

全内反射型光波导开关反射特性的分析

王德煌

(国家集成光电子学联合实验室半导体所区, 北京大学物理系, 100871)

提要 本文详细分析了全内反射型光波导开关的反射特性, 指出反射模存在位相变化及其相对位相差。数值计算结果表明, 反射 TE 模和反射 TM 模强度反射率、反射损耗, 它们的位相变化及其相对位相差都与光波导开关区介质折射率改变量、损耗以及传播角有密切关系。

关键词 全内反射, 光开关, 反射特性

Analysis of reflection characteristics in total-internal-reflection waveguide optical switch

Wang Dehuang

(Semiconductor Institute Region of National Intergrated Optoelectronics Laboratories and Department of Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract The reflection characteristics in total-internal-reflection waveguide optical switch are analysed in detail. It is shown for the first time that there exists the phase changes of reflective modes and their relative phase difference. The results of numerical calculation indicate that the power reflectivity, reflective loss, phase change and their relative phase difference for the reflective TE mode and reflective TM mode remarkably depend on the refractive index change, the loss in switch region and the propagation angle.

Key words total-internal-reflection, optical switch, reflection property

1 引言

目前实用型光波导开关及其阵列主要有铁电晶体、如 LiNbO_3 和半导体 (GaAs 系和 InP 系) 以及超晶格、多量子阱等。它们的结构一般是定向耦合型和交叉波导型。后者包括全内反射型, 它是以光波导开关区介质折射率变化为依据的。近几年来, 国内外对全内反射型光波导开关, 主要是其反射和透射等特性, 进行了详细的理论与实验研究, 但都没有专门分析和充分注意反射光的位相和偏振状态^[1,2]。本文详细报道用电磁波理论分析全内反射型光波导开关的反射特性, 特别是首次分析了反射模与入射模的位相关系和反射模的偏振状态。对 GaAs/

GaAlAs 全内反射型光波导开关进行了数值计算。

2 基本分析

设有两单模光波导构成交叉型全内反射型光波导开关,其截面示意图如图 1 所示。图中阴影部分是光波导开关区,其长度远大于光波长。设用单色平面波近似光波导内导引模,当单色平面波

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

入射到光波导开关区交界面上时,由电磁波理论得到其反射波和折射波分别为

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

和

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

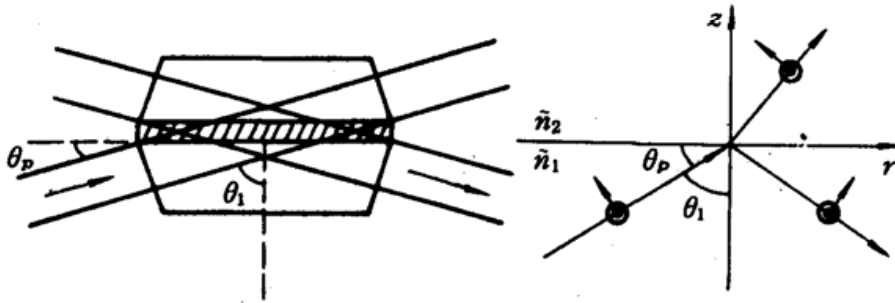


Fig. 1 Schematic of intersectional total-internal-reflection waveguide optical switch

现只考虑它们的电矢量而且仅分析垂直于入射面的光波(即 TE 模)和平行于入射面的光波(即 TM 模)。选取图 1 所示坐标系,用电磁波理论推导,对 TE 模和 TM 模的非涅耳公式分别为^[3~5]

$$\frac{E'_{1\perp}}{E_{1\perp}} = \frac{\tilde{n}_1 \cos \theta_1 - \tilde{n}_2 \cos \theta_2}{\tilde{n}_1 \cos \theta_1 + \tilde{n}_2 \cos \theta_2} \quad (\text{TE 模}) \quad (4)$$

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

这里 θ_1 和 θ_2 分别是入射角和折射角。 \tilde{n}_1 和 \tilde{n}_2 分别是入射面所在介质的折射率和光波导开关区介质的折射率。它们一般是复数。设光波导开关未工作时, $\tilde{n}_1 = \tilde{n}_2 = n_1$ 为实数;光波导开关工作时, $\tilde{n}_1 = n_1$ 是实数,而 \tilde{n}_2 是复数:

$$\tilde{n}_2 = n_2 + jK \quad (6)$$

其中 $K = (\lambda/4\pi)\alpha$, λ 是入射光波长, α 是开关区内的损耗。 $n_2 = n_1 + \Delta n$, ($\Delta n < 0$)。令

$$\tilde{n}_2 \cos \theta_2 = A + jB \quad (7)$$

其中 A 和 B 为实数。平方(7)式,利用折射定律

$$\tilde{n}_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1 \quad (8)$$

得到

$$(A + jB)^2 = \tilde{n}_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1 \quad (9)$$

令上式中实部与虚部分别相等,有

$$A = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(n_2^2 - K^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^2 + (2n_2 K)^2} + (n_2^2 - K^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1) \right]} \quad (10)$$

$$B = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(n_2^2 - K^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^2 + (2n_2 K)^2} - (n_2^2 - K^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1) \right]} \quad (11)$$

对垂直于入射面的光波(TE模),由(4),(7),(9),(10)和(11)式得到其反射TE模强度反射率为

$$R_{\perp} = \frac{(n_1 \cos \theta_1 - A)^2 + B^2}{(n_1 \cos \theta_1 + A)^2 + B^2} \quad (12)$$

反射TE模与入射TE模间位相变化为

$$\Phi_{\perp} = \tan^{-1} \left[\frac{2n_1 \cos \theta_1 B}{A^2 + B^2 - n_1^2 \cos^2 \theta_1} \right] \quad (13)$$

同理,对平行于入射面的光波(TM模)有

$$R_{\parallel} = \frac{[(n_2^2 - K^2) \cos \theta_1 - n_1 A]^2 + [2n_2 K \cos \theta_1 - n_1 B]^2}{[(n_2^2 - K^2) \cos \theta_1 + n_1 A]^2 + [2n_2 K \cos \theta_1 + n_1 B]^2} \quad (14)$$

$$\Phi_{\parallel} = \tan^{-1} \left[\frac{2n_1 \cos \theta_1 (2n_2 K A - n_2^2 B + K^2 B)}{(n_2^2 + K^2)^2 \cos^2 \theta_1 - n_1^2 (A^2 + B^2)} \right] \quad (15)$$

一般设计全内反射光波导开关工作在发生全反射状态。从折射定律知道,入射角

$$\theta_1 = \theta_c = \sin^{-1}(n_2/n_1) \quad (n_1 > n_2) \quad (16)$$

时发生全反射。 θ_c 为临界角。它是与折射角 $\theta_2 = \pi/2$ 相对应的入射角。全反射时若认为 θ_2 是虚折射角^[4,5],形式上折射定律仍成立,则 θ_2 的余弦是虚数,现写成

$$\cos \theta_2 = j \left(\frac{1}{n_2} \right) \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2} \quad (17)$$

此时菲涅耳公式仍成立。则反射TE模和反射TM模的位相变化仍由(13)、(15)式表示。如果光波导开关工作波长选取在透明区,且开关区内无损耗($\alpha = 0$),则(13)、(15)式分别简化为

$$\Phi_{\perp} = \tan^{-1} \left[\frac{2n_1 \cos \theta_1 \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2}}{n_1^2 (\sin^2 \theta_1 - \cos^2 \theta_1) - n_2^2} \right] \quad (18)$$

$$\Phi_{\parallel} = \tan^{-1} \left[\frac{2n_1 \cos \theta_1 n_2^2 \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2}}{n_1^2 (n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2) - n_2^2 \cos^2 \theta_1} \right] \quad (19)$$

可见,当入射TE模与入射TM模是同位相时,(18)和(19)两式表明 $\Phi_{\perp} \neq \Phi_{\parallel}$,说明反射TE模与反射TM模间存在相对位相差,写成

$$\Delta\Phi = \Phi_{\perp} - \Phi_{\parallel} \quad (20)$$

另外,设计交叉型全内反射光波导开关时,用反射损耗特征元器件性能指标。它与强度反射率间有如下关系式

$$L_r = 10 \log_{10}(1/R) \quad (\text{dB}) \quad (21)$$

还用交叉角或相对于开关区交界面的传播角 θ (等于1/2交叉角)替代入射角 θ_1 。它们满足

$$\theta_1 = \pi/2 - \theta, \quad (22)$$

综上所述,反射TE模和反射TM模的强度反射率、反射损耗、它们的位相变化及其相对位相差都与入射角或传播角、开关区介质折射率和开关区内损耗有密切关系。

3 数值计算与讨论

现以 GaAs/GaAlAs 全内反射型光波导开关为例进行数值计算。工作波长选取在透明区,其大小是 900 nm。光波导开关未工作时,取 $n_1 = n_2 = 3.60$ 和 $\alpha = 0$;光波导开关工作时, $n_2 = n_1 + \Delta n, \Delta n < 0$,保证满足全反射条件。图 2 给出固定 $\Delta n = -0.18$,取不同 α 值时, θ_1 和 θ_r 对反射 TE 模和反射 TM 模的强度反射率 R 和反射损耗 L_r 的影响情形。从图 2 可见, $\alpha = 0$ 时入射角 $\theta_1 \geq 71.8^\circ$ 后, $R = 100\%$,且 $L_r = 0$ dB,此时临界角 θ_c 是 71.8° ,如图中箭头所示。 $\alpha = 100 \text{ cm}^{-1}$ 时,入射角 $\theta_1 \geq 76^\circ$ 后,才有 $R = 100\%$ 和 $L_r = 0$,说明临界角 θ_c 已从 71.8° 变为 76° 。 $\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 时,没有发生全反射, $\theta_r \rightarrow 0, R \rightarrow 100\%$ 和 $L_r \rightarrow 0$ 。从图可见, α 取值不同,引起 R 和 L_r 值随 θ_r 或 θ_1 变化的规律不同,都是非线性的。另外, α 值和 θ_r 值越大,反射 TE 模的 R_\perp 和反射 TM 模的 R_\parallel 以及对应的 L_r 值,越来越能区分开来。同样条件下, $R_\perp > R_\parallel$ 。这对使用全内反射型光波导开关是值得给予考虑与选择的。

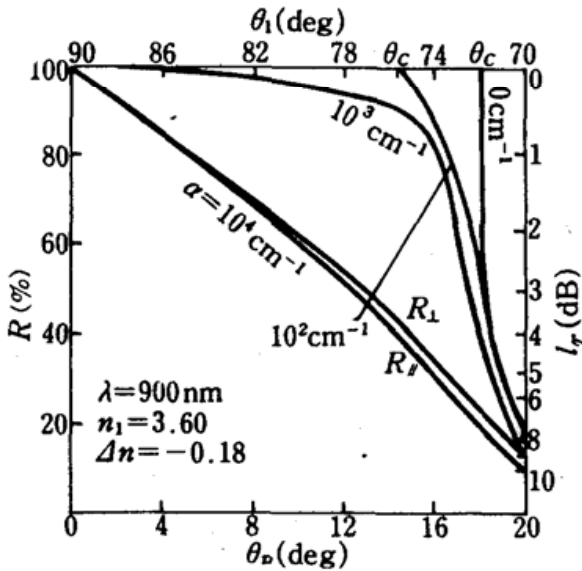


Fig. 2 Calculated power reflectivity R and reflective loss L_r of reflective mode at dielectric interface of switch region as a function of the propagation angle θ and light incident angle θ_1 in GaAs/GaAlAs total-internal-reflection waveguide optical switch

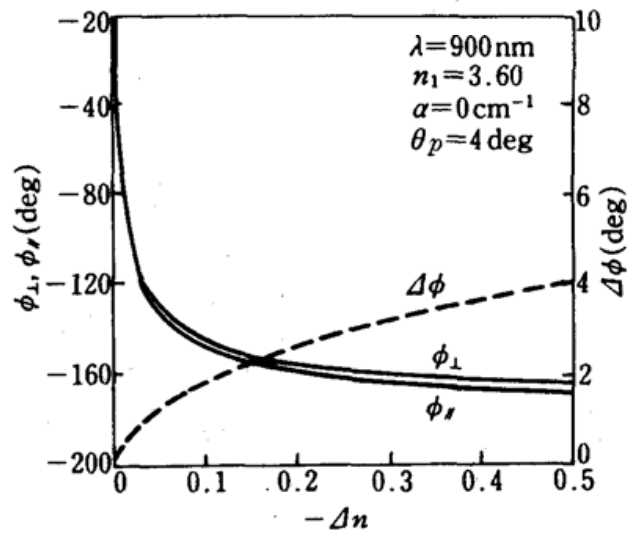


Fig. 3 Phase changes for the difference reflective mode $\Phi_\perp, \Phi_\parallel$ and their relative phase difference $\Delta\Phi$ as a function of the refractive index change Δn in the switch region of GaAs/GaAlAs total-internal-reflection waveguide optical switch

图 3 给出全内反射型光波导开关处于 $\alpha = 0$ 的理想状态,固定 $\theta_r = 4^\circ$ 处,反射 TE 模的 Φ_\perp 、反射 TM 模的 Φ_\parallel 和它们间相对位相差 $\Delta\Phi$ 随光波导开关内开关区介质折射率改变量 Δn 变化的关系图。从图可见,在 $0 < |\Delta n| \leq 0.05$ 区间内, $\Phi_\perp, \Phi_\parallel$ 和 $\Delta\Phi$ 值都随 Δn 值而陡峭变化。 $|\Delta n| \geq 0.10$ 后,它们的变化缓慢。这种现象说明,控制光波导开关内开关区介质折射率改变量,尽量减小反射模的位相变化,改善反射特性,对设计与使用全内反射型光波导开关不仅是理论上的

问题,实际应用时也应加以了解和充分重视。

图 4 给出全内反射型光波导开关处于 $\alpha = 0$ 的理想状态、固定 $\Delta n = -0.18$ 处,反射 TE 模的 ϕ_{\perp} 和反射 TM 模的 ϕ_{\parallel} 以及它们间相对位相差 $\Delta\phi$ 随 θ , 和 θ_1 变化的关系图。从图可见, $\theta_1 < \theta_c$ 时,未发生全内反射时, $\phi_{\perp} = \phi_{\parallel} = 0$ 。说明反射模与入射模,反射模间都是同位相。 $\theta_1 = \theta_c = 71.8^\circ$ 处发生全反射。在 $\theta_c < \theta_1 < 90^\circ$ 区间内, ϕ_{\perp} 和 ϕ_{\parallel} 值都是 θ_1 的单调递减函数,呈非线性变化,且 ϕ_{\parallel} 略大于 ϕ_{\perp} 值。 $\theta_1 = 90^\circ$, $\phi_{\perp} = \phi_{\parallel} = -180^\circ$, 此时入射模沿开关区交界面传播,无反射现象。图示 ϕ_{\perp} 略小于 ϕ_{\parallel} 值,故 $\Delta\phi$ 应是正值,在 $\theta_c < \theta_1 < 90^\circ$ 区间内,它也是 θ_1 的非线性函数。 $\theta_1 = \theta_c$ 处, $\Delta\phi = 0$, 此后随 θ_1 增大而很快增加,经一极大值 ($\theta_1 \approx 76.7^\circ$) 后,缓慢下降到 $\theta_1 = 90^\circ$ 处 $\Delta\phi = 0$ 。在此区间内, $\Delta\phi \neq 0$ 的结果说明,如果入射光是线偏振光,则反射光将是椭圆偏振光,而且其长短轴比与 θ_1 值有关。显然,此时全内反射型光波导开关将是具有偏振特征而不是无偏振性。因而使用全内反射型光波导开关应该注意并考虑输入光和输出光的偏振状态。

一般光波导开关内,特别是开关区是存在损耗 ($\alpha \neq 0$), 图 2 中表示 α 值大小对反射模的强度反射率、反射损耗和临界角大小的影响。图 5 则给出 α 值对反射模的 ϕ_{\perp} 、 ϕ_{\parallel} 和 $\Delta\phi$ 值的影响情形。从图示曲线可见, α 值大于 10^3 cm^{-1} 时, ϕ_{\perp} 、 ϕ_{\parallel} 值基本是一常量。只有 $\alpha > 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 后, ϕ_{\parallel} 和 ϕ_{\perp} 值才随 α 值而有非线性变化,且 ϕ_{\parallel} 略大于 ϕ_{\perp} 值, $\Delta\phi$ 值也随 α 值而增加。由于光波导开关的工作波长选取在透明区, α 值一般小于 10^2 cm^{-1} 。所以开关区损耗与开关区介质折射改变量相比较,其影响较小,这从复数折射率的实部与虚部比较结果明显说明。

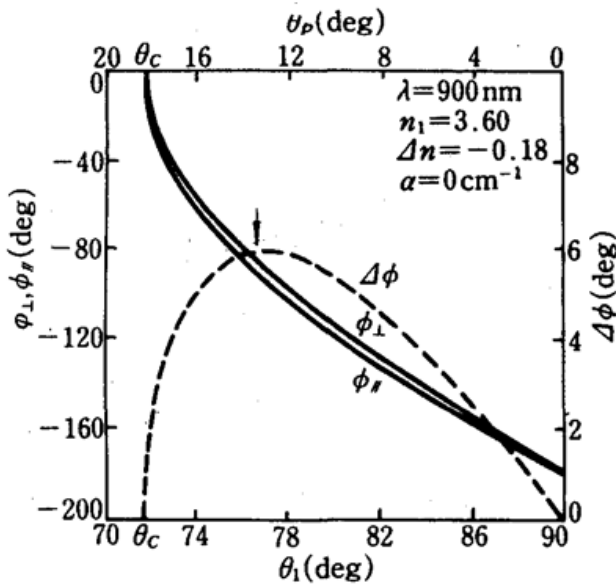


Fig. 4 Phase changes ϕ_{\perp} , ϕ_{\parallel} for the reflective mode and their relative phase difference $\Delta\phi$ as a function of the propagation angle θ and light incident angle θ_1 in GaAs/GaAlAs total-internal-reflection waveguide optical switch

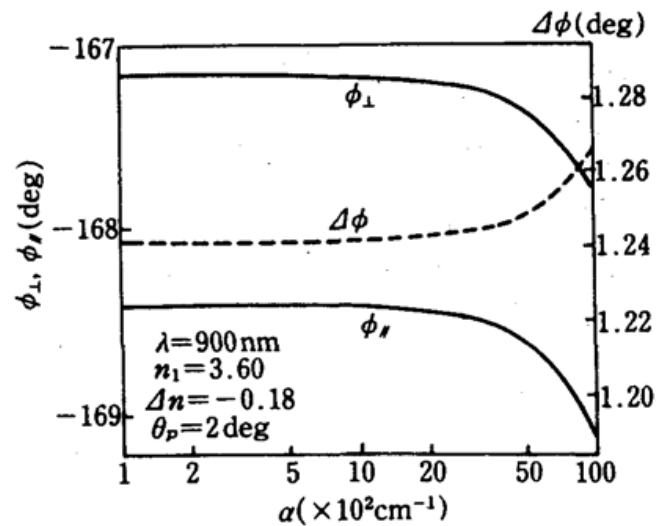


Fig. 5 Phase changes ϕ_{\perp} , ϕ_{\parallel} of reflective mode and their relative phase change $\Delta\phi$ as a function of loss α in the switch region of GaAs/GaAlAs total-internal-reflection waveguide optical switch

上述理论分析和数值计算结果都表明,适当选取传播角,控制开关区介质折射率改变量,减小开关区内损耗,可以提高反射模的强度反射率,减小反射损耗。同时有必要选择工作模式,。

TE 模或 TM 模。因为反射 TE 模和反射 TM 模都存在位相变化,而且它们不相等。所以,入射光是线偏振光,反射光将是椭圆偏振光。此时,全内反射型光波导开关具有偏振特征,不是无偏振性的光电子元器件。因而,研制全内反射型光波导开关及其阵列时,必须充分予以考虑。使用该类型元器件时,也应该了解其偏振特征,合理选用最佳参数和最优工作条件。

作者衷心感谢王威礼同志、庄婉如同志和林雯华同志对本项研究工作的大力支持。

参 考 文 献

- 1 S. K. Sheen, *Appl. Opt.*, **18**(22), 3670(1978)
- 2 F. Ito *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-26**(5), 883(1990)
- 3 M. 波恩, E. 沃耳夫, 光学原理, 科学出版社, 1978, 1981, **58**, 820
- 4 赵凯华, 钟锡华, 光学, 北京大学出版社, 1984, 246
- 5 张之翔, 光的偏振, 高等教育出版社, 1985, 12

第五届全国纤维光学、集成光学学术讨论会 与第四届光计算学术讨论会在厦门召开

由中国光学学会纤维光学与集成光学专业委员会主办、厦门大学物理系承办的第五届全国纤维光学与集成光学学术讨论会和第四届光计算学术讨论会于 1992 年 10 月 6 日至 9 日在福建省厦门市厦门大学召开。出席会议的代表共 176 人。会议录用各类论文共 213 篇,已汇编成册。

开幕式上日本应用物理(英文版)杂志主编、东京大学应用物理系教授义藤良一即席作了题为实用化半导体激光器件材料的报告,指出当今半导体激光器开发的动向为高输出、短波长和量子阱化。大会共有 7 篇特邀报告,它们是未来计算系统的光互联、光互联技术、电子学与光子学、通信光纤及其应用的发展、应变层量子阱器件及其应用、微小光学与阵列光学、孤子通信系统的通信容量等。大会设纤维光学、集成光学和光计算三个专题,进行分组报告讨论,内容涉及到光电子学的广泛领域,包括纤维光学、通信用光纤、特种光纤及其器件、光纤材料的理论设计及工艺技术;集成光学器件、集成光学系统和材料的理论与实验技术;光计算的理论探讨与基础研究、光计算器件、互联技术、OEIC 在互联中的应用、算法与体系、算法与体系结构等。

会议还完成了中国光学学会纤维光学与集成光学专业委员会的换届工作。

(赵梅村)