

全内反射型半导体光波导开关的位相变化

王德煌

(集成光电子学国家重点联合实验室半导体所区, 北京大学物理系, 北京, 100871)

1991年5月6日收到, 1991年8月22日修改定稿

理论分析了全内反射型半导体光波导开关内的位相关系。数值计算了 $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP 全内反射型光波导开关内的反射 TE 模和 TM 模的位相变化 δ_s, δ_p 和它们间相对位相差 $\Delta\delta$ 。结果表明, 光波导开关内开关区介质折射率变化量 Δn 、吸收系数 α 和传输角 θ , 对 δ_s, δ_p 和 $\Delta\delta$ 值均有很大影响, 它们间都有一种非线性变化关系。结果还表明, 由于反射 TE 模和反射 TM 模间存在有相对位相差, 全内反射型光波导开关将是一种有偏振特征的元器件。

PACC: 0760H, 7280, 4280S, 0570

一、引言

光波导开关是光纤通讯、光信息处理和光计算机等高新技术领域中不可缺少的元器件, 也是集成光电子学的基础元器件之一。因而它的研究很活跃而且进展迅速。现在实用型光波导开关主要有铁电晶体、如 LiNbO_3 、 LiTaO_3 和半导体, 如 GaAs/GaAlAs 和 InGaAsP/InP 光波导开关, 其中全内反射型半导体光波导开关的研究近几年来特别令人关注, 但其理论与实验研究主要在于光波导开关的透射和反射特性等方面, 没有涉及全反射光的位相关系和偏振问题^[1-8]。本文首次报道理论分析全内反射型半导体光波导开关内的位相关系, 数值计算 $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP 全内反射型光波导开关内反射光的位相变化大小, 讨论其偏振问题。分析结果对全内反射型光波导开关的研制和使用将具有指导性参考价值。

二、理论公式

设有两单模光波导构成的交叉型全内反射型光波导开关, 其示意图如图1示。其开关区长度远远大于光波长, 用单色平面光波近似波导内的导引模。当单色平面光波

$$\begin{aligned}\tilde{E}_1 &= E_1 \exp[j(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega_1 t)], \\ \tilde{H}_1 &= H_1 \exp[j(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega_1 t)].\end{aligned}\quad (1)$$

入射到开关区交界面时, 其反射光波和透射光波分别是

$$\begin{aligned}\tilde{E}'_1 &= E'_1 \exp[j(\mathbf{k}'_1 \cdot \mathbf{r} - \omega_1 t)], \\ \tilde{H}'_1 &= H'_1 \exp[j(\mathbf{k}'_1 \cdot \mathbf{r} - \omega_1 t)],\end{aligned}\quad (2)$$

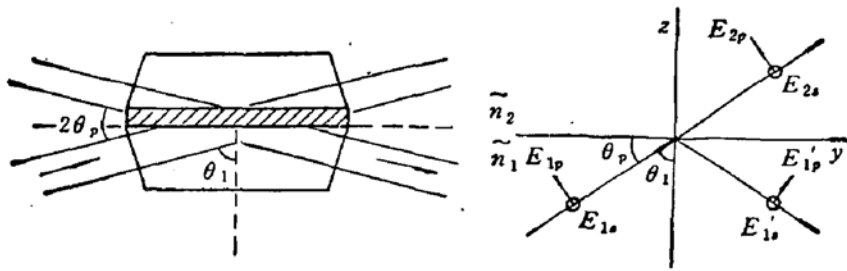


图 1 交叉型全内反射型光波导开关截面示意图

和

$$\begin{aligned}\tilde{E}_2 &= E_2 \exp[j(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \omega_2 t)], \\ \tilde{H}_2 &= H_2 \exp[j(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \omega_2 t)].\end{aligned}\quad (3)$$

现只考虑入射光波的电矢量而且分别考虑它垂直和平行于入射面,即 TE 模和 TM 模的情形。取如图 1 所示的坐标系。从麦克斯韦电磁波理论可以推导出反射的 TE 模和反射的 TM 模的非涅耳公式^[9,10]:

$$\frac{E'_{1t}}{E_{1t}} = \frac{\tilde{n}_1 \cos \theta_1 - \tilde{n}_2 \cos \theta_2}{\tilde{n}_1 \cos \theta_1 + \tilde{n}_2 \cos \theta_2}, \quad (\text{TE 模}) \quad (4)$$

$$\frac{E'_{1p}}{E_{1p}} = \frac{\tilde{n}_2 \cos \theta_1 - \tilde{n}_1 \cos \theta_2}{\tilde{n}_2 \cos \theta_1 + \tilde{n}_1 \cos \theta_2}. \quad (\text{TM 模}) \quad (5)$$

这里 $\tilde{n}_1$ 和 $\tilde{n}_2$ 分别是入射面所在介质和开关区介质的折射率。它们一般是复数。

已知光波在两种各向同性介质的交界面上折射时满足斯涅耳定律

$$\tilde{n}_1 \sin \theta_1 = \tilde{n}_2 \sin \theta_2. \quad (6)$$

当 $|\tilde{n}_1| > |\tilde{n}_2|$ 时,有 $\theta_1 < \theta_2$ 。这时有

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{|\tilde{n}_2|}{|\tilde{n}_1|} \right). \quad (7)$$

θ_c 叫做临界角。它是与折射角 $\theta_2 = 90^\circ$ 相对应的人射角。如果 $\theta_1 > \theta_c$ 时则发生全反射。若认为 θ_2 是虚折射角,形式上斯涅耳定律仍成立,则 θ_2 的余弦角是虚数,写为

$$\tilde{n}_2 \cos \theta_2 = j \sqrt{(\tilde{n}_1 \sin \theta_1)^2 - \tilde{n}_2^2}. \quad (8)$$

而发生全反射时菲涅耳公式仍成立。但入射光波和反射光波间产生有位相变化。令

$$\frac{E'_{1t}}{E_{1t}} = \rho_t \exp(j\delta_t), \quad (\text{TE 模}) \quad (9)$$

$$\frac{E'_{1p}}{E_{1p}} = \rho_p \exp(j\delta_p), \quad (\text{TM 模}) \quad (10)$$

其中 ρ_t 和 ρ_p 是幅值,全反射时, $\rho_t = \rho_p = 1$ 。 δ_t 和 δ_p 分别表示反射的 TE 模和反射的 TM 模的位相变化值。假设入射面所在介质无损耗, $\tilde{n}_1 = n_1$ 是实数,而开关区介质折射率是

$$\tilde{n}_2 = n_2 + jK, \quad (11)$$

其中

$$K = \frac{\lambda}{4\pi} \alpha. \quad (12)$$

这里 α 是光波长 λ 处开关区介质的吸收系数或损耗值。令 $\tilde{n}_2 \cos \theta_2 = A + jB$, 其中 A 和 B 为实数, 它们由(11)式和折射定律确定。则从(4)、(8)、(9)和(10)式综合求解, 整理后有

$$\delta_t = \tan^{-1} \left[\frac{2n_1 B \cos \theta_1}{A^2 + B^2 - n_1^2 \cos^2 \theta_1} \right], \quad (\text{TE 模}) \quad (13)$$

$$\delta_p = \tan^{-1} \left[\frac{2n_1 \cos \theta_1 [2n_2 K A - B(n_2^2 - K^2)]}{(n_2^2 + K^2)^2 \cos^2 \theta_1 - n_1^2 (A^2 + B^2)} \right], \quad (\text{TM 模}) \quad (14)$$

而反射的 TE 模与反射的 TM 模间相对位相差是:

$$\Delta\delta = \delta_t - \delta_p, \quad (15)$$

这里

$$A = \sqrt{\frac{1}{2} \{ [(n_2^2 - K^2) - n_1^2 \sin^2 \theta_1] + \sqrt{[(n_2^2 - K^2) - n_1^2 \sin^2 \theta_1]^2 + 4n_1^2 K^2} \}}, \quad (16)$$

$$B = \sqrt{\frac{1}{2} \{ -[(n_2^2 - K^2) - n_1^2 \sin^2 \theta_1] + \sqrt{[(n_2^2 - K^2) - n_1^2 \sin^2 \theta_1]^2 + 4n_1^2 K^2} \}}. \quad (17)$$

另外, 实用型光波导开关常用相对交界面的传输角 θ_p (等于交叉角的一半) 代替入射角 θ_1 , 它们间关系是图 1 所示:

$$\theta_p = 90 - \theta_1. \quad (18)$$

综上所述, 全内反射型光波导开关处于工作状态时, 与入射光波对应的反射的 TE 模和反射的 TM 模都有一个位相变化量 δ_t 和 δ_p , 以及它们间相对位相差 $\Delta\delta$ 值。它们的大小都与开关区介质折射率变化量 Δn , 损耗 α 和入射角 θ_1 有密切的关系。

三、数值计算结果与讨论

现以 $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP 全内反射型光波导开关为具体例子进行数值计算。假定入射光波的 TE 模与 TM 模同位相。光波导开关未工作时取 $n_1 = n_2 = 3.40$ 和 $\alpha = 0$, 工作时 $n_1 = 3.40$ 而 $\tilde{n}_2 = (n_1 + \Delta n) +$

jK 和 $K = \frac{\lambda}{4\pi} \alpha$ 且 α 可取 0 或非 0 值。

为满足全反射条件, 要求 $\Delta n < 0$, 即 $\frac{\Delta n}{n_1}$

为负数。图 2 给出固定入射角和无损耗时, 该光波导开关内, 反射的 TE 模和 TM 模的位相变化 δ_t 和 δ_p , 以及它们间相对位相差 $\Delta\delta$ 随开关区介质折射率变化量 Δn 的变化关系图。显然, 它们间存在一种非线性变化关系。在 Δn 大小大约小于 0.02 时, δ_t 、 δ_p 和 $\Delta\delta$ 值变化都快速; 当 Δn 值大约大于 0.03 以后, 即

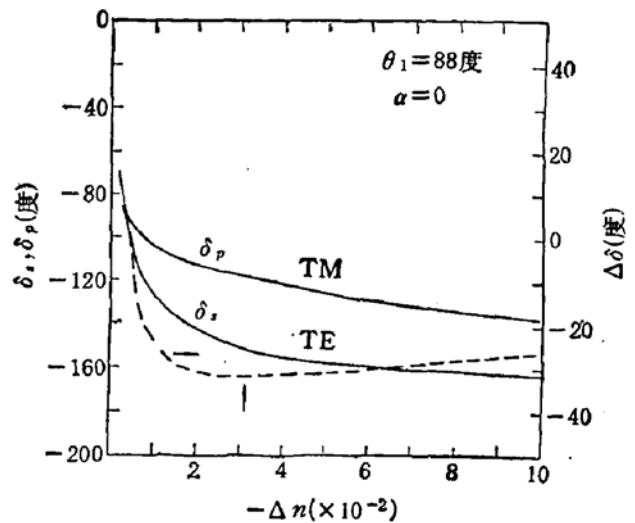


图 2 位相变化 δ_t 和 δ_p 以及相对位相差 $\Delta\delta$ 与 Δn 的关系

$\frac{\Delta n}{n} \geq -1\%$, δ_r , δ_p 和 $\Delta\delta$ 变化都平缓。但 $\Delta\delta$ - Δn 变化曲线上出现一个极值, 如图 2 所示, 此处 $\Delta n \approx -0.032$ 。

图 3 是固定 $\frac{\Delta n}{n} = -1\%$, 即 $\Delta n = -0.034$ 和入射角 $\theta_1 = 88$ 度时, 该光波导开关的 δ_r 和 $\Delta\delta$ 值与开关区损耗 α 的关系图。从图可见, α 值变化对 δ_r 和 $\Delta\delta$ 的影响也是非线性变化关系。 $\alpha \leq 10^3 \text{cm}^{-1}$ 时, δ_r 值变化平缓, 而 $\Delta\delta$ 值基本为一常数。 $\alpha > 10^3 \text{cm}^{-1}$ 后, δ_r 值变化很快, $\Delta\delta$ 值也较快增加, 但其数值较小。说明开关区介质损耗对 δ_r 和 $\Delta\delta$ 的影响远小于 Δn 的影响。这从 $\tilde{n}_2$ 的实部和虚部大小比较也明显可见, 符合光学色散理论分析结果。另外, 选取光波导开关的工作波长在透明波段, 开关区介质损耗 α 一般小于 10^3cm^{-1} 。

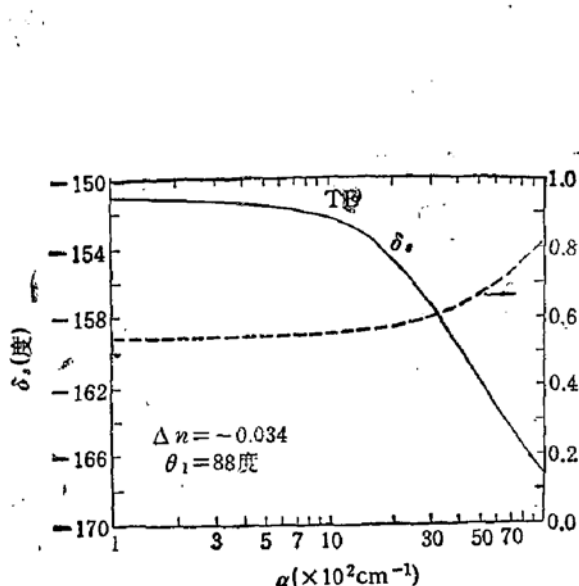


图 3 介质损耗 α 与 δ_r 及 $\Delta\delta$ 的变化关系图

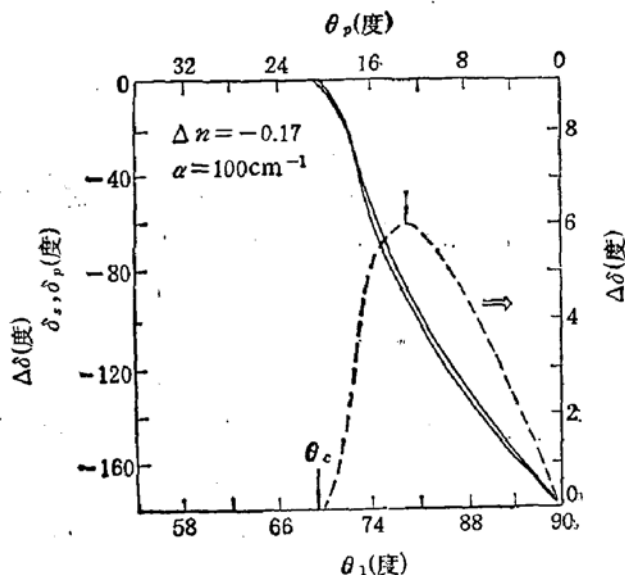


图 4 δ_r 以及 $\Delta\delta$ 随入射角 θ_1 (传输角 θ_p) 变化的关系图

图 4 表示固定 $\frac{\Delta n}{n} = -5\%$, 即 $\Delta n = -0.17$ 和 $\alpha = 10^2 \text{cm}^{-1}$ 时, 不同入射角 θ_1 , 即不同传输角 θ_p 影响反射 TE 模的 δ_r 和反射 TM 模的 δ_p 以及它们间相对位相差 $\Delta\delta$ 的情形。从图可见, 入射角 $\theta_1 < \theta_c$ 时, δ_r 值, 反射 TM 模的 δ_p 值以及它们间的 $\Delta\delta$ 值都是 0, 说明同位相入射的 TE 模和 TM 模, 发生全反射以前, 其反射的 TE 模和 TM 模仍是同位相的。当 $\theta_1 \geq \theta_c$ 后, δ_r , δ_p 和 $\Delta\delta$ 值都随 θ_1 而变化, 这是一种随 θ_1 值增加而 δ_r 和 δ_p 值单调递减的非线性变化规律, 但 δ_r 与 δ_p 值变化大小不同, 因而 $\Delta\delta$ 值随 θ_1 增加而很快增大, 经一极大值, $\theta_1 \approx 77$ 度 (如图中箭头所示), 然后快速下降到 $\theta_1 = 90$ 度的零值。这时表示入射光没有反射, 所以原来位相不变。从图可见, $\Delta\delta \sim \theta_1$ 曲线是一种类脉冲线型。说明设计光波导开关时, 两单模光波导的交叉角 ($2\theta_p$) 必须慎重合理地选择。 $\Delta\delta$ 值越大, 表明同位相入射的 TE 模和 TM 模, 经开关区交界面全反射后, 其反射的 TE 模和 TM 模不再是同位相, 如果入射光为线偏振光则反射光将可能是椭圆偏振光而不再是线偏振光, 这对设计、制造和使用此类型光波导开关是应该引起足够的重视。

四、结 论

用电磁波理论分析了全内反射型半导体光波导开关内的反射 TE 模和 TM 模的位相变化 δ_s 和 δ_p 。对 $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP 全内反射型光波导开关进行数值计算。结果表明, 该元器件内开关区介质折射率变化量 Δn 、开关区介质损耗 α 和入射角 θ_i 或传输角 θ_p 对 δ_s 、 δ_p 和它们间的差值 $\Delta\delta$ 都有影响。其中 Δn 值和 θ_i 值影响大于 α 值的影响。它们间变化关系都是非线性的。 Δn 值约小于 0.020 时, δ_s 、 δ_p 和 $\Delta\delta$ 值变化较快; Δn 值约大于 0.032 后, δ_s 和 δ_p 值变化平缓。 $\Delta\delta$ - Δn 曲线上有一极大值。 δ_s 和 δ_p 都是 θ_i 的单调递减函数, 但其变化量不相等。 $\Delta\delta$ - θ_i 曲线呈一种类脉冲线型且有极大值。以上结果充分表明, 全内反射型半导体光波导开关处于工作状态时, 反射的 TE 模和 TM 模与入射的 TE 模和 TM 模间存在位相变化, 这些变化与开关区介质光学常数和入射角有关联。由于存在位相变化, 所以入射光如果是线偏振光时, 则反射光将可能是椭圆偏振光。此时, 全内反射型半导体光波导开关不再是无偏振性而是具有偏振特征的元器件。因而设计、制作和使用该类型元器件必须给予足够重视。

作者感谢赵凯华教授、张之翔教授在光学理论上的有益讨论, 感谢庄婉如研究员、王威礼教授对本项研究的大力支持。

参 考 文 献

- [1] S. K. Sheem, *Appl. Opt.*, **17** (22), 3670 (1978).
- [2] G. E. Betts, and W. S. C. Chang, *IEEE J. Quantum Electron.*, **7**, 1027 (1980).
- [3] A. Neyer, W. Mevenkamp, L. Thylen, and B. Lagerstrom, *J. Lightwave Techn.*, **LT-3**(3), 635 (1985).
- [4] K. G. Ravikumar, K. Shimonura, T. Kikugawa, et al., *Electron. Lett.*, **24**, 415 (1988).
- [5] F. Ito, M. Matsuura and T. Tanifuji, *IEEE J. Quantum Electron.*, **25** (7), 1677 (1989).
- [6] K. Shimonura, Y. Suematsu, and S. Arai, *IEEE J. Quantum Electron.*, **26** (5), 883 (1990).
- [7] 庄婉如, 信息光电子学术研讨会论文集, 厦门, 138 (1990).
- [8] 林雯华、王德煌、庄婉如等, 光电子器件与集成技术, 1991年年会论文集, 北京, (1991).
- [9] M. 玻恩, E. 沃耳夫, 光学原理(上), 第一章, (下)第十三章, 1978年(上), 1981年(下), 科学出版社.
- [10] 张之翔, 光的偏振, 第一章, 1985年, 高等教育出版社.

Phase Changes in Semiconductor Total-Internal-Reflection Waveguide Optical Switch

Wang Dehuang

(Semiconductor Institute Region, Integrated Optoelectronics Laboratories of China,
Department of Physics, Peking University, 100871)

Abstract

The phasing in semiconductor total-internal-reflection waveguide optical switch is analyzed. The phase changes of TE mode and TM mode, δ_t and δ_p , and their phase difference $\Delta\delta$ in $1.3\ \mu\text{m}$ InGaAsP/InP total-internal-reflection waveguide optical switch are calculated numerically. It shows that the δ_t , δ_p and $\Delta\delta$ are remarkably dependent on the refractive index change Δn and the absorption coefficient α in switch region and the propagation angle θ_p . There are nonlinear variations between them. Besides, the total-internal-reflection waveguide optical switch may be a device with polarized character because there is a relative phase difference between the reflective TE mode and reflective TM mode.

PACC: 0760H, 7280, 4280s, 0570