

Pemandu Gelombang Optik Polimer pada Substrat Silikon Dioksida untuk Panjang Gelombang 1,55 μm

Optical Waveguide Using Polymer Material on Silicon Dioxide Substrate for 1.55 μm Optical Wavelength

Dadin Mahmudin dan Yusuf Nur Wijayanto

Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.
Komp LIPI Gd 20, Jl Sangkurian 21/54D, Bandung 40135, Indonesia

Abstrak

Cahaya dapat dirambatkan dengan efektif melalui pandu gelombang optik untuk aplikasi teknologi komunikasi. Pandu gelombang optik memiliki beberapa struktur seperti struktur melingkar (serat optik) dan struktur planar (pandu gelombang optik persegi). Serat optik pada umumnya digunakan untuk komunikasi jarak jauh dan pandu gelombang optik persegi digunakan untuk komunikasi jarak pendek. Dalam tulisan ini, dibahas pandu gelombang optik persegi dengan menggunakan bahan polimer pada substrat silikon dioksida untuk panjang gelombang optik 1,55 μm . Bahan polimer digunakan sebagai inti (*core*) dari pandu gelombang optik. Silikon dioksida dan udara digunakan sebagai selubung (*cladding*). Bahan polimer digunakan sebagai inti karena nilai indeks biasnya lebih besar dibanding material lain yang digunakan sebagai selubung. Analisis pandu gelombang optik dihitung dengan menggunakan *software* Wolfram Mathematica yang berdasarkan pada metode Marcatti dan persamaan Maxwell. Distribusi medan dan mode dispersi dari pandu gelombang optik telah diperoleh untuk panjang gelombang optik 1,55 μm . Moda operasi dari pandu gelombang optik dapat dikontrol dengan mengatur ukuran panjang dan lebar dari inti. Analisis dan hasil pandu gelombang optik dibahas secara rinci. Pandu gelombang optik menggunakan bahan polimer pada substrat silikon dioksida dapat digunakan untuk rangkaian optik terpadu dan perangkat penginderaan optik.

Kata kunci: pandu gelombang optik, polimer, silikon dioksida, distribusi medan optik, mode operasi optik.

Abstract

Light can be propagated effectively through optical waveguides for communication. Optical waveguides have several structures such as a circular structure (optical fibers) and planar structure (rectangular optical waveguides). The optical fibers are used commonly for long distance communication and the rectangular optical waveguides can be used for short distance communication. In this paper, rectangular optical waveguides using a polymer material on a silicon dioxide substrate are discussed for 1.55 μm optical wavelength. The polymer material is used for a core of the optical waveguides. The silicon dioxide and air are used for its cladding. The polymer material is good for the core region since its refractive index is larger than the cladding regions. In analysis, the optical waveguides was calculated using Wolfram Mathematica software based on the Marcatti's method and Maxwell's equations. Field distribution and modal dispersion of the optical waveguide were obtained for 1.55 μm optical wavelength. Operation mode of the optical waveguides can be controlled by setting the core size in the height and width. The analysis and results of the optical waveguides are discussed in detail. The optical waveguides using a polymer material on a silicon dioxide substrate can be used for integrated optical circuit and optical sensing devices.

Keywords: optical waveguide, polymer, silicon dioxide, optical field distribution, optical mode operation.

I. PENDAHULUAN

Pandu gelombang adalah media yang digunakan untuk memandu gelombang seperti gelombang elektromagnetik dan gelombang suara [1]. Sedangkan pandu gelombang optik yaitu media yang digunakan untuk menyalurkan informasi yang berkapasitas besar. Pemandu gelombang optik banyak digunakan pada sistem telekomunikasi, hal ini dikarenakan oleh keunggulan-keunggulan yang dimilikinya seperti: (1) lebih ekonomis, (2) lebih cepat dalam hal mentransmisikan data, (3) lebih aman dari sistem

penyadapan, dll.

Berdasarkan sifat karakteristiknya, pandu gelombang optik dibagi menjadi dua, yang pertama adalah *single mode*, di mana *single mode* adalah sebuah sistem transmisi data berwujud cahaya yang di dalamnya hanya terdapat satu buah indeks sinar tanpa terpantul yang merambat sepanjang media tersebut dibentang. Satu buah sinar yang tidak terpantul di dalam media optik tersebut membuat teknologi fiber optik yang satu ini hanya sedikit mengalami gangguan dalam perjalanannya. Itu pun lebih banyak gangguan yang berasal dari luar maupun gangguan fisik saja. Kedua adalah *multi mode* yaitu jenis serat optik yang penyaluran cahayanya dari satu ujung ke ujung lainnya dengan melalui beberapa lintasan cahaya dengan memiliki dua profil indeks bias yaitu *graded index* dan *step index* [2].

* Corresponding Author.

Email: dradrin@gmail.com, esdetrans@gmail.com

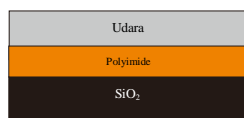
Received: November 21, 2014; Revised: December 12, 2014

Accepted: December 30, 2014

Published: December 30, 2014

© 2014PPET - LIPI

doi : 10.14203/jet.v14.56-60



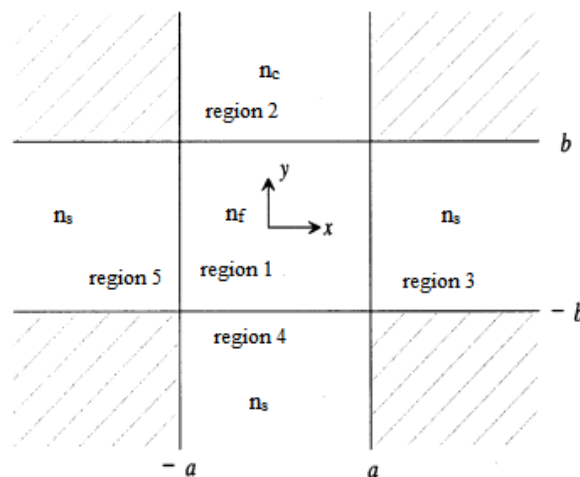
Gambar 1. Pemandu Gelombang Optik Berstruktur Planar.

Pada Gambar 1 dapat dijelaskan bahwa untuk memperoleh pemandu gelombang optik dengan keadaan *single mode* diperlukan material dengan syarat indeks bias $n_f > n_s > n_c$ dengan n_f adalah indeks bias *core* (*polyimide*), n_s = indeks bias substrat (SiO_2), dan n_c = indeks bias *cladding* (udara) [3]. Adapun pemandu gelombang optik yang digunakan adalah *planar optical waveguides*, hal ini dikarenakan lebih mudah dibuat pada beberapa bahan material yang berbeda serta dapat diperoleh berbagai aplikasi yang penting. Bahan elektro-optik yang digunakan untuk pabrikasi *planar optical waveguides* cocok untuk *modulator*. Bahkan silika dan polimer organik dapat digunakan untuk membentuk *planar optical waveguides* yang berguna untuk berbagai macam aplikasi [4]. Selain itu, *planar optical waveguide* dapat digunakan untuk *integrated optics* dengan kelebihan sebagai berikut: *low insertion loss*, lebih efisien untuk menggabungkan serat optik ke dalam sebuah *chip*, *polarization independent operation*, memiliki *integration density* yang tinggi, jangkauan lebih reliabel, dan lebih ekonomis dalam teknologi pabrikasi [5]. Bahan yang digunakan pada pabrikasi ini adalah polimer yang dapat dibuat untuk berbagai bentuk (struktur) pada aplikasi di bidang telekomunikasi dan elektronika. Di bidang telekomunikasi, *waveguide polymer* dapat digunakan sebagai filter cahaya (*optical filter*) seperti: *Mach-Zehnder Interferometer* dan *Microring-Resonator*. Sedangkan di bidang elektronika, *waveguide* optik dapat digunakan sebagai komponen sensor.

Polyimide adalah gugus yang sangat menarik dari bahan polimer, yang memiliki kekuatan luar biasa dan ketahanan terhadap panas dan bahan kimia yang sangat baik. Kekuatan dan ketahanannya terhadap panas dan bahan kimia begitu bagus, di mana material ini sering dilapiskan pada gelas dan logam seperti halnya baja, dan diaplikasikan dalam kebutuhan industri. *Polyimide* bahkan digunakan dalam kehidupan sehari-hari, karena memiliki kestabilan termal, ketahanan terhadap minyak, pelumas, dan lemak, serta sifat transparansinya terhadap radiasi gelombang mikro. Jenis polimer ini juga dapat digunakan dalam *circuit board*, isolator, fiber untuk pelindung pakaian, komposit dan adhesif [6], [7]. Dalam tulisan ini akan dibahas perancangan untuk memperoleh *modal dispersion* dan *field profiles* dari pemandu gelombang optik dengan substrat polimer (*polyimide*). Metode yang digunakan adalah *step index* dengan menggunakan metode Marcantili dan penurunan persamaan *Maxwell*. Perancangan dilakukan menggunakan program Wolfram Mathematica.

II. METODE PERANCANGAN

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah studi literatur dan simulasi dengan menggunakan program Wolfram Mathematica. Adapun pada perancangan dilakukan dengan menggunakan metode Marcantili (Gambar 2):



Gambar 2. Metode Marcantili [8].

- Metode Marcantili

Pada pemandu gelombang optik terdapat beberapa metode analisis yang digunakan, di antaranya adalah metode untuk 3 layer pada pemandu gelombang optik *slab*, metode *effective index*, dan metode Marcantili. Metode analisis ini lebih akurat dibandingkan dengan metode *numeric*. Akan tetapi lebih sulit digunakan dan harus lebih jelas. Dalam tulisan ini digunakan metode Marcantili yaitu seperti pada Gambar 2 yang menunjukkan *cross-section* sebuah pemandu gelombang optik *buried*. Pada Gambar 2 terdapat *core* sebagai n_f , lebar $2a$ dan tinggi $2b$ yang dikelilingi oleh *cladding* dengan indeks bias n_s dan n_c . Pada metode Marcantili diasumsikan bahwa medan listrik dan medan magnet mengikat inti (*core*) mode TE (*transverse electric*) untuk E_{pq}^x yang memiliki komponen medan utama E_x dan H_y , sehingga dapat diasumsikan polarisasi medan listrik di sumbu x dengan $E_y = 0$ [8].

Medan listrik dan medan magnet setiap region pada Gambar 2 bisa diperoleh dengan fungsi gelombang sebagai berikut [5]:

$$\begin{aligned} E_x &= C_1 \cos(k_x x + \alpha_1) \cos(k_y y + \alpha_2) & (\text{region 1}) \\ &= C_2 \cos(k_x x + \alpha_1) \exp(-\gamma_y(y - b)) & (\text{region 2}) \\ &= C_3 \exp(-\gamma_x(x - a)) \cos(k_y y + \alpha_2) & (\text{region 3}) \\ &= C_4 \cos(k_x + \alpha_1) \exp(\gamma_y(y + b)) & (\text{region 4}) \\ &= C_5 \exp(\gamma_x(x + a)) \cos(k_y y + \alpha_2) & (\text{region 5}) \end{aligned} \quad (1)$$

dengan:

$$k_x^2 + k_y^2 + \beta^2 = k_0^2 n_f^2 \quad (2)$$

$$k_x^2 - \gamma_y^2 + \beta^2 = k_0^2 n_f^2 \quad (3)$$

$$-\gamma_x^2 + k_y^2 + \beta^2 = k_0^2 n_f^2 \quad (4)$$

sehingga diperoleh:

$$\gamma_x^2 = k_0^2 (n_f^2 - n_s^2) - k_x^2 \quad (5)$$

$$\gamma_y^2 = k_0^2 (n_f^2 - n_s^2) - k_y^2 \quad (6)$$

di mana,

γ = konstanta fase

β = konstanta propagasi

α = konstanta atenuasi
 k = bilangan gelombang (ω/c),
 ω = kecepatan sudut
 c = kecepatan cahaya
 C = amplitudo
 n_f = indeks bias *core*
 n_s = indeks bias substrat

Single mode dan *multi mode* dari *optical waveguide* dapat ditentukan dengan mengatur ukuran *core* dari pemandu gelombang optik tersebut, di mana ukuran *core* tersebut terdapat dua parameter penting yaitu ketinggian dan lebar. Penentuan ketinggian dan lebar dari pemandu gelombang optik berstruktur planar menggunakan persamaan-persamaan seperti di bawah ini [4].

$$2V\sqrt{1-b} = m\pi + \tan^{-1}\sqrt{\frac{b}{1-b}} + \tan^{-1}\sqrt{\frac{b+\delta}{1-b}} \quad (7)$$

$$2V\sqrt{1-b} = m\pi + \tan^{-1}\left(\frac{n_f^2}{n_s^2}\sqrt{\frac{b}{1-b}}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{n_f^2}{n_c^2}\sqrt{\frac{b+\delta}{1-b}}\right) \quad (8)$$

di mana,

$$b = \frac{\bar{n}^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_s^2}, \delta = \frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2} \quad (9)$$

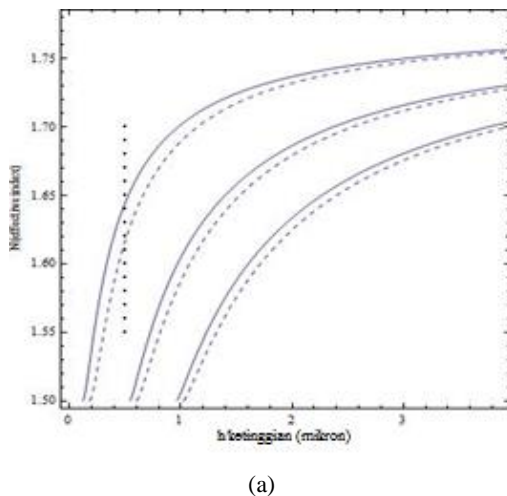
$$V = k_0 d \sqrt{n_f^2 - n_s^2} \quad (10)$$

di mana,

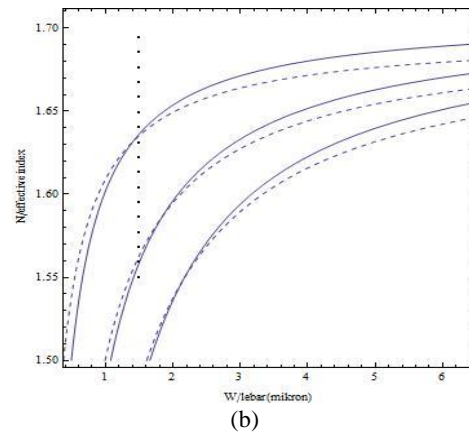
δ = parameter ukuran panduan gelombang tidak simetris
 n_c = indeks bias *cladding*
 $m = 0, 1, 2, 3$
 d = parameter ukuran *core*

III. HASIL ANALISIS

Gambar 3 merupakan hasil simulasi dengan menggunakan program Wolfram Mathematica dengan memasukan persamaan (1), (7), dan (8), sehingga diperoleh:

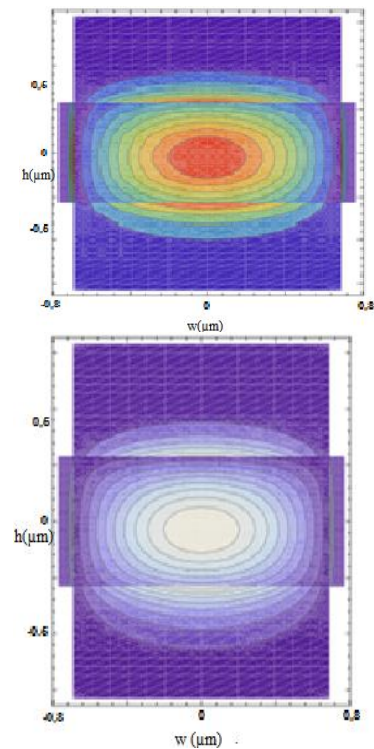


(a)

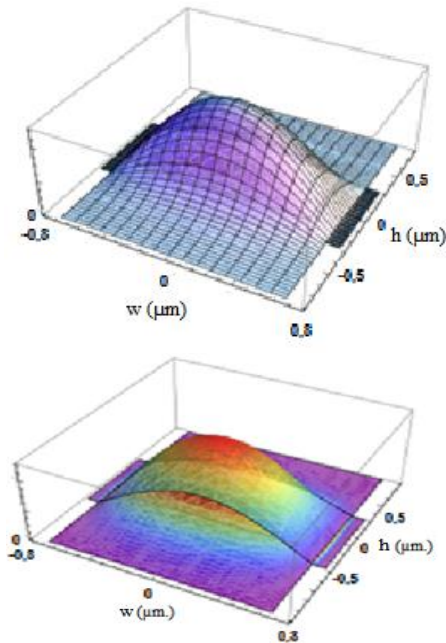


Gambar 3. Hubungan Antara Ketebalan (a) dan Lebar (b) Dengan *Effective Index*.

Pada perancangan pemandu gelombang optik berstruktur planar seperti Gambar 1, ditetapkan harga indeks bias dari substrat (n_s) yaitu $\text{SiO}_2 = 1,5$, *polyimide* (n_f) = 1,78, dan udara (n_c) = 1. Setelah mengetahui nilai indeks bias masing-masing dan nilai *effective index* 1,64 maka akan diperoleh ketinggian atau ketebalan dari *core* untuk keadaan *single mode* yaitu 1,09 μm , seperti terlihat pada Gambar 4 (a). Untuk memperoleh harga lebar *waveguide*, pada saat ketinggian 1,09 μm dapat dimasukkan kedalam Persamaan (7) dan (8), sehingga dapat diperoleh lebar pada pemandu gelombang optik berstruktur planar yaitu 1,5 μm untuk keadaan *single mode*. Keadaan ini dapat dijadikan acuan untuk proses pabrikasi. Kemudian untuk mengetahui mode pemandu gelombang optik berstruktur planar digunakan metode Marcattilli dengan memasukkan harga tinggi dan lebar yang sudah diketahui dari perancangan sebelumnya, maka diperoleh mode profil 2D seperti pada Gambar 4, dan Gambar 5 merupakan hasil simulasi mode profil 3D.

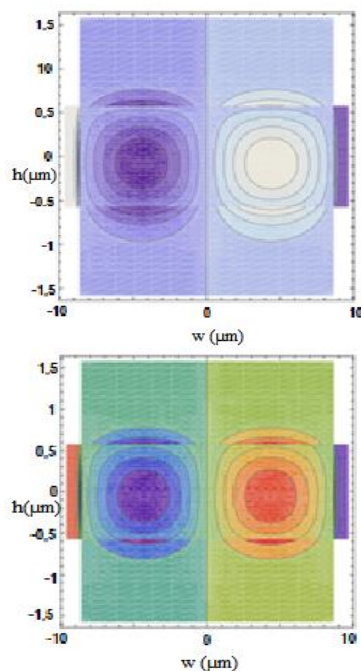
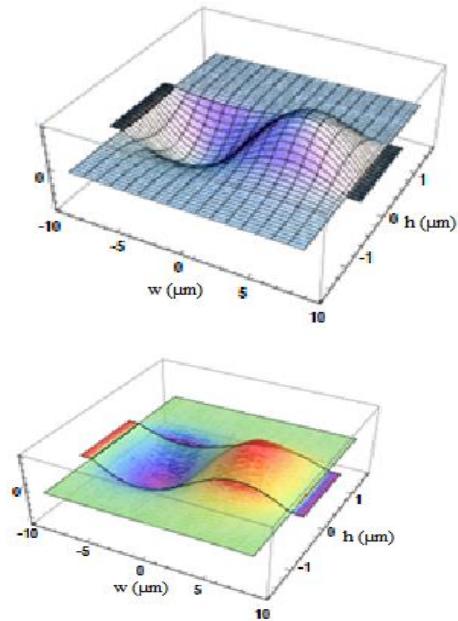


Gambar 4. 2D E_{pq}^x Mode dan E_{pq}^y Mode untuk $p = 1$ dan $q = 1$.

Gambar 5. 3D E_{pq}^x Mode dan E_{pq}^y Mode untuk $p = 1$ dan $q = 1$.

Pada Gambar 4 dapat diperoleh keadaan mode-mode pada pemandu gelombang optik berstruktur planar dengan nilai ($p = 1$ dan $q = 1$) pada saat nilai $h = 1,09 \mu\text{m}$ dan $w = 1,5 \mu\text{m}$. Mode E^x menunjukkan untuk keadaan *electric field*, di mana diasumsikan $E_y = 0$. Mode E^y menunjukkan untuk keadaan *magnetic field*, dengan $H_y = 0$. Gambar 4 dan Gambar 5 menunjukkan bahwa dengan harga $h = 1,09 \mu\text{m}$ dan $w = 1,5 \mu\text{m}$ diperoleh keadaan *single mode*.

Sebagai perbandingan, dilakukan juga simulasi untuk mendapatkan mode pemandu gelombang optik berstruktur planar *multi-mode* dengan nilai $p = 2$, $q = 1$, $h = 1,09 \mu\text{m}$, $w = 17,28 \mu\text{m}$ dengan nilai $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$. Hasil dari simulasi dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.

Gambar 6. 2D E_{pq}^x Mode dan E_{pq}^y Mode untuk $p = 2$ dan $q = 1$.Gambar 7. 3D E_{pq}^x Mode dan E_{pq}^y Mode untuk $p = 2$ dan $q = 1$.

KESIMPULAN

Analisis pemandu gelombang cahaya menggunakan bahan polimer pada substrat silikon dioksida telah dilakukan pada operasi panjang gelombang 1,55 μm . Moda operasi dari pemandu gelombang cahaya dapat ditentukan dengan mengatur ukuran inti pemandu gelombang berupa tinggi dan lebarnya. Lebih lanjut, distribusi medan cahaya pada pemandu gelombang tersebut telah dilakukan baik pada operasi moda tunggal dan moda banyak. Sehingga, pemandu gelombang cahaya dengan bahan polimer pada substrat silikon dioksida dapat digunakan untuk memandu gelombang cahaya dengan jarak pendek seperti pada komponen optik terintegrasi dan sensor optik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ibu Anggraeni dan Dr. Lilik Hasanah, M.Si dari Universitas Pendidikan Indonesiadan Bapak Topik Teguh Estu dari Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) atas bantuannya dalam melakukan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Walahir. (2012). Pandu gelombang. [Online]. Available: <http://husnawalahir.blogspot.com/2012/01/pandu-gelombang.html>
- [2] G. E. Keiser, *Optical Fiber Communications*, International Ed., New York, USA: McGraw-Hill 2000.
- [3] A. Y. Rohedi, Suryadi, dan A. Rubiyanto, "Teknik menormalisasi persamaan relasi dispersi pandu gelombang slab berbasis bahan optik linier", *Seminar Nasional Ikatan Sarjana Nahdlatul Ulama*, Surabaya, Juni 2004, hal.71-81.
- [4] G. P. Agrawal, *Lightwave Technology Components and Devices*. New Jersey, USA: John Wiley and Sons, Inc., 2004.
- [5] K. Worhoff, P. V. Lambeck, and A. Driessen, "Design, tolerance analysis, and fabrication of silicon oxynitride based planar optical waveguides for communication devices", *Journal Of Lightwave Technology*, vol. 17, no. 8, pp. 1401-1407, August 1999.
- [6] L. A. Eldada, *Optical Networking Components*, Wilmington, USA: DuPont Photonics Technologies, 2005.

- [7] L. A. Eldada, K. W. Beeson, D. Pant, R. Blomquist, L. W. Shacklette, and M. J. McFarland, "Polymeric components for all optical network", *Proc. SPIE3950, Optoelectronic Integrated Circuits IV*, 78, April 2000.
- [8] K. Kawano, *Introduction to Optical Waveguide Analysis*, New York, USA: John Wiley and Sons, Inc., 2001.