

ETUDE MODALE DE GUIDES A SECTION TRANSVERSE QUELCONQUE

Y. Moreau^a, J. Porque^a, P. Coudray^a, P. Etienne^b.

^aCentre d'Electronique et de Micro-optoélectronique de Montpellier UMR 5507
Université de Montpellier II 34095 MONTPELLIER CEDEX - FRANCE
e-mail : moreau@cem2.univ-montp2.fr Web : <http://w3.cem2.univ-montp2.fr/~moreau/>

^bLaboratoire des Verres UMR N°5587
Université de Montpellier II 34095 MONTPELLIER CEDEX - FRANCE

RESUME

Le développement d'interconnexions et de dispositifs originaux nécessite le calcul de modes dans des structures guidantes à géométrie complexe. Un logiciel appréhendant des guides de sections quelconques a été développé, sur la base d'une programmation orientée objets (Java), conviviale, évolutive, et exécutable sur le réseau internet.

I- INTRODUCTION

Une des clés essentielles de l'optique intégrée est la résolution des problèmes d'interconnexion et le développement de l'hybridation électronique-optique. Une solution optimale demande l'intégration de composants discrets fabriqués à partir de différents matériaux, l'implantation de guides sur des substrats gravés¹, la réalisation de circuits sur plusieurs niveaux², etc. La complexité géométrique des structures guidantes est inévitable dans ce type de développement.

Notre approche de l'optique guidée par l'utilisation d'un matériau vitreux organo-minéral³ illustre la complexité géométrique possible. La fabrication de guides d'ondes à basse température que nous avons développée⁴ permet de déposer plusieurs couches sur un dispositif électronique sans le détériorer. L'inscription de guides sur une couche photosensible par simple photopolymérisation locale conduisant à une augmentation d'indice ouvre la voie à la conception de dispositifs originaux ; savoir étudier des guides d'ondes à section quelconque devient nécessaire.

Nous avons été confrontés par exemple à la réalisation de guides implantés dans des "V-grooves" (figure 1) avec réflecteur pour couplage avec des VCSELs ou la réalisation de guides "ridge" trapézoïdaux (figure 2).

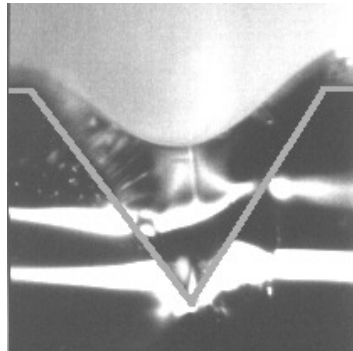


Figure 1 : Photographie d'un "V-groove" avec dépôt sol-gel.

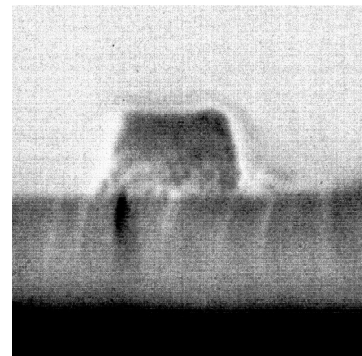


Figure 2 : Guide "ridge" trapézoïdal réalisé par voie sol-gel.

II- CALCUL DES MODES

Trouver les modes d'une section de guide d'onde et leur constante de propagation β ($= k n_c$) est à la base un problème de valeurs propres : l'équation d'onde pour un champ F : $\{\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2\} F_{xyz} + k^2 n^2 F_{xyz} = 0$ devient $\{\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + k^2 n^2\} F_{xy} = \beta^2 F_{xy}$ si $F_{xyz} = \exp(-i\beta z) F_{xy}$

La correction de polarisation et/ou la mise sous forme vectorielle peuvent être introduites sans changer la démarche. La discrétisation de l'opérateur {...} en chaque point x, y de la section grâce à des formules de différences finies demande un nombre important de points à considérer pour avoir une précision suffisante, étant la nature transcendante (exponentielle ou sinusoidale) des profils des champs de mode. Nous avons préféré considérer les profils (inconnus) comme des combinaisons

linéaires de fonctions de base orthogonales $F(x,y) = \exp(-i\beta z) \sum c_{ij} S_i(x) \times S_j(y)^5$. Par simplicité, la base choisie est constituée de fonctions sinusoidales nulles sur les limites du domaine rectangulaire enserrant le ou les guides : $S_{i,j}(x,y) = S_i(x) \times S_j(y) = \sqrt{4/L_x L_y} \sin(i \pi x/L_x) \sin(j \pi y/L_y)$.

Les conditions aux limites imposées ne demandent un domaine étendu que si les modes considérés sont proches de la coupure, ou s'il s'agit de modes rayonnés⁶. Nous avons aussi utilisé une base de fonctions de Gauss Hermite⁷, lesquelles ont l'avantage de décroître exponentiellement en fonction de la distance au centre du domaine étudié.

En substituant $F(x,y)$ (et ses dérivées) dans l'équation d'onde pour tous les couples ij .

$$E(\dots c_{ij}, \dots, x, y) = \sum c_{ij} [-n_e^2 - \pi^2/k^2 (i^2/L_x^2 + j^2/L_y^2) + n^2(x,y)] S_{ij}(x,y) = 0$$

L'équation $E(\dots)=0$ en c_{ij} sera vérifiée pour tout couple (x,y) du domaine, si :

$\iint E(\dots c_{ij}, \dots, x, y) x W(x, y) dx dy = 0$ pour toute fonction poids $W(x,y)$; elle est approximativement vérifiée si la double intégrale est nulle pour l'ensemble des fonctions de base $S_{ij}(x,y)$ choisi pour fonction de poids $W(x,y)$ (Méthode de Galerkin⁸). On obtient ainsi un système dont il faut calculer les valeurs propres de N (nombre de couples ij) équations algébriques dont celle de rang ij s'écrit :

$$\sum_{ij} A_{ij,ij} c_{ij} = n_e^2 c_{ij} \text{ avec } A_{ij,ij} = \iint \{ (n^2(x,y) - n_o^2) S_{ij}(x,y) S_{ij}(x,y) dx dy + [\text{si élément diagonal}] - \pi(i^2/L_x^2 + j^2/L_y^2) + n_o^2 \times \text{surface_du_sous_domaine} \}$$

Si n_o est l'indice du domaine entourant le guide ou les guides, les coefficients $A_{ij,ij}$ ne demandent l'évaluation de l'intégrale que sur les sous-domaines d'indice $n(x,y)$ différents. L'intégration peut être effectuée par voie analytique sur des sous-domaines rectangulaires. De façon à pouvoir prendre en compte des géométries particulières, nous avons introduit une intégration précise applicable à toute forme polygonale.

III- GUIDE DE SECTION QUELCONQUE

Le calcul de l'intégrale sur un quadrilatère quelconque, dérivé des outils logiciels d'éléments finis⁹, est fondé sur l'intégration dans un rectangle de référence (-1,1)-(-1,-1) et l'utilisation d'une interpolation bilinéaire :

$\iint E(x,y). dx dy = \iint E(x(\eta,\zeta), y(\eta,\zeta)) \det(J). d\eta d\zeta$ où (η,ζ) sont des coordonnées de référence variant chacune entre -1 et +1, les fonctions $x(\eta,\zeta)$, et $y(\eta,\zeta)$, sont respectivement égales à :

$$x(\eta,\zeta) = [N] [x_0 \ x_1 \ x_2 \ x_3]^t \text{ et } y(\eta,\zeta) = [N] [y_0 \ y_1 \ y_2 \ y_3]^t \text{ où } [N] = 1/4 \times [(1-\zeta) \times (1-\eta) \ (1+\zeta) \times (1-\eta) \ (1+\zeta) \times (1+\eta) \ (1-\zeta) \times (1+\eta)] \text{ (fonction d'interpolation),}$$

x_i et y_i sont les coordonnées des sommets du quadrilatère quelconque, et $\det(J)$ est le déterminant de la matrice Jacobienne de la transformation :

$$\det(J) = a_0 + a_1 \zeta + a_2 \eta \text{ avec}$$

$$a_0 = ((y_3 - y_1) * (x_2 - x_0) - (y_2 - y_0) * (x_3 - x_1)) / 8 ;$$

$$a_1 = ((y_2 - y_3) * (x_1 - x_0) - (y_1 - y_0) * (x_2 - x_3)) / 8 ;$$

$$a_2 = ((y_3 - y_0) * (x_2 - x_1) - (y_2 - y_1) * (x_3 - x_0)) / 8 ;$$

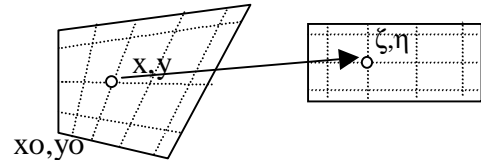


Figure 1: Intégration Gauss sur forme bilinéaire

L'intégration choisie est une méthode numérique de Gauss -Legendre, développée en produit (intégration dans les deux dimensions). Elle repose sur l'évaluation de l'intégrande en des points particuliers optimisés (zéros des polynômes de Legendre fournies par des tables). Ces évaluations sont pondérées puis ajoutées pour donner l'intégrale. Pour un nombre de points donnés, la méthode est beaucoup plus précise que celles fondées sur un espacement régulier (Simpson ou trapèzes), particulièrement, comme c'est le cas ici, lorsque les intégrandes contiennent des fonctions transcendentes.

Les coordonnées (η,ζ) des points d'évaluation fourni par les tables avec les poids correspondants, sont transformées en coordonnées (x,y) de notre structure, l'évaluation des intégrales

sur les quadrilatères constituant la section du guide conduit à la construction de la matrice dont on cherchera les valeurs propres (indices effectifs des modes) et les vecteurs propres associés (coefficients de constructions des profils de modes).

Le continuum de modes radiatifs est estimé en considérant les valeurs propres correspondant à des indices effectifs inférieurs à l'indice de gaine par augmentation de l'ordre maximal de la décomposition.

IV- APPROCHE LOGICIELLE OBJET

La démarche logicielle *objet* caractérise notre approche, ceci présente plusieurs conséquences:

Le programme est structuré en blocs qui peuvent être modifiés indépendamment : la section de guidage est décrite à l'aide de rectangles, et de quadrilatères quelconques. Il serait facile d'introduire d'autres formes de description comme l'ellipse en fournissant une méthode d'intégration des produits de fonctions de base sur l'ellipse. Des formes à variation d'indices de réfraction peuvent également être rajoutées. Les interfaces conviviales standards permettent par exemple la description à la souris.

Une version du logiciel est écrite en langage Java¹⁰, ce qui lui permet d'être portable et accessible par internet, tout en étant exécuté sur la propre machine de l'utilisateur (figure 3).

Ce logiciel a été développé pour une analyse modale de structures guidantes réalisés par voie sol-gel avec des formes particulières : dépôts sur substrats gravés pour réaliser des interconnexions fibres- guides, guides -VCSELs etc... Le calcul des modes nous a permis de modéliser la propagation le long de dispositifs tels que diviseurs, coupleurs directionnels, M.M.I.

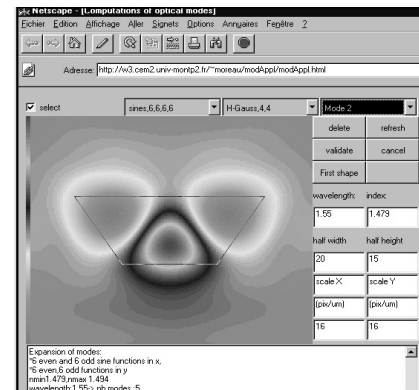


Figure 3: Profil d'un mode guidé (guide de section trapézoïdale)

V- CONCLUSION

Développé au départ pour le calcul des modes dans des structures guidantes déposées sur substrats gravés, un logiciel a été développé selon une démarche logicielle objet, en langage Java et accessible grâce à un navigateur sur le réseau Internet. Il permet le calcul des modes dans des structures de géométries beaucoup plus variées et devrait donc accompagner le développement des dispositifs originaux réalisables en optique intégrée.

¹ C.A.Jones, K. Cooper, "Hybrid integration onto silicon motherboards with planar silica waveguides", IEE proc. Optoelectron., vol. 143, n°5, pp 316-321, oct. 96.

² P. Coudray, J. Porque, P. Etienne, Y. Moreau, "Multilevel optical circuits in a hybrid sol-gel derived glass structure", Conf. SPIE-Annual meeting, San Diego (USA), July 98.

³ P. Coudray, Y. Moreau, P. Etienne, J. Porque " New developments in integrated optics using the sol-gel process", invited paper, International Conference SPIE, Critical Review n° 68, " Sol-gel and Polymer Photonics Devices ", San Diego, USA, July 1997

⁴ P. Coudray, P. Etienne, Y. Moreau, J. Porque, S.I. Najafi, "Sol-gel channel waveguide on silicon : fast direct imprinting and low cost fabrication.", Optics communication, p. 199, Nov. 1997.

⁵ D.Marcuse, "Solution of the vector wave equation for general dielectric waveguides by the Galerkin Method", I.E.E.E. Journal of Quantum Electronics, vol. 28, n°2, February 1992.

⁶ S. Farahvash, S. Safavi-Naeni, M. Tabiani, "Finding the radiation from dielectric waveguide step junction using eigenmode expansion -bounded approach", Opt.Eng. 36(10), 2897-2903 (October 1997).

⁷ J. Porque, P. Coudray, Y. Moreau, P. Etienne, "Calculations for the optimization of channel waveguides made by sol-gel process", Proc. of International Conference SPIE , Vol 3283, San Jose, USA, Jan.1998

⁸ P. Tong, J. Rossettos, Finite Element Method, MIT Press, Cambridge, Mass. 1978

⁹ G. Dhatt, G. Touzot, "Une présentation de la méthode des éléments finis", Maloine. S.A. Ed. Paris, 1981

¹⁰ F.Buss, S. Schlopke, "Programmation JAVA", Micro Applications, Paris, 1997.