

HIAST
Communication
Department

الجمهورية العربية السورية
المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
قسم الفيزياء
العام الدراسي 2019/2018

رسالة ماجستير

أعد لنيل درجة الماجستير في علوم وهندسة البصريات

تصنيع ودراسة مرشد موجة مستوي واختباره وتوصيفه

تقديم

إباء خلوف

إشراف

د. شكري المقداد د. عقيل سلوم

إهداء

إلى حماة الوطن الذين يرسخون إيماننا بأن المستحيل لا ينتمي إلى القاموس السوري، رجال الجيش العربي السوري.
إلى من كانوا الدعم والقوة، عائلتي.
إلى أصدقائي.

لا أحد منا يمكن أن يحقق النجاح بأن يعمل لوحده.

نيلسون مانديلا

كلمة شكر

أقدم بالشكر إلى المشرفين على هذا العمل رئيس قسم الاتصالات الدكتور شكري المقداد ورئيس قسم الفيزياء الدكتور عقيل سلوم على ما قدماه لي من وقت وجهد وتوجيهات طيلة فترة المشروع.

كما أتوجه بالشكر إلى كل من قدم المساعدة في هذا العمل وخصوصاً د. خالد ميا، د. رضوان اللحام و د. يوسف الخطيب.

الخلاصة

تم في هذا المشروع تصنيع مرشد موجة مستوي ودراسة خصائصه أي رسم منحنى قرينة الانكسار اعتماداً على طريقة W.K.B المعاكسة.

استخدمنا طريقتين لتصنيع مرشحات الموجة المستوية:

١- اعتمدنا بشكل أساسي طريقة التبادل الأيوني في الزجاج لتصنيع مرشحات الموجة المستوية والتي تُعطي مرشداً له قرينة انكسار متدرجة (graded index waveguide)، تمكنا من تصنيع مرشد موجة باستخدام شاردة الفضة Ag^+ ، شاردة البوتاسيوم K^+ وشاردة الليثيوم Li^+ . تُظهر النتائج أنه من السهولة الحصول على مرشد وحيد النمط باستخدام شاردة البوتاسيوم وبالتالي تكون مفيدة في التطبيقات التي تحتاج مرشد موجة وحيد النمط، أمّا شاردة الفضة فإنها تُعطي تغيرات كبيرة في قرينة الانكسار خلال زمن قصير (١٠-٣٠ دقيقة). بالنسبة إلى شاردة الليثيوم، تمكنا للمرة الأولى من صنع مرشد موجة على زجاج BK7 وإيجاد الشروط المناسبة لذلك.

٢- تم تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام مادة PMMA على شرائح من زجاج الكوارتز وزجاج BK7، حيث نحصل على مرشحات ذات قرينة انكسار قفزة (step index) وقد جرت دراسة شروط الحصول عليه وخصائصه.

الكلمات المفتاحية: مرشد الموجة المستوي، التبادل الأيوني، الربط الموشوري، خطوط m-lines.

Abstract

This project aims to fabricate and characterize planar waveguide.

Two techniques were used:

1- Graded index planar waveguides were fabricated by ion-exchange technique, and the characterization of the fabricated waveguides were done. i.e. determination of the refractive index profile in graded index waveguide. The refractive index profiles are determined by the inverse Wentzel-Kramers-Brillouin (IWKB) method. Ion-exchanged occurs between Na^+ ions from the glass and Ag^+ , K^+ and Li^+ ions from molten salts. The K^+-Na^+ exchange takes a few hours to form single mode waveguide which is attractive for

applications where high accuracy is important, The ion Ag^+ gives large changes of refractive index in short time (10–30 min). For ions Li^+ , planar waveguides were fabricated on BK7 glass.

2– Step index waveguides were fabricated by using PMMA material on glass BK7 and quartz. Characterisation of these waveguides were made and results are presented.

Key words: planar waveguide, graded–index, step–index, ion–exchange, prism coupling and m–lines method.

المحتويات

٧	قائمة الأشكال.....
VIII	قائمة الجداول
IX	الاختصارات
X	مقدمة عامة
١	الفصل الأول: الأسس النظرية لمرشد الموجة المستوي
١	1.1- تعريف مرشد الموجة المستوي
١	2.1- انتشار الموجة الضوئية داخل المرشد.....
٥	3.1- تصنيف مرشحات الموجة المستوية اعتماداً على قرينة الانكسار
٦	4.1- طرق تصنيع مرشد الموجة المستوي
٨	5.1- قياس معاملات المرشد.....
١٨	6.1- لمحة عن الأعمال السابقة
٢٢	الفصل الثاني: الأدوات والمواد والأجهزة المستخدمة وطرق التحضير
٢٢	1.2- المواد الكيميائية والأجهزة المستخدمة في عملية التبادل الأيوني
٢٣	2.2- شرائح الزجاج
٢٤	3.2- تجربة الربط الموشوري.....
٢٦	4.2- مادة PMMA
٢٧	5.2- تصنيع مرشد موجة مستوي بطريق التبادل الأيوني
٢٧	6.2- تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام مادة PMMA
٣٠	الفصل الثالث: النتائج والمناقشة
٣٠	1.3- نتائج تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام شاردة Ag^+
٣١	2.3- نتائج تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام شاردة K^+
٣٤	3.3- نتائج تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام شاردة Li^+
٣٦	4.3- توصيف المرشد المصنع بطريقة التبادل الأيوني
٤١	5.3- نتائج تصنيع مرشد باستخدام مادة PMMA

٤٥	6.3- تصنيع مجمع/مقسم الإشارة (y-junction)
٤٩	الخاتمة
٥٠	الآفاق المستقبلية
٥١	الملاحق
٥٢	الملحق آ- برنامج الماتلاب لرسم منحنى قرينة الانكسار
٥٤	الملحق ب- مخطط تصنيع Y-junction
٥٥	المراجع

قائمة الأشكال

- الشكل ١: مخطط جايرو الألياف الضوئية^[1]..... X
- الشكل ٢: مقسم إشارة (Y-junction)..... Xi
- الشكل ٣: انتشار موجة ضوئية داخل مرشد موجة مستوي ١
- الشكل ٤: انتشار موجة ضوئية داخل مرشد موجة مستوي-٢ ٢
- الشكل 5 : step-index planar waveguide ٥
- الشكل 6 : graded index waveguide ٦
- الشكل ٧: التبادل الأيوني في الزجاج^[4]..... ٧
- الشكل ٨: مخطط توصيف مرشد موجة له قرينة انكسار متدرجة ١٠
- الشكل ٩: مبدأ تجربة الربط الموشوري^[7]..... ١٠
- الشكل ١٠: خطوط m-lines^[3]..... ١١
- الشكل ١١: خطوط m-lines العاتمة لمرشد موجة مستوي ١٢
- الشكل ١٢: خطوط m-lines المضيئة لمرشد موجة مستوي ١٢
- الشكل ١٣: طريقة قياس زاوية النمط الأول اعتماداً على خطوط m-lines العاتمة ١٣
- الشكل ١٤: طريقة قياس زوايا الأنماط اعتماداً على خطوط m-lines المضيئة: (a) النمط الأول مُضاء، (b) النمط الثاني مُضاء ١٤
- الشكل ١٥: مسار شعاع ضوئي يدخل إلى الموشور ثم إلى مرشد الموجة المستوي^[7]..... ١٤
- الشكل ١٦: الحالة الأولى لورود شعاع على الموشور ١٥
- الشكل ١٧: الحالة الثانية لورود شعاع على الموشور ١٥
- الشكل ١٩: نتائج تصنيع مرشد موجة باستخدام شاردة الفضة عند درجة حرارة 382°C بنسب مولية مختلفة، نوع الزجاج (a) soda-lime (b) BK7^[11]..... ٢٠
- الشكل ١٩: الربط الموشوري ٢٥
- الشكل ٢٠: منصة قياس زوايا الأنماط ٢٦
- الشكل ٢١: تشكيل طبقة من مادة PMMA على شريحة من زجاج الكوارتز ٢٨
- الشكل ٢٢: خط m-lines لمرشد موجة المُصنع باستخدام شاردة البوتاسيوم (وقت التبادل: 210 دقيقة، درجة الحرارة: 380 درجة مئوية) ٣٢

- الشكل ٢٣: خط m-lines لمرشد موجة المُصنع باستخدام شاردة البوتاسيوم (وقت التبادل: ٤٢٠ دقيقة، درجة الحرارة: 380°C) ٣٣
- الشكل ٢٤: سطح عينة زجاج بعد إجراء تبادل أيوني مع شاردة الليثيوم ٣٤
- الشكل ٢٥: خط m-lines لمرشد تم تصنيعه بشارد الليثيوم (65%، 500°C، 2 min)، (a) m-lines المضئية، (b) m-lines العاتمة ٣٥
- الشكل ٢٦: منحنى قرينة الانكسار لمرشد موجة مصنع بشاردة الفضة (درجة الحرارة 370°C، النسبة المولية 0.008، الزمن 10min) ٣٦
- الشكل ٢٧: منحنى قرينة الانكسار لمرشد موجة مصنع بشاردة الفضة (درجة الحرارة 370°C، النسبة المولية 0.008، الزمن 20 min) ٣٧
- الشكل ٢٨: منحنى قرينة الانكسار لمرشد موجة مصنع بشاردة الفضة (درجة الحرارة 370°C، النسبة المولية 0.008، الزمن 30min) ٣٧
- الشكل ٢٩: منحنى قرينة الانكسار لمرشد موجة مصنع بشاردة الفضة (درجة الحرارة 370°C، النسبة المولية 0.01، الزمن 15min) ٣٨
- الشكل ٣٠: منحنى قرينة الانكسار لمرشد موجة مصنع بشاردة الفضة (درجة الحرارة 370°C، النسبة المولية 0.01، الزمن 30min) ٣٨
- الشكل ٣١: منحنى قرينة الانكسار لمرشد موجة مصنع بشاردة الفضة (درجة الحرارة 370°C، النسبة المولية 0.01، الزمن 25min) ٣٩
- الشكل ٣٢: تأثير زمن التبادل على منحنى قرينة الانكسار من أجل نسبة مولية 0.008 (sample 1: 10min, sample 4: 20min, sample 5: 30min) ٤٠
- الشكل ٣٣: تأثير زمن التبادل على منحنى قرينة الانكسار من أجل نسبة مولية 0.01 (sample 6: 15min, sample 7: 30min, sample 8: 25min) ٤٠
- الشكل ٣٤: تأثير النسبة المولية لنترات الفضة في المصهور الملحي على منحنى قرينة الانكسار من أجل زمن تبادل 30 دقيقة ٤١
- الشكل ٣٥: منحنى قياس سماكة طبقة PMMA المتشكلة على شريحة من زجاج الكوارتز ٤٣
- الشكل ٣٦: منحنى قياس سماكة طبقة PMMA المتشكلة على شريحة زجاج BK7 ٤٣
- الشكل ٣٧: منحنى قياس سماكة طبقة PMMA المتشكلة على شريحة زجاج BK7، 2 ٤٣
- الشكل ٣٨: مقياس التداخل ماخ-زيندر^[13] ٤٦

- الشكل ٣٩: شريحة زجاج مطلية بمادة الكروم لتشكل وصلة Y-junction ٤٧
- الشكل ٤٠: وصلة (Y-junction) المُصنعة باستخدام ماسك أكسيد الألمنيوم ٤٨

قائمة الجداول

- جدول ١: الخصائص الأساسية للشوارد التي تُستخدم عادةً في طريقة التبادل الأيوني^{[5][6]}..... ٧
- جدول ٢: تغير عدد الأنماط مع تغير زمن التبادل الأيوني مع شاردة البوتاسيوم في أنواع متعددة من الزجاج (Pyrex و soda lime، BK7) عند درجة الحرارة 385 درجة مئوية^[10]..... ١٩
- جدول ٣: نتائج تصنيع مرشد موجة باستخدام مصهور ملحي مكون من 70mol% نترات البوتاسيوم و 30mol% نترات الفضة، عند درجة حرارة 350°C^[3]..... ٢١
- جدول ٤: خصائص المواد المستخدمة في عملية التبادل الأيوني..... ٢٢
- جدول ٥: نتائج تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام شاردة الفضة على زجاج m.s. عند درجة حرارة 370°C..... ٣٠
- جدول ٦: تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام شاردة الفضة في نوعين من الزجاج..... ٣١
- جدول ٧: نتائج تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام شاردة البوتاسيوم..... ٣١
- جدول ٨: قرائن الانكسار الفعالة للأنماط في مرشد الموجة المُصنع باستخدام شاردة البوتاسيوم..... ٣٣
- جدول ٩: يوضح بارامترات التجارب للتبادل الأيوني مع شاردة الليثيوم مع مصهور ملحي يحوي ٦٥% من نترات الليثيوم..... ٣٥
- جدول ١٠: زمن التغطية ونوع الزجاج المستخدم في تجارب تصنيع مرشد موجة باستخدام مادة PMMA..... ٤١
- جدول ١١: عدد الأنماط (TE) المنتشرة في المرشحات المصنعة باستخدام مادة PMMA..... ٤٤
- جدول ١٢: المواد المستخدمة لإزالة مواد الطلاء عن الزجاج..... ٤٧

الاختصارات

W.K.B. Invers: the Wentzel–Kramers–Brillouin inverse method.

m.s. : microscope slide (نوع زجاج).

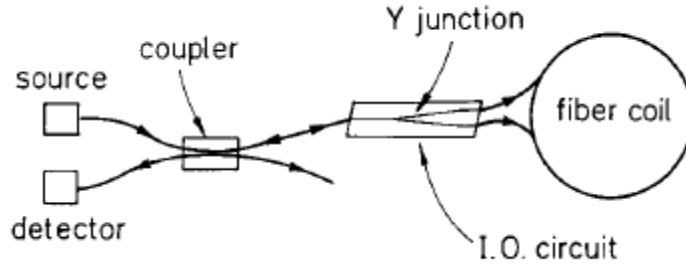
MZI: Mach–Zehnder Interferometer.

PMMA: Poly methyl methacrylate.

NA: numerical aperture.

مقدمة عامة

تُطور العديد من الجهات العلمية أنظمة ملاحية تحتوي على جايروسكوب الألياف الضوئية (Fiber Optic Gyro)، ومن المكونات الهامة للجايروسكوب مقسم/مجمع الإشارة (Y-junction: splitter/combiner). يبين الشكل (١) مخطط جايرو الألياف الضوئية^[1]. يتم ارسال إشارة من منبع ضوئي، فنقوم وصلة مقسم إشارة (Y-junction: splitter/ combiner) بتقسيم الإشارة في مسارين ضوئيين ضمن بكرة ليف ضوئي، وفي نهاية مسار كل منهما يلتقيان عن طريق الوصلة السابقة نفسها والتي تعمل كمجمع في الاتجاه المعاكس.

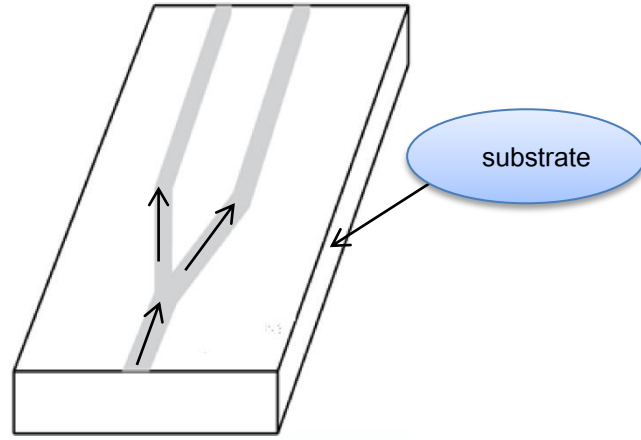


الشكل ١: مخطط جايرو الألياف الضوئية^[1]

مقسم/مجمع الإشارة (Y-junction) هي عبارة عن دائرة ضوئية ترشد الموجة الضوئية حسب ما تم توضيحه أعلاه، يُوضح الشكل (٢) مخطط مقسم الإشارة.

يُمكن النظر إلى Y-junction على أنها مرشحات موجة، حيث يتم تصنيعها ببساطة كما يتم تصنيع المرشحات بشكل مباشر أو باستخدام قناع (mask) مناسب حسب الحاجة.

يُعتبر مرشد الموجة الضوئي من المكونات الأساسية في الدارات التكاملية الضوئية. كما تُستخدم في تطبيقات الحساسات الضوئية (planar waveguide sensors)، هذه الحساسات مرغوبة في التطبيقات التي تتطلب حساسية عالية مع حجم صغير، وتُستخدم في مجالات مختلفة^[2].



الشكل ٢: مقسم إشارة (Y-junction)

من أهم ميزات الدرات التكاملية على الزجاج الكلفة المنخفضة للمواد المستخدمة وسهولة طرق التصنيع نسبياً. تقوم مرشحات الموجة الضوئية بتوجيه الموجة الضوئية عن طريق مبدأ الانعكاس الكلي الداخلي بين سطحين.

تُصنع مرشحات الموجة المستوية على شرائح زجاجية بإضافة فلم رقيق على الشريحة أو بتغيير قرينة انكسار طبقة سطحية من الشريحة و تُدعى هذه الطبقة طبقة المرشد بحيث يكون لها قرينة انكسار أعلى من قرينة انكسار الشريحة الأساسية. من طرق تصنيع مرشحات الموجة التبادل الأيوني (ion-exchange)، التطعيم (doping)، إضافة طبقة بوليميرية وغيرها، التبادل الأيوني هو الأكثر استخداماً في تصنيع المرشحات. يعتمد التبادل الأيوني على استبدال شاردة من مكونات الزجاج (غالباً شاردة الصوديوم) بشاردة لها استقطابية مختلفة مثل شوارد الفضة، البوتاسيوم، السيزيوم، الثاليوم وغيرها^[3]. إضافة إلى أهمية الشاردة المستخدمة فإن الشاردة نفسها لها تأثيرات مختلفة حسب نوع الزجاج، حيث تختلف مكونات الزجاج من نوع لآخر. تُعطي طريقة التبادل الأيوني مرشد موجة له قرينة انكسار متدرجة (graded index waveguide). يوجد طرق تصنيع أخرى تعطي مرشد موجة له قرينة انكسار ثابتة (step index waveguide) مثل الأغشية الرقيقة.

الفصل الأول

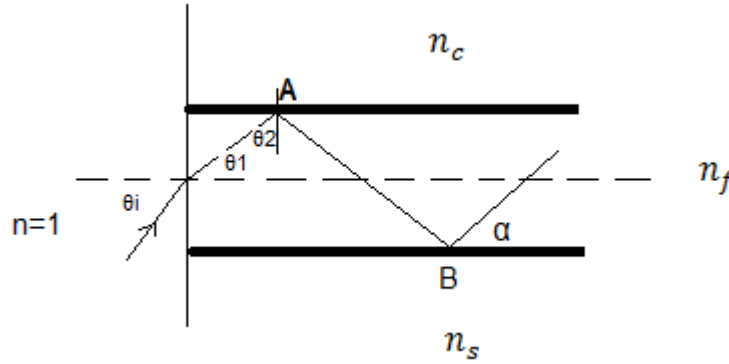
الأسس النظرية لمرشد الموجة المستوي

1.1- تعريف مرشد الموجة المستوي

- تركيب هندسي مؤلف من ثلاث طبقات مستوية متوازية ذات قرائن انكسار مختلفة عموماً:
- وسط له قرينة انكسار n_c (cover)، غالباً يكون الهواء ($n_c = 1$).
 - طبقة المرشد (guide) لها سماكة محددة، وقرينة انكسار n_f ممكن أن تكون ثابتة أو متغيرة.
 - طبقة لها قرينة انكسار n_s (substrate).

2.1- انتشار الموجة داخل المرشد

كما يُوضح الشكل (3)، موجة ضوئية تدخل المرشد بزاوية θ_i وتنتشر داخل المرشد



الشكل 3: انتشار موجة ضوئية داخل مرشد موجة مستوي

عند حقن إشارة في المرشد، يجب أن يحقق الشعاع شرط الانعكاس الكلي عند النقطتين A و B حتى تبقى الإشارة داخل المرشد. وبالتالي يجب أن تحقق قرائن الانكسار n_s و n_f و n_c العلاقة التالية:

$$n_f > n_s > n_c \quad (1)$$

يمكن أن تتساوى قرينتا انكسار الوسطين الجانبيين $n_s = n_c$ ، ويسمى عندها المرشد بالمتناظر. بفرض تحقق انعكاس كلي عند النقطة A، أي زاوية الانكسار تساوي 90 درجة:

$$\sin \theta_i = n_f * \sin \theta_1$$

$$n_f * \sin \theta_2 = n_c * \sin 90$$

$$n_f * \cos \theta_1 = n_c$$

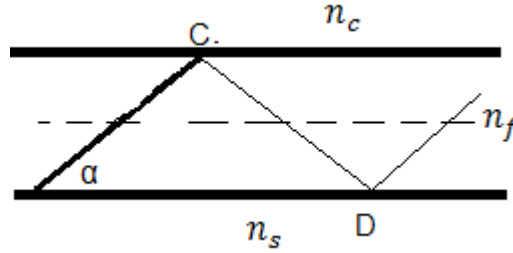
$$\cos \theta_1 = \frac{n_c}{n_f}$$

$$\sin \theta_{i \max} = n_f * \sqrt{1 - \left(\frac{n_c}{n_f}\right)^2}$$

$$\sin \theta_{i \max} = \sqrt{n_f^2 - n_c^2} = NA \quad (2)$$

حيث $\theta_{i \max}$ الزاوية العظمى التي يتحقق بها الإرشاد داخل المرشد وتسمى NA الفتحة العددية (numerical aperture).

عند حقن إشارة ضوئية داخل المرشد يحصل تداخل بين الأمواج الضوئية، يمكن أن يكون التداخل تداخلاً هداماً أي تقني الموجتان بعضهما، أو تداخلاً بناءً، يعتمد نوع التداخل على فرق الطور بين الموجتين^[19]، الشكل (٤).



الشكل ٤: انتشار موجة ضوئية داخل مرشد موجة مستوي-٢

$$\phi_{AB} = k_2 * \frac{d}{\sin \alpha} * (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \quad (3)$$

$$\phi_{CD} = k_2 * \frac{d}{\sin \alpha} + \phi_{21} + \phi_{23} \quad (4)$$

d: سماكة طبقة المرشد.

φ_{21} : فرق الطور عندما تنعكس الموجة عند النقطة D.

φ_{23} : فرق الطور عندما تنعكس الموجة عند النقطة C.

حتى يكون التداخل بناءً يجب أن يكون فرق الطور عدد صحيح من 2π :

$$\phi_{CD} - \phi_{AB} = m * 2\pi : m = 1, 2, 3 \quad (5)$$

• من أجل مجموعة الأنماط TE

$$\varphi_{2i} = -2 * \arctg \frac{\sqrt{\cos^2 \alpha - \left(\frac{n_i}{n_f}\right)^2}}{\sin \alpha} : i = 1, 3 \quad (6)$$

$$n_1 = n_s, n_3 = n_c$$

• من أجل مجموعة الأنماط TM

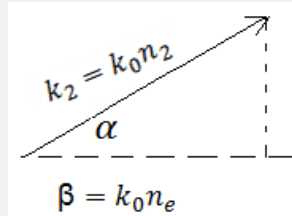
$$\varphi_{2i} = -2 * \arctg \left[\left(\frac{n_f}{n_i}\right)^2 \frac{\sqrt{\cos^2 \alpha - \left(\frac{n_i}{n_f}\right)^2}}{\sin \alpha} \right] \quad (7)$$

بالتعريف:

$$\beta = k_0 n_e = k_2 * \cos \alpha$$

$$k_2 = k_0 n_2$$

$$n_e = n_2 * \cos \alpha$$



n_e : قرينة الانكسار الفعالة للنمط.

سندرس حالة الأنماط TE:

$$\varphi_{2i} = -2 * \arctg \frac{\sqrt{\left(\frac{n_e}{n_f}\right)^2 - \left(\frac{n_i}{n_f}\right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{n_e}{n_f}\right)^2}} = -2 * \arctg \sqrt{\frac{n_e^2 - n_i^2}{n_f^2 - n_e^2}} \quad (8)$$

$$\frac{\varphi_{CD} - \varphi_{AB}}{2} = k_0 d \sqrt{n_f^2 - n_e^2} - \arctg \sqrt{\frac{n_e^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_e^2}} - \arctg \sqrt{\frac{n_e^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_e^2}} = m\pi \quad (9)$$

تسمى المعادلة (٩) معادلة التشتت^[19].

ومنه لا يحصل انتشار عند أي زاوية حتى لو كانت أصغر من زاوية الفتحة العددية بشكل عشوائي إنما تخضع لقيم محددة.

وبالتالي حتى تنتشر الموجة داخل المرشد يجب أن يتحقق شرطان:

✓ يجب أن تكون زاوية دخول الموجة إلى داخل المرشد أصغر من الزاوية $\theta_{i \max}$ حيث:

$$\sin \theta_{i \max} = \sqrt{n_f^2 - n_c^2}$$

✓ أن تحقق الزاوية شرط التداخل البناء:

$$k_0 d \sqrt{n_f^2 - n_e^2} - \arctg \sqrt{\frac{n_e^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_e^2}} - \arctg \sqrt{\frac{n_e^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_e^2}} = m\pi$$

شرط القطع (cut-off) أن تكون $n_e = n_c$.

من علاقة التشتت السابقة نجد تردد القطع الموافق لأي نمط:

$$w_c = \frac{c}{d \sqrt{n_f^2 - n_c^2}} \left(m\pi + \arctg \sqrt{\frac{n_c^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_c^2}} \right) \quad (10)$$

$w_c \neq 0$ ← يوجد تردد قطع $m \neq 0$

$$(w_c \neq 0) : n_1 \neq n_3 \quad \leftarrow \begin{array}{l} \text{m}=0 \\ \leftarrow \end{array}$$

$$w_c = 0 : n_3 = n_1$$

ومنه في حالة المرشد المتناظر فإن النمط الأساسي سينتشر من أجل أي طول موجة.

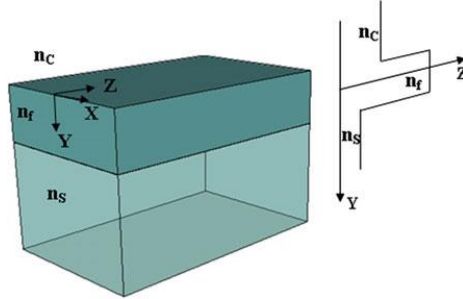
يوجد شرط أخير لانتشار الموجة في المرشد، هو سماكة طبقة المرشد. يمكن الاستنتاج من معادلة التشنت الحد الأدنى للسماكة d المطلوب حتى ينتشر النمط m في المرشد:

$$d_{m_min} = \frac{1}{k * \sqrt{n_f^2 - n_e^2}} \left(m\pi + \text{arctg} \sqrt{\frac{n_e^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_e^2}} + \text{arctg} \sqrt{\frac{n_e^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_e^2}} \right) \quad (11)$$

3.1- تصنيف مرشحات الموجة المستوية

✓ step-index planar waveguide

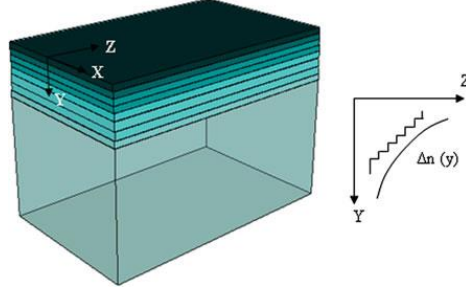
طبقة المرشد لها قرينة انكسار ثابتة على كامل الطبقة، الشكل (٥).



الشكل 5 : step-index planar waveguide

✓ graded index waveguides:

طبقة المرشد لها قرينة انكسار متدرجة، تكون قيمة قرينة الانكسار أعلى على السطح وتتناقص بالتدرج مع العمق حتى تتساوى مع قرينة انكسار الشريحة (substrate)، الشكل (٦).



الشكل 6 : graded index waveguide

4.1- طرق تصنيع مرشد الموجة المستوية

سنذكر بعض تقنيات تصنيع مرشحات الموجة المستوية:

- تقنيات التوضّع:

1. طريقة الرذاذ أو الرش الكاثودي.
2. طريقة التوضّع انطلاقاً من محلول.

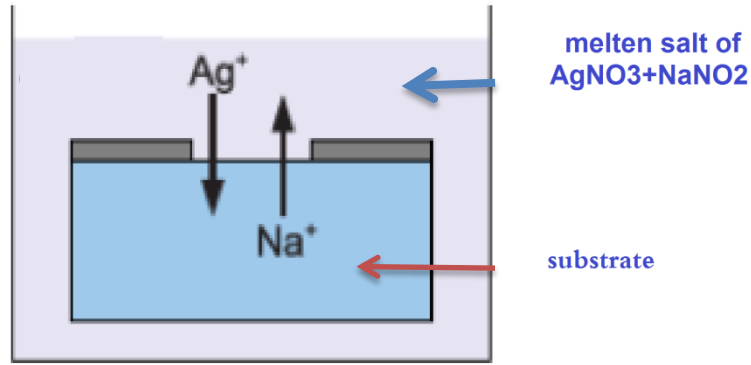
- تقنيات التطعيم:

1. التبادل الأيوني.
2. الزرع الأيوني.

في هذا العمل تم تصنيع مرشحات موجة مستوية باستخدام طريقتي التبادل الأيوني والتوضّع انطلاقاً من محلول.

1.4.1- طريقة التبادل الأيوني في الزجاج

تُعتبر طريقة التبادل الأيوني في الزجاج من الطرق المهمة لتصنيع مرشحات الموجة، حيث يتم استبدال شاردة من الزجاج (غالباً الصوديوم) بشاردة ذات حجم و استقطابية (polarizability) مختلفين (شاردة الفضة، البوتاسيوم، الليثيوم، السيزيوم، أيونات النحاس، الثاليوم وغيرها). يتم وضع شريحة الزجاج في مصهور ملحي في درجة حرارة عالية بهدف تسريع عملية التبادل لمدة زمنية تختلف من شاردة لأخرى، فيتم تبادل الشوارد في الطبقة السطحية من شريحة الزجاج، الشكل (٧) يوضح التبادل الأيوني بين الصوديوم والفضة:



الشكل ٧: التبادل الأيوني في الزجاج^[4]

فنتنتج طبقة لها قرينة انكسار أعلى من قرينة انكسار الصفيحة. ينتج عن هذه الطريقة عموماً مرشد موجة له قرينة انكسار متدرجة (graded index waveguide)، حيث يقل تركيز الشاردة الجديدة كلما زاد العمق. يختلف عمق طبقة المرشد الناتجة حسب نوع المصهور الملحي ودرجة الحرارة والمدة الزمنية لعملية التبادل.

يوضح الجدول (١) الخصائص الأساسية للشوارد التي تُستخدم عادةً في طريقة التبادل الأيوني^{[5][6]}:

جدول ١ : الخصائص الأساسية للشوارد التي تُستخدم عادةً في طريقة التبادل الأيوني^{[5][6]}

العدد الذري	Ionic radius ($\times 10^{-10}$ m)	الاستقطابية (polarizability) ($\times 10^{-30}$ m ³)	الشاردة
11	0.95	0.41	Na ⁺
47	1.26	2.4	Ag ⁺
19	1.33	1.33	K ⁺
3	0.65	0.03	Li ⁺
55	1.65	3.34	Cs ⁺
81	1.49	5.2	Tl ⁺
37	1.9	1.98	Rb ⁺

تخضع عملية التبادل الأيوني لمعادلة الانتشار^{[4][5]}:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad x > 0, t > 0 \quad (12)$$

مع الشروط:

$$— C=C_0 \quad : t>0, x=0$$

$$— C=0 \quad : t=0, x>0$$

C تركيز الشوارد عند النقطة x .

C_0 تركيز الشوارد عند السطح.

t زمن التبادل.

x عمق النقطة التي نريد حساب التركيز عندها.

D ثابت الانتشار.

يُعطى حل المعادلة السابقة^[4]:

$$C(x, t) = C_0 * \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (13)$$

2.4.1- طريقة التوضّع انطلاقاً من محلول

تُستخدم هذه الطريقة في صناعة مرشحات الموجة المستوية ذات قرينة الانكسار الثابتة (step index waveguides)، حيث يتم استخدام مادة لها قرينة انكسار أعلى من قرينة انكسار القاعدة (substrate) بعد حلها بمذيب. تُشكل طبقة رقيقة فوق شريحة الزجاج.

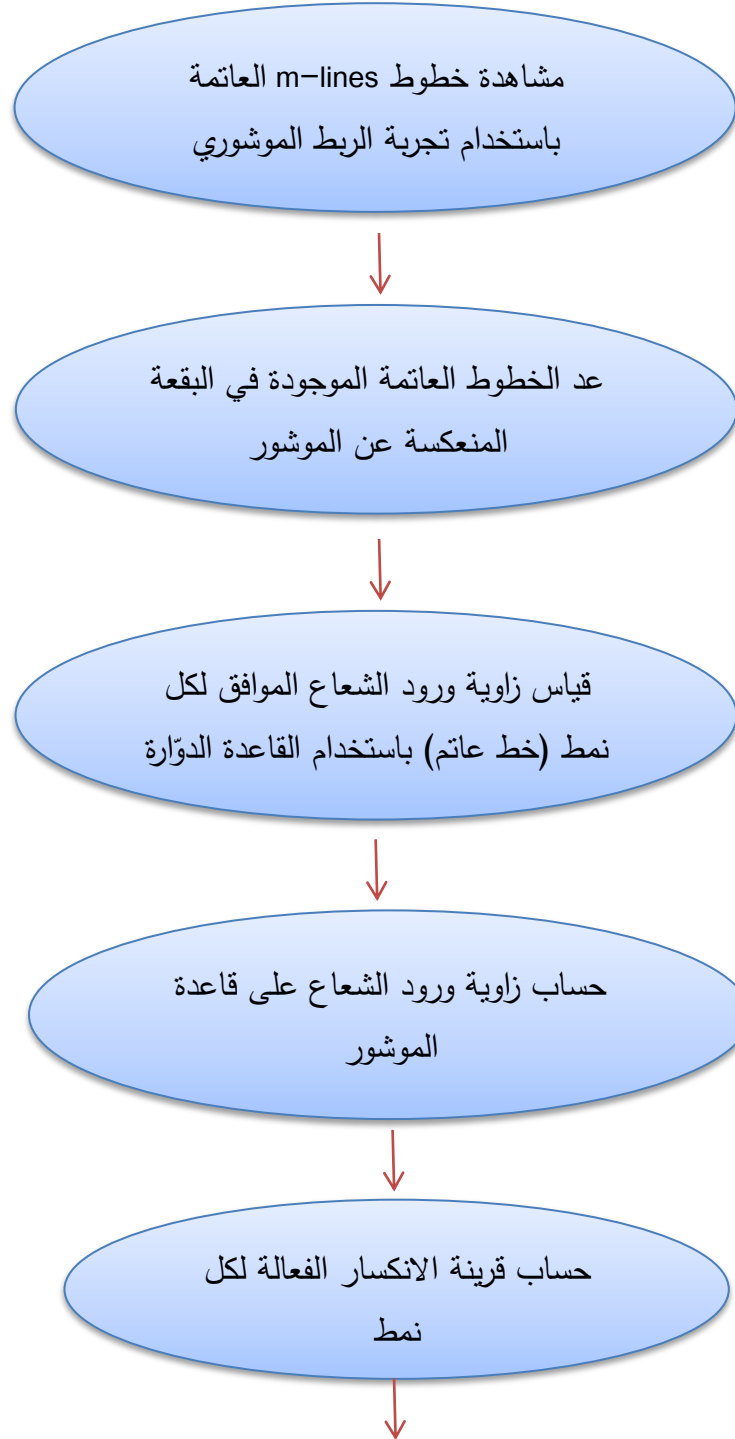
5.1- قياس بارامترات المرشد

بعد تصنيع مرشد موجة مستوي من المهم معرفة قرينة انكسار الطبقة المرشدة وسماكتها. تختلف طريقة التوصيف حسب نوع المرشد.

في حال كان لطبقة المرشد قرينة انكسار ثابتة (step-index) فيلزم معرفة سماكة طبقة المرشد وقرينة انكسارها. أمّا في المرشحات ذات قرينة الانكسار المتدرجة (graded index) فيلزم رسم منحنى تغيرات قرينة الانكسار مع عمق المرشد.

في التجارب العملية قمنا بتصنيع مرشد موجة له قرينة انكسار متغيرة ومرشد له قرينة انكسار ثابتة، وبالتالي سنشرح مراحل قياس بارامترات المرشد في الحالتين.

يوضح الشكل (٨) مخطط توصيف مرشد موجة له قرينة انكسار متدرجة:



تطبيق خوارزمية W.K.B. العكسية لحساب
الاحداثية (العمق) الموافقة لكل قرينة
انكسار

الشكل ٨: مخطط توصيف مرشد موجة له قرينة انكسار متدرجة

1.5.1- الربط الموشوري وخطوط م (m-lines)

- مبدأ طريقة الربط الموشوري

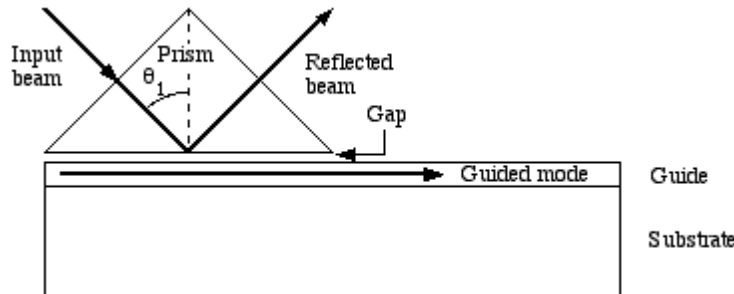
عند ورود شعاع ضوئي من وسط شفاف له قرينة الانكسار n_1 إلى وسط شفاف آخر له قرينة انكسار n_2 بزاوية θ_1 فان الشعاع ينكسر بزاوية θ_2 ، بحيث يحققان العلاقة:

$$n_1 * \sin(\theta_1) = n_2 * \sin(\theta_2) \quad (14)$$

ينعكس الشعاع انعكاساً كلياً إذا ورد بزاوية أكبر من الزاوية الحرجة θ_l ، تُعطى الزاوية الحرجة بالعلاقة:

$$\sin(\theta_l) = \frac{n_2}{n_1} : n_2 < n_1 \quad (15)$$

نضع موشور له قرينة انكسار n_p فوق مرشد الموجة المستوي له قرينة انكسار n_o ، بحيث $n_p > n_o$ ، نمرر شعاع ضوئي في الموشور بحيث ينعكس انعكاساً كلياً على قاعدة الموشور كما في الشكل (٩)، ثم نضغط الصفيحة على الموشور حتى يحدث الترابط، أي ينتقل جزء من طاقة الموجة الواردة على قاعدة الموشور إلى المرشد.



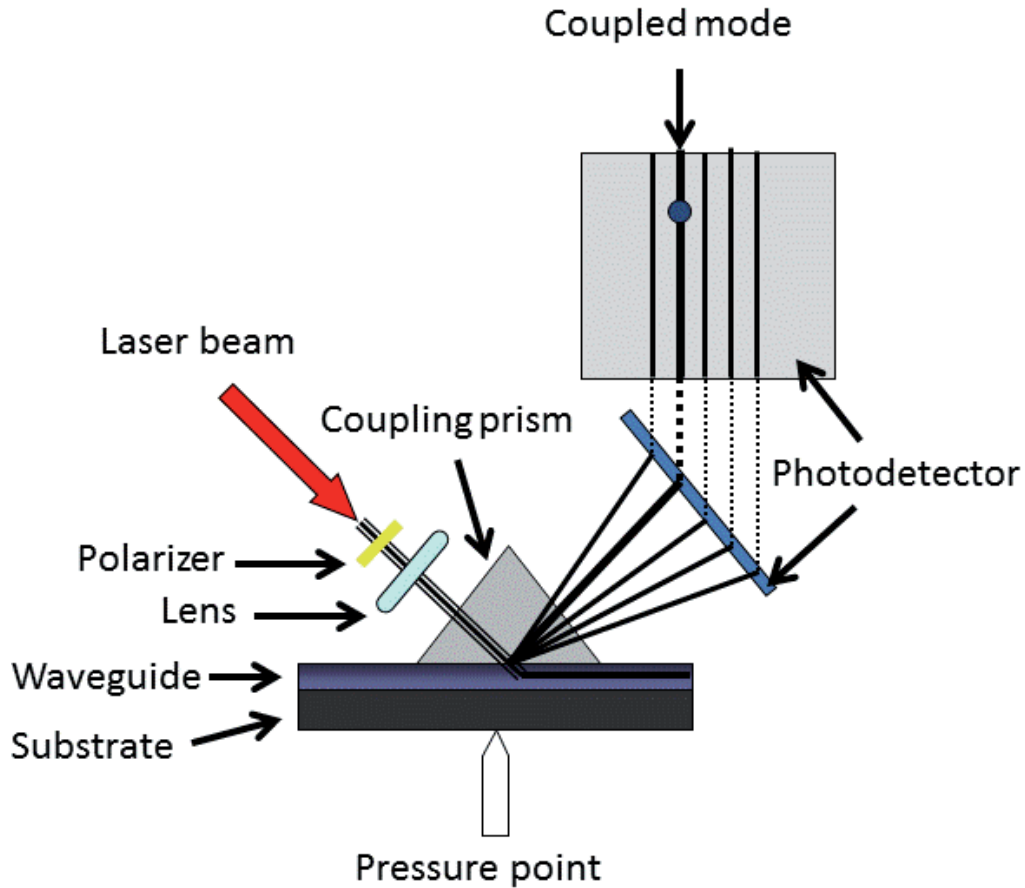
الشكل ٩: مبدأ تجربة الربط الموشوري [7]

- مشاهدة خطوط m-lines

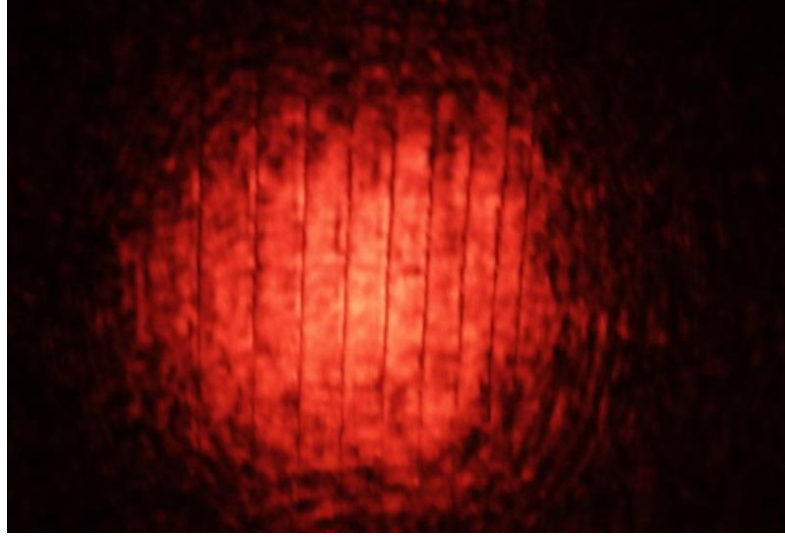
لمشاهدة خطوط m -lines العاتمة نستخدم حزمة ليزر محترقة، الأشعة المختلفة المكونة للحزمة سوف تسقط بزوايا مختلفة حتى نحصل على عدد من زوايا الربط في الوقت نفسه، من أجل كل زاوية ربط ينتشر نمط في المرشد أي إنّ الموجة الموافقة تنتقل لتنتشر في المرشد، بالتالي تنعدم الشدة المنعكسة للشعاع الوارد وفق هذه الزاوية، كما يوضّح الشكل (١٠).

نتلقى الحزمة المنعكسة عن قاعدة الموشور على شاشة، فنظهر بقعة مضيئة تحتوي عدداً من الخطوط المستقيمة العاتمة، عدد الخطوط يُمثل عدد الأنماط المنتشرة في المرشد الناتجة عن عملية الربط و كل خط يعبر عن نمط انتشار.

يوضّح الشكل (١١) خطوط m -lines العاتمة عند استخدام مرشد موجة قمنا بتصنيعه باستخدام شاردة الفضة (العينة رقم ٨)، يظهر في الشكل تسع خطوط وبالتالي ينتشر في المرشد تسع أنماط:

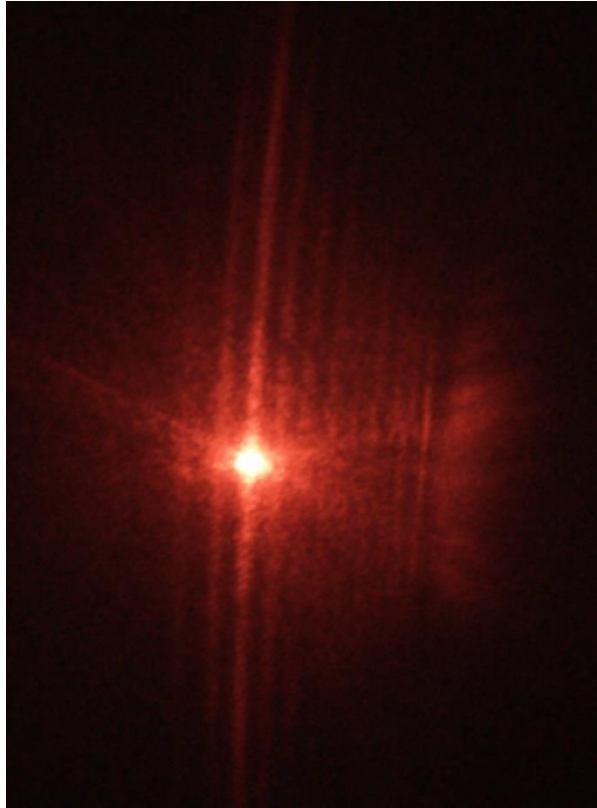


الشكل ١٠: خطوط m -lines^[3]



الشكل ١١: خطوط m-lines العاتمة لمرشد موجة مستوي

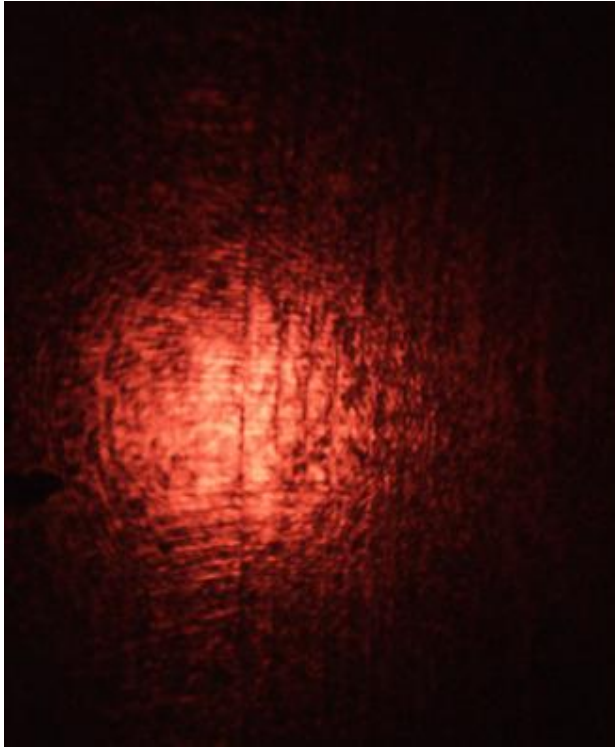
يمكن مشاهدة خطوط m-lines المضيئة في حال وجهنا الليزر باتجاه الموشور مباشرة بدون استخدام عدسات،
الشكل (١٢):



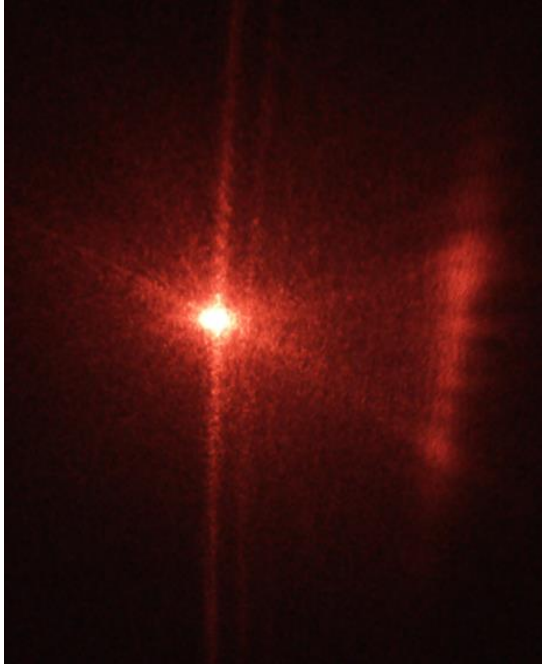
الشكل ١٢: خطوط m-lines المضيئة لمرشد موجة مستوي

لقياس زوايا ورود الأشعة على الموشور (كل زاوية موافقة لنمط حيث يتم منها حساب زوايا الأنماط كما سنرى لاحقاً)، نقوم بتدوير الموشور حتى يكون أول خط مُضيئ والذي يوافق أول نمط في مركز الدائرة كما يبين الشكل (١٣).

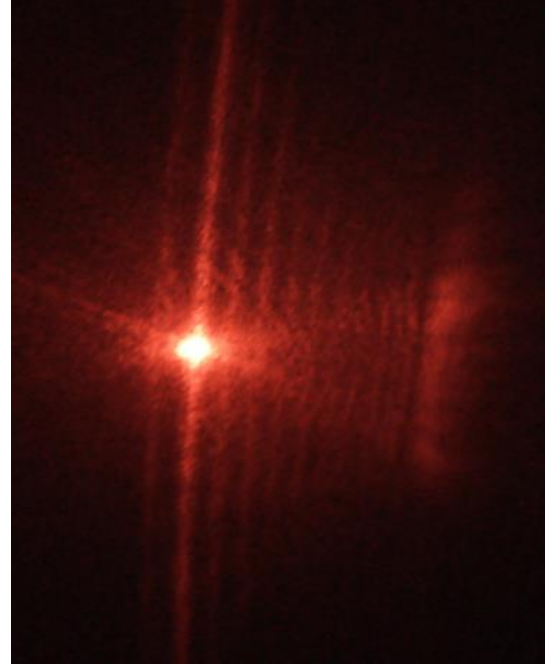
تعتمد الطريقة السابقة على النظر وبالتالي احتمال الخطأ كبير، لتجنب خطأ النظر في القياس يمكن استخدام خطوط m -lines المضيئة، عند تدوير الجملة يضيئ كل نمط عند الزاوية الموافقة له، يظهر في الشكل (١٤) صورتين، الصورة الأولى فيها النمط الأول مُضاء، ثم في الصورة المجاورة النمط الثاني مُضاء:



الشكل ١٣: طريقة قياس زاوية النمط الأول اعتماداً على خطوط m -lines العاتمة



(a)

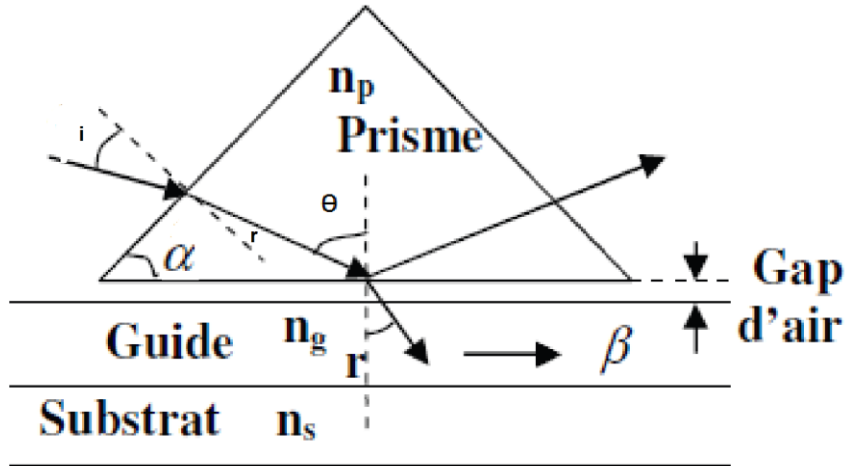


(b)

الشكل ١٤: طريقة قياس زوايا الأنماط اعتماداً على خطوط m -lines المضيئة: (a) النمط الأول مُضاء، (b) النمط الثاني مُضاء

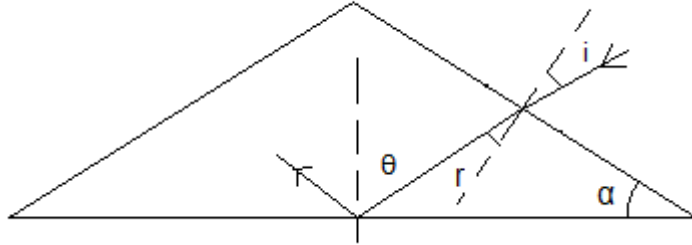
2.5.1- رسم منحنى قرينة الانكسار باستخدام طريقة W.K.B المعاكسة

عند ورود شعاع ضوئي على الموشور بزواوية i ، يدخل الموشور بزواوية r ، الشكل (١٥):



الشكل ١٥: مسار شعاع ضوئي يدخل إلى الموشور ثم إلى مرشد الموجة المستوي^[7]

تجربة الربط الموشوري في المخبر تمكننا من قياس الزاوية i ، نحسب زاوية الورود على قاعدة الموشور θ_m من العلاقات التالية وذلك حسب الحالة:
الحالة الأولى:

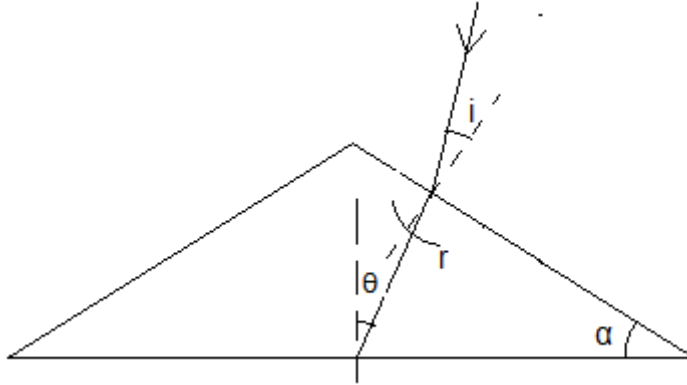


الشكل ١٦: الحالة الأولى لورود شعاع على الموشور

$$\theta = \alpha + r$$

$$n_p * \sin(r) = \sin i$$

الحالة الثانية:



الشكل ١٧: الحالة الثانية لورود شعاع على الموشور

$$\theta = \alpha - r$$

$$n_p * \sin(r) = \sin i$$

حساب قرينة الانكسار لكل نمط عن طريق قياس زاوية النمط:

$$n_{em} = n_p * \sin(\theta_m) \quad (16)$$

ومنه نكون حصلنا على قرائن الانكسار الفعالة للأنماط.

نعود إلى علاقة التشتت، المعادلة (٨):

$$m\pi = k_0 d \sqrt{n_f^2 - n_e^2} - \arctg \sqrt{\frac{n_e^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_e^2}} - \arctg \sqrt{\frac{n_e^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_e^2}}$$

بإهمال الحدين الأخيرين [19]:

$$k_0 d \sqrt{n_f^2 - n_e^2} = m\pi \quad (17)$$

ومنه منحنى توزع قرينة الانكسار الفعالة n_e :

$$n_e \cong n_f - \frac{1}{2n_f} \left(\frac{m\pi}{kd} \right)^2 \quad (18)$$

تتغير n_e وفق علاقة تربيعية مع رقم النمط وطول الموجة:

$$k_0 d \sqrt{n_f^2 - n_e^2} \Rightarrow k_0 \int_0^{y_t} \sqrt{n^2(y) - n_e^2} dy \quad (19)$$

$$k_0 \int_0^{x_m} \sqrt{n^2(x) - n_{em}^2} dx = \varphi_{g0} + \frac{\pi}{4} + m \quad (20)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

m : عدد الأنماط.

n_{em} : قرينة الانكسار الفعالة للنمط m .

x_m : العمق الموافق لقرينة الانكسار n_{em} .

λ_0 : طول موجة الليزر المستخدم في تجربة الربط الموشوري.

φ_{g0} : فرق الطور الناتج عن انعكاس الشعاع الضوئي.

يمكن تطبيق طريقة W.K.B العكسية في حال تحقق الشروط التالية:

✓ $n(x)$ عظمى عند السطح.

✓ تتغير $n(x)$ بشكل صغير جداً مع طول الموجة.

✓ $n(x)$ ترتيب ومتناقص.

○ يجب الانتباه إلى الاستقطاب لتطبيق العلاقات المناسبة.

يتم رسم منحنى قرينة الانكسار بطريقة تقريبية بمعرفة n_{sur} (قرينة انكسار سطح المرشد) والتناثيات (n_{em}, x_m) . باستخدام الفرضيات التالية^[7]:

• السطح هواء- مرشد عاكس تماماً وبالتالي: $\varphi_{g0} = \frac{\pi}{2}$

• المنحى $n(x)$ خطي بين كل نقطتين متتاليتين، وبالتالي نكتب:

$$n(x) = n_m + \frac{n_{m-1} - n_m}{x_{m-1} - x_m} * (x - x_m) \quad : \quad x_{m-1} < x < x_m \quad (21)$$

حيث n_m هي قرينة الانكسار عند x_m .

• نفرض:

$$n^2(x) - n_m^2 \approx (n(x) - n_m) \left(\frac{n_{m-1} + 3n_m}{2} \right) \quad : \quad x_{m-1} < x < x_m \quad (22)$$

$$n(x) + n_m \approx \frac{n_{m-1} + n_m}{2} + n_m \quad (23)$$

وبالتالي:

$$n(x) \approx \frac{n_{m-1} + n_m}{2} \quad (24)$$

تصبح المعادلة (١٩) على الشكل:

$$\int_0^{x_m} \sqrt{n^2(x) - n_{em}^2} dx = \frac{4m + 3}{8} * \lambda_0 \quad : \quad m = 0, 1, 2 \dots \quad (25)$$

النمط الأساسي يوافق $m=0$ و له قرينة انكسار فعالة n_1 ، وبالتالي يمكننا أن نكتب $n(x)$ بين $x=0$ و $x=x_1$:

✓ من أجل النمط الأساسي $m=0$ (له قرينة انكسار فعالة n_1):

$$x_{m-1} = x_{sur} = 0, \quad n_{m-1} = n_{sur} = n(0)$$

وبالتالي يمكننا أن نكتب $n(x)$ بين $x=0$ و $x=x_1$

$$n(x) = n_1 + \frac{n_{sur} - n_1}{x_1} * (x_1 - x) \quad (26)$$

بإجراء التكامل نستنتج معادلة x_1 الموافقة ل n_1 [7]:

$$x_1 = \frac{9\sqrt{2} * \lambda_0}{16\sqrt{n_{sur} - n_1}\sqrt{n_{sur} + 3n_1}} \quad (27)$$

من الفرضية السابقة أنّ $n(x)$ خطي بين كل نقطتين متتاليتين نتحصل على معادلة تكرارية لحساب نقاط x الموافقة لقرائن الانكسار [5][7]:

$$x_{m+1} = x_m + \frac{3}{\sqrt{2}\sqrt{n_m - n_{m+1}}\sqrt{n_m + 3n_{m+1}}} \left(\frac{(4m+3)\lambda_0}{8} - S \right)^{[5][7]} \quad (28)$$

$$S = \frac{2}{3} \sum_{k=1}^m \sqrt{\frac{n_{k-1} + n_k}{2} + n_{m+1}} * \frac{x_k - x_{k-1}}{n_{k-1} - n_k} * \left((n_{k-1} - n_{m+1})^{3/2} - (n_k - n_{m+1})^{3/2} \right) \quad (29)$$

6.1- لمحة عن الأعمال السابقة

التبادل الأيوني في الزجاج من الطرق الشائعة لتصنيع مرشحات الموجة، كانت البداية في سبعينيات القرن الماضي حيث تمّ نشر أول عمل عام 1972، حيث قام Izawa و Nakagome بتصنيع مرشد موجة باستخدام التبادل الأيوني بين شاردة الثاليوم Tl^+ من المصهور الملحي مع شوارد Na^+ و K^+ من الزجاج [4]. في السنوات اللاحقة تم إنجاز العديد من الأعمال للتبادل الأيوني باستخدام شوارد أخرى وهي Li^+ , Cu^+ , Ag^+ , K^+ , Cs^+ , Rb^+ . سنذكر بعض الأمثلة عن التبادل الأيوني في الزجاج لبعض الشوارد والشروط المستخدمة من أجل هذه الشوارد.

١- شاردة النحاس: تُمزج مادة كبريتات النحاس مع كبريتات الصوديوم بنسبة مولية 50:50 في درجة حرارة بجوار 590 درجة مئوية، لمدة زمنية تتراوح من خمسة إلى عشرين دقيقة، كما نعلم أنّ شاردة النحاس لها تكافؤين،

ساهمت كل من Cu^{+2} و Cu^{+} بالتبادل الأيوني، ولكن Cu^{+2} تتواجد عند الطبقات السطحية أما Cu^{+} فتدخل لعمق أكبر. بما أن استقطابية Cu^{+2} أصغر من استقطابية Cu^{+} فإن لها الدور الأكبر في تشكّل طبقة المرشد^{[9][8]}.

٢- شاردة البوتاسيوم: تُستخدم في التطبيقات التي تتطلب تغيرات صغيرة في قرينة الانكسار، يُوضّح الجدول (٢) نتائج تجارب لتصنيع مرشحات موجة باستخدام نترات البوتاسيوم الصافية^[10]:

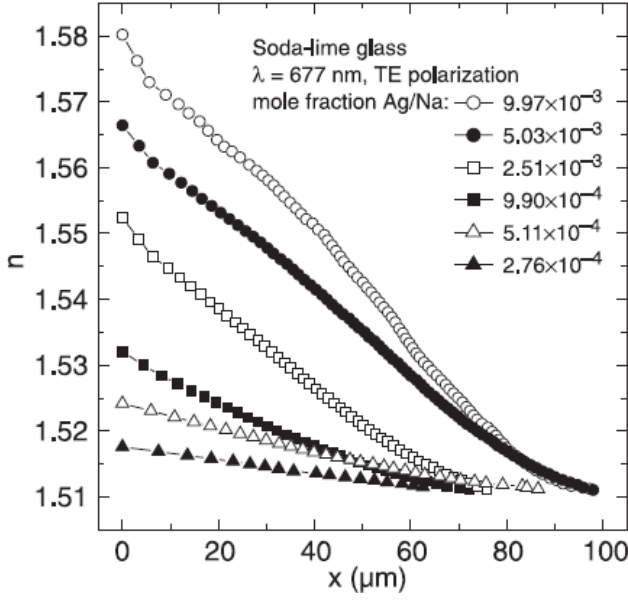
جدول ٢: تغير عدد الأنماط مع تغير زمن التبادل الأيوني مع شاردة البوتاسيوم في أنواع متعددة من الزجاج (BK7، soda lime و Pyrex) عند درجة الحرارة 385 درجة مئوية^[10]

time (hrs)	soda lime	BK7	PYREX
0.5	1	1	0
1.0	2	1	0
1.5	2	1	0
3.0	2	2	1
6.0	3	2	1
12.0	5	3	2
24.0	5	4	2
36.0	-	5	3
48.0	-	6	4
72.0	9	7	4

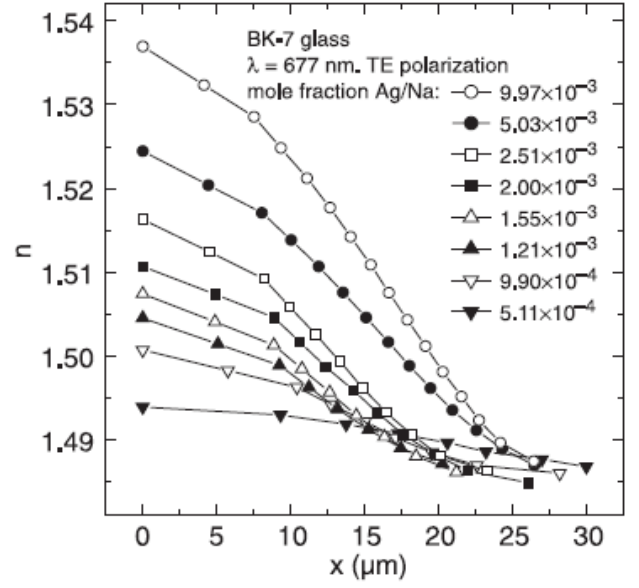
يُوضّح الجدول السابق تأثير تبادل شاردة البوتاسيوم على ثلاث أنواع مختلفة من الزجاج ضمن البارامترات نفسها (درجة الحرارة و الزمن).

نلاحظ أنّ شاردة البوتاسيوم تتطلب زمناً طويلاً حتى يحصل التبادل بكميات كافية. وهي خاصية مفيدة في بعض التطبيقات التي تحتاج مرشحات بنمط وحيد مثل جايرو الألياف الضوئية.

٣- شاردة الفضة: في عام 2005 تمّ نشر نتائج لتصنيع مرشد موجة باستخدام شاردة الفضة في نوعين من الزجاج، BK7 و soda-lime، تمّ استخدام مصهور ملحي مكون من نترات الفضة ونترات الصوديوم بنسب مولية تتراوح بين $2.76 \cdot 10^{-4}$ و $9.97 \cdot 10^{-3}$ ، درجة الحرارة المستخدمة $382^{\circ}C$ ^[11].



(a)



(b)

الشكل ١٨: نتائج تصنيع مرشد موجة باستخدام شاردة الفضة عند درجة حرارة 382°C بنسب مولية مختلفة، نوع الزجاج (a) soda- lime (b) BK7 [11]

٤- شاردة الليثيوم: في عام 2003 تمّ نشر نتائج لتصنيع مرشد موجة باستخدام شاردة الليثيوم على زجاج soda-lime، تمّ استخدام أنواع مختلفة من المصهور الملحي بدرجات حرارة مختلفة تتراوح بين $120 - 600^{\circ}\text{C}$ ، زمن التبادل يتراوح من ٣٠ ثانية حتى ٢٤ ساعة، حدثت تشوهات في الزجاج في العديد من التجارب، تمّ التوصل إلى نتيجة مفادها أنه للحصول على سطح بدون تشوه يجب استخدام درجة حرارة أعلى من درجة الحرارة T_g (Transformation temperature) الخاصة بزجاج soda-lime [12].

٥- في بعض الدراسات تمّ استخدام شاردتين في عملية التبادل الأيوني، في عام 2017 تمّ نشر دراسة حول استخدام مصهور ملحي مكون من نترات الفضة ونترات البوتاسيوم مع زجاج soda-lime، حيث يحدث التبادل بين شاردتي الفضة والبوتاسيوم من المصهور الملحي مع شاردة الصوديوم في الزجاج [3]، يوضّح الجدول (٣) نتائج هذه الدّراسة (تغيرات قرينة الانكسار، عدد الأنماط والعمق):

جدول ٣: نتائج تصنيع مرشد موجة باستخدام مصهور ملحي مكون من 70mol% نترات البوتاسيوم و 30mol% نترات الفضة، عند درجة حرارة 350°C^[3]

Waveguide	Diffusion time (minutes)	Refractive Index change	Mode Number	Estimated Depth Penetration (μm)
Sample Ag/K-Na 1	25	2×10^{-3}	6	0,27
Sample Ag/K-Na 2	100	3×10^{-3}	8	0,55
Sample Ag/K-Na 3	225	3×10^{-3}	10	0,82
Sample Ag/K-Na 4	400	3×10^{-3}	12	1,1
Sample Ag/K-Na 5	625	4×10^{-3}	15	1,37
Sample Ag/K-Na 6	900	3×10^{-3}	20	1,65

الفصل الثاني

الأدوات والمواد والأجهزة المستخدمة

وطرق التحضير

1.2- المواد الكيميائية والأجهزة المستخدمة في عملية التبادل الأيوني

- المواد الكيميائية:

من أجل عملية التبادل الأيوني يتم استخدام أملاح الشوارد المطلوبة، ويتم اختيار المادة المناسبة حسب خصائصها، يجب أن نراعي درجة انصهار المادة المستخدمة وأن تكون ضمن المجال المقبول للزجاج المستخدم.

الجدول (٤) يبين خصائص المواد المستخدمة في عملية التبادل الأيوني:

جدول ٤ : خصائص المواد المستخدمة في عملية التبادل الأيوني

اسم المادة	رمز المادة	الكتلة المولية (g/mol)	درجة الانصهار (°C)
نترات الصوديوم	NaNO ₃	84.99	307°
نترات الفضة	AgNO ₃	169.87	209.7°
نترات البوتاسيوم	KNO ₃	101.103	334°
نترات الليثيوم	LiNO ₃	68.95	255°
نترات النحاس	Cu(NO ₃) ₂	187.57	114°
كبريتات الليثيوم	Li ₂ SO ₄	109.94	845°
كبريتات الصوديوم المائية	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	320.2	32.38°

884°	142.06	Na ₂ SO ₄	كبريتات الصوديوم اللامائية
150°	249.68	CuSO ₄ .5H ₂ O	كبريتات النحاس المائية

• الأجهزة والأدوات:

١. جرن طحن سيراميكي.

٢. الفرن: عملية التبادل الأيوني تحتاج درجة حرارة تتراوح بين 250°C-400°C. استخدمنا فرن يعطي درجات حرارة عالية تصل إلى 1100°C، من إنتاج شركة Controlab.

2.2- شرائح الزجاج

يختلف الزجاج من نوع إلى آخر حسب الأكاسيد المكونة له. في عملية التبادل الأيوني من المهم معرفة نوع الزجاج المستخدم، حيث أنّ نتيجة التبادل تختلف من زجاج لآخر رغم ثبات المعاملات الأخرى (نوع المصهور الملحي، درجة الحرارة وزمن التبادل) كما سنرى في الفصل اللاحق، من المهم أيضاً معرفة قرينة انكسار الزجاج لحساب التغير الناتج عن عملية التبادل.

أنواع الزجاج المستخدمة في التجارب:

١. زجاج m.s. (microscope slide):

• قرينة الانكسار: 1.505 عند طول موجة 0.632µm.

• المكونات الرئيسية:

SiO₂: 73.1%, Na₂O: 13.8%, CaO: 8.6%, MgO: 4.0%, SO₃: 0.3%, Al₂O₃: 0.1% and Fe₂O₃: 0.1%.

٢. BK7:

• قرينة الانكسار: $n_d = 1.51680$, $n_e = 1.51872$, $n_{632.8} = 1.51509$.

• المكونات الرئيسية:

SiO₂: 69.13%, Na₂O: 10.14%, As₂O₃: 0.36%, B₂O₃: 10.75%, K₂O: 6.29%, BaO: 3.02%, others: 0.05%.

٣. BK10:

• قرينة الانكسار: $nd = 1.56883$

• المكونات الرئيسية:

SiO₂: 68.1%, Na₂O: 10.2%, As₂O₃: 0.39%, B₂O₃: 10.75%, K₂O: 6.0%, BaO: 3.02%, others: 0.1%.

٤. شرائح كوارتز:

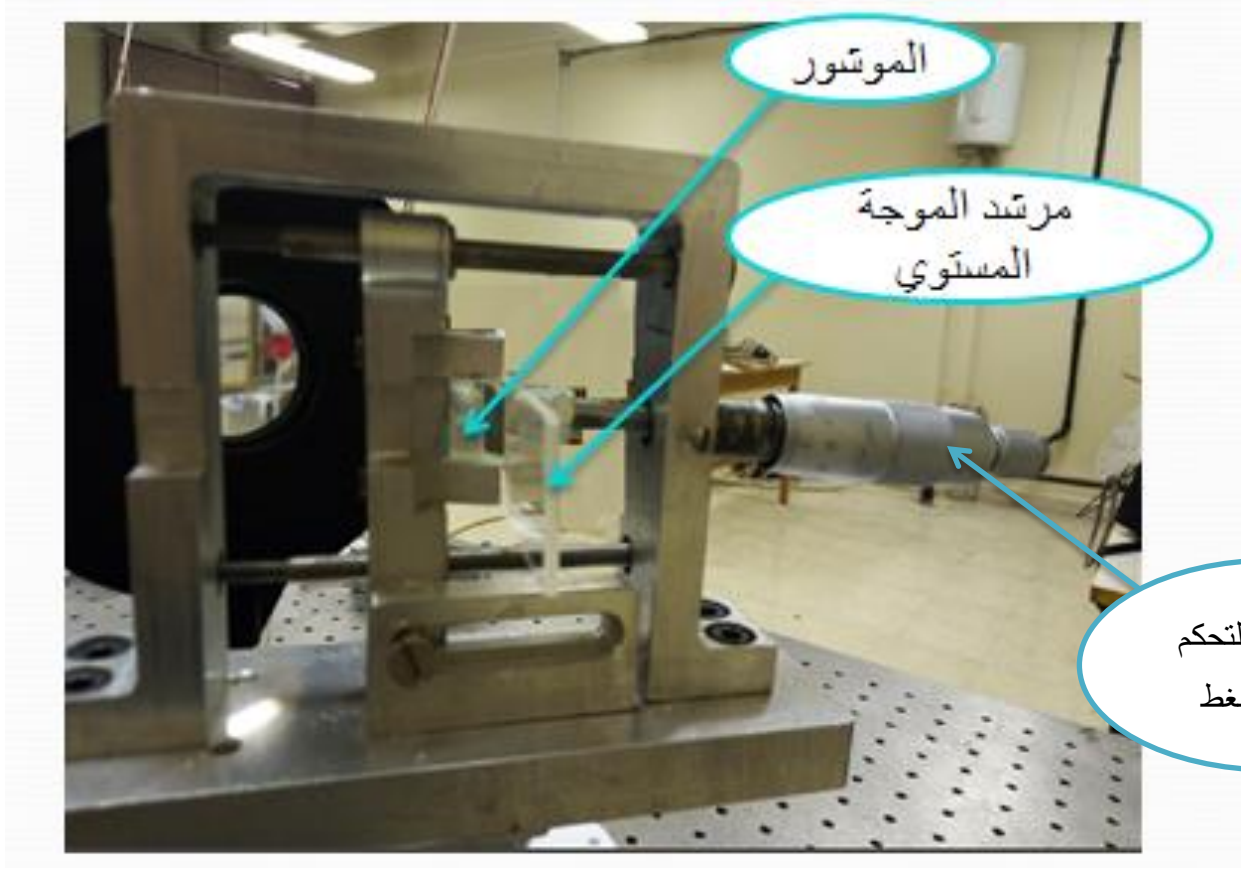
• قرينة الانكسار: $nd = 1.45$

• المكونات الرئيسية:

SiO₂: 100%.

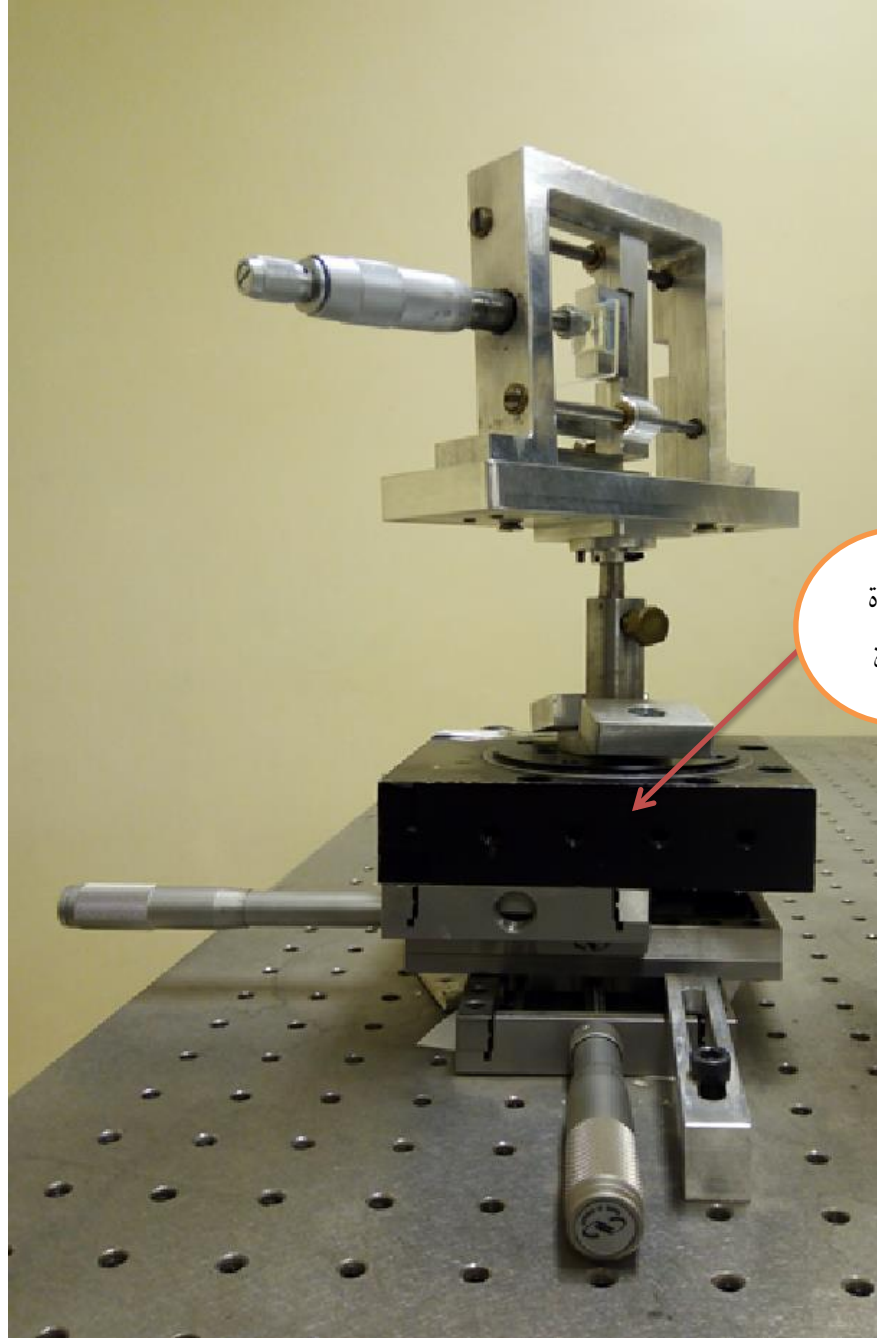
3.2- تجربة الربط الموشوري

- الموشور: موشور من مادة متبلورة اسمها التقني (H-ZF52A)، قرينة انكساره 1.84667، زاوية رأسه: 56°
- الليزر: He-Ne ($\lambda = 0.632\mu\text{m}$)، الاستقطاب TE.
- تم استخدام منصة دوارة يُثبت عليها الموشور باستخدام براغي، يتم وضع المرشد على قاعدة الموشور والضغط باستخدام رأس محدد، بحيث يمكن التحكم بشدة الضغط عن طريق ذراع دوّار وبالتالي التحكم بالمسافة بين المرشد وقاعدة الموشور، كما يُوضح الشكل (١٩):



الشكل ١٩: الربط الموشوري

المنصة السابقة مثبتة على قاعدة دَوّارة مُدرّجة تسمح بقياس الزوايا بدقة تصل إلى 0.01 درجة، الشكل (٢٠).



الشكل ٢٠: منصة قياس زوايا الأنماط

4.2- تعريف مادة PMMA (Poly methyl methacrylate)

تُعرف أيضاً باسم الزجاج الأكريلي (acrylic glass)، مادة بلاستيكية صلبة، سهلة التشكيل، خفيفة الوزن وبديلة للزجاج في التطبيقات عالية التكلفة و التي تحتاج مرونة مثل نوافذ السيارات وشاشات الهواتف الذكية.

5.2-تصنيع مرشد موجة مستوي بطريقة التبادل الأيوني

تم تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام شاردة Ag^+ ، شاردة K^+ و شاردة Li^+ .

• مراحل العمل: من أجل شاردة الفضة مثلاً.

(a) طحن نترات الفضة باستخدام جرن الطحن السيراميكي، وكذلك نترات الصوديوم.

(b) خلط نترات الصوديوم مع نترات الفضة بنسبة مولية محددة، يجب أن يتم الخلط جيداً حتى يختلط الملحين تماماً.

حساب التركيز (نسبة المولية):

$$C = \frac{AgNO_3}{AgNO_3 + NaNO_3} \quad (30)$$

(c) وضعها ضمن الفرن بدرجة حرارة عالية (بجوار $370^\circ C$)، مراقبة الخليط حتى يتم الانصهار بشكل كامل.

(d) بعد انصهار الملح بشكل كامل يتم وضع شريحة الزجاج ضمن الخليط لمدة زمنية.

(e) ترك الشريحة حتى تبرد بعد إزالتها من المصهور.

(f) تنظيفها بشكل جيد بالكحول.

6.2- تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام مادة PMMA

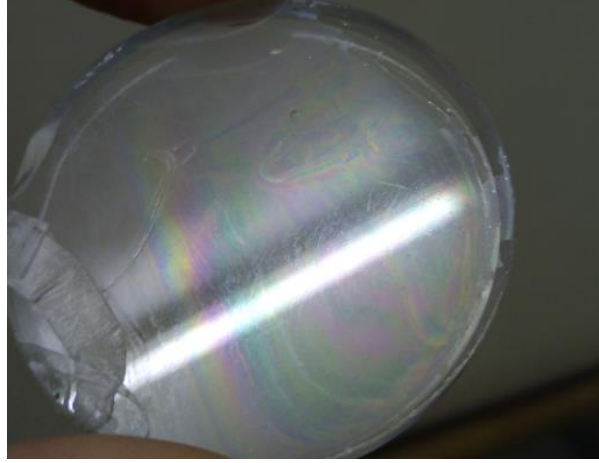
تُستخدم البوليميرات لتصنيع مرشد موجة له قرينة انكسار ثابتة (step-index waveguid)، حيث يتم تشكيل طبقة من المادة البوليميرية على الزجاج بعد حلها بمذيب، تختلف سماكة الطبقة حسب زمن تغطيس شريحة الزجاج في المحلول. يختلف عدد الأنماط التي تنتشر في المرشد حسب سماكة الطبقة.

تمّ استخدام نوعين من شرائح الزجاج كقاعدة للمرشد (substrate)، زجاج الكوارتز وزجاج BK7. زجاج الكوارتز له قرينة انكسار 1.45، أصغر من قرينة انكسار المادة البوليميرية، أمّا زجاج BK7 فله قرينة انكسار أعلى لذلك نحتاج طبقة لها قرينة انكسار منخفضة نضعها على الزجاج قبل طبقة PMMA.

1.6.2- تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام مادة PMMA على شرائح من زجاج الكوارتز

تمّ حل كمية من مادة PMMA بالأسيتون، استغرقت المادة زمناً طويلاً -عدّة ساعات- عند درجة غليان الأسيتون حتى ذابت بشكل كامل.

يتمّ تغطيس شريحة زجاج الكوارتز في المحلول السابق لمدة زمنية (سيتمّ تحديدها في فقرة لاحقة) ثمّ انتظرها حتى تجف. يمكن الملاحظة بالنظر تشكّل الطبقة على شريحة الزجاج كما يظهر في الشكل(٢١):

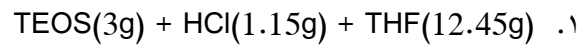


الشكل ٢١: تشكيل طبقة من مادة PMMA على شريحة من زجاج الكوارتز

2.6.2-تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام مادة PMMA على زجاج BK7

كما ذكرنا سابقاً نحتاج طبقة لها قرينة انكسار منخفضة على الزجاج، لذلك تم تشكيل طبقة من أكسيد السليسيوم المسامي على الزجاج أولاً، وبالتالي يصبح لدينا طبقة ذات قرينة انكسار 1.33.

• طريقة تحضير أكسيد السليسيوم المسامي:



HCl ممدد أي يضاف 16mL ماء منزوع الشوارد إلى 0.02mL HCl مركز .

tetrahydrofuran :THF

tetraethoxysilane :TEOS

٢. يُحل 0.6g من مادة PMMA بإضافة THF ليصبح الوزن 20g.

٣. يُضاف المحلول الناتج عن الخطوة الأولى إلى 16.6g من المحلول الناتج عن الخطوة الثانية.

٤. يُضاف لما سبق 33.2g THF.

٥. يتمّ تغطيس شريحة الزجاج في المحلول السابق لمدة دقيقة ثمّ تُترك حتى تجف.

وبذلك تتشكل على الزجاج طبقة لها قرينة انكسار أقل من قرينة انكسار مادة PMMA. بعدها يتم تغطيس الشريحة في محلول PMMA مع الأسيتون لمدة زمنية (سيتم تحديدها في فقرة لاحقة)، ثم تُترك حتى تجف.

الفصل الثالث

النتائج والمناقشة

1.3- نتائج تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام شاردة Ag^+

أجرينا عدّة تجارب على التبادل الأيوني باستخدام شاردة الفضة على زجاج m.s. عند درجة حرارة $370^{\circ}C$ ، زمن تبادل يتراوح من خمس إلى ثلاثين دقيقة و نسب مولية للمصهور الملحي (0.008, 0.01).
يوضح الجدول التالي بارمترات التجارب (النسبة المولية وزمن التبادل)، وعدد الأنماط المنتشرة في المرشد الناتج:

جدول ٥: نتائج تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام شاردة الفضة على زجاج m.s. عند درجة حرارة $370^{\circ}C$

رقم العينة	التركيز (mol%)	مدة التبادل (دقيقة)	عدد الأنماط (TE)
١	0.008	5	0
٢	0.008	10	5
٣	0.008	15	5
٤	0.008	20	5
٥	0.008	30	7
٦	0.01	15	7
٧	0.01	30	11
٨	0.01	25	9

نلاحظ من الجدول السابق أنّه يمكن الحصول بسهولة على مرشد متعدد الأنماط اعتماداً على شاردة الفضة، فمن أجل نسبة مولية 0.008%، درجة حرارة $370^{\circ}C$ وزمن تبادل 10 دقائق حصلنا على خمس أنماط.

بدايةً أجرينا عدّة تجارب بتغيير زمن التبادل، باستخدام النسبة نفسها وتحت تأثير درجة الحرارة نفسها، حيث زدنا زمن التبادل إلى 15 و 20 دقيقة، حصلنا على النتيجة نفسها، أمّا من أجل زمن 30 دقيقة حصلنا على 7 أنماط.

غيرنا النسبة إلى 0.01 وأعدنا التجارب السابقة بتغيير زمن التبادل وثبيت درجة الحرارة، فكان أعلى عدد أنماط حصلنا عليه 11 نمط وذلك من أجل زمن 30 دقيقة.

- تم تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام نوع آخر من الزجاج BK10 باستخدام بارامترات العينة 3 بنفسها (زمن تبادل 15 دقيقة، نسبة مولية: 0.008) فكانت النتائج:

جدول ٦ : تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام شاردة الفضة في نوعين من الزجاج

الشاردة	نوع الزجاج	عدد الأنماط
Ag ⁺	m.s.	5
	BK10	1

غيرنا نوع الزجاج، استخدمنا زجاج BK10، من أجل نسبة مولية 0.008، درجة حرارة 370°C و زمن تبادل 15 دقيقة فحصلنا على نمط وحيد بسهولة بدل خمسة أنماط في زجاج m.s.

2.3- نتائج تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام شاردة K⁺

أجرينا عدّة تجارب على التبادل الأيوني باستخدام شاردة البوتاسيوم على زجاج m.s. و BK7، عند درجات حرارة مختلفة بجوار 370°C، نسب مولية مختلفة وزمن تبادل يتراوح من 5 إلى 90 دقيقة، فلم نحصل على أيّ نتيجة. استخدمنا مصهوراً ملحياً مكون من نترات البوتاسيوم فقط، وزدنا زمن التبادل حتى عدّة ساعات حتى ظهرت أنماط في تجربة الربط الموشوري، يوضّح الجدول (٧) درجة الحرارة المستخدمة وزمن التبادل لكل عينة، بالإضافة إلى عدد الأنماط المنتشرة في كل عينة:

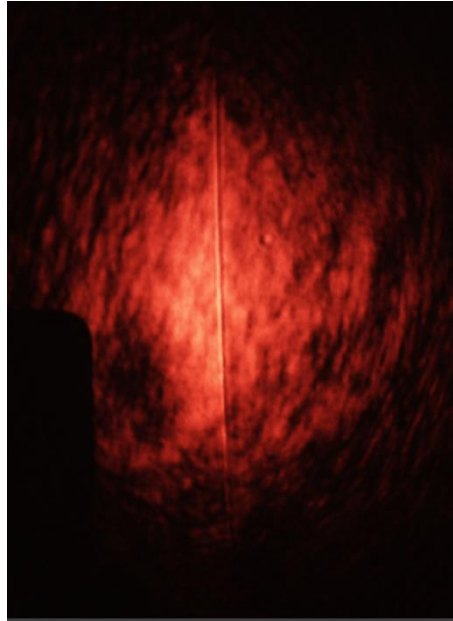
جدول ٧ : نتائج تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام شاردة البوتاسيوم

رقم العينة	درجة الحرارة	مدة التبادل (دقيقة)	نوع الزجاج	عدد الأنماط (TE)
٦	380°C	210	BK7	1
٧	380°C	180	m.s.	1
٨	385°C	420	m.s.	2
٩	385°C	570	m.s.	2

لم نستطع الحصول على أنماط حتى استخدمنا مصهوراً ملحيّاً مكوناً من نترات البوتاسيوم فقط، ومع ذلك استغرق وقتاً طويلاً حتى حصلنا على نمط واحد (ثلاث ساعات). وبالتالي شاردة البوتاسيوم ممكن أن يكون لها أفضليه في التطبيقات التي تتطلب مرشد بنمط وحيد.

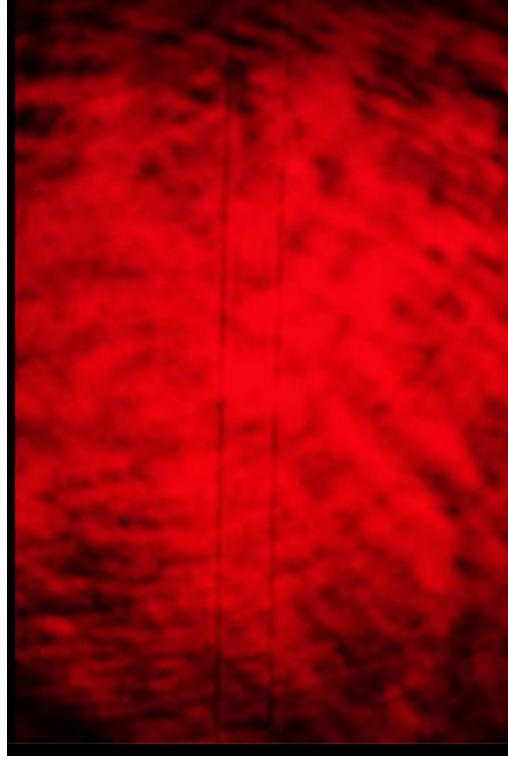
ذكرنا في فقرة سابقة نتائج تصنيع مرشد موجة باستخدام شاردة البوتاسيوم في زجاج BK7^[10]، في درجة حرارة 385°C تم الحصول على نمط وحيد من أجل أزمنة تبادل تراوحت من نصف ساعة حتى ساعة ونصف، أمّا من أجل ٣ ساعات فقد تم الحصول على نمطين، بينما حصلنا نحن على نمط وحيد من أجل زمن 3.5 ساعة في درجة حرارة 380°C. يوجد عدّة عوامل يمكن أن تسبب الفرق السابق منها نقاوة الملح المستخدم.

يظهر في الشكل (٢٢) خطوط m-lines الناتجة عن العينة ٦:



الشكل ٢٢: خط m-lines لمرشد موجة المُصنّع باستخدام شاردة البوتاسيوم (وقت التبادل: 210 دقيقة، درجة الحرارة: 380 درجة مئوية)

يظهر في الشكل (٢٣) خطوط m-lines الناتجة عن العينة ٨:



الشكل ٢٣: خط m-lines لمرشد موجة المُصنع باستخدام شاردة البوتاسيوم (وقت التبادل: ٤٢٠ دقيقة، درجة الحرارة: 380°C)

بقياس قرائن الانكسار الفعالة للأنماط في العينات السابقة كانت النتائج كما يلي:

جدول ٨ : قرائن الانكسار الفعالة للأنماط في مرشد الموجة المُصنع باستخدام شاردة البوتاسيوم

9	8	7	6	العينة
1.5228	1.5232	1.5226	1.5223	$n_{\text{eff-TE0}}$
1.5298	1.5269	-	-	$n_{\text{eff-TE1}}$

من أجل مرشد موجة وحيد النمط ومن أجل نوعي الزجاج BK7 و m.s. حصلنا على تغيير في قرينة الانكسار $\Delta n \cong 0.02$. أمّا من أجل مرشد الموجة متعدد الأنماط (العينة ٨ و ٩) حصلنا على تغيير في قرينة الانكسار $\Delta n \cong 0.03$.

3.3- نتائج تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام شاردة Li^+

شاردة الليثيوم لها خصوصية من حيث الحجم الصغير والاستقطابية الصغيرة مقارنة بشاردة الصوديوم التي تتبادل معها، الحجم الصغير يسبب تشوهات في الزجاج - ذكرنا سابقاً في الجدول (1) قيم القطر الذري للشوارد- لذلك أجرينا العديد من التجارب للحصول على الشروط الصحيحة لتصنيع مرشد موجة مستوي.

استخدمنا مصهور ملحي بنسب مولية مختلفة على مجال واسع من 0.02% حتى 100% عند درجات حرارة ($280^{\circ}C$ ، $330^{\circ}C$ ، $350^{\circ}C$ و $370^{\circ}C$)، زمن التبادل من دقيقة حتى ساعة كاملة. بدايةً استخدمنا زجاج m.s.، لاحظنا تشوه في الزجاج لذلك استخدمنا زجاج BK7 و BK10.

لم نستطع الحصول على مرشد موجة عند الشروط السابقة، في البداية لم نجد في الأدبيات المتاحة أي ذكر لأحد قام بتصنيع مرشد موجة باستخدام شاردة الليثيوم، ولكن ما دفعنا للتجربة وجود إشارات في أكثر من مرجع إلى إمكانية استخدام شاردة الليثيوم^[9]. بعد البحث وجدنا مقالين يتحدثان عن التبادل الأيوني باستخدام شاردة الليثيوم في زجاج^[12] soda-lime.

رفعنا درجة الحرارة (540° - 600°) مع مصهور ملحي مكون من نترات الليثيوم فقط وزمن تبادل قصير، عدة دقائق، باستخدام زجاج BK7. جميع التجارب أدت إلى تخريب في الزجاج، يظهر في الشكل (٢٤) سطح إحدى العينات السابقة التي تشوهت:



الشكل ٢٤: سطح عينة زجاج بعد إجراء تبادل أيوني مع شاردة الليثيوم

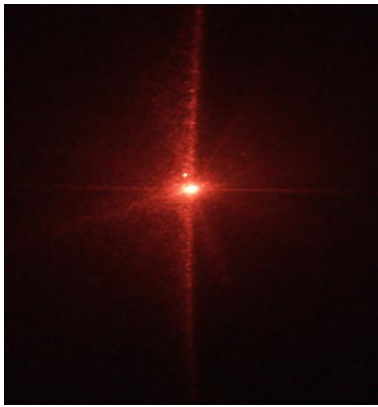
غيرنا نوع المصهور الملحي حيث استخدمنا مصهور ملحي يحوي 65% من نترات الليثيوم كما يوضح الجدول (٩):

جدول ٩ : يوضح بارامترات التجارب للتبادل الأيوني مع شاردة الليثيوم مع مصهور ملحي يحوي ٦٥% من نترات الليثيوم:

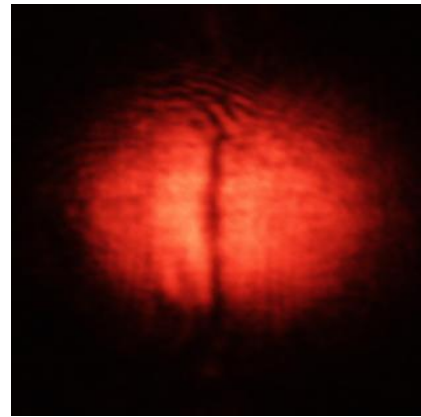
رقم العينة	النسبة المولية	درجة الحرارة °C	زمن التبادل (دقيقة)	نوع الزجاج
١	65%	450°	2	BK7
٣	65%	500°	3	BK7
٥	65%	500°	2	BK7
٦	65%	540°	2	BK7
٨	65%	500°	50 sec	BK7
٩	65%	450°	30 sec	BK7
١٠	65%	450°	10 sec	BK7

عند استخدام مصهور ملحي يحوي 65% من نترات الليثيوم ،درجة حرارة (450° و 500°) و زمن تبادل من 10 ثواني حتى 3 دقائق لا يحدث أي تشوه في زجاج BK7.

تم اختبار العينات السابقة لمشاهدة خطوط m-lines: العينة 5 (65% ،500°C ،2 min): ظهر نمط واحد (TE)، الشكل (٢٥):



(a)



(b)

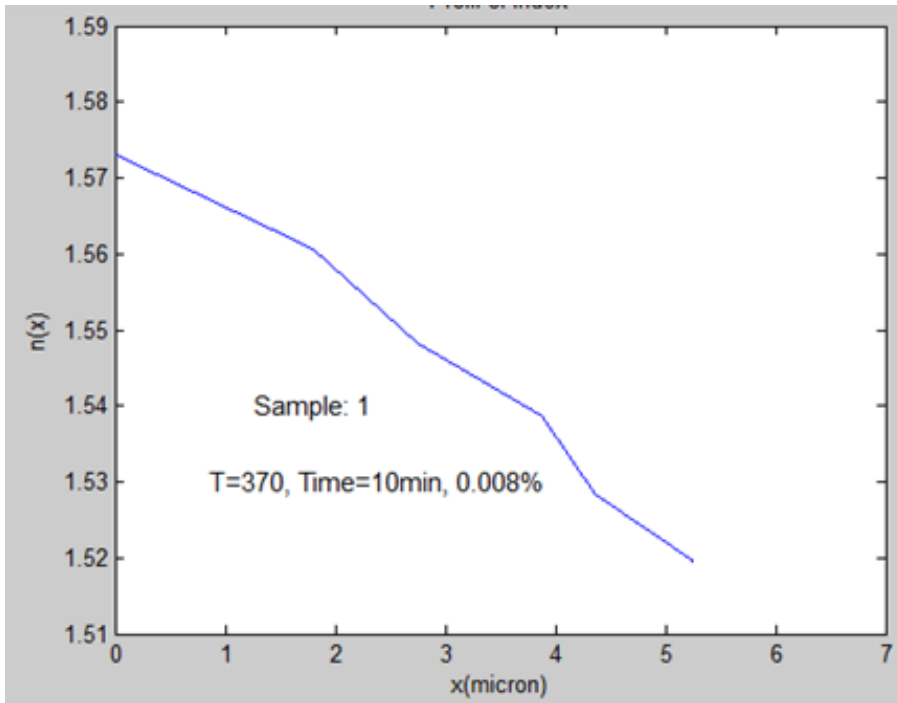
الشكل ٢٥: خط m-lines لمرشد تم تصنيعه بشارد الليثيوم (65% ،500°C ،2 min)، (a) m-lines المضيئة، (b) m-lines العاتمة

في تجاربنا على زجاج BK7 لاحظنا وجود تشوه عند استخدام نترات الليثيوم فقط مهما كانت درجة الحرارة. تمكنا من الحصول على مرشد موجة وحيد النمط في زجاج BK7 باستخدام مصهور ملحي يحوي 65% نترات الليثيوم عند درجة الحرارة 500 درجة و زمن تبادل دقيقتين.

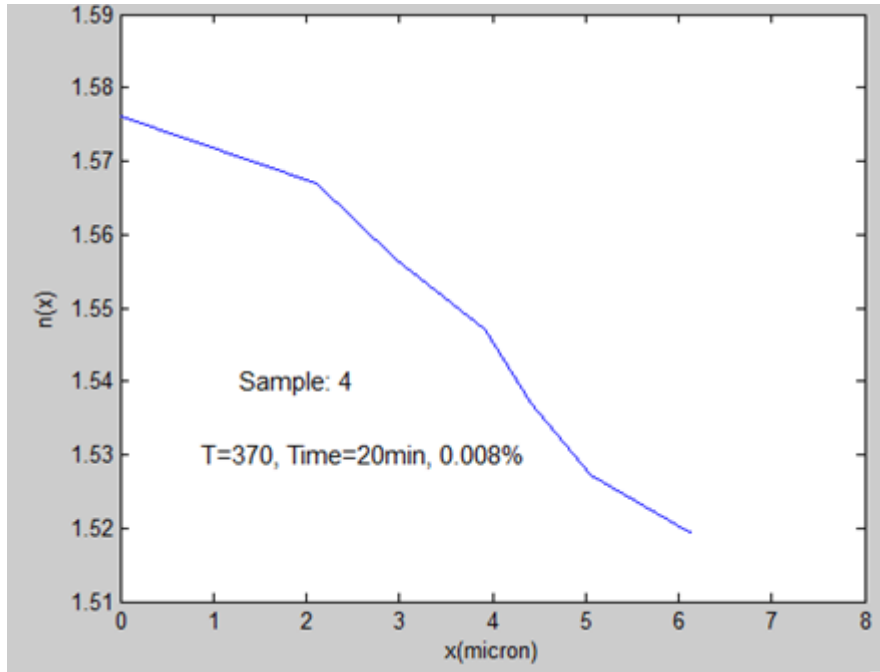
4.3- توصيف المرشد المصنع بطريقة التبادل الأيوني

تم كتابة برنامج حاسوبي باستخدام ماتلاب لرسم منحنى قرينة الانكسار ل مرشد الموجة المستوي بدلالة العمق عن السطح بالاعتماد على طريقة W.K.B العكسية (المعادلات: ٢٧، ٢٨ و ٢٩).

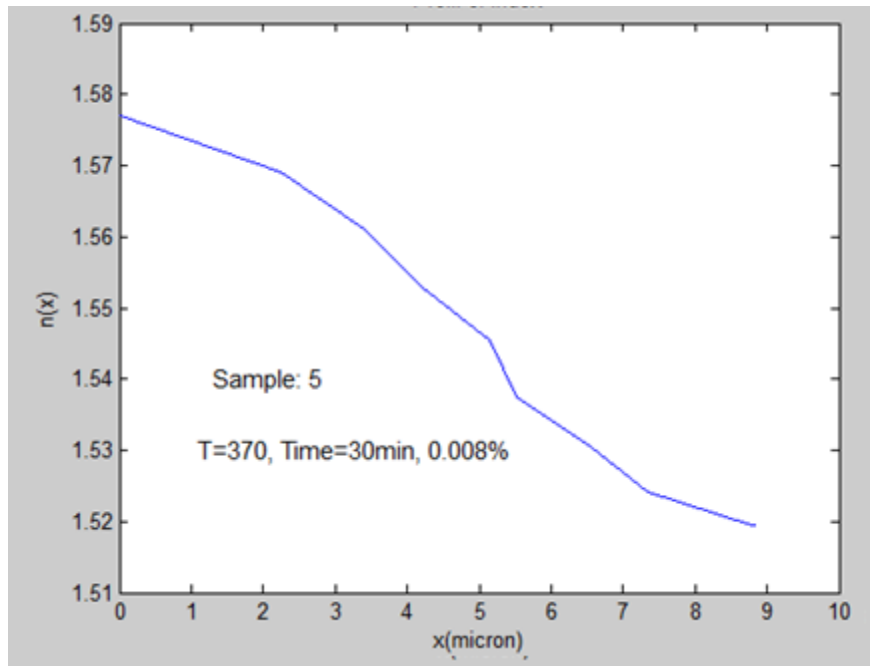
✓ منحنيات قرينة الانكسار للمرشحات المصنعة باستخدام شاردة الفضة



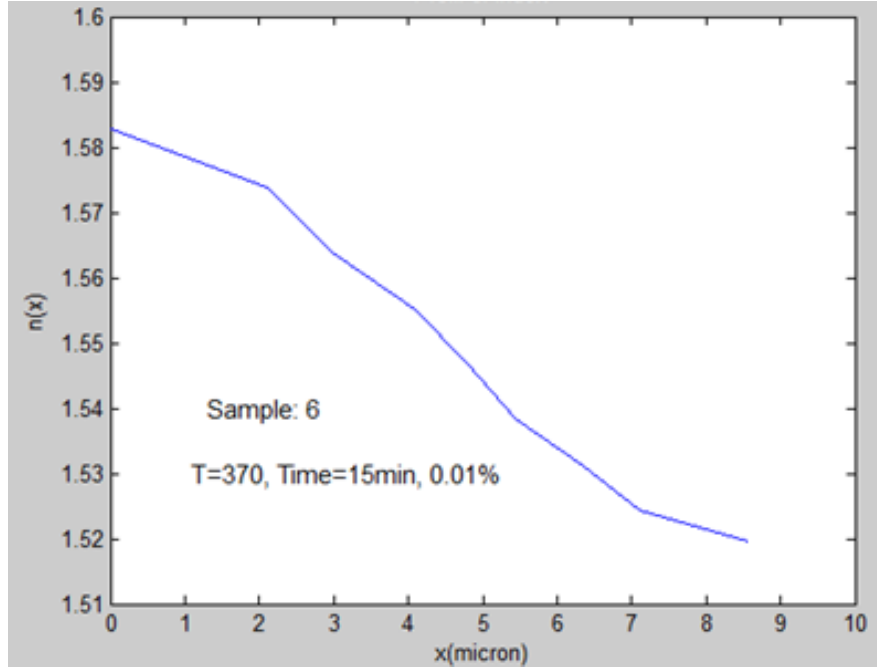
الشكل ٢٦: منحنى قرينة الانكسار لمرشد موجة مصنع بشاردة الفضة (درجة الحرارة 370°C، النسبة المولية 0.008، الزمن 10min)



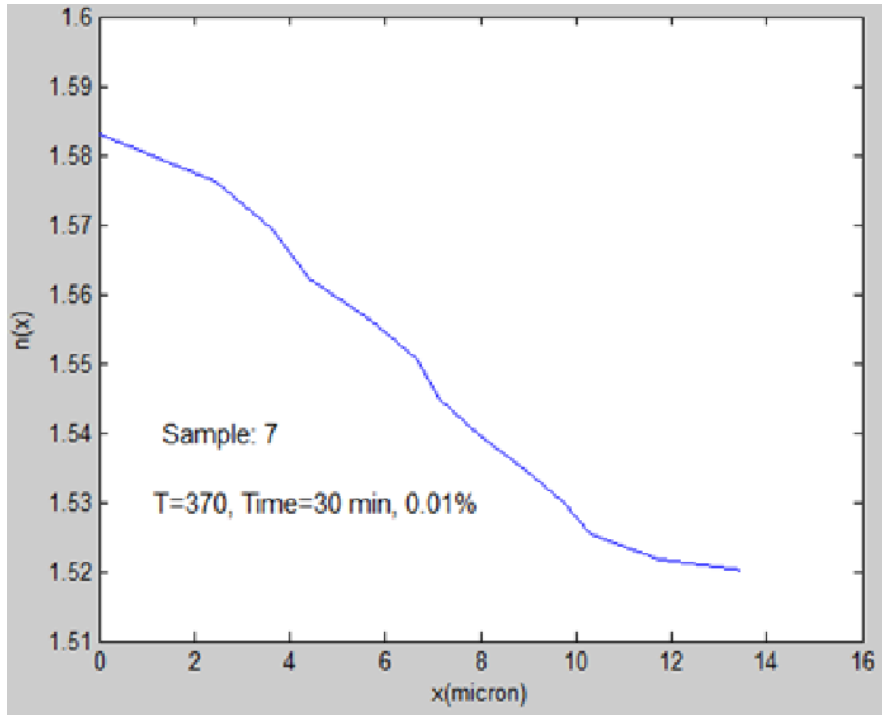
الشكل ٢٧: منحنى قرينة الانكسار لمرشد موجة مصنع بشاردة الفضة (درجة الحرارة 370°C ، النسبة المولية 0.008 ، الزمن 20 (min)



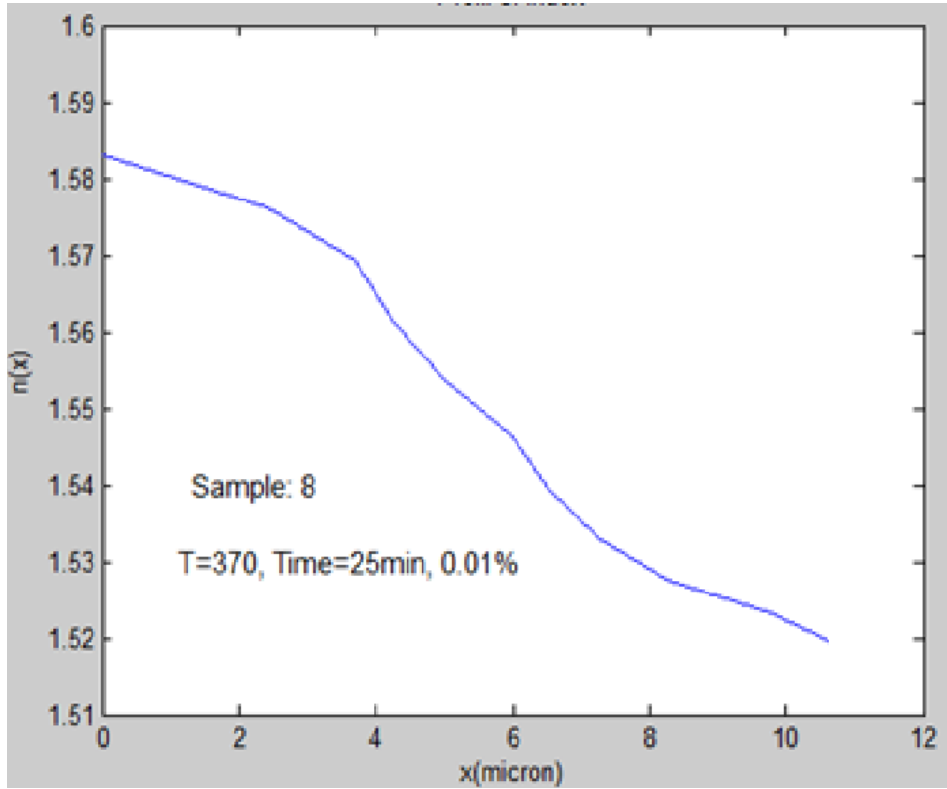
الشكل ٢٨: منحنى قرينة الانكسار لمرشد موجة مصنع بشاردة الفضة (درجة الحرارة 370°C ، النسبة المولية 0.008 ، الزمن 30min)



الشكل ٢٩: منحنى قرينة الانكسار لمرشد موجة مصنع بشاردة الفضة (درجة الحرارة 370°C ، النسبة المولية 0.01 ، الزمن 15min)



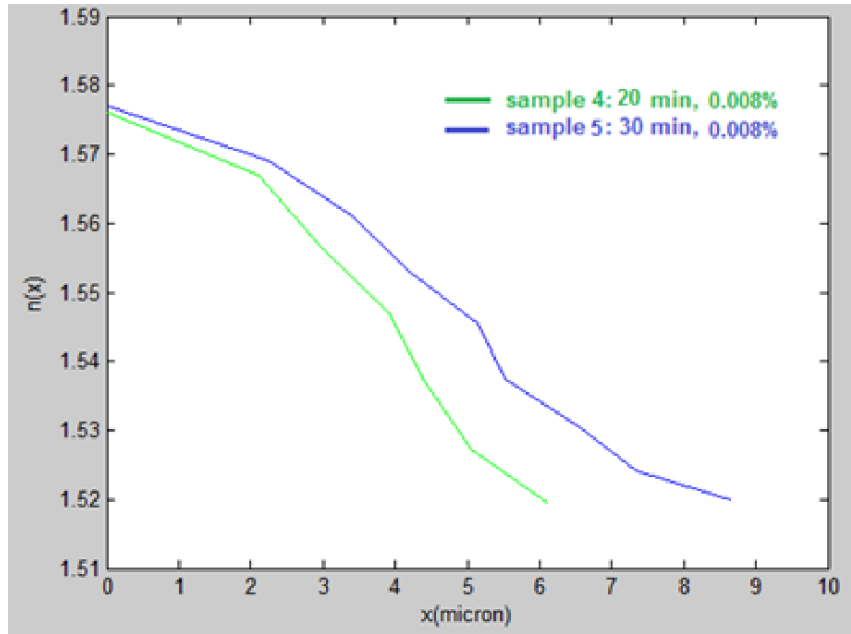
الشكل ٣٠: منحنى قرينة الانكسار لمرشد موجة مصنع بشاردة الفضة (درجة الحرارة 370°C ، النسبة المولية 0.01 ، الزمن 30min)



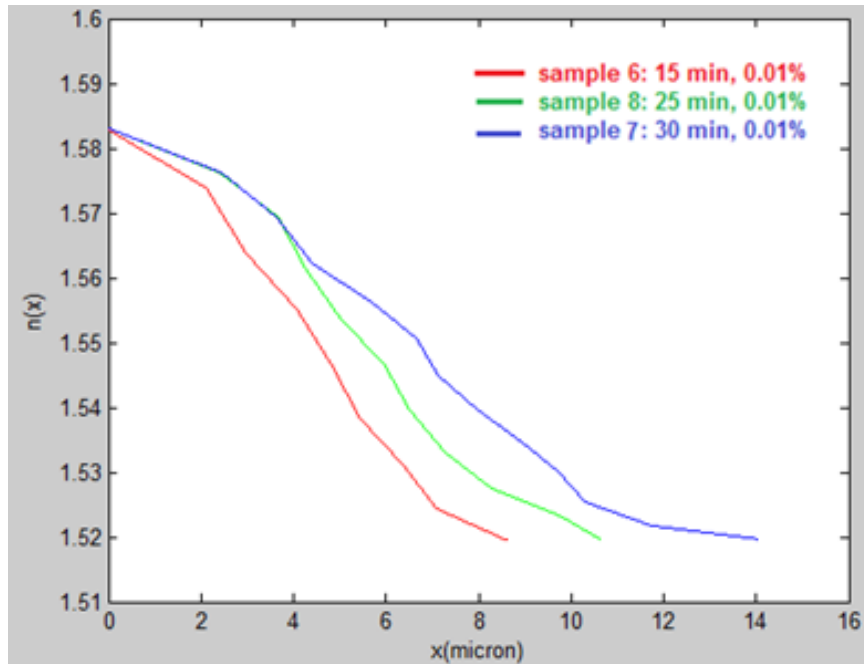
الشكل ٣١: منحنى قرينة الانكسار لمرشد موجة مصنع بشاردة الفضة (درجة الحرارة 370°C ، النسبة المولية 0.01 ، الزمن 25min)

حصلنا على مرشد موجة بعمق يصل إلى 10.5µm تقريباً من أجل زمن تبادل 30 دقيقة ونسبة مولية 0.01، وتغيير بقرينة الانكسار $\Delta n \cong 0.062$ عند استخدام تركيز 0.01.

يظهر في الشكل (٣٢) المنحنيات للعينات (4,5)، هذه العينات الثلاث لها البارامترات نفسها ماعدا زمن التبادل، و في الشكل (٣٣) المنحنيات الثلاث للعينات (6,7,5) والتي تختلف بزمن التبادل أيضاً. نلاحظ في كلا الشكلين أنّ العينات الثلاث لها تغير قرينة الانكسار نفسها ولكن تختلف سماكة المرشد (تزيد مع زيادة الزمن)، أي زيادة زمن التبادل يؤثر فقط على عمق المرشد.

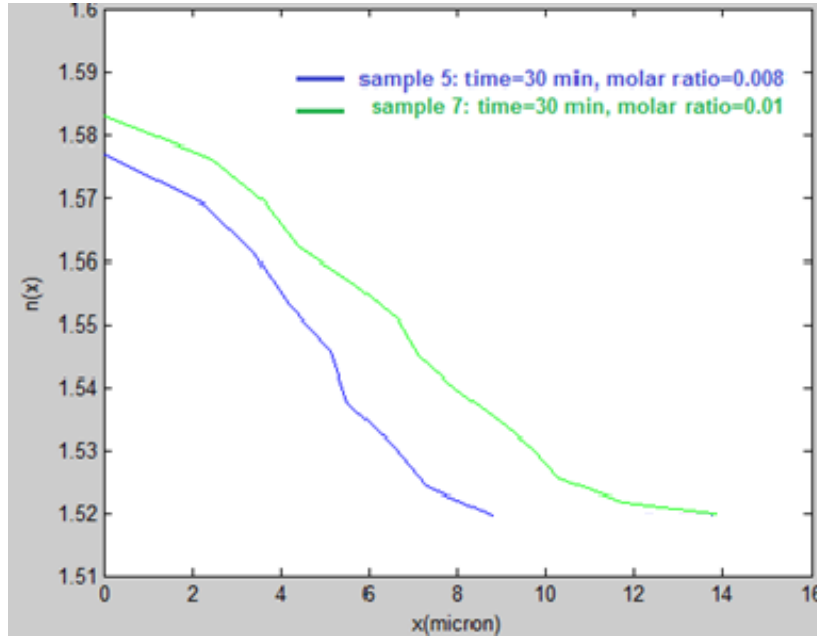


الشكل ٣٢: تأثير زمن التبادل على منحنى قرينة الانكسار من أجل نسبة مولية 0.008 (sample 1: 10min, sample 4: 20min, sample 5: 30min)



الشكل ٣٣: تأثير زمن التبادل على منحنى قرينة الانكسار من أجل نسبة مولية 0.01 (sample 6: 15min, sample 7: 30min, sample 8: 25min)

عند زيادة نسبة نترات الفضة في المحلول الملحي-مع تثبيت باقي البارامترات- تزيد قرينة انكسار المرشد. يظهر في الشكل (٣٤) المنحنيين الخاصين بالعينات (7,5)، العيتان لهما البارامترات نفسها باستثناء النسبة المولية ل نترات الفضة في المصهور الملحي.



الشكل ٣٤: تأثير النسبة المولية ل نترات الفضة في المصهور الملحي على منحنى قرينة الانكسار من أجل زمن تبادل 30 دقيقة

5.3- نتائج تصنيع مرشد باستخدام مادة PMMA

أجرينا ثلاث تجارب لتصنيع مرشد موجة باستخدام مادة PMMA، يوضح الجدول (١٠) زمن التغطية لكل عينة ونوع الزجاج:

جدول ١٠ : زمن التغطية ونوع الزجاج المستخدم في تجارب تصنيع مرشد موجة باستخدام مادة PMMA

رقم العينة	نوع الزجاج	زمن التغطية (دقيقة)
١	كوارتز	1
٢	BK7	0.5
٣	BK7	1

لم يظهر أي نمط بتجربة الربط الموشوري للشرائح السابقة. كما ذكرنا سابقاً يختلف عدد الأنماط التي تنتشر في المرشد حسب سماكة المرشد وبالتالي يوجد حد أدنى للسماكة حتى ينتشر النمط m (TE) في المرشد، تُعطي سماكة طبقة المرشد الدنيا اللازمة حتى ينتشر النمط m بالعلاقة^[17]:

$$W_{min} = \frac{1}{k \sqrt{n_1^2 - n_0^2}} \left(m\pi + \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{n_0^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_0^2}} \right) \right) \quad (31)$$

حتى تتشكل طبقة المرشد يجب أن تحقق السماكة شرط انتشار النمط الأساسي m=0، وبالتالي تكون السماكة الدنيا اللازمة حتى يصبح لدينا مرشد:

$$W_{min} = \frac{1}{k \sqrt{n_1^2 - n_0^2}} \left(\tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{n_0^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_0^2}} \right) \right) \quad (32)$$

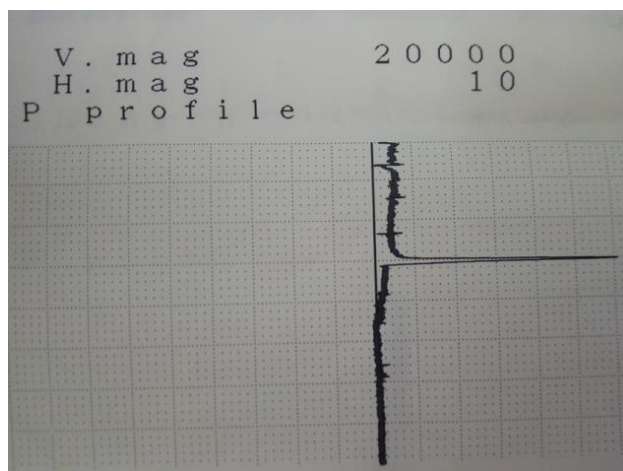
من أجل حساب الحد الأدنى اللازم لسماكة طبقة PMMA قرينة انكسارها $n_1=1.4905$ ، على شريحة من زجاج الكوارتز $n_0=1.45$ ، والوسط بين قاعدة الموشور و المرشد هو الهواء $n_2=1$ ، نطبق العلاقة السابقة مع العلم أن الليزر المستخدم هو ليزر He-Ne:

$$W_{min}=0.3658\mu\text{m} :m=0 \text{ (TE)}$$

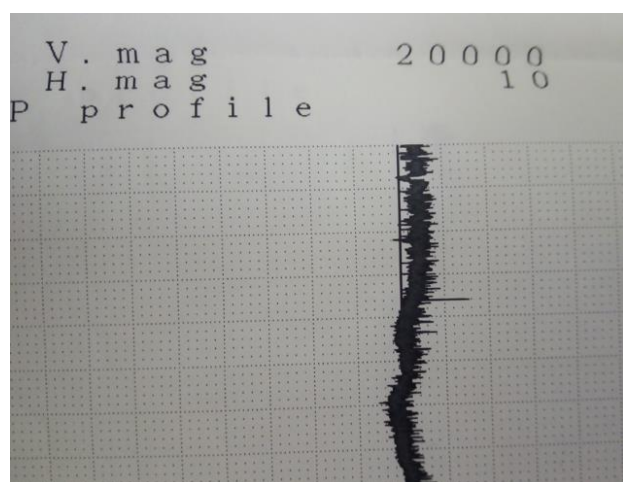
وبالتالي الحد الأدنى اللازم لسماكة طبقة PMMA ، على شريحة زجاج BK7، مع وجود طبقة من أكسيد السليسيوم المسامي:

$$W_{min}=0.137\mu\text{m} :m=0 \text{ (TE)}$$

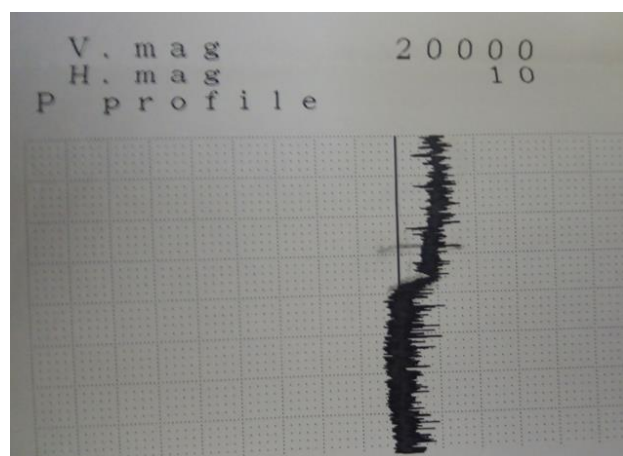
للتأكد من العينات تم قياس طبقة PMMA المتشكلة في مخبر المعايرة، النتائج موضحة بالأشكال (٣٥، ٣٦ و٣٧)، فكانت النتائج $(0.135\mu\text{m}, 0.25\mu\text{m})$



الشكل ٣٥: منحنى قياس سماكة طبقة PMMA المتشكلة على شريحة من زجاج الكوارتز



الشكل ٣٦: منحنى قياس سماكة طبقة PMMA المتشكلة على شريحة زجاج BK7



الشكل ٣٧: منحنى قياس سماكة طبقة PMMA المتشكلة على شريحة زجاج BK7، 2

أي أنّ سماكة الطبقة المُتشكلة أقل من الحد الأدنى المطلوب، يمكن حل هذه المشكلة بزيادة زمن التغطية. تم تصنيع عينات بزمن تغطية ٣، ٤ و ٨ دقائق على زجاج الكوارتز، ومن ٤ دقائق على زجاج BK7. قمنا بمشاهدة خطوط m-lines للعينات السابقة فكانت النتائج كما في الجدول التالي:

جدول ١١ : عدد الأنماط (TE) المنتشرة في المرشحات المصنعة باستخدام مادة PMMA

رقم العينة	نوع الزجاج	زمن التغطية (دقيقة)	عدد الأنماط (TE)
١	كوارتز	3	0
٢	كوارتز	4	1
٣	كوارتز	8	2
٤	BK7	4	2

لتكن W ثخانة طبقة PMMA ولتكن n قرينة انكسار الغشاء، و k طولية شعاع الموجة في الخلاء. تُكتب علاقة التشتت في مرشد الأمواج المستوي^[18]:

$$kW(n^2 - N_m^2)^{\frac{1}{2}} = \psi_m(n, N_m) \quad (33)$$

مع:

$$\psi_m(n, N_m) = m\pi + \phi_0(n, N_m) + \phi_2(n, N_m) \quad (34)$$

و

$$\phi_j(n, N_m) = \arctan \left[\left(\frac{n}{n_j} \right)^{2p} \left(\frac{N_m^2 - n_j^2}{n^2 - N_m^2} \right) \right] \quad (35)$$

$j=0,2$

n_0 قرينة انكسار الزجاج (substrate).

n_2 قرينة انكسار الوسط بين الموشور والمرشد.

N_m قرينة الانكسار الفعالة للنمط m .

عند انتشار نمط واحد في المرشد يمكن حساب سماكة طبقة المرشد مباشرةً من العلاقة السابقة، فمن أجل العينة ٢ من الجدول (١١) نجد أن سماكة طبقة PMMA:

$$W=1,06\mu\text{m}$$

6.3- تصنيع Y-junction

1.6.3- تطبيقات التبادل الأيوني في الزجاج

مع زيادة معدلات البيانات في الاتصالات، يمكن أن توفر البصريات منتجاً له عرض نطاق ترددي عالي مع تداخل منخفض للإشارة واستهلاك أقل للطاقة، وتقدم مرشحات الموجة وسط اتصال منخفض التكلفة. على الرغم أن هذا العمل يتركز في الغالب على مرشحات الموجة الخطوية (step index)، إلا أنه مؤخراً دخلت مرشحات الموجة المصنعة بطريقة التبادل الأيوني في هذه التطبيقات.

تُقدم شرائح الزجاج الرقيقة عالية الجودة وبأحجام كبيرة مادة جيدة لانتشار الإشارة الكهروضوئية، وتتمتع بنفس الوقت بخصائص حرارية، ميكانيكية، بصرية ممتازة

يوجد العديد من العناصر والمكونات التي يتم تصنيعها بواسطة التبادل الأيوني في الزجاج، والتي تتوافق في الدارات التكاملية الضوئية ومع الألياف الضوئية.

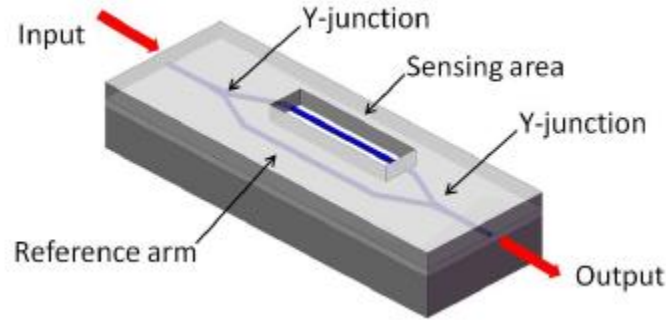
الأجهزة غير الفعالة (Passive Devices) هي الأدوات التي تُستخدم لنقل الإشارة، بعضها يتشكل من مرشد موجة متعدد الأنماط مثل splitter و wavelength multiplexers، وبعضها يتشكل من مرشد موجة وحيد النمط مثل couplers, tapers polarizers, ring resonators, and thermo-optic switches. تقريباً يمكن تصنيع جميع عناصر مرشد الموجة غير الفعالة بطريقة التبادل الأيوني.

• مقسم الحزمة (Splitter):

يُعتبر مقسم الحزمة (beam splitter) عنصر أساسي في الدارات التكاملية الضوئية، و المقسم 1x2 هو الأساس. يوجد أنواع عديدة لمقسمات الإشارة مثل مقسم على شكل حرف Y (Y-junction) و شكل حرف T (T-junction).

• مقياس التداخل ماخ-زيندر (Mach-Zehnder Interferometer):

مقياس التداخل ماخ-زيندر هو جهاز يستخدم لقياس فرق الطور بين حزمتين (موجتين)، صادرتين عن نفس المنبع، ينقسمان في مسارين مختلفين، ينتج فرق الطور عن فرق المسير بين الحزمتين^[13]، الشكل (٣٨):



الشكل ٣٨: مقياس التداخل ماخ-زيندر^[13]

في الدارة التكاملية MZI ينقسم الضوء في مسارين فرعيين باستخدام الوصلة التفرعية Y ، أحد الفرعين يكون الفرع المرجعي و الآخر الفرع الحساس. بعد مسافة ما تجتمع الحزمتان مجددا في وصلة Y ثانية.

2.6.3- الجزء العملي لتصنيع Y-junction

تم إجراء محاولات كثيرة لعمل قناع (mask) على الزجاج لتصنيع بعض العناصر مثل y -junction، وفي هذا السياق تم تجريب أقنعة باستخدام المواد التالية:

- MgF2
- ZrO2
- TiO2
- AlO2
- الكروم

يظهر في الشكل (٣٩) شريحة من الزجاج تم طليها بمادة الكروم بهدف تصنيع وصلة Y -junction:



الشكل ٣٩: شريحة زجاج مطلية بمادة الكروم لتشكل وصلة Y-junction

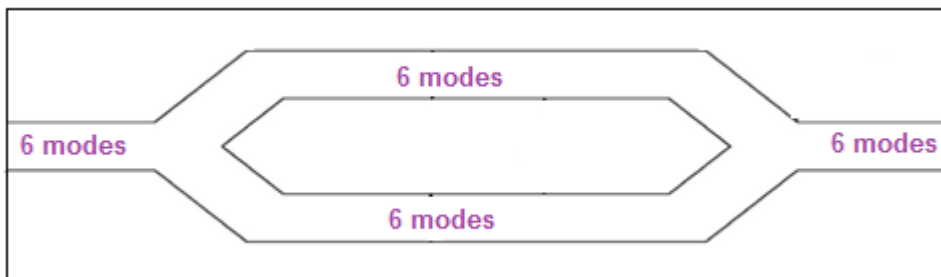
تم اجراء تجارب على عينات الزجاج المطلية بالمواد السابقة للتأكد من عزلها للزجاج حتى لا يحدث تبادل أيوني بين الزجاج و المصهور الملحي وعدم تأثرها بدرجة الحرارة المستخدمة، حيث تم وضعها في مصهور ملحي مكون من نترات الفضة و نترات الصوديوم في درجة حرارة 370°C ، بعد ذلك نزيل مادة القناع ونختبر الشريحة على تجربة الربط الموشوري، يوضّح الجدول (١٢) المادة المستخدمة لإزالة المواد السابقة عن الزجاج:

جدول ١٢: المواد المستخدمة لإزالة مواد الطلاء عن الزجاج

اسم مادة الماسك	مادة المذيب
MgF ₂	حمض الخل
ZrO ₂	حمض الفوسفور
TiO ₂	حمض كلور الماء
Al ₂ O ₃	لم نتمكن من إزالتها

النتائج:

١. بالنسبة للعينة المطلية بمادة الكروم، تفاعلت مادة الكروم مع المصهور الملحي وزالت تماما عن الزجاج، وبالتالي مادة الكروم غير مناسبة للتطبيق.
٢. بعد إزالة المواد ZrO_2 و TiO_2 ، MgF_2 عن شرائح الزجاج تم اختبار هذه الشرائح، وجدنا أنه حدث تبادل أيوني بين المصهور الملحي والزجاج، وبالتالي فهي غير مناسبة لصنع قناع.
٣. لم نتمكن من إزالة طبقة أكسيد الألمنيوم عن الزجاج لاختبار الزجاج، لذلك صنعنا قناع بسماكة لا تتجاوز 100nm بحيث يمكننا اختبار العينة على تجربة الربط الموشوري بدون إزالة طبقة أكسيد الألمنيوم. تم صنع قناع من أكسيد الألمنيوم بسماكة حوالي 60nm، وأجرينا على الشريحة تبادل أيوني مع شاردة الفضة، باختبار الشريحة على تجربة الربط الموشوري ظهر معنا ٦ أنماط في الفرع الأساسي للوصلة و ٦ أنماط في كل من الفرعين، الشكل (٤٠):



الشكل ٤٠: وصلة (Y-junction) المُصنعة باستخدام ماسك أكسيد الألمنيوم

تم النجاح في تصنيع مقسم إشارة على شكل (Y-junction) باستخدام قناع من مادة أكسيد الألمنيوم بسماكة أقل من 100nm، وتمّ التأكد من خصائصه.

الخاتمة

تمكنا من تصنيع مرشحات موجة مستوية بطرق مختلفة وقمنا بتوصيفها وفي هذا الإطار تمّ مايلي:

١. تصنيع مرشد موجة مستوي من النوع (graded index) باستخدام شاردة الفضة حيث حصلنا على مرشد موجة متعدد الأنماط بسماكة تصل إلى $13.5\mu\text{m}$ خلال زمن تبادل قصير (١٠-٣٠ دقيقة).

٢. تصنيع مرشد موجة مستوي من النوع (graded index) باستخدام شاردة البوتاسيوم، حيث استغرقت عملية التبادل ثلاث ساعات وحصلنا على مرشد بنمط وحيد بدرجة حرارة تبادل 380°C .

٣. تصنيع مرشد موجة مستوي من النوع (graded index) وحيد النمط باستخدام شاردة الليثيوم على شريحة من زجاج BK7، وتمّ التحضير عند درجة حرارة 500°C و زمن تبادل قصير (دقيقتين)، وحسب معرفتنا فهي المرة الأولى التي يُحضّر بها مرشد موجة باستخدام شاردة الليثيوم وزجاج BK7.

٤. تصنيع مرشد موجة مستوي من النوع (step index) باستخدام مادة PMMA على شريحة من الكوارتز، كما تمكنا من تصنيع مرشد من النوع نفسه على زجاج BK7 (ذو قرينة انكسار أكبر من قرينة انكسار مادة PMMA)، ولتحقيق ذلك قمنا بتشكيل طبقة من أكسيد السليسيوم المسامي (ذو قرينة انكسار أصغر من قرينة انكسار مادة PMMA) على سطح الزجاج ثمّ توضع طبقة المرشد من مادة PMMA. وحسب علمنا لم تُستخدم هذه الطريقة سابقاً.

٥. قمنا بتصنيع وصلة (Y-junction) باستخدام قناع من مادة أكسيد الألمنيوم.

٦. تمّ برمجة معادلات W.K.B العكسية باستخدام ماتلاب، يسمح هذا البرنامج برسم منحنى قرينة الانكسار بدلالة العمق اعتماداً على زوايا الأنماط المقاسة في تجربة الربط الموشوري.

الآفاق المستقبلية

- تصنيع مرشد موجة مستوية باستخدام زجاج BK7 ومصهور ملحي مكون من كبريتات الليثيوم، وإيجاد شروط العمل المناسبة.
- تصنيع مرشد أمواج حلزوني يمكن استخدامه في صناعة جايروسكوب الألياف الضوئية.
- اختبار ماسكات مختلفة مناسبة لصنع المرشد المذكور.
- استثمار نتائج العمل في صناعة محسات مرشحات الأمواج (planar waveguide sensors).

الملاحق

الملحق آ

برنامج الماتلاب لرسم منحنى قرينة الانكسار

```
clear all;
n_p=1.84667; %% index of prism

%% sample 7
num_of_mods=11;
n_s=1.583;
the_zero=336.41;
angles=[337.34 336.97 336.5 336.03 335.53 334.96 334.35 333.78 333.14 332.35
331.60];%% mesurment angles

%% حساب زوايا وقرائن الانكسار الفعالة للأنماط

for j=1:num_of_mods
    if (angles(j)<the_zero)

        i(j)=(the_zero-angles(j))*(pi/180); % in radian
        r(j)= asin( sin(i(j)) / n_p);
        teta(j)=(56*pi/180) +r(j);
    end
        if (angles(j)>the_zero)
            i(j)=(angles(j)-the_zero)*(pi/180); % in radian
            r(j)= asin( sin(i(j)) / n_p);
            teta(j)=(56*pi/180) -r(j);
        end
        n(j)= n_p *sin(teta(j));
    end

%%
x_s = 0;
lamda=0.6328; %%He-Ne laser
f=n_s -n(num_of_mods);
l=n_s+(3*n(num_of_mods));
x(1)= (9*lamda * power(2,0.5)) / (16*power(f,0.5)*power(l,0.5));

%%
es=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
y(1)=0; y(2)=x(1);
nem(1)=n_s;

for j=2:num_of_mods+1 %%
    nem(j)=n(num_of_mods-(j-2));
end
nem(num_of_mods+2)=1.5195; %% index of glass
```

```

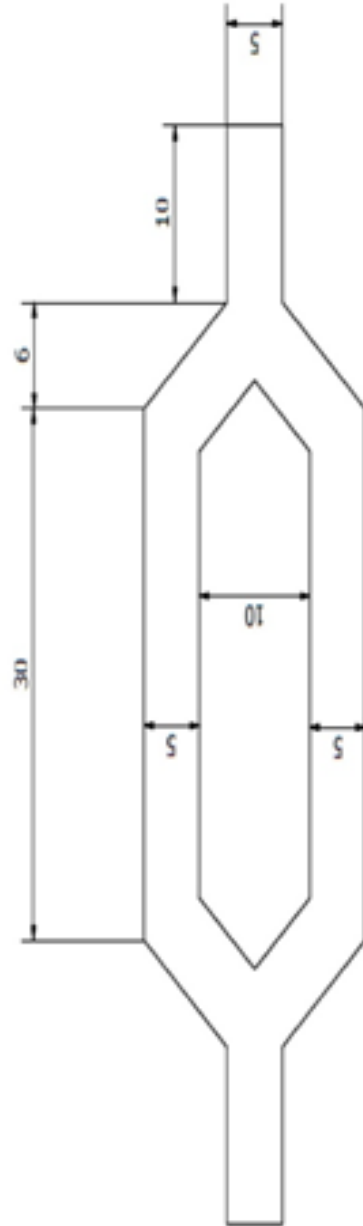
for m=1:num_of_mods
    for k=1:m
        p(k)= ((nem(k)+nem(k+1))/2)+ nem(m+2);
        w(k)=nem(k)-nem(m+2);
        z(k)=nem(k+1)-nem(m+2);
        sss(k)=(2/3)*power(p(k),0.5) * ((y(k+1)-y(k)) / (nem(k)-nem(k+1)))
* (power(w(k),3/2)-power(z(k),3/2));
        es(m)=es(m)+sss(k);
    end
    a(m)=3/(power(2,0.5)*power((nem(m+1) -
nem(m+2)),0.5)*power((nem(m+1)+(3*nem(m+2))),0.5));
    y(m+2)= y(m+1) + ( a(m) * ( ((4*m+3)*lamda)/8)-es(m) );
    %x(m+1)=y(m+2);

end
plot(y,nem,'blue');
hold all;
plot(f,v,'blue');
xlabel('x(micron)')
ylabel('n(x)')
title('Profil of index')
text(0.8,1.53,' T=370, Time=30min, 0.01%', 'FontSize',11)
text(1.2,1.54,' Sample: 7', 'FontSize',11)

```

الملحق ب

مخطط تصنيع Y-junction



الأبعاد بالميللي متر (mm).

المراجع الأجنبية

- [1] H. C. Lefèvre, " Fundamentals of the Interferometric Fiber–Optic Gyroscope", Optical Review, Vol. 4, pp.20–27, 1996.
- [2] A. Dutta, " Planar Waveguide Optical Sensors: Chapter 2", Springer International Publishing Switzerland, 2016.
- [3] M. Yulianto, A. Marzuki, and V. Suryanti, " Fabrication and characterization planar waveguides of Na+–Ag+/K+ by ion exchange and prism coupler" , AIP Conference Proceedings, Vol.1868, pp. 060006_1- 060006_6, 2017.
- [4] A. Tervonen, B. R. West and S. Honkanen, "Ion-Exchanged Glass Waveguide Technology: A Review", Optical Engineering, Vol.50, pp. 071107_1-071107_14, 2011.
- [5] CH. Moukdad, "Contribution a l'etude d'un multiplexeur de longueurs d'ondes optiques realise en technologie d'echanges ioniques dans le verre", doctoral thesis, france,1987.
- [6] A. Opilski, R. Rogozinski, k. Gut, M. Blahut and Z. Opilski, "Present state and perspectives involving application of ion exchange in glass", Opto-Electronics Review, Vol.2, pp.117-127, 2000.
- [7] S. Mehellou and F. Rehouma, " Détermination du profil d'indice d'un guide optique plan à gradient d'indice", Annales des Sciences et Technologie, Vol.3, pp.70-81, 2011.
- [8] Y. Ti, F. Qiu, Y. Cao, L. Jia, W. Qin, J. Zheng, G. Farrell," Photoluminescence of copper ion exchange BK7 glass planar waveguides" Springer Science+Business Media, Vol.43, pp. 7073–7078 , 2008.
- [9] X. Hong-Yun, T. Chuan-Xin, Z. Xiao-Wei, Z. Jie, " Refractive Index Profiles of Copper Ion Exchange Glass Planar Waveguides" Chin. Phys. Lett., Vol.29,pp.157-160 , 2012.
- [10] J. Gortych and D. G.H All," Fabrication of Planar Optical Waveguides by K+-Ion Exchange in BK7 and Pyrex Glass", IEEE Journal Of Quantum Electronics, Vol.22,pp.892-895, 1986.
- [11] R. Rogozinski and P. Karasinski, " Optical waveguides produced in ion exchange process from the solutions of AgNO₃-NaNO₃ for planar chemical amplitude sensors", Opto-electronics Review, Vol.13, pp.229-238, 2005.

- [12] L. Salavcova, P. Nekvindova, J. Cervena, A. Langrova, V. Drahos and J. Spirkova, "Study of fabrication and properties of few-modes planar lithium glass waveguides", Proceedings of SPIE , Vol.5036, pp.576-581, 2003.
- [13] S. Dante, D. Duval, B. Sepúlveda, A. B. González-Guerrero, J. R. Sendra, and L. M. Lechuga, " All-optical phase modulation for integrated interferometric biosensors", Optics Express, Vol.20, pp.7195-7205, 2012.
- [14] Z. Zhou and X. Duan," Integrated waveguide splitter fabricated by Cs⁺--Na⁺ ion-exchange ", Optics Communications, Vol.266, pp.129–131, 2006.
- [15] R. K. Lagu and R. V. Ramaswamy, "Process and Waveguide Parameter Relationships for the Design of Planar Silver Ion-Exchanged Glass Waveguides", Journal Of Lightwave Technology, Vol.LT-4, pp.176-180,1986.
- [16] G. Sorbello, S. Taccheo, M. Marano, M. Marangoni, R. Osellame, R. Ramponi and P. Laporta, "Comparative of Ag-Na thermal and field-assisted ion exchange on Er-doped phosphate glass", optical materials, Vol.17, pp.425-435,2001.
- [17] N. Tanio and T. Nakanishi, " Physical Aging and Refractive Index of Poly(methyl methacrylate) Glass", Polymer Journal, Vol.38, pp.814–818, 2006.

المراجع العربية

- [١٨] د. عقيل سلوم، "بناء منظومة تسمح بقياس قرينة الانكسار والسماكة لأغشية رقيقة"، المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، ٢٠١٣.
- [١٩] د. شكري المقداد، " مقرر الكترنيات بصرية"، المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، ٢٠١٨.

الخلاصة

تمّ في هذا المشروع تصنيع مرشد موجة مستوي ودراسة خصائصه أي رسم منحني قرينة الانكسار اعتماداً على طريقة W.K.B المعاكسة.

استخدمنا طريقتين لتصنيع مرشحات الموجة المستوية:

٣- اعتمدنا بشكل أساسي طريقة التبادل الأيوني في الزجاج لتصنيع مرشحات الموجة المستوية والتي تُعطي مرشداً له قرينة انكسار متدرجة (graded index waveguide)، تمكنا من تصنيع مرشد موجة باستخدام شاردة الفضة Ag^+ ، شاردة البوتاسيوم K^+ وشاردة الليثيوم Li^+ . تُظهر النتائج أنّه من السهولة الحصول على مرشد وحيد النمط باستخدام شاردة البوتاسيوم وبالتالي تكون مفيدة في التطبيقات التي تحتاج مرشد موجة وحيد النمط، أمّا شاردة الفضة فإنها تُعطي تغيرات كبيرة في قرينة الانكسار خلال زمن قصير (١٠-٣٠ دقيقة). بالنسبة إلى شاردة الليثيوم، تمكنا للمرة الأولى من صنع مرشد موجة على زجاج BK7 وإيجاد الشروط المناسبة لذلك.

٤- تم تصنيع مرشد موجة مستوي باستخدام مادة PMMA على شرائح من زجاج الكوارتز وزجاج BK7، حيث نحصل على مرشحات ذات قرينة انكسار قفزة (step index) وقد جرت دراسة شروط الحصول عليه وخصائصه.

الكلمات المفتاحية: مرشد الموجة المستوي، التبادل الأيوني، الربط الموشوري، خطوط m-lines.

Abstract

This project aims to fabricate and characterize planar waveguide.

Two techniques were used:

3- Graded index planar waveguides were fabricated by ion-exchange technique, and the characterization of the fabricated waveguides were done. i.e. determination of the refractive index profile in graded index waveguide. The refractive index profiles are determined by the inverse Wentzel-Kramers-Brillouin (IWKB) method. Ion-exchange occurs between Na^+ ions from the glass and Ag^+ , K^+ and Li^+ ions from molten salts. The K^+ - Na^+ exchange takes a few hours to form single mode waveguide which is attractive for applications where high accuracy is

important, The ion Ag^+ gives large changes of refractive index in short time (10–30 min). For ions Li^+ , planar waveguides were fabricated on BK7 glass.

4– Step index waveguides were fabricated by using PMMA material on glass BK7 and quartz.

Characterisation of these waveguides were made and results are presented.

Key words: planar waveguide, graded-index, step-index, ion-exchange, prism coupling and m-lines method.

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا Higher Institute for Applied Sciences & Technology

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا مؤسسة حكومية للتعليم العالي أحدثت بموجب المرسوم التشريعي رقم / ٢٤ / لعام ١٩٨٣، وذلك بهدف إعداد كوادر علمية متميزة من مهندسين وباحثين للإسهام الفاعل في عملية التطوير العلمي والتنمية في الجمهورية العربية السورية.

يمنح المعهد العالي درجة الإجازة في الهندسة في الاتصالات والمعلوماتية والنظم الإلكترونية والميكاترونيكس وعلوم وهندسة المواد وهندسة الطيران . يقبل المعهد العالي لدراسة هذه الاختصاصات شريحة منتقاة من المتفوقين في الشهادة الثانوية من الفرع العلمي . يتيح المعهد العالي أيضاً برامج ماجستير أكاديمي في نظم الاتصالات وفي التحكم والروبوتيك وفي نظم المعطيات الكبيرة ونظم المعلومات ودعم القرار وفي علوم وهندسة المواد وعلوم وهندسة البصريات . وأخيراً، يمنح المعهد العالي درجة الدكتوراه في الاتصالات والمعلوماتية ونظم التحكم والفيزياء التطبيقية . تُحدث في المعهد العالي اختصاصات جديدة بحسب متطلبات سوق العمل وتوجهات البحث والتطوير المحلية والعالمية.

يمارس المعهد العالي عبر جهود أطره وفعالياته العلمية المختلفة نشاطاً حثيثاً في البحث والتطوير، إذ ينفذ مشاريع ودراسات واستشارات متنوعة لصالح الجهات العامة والخاصة في القطر، كما يتعاون مع جهات خارج القطر في بعض المشاريع البحثية والتطويرية . يسعى المعهد أيضاً، عبر دورات تدريبية نظرية وعملية متاحة للقطاعين العام والخاص وللأفراد، إلى إفادة أوسع فئة من المهتمين من إمكانيات أطره العلمية ومختبراته . واستكمالاً لدوره الرائد في مجال التعليم ونشر العلم، ينشر المعهد العالي كتباً علمية عالية المستوى من نتاج أطره، منها ما هو تدريسي يوافق المناهج في المعهد العالي ويفيد شريحة واسعة من الطلاب الجامعيين عموماً، ومنها ما هو علمي ثقافي . يتيح المعهد العالي بعضاً من منشوراته على موقعه على الشبكة، كما يتيح إمكانية الاطلاع على رسائل الماجستير والدكتوراه المنفذة في المعهد العالي وعلى بعض منشورات طلابه وأطره من المقالات العلمية.

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، الجمهورية العربية السورية، دمشق، ص.ب ٣١٩٨٣

Higher Institute for Applied Sciences & Technology – HIAST

P. O. Box 31983, Damascus, Syrian Arab Republic

هاتف ٠٠٩٦٣١١٥١٢٣٨١٩ - فاكس ٠٠٩٦٣١١٥١٤٠٧٦١

بريد إلكتروني contact@hiast.edu.sy

موقع إلكتروني www.hiast.edu.sy