

حساب بارامترات الأمواج الضوئية المنتشرة في دليل موجي ميكروي ضوئي بلاستيكي شفاف لاستخدامها في الإلكترونيات الضوئية

الدكتور ثامر داؤد*

(تاريخ الإيداع 30 / 10 / 2011. قُبل للنشر في 15 / 2 / 2012)

□ ملخص □

شهد مجال الاتصالات في العقدين الماضيين تزايداً كبيراً في حجم المعطيات المتبادلة؛ وذلك نتيجة الاستخدام الكبير لخدمات اتصال جديدة مثل خدمات الأنترنت والفيديو والصوت وغيرها من التطبيقات. هذا ما استلزم التطوير في البنى التحتية لتقنيات التجميع Multiplexing في الإرسال وتقنيات فك التجميع Demultiplexing الملائمة لذلك في الاستقبال، خصوصاً تلك المستخدمة للدارات غير الفعالة.

البحث المقدم هنا يهدف بشكل أساسي إلى التحقق من إمكانية تشكيل أحد عناصر هذه الدارات، وهو دليل موجي ميكروي ضوئي بلاستيكي شفاف Optical Microwave Guide لاستخدامه في الدارات المتكاملة الضوئية Optical Integrated Circuits. هذا العنصر سيتم تصنيعه بزيادة قرينة انكسار منطقة محددة من المادة العازلة كهربائياً و ذلك باستخدام طريقة القناع Mask Method ؛ لذلك هذا البحث سيكون مركزاً على دراسة إمكانية انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية الضوئية في هذه البنية، ومن ثم تحديد هوية هذه الأمواج مع حساب بارامترات الأساسية (قرينة الانكسار الفعالة- ثابت الانتشار- الاستطاعة المحمولة بكل موجة-...).

إن هذا العمل سيتم إنجازه باستخدام برنامج الحساب Modulef ، وذلك بعد كتابة الكودات اللازمة لذلك.

الكلمات المفتاحية: بوليمير، دليل موجة ضوئي، طريقة القناع، بيئة MODULEF

* مدرس- قسم هندسة الاتصالات - كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية- جامعة حلب- حلب- سورية.

Calculating Propagated Optical Waves Parameters in Transparent Plastic Optical Microwave Guide for Optoelectronic Applications

Dr. Daoud Thaer *

(Received 30 / 10 / 2011. Accepted 15 / 2 / 2012)

□ ABSTRACT □

The field of communications witnessed in the last two decades a significant increase in the volume of data exchanged due to the extreme usage of new communication services such as internet services, video, audio and other applications. This development needed an advancement of the infrastructure of the multiplexing techniques of transmission and demultiplexing techniques of reception, which are appropriate for that; especially those used for passive circuits.

The following research mainly aims at verifying the possibility of forming one of these circuits and in this respect it is a transparent, plastic, Optical Microwave Guide intended to be used in the optical integrated circuits. This component will be manufactured by increasing the refractive index of a specific region of the electrically insulating material; by using the mask method.

Therefore, this research will concentrate on the possibility for the spread of optical electromagnetic waves in this structure and hence identifying these waves as well as calculating its basic parameters, i.e. (active refractive index, constant of propagation, power conveyed by each wave,...).

This work will be done through using the MODULEF program, after writing all codes necessary for this purpose.

Keywords: Polymer, Optical Waveguide, Modulef, Mask Method

*Assistant Professor, Department of Communication, Faculty of electrical and Electronic Engineering, Aleppo University, Aleppo, Syria.

مقدمة:

مع ظهور الليزر في الستينيات من القرن الماضي استطعنا فعلياً استخدام الضوء بوصفه وسيلة لنقل المعلومات، مقارنة مع أنظمة الاتصالات الراديوية Radoi Communications؛ إذ إن تردد الموجة الحاملة سيكون مضروباً على الأقل بـ 10000 مرة (حيث يتم استخدام الحزم الترددية بترددات عالية جداً من مرتبة 10^{14} Hz)، وهذا ما سمح باستخدام حزمة تمرير كبيرة جداً.

إن ظهور الجيل الأول من الألياف البصرية Optical Fibers عام 1966 سمح بانطلاق الاتصالات الضوئية، و من ثم تطور الشبكات الضوئية الأكثر تعقيداً، التي أدت إلى ظهور ما يعرف بالضوئيات المتكاملة لتنفيذ عناصر الوصلات الداخلية مثل: الموزعات - المعدلات - مضاعفات التردد و عكسها.... من ناحية ثانية فإن استخدام المواد العازلة كهربائياً ذات الضياعات الصغيرة جداً و الاستقرار الحراري الجيد يسمح بتطوير عناصر غير فعالة ضوئية وتنفيذها [1-4] مثل: شبكة براغ Bragg Network - أدلة موجة ضوئية مستوية Planer Optical wave guides - دليل موجة ميكروي ضوئي Optical Microwave Guide - رنانات ضوئية Optical Resonators - إن هذه العناصر يمكن أن تسمح لنا بالحصول على ما يعرف حالياً بالدارات المتكاملة الضوئية التي يمكن استخدامها في الاتصالات الضوئية.

أما من وجهة النظر التقنية فإن المواد العازلة كهربائياً والأكثر استخداماً لإنجاز هذه البنى هي الزجاج، والبوليمير، والمواد البلورية العازلة كهربائياً. سنقوم بالتركيز على مادة البوليمير بوصفه مادة مستخدمة لتشكيل دليل موجة الميكروي الضوئي ودراسته، ويمكن أن نقسم الطرق المستخدمة لعملية التصنيع وفق مبدئين: - مبدأ استخدام القناة - مبدأ الحفر أو الكتابة المباشرة Direct Writing، و سنقوم بدراسة البنية الناتجة عن المبدأ الأول؛ إذ تم إنجاز هذه الدراسة في مخابر جامعة حلب خلال العام الدراسي 2010-2011.

أهمية البحث وأهدافه:

البحث المقدم هنا يهدف إلى دراسة إمكانية تشكيل عناصر لاستخدامها في الدارات المتكاملة الضوئية وبشكل أدق دراسة إمكانية تشكيل دليل موجة ميكروي ضوئي ضمن مادة بلاستيكية شفافة عبر تغيير قرينة انكسار منطقة محددة من هذه المادة وذلك باستخدام طريقة الحفر غير المباشر أو ما تسمى بطريقة القناة. هذه الدراسة ستتركز في البداية على التحقق من إمكانية الحصول على انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية الضوئية ضمن هذه البنية (في المنطقة التي تم تغيير قرينة انكسارها) [1-5]، ومن ثم سيتم تحديد هوية مختلف هذه الأمواج، بالإضافة إلى حساب كل البارامترات الأساسية المتعلقة بكل موجة منتشرة. ختاماً سيتم دراسة تأثير كل من عمق منطقة الانتشار وقرينة انكسارها على كل بارامتر من هذه بارامترات.

طرائق البحث ومواده:

لتحقيق أهداف هذا البحث بشكل منهجي و مناسب فقد تم ترتيب خطواته وفق المراحل التالية:

- 1- تقديم موجز للمادة البلاستيكية العازلة كهربائياً و المستخدمة في هذه الدراسة.
- 2- شرح موجز لأهم الطرق المستخدمة في تعديل الخواص الفيزيائية (قرينة انكسار) للمادة العازلة كهربائياً وخصوصاً طريقة القناة وطريقة الحفر المباشر.

3- بعد ذلك نقوم بتقديم نتائج الدراسة الحسابية والتفصيلية للأمواج الممكن انتشارها في البنية الممكن إنجازها بطريقة القناع التي تم إنجازها بواسطة البرنامج MODULEF بعد أن تم كتابة الكودات الخاصة لدراستنا، ولكن قبل هذا العرض سنقوم باستعراض موجز لهذا البرنامج والبيئة التي يركز عليها.

4- تحليل النتائج ومناقشتها.

5- ختاماً سنقدم الاستنتاجات والتوصيات لهذه الدراسة.

1- تقديم مبسط للمادة المستخدمة في هذه الدراسة

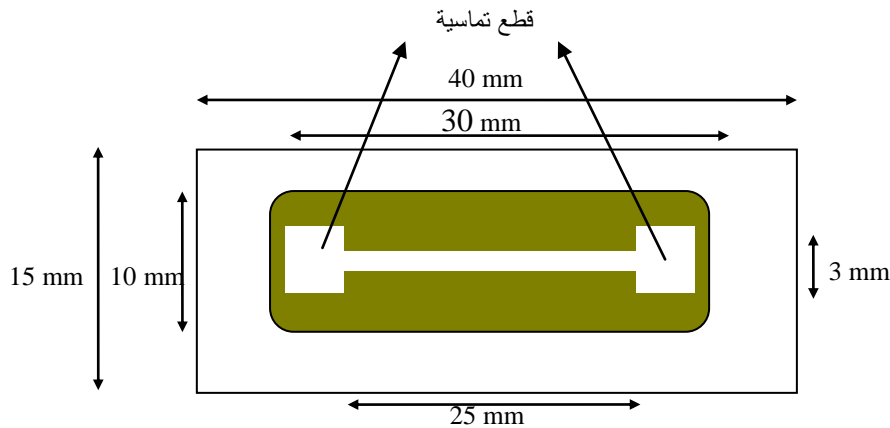
إن المادة العازلة كهربائياً المستخدمة هنا هي مادة عضوية بوليميرية من عائلة المواد البلاستيكية الشفافة من النوع (Poly(diethylene glycol bis(allylcarbonate))، التي لها الصيغة الكيميائية $C_{12}H_{18}O_7$ [6-7]، هذه المادة الشفافة لها قرينة انكسار n_s قريبة من 1.49 من أجل طول موجة بصري $\lambda \approx 630 \text{ nm}$ ، ولها خواص رائعة في مجال البصريات الكلاسيكية و خصوصاً أن ضياعاتها الذاتية تقريباً 0.4 dB/cm .

2 - طرق تعديل قرينة انكسار المادة العازلة كهربائياً

2 - 1 - تعديل قرينة الانكسار باستخدام مبدأ القناع (الحفر غير المباشر) [8-12]

إنّ العديد من المواد العازلة كهربائياً، وخصوصاً المادة البلاستيكية المدروسة عندما تتعرض لحزمة إشعاعية، (فوتونات γ - أيونات - إلكترونات)، وذلك باستخدام مبدأ القناع أو مبدأ الحفر المباشر فإنها تخضع لتغيرات بنيوية، هذه التغيرات تقود لزيادة موضعية في قرينة الانكسار المادة .

إن عملية التعديل باستخدام طريقة القناع تكون، كما هو موضح بالشكل (1) ؛ إذ إنّ المبدأ الأساسي لهذه الطريقة يتم بوضع طبقة رقيقة جداً من الذهب ($0,8 \rightarrow 0,9 \mu\text{m}$) و ذلك قبل تعريض المادة العضوية للحزم الإشعاعية.



الشكل (1) : يمثل المميزات الجيومترية لطريقة الأقتعة لتشكيل مجرى ضوئي

بعد اتباع الإجراءات (Protocols) اللازمة لهذه الطريقة نحصل على تغيير في قرينة انكسار المادة، كما هو موضح بالشكل (2)؛ إذ إنّ العرض الأصغري للمنطقة المصنعة الممكن الحصول عليه هو $50 \mu\text{m}$ ، أما قرينة الانكسار لهذه المنطقة فهي متغير حسب قدرة الجزئيات.

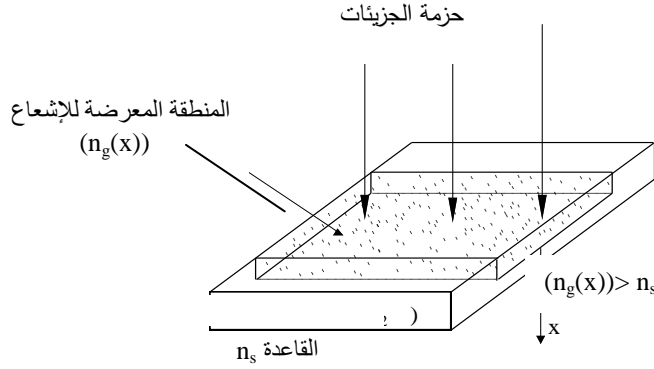
ومن ثم فإن مميزات البنية المراد دراستها ستكون كما يلي :

- عرض منطقة التوجيه : $l = 50 \mu\text{m}$

- سماكة منطقة التوجيه : $h = 3 \mu\text{m} \rightarrow 12 \mu\text{m}$

- قرينة انكسار Refractive Index منطقة القاعدة : $n_s \approx 1,490$

- قرينة انكسار منطقة التوجيه : $n_g = 1,510 \rightarrow 1,580$



الشكل (2) : البنية الضوئية المصنعة بطريقة القناع

2-2 - تعديل قرينة الانكسار باستخدام الحفر المباشر [7]، [13-16]

هذه الحالة تتميز بعدم الحاجة لاستخدام القناع الذي كان ضرورياً للطريقة السابقة؛ إذ إنَّ الإشعاع يكون بشكل مباشر (الحفر المباشر)، وذلك بواسطة تقنية الماسح الإلكتروني (SEM) Scanning Electron Microscope ؛ إذ إنَّه بواسطة هذه الطريقة يمكننا التحكم بالبنية المراد تنفيذها وخصوصاً الشكل؛ إذ إنَّه يمكننا الحصول على بنى بأشكال مختلفة مثل: الخط المعزول-البنية الدائرية (قرص)- بنية مشكّلة من خط و قرص - هذه الطريقة يمكن أن تكون ملائمة جداً لإنجاز البنى ذات الأبعاد الصغيرة نسبياً، والبنى المعقدة، والمشكلة من أكثر من عنصر.

3 - دراسة تحليلية و تفصيلية للأمواج الممكن انتشارها

هنا سنقوم بدراسة تحليلية تفصيلية لبنى يمكن أن يتم إنجازها بطريقة القناع، و هذه الدراسة تشتمل على تحديد مدى إمكانية انتشار الأمواج الضوئية ضمن هذه البنى ومن ثم تحديد بارامترات هذه الأمواج. إن هذه الدراسة سيتم إنجازها بالاعتماد على برنامج الحساب MODULEF.

3-1 - برنامج الحساب MODULEF

إن الاستخدام المتزايد للدارات غير الفعالة و ذلك في مجال الأمواج الميكروية Micro waves والأشعة تحت الحمراء Infra-Red و الضوئية Optical يفرض علينا تطوير طرق حساب دقيقة جداً لإجراء الدراسة الكهرومغناطيسية لهذه البنى؛ إذ إنَّ أغلب طرق التحليل الأخرى مثل [17-21] :

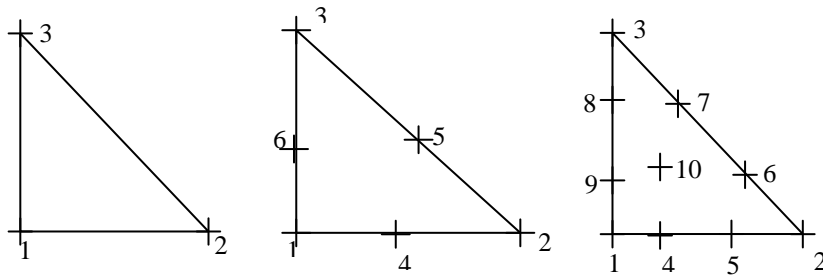
Marcatilli Methode - Effective Index Methode - Finite Difference Methods (FDM) - Finite Difference Methods for Linear Parabolic Equation- Finite-Difference Time-Domain Methods- High Frequency Structure Simulator(HFSS) - ANSYS V11- SP1 - COMSOL Multiphysic.

هي طرق تحليل ملائمة و جيدة للكثير من التطبيقات، و لكنها من أجل الدراسة الكهرومغناطيسية الدقيقة جداً فإنها غير كافية، فهي مثلا لا تأخذ بشكل كافٍ الوسط المحيط بالبنية أو طبيعة التحريض أو....
أما طريقة الحساب الرياضية التي تستخدم برنامج الحساب MODULEF [22-26] ، الذي تم تطويره، فإنها تسمح لنا بتنفيذ التحليل الكهرومغناطيسي في المستوي الترددي (التردد الطيني ، توزع الحقل الكهرومغناطيسي، السماحية الفعالة، ثابت الانتشار،...) و ذلك لبنية مكونة من عديد من الأوساط العازلة كهربائياً، المتجانسة، خطية. هذه البنية يجب أن تكون محددة بوساطة جدران كهربائية Electric Walls CCE أو جدران مغناطيسية Magnetic CCM Walls .

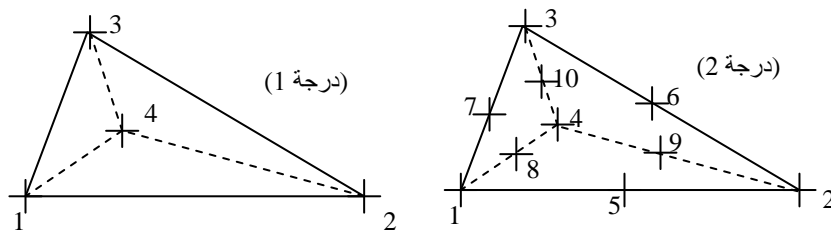
إن من أهم مزايا هذه الطريقة هو أنه يمكننا تطبيقها على البنى بمختلف الأبعاد، وكذلك يمكننا من خلالها دراسة مختلف أنواع الاقتران. بالمقابل إن أهم العقبات التي تواجهنا في هذه الطريقة هو حجم الذاكرة اللازم، ومن ثم زمن الحساب الطويل.

لإجراء الحساب بهذه الطريقة فإنه يجب اتباع المراحل التالية :

1 - إدخال البنية هندسياً (أبعاد البنية) و تشكيل ما يعرف بالشبكة العنكبوتية للبنية وذلك بتقسيم البنية تحت شكل مثلثات في حالة الدراسة ببعدين كما هو موضح بالشكل (3) ، أما إذا كانت الدراسة بثلاثة أبعاد فإن التقسيم يكون على شكل مجسمات كما هو موضح بالشكل (4) . مع الملاحظة أنه في المنطقة المتوقع انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية يجب أن نزيد عدد نقاط التقطيع؛ لأن ذلك يضمن الحصول على نتائج دقيقة، و لكن بالمقابل فإن الزمن اللازم للحساب سيكون كبيراً نسبياً، مع الملاحظة أن هذه المرحلة مستقلة عن جسم البرنامج MODULEF ، ولكن هي التي ستسمح لنا البدء في عملية الحساب الرياضي



الشكل (3) : مثال للتقسيم في حالة الدراسة ببعدين



الشكل (4) : مثال للتقسيم في حالة الدراسة بثلاثة أبعاد

2 - المرحلة الثانية يتم فيها البدء باستخدام البرنامج MODULEF و ذلك بكتابة كود يتضمن إدخال مميزات البنية (سماحيات البنية - الشروط الحديدية - ...)

3 - المرحلة الثالثة يتم فيها كتابة كود الحساب النهائي الذي يؤمن حساب الأمواج المنتشرة و كل ما يتعلق بها (نوع الموجة - السماحية الفعالة وثابت الانتشار المطابق لكل موجة - توزع شدة الحقول الكهرومغناطيسية - ...)

3-2 - علاقات الحساب

إن جوهر المسألة يكون بحساب الأمواج الكهرومغناطيسية بكل ما يتعلق بها في بنية يمكن أن تحتوي على العديد من الأوساط بمساحيات مختلفة وبنفوذية مغناطيسية متماثلة. البنية تكون محددة بسطوح فصل التي إما أن تكون دارة مقصورة كهربائية CCE وإما أن تكون مغناطيسية CCM ، التي سيكون عليها متوزع الشحن والتيارات السطحية. ضمن هذه الشروط فإن معادلات ماكسويل تكتب بالصيغة التالية [26-27] :

$$\left. \begin{aligned} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} &= -\overrightarrow{j_{ms}} \delta S_m - \frac{\partial \vec{b}}{\partial t} - \sum_{i=1}^n \overrightarrow{j_{mpi}} \delta S_{pi} \\ \overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} &= \overrightarrow{j_{es}} \delta S_e + \frac{\partial \vec{d}}{\partial t} + \overrightarrow{j_e} + \sum_{i=1}^n \overrightarrow{j_{epi}} \delta S_{pi} \\ \text{div} \vec{B} &= \rho_{ms} \delta S_m + \sum_{i=1}^n \rho_{mpi} \delta S_{pi} \\ \text{div} \vec{D} &= \rho_{es} \delta S_m + \sum_{i=1}^n \rho_{epi} \delta S_{pi} + \sum_{1 \leq i \leq j \leq N} \rho_{es_{ij}} \delta S_{ij} + \rho_e(v, \theta, z, t) \end{aligned} \right\} (1)$$

حيث :

$$\begin{aligned} n &: \text{عدد المنافذ للبنية} & N &: \text{عدد سطوح الفصل بين الأوساط} \\ i=1 \rightarrow n &: \text{رقم المنفذ} & p_i &: \text{مستوي المنفذ} \\ & & S_{pi} &: \text{سطح المستوي } p_i \\ \overrightarrow{j_{ms}} \delta S_m \text{ و } \rho_{ms} \delta S_m &: \text{هي التيارات و الشحن السطحية المغناطيسية للحامل } S_m \\ \overrightarrow{j_{es}} \delta S_e \text{ و } \rho_{es} \delta S_e &: \text{هي التيارات و الشحن السطحية الكهربائية للحامل } S_e \\ \rho_{es_{ij}} \delta S_{ij} &: \text{تمثل الشحن الكهربائية بين السطوح } S_{ij} \end{aligned}$$

من أجل تبسيط هذه العلاقات فإننا نتوضع دائماً بحالة أن مركبات الحقول الكهرومغناطيسية هي دورية بالنسبة إلى الزمن $\exp(-j\omega t)$ ، بالإضافة إلى أن الأوساط متجانسة و متماثلة ومن دون شحن، ومن ثم:

$$\overrightarrow{j_{e\omega}} = 0, \quad \rho_{e\omega} = 0, \quad \rho_{es_{ij}} = 0$$

بهذه الشروط سيكون لدينا :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{B_\omega} &= \mu_0 \mu_r \overrightarrow{H_\omega} \\ \overrightarrow{D_\omega} &= \epsilon_0 \epsilon_r \overrightarrow{E_\omega} \end{aligned}$$

حيث ϵ_r و μ_r : هي النفوذية النسبية و السماحية النسبية، و الدليل ω يدل على الدورية. ومن ثم العلاقة (1) تصبح بالشكل التالي :

$$\left. \begin{aligned} \vec{\text{rot}} \vec{E}_\omega &= -j_{ms_\omega} \vec{\delta S}_m + j\omega\mu_0\mu_r \vec{H}_\omega - \sum_{i=1}^n j_{m_{pi}} \vec{\delta S}_{pi} \\ \vec{\text{rot}} \vec{H}_\omega &= j_{es_\omega} \vec{\delta S}_e - j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r \vec{E}_\omega + \sum_{i=1}^n j_{e_{pi}} \vec{\delta S}_{pi} \\ \text{div} \vec{B}_\omega &= \rho_{ms_\omega} \vec{\delta S}_m + \sum_{i=1}^n \rho_{m_{pi}} \vec{\delta S}_{pi} \\ \text{div} \vec{D}_\omega &= \rho_{es_\omega} \vec{\delta S}_m + \sum_{i=1}^n \rho_{e_{pi}} \vec{\delta S}_{pi} \end{aligned} \right\} (2)$$

ومن ثم فإن معامل التداور $\vec{\text{rot}}$ في العلاقاتين السابقتين يمكن أن تنتشر باتجاه التوزعات الممكنة، ومن ثم فإن العلاقات النهائية للحقول الكهربائية و المغناطيسية المتوجب حلها يمكن أن تكتب بالصيغة التالية [26-27] :

$$\iiint_V \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \vec{\text{rot}} \vec{H} \right) (\vec{\text{rot}} \vec{\phi}_m) dV - k_0^2 \iiint_V \mu_r \vec{H} \cdot \vec{\phi}_m dV = -j\omega\varepsilon_0 \sum_{i=1}^n \iint_{S_{pi}} j_{m_{pi}} \vec{\phi}_m dS_{pi} \quad (3)$$

$$\iiint_V \left(\frac{1}{\mu_r} \vec{\text{rot}} \vec{E} \right) (\vec{\text{rot}} \vec{\phi}_e) dV - k_0^2 \iiint_V \varepsilon_r \vec{E} \cdot \vec{\phi}_e dV = -j\omega\mu_0 \sum_{i=1}^n \iint_{S_{pi}} j_{e_{pi}} \vec{\phi}_e dS_{pi} \quad (4)$$

حيث أن: ϕ_m و ϕ_e تمثل على التوالي تابع الفحص القياسي بحائط مغناطيسي و كهربائي
V : يمثل حجم البنية

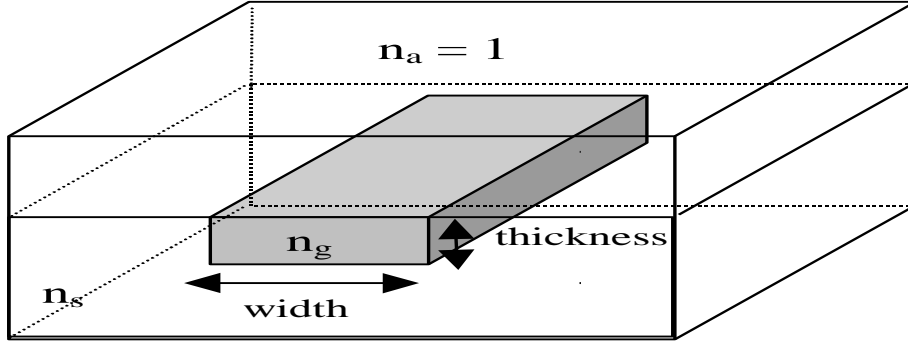
$$k_0^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0$$

إن الحقل سيكون محسوباً في كل عنصر من الشبكة العنكبوتية، مع الملاحظة أنه سيكون لدينا خياران من الحلول :

- حل من دون تحريض: في هذه الحالة يعني تحديد الأمواج المنتشرة في البنية مع كل البارامترات المتعلقة بهذه الأمواج. في هذه الحالة فإن القسم الثاني من المعادلات (3) و (4) سيكون معدوماً.
- حل بوجود تحريض: في هذه الحالة فإن البنية تحتوي عدداً من المنافذ التي تكون مداخل ومخارج لوسائط التحريض. في هذه الحالة فإن القسم الثاني من المعادلات (3) و (4) تمثل التوزع السطحي للتيار المغناطيسي على المستويات p_i ، و حل هذه العلاقات يعطي من أجل كل تردد معاملات النقل والانعكاس بمختلف المنافذ.

النتائج والمناقشة:

نتائج الدراسة التي سنقدمها هنا هي لبني ممكن إنجازها بطريقة القناع (مميزاتا موضحة بالفقرة (1-2)).
إن البنية المدروسة هنا مكونة من ثلاث طبقات: القاعدة بقرينة انكسار n_s محفورة فيها منطقة التوجيه بقرينة انكسار n_g و من الأعلى لدينا الهواء n_a كما هو موضح بالشكل (5).



الشكل (5): الشكل الهندسي للبنية المدروسة

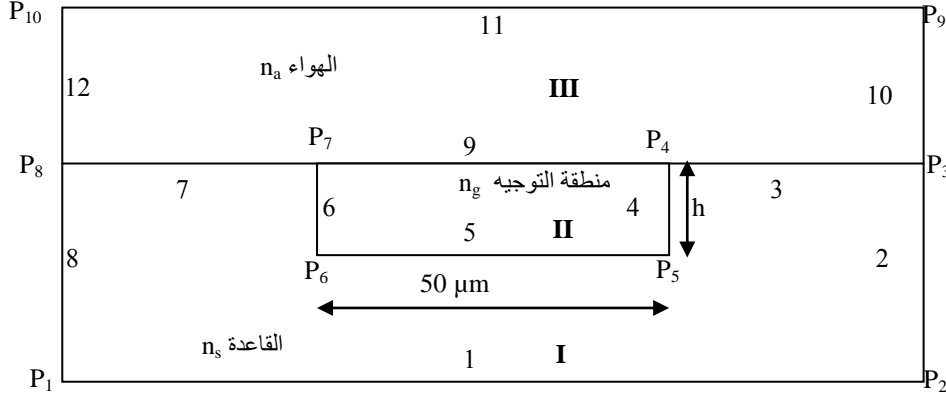
من أجل هذه البنية فإننا سنقوم بدراسة الانتشار في المستوي العرضي Transverse Plan العمودي على محور الانتشار، لذلك سيتم انجاز هذه الدراسة بواسطة البرنامج MODULEF باستخدام الخيار الأول من الحلول (الحل من دون تحريض) على المسقط الأمامي للبنية السابقة؛ لذلك الخطوات الواجب اتباعها لإنجاز الدراسة بهذه الطريقة ستكون بتنفيذ المراحل الثلاث السابقة وذلك وفق التسلسل التالي :

-نقطة البداية تكون بإدخال الأبعاد الهندسية للبنية بإدخال إحداثيات النقاط : $p_1, p_2, p_3, \dots, p_{10}$

-نقوم بتزقيم خطوط البنية التي تربط بين النقاط السابقة : 1, 2, 3, ..., 12

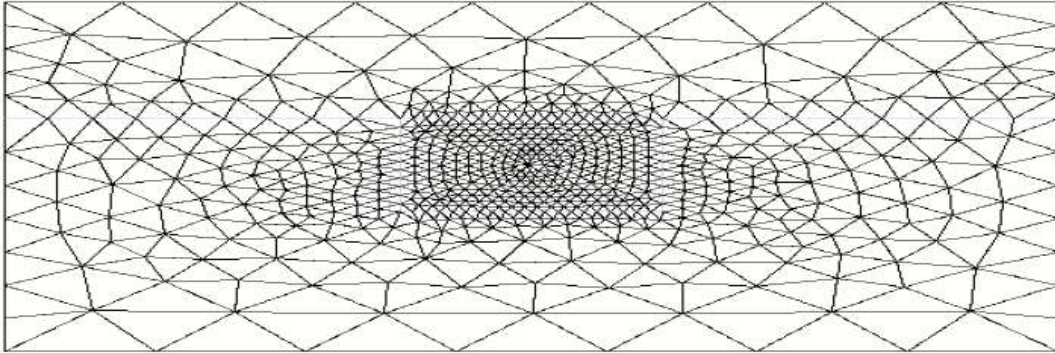
-ثم نقوم بتشكيل مسارات مغلقة و بحيث تمثل المناطق المشكلة للبنية (في حالتنا ثلاث مناطق : I, II, III) ،

كما هو موضح بالشكل (6)



الشكل (6): يبين المسقط الأمامي للبنية المدروسة مع نقاطها و خطوطها و مساراتها المغلقة

نقوم بعد ذلك بتقسيم كل خط من الخطوط لعدد من الأقسام ، و بحيث أنه يجب أن يزيد عدد نقاط التقسيم في المناطق التي نتوقع تمركز القدرة فيها بشكل كبير (هنا سيكون التركيز بالمنطقة II). بهذا التقسيم نحصل على الشبكة العنكبوتية التي يتحدد فيها عدد النقاط - عدد العقد - عدد العناصر - عدد المثلثات. في حالتنا هذه فإن الشبكة العنكبوتية الموضحة بالشكل (7) من أجل السماكة $8 \mu m$ وإن عدد النقاط : 899 نقطة - عدد العقد : 899 عقدة - عدد العناصر : 1744 عنصراً - عدد المثلثات : 1744 مثلاً.



الشكل (7): مثال عن الشبكة العنكبوتية للبنية المدروسة

بعد هذه المرحلة يتم كتابة برنامج الحساب الرياضي الذي يجب أن يلائم البنية المدروسة، و هذا البرنامج يتألف من قسمين:

-الأول يتم من خلاله التعريف بالميزات الفيزيائية للبنية (سماحية الأوساط، النفوذية المغناطيسية، الناقلية، طبيعة جدران الفصل بين أوساط البنية (جدار كهربائي أو جدار مغناطيسي)،...)،
 -الثاني يمكننا من خلاله، وبعد إدخال التردد المراد الدراسة عنده، تحديد كل البارامترات الكهرومغناطيسية للبنية (قيم مركبات الحقول الكهرومغناطيسية وفق الإحداثيات المختارة (ديكارتية، أسطوانية)، ثابت الانتشار، الترددات الطنينية، السماحيات الفعالة، الاستطاعة المحمولة،...)، و ذلك وفق صيغة الحساب المختارة في هذا القسم من البرنامج.

بعد إنجاز كل هذه الخطوات، فإن البرنامج سيقوم بحساب الحقول الكهرومغناطيسية في كل عقدة و قطعة من الشبكة العنكبوتية، ومن ثم سيقوم بحساب المركبات الكهرومغناطيسية لكل الأمواج الموجودة ضمن هذه البنية (موجّه أو غير موجّه) مع حساب كل البارامترات المتعلقة بكل موجة.

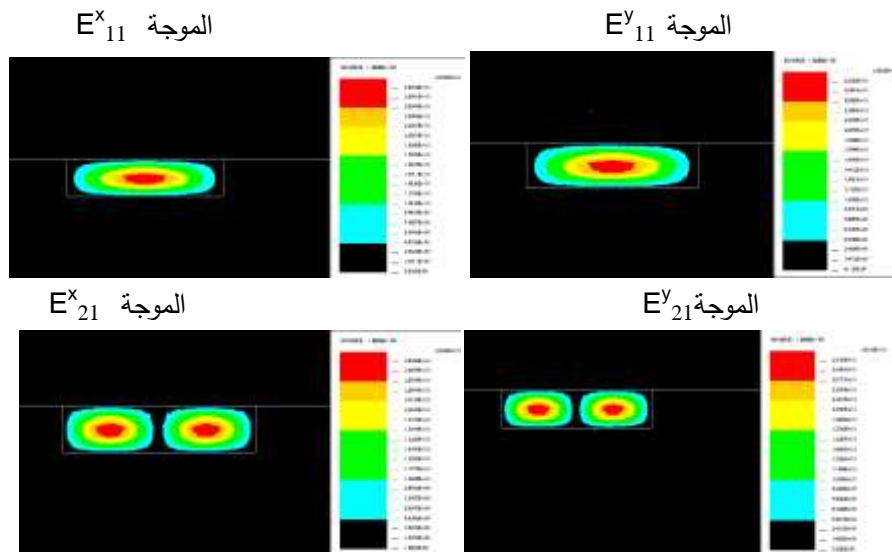
لذلك فقد تم التمكن من تحديد كل الأمواج الضوئية المنتشرة في هذه البنية، وتم دراسة تأثير كل من سماكة منطقة التوجيه $3\mu\text{m} \leq h \leq 11\mu\text{m}$ و قرينة انكسارها $1,51 \leq n_g \leq 1,58$ على بارامترات البنية و ذلك من أجل تردد هو بجوار 500000 GHz.

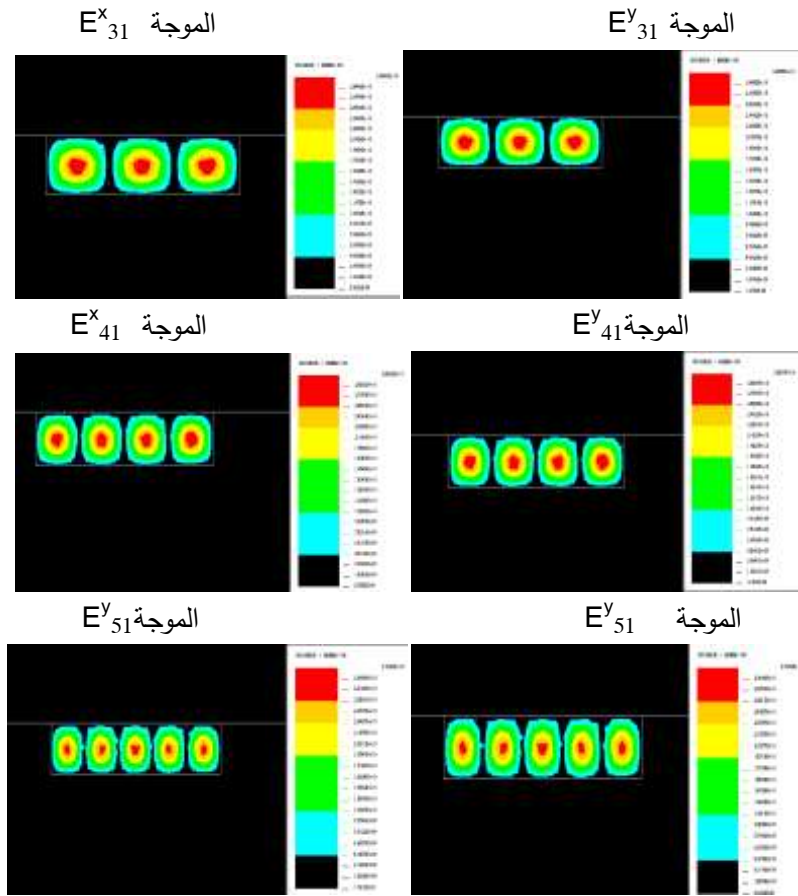
يبين الجداول (1) نتائج الحساب للأمواج العشرة الأولى الممكن انتشارها في هذه البنية مع كل البارامترات المتعلقة بكل موجة (الحقول الكهرومغناطيسية المعترضة - الاستطاعة النسبية لمنطقة التوجيه بالنسبة إلى الاستطاعة الكلية الكلية $p_{\text{التوجيه}}/p_{\text{الكلية}}$ - السماحية الفعالة ϵ_{eff} - ثابت الانتشار β)، و ذلك فقط من أجل $h = 6\mu\text{m}$ و $n_g = 1,51$.

الجدول (1): نتائج الأمواج المنتشرة E_{lm}^y و E_{lm}^x من أجل $n_g = 1,5$ و $h = 6\mu m$

\square rad/mm	$= n_e^2 \epsilon_{eff}$	$P_{الكلي} / P_{التوجيه}$	المركبات المعترضة (E_y, H_y) micro J/m	المركبات المعترضة (E_x, H_x) micro J/m	الموجة المنتشرة
15814,65	2,277510	0,9819637	$0,161 \times 10^{-1}$ $0,481 \times 10^0$	$0,481 \times 10^0$ $0,161 \times 10^{-1}$	E_{11}^x
15814,62	2,277500	0,9814614	$0,481 \times 10^0$ $0,157 \times 10^{-1}$	$0,157 \times 10^{-1}$ $0,481 \times 10^0$	E_{11}^y
15814,13	2,277363	0,9811471	$0,141 \times 10^{-1}$ $0,483 \times 10^0$	$0,484 \times 10^0$ $0,141 \times 10^{-1}$	E_{21}^x
15814,11	2,277360	0,9810075	$0,483 \times 10^0$ $0,144 \times 10^{-1}$	$0,144 \times 10^{-1}$ $0,483 \times 10^0$	E_{21}^y
15813,33	2,277130	0,9809092	$0,420 \times 10^0$ $0,740 \times 10^{-1}$	$0,740 \times 10^{-1}$ $0,420 \times 10^0$	E_{31}^y
15813,32	2,277130	0,9809770	$0,740 \times 10^{-1}$ $0,420 \times 10^0$	$0,420 \times 10^0$ $0,740 \times 10^{-1}$	E_{31}^x
15812,31	2,276840	0,9814614	$0,490 \times 10^0$ $0,171 \times 10^{-3}$	$0,173 \times 10^{-3}$ $0,490 \times 10^0$	E_{41}^y
15812,30	2,276830	0,9818421	$0,157 \times 10^{-3}$ $0,490 \times 10^0$	$0,490 \times 10^0$ $0,159 \times 10^{-3}$	E_{41}^x
15810,92	2,276440	0,9828230	$0,215 \times 10^{-1}$ $0,476 \times 10^0$	$0,470 \times 10^0$ $0,216 \times 10^{-1}$	E_{51}^x
15810,93	2,276442	0,9826583	$0,470 \times 10^0$ $0,215 \times 10^{-1}$	$0,216 \times 10^{-1}$ $0,470 \times 10^0$	E_{51}^y

والشكل (8) يبين توزيع كثافة الحقول الكهرومغناطيسية في المستوي المعترض للانتشار للمطابقة للأمواج المنتشرة و المبينة بالجدول 1



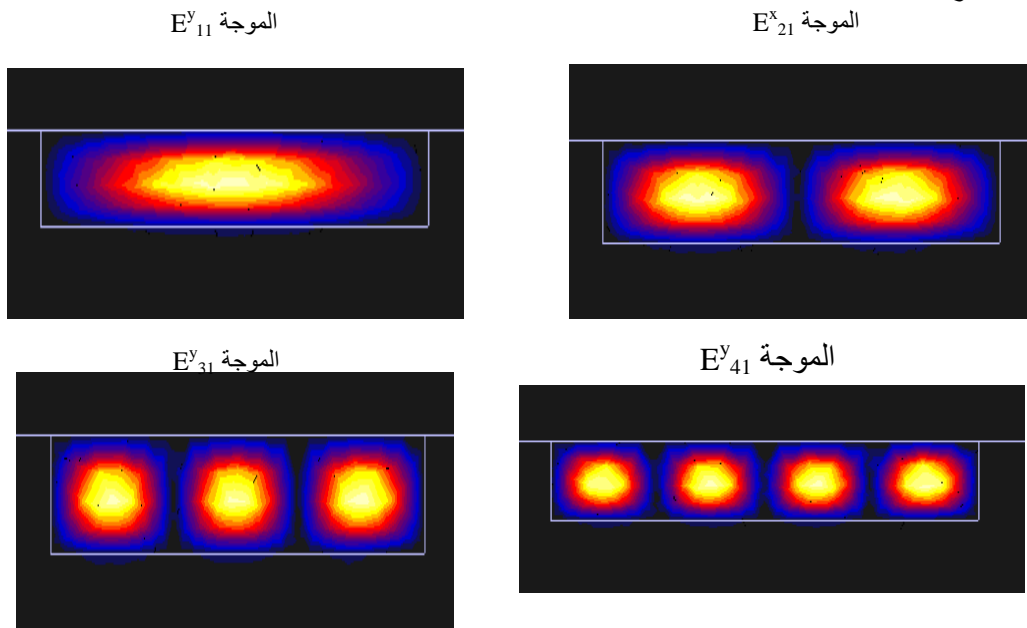


الشكل (8): توزيع كثافة الحقول الكهرومغناطيسية في المستوي المعترض للانتشار وذلك من أجل مختلف

الأمواج المنتشرة بحالة $h = 6 \mu\text{m}$

الشكل (9) يعرض توزيعاً لكثافة الحقول الكهرومغناطيسية في المستوي المعترض للانتشار وذلك لبعض

الأمواج المنتشرة بحالة $h = 11 \mu\text{m}$



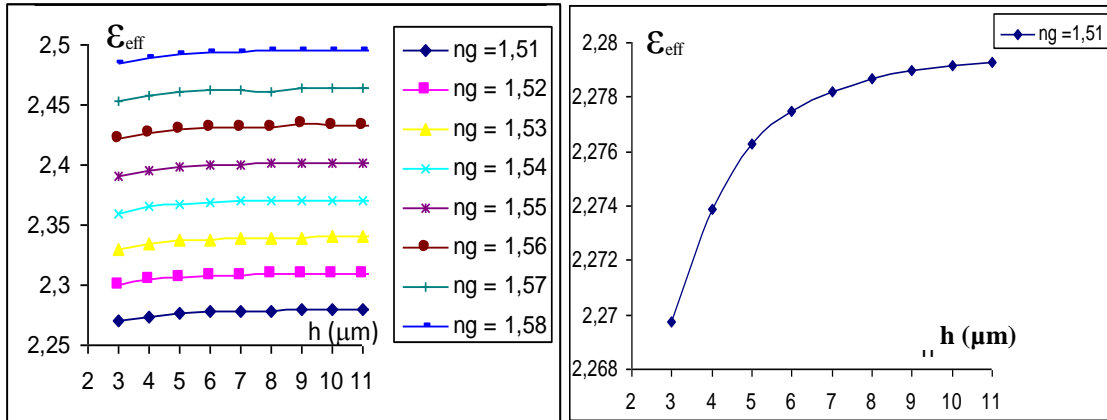
الشكل (9): توزيع كثافة الحقول الكهرومغناطيسية في المستوي المعترض للانتشار وذلك من أجل مختلف

الأمواج المنتشرة بحالة $h = 11 \mu\text{m}$

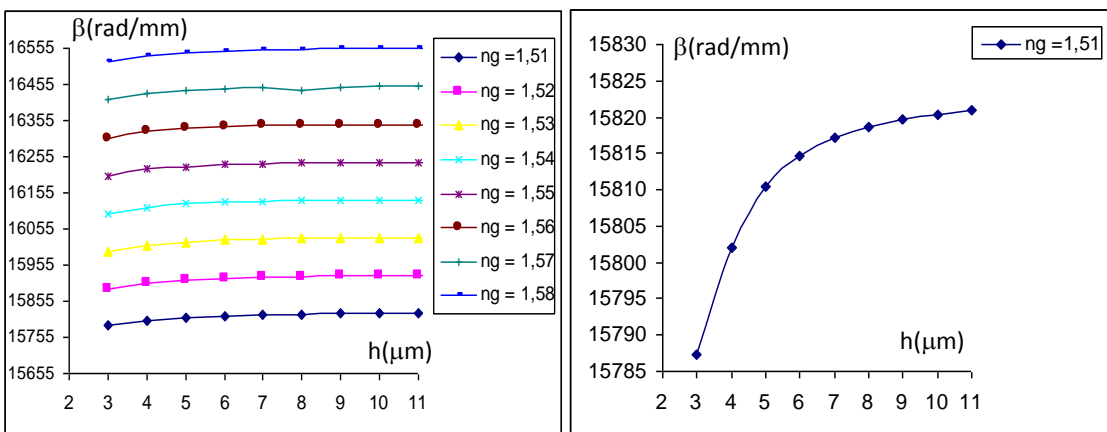
3-4 - مناقشة النتائج وتحليلها:

إن نتائج الدراسة التي تم الحصول عليها لبارامترات الأمواج المنتشرة في البنية المقترح تنفيذها بتقنية القناع باستخدام برنامج MODULEF تكون ممثلة بالأشكال من (10) حتى (13) ، حيث إننا مثلنا تغيرات كل من السماحية الفعالة ϵ_{eff} و ثابت الانتشار β بوصفه تابعاً لكلٍ من سماكة منطقة التوجيه h و قرينة انكسارها n_g و ذلك للأمواج E_{11}^y و E_{51}^y فقط. أما القسم الأيمن من هذه المنحنيات فإنه يمثل تغيرات هذه البارامترات من أجل قيمة واحدة و محددة لقرينة الانكسار n_g .

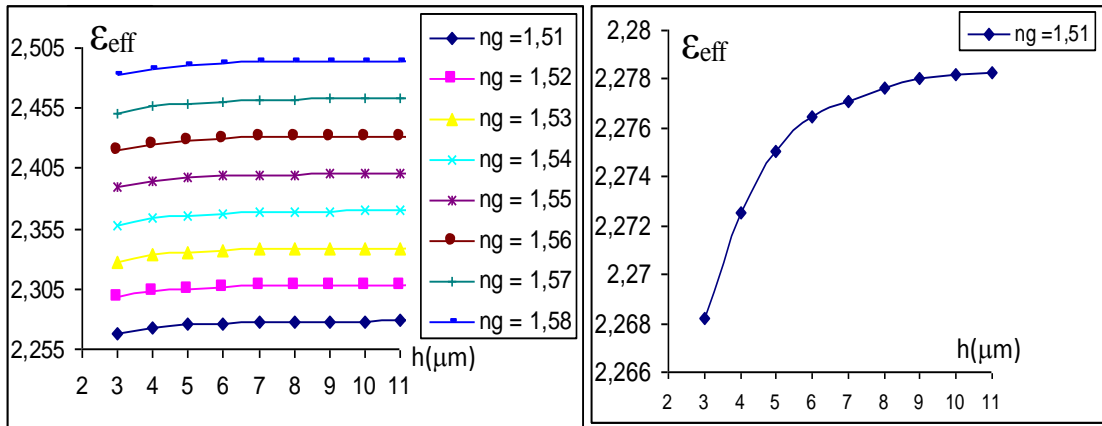
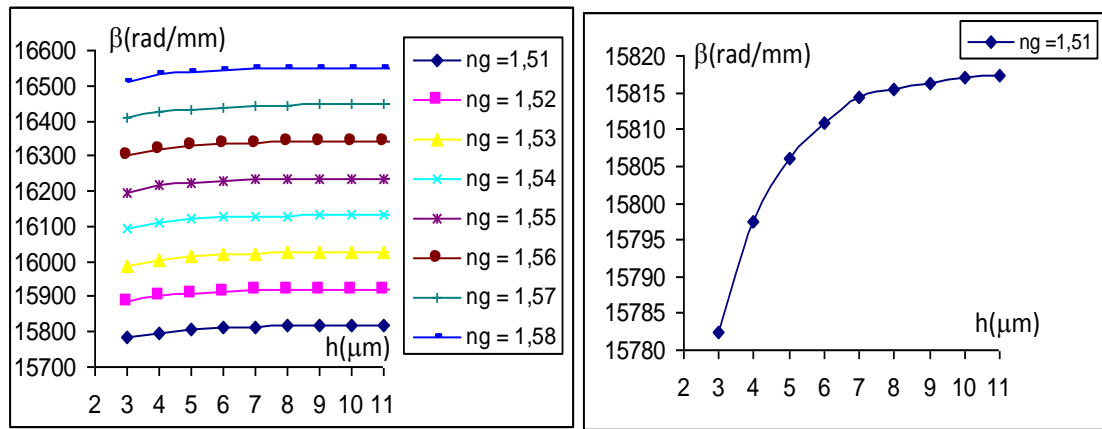
من هذه المنحنيات نلاحظ أن السماحية الفعالة $\epsilon_{eff} = n_{eff}^2$ تزداد بوصفها تابعاً للسماكة h حتى يصل إلى قيمة بعدها يبقى ثابتاً، و هذه القيمة تكون قريبة جداً من n_g^2 و هذا ما يوافق الانتشار الموجّه الذي تكون فيه قرينة الانكسار الفعالة محققة للمترابحة $n_s < n_{eff} \leq n_g$. هذه التغيرات في السماحية الفعالة ستفرض على ثابت الانتشار اتباع شكل التغير نفسه وذلك بسبب العلاقة الطردية بينهما.



الشكل (10) : تغيرات السماحية الفعالة بوصفها تابعاً لسماكة منطقة التوجيه للموجة E_{11}^y



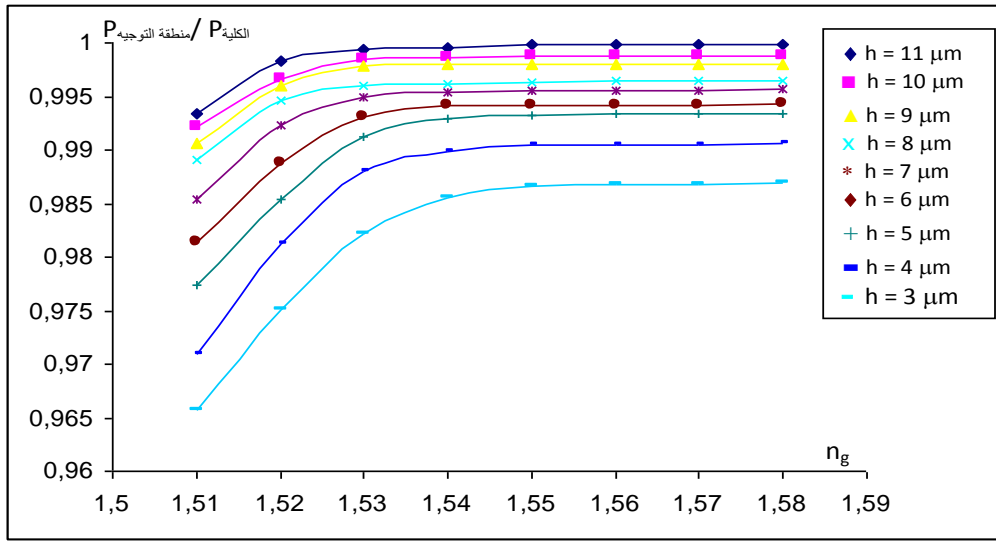
الشكل (11) : تغيرات ثابت الانتشار بوصفها تابعاً لسماكة منطقة التوجيه للموجة E_{11}^y

الشكل (12) : تغيرات السماحية الفعالة بوصفه تابعاً لسماكة منطقة التوجيه للموجة E_{51}^y الشكل (13) : تغيرات ثابت الانتشار بوصفه تابعاً لسماكة منطقة التوجيه للموجة E_{51}^y

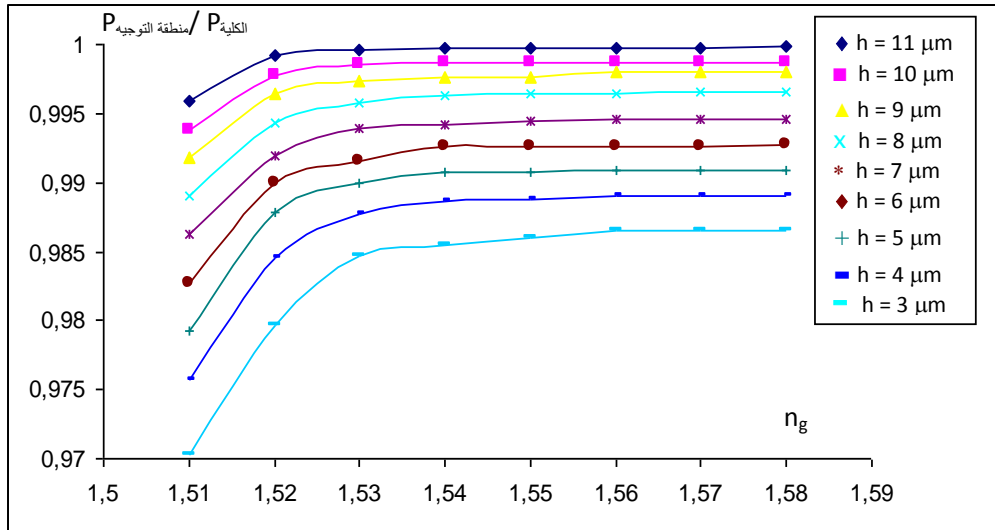
كذلك قمنا بدراسة تغيرات الاستطاعة المنبثقة في منطقة التوجيه بوصفه تابعاً لقرينة انكسار منطقة التوجيه وسماكة هذه المنطقة؛ إذ إنه ومن أجل سماكة معينة فإن استطاعة منطقة التوجيه تزداد بزيادة قرينة الانكسار n_g حتى تصل لقيمة تثبت تقريباً بعدها، و هذا يدل على أن القدرة ستكون بمعظمها مركزة في منطقة التوجيه وخارجها يتناقص أسياً بسرعة عالية جداً. الأشكال (14) و (15) تعرض هذه التغيرات و ذلك من أجل الموجتين E_{11}^y و E_{51}^y .

من ناحية ثانية، فمن أجل قيمة محددة للقرينة n_g فإننا نلاحظ أن كمية القدرة المتمركزة في منطقة التوجيه تزداد بزيادة سماكة هذه المنطقة h لحد تصبح القدرة بكاملها متمركزة في هذه المنطقة.

ملاحظة: من أجل بقية الأمواج المنتشرة في هذه البنية E_{1m}^x و E_{1m}^y ، فقد لاحظنا التغيرات نفسها التي عرضناها للأمواج E_{11}^y و E_{51}^y .



الشكل (14) : تغيرات الاستطاعة لمنطقة التوجيه بوصفها تابعاً لقرينة انكسارها وذلك بالنسبة إلى الموجة E_{11}^y



الشكل (15) : تغيرات الاستطاعة لمنطقة التوجيه بوصفها تابعاً لقرينة انكسارها وذلك بالنسبة إلى الموجة E_{51}^y

الاستنتاجات والتوصيات:

إن هذه الدراسة مكنتنا من تحديد الخواص الكهرومغناطيسية لبنية يمكن تصنيعها بطريقة الحفر غير المباشر ومعرفتها معرفة دقيقة (طريقة القناع)؛ وذلك من خلال تحديد كافة الأمواج مع بارامتراتنا التي تنتشر في هذه البنية، ومن ثم هذا ما يتيح لنا التفكير بتصميم عدد من دارات الإلكترونيات الضوئية لاستخدامها في الاتصالات الضوئية كالمرشحات الضوئية Optical Filters، شبكات براغ Bragg Network، الفارنات الاتجاهية Directing Coupler وغيرها. كذلك تحققنا من إمكانية تطبيق برنامج الحساب على الأبعاد الميكرومترية الضوئية، وهذا ما يسمح لنا بالتفكير بدراسة مختلف العناصر و الدارات غير الفعالة مهما كانت أبعادها.

لذلك فإن الخطوات المستقبلية المرجوة لهذه هي التنفيذ العملي لهذه البنية، و من ثم الانطلاق لدراسة الدارات المتكاملة الضوئية وتنفيذها.

المراجع:

- [1]- TOFFANNO, Z. *Composants Photoniques et Fibres Optiques*. ISBN, France, 2001, 318.
- [2]- FREDERIC, Z.; BORIS K. *Fondation of photonic crystal Fibres*. ISBN, 2006, 1 – 86094- 507-4
- [3]- HRANILOVIC, S. - *Wireless optical communication systems*. Hamilton, Ontario, Canada, 2005, 210.
- [4]- JOHN R, V. - *Optical networking best practices*, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey Published simultaneously in Canada, 2007, 505.
- [5]- OKAMOTO, K. - *Fundamentals of optical waveguides*, Second edition, California 92101-4495, USA, 2006, 578.
- [6]- COWIE, J.M.G., - *Polymers : Chemistry and Physics of Modern Materials* (2nd Edition) Ed. Blakie, London, 1991,446.
- [7]- TAYYEB, ZUHAIR, A. - *Use of CR-39 Polymer for Radiation Dosimetry*, JKAU: Eng. Sci., Vol. 22 No.1, pp: 79-96 (2011 A.D. / 1432A.H.), DOI: 10.4197 / Eng. 22-1.5
- [8] - EREES, F.S., YENER, G., SALK, M. , OZBAL, O.,- *Measurement of radon content in soil gas and in thermal wayers in Western Turkey*,2006, Nucl. Tracks Radiat. Measur., 41: 354 – 361.
- [9] - ZAKI, M.F. , El-SHAER, Y.H. , *Particularization of alpha contamination using CR- 39 track detectors* , Paramana , 2007, 69 (4): 567 – 574.
- [10]-Al- AZMI, D. , ABU-SHDY, A.I., SAYED, A.M. , Al-ZAYED, A. , *Indoor radon in Kuwait*,2008, Health Phys. , 94 (1): 49 – 56.
- [11]-B. BENNAMANE, B., GAGNADRE,C., MARCOU,J. *Proceeding Micro Optics*, Hambourg, 1988, ECO 1, 1014, 132.
- [12]-GAGNADRE, C., - *Thèse de Docteur Ingénieur n°7*,France, 1992,194.
- [13]-BINSANGOU, V., - *19th International Conference on Nuclear Track in Solide*, Besançon, France,1998.
- [14]-DUCOURTIEUX, P., - *Diplôme d'Ingénieur en Informatique*, CNAM, France. 2003.
- [15] - C. LE GRESSUS,- *Microscope Electronique à Balayage*. Techniques de l'Ingénieur, 2006, P1, 865.
- [16] - PHILIPS ELECTRONICS N. V.,- *Microscope Electronique à Balayage Série XL, Manuel d' Utilisation*. Eindhoven, Pays-Bas,2003.
- [17] - BOSSAVIT, A. *Discretization of Electromagnetic Problems: The Generalized Finite Differences*, The Netherlands, Elsevier B.V, 2005.
- [18] - THOMEE, V., *Finite Difference Methods for Linear Parabolic Equations*, San Diego, USA, 2005.
- [19]-HAGNESS, S. C., TAFLOVE, A GEDDEY, S. D., *Finite-Difference Time-Domain Methods*, ISSN 1570-8659, Elsevier B.V.,2005.
- [20]-COMSOL Multiphysics , Version 4 . 0 a, *COMSOL Installation and Operations Guide* □ COPYRIGHT 1998–2010 COMSOL AB.
- [21]-MARCOU, J.,- *Cours d'Optoélectronique D.E.A*, France, 2003-2004.

- [22]-SCHILDERS, W.H.A, TER MATEN, E.J.W., *Special Volume: Numerical Methods in Electromagnetics* , London, UK, 2005.
- [23]-MATTHEW, N.O., - *Elements Of Electromagnetic*, ISBN, Third Edition-New York, 2001,765p.
- [24]-MATTHEW, N.O., - *Numerical Techniques In Electromagnetics*. ISBN, Second Edition-New York, 2000, 750p.
- [25]-AUBOURG,M., VERDEYME, S., GUILLON,P. *Microwave Passive Devices*. Wiley Interscience, 1996, 53-77.
- [26]- AUXEMERY,P., - *Contribution a l'Etude des Parameters Electriques et Magnetiques des Modes de Galerie de Resonateurs Dielectriques*, France, 2006, 271.
- [27]-BESNE, Ph. - *Thèse de Docteur Ingénieur n°37*,France, 2005,198.