POLARISASI TE DAN TM BERDASARKAN STRUKTUR PANDU GELOMBANG RIB DENGAN MENGGUNAKAN METODA INDEKS EFEKTIF

Suwasti Broto

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Budi Luhur, Jakarta, 12260
e-mail: suwasti.broto@budiluhur.ac.id

Abstract: *A simple solution of modal effective refractive index which the TE and TM modes of a rib waveguide structure are obtained by the effective index (EIP) technique using dispersion characteristic curves of a single three-layer slab waveguide. The accuracy of this work is confirmed by comparison with results from other methods. Furthermore, birefringence that was professed with* $\Delta n_{eff} = (n_{TE} - n_{TM})$ *also was explained.*

Keyword: birefringence, effective index method, rib waveguide, dispersion slab.

Abstrak: *Sebuah solusi sederhana dari indeks bias efektif modal dimana mode TE dan TM dari struktur pandu gelombang rib diperoleh dengan teknik indeks efektif (EIP) dengan menggunakan kurva karakteristik dispersi dari sebuah pandu gelombang slab tiga lapis tunggal. Keakuratan pekerjaan ini dikonfirmasi dengan membandingkan hasil dari metode lainnya. Selanjutnya, juga diuraikan birefringence yang dinyatakan dengan* $\Delta n_{eff} = (n_{TE} - n_{TM})$.

Keyword: birefringence, effective index method, rib waveguide, dispersion slab.

1. PENDAHULUAN

Pandugelombang rib secara umum mendukung mode quasi-TE dan quasi-TM, yang memiliki komponen medan listrik utama masing-masing sepanjang arah x dan arah y, sedemikian hingga, mendekati terpolarisasi secara linear [6].
Bahan anisotropik yang memiliki indeks bias ganda yang dikenal sebagai bahan uniaksial. Bahan dengan birefringence linier memiliki indeks bias ortogonal yang berbeda bila terpolarisasi linier dari berkas cahaya yang melewatinya. Perbedaan antara indeks bias ordinari dan ekstra-ordinari $\Delta n_{eff} = (n_{TE} - n_{TM})$ dinyatakan sebagai birefringence optik. Birefringence merupakan sebuah sifat murni yang dimiliki oleh suatu material. Pada makalah ini, kami mengusulkan untuk menentukan indeks bias kedua quasi-TE dan quasi-TM dari struktur pandugelombang rib yang digunakan oleh [4] yaitu metoda indeks efektif dengan menggunakan kurva karakteristik dispersi dari pandugelombang slab tiga lapis tunggal.

Struktur ini telah diterapkan dengan menggunakan teknik lain sebelumnya seperti [2] dan [4] dengan teknik vektor elemen hingga, yang memperoleh solusi teknik finite difference dengan metode inverse power (IPM), dan teknik lainnya [3] menggunakan semi-vectorial finite difference (SVFD) dan metode indeks efektif (EIM) [5]
Konstanta propagasi yang dinormalisasi dan birefringence struktur ini disajikan di sini.
Penelitian ini dapat membantu membuat pilihan yang lebih tepat mengenai bahan (material) perangkat yang akan digunakan sesuai dengan kebutuhan yang diharapkan.
Dalam menentukan indeks bias efektif dan konstanta propagasi ternormalisasi teknik yang kami usulkan menggunakan label (EIP). Semua hasil ditunjukkan dalam bentuk table untuk dapat dibandingkan dengan teknik sebelumnya dan pula dalam bentuk grafik juga ditunjukkan.

2. ANALISA

Kasus pandugelombang struktur rib, lapisan pemandu pada kedua sisi daerah yang terangkat (dinaikkan), mendukung struktur slab. Pengurungan dapat terjadi karena ketebalan ekstra lapisan pemandu di daerah yang dinaikkan.
Sehingga dengan demikian kita harus mempertimbangkan pengurungan secara 2-D, besarnya variasi medan pada arah ‘y’ perlu dipikirkan, indeks bias juga sebagai fungsi dari dua koordinat transversal dan persamaan gelombang scalar yang berlaku pada keadaan untuk medan listrik dapat ditunjukkan sebagai,

$$\frac{\partial^2 E(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E(x,y)}{\partial y^2} - \left(n_0^2 k_0^2 - \beta^2\right) E(x,y) = 0 \tag{1}$$

dimana k_0 adalah sebuah bilangan gelombang untuk media ruang bebas, n_0 adalah indek bias efektif dan β adalah konstanta propagasi. Sebuah ungkapan analogi yang berlaku bagi medan magnetik.

Pertimbangan masalah yang melibatkan profil transversal ini sering dapat ditangani dengan memberlakukan dua arah transversal secara independen atau terpisah.

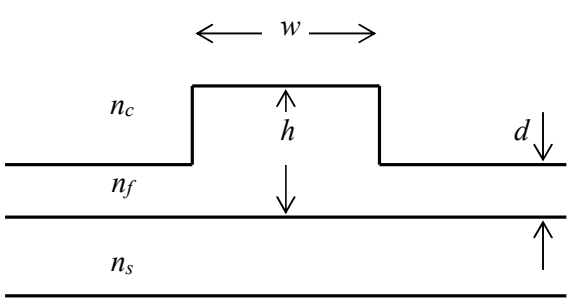
Secara matamatis, medan *E(x,y)* diasumsikan terdiri atas perkalian antara komponen '*x*' dan '*y*' dan dengan cara ini variable yang dipisahkan dapat dituliskan seperti berikut ini,

$$E(x,y) = X(x) \cdot Y(y) \tag{2}$$

Aturan metodologi pemisahan variable ditunjukkan dengan jelas pada metoda perhitungan sifat-sifat medan modal pada sebuah pandu gelombang kanal. Pada metodologi ini, persamaan (1) dibentuk masing-masing oleh variable x dan y ke dalam persamaan gelombang scalar secara terpisah menurut (2) adalah sebagai berikut,

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} - \left(n_x^2 k_0^2 - \beta_x^2\right) = 0 \\ \frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2} - \left(n_y^2 k_0^2 - \beta_y^2\right) = 0 \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

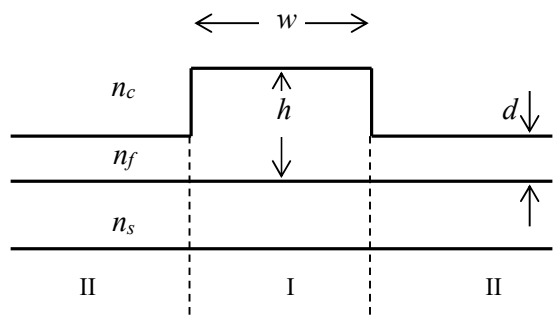
Pada makalah ini, dijelaskan sebuah struktur pemandu gelombang yang telah digunakan oleh [4] sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, yang umum dikatakan sebagai struktur pandu gelombang rib.



Gambar 1. Struktur umum pandu gelombang rib.

3. METODA INDEKS EFEKTIF

Metoda indeks efektif digunakan untuk menyelesaikan struktur pandu gelombang 2-D. Keutamaan dari metoda ini adalah menggantikan sebuah struktur 2-D menjadi sebuah struktur persamaan dalam 1-D (slab). Langkah pertama, kita pikirkan gambar 1 dalam tiga wilayah terpisah bagi sebuah tiga-lapis slab tunggal asimetrik seperti dilukiskan pada Gambar 2 di bawah ini. Dua wilayah II dan satu wilayah I masing-masing sebagai permasalahan 1-D. Setiap wilayah dapat dihitung untuk mendapatkan indeks bias efektif N_I dan N_{II} dengan ketebalan masing-masing slab adalah *h* dan *d*. Hasil dari perhitungan N_I dan N_{II} tersebut terdapat kedudukan baru pemandu gelombang slab simetri N_I sebagai lapisan inti (core) dan N_{II} sebagai lapisan pembungkus (cladding). Langkah berikutnya, sebuah indeks bias efektif dari struktur rib keseluruhan dapat dihitung dari dua kedudukan (formasi) pandu gelombang slab simetris baru.



Gambar 2. Pemisahan wilayah tiga slab sebuah rib

4. KARAKTERISTIK DISPERSI PANDU GELOMBANG SLAB

Menurut [1], hubungan dispersi pemandu gelombang slab dapat diungkapkan sebagai,

$$V\sqrt{1-b} = m\pi + \tan^{-1}\sqrt{\frac{b}{1-b}} + \tan^{-1}\sqrt{\frac{a_E + b}{1-b}} \quad \text{moda TE} \tag{4}$$

$$V\left[\left(\sqrt{q}\right) n_f / n_s\right]\sqrt{1-b} = m\pi + \tan^{-1}\sqrt{\frac{b}{1-b}} + \tan^{-1}\sqrt{\frac{a_M(1-bd)+b}{1-b}} \quad \text{moda TM} \tag{5}$$

dimana,

$$a_E = \left(n_s^2 - n_c^2\right) / \left(n_f^2 - n_s^2\right) \quad \text{dan}$$

$$a_M = \left(\frac{n_f}{n_c}\right)^4 \left(n_s^2 - n_c^2\right) / \left(n_f^2 - n_s^2\right) = \left(\frac{n_f}{n_c}\right)^4 a_E \tag{6}$$

a_E dan a_M adalah derajad kesimetrisan slab dari masing-masing moda TE dan TM, sedangkan b adalah normalisasi konstanta propagasi slab.

$$d = \left(1 - n_s^2 / n_f^2\right) / \left(1 - n_c^2 / n_f^2\right) \tag{7}$$

$$V = kt\sqrt{n_f^2 - n_s^2} \tag{8}$$

dimana, V normalisasi frekuensi, $t = h$ untuk wilayah I dan $t = d$ untuk wilayah II (lihat Gambar 2) masing-masing sebagai ketebalan sebuah slab. Indeks bias efektif N untuk setiap wilayah dapat dihitung dengan menggunakan sebuah formula,

$$N = \sqrt{n_s^2 + b\left(n_f^2 - n_s^2\right)} \tag{9}$$

Sebuah normalisasi konstanta propagasi struktur keseluruhan dapat dihitung dengan menggunakan sebuah formula yang diturunkan dari persamaan (9) seperti berikut,

$$b = \left(N^2 - n_s^2\right) / \left(n_f^2 - n_s^2\right) \tag{10}$$

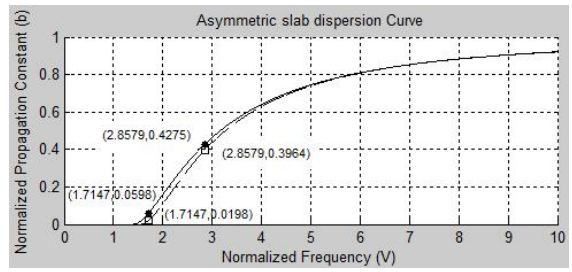
dimana, N adalah indeks bias efektif struktur keseluruhan untuk kedua TE dan TM.

5. SIMULASI DAN HASIL

Dalam simulasi ini untuk meyakinkan keakurasian metoda ini kami menganalisa dengan menggunakan sebuah struktur pandu gelombang yang digunakan oleh [3]-[5] dengan $h = 1$ μm, $d = (0.6 - 0.9)$ μm, $w = 3$ μm, $n_f = 3.44$ μm, n_s=3.40 μm, dan $n_c = 1.0$ μm dioperasikan pada $\lambda = 1.15$ μm (bersesuaian dengan $V_h = 2.8579$).

Untuk jelasnya, pada struktur di atas dapat diperoleh V yaitu 2.8579 dan 1.7147 masing-masing ketika $h = 1$ dan $d = 0.6$ dengan menggunakan persamaan (8). Sebagai tambahan a_E, a_M dan d masing-masing adalah 38.5965, 5404.8257 dan 0.0253 menggunakan (6) dan (7). Dari ini, sebuah eksekusi pemrograman MATLAB berjalan seperti berikut ini,

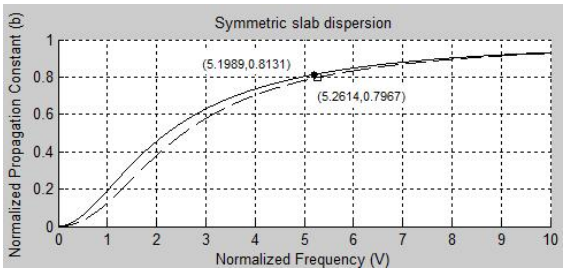
```
Refractive index of guiding : 3.44
Refractive index of substrate : 3.40
Refractive index of cladding : 1.0
Wavelength (um) : 1.15
Rib Height (um) : 1.0
Rib Width (um) : 3.0
Outer slab thickness (um) : 0.6

N(II): 3.402405(TE)    3.400797(TM)
N(I): 3.417157(TE)     3.415912(TM)
N effective for rib: 3.414405(TE) 3.412845(TM)
b for rib: 0.358777(TE)    0.319850(TM)
```



Gambar 3. Kurva disperse TE dan TM untuk V 2.8579 dan 1.7147; a_E, a_M dan d masing-masing adalah 38.5965, 5404.8257 dan 0.0253.

Gambar 3 melukiskan kurva keluaran TM dan TE slab dispersi asimetris yang mana normalisasi konstanta propagasi ditunjukkan disini sebagai 0.0598 (TE) dan 0.0198 (TM), 0.4275 (TE) dan 0.3964 (TM) ketika V adalah 1.7147 dan 2.8579 masing-masing. Dari hasil tersebut kemudian dengan menggunakan persamaan (9), indeks bias efektif N(II) dan N(I) seperti ditunjukkan keluaran secara numeric di atas adalah 3.402405 (TE), 3.400797 (TM) dan masing-masing 3.417157 (TE), 3.415912 (TM). Sebagai tambahan pada hasil di atas juga digambarkan sebuah slab tunggal tiga lapis simetris dimana indeks bias efektif N(I) sebagai tebal core w, sedangkan N(II) sebagai pembungkusnya sebagaimana dilukiskan pada Gambar 2 di atas dengan arah mendatar.

Menentukan indeks bias efektif dan normalisasi konstanta propagasi struktur menyeluruh yang sebelumnya telah dihitung normalisasi frekuensi V dengan menggunakan (9) untuk kedua moda TE dan TM dengan masing-masing $t = w$. Dari hasil ini akan dapat menentukan normalisasi konstanta propagasi b sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4 di bawah ini,

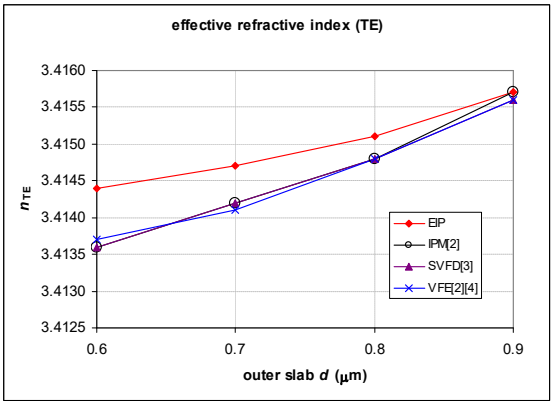


Gambar 4. Kurva disperse TE dan TM simetris tiga-lapis slab tunggal ketika $a_E = a_M = 0$ untuk N(I) sebagai core dan N(II) sebagai pembungkus (cladding).

Hasil simulasi (EIP) kami keseluruhan secara lengkap diringkas dalam bentuk table dan grafik seperti berikut. Kedua table dan grafik menggambarkan perubahan indeks bias efektif dan normalisasi konstanta propagasi oleh variasi slab bagian luar (outer slab) struktur rib usulan kami yaitu d = (0.6 – 0.9) μm. Table 1 menggambarkan pengaruh d pada indeks bias efektif n_{eff}. Table tersebut menandakan bahwa indeks bias untuk TE lebih besar dari TM, dikarenakan normalisasi konstanta propagasi moda TE lebih besar dari moda TM seperti ditunjukkan secara grafik pada Gambar 4 di atas.

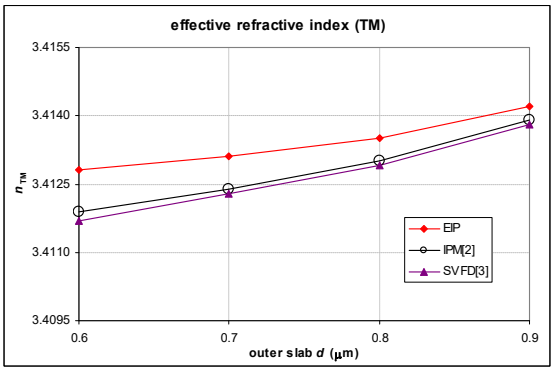
Tabel 1: Perbandingan indeks bias dengan metoda yang berbeda.

d (μm)	effective refractive index (n_{eff})						
	TE				TM		
	EIP	VFE[2][4]	IPM[2]	SVFD[3]	EIP	IPM[2]	SVFD[3]
0.6	3.4144	3.4137	3.4136	3.4136	3.4128	3.4119	3.4117
0.7	3.4147	3.4141	3.4142	3.4142	3.4131	3.4124	3.4123
0.8	3.4151	3.4148	3.4148	3.4148	3.4135	3.4130	3.4129
0.9	3.4157	3.4156	3.4157	3.4156	3.4142	3.4139	3.4138



Gambar 5. Hubungan antara N_{TE} dan slab bagian luar d secara grafik.

Tabel 1 dan Gambar 5 mengilustrasikan hasil-hasil EIP dibandingkan dengan metoda yang lain, bahwa metoda yang lain diantaranya adalah intensity power IPM[2], semi-vectorial finite difference SVFD[3] dan vector finite element VFE[2][4]. Sedangkan Tabel 1 dan Gambar 6 mengilustrasikan EIP dibandingkan dengan intensity power method IPM[2] dan semi-vectorial finite difference SVFD[3].

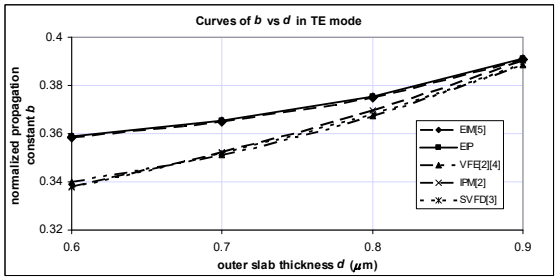


Gambar 6. Hubungan antara N_{TM} dan bagian luar slab d secara grafik.

Tabel 2 mengilustrasikan pengaruh d atas normalisasi konstanta propagasi b. ini menandakan bahwa b moda TE adalah lebih besar dari moda TM, karena indeks bias efektif moda TE adalah lebih besar dari TM. Pada tabel tersebut diperlihatkan juga bahwa hasil simulasi (EIP) yang diusulkan dibandingkan dengan metoda yang lain, diantaranya EIM[5], VFE[2][4], IPM[2] dan SVFD[3]. Pada Gambar 7, normalisasi konstanta propagasi metoda usulan terlihat sangat mendekati dengan [5], namun pada d terkecil kedua metoda usulan dan [5] tampak over estimasi, sedangkan pada d terbesar satu dengan yang lain sangat dekat.

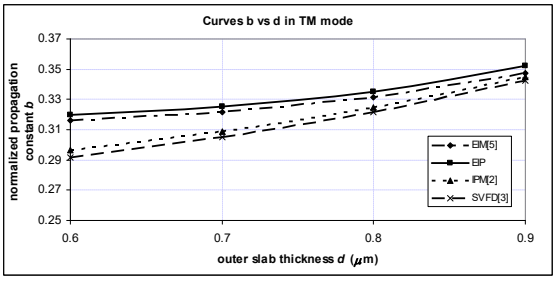
Tabel 2: Perbandingan normalisasi indeks konstanta propagasi dengan metoda lain.

d (μm)	normalized propagation constant (b)								
	TE					TM			
	EIM[5]	EIP	VFE[2][4]	IPM[2]	SVFD[3]	EIM[5]	EIP	IPM[2]	SVFD[3]
0.6	0.3583	0.3588	0.3399	0.3382	0.3378	0.3164	0.3199	0.2964	0.2915
0.7	0.3649	0.3653	0.3512	0.3525	0.3518	0.3219	0.3253	0.3089	0.3050
0.8	0.3749	0.3753	0.3674	0.3696	0.3682	0.3314	0.3351	0.3245	0.3216
0.9	0.3908	0.3911	0.3886	0.3905	0.3888	0.3471	0.3525	0.3448	0.3425



Gambar 7. Hubungan antara normalisasi konstanta propagasi *b* dan *d* untuk moda TE secara grafik.

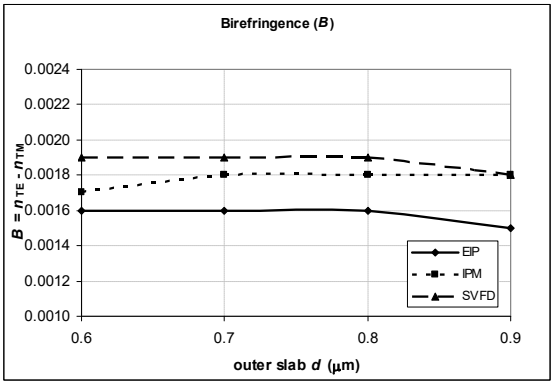
Gambar 8 mengilustrasikan hubungan antara normalisasi konstanta propagasi *b* untuk moda TM dan ketebalan slab bagian luar *d* yang hampir mirip dibandingkan dengan Gambar 7 walau bagaimanapun metoda usulan masih over estimasi bila dibandingkan dengan metoda yang lain.



Gambar 8. Hubungan antara normalisasi konstanta propagasi *b* dan *d* untuk moda TM secara grafik

6. BIREFRINGENCE

Selisih antara indeks bias efektif untuk TE dan TM sebuah material intrinsic dapat diungkapkan sebagai sebuah birefringence optik. Dari hasil yang telah ditunjukkan pada Tabel 1 terdapat perbedaan antara indeks bias efektif untuk moda TE dan TM. Selisih dari kedua indeks bias efektif moda TE dan TM dapat digambarkan secara grafik yang ditunjukkan pada Gambar 9 seperti berikut,



Gambar 9. Birefringence Optik

Dari hasil secara grafik dari Birefringence yang ditunjukkan pada Gambar 9, kedua EIP dan SVFD memiliki sifat garis trend yang sama namun tidak dengan IPM yang memiliki garis trend sebaliknya.

7. KESIMPULAN

Sebuah metoda indeks efektif dengan menggunakan kurva disperse karakteristik slab tiga-lapis tunggal telah dikembangkan. Teknik sederhana ini telah diterapkan pada sebuah struktur pandu gelombang rib. Pengaruh parameter ketebalan slab bagian luar pada konstanta propagasi, indeks bias dan birefringence juga dipelajari. Kesepakatan yang baik atau kesesuaian dengan metoda yang telah dipublikasi telah diperoleh.

DAFTAR REFERENSI

[1]. H. Kogelnik and V. Ramaswamy, "Scaling Rules for Thin-Film Optical Waveguides", Applied Optics, Vol. 13, No. 8, August 1974.

[2]. M.S. Stern, "Semivectorial polarised finite difference method for optical waveguides with arbitrary index profiles", IEE PROCEEDINGS, Vol. 135, Pt. J, No. I , FEBRUARY 1988.

[3]. Norazan Mohd Kassim," Optical Waveguides in Silicon Materials", University of Nottingham: PhD Thesis 1991.

[4]. Rahman B.M.A., and DAVIES, J.B. "Vector-H finite element solution of GaAs/GaAlAs rib waveguides", *IEE Proc.* J, 1985, 132, 349-353, 1985.

[5]. Zaghloul, M., and Abou El-Fadi, A.A, "A Simple Analytical Approach to Optical Rib Waveguides". 16th National Radio Science Conference, NRSC: B9/1-B9/8. 1999.

[6]. K.S. Chiang and W.P. Wong, "Rib waveguides with degenerate polarised modes" ELECTRONICS LETTERS, Vol. 32 No. 12, 6th June 1996.