

屈折率テーパを用いた任意比光分配器の分配比改善に関する一考察

堀田 昌志[†] (正員) 高杉 宗弘[†] (学生員)
 小野 和雄[†] (正員)

A Study on Splitting Ratio for Variable Optical Beam Splitter Utilizing a Tapered in Index Velocity Coupler

Masashi HOTTA[†], Member, Munehiro TAKASUGI[†], Student Member, and Kazuo ONO[†], Member

[†] 愛媛大学工学部電気電子工学科, 松山市
 Faculty of Engineering, Ehime University, Matsuyama-shi, 790-77 Japan

あらまし これまでに提案してきた平行3線屈折率 Tapered Velocity Coupler (TVC) を用いた任意比光分配器の構造の最適化を行うことで, 分配比特性の大幅な改善が可能であることを示している. 解析には差分法 (FDM) を用いている.

キーワード 任意比光分配器, LiNbO₃, 電気光学効果, Tapered Velocity Coupler, 差分法

1. まえがき

高性能な光通信システムを構築するためには, 光波を任意の電力比に分配する素子が必要であると考えられる. 特に, 今後実用化が期待される超広帯域光通信技術におけるシステム全体の性能向上には, その特性が光波の波長に依存しない任意比光分配器の実現が望まれる. 現在, 波長依存性の極めて少ない素子として, 当初マイクロ波帯で注目を浴びた Tapered Velocity Coupler [1] (以下では TVC と称する) の原理を光波帯まで拡張したさまざまな機能をもつ光素子の構成例が報告されている [2]~[7].

筆者らの一人はこれまでに, 代表的な1軸異方性結晶である LiNbO₃ の電気光学効果と屈折率テーパ導波路を用いた平行3線 TVC からなる外部制御形任意比光分配器の構成法を提案している [4],[5]. しかし, これまでの分配器では, 素子長短縮のために素子の出射端近傍で屈折率テーパ導波路に急激な屈折率変化を必要としたり, 制御電圧を高くしても分配比が飽和してしまうといった問題点があった. そこで, 屈折率テーパ導波路に急激な屈折率変化を用いる代わりに, 分配器中にテーパ構造を導入することで素子長を短縮できることも明らかにしている [7]. しかし, 分配器中にテーパ構造を導入した場合でも, 分配比特性の改善を行うことはできず, その最大値はこれまでの分配器同様, たかだか 1:3 であった. そこで本論文では, 制御電圧を印加する電極配置を変更し, 電気光学効果によ

る光分配器の屈折率分布の非対称性を変化させることで, その分配比を大幅に改善できることを示す. なお, 数値解析には差分法 [8] を用いる.

2. TVC を用いた任意比光分配器

これまでに屈折率テーパ導波路を含む平行3線 TVC を用いた任意比光分配器の構成法が提案されている [4],[5]. この分配器は, コア領域の屈折率が伝送軸に沿って緩やかに変化する2本の屈折率テーパ導波路とその中央にある屈折率一定の直線導波路から構成されている. また, 屈折率テーパ導波路の屈折率は, 入射端で中央の導波路の屈折率よりも低く, 出射端で高くなるようにする. 更に, 素子長短縮のために出射端近傍で屈折率テーパ導波路の屈折率変化量を急激に大きくしている.

このような分配器において, 屈折率テーパ導波路の伝送軸に沿う屈折率の増分を適切に設計することにより, 中央の導波路から入射した光波を外側の2本の導波路へと1方向的に移行させることができ, 光波を分配できる.

ところで, 単調に屈折率に変化する屈折率テーパ導波路は, 膜厚をテーパ状に変化させた Ti フィルムを基板上に蒸着し, 熱拡散を行うことで作製できる [2],[3]. しかし, 熱拡散法では, 急激な屈折率変化をもつ屈折率テーパ導波路を再現性良く形成することは非常に困難である. そこで, 図1に示すように, 屈折率テーパ導波路の屈折率を急激に変化させる代わりに, 屈折率一定の中央の導波路 A にテーパ構造を導入することでも, 分配器の素子長を短縮可能であることが確認されている [7].

ここで, 図1に示すような TVC を代表的な1軸異

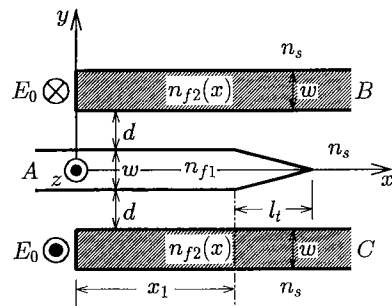


図1 テーパ構造を導入した任意比光分配器
 Fig.1 Variable optical beam splitter utilizing tapered velocity coupler with dimensionally tapered waveguide proposed in Ref. [7].

方性結晶である z-cut LiNbO₃ 基板上に作製する。ところで、LiNbO₃ のような異方性結晶では、基板に外部電界を印加すると結晶の電気光学効果によりその屈折率が変化する。例えば、同図中に斜線で示すように導波路 B および C のコア領域上に電極を装荷し、光学軸に平行で互いに逆方向の外部電界 E₀ を印加すると、導波路 B および C のコア領域の屈折率は、導波路 B では上昇し、導波路 C では低下することになる。従って、TVC の伝送軸に対する構造の対称性が変化し、導波路 B および C へと移行する光波の電力を変化させることができる。すなわち、外部電界 E₀ の強さにより光波の分配比を制御できる任意比光分配器が構成できる。

ところで、同図に示すように座標系をとると、LiNbO₃ の電気光学効果による影響は TE モードに特に顕著に現れる。そこで、以下では TE モードに限定して議論する。

まず、テーパ形導波路（構造上のテーパ導波路）を含む任意比光分配器の光波の分配比特性を求めると、動作特性に波長依存性はほとんど認められないが、分配比はやはり飽和し、大きな分配比を得ることができないことが示されている [7]。そこで、本論文では分配器の導波路構造はそのまま、電界印加用電極の配置を変更し、その分配比の拡大を試みる。

3. 分配比の改善

導波路 B および C のコア領域上に配置した電極を、図 2 に示すように導波路 B および C と導波路 A 間に移動させた場合を考える。この場合、導波路 B および C と導波路 A 間のクラッド領域の屈折率が結晶の電気光学効果により変化する。そこで、本分配器の電

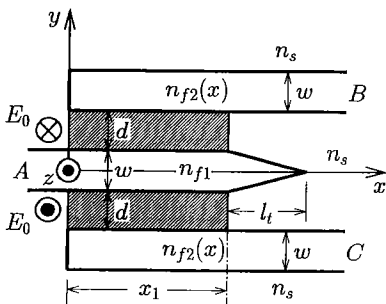


図 2 電極配置を変更した任意比光分配器

Fig.2 Novel variable optical beam splitter utilizing tapered velocity coupler with different electrode location.

気光学効果による屈折率変化分 δn に対する光波の分配比特性を求めた結果を図 3 に示す。なお、解析では、電極間に電界を印加していない状態での導波路 B および C の伝送軸 (x 軸) に沿う屈折率分布を入射端での屈折率 n_{f0} と屈折率増分 Δn を用いて次のように定める。

$$n_{f2}(x) = \begin{cases} n_{f0} + \Delta n x, & 0 \leq x < x_2 \\ n_{f0} + \Delta n x_2, & x_2 \leq x \end{cases} \quad (1)$$

但し、 $x_2 = x_1 + l_t$ であり、解析では各構造パラメータを以下に示すとおりとする。

$d = 4 \mu\text{m}$, $w = 3 \mu\text{m}$, $x_1 = 17500 \mu\text{m}$, $l_t = 500 \mu\text{m}$, $n_s = 2.2000$, $n_{f0} = 2.2015$, $n_{f1} = 2.2020$, $\Delta n = 3.5 \times 10^{-8} \mu\text{m}^{-1}$

なお、光波の波長は、 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ とし、電極は導波路 A がテーパ構造となる直前 ($x = x_1$) で切断している。

同図より、電極配置を移動させることで 1:9 以上の大きな分配比が得られることがわかる。ただ、最大分配比を得るために必要な屈折率変化分 δn 、すなわち印加電界の強さは、これまでに提案されている分配器 [4],[5],[7] に比べて 10 倍程度大きくなっているが、LiNbO₃ 結晶の破壊電界と比較すればたかだか 1/3 程度である。また、本論文で提案した分配器について、構造はそのまま光波の波長を $0.628 \mu\text{m}$ および $0.638 \mu\text{m}$ と変化させた場合の分配比特性を求めた結果も図 3 中に破線および点線で示している。同図よ

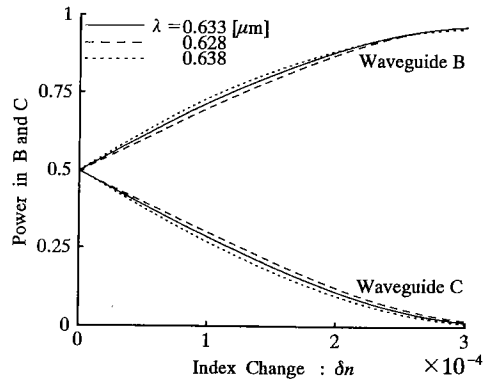


図 3 電極を移動させた任意比光分配器の分配比特性

Fig.3 Characteristics of splitting ratio for variable optical beam splitter proposed in this paper, where optical wavelength is assumed to be $0.633 \mu\text{m}$ in solid lines, $0.628 \mu\text{m}$ in dashed lines and $0.638 \mu\text{m}$ in dotted lines, respectively.

り、本分配器でも、これまでに提案されている TVC を用いた分配器同様、波長依存性が極めて少ないことがわかる。

以上の結果より、本論文で示した電極配置で作られる TVC の非対称性が光波を任意比に効率よく分配するためには、より適したものであると考えられる。ここで、本論文で示した分配比改善のメカニズムを理解するには、更に詳細な固有モード解析ならびにモード結合理論による解析 [9] が必要であると考えられる。また、より低い駆動電圧でより大きな分配比が得られるような任意比光分配器の構成法を確立することが今後の検討課題として考えられる。

4. むすび

本論文では、屈折率テーパ導波路を用いた TVC からなる任意比光分配器の構造を最適設計することで分配比特性の改善を試みた。その結果、屈折率テーパ導波路とテーパ形導波路を組み合わせた分配器の電極の配置を適切に設計することで、素子の分配比特性を大幅に改善できることを示した。

謝辞 本研究を遂行するに当り大変貴重かつ的確な御意見を頂いた大阪府立大学工学部電気電子システム工学科下代雅啓博士に深謝する。また、日々、御指導、御激励を頂く同大学沢新之輔教授に心から感謝の意を表す。なお、本研究の一部は科学研究費（奨励研究（A））の援助のもとに行われたものである。

文 献

- [1] J.S. Cook, "Tapered velocity couplers," *Bell Syst. Tech. J.*, vol.34, no.4, pp.807-822, March 1955.
 - [2] H.S. Kim and R.V. Ramaswamy, "Tapered, both in dimension and in index, velocity coupler: Theory and experiment," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol.QE-29, no.4, pp.1158-1167, April 1993.
 - [3] R.V. Ramaswamy and H.S. Kim, "A novel, tapered, both in dimension and in index, velocity coupler switch," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.5, no.5, pp.557-560, May 1993.
 - [4] M. Geshiro and M. Hotta, "A proposal for a variable divider of optical power consisting of LiNbO_3 ," *Proc. IEEE Asia-Pacific Microwave Conf.*, Hsinchu, Taiwan, vol.2, pp.(18)24-(18)27, Oct. 1993.
 - [5] M. Geshiro and M. Hotta, "A variable optical beam splitter consisting of a tapered velocity coupler," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E77-C, no.11, pp.1722-1725, Nov. 1994.
 - [6] M. Hotta and M. Geshiro, "A novel optical polarization splitter using a dimensionally tapered velocity coupler," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E77-C, no.11, pp.1731-1734, Nov. 1994.
 - [7] 堀田昌志, 高杉宗弘, 小野和雄, "屈折率テーパを含む平行 3 線 TVC を用いた任意比光分配器の一構成法," 平 6 四国連大, no.12-11, p.206, Nov. 1994.
 - [8] 山内潤治, 安藤拓司, 中野久松, "交互方向陰的差分法による伝搬ビーム解析," *信学論 (C-I)*, vol.J75-C-I, no.3, pp.148-154, March 1992.
 - [9] D. Marcuse, *Theory of dielectric optical waveguides*, Chap. 3, Academic Press, New York, 1974.
- (平成 7 年 9 月 1 日受付, 11 月 9 日再受付)