضح الخطوات الأساسية للحساب والموضح كالتالي :



2.II- طرق ترسيب المواد المستعملة :

تقنيات الترسيب كثيرة نذكر منها :

تبخير تحت الفراغ بالقذف الإلكتروني، الرش المهبطي، ترسيب كيميائي في الطور البخاري (CVD)، تقنية Sol-Gel [14,5]، الترسيب بنبض الليزر، ترسيب بخار كيميائي عضوي معدني (MOCVD) [41,17]، الترسيب بطبقة ذرية (ALD) ، تقنية (hydrothermal) والترسيب الكيميائي بواسطة طور بخاري منشط ببلازما الموجات الميكرونية (PECVD) [18,11,10,7,1].

بعكس طرق CVD التي تحتاج درجة حرارة عالية فإن طرق PECVD-ECR يمكن إنجازها في درجة حرارة منخفضة [4]، ECR تعني رنين سيكلوتروني للإلكترونات.

جهاز الترسيب PECVD-ECR المستعمل ، ينتمي إلى مخبر الإلكترونيك، الإلكترونيات الضوئية والميكروإلكترونيك LEOM للمدرسة المركزية بليون، الترسيب ملاحظ باستعمال إيسومترية وحيدة طول الموجة، الجهاز التجريبي (مفاعل-إيسومتر) ممثل بالشكل 2.II.

1.2.II- ترسيب طبقات SiO₂ و TiO₂ :

أ- مبدأ الترسيب الكيميائي بمساعدة البلازما ECR :

لترسيب طبقات أكسيد السيليسيوم SiO₂ وأكسيد التيتانيوم TiO₂ يمكن استعمال تقنية PECVD. الطبقات مشكلة بتفاعل كيميائي يحدث على المسند بين الغازات السوابق (Les précurseurs) والأكسجين. أيونات الأكسجين ناتجة من البلازما ECR وذرات Si و Ti أصلها جزيئات عضوية معدنية (Les précurseurs) تحت طور بخاري، الجزيئات فككت بواسطة البلازما.

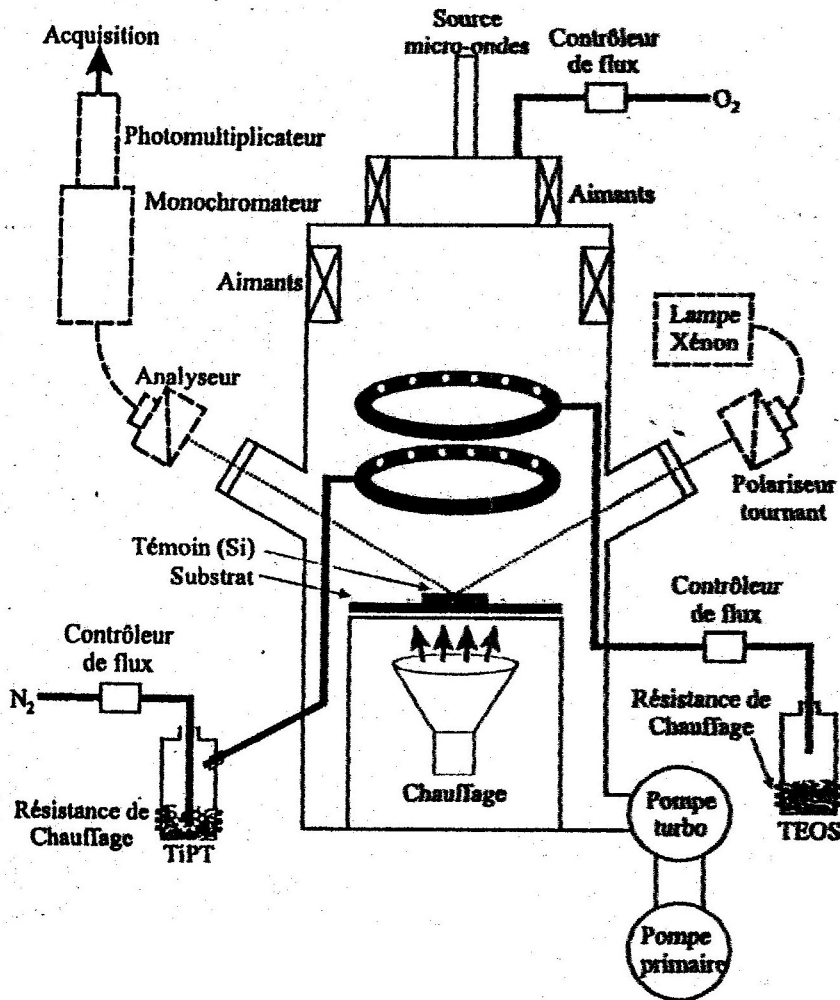
البلازما عبارة عن مجموعة متعادلة من جسيمات مشحونة موجبة وسالبة، نقول بلازما باردة تفرغ كهربائي من غمط ضيائي في غاز ذو ضغط منخفض.

بلازما الموجات الميكرونية ECR يستعمل الرنين السيكلوتروني للإلكترونات بوجود حقل مغناطيسي وهو بلازما باردة [13].

ب- ظروف الترسيب :

العينات المستعملة للتحقق من النماذج النظرية المقدمة في هذه المذكرة تم الحصول عليها من مخبر LEOM للمدرسة المركزية بليون الفرنسية .

الشكل 2.II يمثل غرفة الترسيب، منبع الموجات الميكرونية ذات تواتر 2,45 GHz كذلك مجموعة مغناط تشكل حقل مغناطيسي 875 Gauss.



الشكل 2.II : مخطط مفاعل الترسيب PECVD-ECR (الترسيب الكيميائي في طور بخاري باستعمال الرنين السيكلوتروني للإلكترونات).

العناصر الممثلة بخط متقطع تمثل الإلبسومتر. [13]

استطاعة مولد الموجات الميكرونية 75 W.

السوابق العضوية المعدنية المستعملة على الترتيب رابع إيثوكسي سيلان $(\text{TEOS}) \text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ورابع إيزو بربوكسيد التيتان $(\text{TIPT}) \text{Ti}(\text{O}-i-\text{C}_3\text{H}_7)_4$.

نستعمل TEOS و TIPT للأسباب التالية :

- أهما تبخران عند درجة أقل من 50° م.
- أهما أقل خطورة من السيلان (SiH₄).
- أهما سهلي الاستعمال وقليلتي التكاليف.

TEOS و TIPT تكون مسخنة إلى 50° م، أنابيب نقلها مسخنة إلى 60° م ، نراقب مباشرة فيض TEOS بينما N₂ يستعمل كغاز ناقل لـ TIPT.

أما فيض O₂ فإنه ذو معدل ثابت 6 sccm.

TEOS و TIPT موزعين في النطاق (enceinte) بواسطة حلقتين مثقوبتين واقعتين في أعلى المسند بحيث تضمن توزيع منتظم للسوابق.

درجة حرارة المسند 100° م حتى تتفادى تكاثف السوابق.

درجة حرارة النطاق 40° م والضغط من رتبة 1 mTorr أثناء الترسيب في هذه الظروف التجريبية يمكن الحصول على طبقات ذات نوعية جيدة وكثيفة ومتجانسة.

المفاعل مزود بالبسومتر (ellipsometre) الذي يسمح بمراقبة السمك الضوئي للطبقة أثناء عملية الترسيب [13,4].

- أثناء ترسيب SiO₂ فيض TEOS معدله 2,5 sccm وفي هذه الحالة يوقف تدفق فيض TIPT.

- أثناء ترسيب TiO₂ فيض TIPT معدله 1 sccm وفي هذه الحالة يوقف تدفق فيض TEOS.

- الترسيبات المتتالية تشكل تباينات بين الطبقات بتراكمها تؤدي إلى تشكيل بعض الشقوق نتخلص منها عادة بعملية التسخين إلى 200° م لمدة 12 ساعة بعد ترسيب كل 4 طبقات [13].

II.2.2- ترسيب خليط SiO₂ و TiO₂ متدرج القرينة :

باستعمال السوابق TEOS و TIPT معا في نفس الوقت ونقوم بتغيير تدفقهما بواسطة جهاز مراقبة

آلي (automate) وذلك حسب الخليط المتدرج المراد الحصول عليه.

TIPT أكثر فعالية من TEOS مع الأكسجين.

يمكن كمثال الحصول على طبقة متدرجة القرينة تبدأ بترسيب TiO₂ وتنتهي بـ SiO₂. وذلك بالتحكم

بدفق السوابق بحيث يتناقص فيض TIPT تدريجيا حتى التوقف.

يمكن الحصول على طبقة غير متجانسة بحيث تركيبتها تدريجيا من TiO₂ إلى SiO₂ [4].

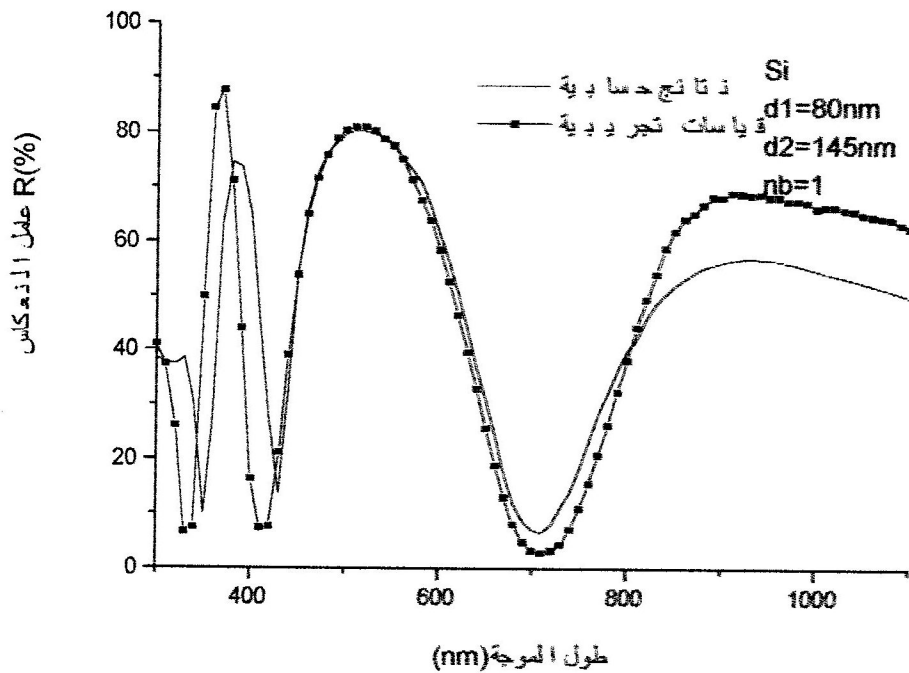
بعد الحصول على مختلف الطبقات تم قياس عامل الانعكاس R بدلالة طول الموجة في مجال (1100-300)nm باستخدام جهاز مقياس الضوء الطيفي (Spectrophotometre)

3.II- التحقق من صلاحية النماذج :

للتحقق من صلاحية النموذج يجب مقارنة نتائجه الحسائية بقياساته التجريبية. استعملنا في هذا المجال ثلاث عينات مختلفة لمرايا براغ ذات طبقات ثنائية متجانسة ($\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) والعينة الرابعة لغطاء مضاد للانعكاس ثنائي الطبقة ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$) حيث رسبت العينات الأربعة بطريقة PECVD-ECR وتم فيها أخذ قياسات لعامل الانعكاس R بدلالة طول الموجة λ وبورود عمودي للضوء.

1.3.II- مرآة براغ ذات طبقة ثنائية :

هذه العينة مستندها من السيليسيوم رسبت عليها طبقة من SiO_2 بسمك $d_1 = 80\text{nm}$ بعدها طبقة TiO_2 بسمك $d_2 = 145\text{nm}$ وهي متركزة عند $\lambda_0 = 520\text{nm}$ ونوضح ذلك بالشكل 3.II.

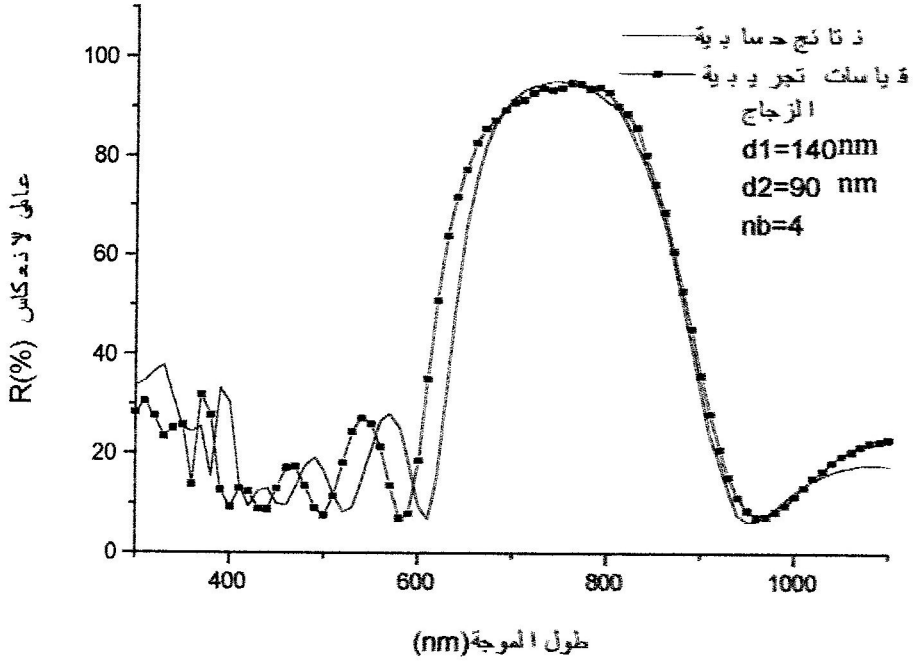


الشكل 3.II- يبياني عامل الانعكاس لمرآة براغ ذات طبقة ثنائية ($\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) متركزة عند طول الموجة 520 nm (حسابي وتجريبي).

2.3.II - مرآة براغ ذات أربع طبقات ثنائية :

هذه العينة مسندها من زجاج رسبت عليها أربع طبقات ثنائية ($\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) حيث سمك كل طبقة SiO_2 $d_1 = 140 \text{ nm}$ وسمك كل طبقة TiO_2 $d_2 = 90 \text{ nm}$ وهي متركزة عند : $\lambda_0 = 750 \text{ nm}$.

ونوضح ذلك بالشكل 4.II.

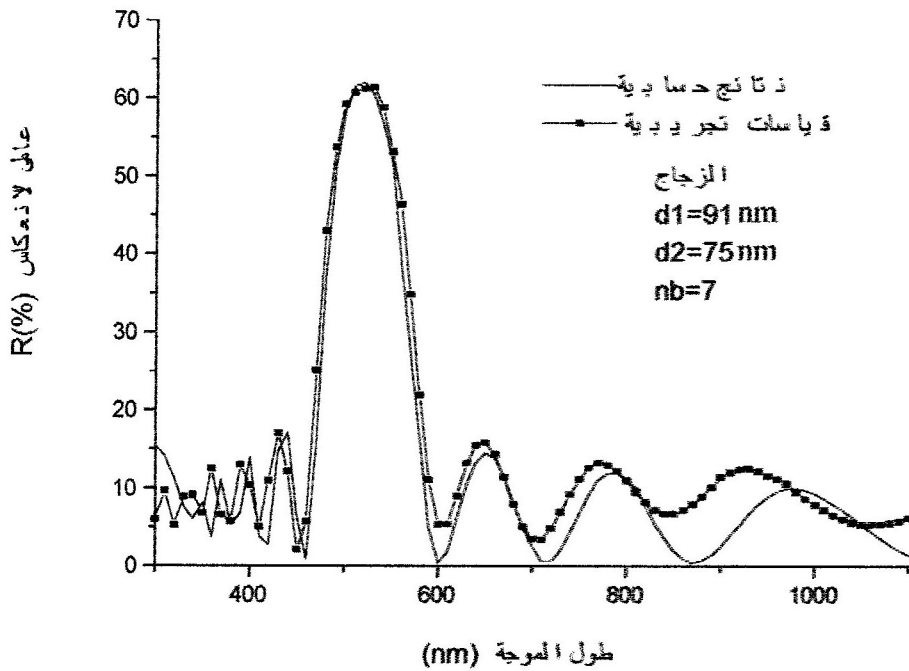


الشكل 4.II - بياني عامل الانعكاس لمرآة براغ ذات 4 طبقات ثنائية ($\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) متركزة عند طول الموجة 750 nm (حسابي وتجريبي)

3.3.II - مرآة براغ ذات سبع طبقات ثنائية :

هذه العينة مسندها من زجاج رسبت عليها سبع طبقات ثنائية ($\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) حيث سمك كل طبقة SiO_2 $d_1 = 91 \text{ nm}$ وسمك كل طبقة TiO_2 $d_2 = 75 \text{ nm}$ وهي متركزة عند : $\lambda_0 = 520 \text{ nm}$.

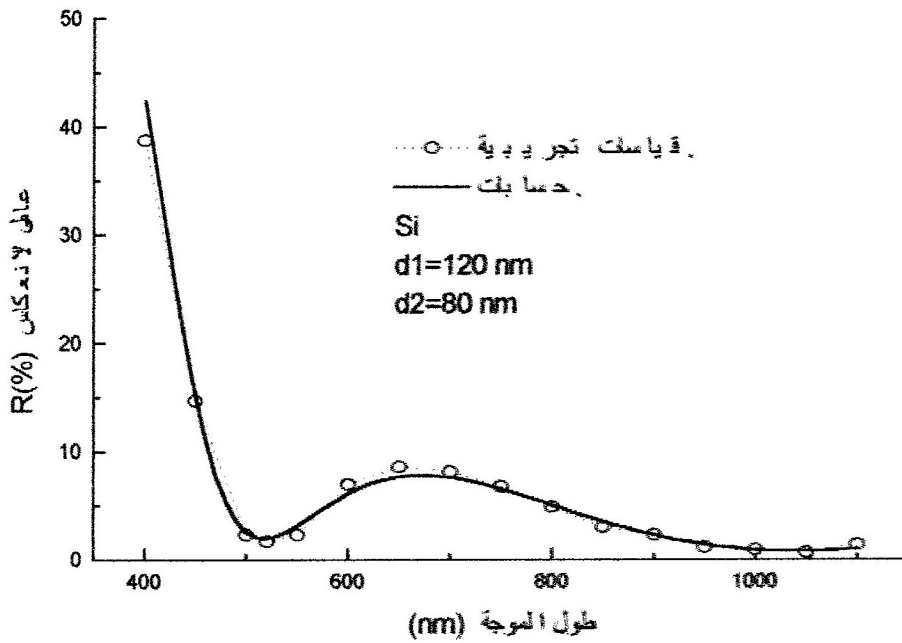
ونوضح ذلك بالشكل 5.II.



الشكل : 5.II- يبياني عامل الانعكاس لمرآة براغ ذات 7 طبقات ثنائية ($\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) متركزة عند طول الموجة 520 nm (حسابي وتجريبي)

4.3.II- غطاء مضاد للانعكاس ذو طبقة ثنائية :

هذه العينة مستندها من سيليسيوم رسبت عليها طبقة ثنائية ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$) حيث سمك طبقة SiO_2 $d_2 = 80 \text{ nm}$ وسمك طبقة TiO_2 $d_1 = 120 \text{ nm}$. ونوضح ذلك بالشكل 6.II.



الشكل : 6.II - يبياني عامل الانعكاس لغطاء مضاد للانعكاس ذو طبقة ثنائية (TiO_2/SiO_2) (حسابي وتجريبي)

نلاحظ أن البيانات الحاسوبية (النظرية) تتطابق جيدا مع القياسات التجريبية في النماذج الأربعة. وعليه نكون قد تأكدنا من صلاحية النماذج المقترحة. وسوف نتعرض في الفصل الموالي إلى دراسة مفصلة لمرايا براغ وللمرشحات وكذلك للأغشية المضادة للانعكاس.

الفصل الثالث

نتائج واستنتاجات

بعدها درسنا في الفصل الثاني نموذج لمرايا بنوعيتها ذات قفز القرينة وذات قرينة متدرجة وفقا لدالة دورية، ثم نماذج لمرشحات بنوعيتها ذات قفز القرينة وذات قرينة متدرجة دوريا ونموذج لغطاء مضاد للانعكاس بطبقتين (TiO_2/SiO_2) بعدها وصف طريقة PECVD-ECR التي تم بها ترسيب مادتي SiO_2 و TiO_2 ، ثم قمنا بمقارنة نتائج تجريبية بنتائج حسابية لثلاث عينات لمرايا براغ ذات قفز القرينة ونفس العملية قمنا بها لعينة غطاء مضاد للانعكاس ذو قفز القرينة.

في هذا الفصل نقوم بعمليات تشبيه للاستجابة الضوئية لمرايا براغ بنوعيتها وكذلك للمرشحات بنوعيتها ثم للأغطية المضادة للانعكاس باستعمال برامج في فضاء Matlab 5.3 وباستعمال وسائط مناسبة لكل جملة، نرسم بيانات نحصل منها على نتائج التي نصل بها إلى استنتاجات التي تكون أغلبها مسندة بمراجع.

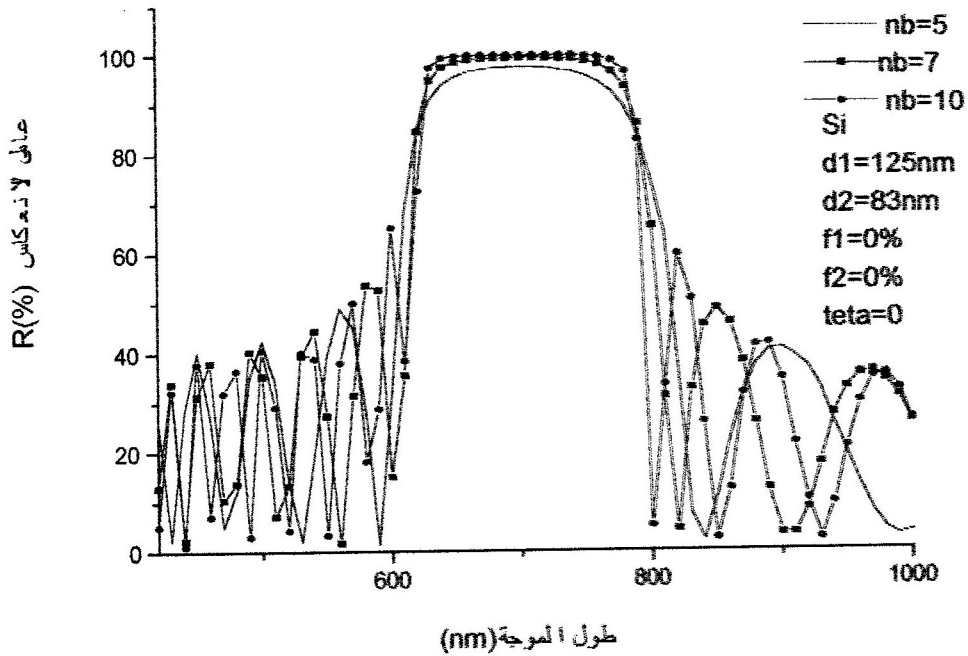
1.III- مرايا براغ :

1.1.III- مرايا براغ ثنائية الطبقات المتجانسة ذات قفز القرينة :

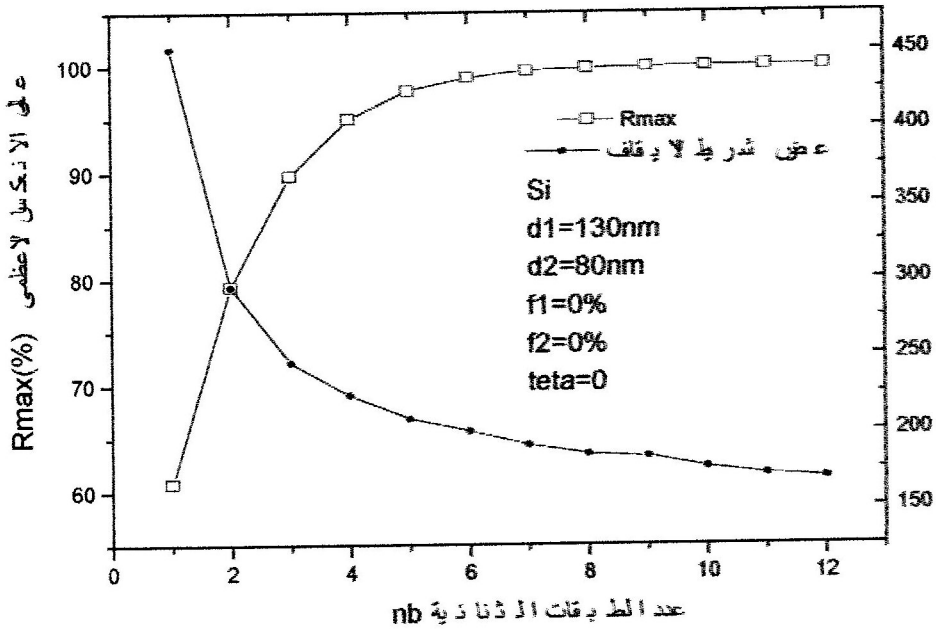
1.1.1.III- مرايا براغ ذات قفز القرينة على مسند من السيليسيوم :

مادة السيليسيوم في المجال الضوئي nm (300-1100) قرينتها معطاة في الملحق I حيث قرينة انكسارها تتراوح بين 3,5 و 6,8 ، هذه المادة ذات قرينة كبيرة كما أنها ماصة في المجال الضوئي nm (300-530).
أ- تأثير عدد الطبقات الثنائية على المرآة :

في هذه الدراسة نعتبر طبقات TiO_2 و SiO_2 خالية من المسامات وورود الضوء فيها بشكل عمودي وذلك للحصول على مرآة متركزة عند $\lambda_0 = 700 \text{ nm}$. أخذنا في البداية حالة يكون السمك الضوئي لطبقاتها ربع موجة أي تحقق العلاقتين (2.I) و (3.I) قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية للمرآة بأعداد مختلفة من الطبقات الثنائية حسب الشكل 1.I.III. أ. وقمنا بنفس العملية السابقة حيث غيرنا عدد الطبقات الثنائية nb من 1 إلى 12 ورسمنا عامل الانعكاس الأعظمي R_{Max} بدلالة عدد الطبقات الثنائية nb وكذلك رسمنا عرض القمة الرئيسية عند منتصف R_{Max} (عرض شريط الإيقاف) $\Delta\lambda$ بدلالة nb على نفس المعلم والموضح بالشكل 1.I.III. ب.



(أ)



(ب)

الشكل: 1.III- تأثير عدد الطبقات الثنائية (SiO_2/TiO_2) لمرآة ربيع موجة متمركزة

عند $\lambda_0 = 700 \text{ nm}$:

أ- على عامل الانعكاس R .

ب- على عامل الانعكاس الاعظمي R_{max} وعلى عرض شريط الإيقاف .

نلاحظ أنه بزيادة عدد الطبقات الثنائية nb للمرآة يزداد R_{max} وابتداء من $nb = 10$ فإنه $R_{max} \approx 100\%$ ونلاحظ تناقص Δr مع زيادة nb إلى أن نصل إلى $nb = 10$ فإن Δr تقريبا يثبت ، وهذه النتائج تتماشى مع دراسات منشورة [2,6,7,8,11,13].

وعلى هذا الأساس نأخذ كأحسن وأدق عدد من الطبقات الثنائية 10 للمرآة.

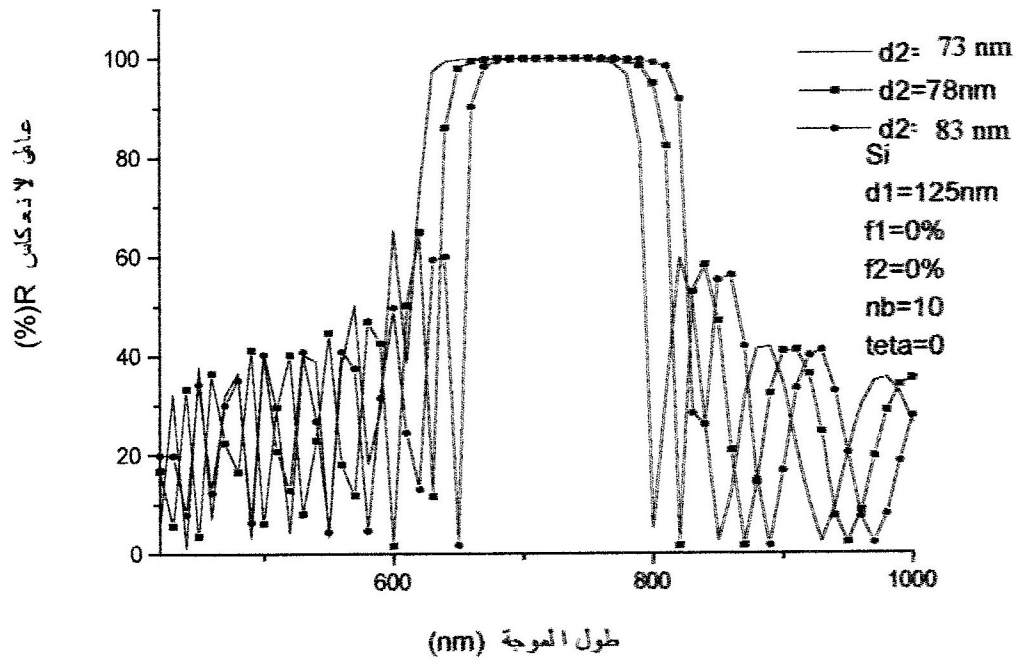
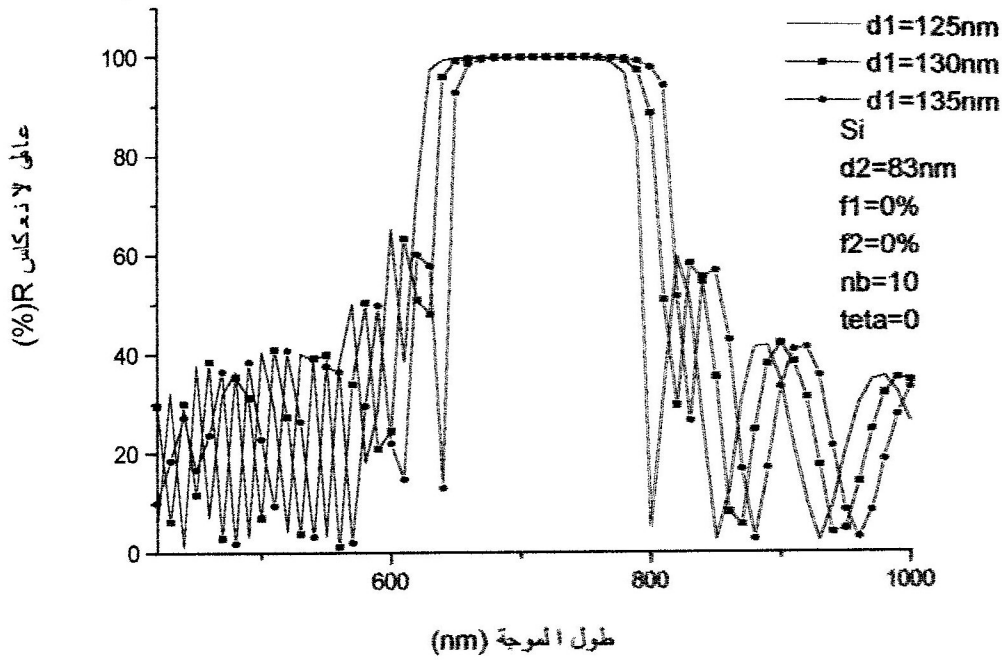
ب- تأثير تغير سمكي طبقتي المادتين على المرآة :

قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية لمرآة ثبتنا سمك طبقة TiO_2 (d_2) لها وغيرنا سمك طبقة SiO_2 (d_1) حول

السمك المطابق لربع الموجة $\left(\frac{\lambda_0}{4}\right)$. نحصل على الشكل 2.III.أ.

ثم قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية لمرآة ثبتنا سمك طبقة SiO_2 (d_1) وغيرنا سمك طبقة TiO_2 (d_2) حول

السمك المطابق لربع الموجة $\left(\frac{\lambda_0}{4}\right)$. نحصل على الشكل 2.III.ب.



الشكل: 2.III- تأثير تغير سمك الطبقات ($\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) على عامل الانعكاس :

أ- سمك طبقات SiO_2 .

ب- سمك طبقات TiO_2 .

نلاحظ انزياح البيانات $R(\lambda)$ نحو أطوال الموجات الأكبر عند زيادة d_1 أو d_2 وهذا طبيعي إذا رجعنا إلى العلاقة (1.1).

فإن تغير سمكي الطبقتين يسمح بضبط المرآة حول طول موجة معينة λ_0 ومن الأحسن أن تبقى $n_1 d_1$ و $n_2 d_2$ قريبة من $\frac{\lambda_0}{4}$.

عند ترسيب طبقتي SiO_2 و TiO_2 يمكن أن تحصل أخطاء تجريبية للسمكين d_1 و d_2 وهذا لا يخل بنوعية المرآة. لأن الأخطاء الصغيرة في سمك الطبقات لا تؤثر في عامل الانعكاس إلا في المنطقة ذات الانعكاس الضعيف [1]، فإننا نعتمد في دراستنا على أن السمك الضوئي لكل طبقة ربع موجة $\left(\frac{\lambda_0}{4}\right)$.

ج- تأثير مسامية المادتين على المرآة :

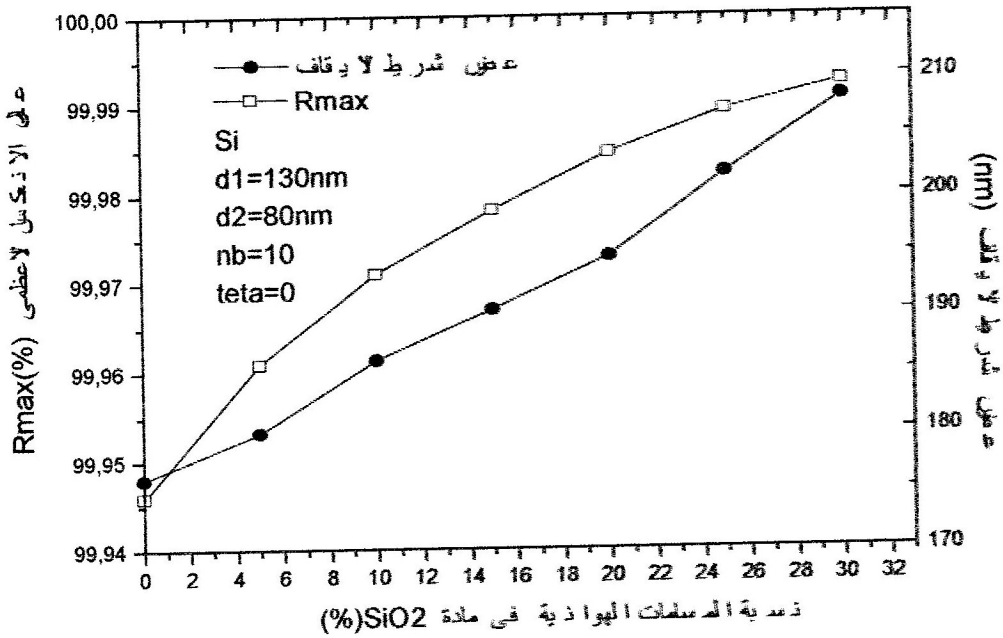
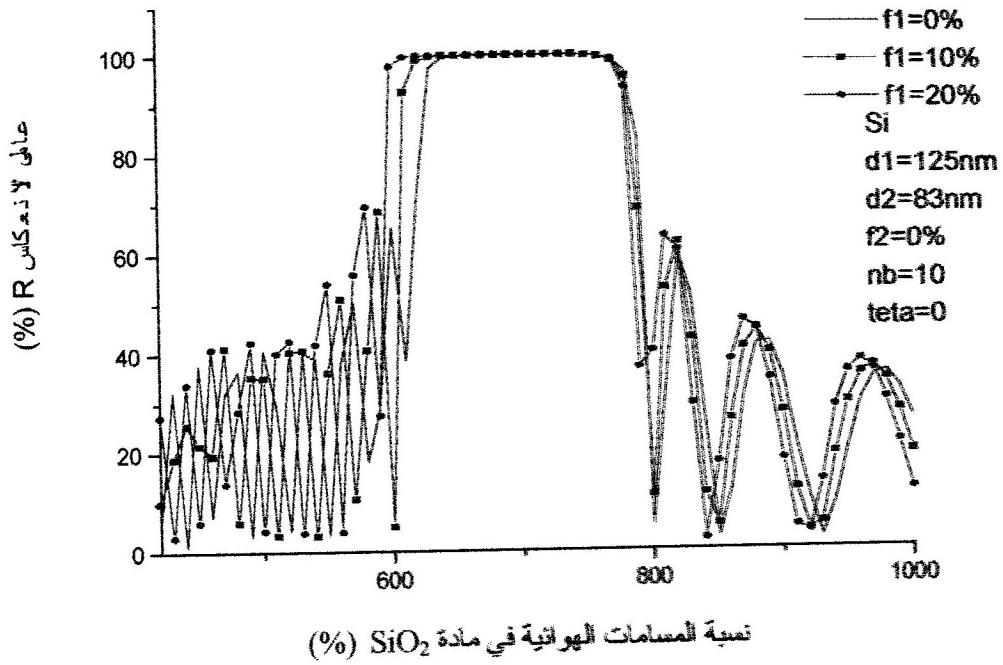
حسب طرق ترسيب طبقات SiO_2 و TiO_2 التجريبية كطريقة PECVD-ECR قد تتخلل هذه المواد مسامات هوائية حيث تكون كثافتها أقل من الكثافة العادية [12] وعلى هذا الأساس قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية لمرآة متركزة عند $\lambda_0 = 700\text{nm}$ وبورود عمودي للضوء بحيث اعتبرنا طبقة TiO_2 خالية من المسامات الهوائية ($f_2 = 0\%$) أما طبقة SiO_2 بها نسب مختلفة من المسامات الهوائية f_1 فتحصلنا على بيانات $R(\lambda)$ الموضحة على الشكل III.3.أ.

قمنا بدراسة عامة على نفس المرآة وبورود عمودي للضوء كذلك قمنا بعملية تشبيه للاستجابة الضوئية للمرآة وغيرنا في كل مرة نسبة المسامات الهوائية في طبقة SiO_2 (f_1) من 0% إلى 30% ، بعدها رسمنا البيان الممثل لتغيرات عامل الانعكاس الأعظمي R_{max} بدلالة f_1 وكذلك عرض القمة الرئيسية عند منتصف الارتفاع R_{max} بدلالة f_1 في نفس المعلم فتحصل على المنحنيين الممثلين بالشكل III.3.ب.

بورود عمودي للضوء قمنا بعملية الاستجابة الضوئية لنفس المرآة بحيث أخذنا طبقة SiO_2 خالية من المسامات الهوائية ($f_1 = 0\%$) أما طبقة TiO_2 بها نسب مختلفة من المسامات الهوائية (f_2) والمنحنيات البيانية $R(\lambda)$ مبينة على الشكل III.4.أ.

قمنا بدراسة عامة على نفس المرآة بحيث قمنا بعملية تشبيه للاستجابة الضوئية للمرآة وغيرنا في كل مرة نسبة المسامات الهوائية f_2 في TiO_2 من 0% إلى 30%.

بعدها رسمنا البيان الممثل لتغيرات R_{max} بدلالة f_2 وكذلك $\Delta\lambda$ بدلالة f_2 في نفس المعلم فتحصل على المنحنيين البيانيين الممثلين بالشكل III.4.ب.

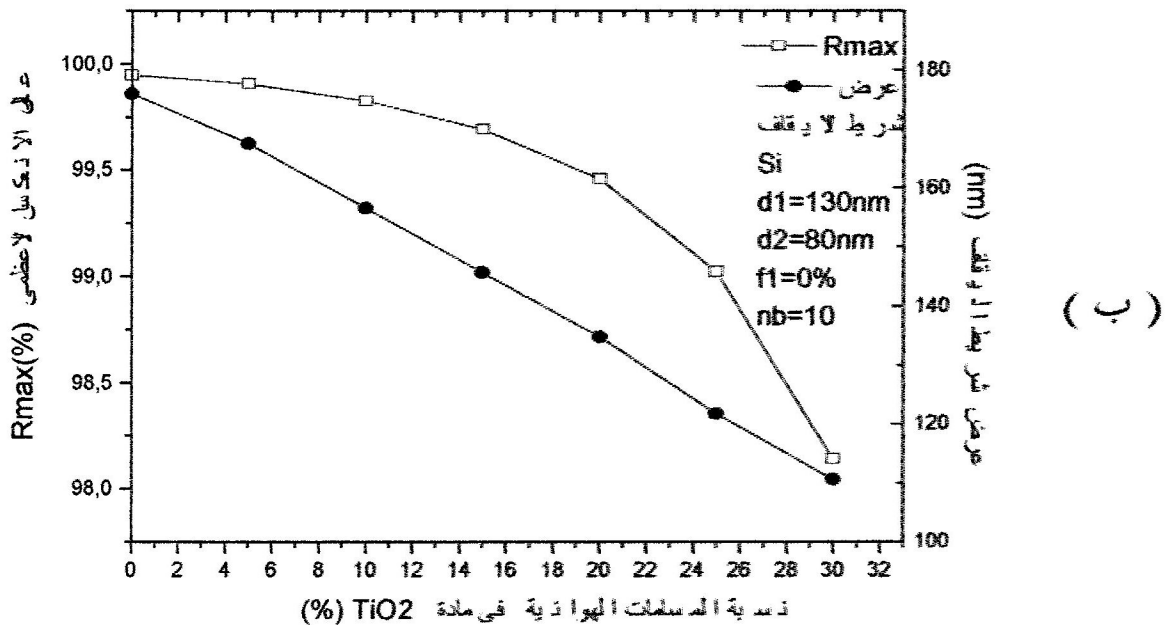
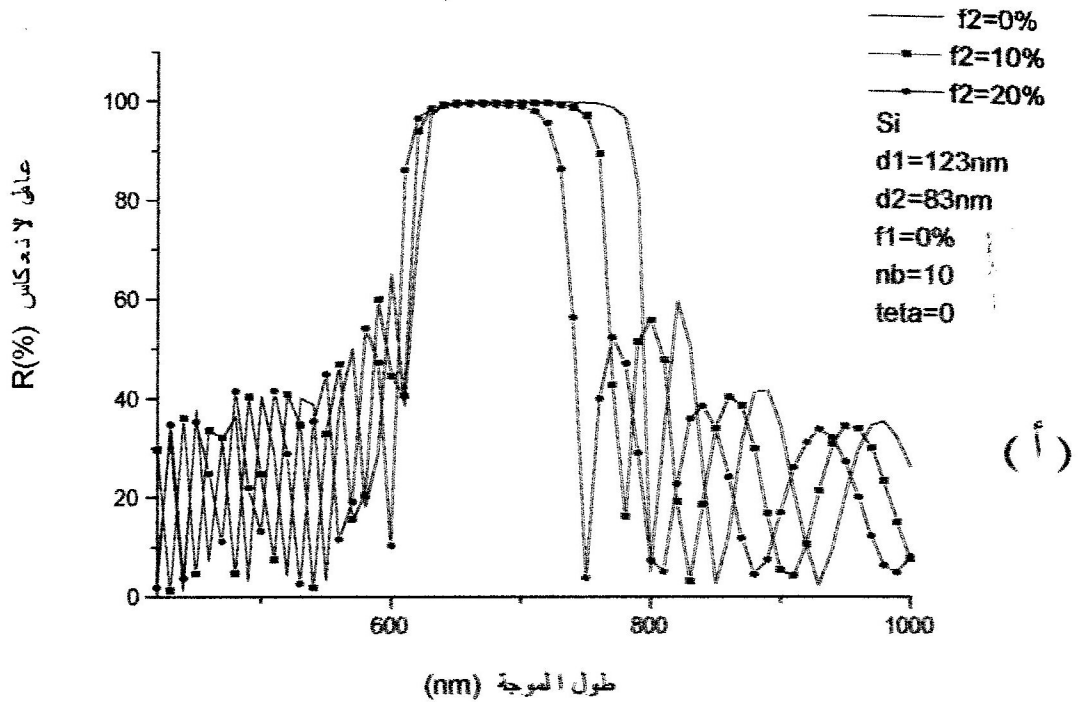


الشكل 3.III- تأثير نسبة المسامات الهوائية في مادة SiO_2 على مرآة ذات طبقات ثنائية $(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)$

ربع موجة متمركزة عند $\lambda_0 = 700 \text{ nm}$:

أ- على عامل الانعكاس R .

ب- على عامل الانعكاس الأعظمي R_{max} و على عرض شريط الايقاف.



الشكل: 4.III- تأثير نسبة المسامات الهوائية في مادة TiO_2 على مرآة ذات طبقات ثنائية (SiO_2/TiO_2)

ربع موجة متمركزة عند $\lambda_0 = 700 \text{ nm}$:

أ- على عامل الانعكاس R .

ب- على عامل الانعكاس الأعظمي R_{max} وعلى عرض شريط الايقاف.

نلاحظ من البيانات الممثلة بالشكل 3.III أنه كلما زادت نسبة المسامات الهوائية في طبقة SiO_2 زادت R_{max} وكذلك زادت $\Delta\lambda$ مع انزياح طفيف في القمة الرئيسية وكذلك القمم الثانوية نحو أطوال الموجات الأصغر.

نلاحظ من البيانات الممثلة بالشكل 4.III أنه كلما زادت نسبة المسامات الهوائية في TiO_2 نقصت R_{max} وكذلك نقصت $\Delta\lambda$ مع إنزياح طفيف في القمة الرئيسية وكذلك القمم الثانوية نحو أطوال الموجات الأصغر.

قربنيّ المادتين SiO_2 و TiO_2 عند طول الموجة $\lambda_0 = 700\text{nm}$ على الترتيب 1,4 و 2,1 فالفرق بينهما = 0,7.

أن وجود مسامات هوائية داخل SiO_2 فإنه يقلل من قربته وبالتالي يزداد الفارق بين قربنيّ المادتين ونعلم أنه كلما زاد الفارق بين القربيتين زاد عامل الانعكاس الأعظمي R_{max} حسب العلاقة (4.I) وبوجود مسامات هوائية في TiO_2 فإنه يقلل من قيمة قربته وبالتالي يقل الفارق بين القربيتين ونعلم أنه حسب العلاقة (4.I). وكلما نقص الفارق بين القربيتين نقص عامل الانعكاس الأعظمي R_{max} وهذه النتائج تتماشى مع دراسات منشورة [13,11,7,6,3].

ونستنتج من العلاقة (5.I) أنه كلما زاد الفارق بين القربيتين زاد عرض القمة الرئيسية $\Delta\lambda$ عند منتصف الارتفاع وكلما نقص الفارق بين القربيتين نقص $\Delta\lambda$.

وقد لوحظ تجريبيا أن مادة SiO_2 المرسبة بطريقة PECVD-ECR تحتوي على نسبة من المسامات الهوائية تقارب 10% [1].

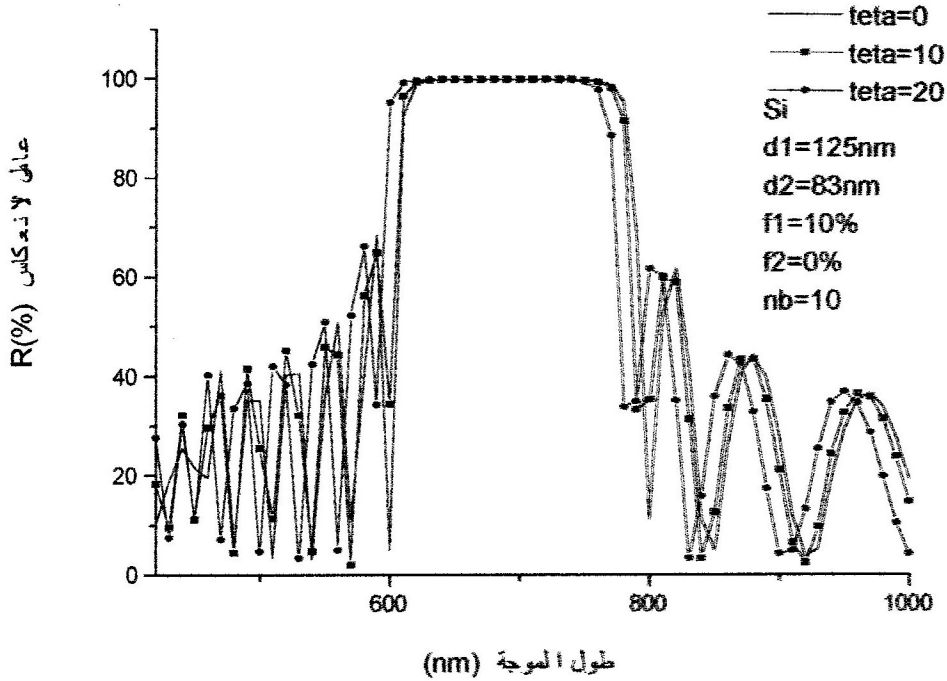
وعليه للحصول على أحسن النتائج لمرايا براغ يستحسن أخذ TiO_2 غير مسامي و SiO_2 به 10% من المسامات الهوائية.

د- تأثير زاوية الورود :

قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية لمرآة براغ متركزة عند $\lambda_0 = 700\text{nm}$ بحيث تكون طبقة TiO_2 خالية من المسامات الهوائية أما طبقة SiO_2 تحتوي على 10% من المسامات الهوائية. ندرس تغير زاوية الورود للضوء حيث أخذنا زوايا مختلفة حسب الشكل 5.III.

فلاحظ أن المرآة لا تتأثر بزاوية الورود.

فقط في حالة الزوايا الكبيرة يحدث انزياح نحو أطوال الموجات الأصغر مع تغير طفيف في قيمة عامل الانعكاس الأعظمي للمرآة R_{max} .



الشكل: 5.III- تأثير زاوية الورد على عامل الانعكاس R لمرآة براغ ذات طبقات ثنائية ($\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) ربيع موجة.

III.1.1.2- مرايا براغ ذات قفز القرينة على مسند من زجاج :

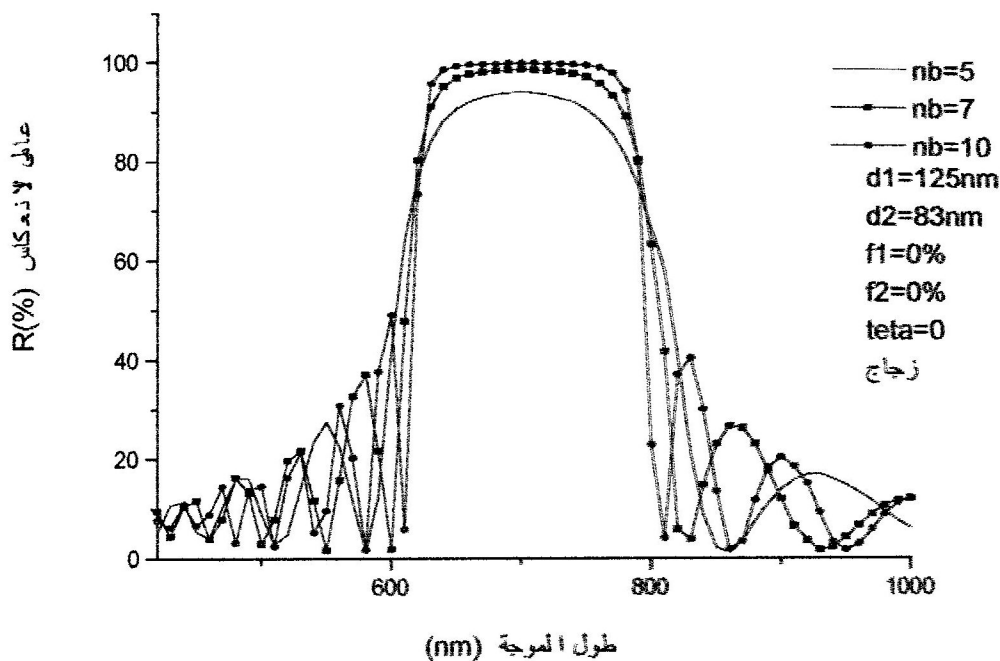
قرائن مادة الزجاج المستعملة في المجال الضوئي (300-1100) nm معطاة في الملحق I ، وهي صغيرة مقارنة بقرائن مادة السيليسيوم وكما نعلم أن الزجاج مادة شفافة.

أ- تأثير عدد الطبقات الثنائية على المرآة :

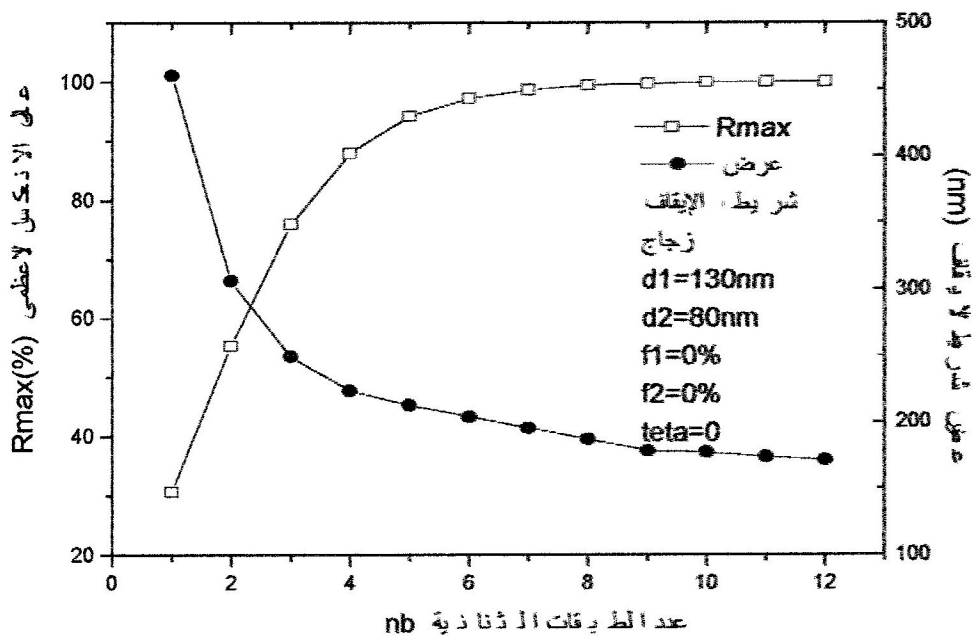
استعملنا طبقات خالية من مسامات الهواء وبورود عمودي للضوء أخذنا حالة للمرآة حيث السمك الضوئي لطبقات المرآة ربيع موجة أي تحقق العلاقاتين (2.I) و (3.I). المرآة التي درسناها متركزة عند : $\lambda_0 = 700\text{nm}$.

قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية للمرآة بأعداد nb مختلفة من الطبقات الثنائية. والبيانات $R(\lambda)$ مبينة بالشكل III.6.أ.

قمنا بدراسة عامة على نفس المرآة كذلك قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية للمرآة وغيرنا عدد الطبقات الثنائية nb من 1 إلى 12 ورسمنا عامل الانعكاس الأعظمي R_{\max} بدلالة nb . وكذلك رسمنا عرض شريط الإيقاف $\Delta\lambda$ بدلالة nb على نفس المعلم والموضح بالشكل III.6.ب.



(أ)



(ب)

الشكل: 6.III- تأثير عدد الطبقات الثنائية ($\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) لمرآة ربيع موجة متركزة عند $\lambda_0 = 700 \text{ nm}$:

أ- على عامل الانعكاس R .

ب- على عامل الانعكاس الأعظمي R_{max} وعلى عرض شريط الإيقاف.

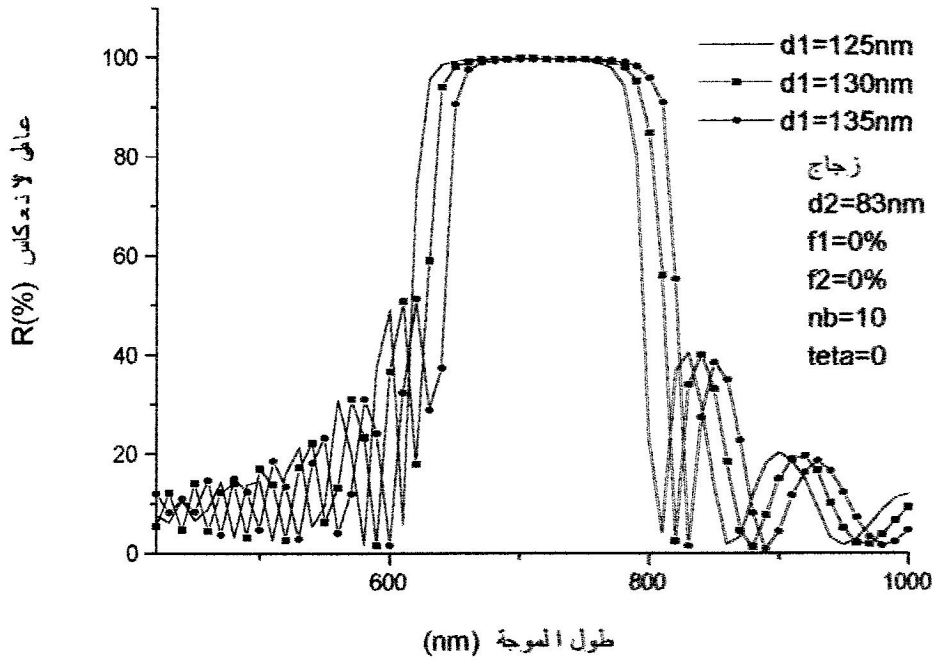
فلاحظ أنه بزيادة عدد الطبقات الثنائية nb للمراة يزداد R_{max} لها حيث عندما $nb = 10$ فإن $R_{max} \approx 100\%$ ونلاحظ تناقص Δl مع زيادة nb ، وهذه الدراسة تتماشى مع دراسات منشورة [11,8,7,5,2,1].

وعلى هذا الأساس نأخذ كأقل وأحسن عدد للطبقات الثنائية $nb = 10$ للمراة.

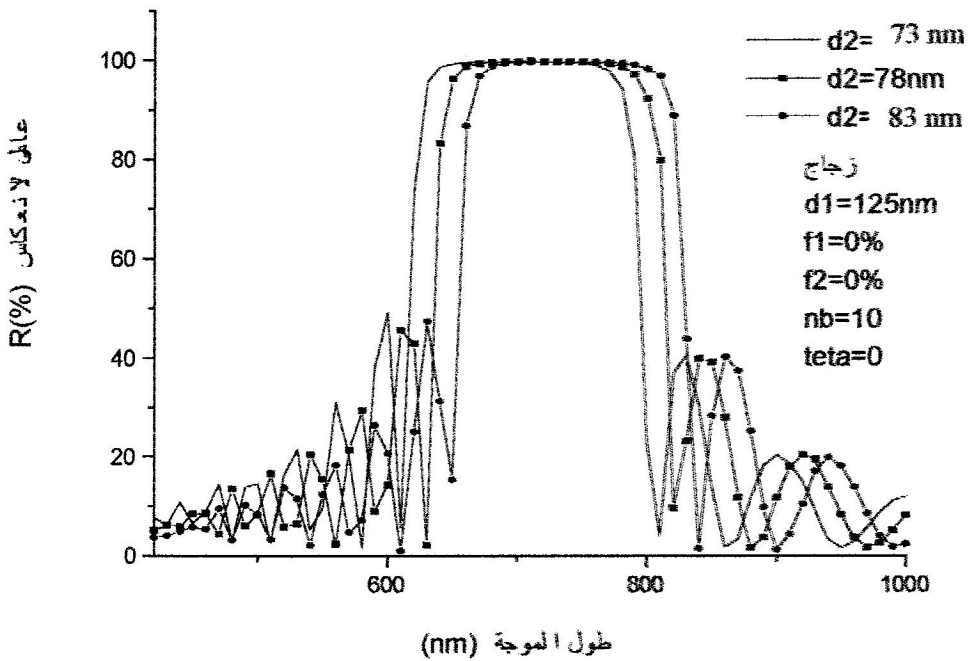
ب- تأثير تغير سمكي طبقتي المادتين على المراة :

قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية للمراة حيث ثبتنا سمك طبقة TiO_2 (d_2) وغيرنا سمك طبقة SiO_2 (d_1) حول السمك المطابق لربع الموجة $\left(\frac{\lambda_0}{4}\right)$. فتحصلنا على منحنيات بيانية المبينة بالشكل III.7.أ.

كذلك بورود عمودي للضوء قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية للمراة حيث ثبتنا سمك طبقة SiO_2 (d_1) وغيرنا سمك طبقة TiO_2 (d_2) حول السمك المطابق لربع الموجة $\left(\frac{\lambda_0}{4}\right)$. فتحصلنا على منحنيات بيانية المبينة بالشكل III.7.ب.



(أ)



(ب)

الشكل: 7.III- تأثير تغير سمك الطبقات ($\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) على عامل الانعكاس :

أ- سمك طبقات SiO_2 .

ب- سمك طبقات TiO_2 .

نلاحظ انزياح البيانات $R(\lambda)$ نحو أطوال الموجات الأكبر عند زيادة d_1 أو d_2 وهذا طبيعي إذا رجعنا إلى العلاقة (I.I) فإننا نعلم في دراستنا على السمك الضوئي لكل طبقة ربع موجة $\left(\frac{\lambda_0}{4}\right)$.

ج- تأثير مسامية المادتين على المرآة :

قمنا بدراسة مرآة متركزة عند $\lambda_0 = 700nm$ ، وبورود الضوء بشكل عمودي.

أقمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية للمرآة بحيث اعتبرنا طبقة TiO_2 خالية من المسامات الهوائية

($f_2 = 0\%$) أما طبقة SiO_2 بها نسب مختلفة من المسامات الهوائية f_1 فتحصلنا على البيانات $R(\lambda)$ الموضحة

على الشكل III.8.أ.

قمنا بدراسة عامة على نفس المرآة حيث قمنا بعملية تشبيه للاستجابة الضوئية للمرآة وغيرنا في كل مرة نسبة المسامات الهوائية f_1 في طبقة SiO_2 من 0% إلى 30%.

بعدها رسمنا البيان الممثل لتغيرات عامل الانعكاس الأعظمي R_{max} بدلالة f_1 وكذلك عرض القمة

الرئيسية عند منتصف الارتفاع R_{max} بدلالة f_1 في نفس المعلم فنحصل على المنحنيين البيانيين الممثلين

بالشكل III.8.ب.

قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية للمرآة بحيث اعتبرنا في هذه الحالة طبقة SiO_2 خالية من المسامات

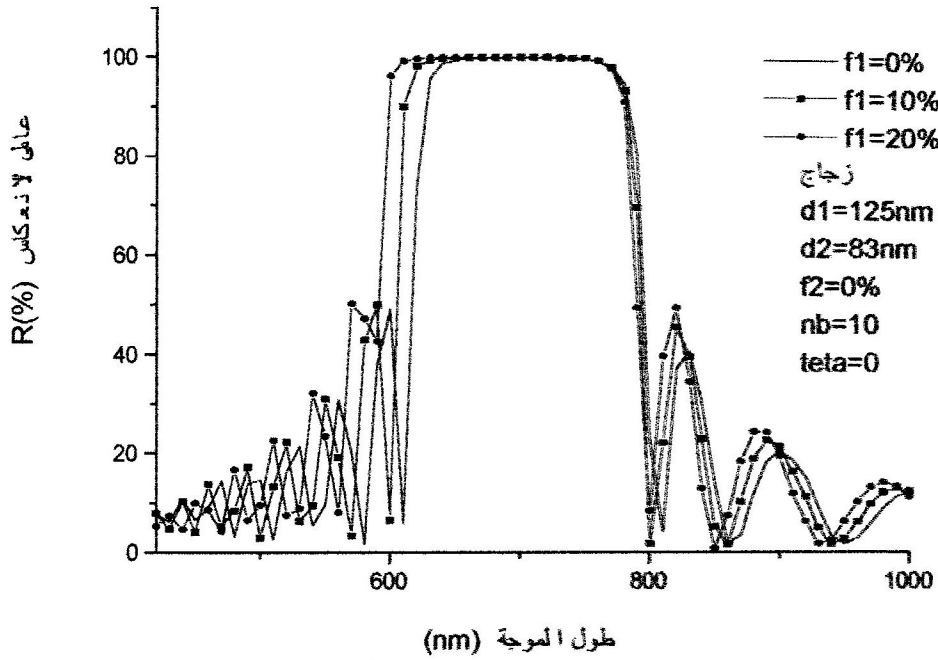
الهوائية ($f_1 = 0\%$) أما طبقة TiO_2 بها نسب مختلفة من المسامات الهوائية والمنحنيات البيانية $R(\lambda)$ مبينة على

الشكل III.9.أ.

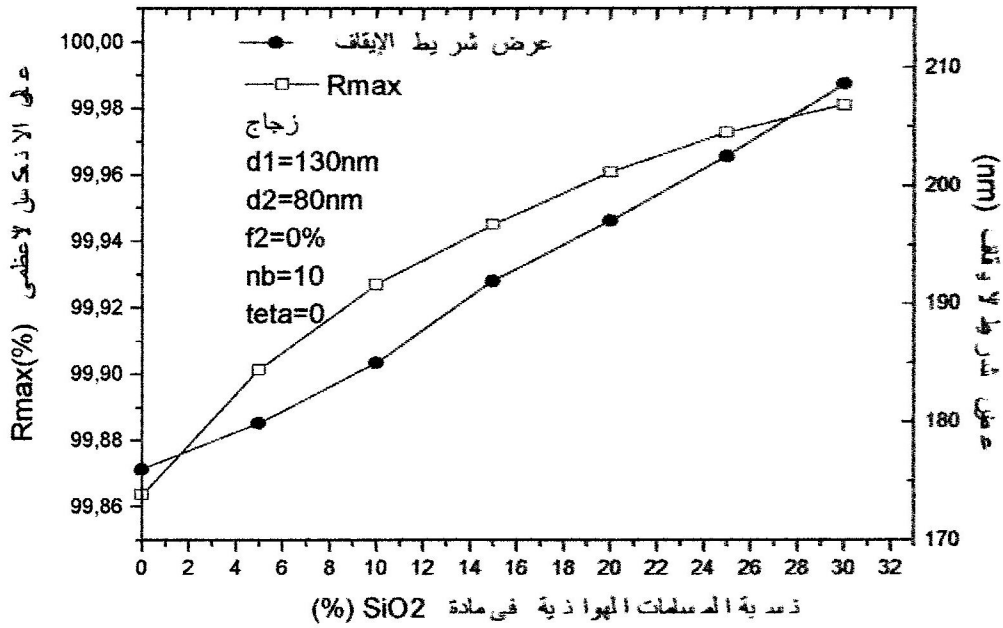
قمنا بدراسة عامة، حيث قمنا بتشبيه للاستجابة الضوئية للمرآة وغيرنا نسبة المسامات الهوائية f_2 في TiO_2 من 0% إلى 30%.

أما طبقة SiO_2 فهي خالية من المسامات الهوائية، بعدها رسمنا البيان الممثل لتغيرات R_{max} بدلالة f_2

وكذلك $\Delta\lambda$ بدلالة f_2 في نفس المعلم والمبين بالشكل III.9.ب.



(أ)



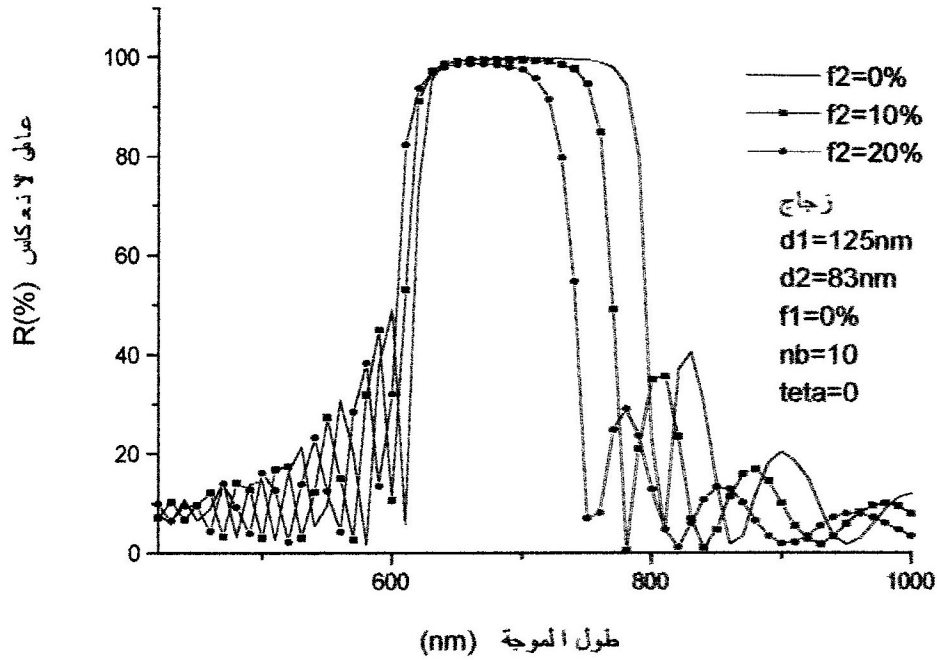
(ب)

الشكل 8.III- تأثير نسبة المسامات الهوائية في مادة SiO_2 على مرآة ذات طبقات ثنائية $(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)$

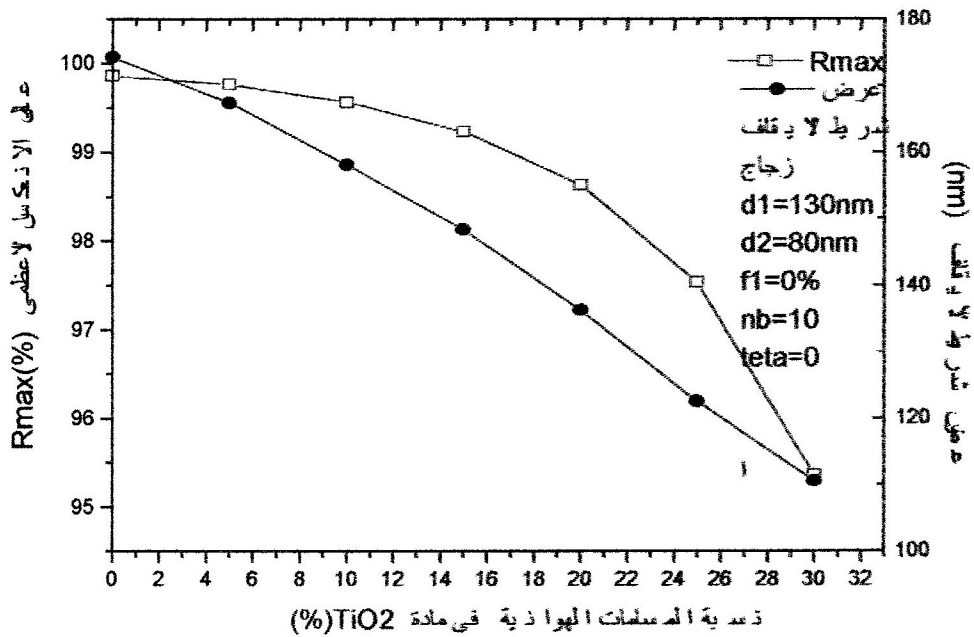
ربع موجة متمركزة عند $\lambda_0 = 700 \text{ nm}$:

أ- على عامل الانعكاس R

ب- على عامل الانعكاس الأعظمي R_{max} وعلى عرض شريط الإيقاف.



(أ)



(ب)

الشكل: 9.III- تأثير نسبة المسامات الهوائية في مادة TiO_2 على مرآة ذات طبقات ثنائية (SiO_2/TiO_2)

ربع موجة متمركزة عند $\lambda_0 = 700 \text{ nm}$:

أ- على عامل الانعكاس R .

ب- على عامل الانعكاس الأعظمي R_{max} وعلى عرض شريط الايقاف.

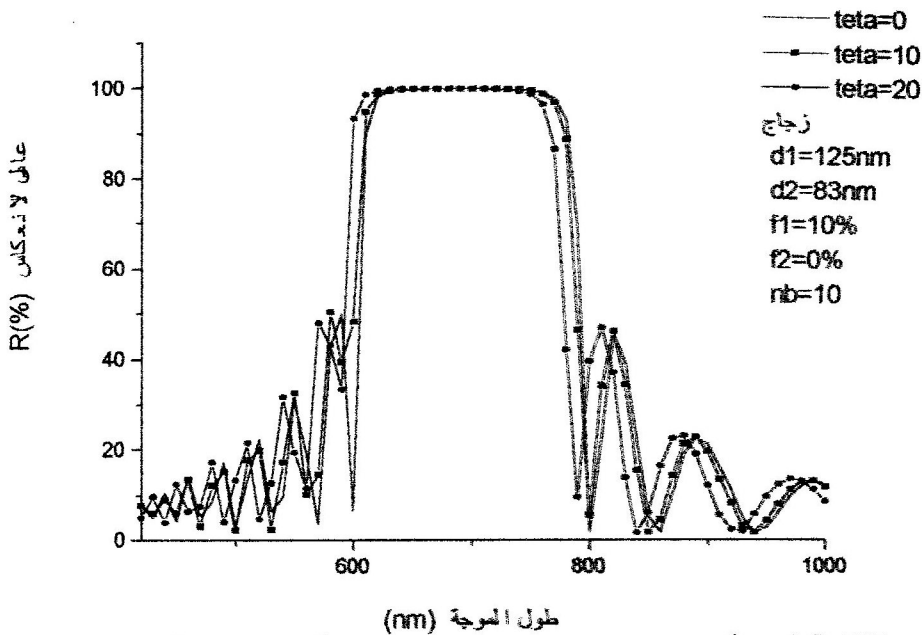
نلاحظ من المنحنيات البيانية الممثلة بالشكل 8.III ، أنه كلما زادت نسبة المسامات الهوائية f_1 في طبقة SiO_2 زادت R_{\max} وكذلك زادت Δn مع انزياح طفيف في القمة الرئيسية وكذلك القمم الثانوية نحو أطوال الموجات الأصغر.

ونلاحظ من البيانات الممثلة بالشكل 9.III أنه كلما زادت نسبة المسامات الهوائية في TiO_2 نقصت R_{\max} وكذلك نقصت Δn مع انزياح طفيف في القمة الرئيسية وكذلك القمم الثانوية نحو أطوال الموجات الأصغر . وزيادة R_{\max} راجع إلى زيادة الفارق بين قرينتي المادتين بوجود مسامات هوائية في SiO_2 ونقصان R_{\max} راجع إلى نقصان الفارق بين قرينتي المادتين بوجود مسامات هوائية في TiO_2 حسب العلاقة (4.I) وبيننا ذلك في حالة مرآة على مسند من Si وهذه النتائج تتماشى مع دراسات منشورة [17,8,5,1].

ومن العلاقة (5.I) نتبين أنه كلما زاد الفارق بين قرينتي المادتين زادت قيمة Δn وكلما نقص هذا الفارق نقصت قيمة Δn وذلك يظهر أكثر وضوحاً في حالة المسند الزجاجي. ومن الدراسات التجريبية لطريقة PECVD-ECR التي رسبت بها مادتي SiO_2 و TiO_2 فإننا نتحصل على أحسن النتائج لمرايا براغ عندما نأخذ TiO_2 غير مسامي و SiO_2 به 10% من المسامات الهوائية.

د- تأثير زاوية الورود :

قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية لمرآة متركزة عند $\lambda_0 = 700\text{nm}$ بحيث أخذنا طبقة TiO_2 خالية من المسامات ($f_2 = 0\%$). أما طبقة SiO_2 بها مسامات هوائية تقدر بنسبة $f_1 = 10\%$. ندرس تغير زاوية الورود للضوء حيث أخذنا زوايا مختلفة حسب الشكل 10.III.



الشكل: 10.III- تأثير زاوية الورود على عامل الانعكاس R لمرآة براغ ذات طبقات ثنائية $(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)$ ربع موجة.

فلاحظ أن المرآة لا تتأثر بزاوية الورود.

أما في حالة الزوايا الكبيرة يحدث انزياح نحو أطوال الموجات الأصغر مع تغير طفيف في قيمة R_{max} للمرآة.

2.1.III- مرآيا براغ ذات تدرج القرينة على مسند من السيليسيوم :

وهي طبقات خليطة من مادتي SiO_2 و TiO_2 غير متجانسة تتغير فيها قرينة المادة وفق دالة دورية ومن

أبسط الدوال التي استعملت الدالة الجيبية البسيطة بحيث تتغير قرينة الخليط جيبيا مع السمك [9,10,11,18] واستعملت كذلك دوال أخرى تختلف عن السابقة.

في هذه الدراسة استعملنا دالتين Fa_A و Fa_B الأولى جيبية والثانية أسية جيبية (أنظر الشكلين 1.II و 3.II):

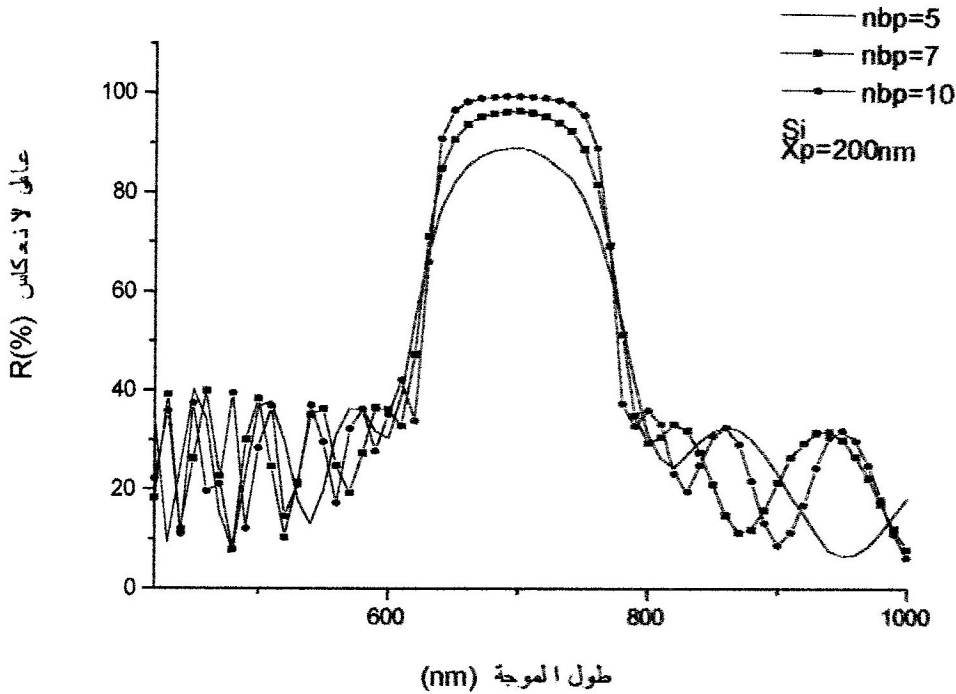
$$Fa_A = ff + \frac{f_0 - ff}{2} \cdot \left(1 + \sin \left(\left(\frac{2\pi x}{X_p} \right) - \frac{\pi}{2} \right) \right)$$

$$Fa_B = ff + \frac{f_0 - ff}{2} \cdot \left(1 + \exp \left(\sin \left(\left(-\frac{2\pi x}{X_p} \right) - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right)$$

وتفاديا للتكرار اقتصرنا على دراسة المرآيا المتدرجة على مسند من Si.

أ- تأثير عدد الدورات الجيبية على المرآة :

قمنا بتشييه الاستجابة الضوئية لمرآة متدرجة القرينة وفقا للدالة الجيبية المعطاة بالعلاقة (9.II) والمتمركزة عند طول الموجة $\lambda_0 = 700nm$ وبورود عمودي لأعداد مختلفة من الدورات للجيبية فتحصلنا على البيانات المبينة على الشكل 11.III.



الشكل : 11.III - تأثير عدد الدورات لمرآة متدرجة القرينة جيبيًا (الخليط (SiO_2-TiO_2)) متمركزة

عند $\lambda_0 = 700 nm$. حيث $f_0 = 100\%$, $ff = 0\%$.

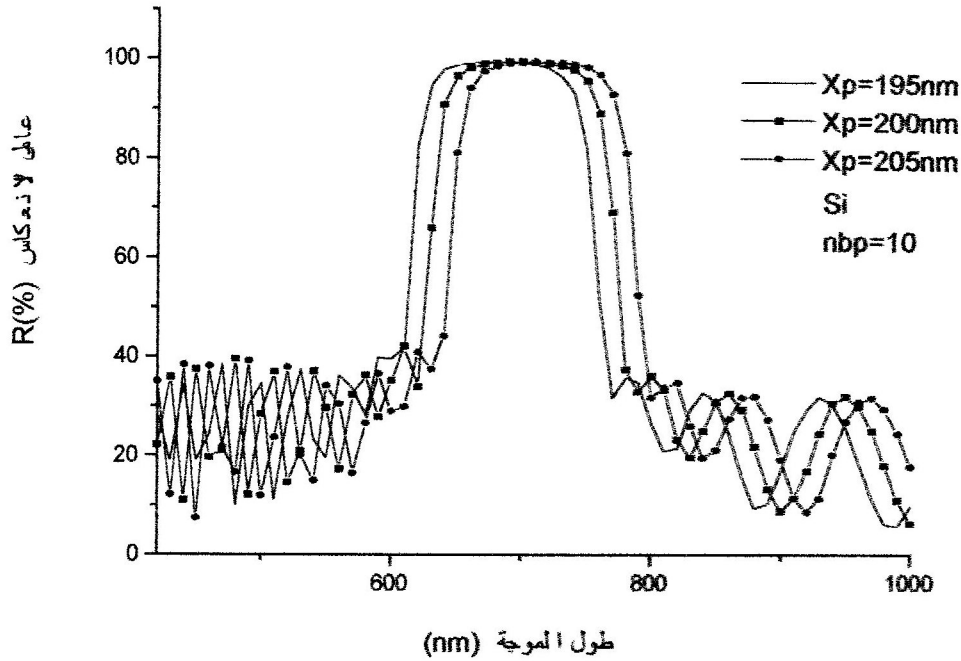
من هذا الشكل ومن الجدول 1.III، نلاحظ بزيادة عدد الدورات يزداد عامل الانعكاس الأعظمي R_{max} للمرآة ويقل عرض القمة الرئيسية $\Delta\lambda$ عند منتصف الارتفاع R_{max} ، ونلاحظ عندما $nbp = 10$ فإن R_{max} يقارب 100% وعليه فإننا نأخذ 10 كأدنى وأحسن عدد للدورات هذه المرآة.

nb	$R_{max}(\%)$	$\Delta\lambda(nm)$
5	89.0889	171.34
7	96.4179	160.44
10	99.3700	149.53

- الجدول 1.III -

ب- تأثير تغير السمك الدوري للجبيبة على المرآة :

قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية لمرآة متدرجة جيبيًا وفقًا للدالة السابقة المعطاة بالعلاقة (9.II) وبورود عمودي للضوء نقوم بتغيير السمك الدوري حول السمك الدوري الذي يحقق تمرکز المرآة عند $\lambda_0 = 700\text{nm}$ حسب الشكل 12.III .



الشكل 12.III- تأثير تغير سمك الدوريات على عامل الانعكاس لمرآة متدرجة القرينة جيبيًا

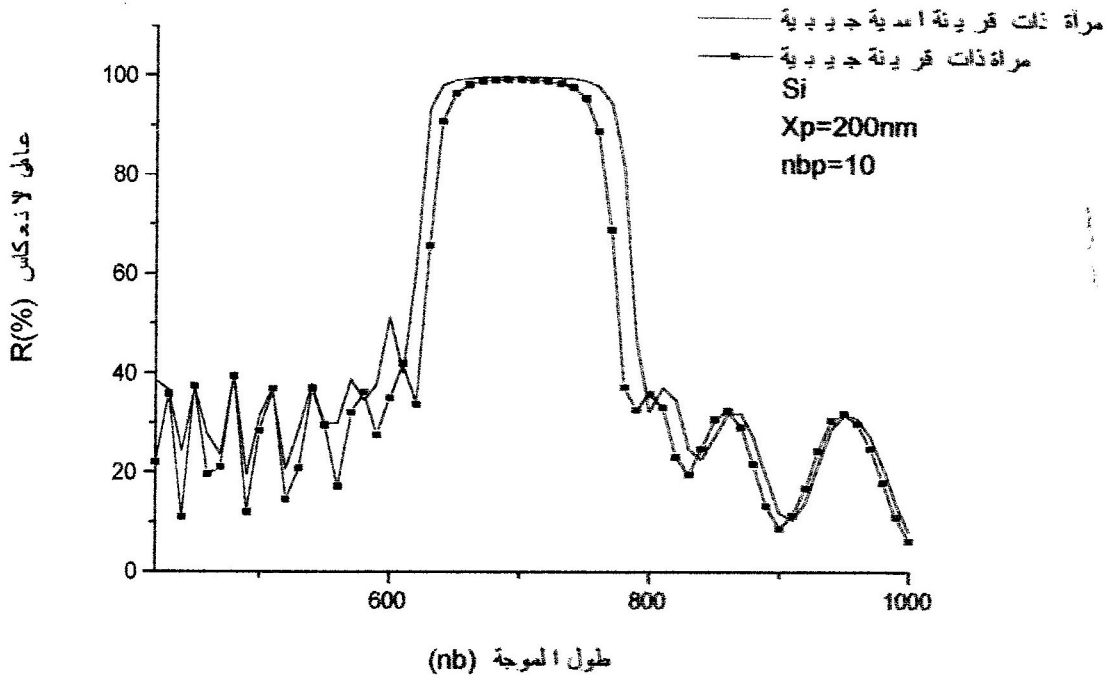
(الخليط $(\text{SiO}_2-\text{TiO}_2)$). حيث $f_0 = 100\%$, $ff = 0\%$.

نلاحظ من الشكل أنه عندما يزداد السمك الدوري للمرآة تنزاح القمة الرئيسية والقمم الثانوية نحو أطوال الموجات الأكبر.

ج- تغير قرينة المرآة على شكل أسّي جيبي :

من باب تحسين المرآة نقترح دالة دورية أخرى لتغير القرينة والمعطاة بالعلاقة (10.II).

قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية لمرآتين متدرجتين وفقًا للدالتين الجيبية و الأسية الجيبية معًا وبورود عمودي للضوء والمرآتين متمركزتين عند $\lambda_0 = 700\text{nm}$ فتحصلنا على الشكل 13.III.



الشكل : 13.III - مقارنة مرآتي متدرجتين إحداهما ذات جيبيه و الأخرى أسية جيبيه.

$$\text{حيث } f_0 = 100\%, ff = 0\%$$

فلاحظ أن R_{max} لهذه المرآة أكبر من R_{max} للمرآة المتدرجة الجيبيه ، وكذلك Δn لهذه المرآة أكبر من R_{max} للمرآة المتدرجة الجيبيه.

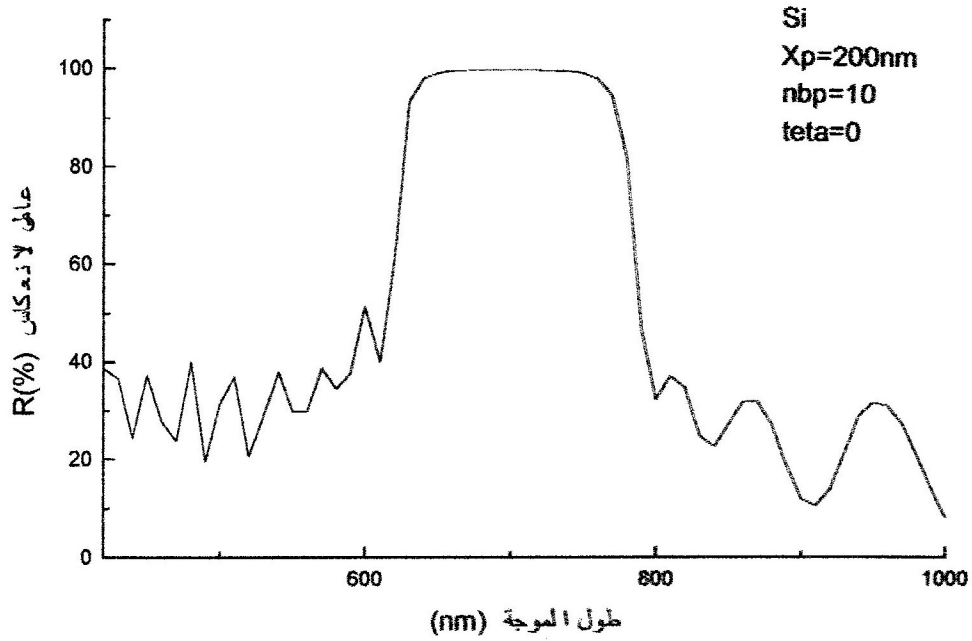
وبالتالي هذه الدالة أجرت تحسينا عن المرآة ذات الدالة الجيبيه السابقة.

د- مقارنة أحسن نتيجتين من نوعي المرآة على مسند من سيليسيوم :

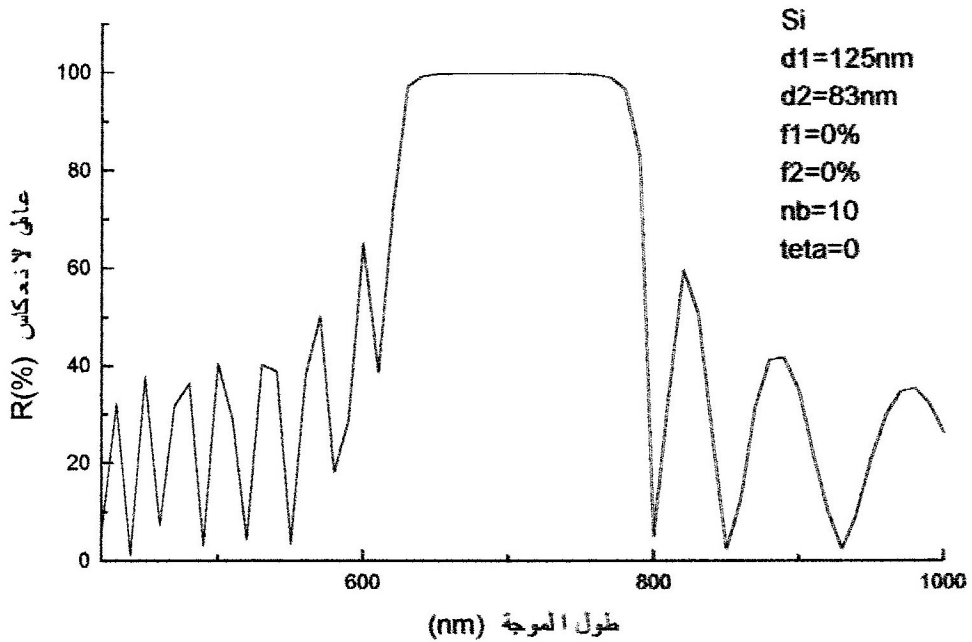
لإجراء مقارنة بين مرآتين ذات قفز القرينة والمتدرجة القرينة على شكل أسية جيبي.

قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية لنوعي المرآة حيث كلاهما متمركزة عند $\lambda_0 = 700nm$ ، ههما نفس العدد من

الطبقات 10 وبورود عمودي للضوء. فحصلنا على الشكلين 14.III.أ و 14.III.ب.



(أ)



(ب)

الشكل: 14.III- مقارنة مرآتين :

- أ- متدرجة أسية جيبية $f_0 = 100\%$, $ff = 0\%$
- ب- ذات طبقات ثنائية $(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)$ ربع موجة.

لدينا الجدول 2.III، يبين قيم R_{max} و $\Delta\lambda$ للمرآتين حيث نجد أن R_{max} للمرآة ذات قفز القرينة أكبر قليلا من R_{max} للمرآة المتدرجة إلا أن القيمتين متقاربتين.

أما $\Delta\lambda$ للمرآة ذات قفز القرينة أكبر قليلا من $\Delta\lambda$ للمرآة المتدرجة إلا أن القيمتين متقاربتين.

المرآة	$R_{max}(\%)$	$\Delta\lambda(nm)$
متدرجة على شكل دالة أسية جيبيية	99.8266	173.68
ذات قفز القرينة	99.9476	176.02

- الجدول 2.III -

فإنه لا يوجد فرق كبير بين المرآتين الكلاسيكية والمتدرجة المقترحة وعليه يمكن أن نعوض المرآة الكلاسيكية بالمرآة المتدرجة لتفادي الأسطح الفاصلة بين الطبقات. كما أن المرآة ترسب على مرحلة واحدة وهذا مفيد تكنولوجيا.

2.III- المرشحات :

وهي ذات مساند زجاجية وتناولنا نوعان من المرشحات :

1.2.III- مرشح ذو قفز القرينة :

وهو مؤلف من مسند زجاجي يوضع عليه عدد $nb1$ من طبقات ثنائية من مادتين نقيتين SiO_2 ثم TiO_2 ، سمك طبقة SiO_2 هو d_{11} وسمك طبقة TiO_2 هو d_{12} ، بعدها يوضع عليه على هذه الجملة عدد $nb2$ من طبقات ثنائية أخرى من مادتي SiO_2 و TiO_2 بحيث سمك طبقة SiO_2 هو d_{21} وسمك طبقة SiO_2 هو d_{22} .

هذا المرشح يمرر ضوء ذو طول موجة λ_0 الموجودة ضمن شريط إيقافه .

في دراستنا هذه نأخذ $nb_1 = nb_2 = nb = 25$.

حتى نغير في طول موجة المرشح يجب أن نغير في الوسائط التالية : $d_{22}, d_{21}, d_{12}, d_{11}$.

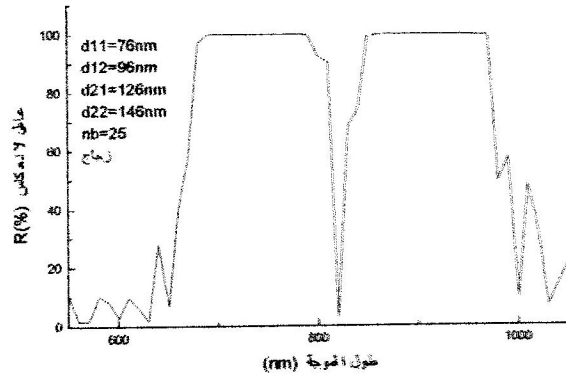
قمنا بتغيير في الوسائط المذكورة للحصول على مرشح عند أطوال موجات مختلفة. وبورود عمودي للضوء

قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية للمرشح الموضح بالشكل 15.III ، فتحصلنا على ثلاثة نماذج التالية :

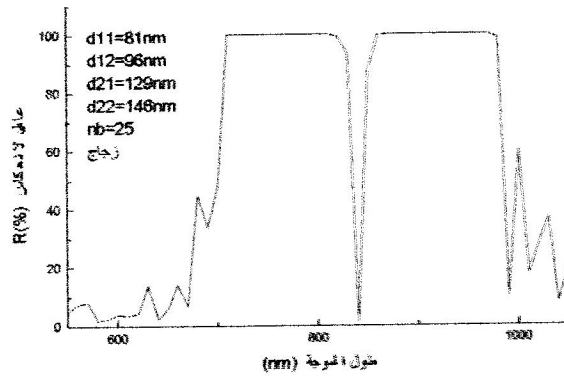
أ- مرشح يعمل عند طول الموجة : $\lambda_0 = 820nm$ ، والمبين على الشكل 15.III.أ.

ب- مرشح يعمل عند طول الموجة : $\lambda_0 = 840nm$ ، والمبين على الشكل 15.III.ب.

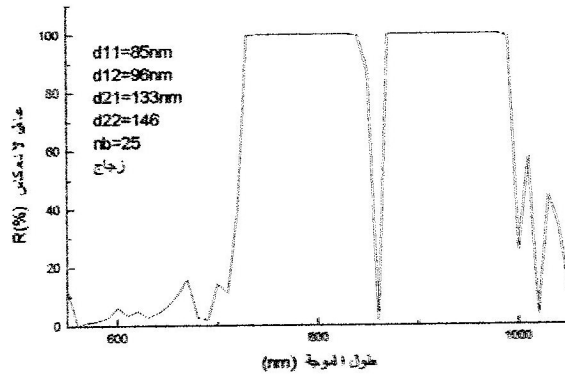
ج- مرشح يعمل عند طول الموجة : $\lambda_0 = 860nm$ ، والمبين على الشكل 15.III.ج.



(أ)



(ب)



(ج)

الشكل: 15.III- تأثير تغير سمك الطبقات لمرشح ذو قفز القرينة ($\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$)

على عامل الانعكاس :

- أ- مرشح يعمل عند طول الموجة 820 nm.
- ب- مرشح يعمل عند طول الموجة 840 nm.
- ج- مرشح يعمل عند طول الموجة 860 nm.

III.2.2- مرشح ذو تدرج القرينة والمتغيرة جيبيًا :

وهو مؤلف من مسند زجاجي فوقه عدد nbp_2 من طبقات خليطة من مادتي SiO_2 و TiO_2 ، سمك الطبقة Xp_2 وهي غير متجانسة قرينتها تتغير وفقا للدالة التالية :

$$Fa_2 = ff + \frac{f_0 - ff}{2 \cdot \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi x}{Xp_2} \right) \right)}$$

يضاف فوقها عدد nbp_1 من طبقات خليطة من مادتي SiO_2 و TiO_2 ، سمك الطبقة Xp_1 وهي غير متجانسة قرينتها تتغير وفقا للدالة التالية :

$$Fa_1 = ff + \frac{f_0 - ff}{2 \cdot \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi x}{Xp_1} - \frac{\pi}{2} \right) \right)}$$

حيث أخذنا :

$$f_0 = 100\%$$

$$ff = 0\%$$

$$nbp_1 = nbp_2 = nbp$$

عدد الطبقات nbp يجب أن يكون كبيرا حتى يعمل المرشح ويسمح بإمرار طول موجة معينة λ_0 خلال شريط إيقافه. فإن عشر طبقات لا تكفي لأن يعمل المرشح.

المرشح يعمل عند طول الموجة λ_0 فيمكن تغيير قيمة λ_0 للمرشح بإحداث تغيير في الوسائط التالية : Xp_2, Xp_1 .

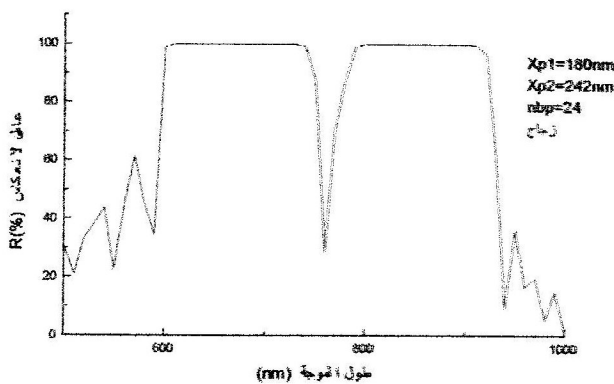
قمنا بتغيير في الوسائط المذكورة للحصول على مرشح يعمل عند أطوال موجات مختلفة وبورود عمودي للضوء. قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية للمرشح الموضح بالشكل III.16.

فحصلنا على ثلاثة نماذج التالية :

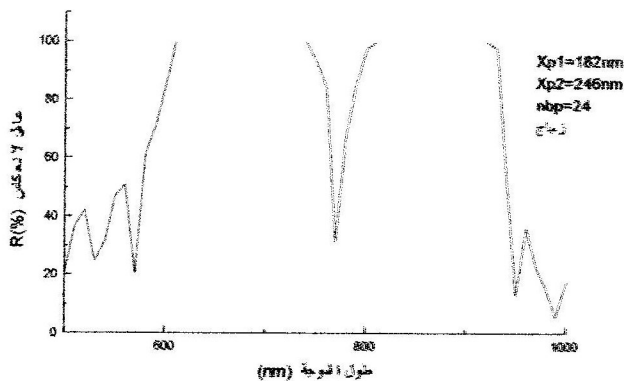
أ- مرشح يعمل عند طول الموجة : $\lambda_0 = 760nm$ ، والمبين على الشكل III.16.أ.

ب- مرشح يعمل عند طول الموجة : $\lambda_0 = 770nm$ ، والمبين على الشكل III.16.ب.

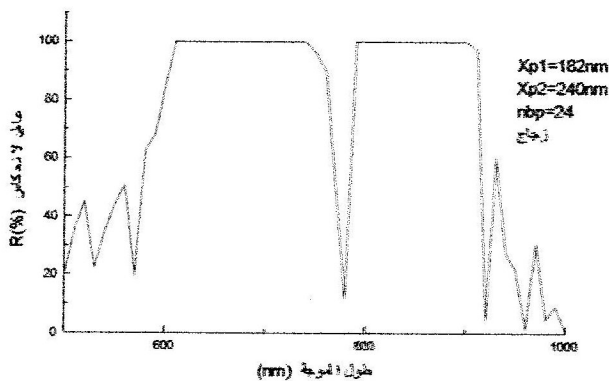
ج- مرشح يعمل عند طول الموجة : $\lambda_0 = 780nm$ ، والمبين على الشكل III.16.ج.



(أ)



(ب)



(ج)

الشكل: 15.III- تأثير تغيير سمك الدورات على عامل انعكاس مرشح متدرج القرينة جيبيًا

(خليط $(\text{SiO}_2\text{-TiO}_2)$)، حيث $f_0 = 100\%$, $ff = 0\%$:

أ- مرشح يعمل عند طول الموجة 760 nm.

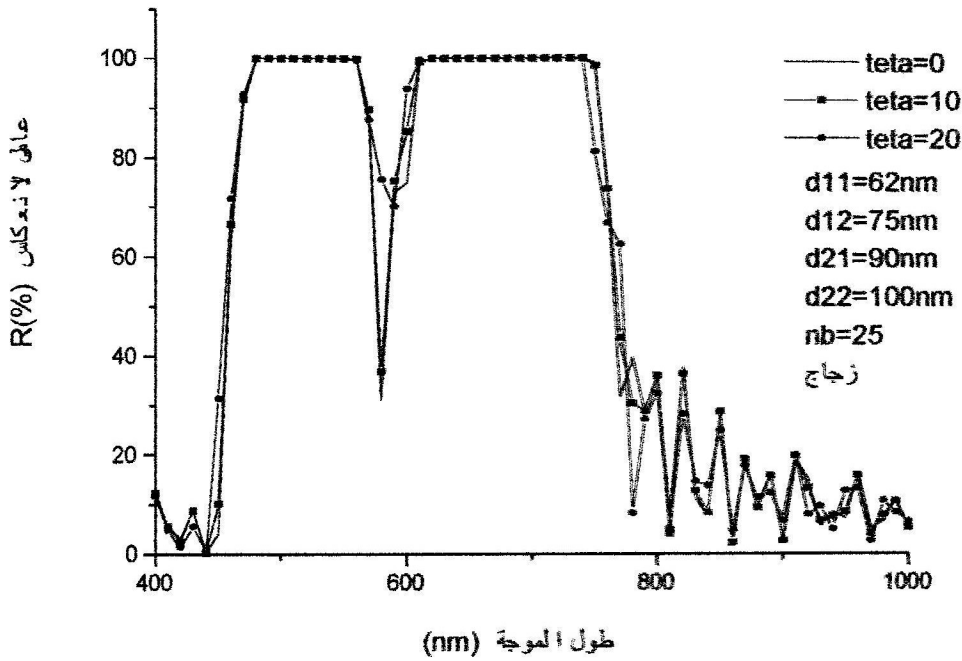
ب- مرشح يعمل عند طول الموجة 770 nm.

ج- مرشح يعمل عند طول الموجة 780 nm.

3.2.III - تأثير زاوية الورود على المرشح :

أ- في حالة المرشح ذو قفز القرينة :

لدينا مرشح يعمل عند $\lambda_0 = 580nm$ في حالة الورود العمودي، نقوم بتشبيه الاستجابة الضوئية لهذا المرشح مع أخذ زوايا ورود مختلفة فنحصل على الشكل 17.III.

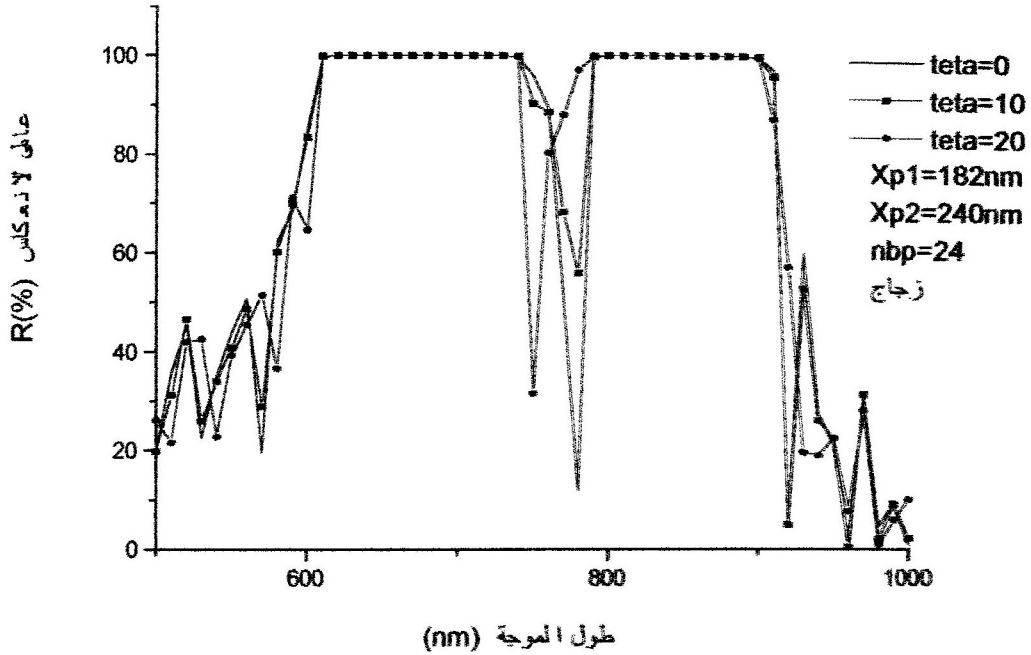


الشكل 17.III - تأثير زاوية الورود لمرشح ذو قفز القرينة (SiO_2/TiO_2) على عامل الانعكاس.

فلاحظ أن المرشح يعمل بشكل عادي وعند $\lambda_0 = 580nm$ لغاية الزاوية 5° ، وعندما تتجاوز زاوية الورود هذه القيمة فإن المرشح لا يعمل عند λ_0 .

ب- في حالة المرشح ذو تدرج القرينة والمتغيرة جيبيًا :

لدينا مرشح (الموضح في 2.2.III) يعمل عند $\lambda_0 = 780nm$ في حالة الورود العمودي، نقوم بتشبيه الاستجابة الضوئية لهذا المرشح مع أخذ زوايا ورود مختلفة فنحصل على الشكل 18.III.



الشكل: 18.III - تأثير زاوية الورود لمرشح متدرج القرينة جيبيًا (خليط $(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)$)

على عامل الانعكاس. حيث $f_0 = 100\%$, $ff = 0\%$.

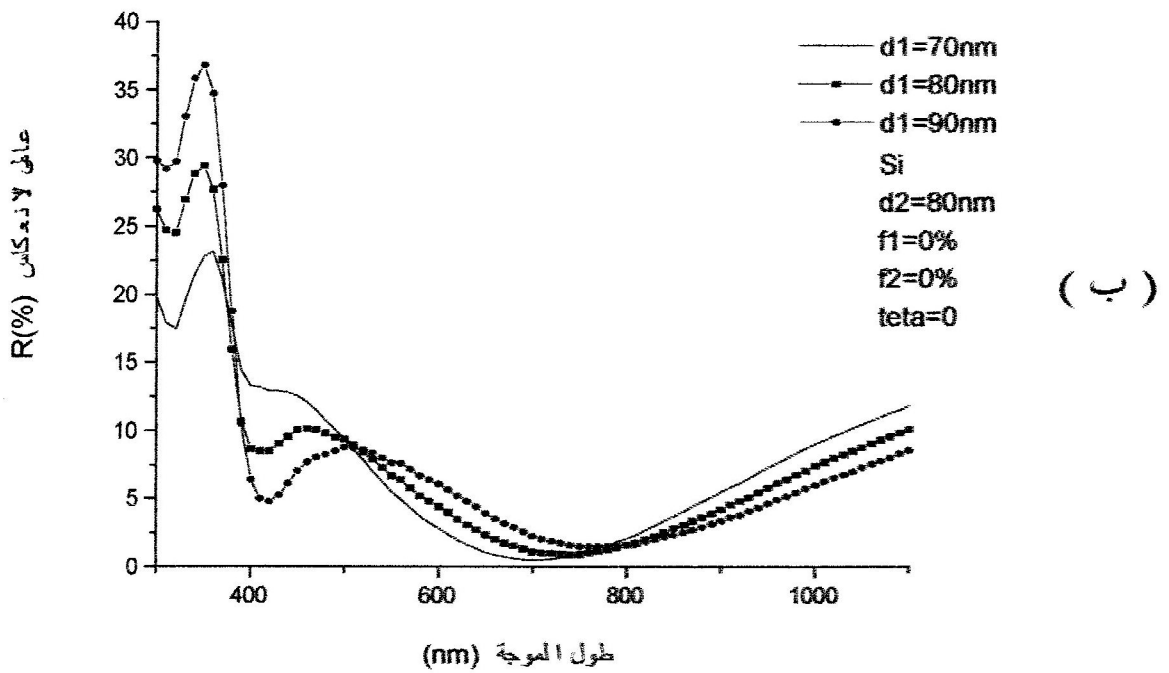
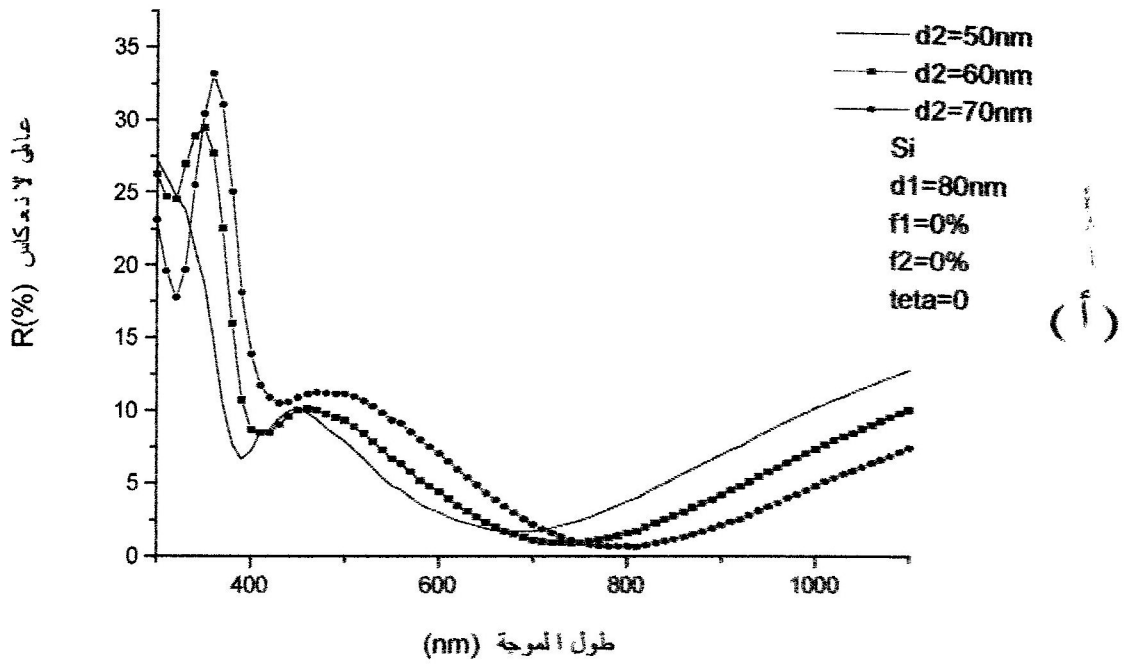
فلاحظ أن المرشح يعمل بشكل عادي وعند $\lambda_0 = 780\text{nm}$ لغاية الزاوية 5° ، وعندما تتجاوز زاوية الورود هذه القيمة فإن المرشح لا يعمل عند λ_0 .

3.III - الأغشية المضادة للانعكاس المكونة من طبقة ثنائية متجانسة ذات قفز القرينة :

على مسند من السيليسيوم فوقه طبقة من مادة TiO_2 سمكها d_2 وفوقها طبقة أخرى من مادة SiO_2 سمكها d_1 ، والهدف من وضع هذه الطبقة الثنائية هو الحصول على غطاء للتقليل من انعكاس الأشعة الشمسية أي جعل المتوسط المرجح لعامل الانعكاس R_w أصغر ما يمكن والمعطى بالعلاقة (22.I). مما يؤدي إلى تولد تيار ضوئي I_{ph} أكبر ما يمكن في الخلية الشمسية حسب العلاقة (23.I). وبهذا نكون قد حسنا من مردود الخلية الشمسية. ونأخذ إذن R_w كمعيار لجودة الغطاء $(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)$.

1.3.III - تأثير تغير سمكي طبقتي المادتين على الغطاء :

في دراستنا هذه اعتبرنا ورود الضوء عموديا ومادتي الغطاء SiO_2 و TiO_2 نقيتين أي خاليتين من الهواء. قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية للغطاء بحيث ثبتنا سمك طبقة TiO_2 (d_2) وغيرنا سمك طبقة SiO_2 (d_1). بعده ثبتنا d_1 وغيرنا d_2 فتحصلنا على البيانات $R(\lambda)$ المبينة على الشكل 19.III.



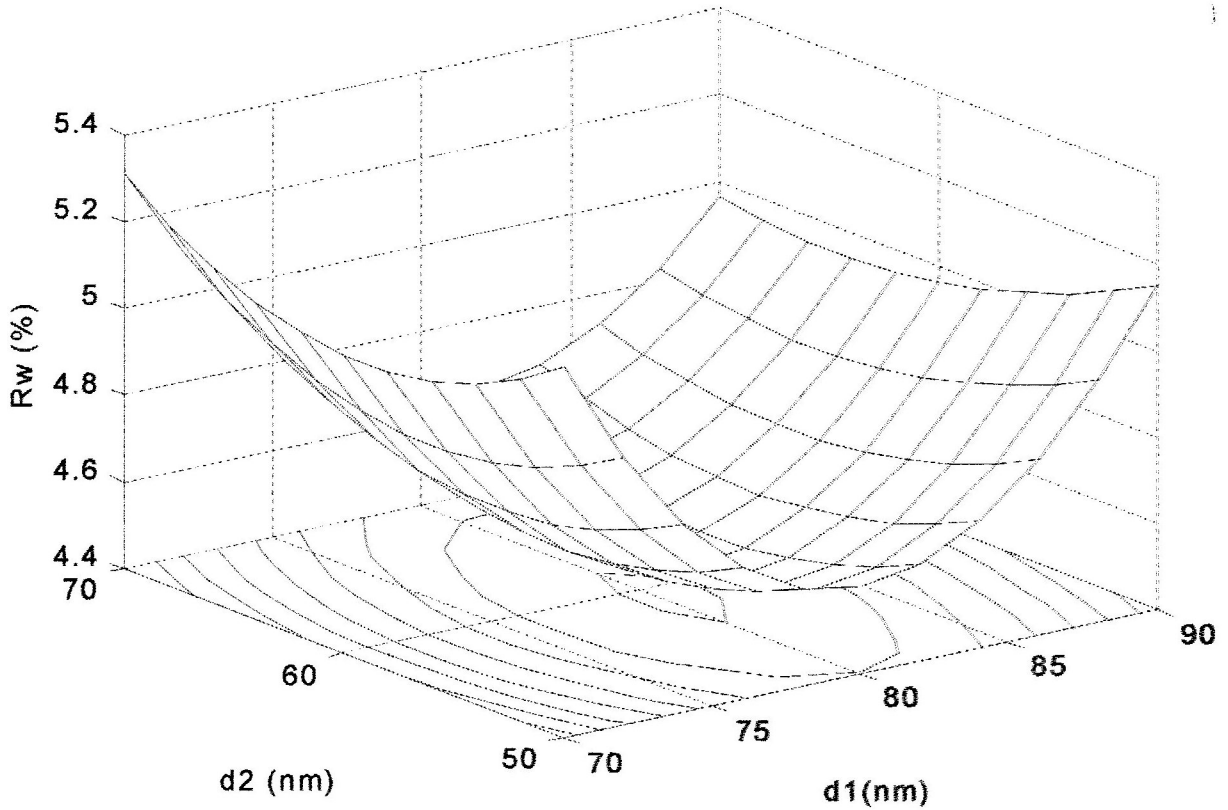
الشكل: 19.III- تأثير تغير سمكي طبقتي الغطاء المضاد للانعكاس ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$) ذو طبقة ثنائية

على عامل الانعكاس R :

أ- تغير سمك طبقة TiO_2 .

ب- تغير سمك طبقة SiO_2 .

وللحصول على أحسن سمكين لـ d_1 و d_2 يجب أن تجري تغيير فيهما معا ولذلك قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية للغطاء وغيرنا فيه السمكين d_1 و d_2 معا وباستعمال الملحق II، فتحصلنا على البيان الثلاثي الأبعاد المعطى بالشكل 20.III.



الشكل 20.III- بيان لاتقاء سمكي أحسن غطاء مضاد للانعكاس ثنائي الطبقة (TiO_2/SiO_2).

وبذلك نصل إلى أحسن نتيجة للسمكين حيث تكون Rw أصغر ما يمكن. ونوضح النتائج في الجدول 3.III التالي :

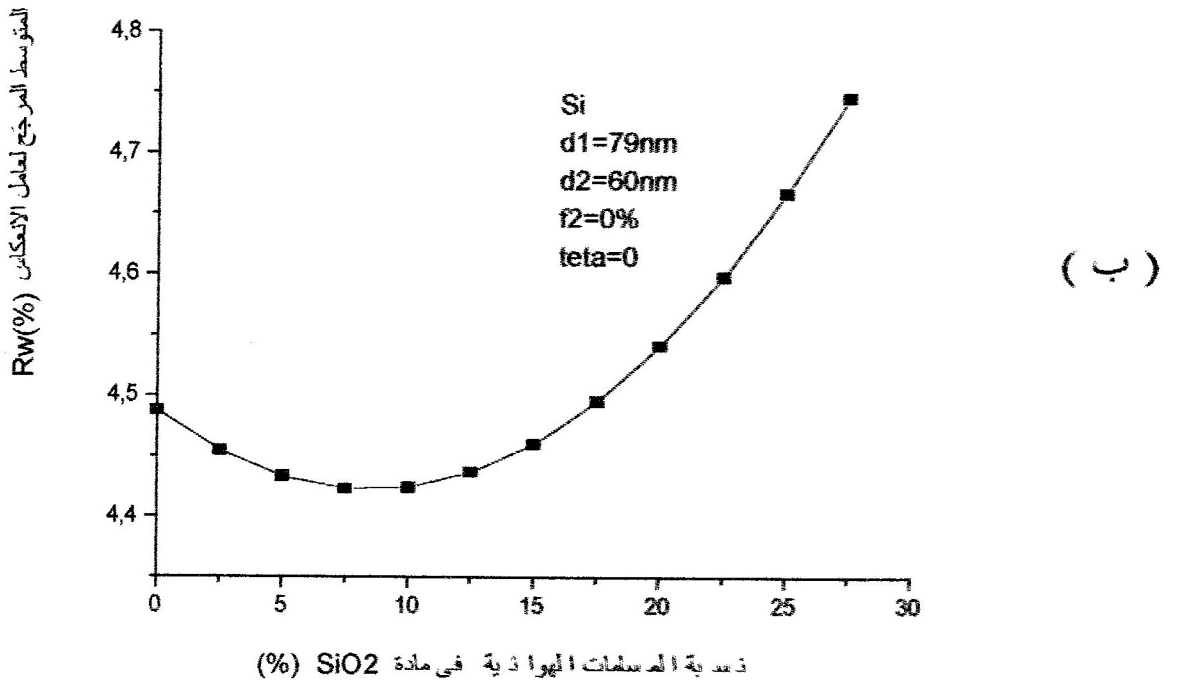
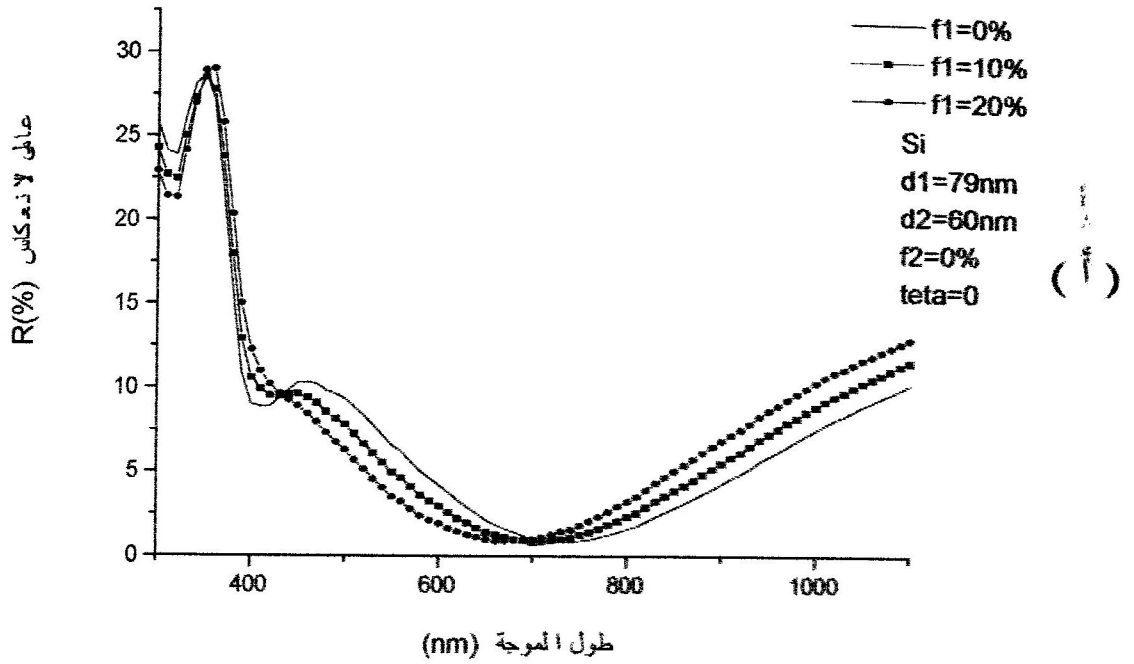
d_1 (nm)	d_2 (nm)	Rw (%)
79	60	4,4876

- الجدول 3.III -

III.2.3- تأثير مسامية المادتين على الغطاء :

قمنا بدراستين لغطاء مضاد للانعكاس ثنائي الطبقة ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$) حيث أخذنا أحسن سمك لطبقة SiO_2 : $d_1 = 79\text{nm}$ وأحسن سمك لطبقة TiO_2 : $d_2 = 60\text{nm}$ واعتبرنا ورود الضوء بشكل عمودي. في دراستنا الأولى اعتبرنا مادة TiO_2 خالية من المسامات الهوائية ($f_2 = 0\%$) وقمنا بعملية تشبيه للاستجابة الضوئية للغطاء وأخذنا نسب مختلفة للمسامات الهوائية (f_1) في مادة SiO_2 فتحصلنا على البيانات $R(\lambda)$ المبينة على الشكل III.21.أ.

بعدها قمنا بعملية تشبيه أخرى للاستجابة الضوئية للغطاء وأخذنا نسب مختلفة من المسامات الهوائية (f_1) في مادة SiO_2 من 0% إلى 30% وباستعمال الملحق II، بعدها رسمنا البيان الذي يمثل تغير Rw مع f_1 والموضح بالشكل III.21.ب.



الشكل: 21.III- تأثير نسب المسامات الهوائية في مادة SiO_2 لغطاء مضاد للانعكاس ذو طبقة ثنائية $(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)$:

أ- على عامل الانعكاس R .

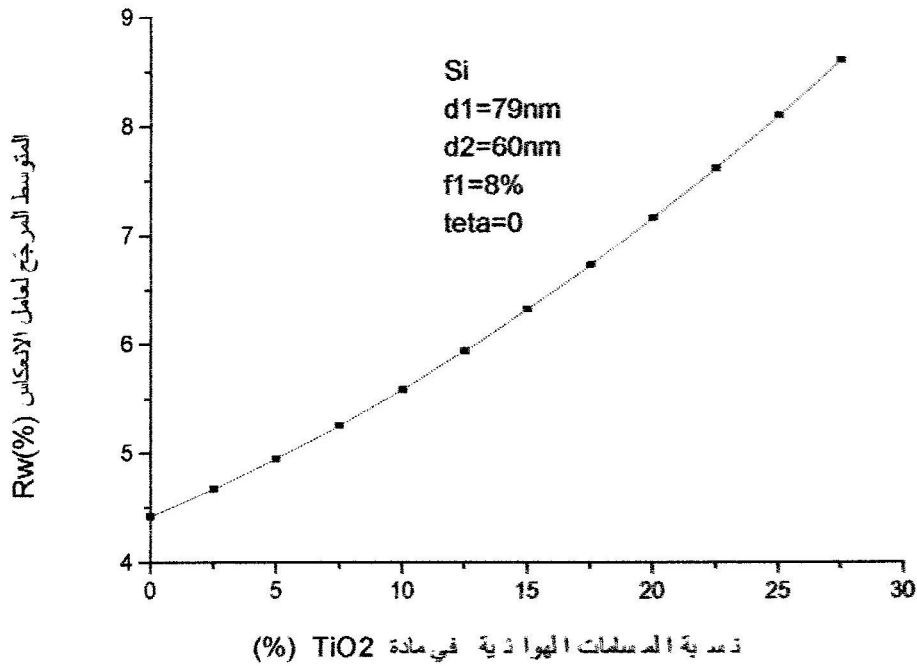
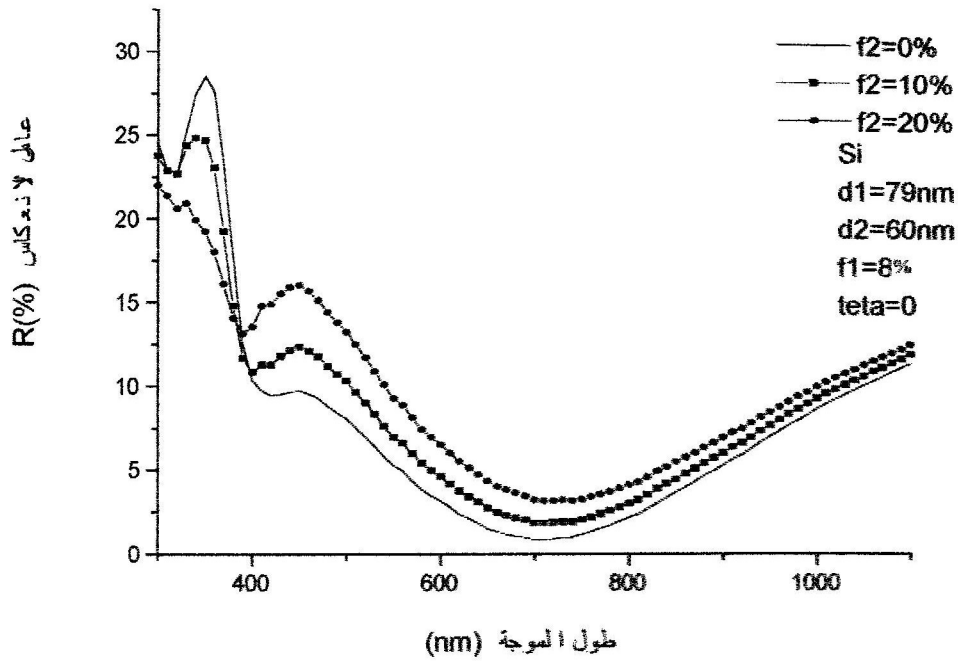
ب- على المتوسط المرجح لعامل الانعكاس Rw

فلاحظ أن قيمة R_w تتناقص إلى أن تصل إلى أدنى قيمة لـ f_1 تكون في المجال (7,5%-10%) ثم تبدأ R_w في التزايد من جديد إلى أكبر نسبة من المسامات الهوائية (30%) وبالتحديد أدنى قيمة لـ R_w تكون عند نسبة المسامات الهوائية في SiO_2 : $f_1 \approx 8\%$.

في دراستنا الثانية قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية للغطاء واعتبرنا أن طبقة مادة SiO_2 تحتوي على نسبة من المسامات الهوائية تقدر بـ $f_1 \approx 8\%$ وأخذنا نسب مختلفة من المسامات الهوائية لـ f_2 في مادة TiO_2 فتحصلنا على البيانات $R(\lambda)$ المبينة على الشكل III.22.أ.

بعدها قمنا بعملية تشبيه أخرى للاستجابة الضوئية للغطاء واعتبرنا طبقة SiO_2 بها 8% من

المسامات الهوائية وأخذنا نسب مختلفة من المسامات الهوائية لـ f_2 في مادة TiO_2 من 0% إلى 30% وباستعمال الملحق II، رسمنا البيان الذي يمثل تغير R_w مع f_2 والمبين بالشكل III.22.ب.



الشكل: 22.III- تأثير نسب المسامات الهوائية في مادة TiO_2 لغطاء مضاد للانعكاس ذو طبقة ثنائية

: (TiO_2/SiO_2)

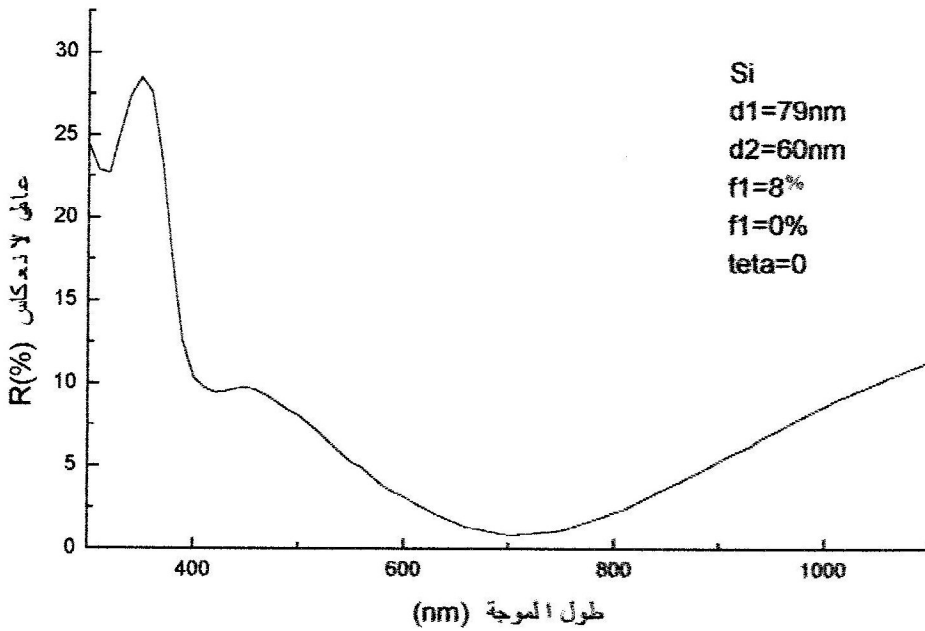
أ- على عامل الانعكاس R .

ب- على المتوسط المرجح لعامل الانعكاس RW

فلاحظ أن قيمة Rw تتزايد بزيادة نسبة المسامات الهوائية في TiO_2 وبالتالي أصغر قيمة لـ Rw هي عندما يكون TiO_2 خالي من المسامات الهوائية أي : $f_2 = 0\%$ وهي أحسن نسبة .
وبهذا نصل إلى أحسن غطاء الذي يحقق أفضل نتيجة والمبينة بالجدول 4.III وبالشكل 23.III.

d_1	$d_2(nm)$	f_1	f_2	$Rw\%$
79	60	%8	%0	%4,4219

الجدول 4.III



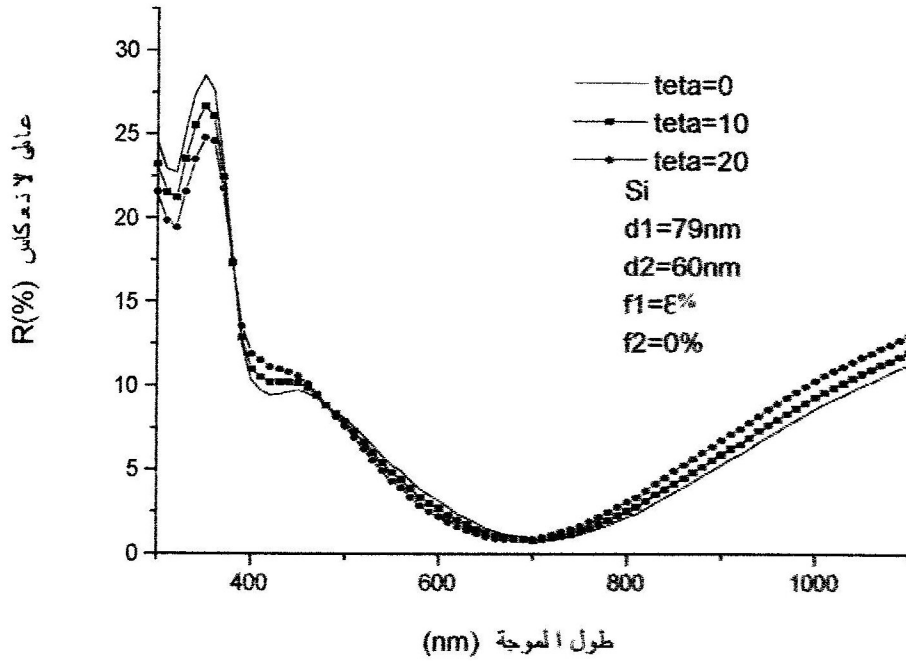
الشكل 23.III- تغيير عامل الانعكاس مع طول الموجة لأحسن غطاء مضاد للانعكاس ذو طبقة ثنائية (TiO_2/SiO_2) .

3.3.III- تأثير زاوية الورود على الغطاء :

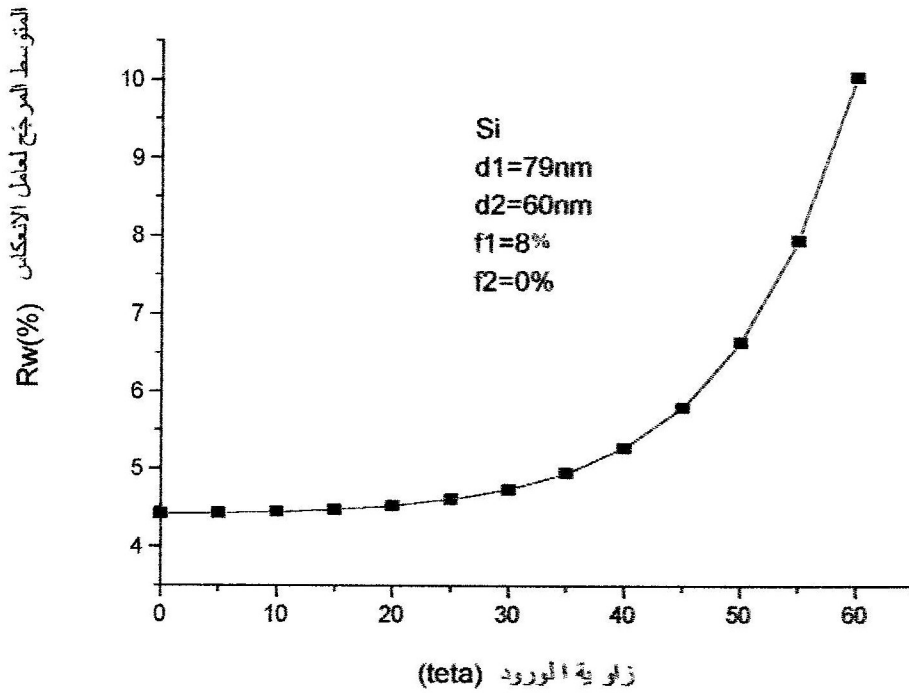
إن أهمية هذه الدراسة تكمن في تغير وضعية الشمس أثناء اليوم وخلال فصول السنة. درسنا غطاء مضاد للانعكاس ثنائي الطبقة (TiO_2/SiO_2) ، سمك طبقة SiO_2 : $d_1 = 79nm$ بما نسبة من المسامات الهوائية $f_1 = 8\%$ وسمك طبقة TiO_2 : $d_2 = 60nm$ هذه الأخيرة خالية من المسامات الهوائية.

قمنا بتشبيه الاستجابة الضوئية للغطاء المعطى مع أخذنا لقيم مختلفة لزواية الورود فتحصلنا على البيانات $R(\lambda)$ المبينة بالشكل III.24.أ.

كذلك قمنا بدراسة عامة حيث قمنا بتشبيه للاستجابة الضوئية للغطاء المعطى مع تغييرنا في قيمة زاوية الورود من 0° إلى 60° وباستعمال الملحق II. رسمنا البيان الذي يمثل تغير R_w مع زاوية الورود θ والمبين بالشكل III.24.ب.



(أ)



(ب)

الشكل: 24.III- تأثير زاوية الورد لغطاء مضاد للانعكاس ذو طبقة ثنائية (TiO₂/SiO₂):

أ- على عامل الانعكاس R.

ب- على المتوسط المرجح لعامل الانعكاس Rw.

نلاحظ عند زيادة θ في المجال ($0^\circ-30^\circ$) فإن قيمة R_w لا تتغير تقريبا.
أما بتزايد θ في المجال ($30^\circ-45^\circ$) يظهر تزايد ضعيف في قيمة R_w أما بعد 45° يكون تزايد R_w محسوس
مع زيادة زاوية الورود θ .

الخاتمة العامة

الخاتمة العامة :

المهدف المحدد لهذا العمل هو تحقيق نماذج نظرية لتشبيه الاستجابة الضوئية للجمل المتعددة الطبقات والتي تطرقنا إلى البعض منها كمرآيا براغ والمرشحات الضوئية ، فالأغطية المضادة للانعكاس باستعمال جمل ذات قفز القرينة أو ذات قرينة متدرجة. وعمليات التشبيه هذه تسمح بالتوصل إلى تجويد إمكانياتها قبل الشروع في إنجازها وهذا له أهمية اقتصادية وتكنولوجية.

استعملنا في دراستنا مادتي SiO_2 و TiO_2 على مسند زجاجي شفاف أو مسند سيليسيوم ممتص. قياسات عامل الانعكاس مسجلة لعينات أنجزت في LEOM بالمدرسة المركزية بليون سمحت لنا بالتحقق من نماذجنا النظرية.

من التحسينات التي تحصلنا عليها بواسطة عمليات التشبيه للاستجابة الضوئية لمختلف الجمل المتعددة الطبقات مع دراسة تأثير الوسائط الخاصة بكل جملة ، نخرج بالنتائج التالية :

1- مرآيا براغ ذات قفز القرينة وبمسندين مختلفين ماص من مادة سيليسيوم وشفاف من مادة الزجاج. توصلنا إلى أفضل النتائج لمرآيا ربع موجة حيث اكتفينا بـ 10 طبقات ثنائية ($\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) وبورود عمودي على المسندين المدروسين يحصل على عامل انعكاس أعظمي أكبر من 99,9% لشريط إيقاف عرضه حوالي 180 nm.

يمكن إزاحة المرآة إلى أطوال موجات أكبر وذلك بإحداث زيادة في سمك طبقاتها. أما بالنسبة لزاوية الورود فليس لها تأثير على خصائص المرآة (أقل من 30°). بينا في هذه الدراسة أنه بالإمكان الحصول على مرآيا ذات نوعية جيدة باستعمال طبقات متدرجة القرينة دوريا.

لمرآيا براغ المتدرجة القرينة جييا ذات مسند من سيليسيوم توصلنا باستعمال مرآة ذات 10 دورات وبورود عمودي للضوء قيمة عامل انعكاس أعظمي أكبر من 99,3% على عرض شريط إيقاف 150 nm.

أحرينا تحسينا للمرآة المتدرجة حيث استعملنا بدل الدالة الجيبيية دالة أخرى أسية جيبيية . نحسب النتائج حيث تحصلنا على عامل انعكاس أعظمي أكبر من 99,8% لعرض إيقاف 170 nm. هذا النوع من المرآيا أفضل من ذات قفز القرينة لأن عملية الترسيب تتم على مرحلة واحدة حيث نتفادي الأسطح الفاصلة.

2- يمكن الحصول على مرشحات ضوئية عند طول موجة معينة باستعمال طبقات ذات قفز القرينة أو متدرجة القرينة بنوعية جيدة . تأثير زاوية الورود يظهر عندما تزيد هذه الأخيرة عن 5° .

3- في الغطاء المضاد للانعكاس ذو طبقة ثنائية : أفضل النتائج المحصل عليها للخلية حيث المتوسط المرجح لعامل الانعكاس تقلص إلى $4,43\%$ في حالة الورود العمودي وسمك طبقة SiO_2 هو 80 nm بما نسبة 8% من المسامات وسمك طبقة TiO_2 الخالية من المسامات هو 60 nm . أما في حالة الورود المائل فإنه لا يكون هناك تأثير كبير على عمل الخلية حيث قدر المتوسط المرجح لعامل الانعكاس بـ $6,62\%$ عند الزاوية 50° .

سمحت لنا النماذج باستعمال طرق رياضية بسيطة للدراسة جمل متعددة الطبقات معقدة تستعمل في الإلكترونيات الضوئية وتوصلنا إلى تجويد تصميماتها .

الملاحق

ملحق I

طول الموجة λ (nm)	السليسيوم Si		الزجاج	أكسيد التيتانيوم TiO_2		أكسيد للسليسيوم SiO_2
	n	k	n	n	k	n
300	5.0000	4.1780	1.5437	2.8458	0.9245	1.4588
310	5.0120	3.5600	1.5412	2.9268	0.7110	1.4555
320	5.0400	3.3130	1.5391	2.9323	0.5534	1.4521
330	5.1150	3.1180	1.5373	2.8696	0.3412	1.4495
340	5.2420	3.0120	1.5356	2.7800	0.2143	1.4481
350	5.4640	3.0120	1.5342	2.7165	0.1388	1.4467
360	6.1960	2.8180	1.5328	2.6489	0.0937	1.4453
370	6.7650	1.9870	1.5315	2.5815	0.0662	1.4440
380	6.5440	1.0330	1.5303	2.5171	0.0491	1.4429
390	5.9420	0.5740	1.5292	2.4354	0.0375	1.4417
400	5.5413	0.3824	1.5281	2.3769	0.0293	1.4407
410	5.3021	0.2986	1.5270	2.3238	0.0229	1.4396
420	5.1024	0.2390	1.5259	2.3152	0.0176	1.4387
430	4.9346	0.1959	1.5248	2.2801	0.0131	1.4379
440	4.7932	0.1640	1.5238	2.2505	0.0092	1.4370
450	4.6732	0.1398	1.5227	2.2261	0.0059	1.4363
460	4.5708	0.1210	1.5217	2.2151	0.0031	1.4355
470	4.4830	0.1058	1.5206	2.2081	0.0007	1.4348
480	4.4073	0.0933	1.5195	2.2043	0	1.4342
490	4.3415	0.0828	1.5185	2.1943	0	1.4336
500	4.2839	0.0737	1.5174	2.1776	0	1.4331
510	4.2333	0.0657	1.5164	2.1718	0	1.4326
520	4.1884	0.0587	1.5153	2.1674	0	1.4321
530	4.1483	0.0525	1.5143	2.1641	0	1.4316
540	4.1123	0.0469	1.5132	2.1614	0	1.4311
550	4.0797	0.0420	1.5122	2.1613	0	1.4307
560	4.0500	0.0376	1.5111	2.1397	0	1.4303
570	4.0228	0.0337	1.5100	2.1380	0	1.4299
580	3.9977	0.0303	1.5090	2.1363	0	1.4295
590	3.9744	0.0273	1.5079	2.1254	0	1.4292
600	3.9527	0.0247	1.5069	2.1107	0	1.4288
610	3.9323	0.0224	1.5059	2.1065	0	1.4285
620	3.9132	0.0204	1.5048	2.1029	0	1.4283
630	3.8951	0.0187	1.5038	2.0974	0	1.4280
640	3.8779	0.0172	1.5028	2.0928	0	1.4277
650	3.8616	0.0160	1.5018	2.0957	0	1.4274
660	3.8460	0.0149	1.5008	2.0927	0	1.4272
670	3.8311	0.0140	1.4998	2.0866	0	1.4269

680	3.8169	0.0133	1.4988	2.0820	0	1.4267
690	3.8032	0.0126	1.4978	2.0808	0	1.4264
700	3.7901	0.0120	1.4968	2.0869	0	1.4262
710	3.7775	0.0115	1.4958	2.0799	0	1.4260
720	3.7653	0.0111	1.4948	2.0725	0	1.4258
730	3.7536	0.0107	1.4939	2.0648	0	1.4256
740	3.7423	0.0103	1.4929	2.0658	0	1.4254
750	3.7314	0.0099	1.4920	2.0583	0	1.4252
760	3.7210	0.0095	1.4911	2.0488	0	1.4250
770	3.7108	0.0092	1.4901	2.0400	0	1.4248
780	3.7011	0.0088	1.4892	2.0310	0	1.4246
790	3.6917	0.0084	1.4883	2.0219	0	1.4244
800	3.6827	0.0080	1.4874	2.0127	0	1.4242
810	3.6739	0.0076	1.4865	2.0123	0	1.4241
820	3.6655	0.0072	1.4856	1.9939	0	1.4239
830	3.6574	0.0067	1.4848	1.9754	0	1.4237
840	3.6497	0.0063	1.4839	1.9659	0	1.4236
850	3.6422	0.0058	1.4831	1.9564	0	1.4235
860	3.6350	0.0053	1.4822	1.9470	0	1.4233
870	3.6281	0.0048	1.4814	1.9376	0	1.4232
880	3.6215	0.0042	1.4806	1.9283	0	1.4230
890	3.6151	0.0037	1.4797	1.9191	0	1.4229
900	3.6090	0.0032	1.4789	1.9100	0	1.4227
910	3.6032	0.0026	1.4781	1.9010	0	1.4226
920	3.5977	0.0021	1.4773	1.9012	0	1.4225
930	3.5923	0.0015	1.4766	1.8925	0	1.4223
940	3.5873	0.0010	1.4758	1.8750	0	1.4222
950	3.5824	0.0005	1.4750	1.8667	0	1.4220
960	3.5778	0	1.4743	1.8586	0	1.4219
970	3.5735	0	1.4735	1.8507	0	1.4218
980	3.5693	0	1.4728	1.8429	0	1.4216
990	3.5654	0	1.4720	1.8355	0	1.4215
1000	3.5617	0	1.4713	1.8283	0	1.4214
1010	3.5582	0	1.4706	1.8212	0	1.4213
1020	3.5549	0	1.4699	1.8209	0	1.4211
1030	3.5518	0	1.4692	1.8205	0	1.4210
1040	3.5489	0	1.4685	1.8202	0	1.4209
1050	3.5462	0	1.4678	1.8198	0	1.4208
1060	3.5436	0	1.4671	1.8194	0	1.4207
1070	3.5413	0	1.4664	1.8191	0	1.4205
1080	3.5391	0	1.4658	1.8187	0	1.4204
1090	3.5371	0	1.4651	1.8184	0	1.4203
1100	3.5353	0	1.4645	1.8180	0	1.4202

ملحق II

طول الموجة (nm)	S(mA/w) Si	Phi ($w/m^2 \cdot nm$)
300	90	0
310	96	1.2000
320	102	7.7000
330	109	16.4000
340	116	24.1000
350	124	33.6000
360	132	42.5000
370	141	51.7000
380	150	57.4000
390	160	72.0000
400	175	85.8000
410	190	150.0000
420	205	170.0000
430	220	193.0000
440	235	228.0000
450	250	280.0000
460	260	307.0000
470	280	337.0000
480	300	354.0000
490	320	387.0000
500	340	422.0000
510	350	428.0000
520	360	448.0000
530	370	481.0000
540	380	485.0000
550	390	494.0000
560	390	501.0000
570	400	514.0000
580	410	525.0000
590	420	530.0000
600	430	543.0000
610	435	548.0000
620	440	550.0000
630	445	552.0000
640	450	558.0000
650	455	546.0000
660	460	552.0000
670	470	572.0000
680	475	572.0000
690	480	573.0000
700	490	581.0000

710	495	579.0000
720	500	575.0000
730	505	572.0000
740	510	539.0000
750	520	468.0000
760	525	415.0000
770	530	549.0000
780	535	545.0000
790	540	542.0000
800	550	549.0000
810	555	507.0000
820	560	514.0000
830	565	522.0000
840	570	388.0000
850	575	363.0000
860	580	497.0000
870	585	493.0000
880	587	486.0000
890	589	479.0000
900	590	477.0000
910	590	467.0000
920	585	280.0000
930	575	94.1000
940	565	141.0000
950	560	130.0000
960	550	147.0000
970	540	219.0000
980	525	269.0000
990	505	256.0000
1000	480	273.0000
1010	450	259.0000
1020	385	226.0000
1030	340	194.0000
1040	295	165.0000
1050	250	136.0000
1060	205	107.0000
1070	160	80.0000
1080	115	55.9000
1090	70	31.2000
1100	20	8.8000

المراجع

المراجع

- [1] A.S. CALLARD, «Elaboration et caractérisation de couches diélectriques pour l'optique», Thèse, Ecole centrale de Lyon, 1996.
- [2] D.BHATTACHARYYA, N.R. SAHOO, S.THAKUR, N.C.DAS, «Spectroscopic ellipsometry of multilayer dielectric coatings», Vacuum N° 60, PP 419-424, 2001.
- [3] B. GALLAS, S.FISSON, A.BRUNET-BRUNEAU, G.VUYE, J.RIVORY, «Ellipsometric investigation of the Si/SiO₂ interface formation for application to highly reflective dielectric mirrors», Thin solid films N° 377-378, PP 62-67, 2000.
- [4] C.MARTINET, V.PAILLARD, A.GAGNAIRE, J.JOSEPH, «Deposition of SiO₂ and TiO₂ thin films by plasma enhanced chemical vapor desposition for antireflection coating.», Journal of non-crystalline solide, N° 216, PP 77-82, 1997.
- [5] S.RABASTE, J.BELLESA, A.BRIOUDE, C.BOVIER, J.C.PLENET, R.BRENIER, O.MARTY, J.MUGNIER, J.DUMAS, «Sol-gel fabrication of thick multilayers applied to Bragg reflectors and microcavities », Thin solid films, N° 416, PP 242-247, 2002.
- [6] S.SETZU, « Réalisation et étude de structure à modélisation d'indice optique en silicium poreux », Thèse , Université Joseph Fourier, 1999.
- [7] V.GOTTSCHALCH, R.SCHMIDT, B.RHEINLANDER, D.PUDIS, S.HARDT, J.KVIENTKOVA, G.WAGNER, R.FRANZHELD, «Plasma-enhanced chemical vapor deposition of SiO_x/SiN_x Bragg reflectors», Thin solid films, N° 416, PP 224-232, 2002.
- [8] W.HEISS, T.SCHWARZL, J.ROITHER, G.SPRINGHOLZ, M.AIGLE, H.PASCHER, K.BIERMANN, K.REIMANN, «Epitaxial Bragg mirrors for the mid-interfared and their applications», Progress in quantum electronics, N° 25, PP 193-228, 2001.
- [9] M.F.OUELLETTE, R.V.LANG, K.L.YAN, R.W.BERTRAM, R.S.OWLES, D.VINCENT, «Experimental studies of inhomogenous coatings for optical applications», J.Vac.Sci.technol.A, Vol 9, N°3, PP 1188-1192,1990
- [10] L.SWART, P.V.BULMIN, M.LACQUET, «Rugate filter manufacturing by electron cyclotron resonance plasma-enhanced chemical vapor deposition of SiN_x » Optical ingeneering ,Vol 36, N° 4,PP 1219-1214, 1997.
- [11] Rapport interne LEOM école centrale de Lyon du 11/09/99.
- [12] B.MASENELLI, A.GAGNAIRE, L.BERTHELOT, J.TARDY, J.JOSEPH, «Controlled spontaneous emission of a tri (8-hydroxyquinoline) aluminum layer in a micro cavity» Journal of applied physics, Vol 85, N°6, PP 3032-3037, 1999.

- [13] D. AMANS, «Micro sources photoniques à base de monocristaux de silicium », Thèse, Ecole centrale de Lyon, 2002.
- [14] Q. ZHANG, J. SHEN, J. WANG, G. WU, L. CHEN, «Sol-gel derived ZrO₂-SiO₂ highly reflective coatings», International journal of inorganic materials, N°2, PP 319-323, 2000.
- [15] J.L. SHEN, C.Y. CHANG, H.C. LIU, W.C. CHOU, Y.F. CHEN, T. JUNG, M.C. WU, «Reflectivity and photoluminescence studies in Bragg reflectors with absorbing layers», Semicond. Sci. Technol, N° 16, PP 548-552, 2001.
- [16] S. CALLARD, A. GAGNAIRE, M.P. BESLAND, J. JOSEPH, «Adapted wavelength methods for in situ ellipsometry», Thin solid films, N° 313-314, PP 479-483, 1998.
- [17] T.C. LU, J.Y. TSAI, J.T. CHU, Y.S. CHANG, S.C. WANG, «InP/InGa AlAs distributed Bragg reflectors grown by low pressure metal organic chemical vapor deposition », Journal of crystal growth, N°1, PP 1-8, 2002.
- [18] D. RATS, D. POITRAS, J.M. SORD, L. MARTINU, J. VON STEBUT, «Mechanical properties of plasma-deposited silicon-based inhomogeneous optical coatings», Surface and coatings technology, N° 111, PP 220-228, 1999.
- [19] M.A. GREEN, «Photovoltaic: technology overview», Energy policy, Vol 28, PP 989-998, 2000.
- [20] D. J. AIKEN, «High performance anti-reflexion coating for broad band multijunction solar cells», Vol N° 64, PP 393-404, 26 February 2000.
- [21] K. CHOPRA, «Solar selective coatings», 3rd workshop on thin films physics and technology», PP 306-311, 1999.
- [22] A. MAHJOUR et L. ZIGHED, «Modélisation du comportement optique des couches diélectriques à gradient d'indice application aux RAR», EBIC 05 Hammamet, 11-15 Août, Tunisie 2003.
- [23] G. ARMIN, A. BIRLE, «Limiting loss mechanisms in 23% efficient silicon solar cells», J. App. phy, PP 3491-3503, 1995.
- [24] A. MUSSET, A. THELEN, «Progress in optics». Vol VIII, Ed Wolf, 1970.
- [25] S. WINDERBAUM, F. YAN, O. REINHOLD, «Application of plasma enhanced chemical vapor deposition silicon nitride as a double layer for polysilicon solar cells», J. Vac. Sci. Technol. A, Vol 15, N°3, 1997.
- [26] P. NOSTELL, A. ROSS, B. KARLSSON, «Optical and mechanical properties of sol-gel antireflective films for solar energy applications», Thin solid films, N° 351, 1999.

- [27] Z.N.ADAMIAN, A.P.HAKHO YAN, V.M.AROUTIOUNIAN, R.S.BARSEGHIAN, «Investigations of solar cells with porous Silicon as antireflection layer», Solar energy materials and solar cells, N° 64, PP 347-351, 2000.
- [28] S.STREHIKE, S.BASTIDE, J.GUILLET, C.LEVY-CEELEMENT, «Design of porous Silicon antireflection coatings for Silicon solar cells», Materials science and engineering's, Voll N° 69, PP 81-86, 2000.
- [29] M.ORGERET, «Les piles solaires: le composant et ses applications», Ed Masson, 1985.
- [30] A.LAUGIER, «Matériaux pour la conversion photovoltaïques », Institut national des sciences appliquées de Lyon, 1983.
- [31] A.RICAUD, « Photopiles solaires », Presse polytechnique et universitaires Romandes, 1997.
- [32] A.GAGNAIRE, « Etude ellipsométrique de l'interface semi-conducteur-électrolyte. application à l'InP », Thèse, Université Claud Bernard. Lyon I, 1986.
- [33] J.P.FAROUX, J.RENAULT, « *Électromagnétismes 2- équations de Maxwell et phénomènes d'induction* », Ed Dunod, Paris, 1998.
- [34] E.ROSENCHER, B.VINTER, «Optoélectronique», Ed Masson, 1998.
- [35] P.ROSNET, « *Eléments de propagations électromagnétique- des fondements théoriques aux applications* », Ed Ellipses, Paris, 2002.
- [36] A.F.BENHABIB, A.HADJADJ, «*Optique physique*», Tome 2, OPU, 1993.
- [37] E.HECHT, «Optique: Cours et problèmes», Série Schaum, 1980.
- [38] H.MATHIEU, «Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques», 4 édition, Masson, 1998.
- [39] S.STREHIKE, S.BASTIDE, C.LEVY-CLEMENT, «Optimization of porous Silicon reflectance for Silicon photovoltaic cells», Solar Energy Materials and solar cells, N° 58, PP 399-409, 1999.
- [40] L.GAO, J.Z.GU, «component material with shape -Effective dielectric constant of two buttiiondistri», J.phy.D, N°35, PP 267-271, 2002.
- [41] R.W.MARTIN, T.KIM, D.BURNS, I.M.WATSON, M.D.DAWSON, T.F.KRAUSS, J.H.MARSH, R.M.DE LA RUE, S.ROMANI, H.KHEYRANDISH, «Dielectric Bragg mirrors for InGaN surface-Emitting Lasers», Phys.Stat.Sol(a), N°176, PP 67-71, 1999.

ملخص :

الجميل المتعددة الطبقات العازلة لها أهمية كبيرة في تطبيقات الإلكترونيات الضوئية، حيث تطرقنا إلى البعض منها كمرايا براغ والمرشحات الضوئية والأغطية المضادة للانعكاس باستعمال مادتي أكسيد السيليسيوم SiO_2 وأكسيد التيتانيوم TiO_2 على مساند من سيليسيوم Si وزجاج.

الهدف المحدد لهذا العمل هو تحقيق نماذج نظرية لتشبيه الاستجابة الضوئية للجميل المدروسة والتي تسمح بالتوصل إلى تجويد إمكاناتها قبل الشروع في إنجازها.

النماذج تتركز على نظرية الأوساط المتعددة الطبقات التي تسمح بحساب عامل الانعكاس من أجل مختلف الجمل المتعددة الطبقات العازلة.

بالإضافة إلى توصلنا لطبقات متدرجة القرينة التي يمكنها تعويض النظم الكلاسيكية ذات قفز القرينة بالتنوع نفسها تفاديا للأسطح الفاصلة وترسيبها يتم على مرحلة واحدة.

وقد سمحت لنا النماذج باستعمال طرق رياضية بسيطة بدراسة جمل متعددة الطبقات معقدة باستعمالات الإلكترونيات الضوئية وتوصلنا إلى تحسين نوعيتها.

الكلمات المفتاحية :

مراة براغ - المرشح - الغطاء المضاد للانعكاس - قفز القرينة - متدرج القرينة.