

An MMI-based Polarization Splitter using Patterned Metal and Angled Joint

Kojima, K.; Nishikawa, S.; Yagyū, E.; Yuan, W.; Wang, B.; Koike-Akino, T.; Parsons, K.

TR2013-012 March 2013

Abstract

We have proposed a polarization beam splitter consisting of MMI with angled joint and metal layer made on an InP substrate. The total device length is less than 600 μm . Computer simulation results show that the insertion loss is less than 0.7 dB and the polarization extinction ratio is greater than 23 dB over the entire C-band.

IEICE 2013/02 OCS/OFT/OPE

This work may not be copied or reproduced in whole or in part for any commercial purpose. Permission to copy in whole or in part without payment of fee is granted for nonprofit educational and research purposes provided that all such whole or partial copies include the following: a notice that such copying is by permission of Mitsubishi Electric Research Laboratories, Inc.; an acknowledgment of the authors and individual contributions to the work; and all applicable portions of the copyright notice. Copying, reproduction, or republishing for any other purpose shall require a license with payment of fee to Mitsubishi Electric Research Laboratories, Inc. All rights reserved.

金属膜と傾斜接合を持つMMI構造による偏波面分離素子の設計

小島 啓介[†] 西川 智志[‡] 柳生 栄治[‡] Wangqing Yuan[†]
Bingnan Wang[†] 秋濃 俊昭[†] Kieran Parsons[†]

[†] Mitsubishi Electric Research Laboratories, 201 Broadway Suite 8, Cambridge, MA 02139, USA

[‡] 三菱電機株式会社先端技術総合研究所 〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8丁目1番1号

E-mail: [†] {kojima, yuan, bwang, koike, parsons}@merl.com, [‡] {Nishikawa.Satoshi@bx,
Yagyuu.Eiji@cb}.MitsubishiElectric.co.jp

あらまし InP基板上に作成された、金属膜と傾斜接合を持つMMI (Multi-Mode Interference) による偏波面分離素子の設計を行った。素子の全長は600 μm 以下である。計算機シミュレーションの結果、Cバンド全体で、挿入損失0.7dB以下、偏波面消光比23dBが得られた。

キーワード MMI、偏波面分離素子、光集積素子

An MMI-based Polarization Splitter Using Patterned Metal and Angled Joint

Keisuke KOJIMA[†] Satoshi NISHIKAWA[‡] Eiji YAGYU[‡] Wangqing YUAN[†]
Bingnan WANG[†] Toshiaki KOIKE-AKINO[†] Kieran PARSONS[†]

[†] Mitsubishi Electric Research Laboratories, 201 Broadway Suite 8, Cambridge, MA, USA

[‡] Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation,

8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-8661, Japan

E-mail: [†] {kojima, yuan, bwang, koike, parsons}@merl.com, [‡] {Nishikawa.Satoshi@bx,
Yagyuu.Eiji@cb}.MitsubishiElectric.co.jp

Abstract We have proposed a polarization beam splitter consisting of MMI with angled joint and metal layer made on an InP substrate. The total device length is less than 600 μm . Computer simulation results show that the insertion loss is less than 0.7 dB and the polarization extinction ratio is greater than 23 dB over the entire C-band.

Keyword MMI, Polarization Beam Splitter, PIC

1. 前書き

光集積回路 (PIC: Photonic Integrated Circuit) の設計において、偏波面を制御することは高速光通信を実現する上で非常に重要である。PICの偏波面依存性やPMD (Polarization Mode Dispersion) は特に高速変調において特性を劣化させる。これを防ぐために、偏波面ダイバーシティ方式が提案されている[1-3]。別の例としては、偏波面多重を用いることにより、伝送容量・スペクトル効率を2倍にすることが可能となる[4]。偏波面ダイバーシティ方式や偏波面多重方式を実現するには、偏波面分離素子が重要な構成要素となる。特に、InP基板上に作製された偏波面分離素子は、レーザ・変調器・受光素子などのアクティブ素子とのモノリシック集積化を実現する上で大いに期待される[5-6]。

MMI (Multi-Mode Interference) 合分波素子は、小型性・広帯域性・製造ばらつきに対する許容性を有するために[7]、偏波面分離素子を実現するのに有望な構成要素である。2個のMMI合分波素子をMZ (Mach

Zehnder) 干渉計に用いた偏波面分離素子は既に提案・実現されている[8]。そこでは、干渉計の一方の導波路の上に誘電体膜と金属膜を蒸着して複屈折を実現しているが、全素子長は3.3 mmと決して小型とはいえなかった。別の方式としては、MMI自体を偏波面分離素子として用いることが考えられる。しかしながら、MMI素子自体は物質系にはよらず本質的には偏波面依存性が小さいということと、InP/InGaAsP材料系においてはSOI (Silicon-On-Insulator)系に比べてコア層とクラッド層の間の屈折率差が小さいために複屈折が小さくなり、数mmという素子長しか実現されていなかった。準状態 (Quasi State) MMI素子[10]、あるいはスロット導波路[11]を用いた偏波面分離素子が、素子長を低減するために提案されているが、性能や製造容易性に妥協が生じている。

本報告においては、1 \times 2 MMI素子を用いた新しい偏波面分離素子構造の提案とシミュレーション結果を示す。MMI素子中に作り付けた、誘電体膜と金属膜によ

る位相シフト部においては、TEとTMモードに大きな複屈折率が生じ、出力ポートにおいてはTEとTMモードが十分分離される。また、MMI素子に作りつけられた傾斜接合によりTEとTMにそれぞれ正確に $\pm\pi/2$ の位相差をつけることで高い偏波面消光比を実現する。素子の最適化により、Cバンド全体で良好な特性と製造ばらつきに対する高い許容性を得ることができた。

2. 原理と設計方法

提案する偏波面分離素子の機能ブロック図を図1に示す。入力信号のTE、TM成分は、 1×2 MMIで等しい位相と強度に2分され、位相シフト部に入力される。この位相シフト部では、TE、TMモードに対して、それぞれ $-\pi/2$ 、 $+\pi/2$ の位相差が下のアームに生じるように設計されている。 2×2 MMIにおいては、クロス状態の光には、パー状態の光に比較して $-\pi/2$ の位相差が生じるので、TE、TMモードの光はそれぞれ下あるいは上の出力ポートに出射する。

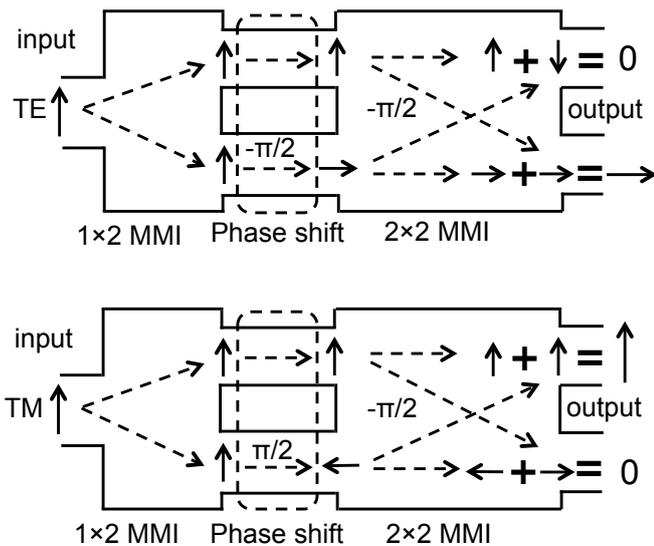


図1 本提案の、MMI素子をベースとした偏波面分離素子の機能ブロック図。矢印は電界の位相を示す。

位相シフトに必要な複屈折を作り出すために、誘電対膜と金属膜を導波路に装荷することは以前に検討されている[12]。ここでは、特に $0.6\mu\text{m}$ 厚のInGaAsP ($\lambda=1.3\mu\text{m}$)の上に SiN_x と $0.2\mu\text{m}$ 厚の金属を持つ導波路において SiN_x の膜厚を変えた場合の Δn_{eff} (金属がある場合と無い場合の有効屈折率の差)を2次元シミュレーションで求めた結果を図2に示す。TEモードに対して、金属膜は電界を押しやる効果があり、それにより Δn_{eff} は負になる。それに対して、TMモードに対して

金属膜は電界を引き寄せる効果があり、それにより Δn_{eff} は正となる。本設計では、 SiN_x の膜厚としては $0.8\mu\text{m}$ を選んだ。その場合、TE、TMモードに対する吸収係数はそれぞれ 9.7cm^{-1} と 11.8cm^{-1} となる。 SiN_x の膜厚は位相シフトと吸収係数のバランスをとるために重要な役割を果たす。 SiN 層がない場合にはTMモードは表面プラズモンポラリトンとして界面に局在し、吸収係数は極めて大きなものとなる。

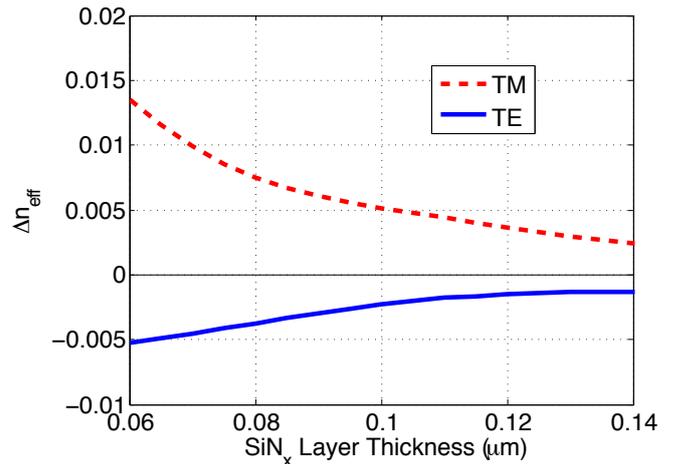


図2 Δn_{eff} (金属膜がある場合とない場合の有効屈折率差) と SiN_x 膜厚の関係の計算値

図3は提案する素子の構造図である。図1に示された位相シフト部は図3(a)中の S_2 と S_3 で示され、 SiN_x 層上に蒸着される金属膜とMMIの傾斜接合により実現される。ここでは、位相シフト部は 1×2 MMIと 2×2 MMIと一体化されている。金属膜のある部分では、TEとTMに位相差が生じ、傾斜接合によりそれぞれ $-\pi/2$ と $\pi/2$ の位相差となるように設計する。

設計に用いたサイズは以下の通りである。入力の導波路幅 W_{input} は $4.5\mu\text{m}$ 、 S_2 と S_3 の境界線での傾斜角は 0.45 度、MMIの幅と全長(L)はそれぞれ $10\mu\text{m}$ 、 $538\mu\text{m}$ である。また、金属膜の幅と全長(L_M)はそれぞれ $4.5\mu\text{m}$ 、 $72\mu\text{m}$ である。 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 部の長さは、それぞれ $1/5L-1/2L_m$ 、 $1/2L_m$ 、 $1/2L_m$ 、 $4/5L-1/2L_m$ である。上側の出力ポート幅 W_{TM} は $4.5\mu\text{m}$ 、下側の出力ポート幅 W_{TE} は $4.45\mu\text{m}$ 、モード調節部の幅 W_{con} と長さ L_{con} はそれぞれ $4.9\mu\text{m}$ 、 $47\mu\text{m}$ である。層構造としては、InP層の上に $0.6\mu\text{m}$ 厚のInGaAsP ($\lambda_g=1.3\mu\text{m}$)の上に $0.08\mu\text{m}$ 厚の SiN_x 膜を作り、位相シフト部には $0.2\mu\text{m}$ 厚のAu層を作り付ける。また、TEモードのための下部出力ポートには $0.2\mu\text{m}$ 長に金属膜をInGaAsP層に直接積層し、TMモードを吸収する偏光子として用いる。これにより、TM光入力に対しては、7dBの偏波面消光比 (PER:

Polarization Extinction Ratio) の改善がなされている。素子の全長は $600\ \mu\text{m}$ であり、これは以前に報告されているInP系MMI素子を用いた偏波面分離素子の全長 $1050\ \mu\text{m}$ [10]よりはるかに短い。

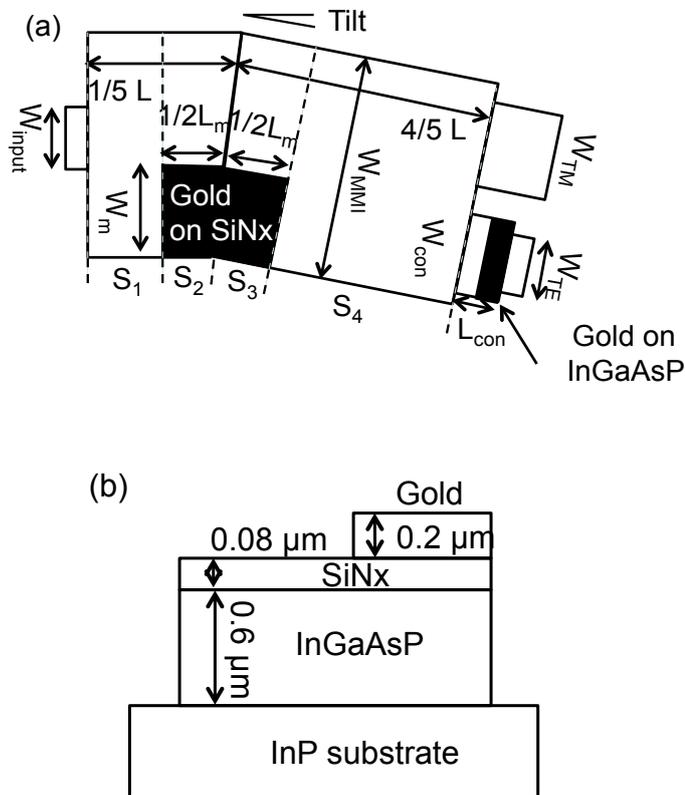


図 3 提案する素子の(a)上面図と(b)断面図 (S_2 と S_3 の境界部)

3. シミュレーション結果

シミュレーションは固有モード展開法を用いる市販のFIMMWAVEにより行った[14]。2次元の固有モード計算には有限要素法を用いた。シミュレーションにおいては、素子製造プロセスに依存する、素子側面の凸凹による散乱損失や、結晶成長プロセスに依存する、導波路での吸収損失は含んでいない。

図 4 には、TE、TMモードの入力による伝搬を示す。想定していたように、TEモードは下部ポート、TMモードは上部ポートに導かれていることが示されている。TMモードは出力面に結像しているが、TEモードは出力面の少し手前に結像している。そのために前述のモード調節部により結合効率を改善している。なお、傾斜角は非常に小さいので、図にははっきりとはあらわれていない。

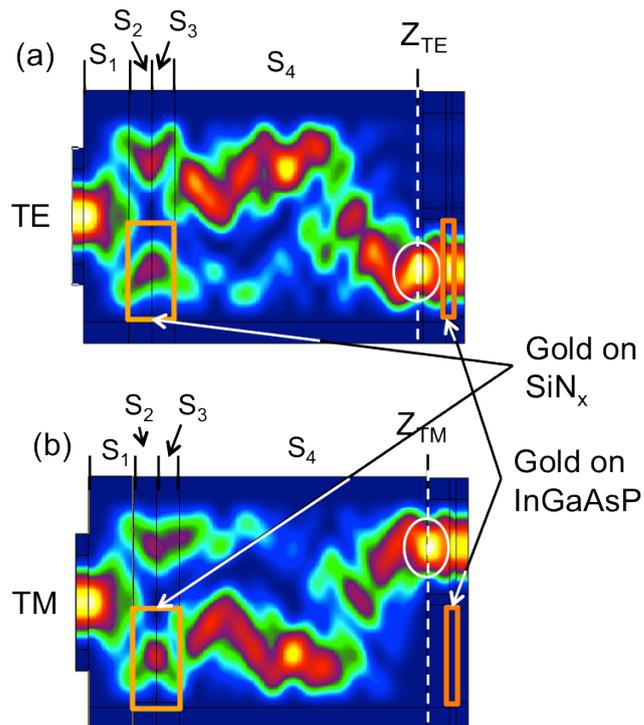


図 4 (a) TEモード、(b) TMモード入力に対する電界の伝搬特性のシミュレーション結果

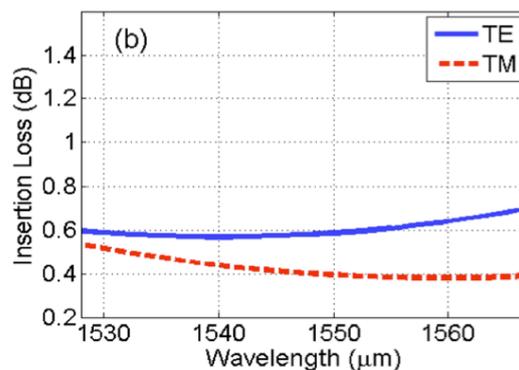
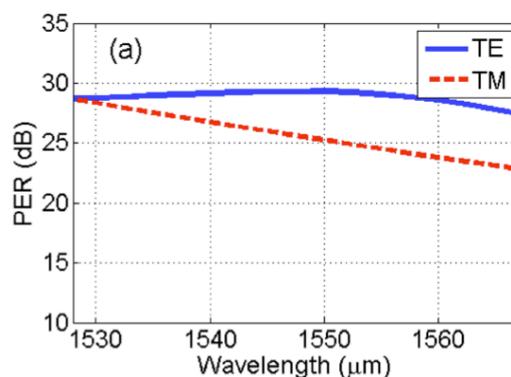


図 5 TE、TMモードに対する (a) 偏波面消光比と (b) 挿入損失の波長依存性のシミュレーション結果

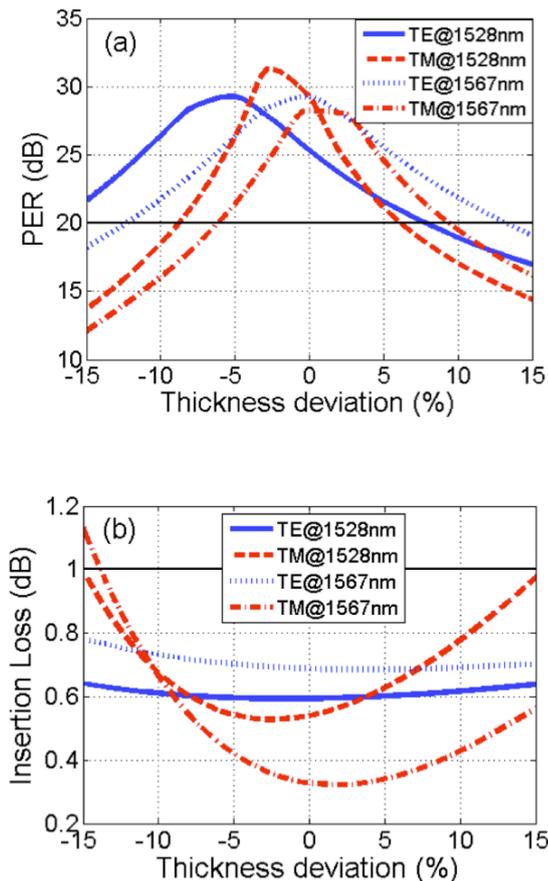


図 6 TE、TMモードのCバンド両端における(a) 偏波面消光比と(b)挿入損失のSiN_x膜厚設計値からのずれによる影響のシミュレーション結果

図 5 は PER と挿入損失の TE、TM モードに対する波長依存性を示す。C バンド(1528-1567nm)全域で PER 23 dB 以上、挿入損失 0.7dB 以下が得られている。MMI 素子の特徴である広帯域はこの素子でも保たれていることを示している。

製造上のばらつきに対する検討も行った。実際の素子の作成においては、SiN_x層の膜厚が図 2 に示されるように位相シフト量を左右するので、膜厚のばらつきの影響を考慮する必要がある。図 6 は SiN_x層の膜厚変位(設計値 0.08μm からのずれ)に対して、TE、TM モードの C バンドの両端における PER と挿入損失をプロットしたものである。±6% のずれに対して、PER 20dB 以上、挿入損失 1dB 以下が得られていることがわかる。この程度の製造ばらつき制御は、ALE (Atomic Layer Deposition) [15] などにより実現できると期待される。

素子構造の最適化にあたっては、MMI 長、金属パターン長(Lm)と幅(Wm)、傾斜角等のパラメータを、C バンドでの両端で TE、TM モード共に 偏波面消光比 20dB 以上、挿入損失 1dB を満たす SiN_x膜厚の範囲が最大に

なるように行った。今後、更に他の素子パラメータの製造上のばらつきも検討する予定である。

なお、ここでは InP 材料系を対象に検討をしたが、別の材料系でも適用が可能であると思われる。

4. 結論

InP 基板上的 MMI をベースにした新しい偏波面分離素子を提案し、シミュレーションを行った。MMI 上に SiN_x誘電体膜を形成し、更に金属パターンを部分的に作成して TE と TM モードに対して位相シフトを与える。更に MMI の傾斜により位相シフト量を正確に $-\pi/2$ と $\pi/2$ になるように設計した。デバイス全長は 600μm 以下である。シミュレーションによれば、1528nm から 1567nm にわたって、偏波面消光比 23dB 以上、挿入損失 0.7dB 以下が得られた。また、製造上のばらつきを考慮し、SiN_x膜が設計値より ±6% ずれた場合にも、C バンド全域で 偏波面消光比 20dB 以上、挿入損失 1dB 以下が期待されることがわかった。なお、本稿では InGaAsP/InP 系を想定して素子構造を検討したが、SOI 等の他の材料系においても適用が可能であると考えられる。

文 献

- [1] T. Barwicz, M. R. Watts, M. A. Popovic, P. T. Rakich, L. Socci, F. X. Kartner, E. P. Ippen, and H. I. Smith, "Polarization-transparent microphotonic devices in the strong confinement limit," *Nat. Photonics*, vol.1, pp.57-60, January 2007.
- [2] H. Fukuda, K. Yamada, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, H. Shinjima, and S. Itabashi, "Silicon photonic circuit with polarization diversity," *Opt. Express*, vol.16, no.7, pp.4872-4880, March 2008.
- [3] W. Bogaerts, D. Taillaert, P. Dumon, D. V. Thourhout, R. Baets, and E. Pluk, "A polarization-diversity wavelength duplexer circuit in silicon-on-insulator photonic wires," *Opt. Express*, vol.15, no.4, pp.1567-1578, February 2007.
- [4] R. Nagarajan, J. Rahn, M. Kato, J. Pleumeekers, D. Lambert, V. Lal, H. S. Tsai, A. Nilsson, A. Dentai, M. Kuntz, R. Malendevich, J. Tang, J. Zhang, T. Butrie, M. Raburn, B. Little, W. Chen, G. Goldfarb, V. Dominic, B. Taylor, M. Reffle, F. Kish, and D. Welch, "10 Channel, 45.6 Gb/s per channel, polarization-multiplexed DQPSK, InP receiver photonic integrated circuit," *J. Lightwave Technol.*, vol.29, no.4, pp.386-395, February 2011.
- [5] L. M. Augustin, R. Hanfoug, J. J. G. M. van der Tol, W. J. M. de Laat, and M. K. Smit, "A compact integrated polarization splitter/converter in InGaAsP-InP," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.19, no.17, pp.1286-1288, September 2007.
- [6] W. Yuan, K. Kojima, B. Wang, T. Koike-Akino, K. Parsons, S. Nishikawa, and E. Yagyu, "Mode-evolution-based polarization rotator-splitter design via simple fabrication process," *Optics Express*, vol.20, no.9, pp.10163-10169, April 2012.
- [7] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, "Optical

multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol.13, no.4, pp.615-627, April 1995.

- [8] L. B. Soldano, A. H. de Vreede, M. K. Smit, B. H. Verbeek, E. G. Metaal, and F. H. Groen, "Mach-Zehnder interferometer polarization splitter in InGaAsP/InP," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.6, no.3, pp.402-405, March 1994.
- [9] B. M. A. Rahman, N. Somasiri, C. Theimistos, and K. T. V. Grattan, "Design of optical polarization splitters in a single-section deeply etched MMI waveguide," *Appl. Phys. B*, vol.73, no.5-6, pp.613-618, October 2001.
- [10] J. M. Hong, H. H. Ryu, S. R. Park, J. W. Jeong, S. G. Lee, E. H. Lee, S. G. Park, D. Woo, S. Kim, and O. Beom-Hoan, "Design and fabrication of a significantly shortened multimode interference coupler for polarization splitter application," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.15, no.1, pp.72-74, January 2003.
- [11] A. Katigbak, J. F. Strother, Jr., and J. Lin, "Compact silicon slot waveguide polarization splitter," *Opt. Eng.*, vol.48, no.8, pp.080503-1-3, August 2009.
- [12] S. C. Rashleigh, "Four-layer metal-clad thin film optical waveguides," *Optical and Quantum Electron.*, vol.8, no.1, pp.49-60, January 1976.
- [13] Q. Lai, M. Bachmann, W. Hunziker, P. A. Besse, and H. Melchior, "Arbitrary ratio power splitters using angled silica on silicon multimode interference couplers," *Electron. Lett.*, vol.32, no.17, pp.1576-1577, August 1996.
- [14] D. F. G. Gallagher and T. P. Felici, "Eigenmode expansion methods for simulation of optical propagation in photonics: pros and cons," *Proc. SPIE*, vol.4987, pp.69-82, June 2003.
- [15] H. Goto, K. Shibahara, and S. Yokoyama, "Atomic layer controlled deposition of silicon nitride with self-limiting mechanism," *Appl. Phys. Lett.*, vol.68, no.23, pp.3257-3259, June 1996.