# Guides optiques à section transverse quelconque: un calcul scalaire et vectoriel en ligne

**Y. Moreau, G. Pille**.

*Centre 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://www.cem2.univ-montp2.fr/~moreau/

**J. Galy**

*Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de MicroElectronique*
*Université de Montpellier II 34095 MONTPELLIER CEDEX - FRANCE*

**Résumé :** Les nouvelles technologies de fabrication, les dispositifs originaux récents, nécessitent le calcul de modes dans des structures guidantes à géométrie complexe. Un logiciel capable de manipuler des guides de sections quelconques a été développé, sur la base d'une programmation orientée objet (Java), conviviale, évolutive, et exécutable en ligne sur le réseau internet.

## 1. Introduction

L'évolution de la technologie vers des dispositifs les plus compacts possibles, les problèmes d'interconnexion et le développement de l'hybridation électronique-optique amènent le concepteur à ne plus se contenter des approximations traditionnelles pour le calcul des modes et de la propagation : méthode de l'indice effectif, modes dans des sections rectangulaires etc. Les récentes technologies pour guides optiques, la réalisation de circuits sur plusieurs niveaux[1], certaines structures de lasers … conduisent inévitablement à une plus grande complexité géométrique des structures guidantes.

Cette complexité possible peut être illustrée par les lasers à cascade quantique[2] étudiés au laboratoire (à section de guide trapézoïdale) ou nos réalisations en optique guidée par l'utilisation d'un matériau vitreux organo-minéral : l'inscription de guides sur une couche photosensible par simple photopolymérisation locale conduisant à une augmentation d'indice ouvre la voie à une conception souple de dispositifs originaux : étudier des guides d'ondes à section quelconque devient nécessaire.

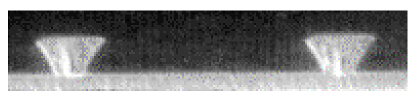

Figure 1 : Guide "ridge"trapézoïdal en technologie organique-inorganique

## 2. Calcul scalaire des modes

Trouver les modes en résolution 'scalaire' et leur constante de propagation $\beta$ (= k $n_e$) peut être compris comme un problème de valeurs propres : l'équation d'onde pour un champ électrique ou magnétique F :

$$\{\delta^2/\delta x^2 + \delta^2/\delta y^2 + \delta^2/\delta z^2\} F_{xyz} + k^2 n^2 F_{xyz} = 0 \text{ devient} \quad (1)$$

$$\{\delta^2/\delta x^2 + \delta^2/\delta y^2 + k^2 n^2\} F_{xy} = \beta^2 F_{xy} \quad \text{avec } F_{xyz} = exp(-i\beta z) F_{xy} \quad (2)$$

Etant donné la nature transcendante (exponentielle ou sinusoïdale) 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(-iβz) $\sum c_{ij} S_i(x) \times S_j(y)$[3] plutôt qu'une simple décomposition de type différences finies. La base choisie est constituée de fonctions sinusoidales (facilement dérivables) nulles sur les limites du domaine rectangulaire entourant le ou les guides : $S_{i,j}(x,y) = 2/\sqrt{L_x L_y}\ \sin(i\,\pi\,x/L_x)\,\sin(j\,\pi\,y/L_y)$. Une largeur $L_x$ ou $L_y$ du domaine double par rapport à celle de la section est suffisante dans la plupart des cas. En substituant F(x,y) (et ses dérivées) dans l'équation d'onde pour tous les couples ij, on obtient l'équation (3) en $c_{ij}$ :

$$E(\ldots c_{ij}\ldots,x,y) = \sum c_{ij} [- n_e^2 - \pi^2/k^2 (i^2/L_x^2 + j^2/L_y^2) + n^2(x,y))] S_{ij}(x,y) = 0 \quad (3)$$

L'équation (1) en $c_{i,j}$ sera vérifiée pour tout point (x,y) du domaine, si pour toute fonction poids W(x,y)

$\iint E(\ldots cij\ldots, x, y) x W(x,y) dxdy = 0$ est vérifié. (3) est *approximativement* vérifiée si la double intégrale est nulle pour l' ensemble des fonctions de base $S_{i'j'}(x,y)$ précisément choisies comme fonction W(x,y) : Cette méthode (dite de Galerkine[4] utilisée dans les méthodes d'éléments finis) substitue donc un système d'équations intégrales à une équation différentielle résolue dans un domaine).

L'intégration par sous-domaines 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 transformation bi-linéaire pour une intégration précise applicable à toute forme polygonale.

### 3. Guide de section quelconque

Le calcul de l'intégrale sur un quadrilatère quelconque, dérivé des outils logiciels d'éléments finis[5], 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 $(\eta,\zeta)$ sont des coordonnées de référence variant chacune entre -1 et +1, les fonctions $x(\eta,\zeta)$, et $y(\eta,\zeta)$, sont respectivement égales à :

$$x(\eta,\zeta) = [N]\ [x_o\ \ x_1\ \ x_2\ \ x_3]^t \ \ et\ \ y(\eta,\zeta) = [N]\ [y_o\ \ y_1\ \ y_2\ \ y_3]^t$$

avec $[N] = 1/4 \times [(1-\zeta) \times (1-\eta)\ \ (1+\zeta) \times (1-\eta)\ \ (1+\zeta) \times (1+\eta)\ \ (1-\zeta) \times (1+\eta)]$ (fonction d'interpolation), $x_i$ et $y_i$ sont les coordonnées des sommets du quadrilatère, et det(J) est le déterminant de la matrice Jacobienne de la transformation.

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). 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 transcendantes.

### 4. Calcul vectoriel des modes

Les deux composantes perpendiculaires ($E_x$ et $E_y$), dans deux équations du type :

$$\frac{d^2E_x}{dx^2} + \frac{d^2E_x}{dy^2} + (k^2n(x,y)^2-\beta^2)E_x + \frac{d}{dx}\left(E_x\frac{d\ ln(n_{xy}{}^2)}{dx} + E_y\frac{d\ ln(n_{xy}{}^2)}{dy}\right) = 0$$

Quoique que plus lourde, la démarche reste du même type, avec un vecteur inconnu juxtaposition des composantes de $E_x$ et $E_y$ décomposées sur la même base orthogonale des $S_{ij}(x,y)$.

### 5. Approche logicielle objet, java et internet

Le logiciel est écrite en langage Java[6], langage *objet*: 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. Outre les interfaces conviviales standards (description à la souris etc.), java rend ce logiciel portable et accessible par internet[7], tout en étant exécuté sur la propre machine de l'utilisateur.

### 6. Conclusion

Développé au départ pour le calcul des modes dans des structures guidantes déposées sur substrats gravés, le logiciel développé en langage Java, avec démarche objet, accessible grâce à un navigateur sur le réseau Internet, permet le calcul des modes dans des structures de géométries très variées et devrait donc accompagner le développement de dispositifs photoniques originaux.


[1] 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.

[2] R. Teissier, D. Barate, A. Vicet, D. A. Yarekha, C Alibert and A. N. Baranov, C. Becker, X Marcadet, M. Garcia and C. Sirtori," InAs/AlSb quantum cascade lasers operating at 6.7µm", *Electronics letters*, vol. 39 (17) , 2003.

[3] 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.

[4] P. Tong, J. Rossettos, *Finite Element Method*, MIT Press, Cambridge, Mass. 1978.

[5] G. Dhatt, G. Touzot, *Une présentation de la méthode des éléments finis*, Maloine. S.A. Ed., Paris, 1981.

[6] F.Buss, S. Schlöpke, *Programmation JAVA*, Micro Applications, Paris, 1997.

[7] Y.Moreau, *http://www.cem2.univ-montp2.fr/~moreau/modAppl*