

光开关交叉角的上限和开关对数值孔径的影响

康寿万¹ 董玉和² 庄婉如³

(集成光电子学国家联合实验室半导体所实验区)

(1 北方交通大学 北京 100044 2 包头钢铁学院 包头 014010

3 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 本文讨论了全内反射型光开关的交叉角 2φ 和光路的数值孔径 NA . 本文给出了设计光开关时 φ 的上限, 并且讨论了当光路中有全内反射型光开关时, NA 受到的影响问题.

PACC: 4280L, 4280S, 4282, 4265P

1 引言

在光纤通信交换系统和光信息处理系统中, 以及在光交换网络中, 光开关都是重要的器件. 近几年, 用半导体材料制作的光开关引起了重视. 例如, 在半导体材料中由载流子注入产生的能带填充效应, 就会造成折射率较大的变化, 利用这一现象就可制成尺寸很小适合于集成的全内反射型(TIR)光波导开关^[1].

TIR 光开关的结构见图 1, 开关区 S 的折射率 n 是通过载流子注入来控制的^[2-6]. 当 $n = n_1$ 时, 投射到 A 端的光束将传至 B₁ 端, 这是开关在的开态. 当有载流子注入时, $n = n_3 = n_1 - \Delta n < n_1$, ($\Delta n > 0$), 光束将在 S 区表面全反射, 于是光束将传至 B₂ 端, 这是开关的关态.

TIR 开关要求 Δn 较大, 而某些 III-V 族化合物半导体材料就能满足这个要求. 例如 GaAs 在注入载流子密度大于 10^{18}cm^{-3} 时, Δn 可达到的 1×10^{-2} , 这比电光效应引起的 Δn 大两个数量级^[5].

本文将讨论以下两个问题: (1) 设计 TIR 开关时, 半交叉角 φ 的上限 φ 如何确定. (2) 当光路中存在 TIR 开关时, 光波导的数值孔径 NA 的计算问题.

我们考虑下列两种情形: 情形(A)和情形(B).

康寿万 男, 1932年生, 教授, 现从事光波导理论研究工作
1994年7月15日收到本文

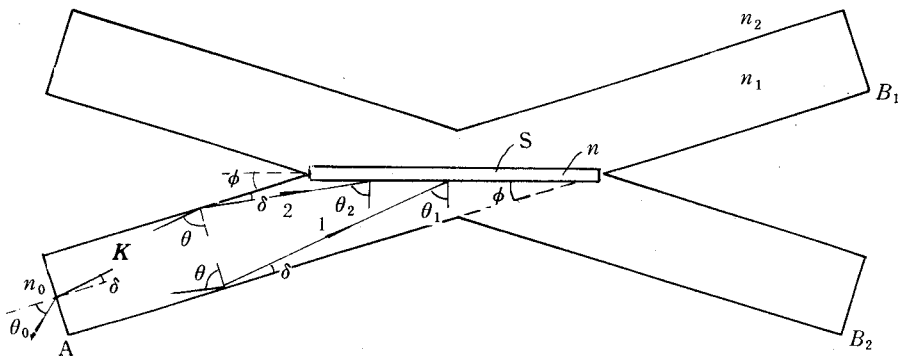


图 1 TIR 光开关结构图
光在波导内壁左右全反射,再入射到 S 区上

2 情形(A)

情形(A)是光在波导的左右两侧全反射,然后入射到开关区 S 上(图 1).

图 1 中的光束 1 和 2 入射至 S 区表面,入射角分别为 θ_1 和 θ_2 , θ_2 比 θ_1 大,因此在讨论全反射问题时,只需考察 θ_1 就足够了.

当开关在关态时, θ_1 须满足全反射条件

$$\theta_1 > \theta_{1c} = \sin^{-1}(n_3/n_1) \tag{1}$$

θ 是光束在 S 区表面的全反射临界角.

由图 1,明显地有关系

$$\delta + \varphi + \theta_1 = \pi/2 \tag{2}$$

δ 是 φ 的余角,当(1)式成立时,由(2)式得到

$$\varphi < \pi/2 - \delta - \theta_{1c} \tag{3}$$

另外,在 n_1 与 n_2 的界面处,充的入射角 θ 也应满足全反射条件

$$\theta > \theta_c = \sin^{-1}(n_2/n_1) \tag{4}$$

因为 $\theta + \delta = \pi/2$, (3)式可改写为

$$\varphi < \theta - \theta_{1c} \tag{5}$$

上式对 θ 的任意允许值都应成立,而 θ 的最小允许值是 θ_c . 因此由(5)式得到

$$\varphi < \theta_c - \theta_{1c} \tag{6}$$

令

$$\varphi_{\max} = \theta_c - \theta_{1c} = \theta_c - \sin^{-1}n_3/n_1 \quad (\theta_c > \theta_{1c} \text{ 时}) \tag{7}$$

于是(6)式成为: $\varphi < \varphi_{\max}$. 可见 φ_{\max} 是 φ 的上限.

要注意的是,只当 $\theta_c > \theta_{1c}$ 时(6)式才适用. 如果 $\theta_c < \theta_{1c}$ 或 $\theta_c \approx \theta_{1c}$ 时, (6)式就不再适用. 此时,我们应选定一个角度 θ_{\min} 来代替 θ_c , (θ_{\min} 要比 θ_{1c} 大). 于是, (4)式被下式取代

$$\theta > \theta_{\min} \tag{8}$$

同时, (6)式和(7)式被下式取代

$$\varphi < \varphi_{\max} = \theta_{\min} - \theta_{1c} = \theta_{\min} - \sin^{-1}(n_3/n_1) \quad (\theta_c \lesssim \theta_{1c} \text{ 时}) \tag{9}$$

所以,在设计 TIR 开关时, φ 的上限 φ_{\max} 由(7)式或(9)式来确定. 考察(7)式或(9)式可见,

Δn 越大, φ_{\max} 就越大, 这有利于使交叉角 2φ 较大.

在设计和制作 TIR 型光开关时, 首要的是要保证有较大的 Δn . 当 Δn 确定之后, 选择 φ 的大小应该适当. 如 φ 选择太小, 则 S 区和整个开关的长度都会偏大, 这将导致开关功率和串话增大, 并使开关难以集成. 一般说来, φ 应选得较大才好, 但如选得太大, 即使满足了(7)式或(9)式的限制, 也将会使 NA 变小, 这一点将在下面讨论.

如果光路中没有 TIR 开关, 则数值孔径 NA_0 (当 $n_0=1$) 是熟知的

$$NA_0 = n_1 \sin(\pi/2 - \theta_c) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (10)$$

而当存在 TIR 开关时, NA 的公式是

$$NA = n_1 \sin \delta_{\max} = n_1 \sin(\pi/2 - \varphi - \theta_{1c}) = n_1 \cos(\varphi + \theta_{1c}) \quad (11)$$

由上式可见, 如选 φ 较大, 就会降低 NA 值.

算例 1: 设一个 TIR 开关的各项参数为: $n_1 = 3.40, n_2 = 3.30, n_0 = 1, \Delta n = 0.02$. 根据以上各公式, 求得 $\theta_c = 76.07^\circ, \theta_{1c} = 83.78^\circ$. 由于 $\theta_c < \theta_{1c}$, 所以此时(7)式不适用. 为此, 我们可以选定一个 θ_{\min} , 设选取 $\theta_{\min} = 87^\circ$, 则由(9)式, 得到 $\varphi_{\max} = 3.22^\circ$, 于是可取 $\theta = 3^\circ$. 另外, NA 由(11)式求出, $NA = 0.191$, 而当不存在开关时, $NA_0 = 0.819$, 两相比较, 可见在本例中, 开关使 NA 明显降低.

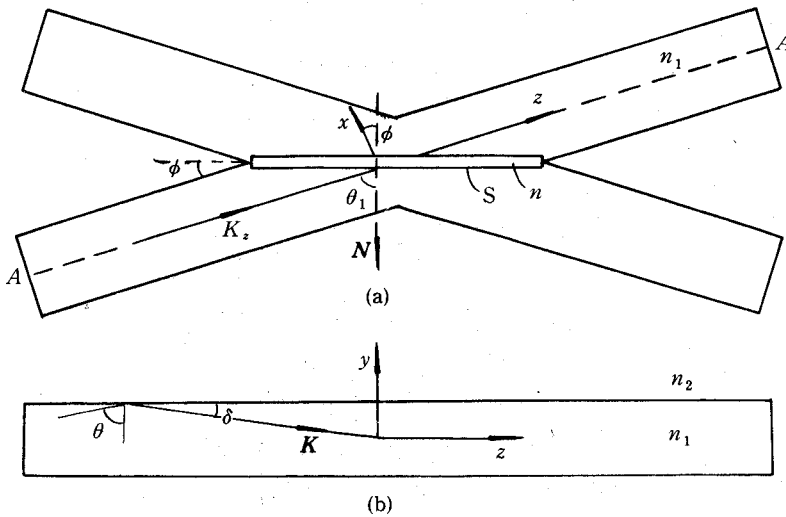


图 2 (a) 光在波导内壁上下全反射, 再入射到 S 区上 (b) 图 2(a) 的 AA 剖面图

3 情形 (B)

情形(B)是光在波导的顶侧与底侧全反射, 然后入射到 S 区上(图 2). 由图 2 可见, 光束波矢 K 及 S 区表面法线 N 为(图 2 中(2)是(1)的 A-A 剖面图)

$$K = -jKy + kKz = -j\cos\theta + kK\sin\theta$$

$$N = -i\cos\varphi - k\sin\varphi$$

$$N = -i\cos\varphi - k\sin\varphi$$

光束在 S 区表面上的入射角 ζ 为

$$\begin{aligned}\sin\zeta &= \frac{1}{K} |\mathbf{K} \times \mathbf{K}| \\ &= [\cos^2\theta\cos^2\varphi + \cos^2\theta\sin^2\varphi + \sin^2\theta\cos^2\varphi]^{1/2} \\ &= [1 - \sin^2\theta\sin^2\varphi]^{1/2}\end{aligned}\quad (12)$$

立即得到

$$\cos\zeta = \sin\theta\sin\varphi \quad (13)$$

由图 2, $\varphi + \theta_1 = \pi/2$, $\theta + \delta = \pi/2$, 故上式也可写成

$$\cos\zeta = \sin\theta\cos\theta_1 = \cos\delta\sin\varphi \quad (14)$$

θ_1 是 ζ 在 x - y 平面中的投影.

明显地有关系

$$\varphi_{\max} = \pi/2 - \theta_{1\min} \quad (15)$$

为了使开关在关态时, 光束在 S 区表面上全反射, 要求

$$\theta_{1\min} = \theta_{1c} = \sin^{-1}(n_3/n_1) \quad (16)$$

因为 $\zeta > \theta_1$, 所以当 $\theta_1 = \theta_{1c}$ 时, ζ 必定比 θ_{1c} 大, 这是因为 $\theta_{1c} = \zeta$. 代(16)式入(15)式, 有

$$\varphi_{\max} = \pi/2 - \sin^{-1}(n_3/n_1) \quad (17)$$

这就在情形(B)时 φ 的上限 φ_{\max}

至于数值孔径 NA , 由于 δ 增大时 ζ 也随之增大, 故只要 $\theta_1 > \theta_{1\min} = \theta_{1c}$, 则光束入射到 S 区表面上必然会全反射. 也就是, 开关的存在不影响 NA , NA 仍然是

$$NA = n_1\sin\delta_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (18)$$

算例 2 参 n_1, n_2, n_0 和 Δn 与算例 1 相同. 此时由(17)和(18)式求出: $\varphi_{\max} = 6.22^\circ$, $NA = 0.819$.

4 结 论

(1) 对于情形(A), 当 $\theta_c > \theta_{1c} = \sin^{-1}(n_3/n_1)$ 时, φ_{\max} 由(7)式确定. 而当 $\theta_c \leq \theta_{1c}$ 时, φ_{\max} 由(9)式确定. 在情形(A)时, NA 会受到 TIR 开关的影响, NA 的计算公式不再是(10)式, 而是(11)式.

(2) 对于情形(B), θ_{\max} 由(17)式确定, NA 的计算公式不变, 仍为(18)式.

参 考 文 献

- [1] K. Ishida, H. Hakamura, H. Matsumura *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1987 **50**:141.
- [2] H. Inoue, H. Nakamura, K. Morosawa *et al.*, IEEE J. Selec. Areas Commun., 1988, **6**:1262.
- [3] S. Sakano, H. Inoue, H. Nakamura *et al.*, Electron. Lett., 1986 **22**:594.
- [4] H. Inoue, T. Kato, Y. Takahashi, E. Amada and K. Ishida, Opt. Engin., 1990 **29**:191.
- [5] 庄婉如, 林雯华, 杨培生, 等, 半导体学报, 1993, **14**:1.
- [6] 林雯华, 庄婉如, 王德煌, 半导体学报, 1993, **14**:233.

Intersect Angle and Numerical Aperture of TIR Optical Switch

Kang Shouwan¹ Dong Yuhe² and Zhuang Wanru³

(National Integrated Optoelectronics Lab., Beijing 100083)

(1 Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

(2 Baotou Steel and Iron college, Baotou 014010)

(3 Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Received 15 July 1994

Abstract The problems of the intersect angle φ of TIR optical switch and numerical aperture NA of the optical circuit are investigated. An upper limit on φ and the formula of NA taking the influence of the TIR switch into account are presented.

PACC: 4280L, 4280S, 4282, 4265P