

波导与探测器吸收层垂直耦合结构中的光学耦合分析*

李 娜 李国正 刘恩科

(西安交通大学电子工程系, 西安 710049)

摘 要 利用几何光学理论分析了波导与探测器吸收层之间的光学传播情况, 以硅基波导与 GeSi/Si 多量子阱 PIN 探测器吸收层为分析对象, 说明光学耦合效率与两层介质的折射率分布及吸收层长度的关系。

关键词 波导, 探测器吸收层, 耦合效率。

1 引 言

在单片光电集成电路中通常将光源、检测器和电子器件制作在一块芯片上, 构成可实用的系统, 其中的传输介质多采用折射率波导结构。波导作为集成光学的基本元件与其它器件的集成已成为光电集成电路的主要研究方向, 已报道的有, 波导与各类半导体激光器的集成^[1], 波导与光电调制器或开关的集成以及波导与各类光电探测器的集成^[2]等。波导与探测器吸收层的集成方式常用的主要有两种, 如图 1 所示。一种是对接耦合方式, 如图 1(a) 所示, 光直接从波导进入探测器的吸收层, 外量子效率较高, 则吸收区的长度可稍短, 因吸收层需重新生长, 要获得较高的量子效率, 则需波导与吸收层对准。另一种是垂直耦合方式, 如图 1(b) 所示。吸收层位于波导上面, 光波通过波导进入吸收区。这种结构不需要再生长和垂直对准, 由于波导与吸收层的交接处属弱吸收, 这部分不需要耗尽, 这就放松了制作工艺的要求。但同时又需要增加长度用以吸收整个波导层中的光波, 结电容会较高。目前多采用第二种结构, 因此本文以垂直耦合结构为分析对象。



Fig. 1 Side view of couple structure of waveguide and photodetector. (a) Butt-coupled, (b) Vertical-coupled absorber

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1997-07-03; 收到修改稿日期: 1997-09-16

2 理论分析

本文采用的耦合结构如图 2 所示, 由于吸收层的折射率较高, 不满足全反射条件, 这时的波导层已不是严格意义上的波导 ($n_3 > n_2$)。实际结构属多层波导, 吸收层为复折射率 ($N + jK$), 虚部对应材料的吸收系数 $\alpha = 4\pi K/\lambda$ 。吸收区 ($z > 0$) 的光场分布, 可认为是波导模 m 的叠加, 对应不同的场分布 $e_m(x)$, 模传播常数为 $\beta_m + j\alpha_m/2$, 其中一些为导模, 另一些为连续模和辐射模, 光场分布可表示为:

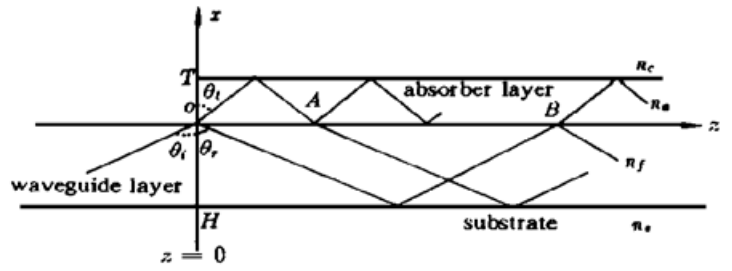


Fig.2 Schematic view of optical couple structure of waveguide and photodetector absorber

$$E(x, z) = \sum_{modeom} C_m e_m(x) \exp [(j\beta_m - \alpha_m/2)z] \tag{1}$$

式中 $e_m(x)$ 为归一化导模电场, 辐射模和连续模忽略不计, 振幅系数由入射光场 $e_{inc}(x)$ 在 $z = 0$ 的积分决定, 即:

$$e_m \approx \int e_{inc}(x) e_m(x) dx \tag{2}$$

如果入射光全部耦合入单模吸收区, 则由(1)式表明光能量将沿 z 方向指数衰减, 吸收系数 α 和内量子效率 η_i 满足:

$$\eta_i = 1 - \exp(-\alpha L) \tag{3}$$

式中 L 为耦合长度。

但从物理角度上看, 这种结构光波耦合的最好描述方法是较低折射率的波导模泄漏进较高折射率的吸收层, 而不是由于输运场的叠加(假设吸收层足够厚), 漏模的存在说明光波传输与平面是不平行的, 而成一定角度, 这种方向变化可用输运场 $e_m(x)$ 复特性来表现, 增加光传输截面, 减少(复)折射率差, 可增加漏模, 它可以用光波传导的直线传播模式进行理解。因此有两种分析光学耦合问题的方法, 即漏波理论^[31]和几何光学方法, 其中漏波理论适用于吸收层较厚的情况, 而实际波导探测器的吸收层厚度只有 $1 \mu\text{m}$ 左右, 因此根据实际结构, 本文用几何光学方法进行讨论。

如将光波视为直线传播的光束、传播方向为平面波的法线方向, 当光线进入如图 2 所示的结构中, 会受到上、下界面的反射, 光线会在上下两介质层间弹射前进。如果假定在 z 方向的光传播是由 $x-z$ 平面内以锯齿形路径运动的平面波构成, 由每个模构成的平面波以同样的位相速度前进, 但反射角不同, 故位相速度的 z 分量不同。这些平面波在各层分界上的反射率和折射率满足菲涅耳原理。

设 O 点前平板波导中的 TE 单模平面波为:

$$E_i = E_{oi} \cos(\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{y} - \omega t) \tag{4}$$

O 点后的反射波 E_r 和透射波 E_t 为

$$E_r = E_{or} \cos(\mathbf{k}_r \cdot \mathbf{r} - \omega t - \phi_r) \tag{5}$$

$$E_t = E_{ot} \cos(\mathbf{k}_t \cdot \mathbf{r} - \omega t - \phi_t) \tag{6}$$

式中 E_{oi} 、 E_{or} 、 E_{ot} 为电场振幅, ϕ_r 和 ϕ_t 是相对于 E_i 的位相常量。根据菲涅耳定律

$$\theta_i = \theta_r, \quad n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \tag{7}$$

在 O 点前按照平板波导传播常数的定义, $\sin \theta_i$ 与导模传播常数一一对应, 在单模条件下, β

= $k_{onf} \sin \theta_i$, 因此 $\sin \theta$ 也同时确定。

对于 TE 波, 菲涅耳公式如下:

$$\frac{E_{0r}}{E_{0i}} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} = r, \quad \frac{E_{0t}}{E_{0i}} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} = t \quad (8)$$

式中 $n_1(= n_f)$ 为入射介质折射率, $n_2(= n_a)$ 为透射介质折射率, $\alpha_1 = \theta_i = \theta_r$, $\theta_2 = \theta_t$, 则在两层介质的分界面上, 反射率 R 和透射率 T 分别为

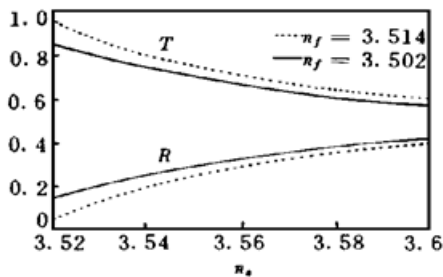
$$R \equiv (E_{0r}/E_{0i})^2 = r^2, \quad T \equiv (n_2 \cos \theta_t/n_1 \cos \theta_i)(E_{0t}/E_{0i})^2 = (n_2 \cos \theta_2/n_1 \cos \theta_1)t^2 \quad (10)$$

而且 $R + T = 1$, 由此可确定 O 点后反射波和透射波的能量分配。

3 具体结构和实验结果分析

由于 GeSi/Si 多量子阱材料的能带结构可随其中锗含量的变化进行调节, 近年来受到越来越多的重视和研究^[4, 5], 并被用作 $1.3 \mu\text{m}$ 红外光探测器的吸收层材料。因此本文具体分析 GeSi/Si 多量子阱 PIN 探测器吸收层与硅基波导光电集成器件的耦合结构。在图 2 中, 衬底层为 n^+ -Si 层, 波导层为硅外延层, 其折射率在 3.500~ 3.514 范围内变化, 吸收层为 GeSi/Si 多量子阱, 折射率为 3.557~ 3.568, 厚度为 $0.6 \mu\text{m}$ 。

在一定的波导层条件下, $n_1 = n_f$, $\sin \theta = \beta/k_{onf}$, 在前述结构中, 入射角基本相同, 即



$\sin \theta = 0.9987$, 由(7)式可得到反射率 R 和透射率 T 与透射介质折射率 $n_2(= n_a)$ 的关系, 如图 3。图中曲线表明吸收层折射率 n_a 越小, 透射率越大、进入上层的光强越大。当 $n_a = 3.55$ 时, 透射率约为 70%, 根据反射率和透射率的定义, 在以上讨论的结构参数下, 光波从波导到吸收层的光学耦合效率约为 70%, 依不同条件, 稍有差异。

Fig. 3 Relation of n_a with R and T

如果使上下界面的折射率满足全反射条件, 进入上层的光波经上界面全反射到达 A 点, z 方向传输距离为 S_{OA} , 后以同样透射率进入波导层并经过 S_{OB} 的距离再次进入吸收层; 而在 O 点反射的光波在波导层中经下界面全反射到达 B 点后, z 方向传输距离为 S_{OB} , 也以同样的透射率进入吸收层, 并通过 S_{OA} 距离后, 再次进入波导层, S_{OA} 和 S_{OB} 可由下式确定:

$$S_{OA} = 2T \tan \theta, \quad S_{OB} = 2H \tan \theta \quad (11)$$

在一次弹射周期中光波路径 $S = S_{OA} + S_{OB}$, 而光束在吸收层中的实际传播距离为 S_{OA} 。如果没有吸收和损耗, 光波将始终如此弹射前进。由于存在吸收, 光强将随着光波的前行逐渐减弱, 在足够的长度下, 大部分被吸收并转化为电能。如果吸收区长度为 L , 则实际吸收距离为 $S_{OA}L/S$ 。GeSi/Si 多量子阱对 $1.3 \mu\text{m}$ 波长光波的吸收系数 α 还不太确定, 一般认为小于 100 cm^{-1} ^[6]。在不考虑其他损耗的情况下, 由(3)式, 根据 $\eta_i = 1 - \exp(-\alpha S_{OA}L/S)$, 可获得内量子效率与吸收区长度的关系, 如图 4 中实线所示。如果取吸收系数 $\alpha = 100 \text{ mm}^{-1}$, 要获得较高的量子效率($\gg 50\%$), 吸收区长度 L 至少为 4 mm。图中 “o” 为实际器件测量值, 虚线为趋势线。

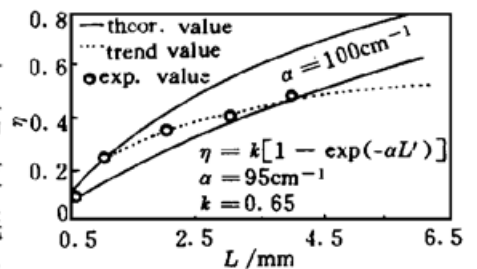


Fig. 4 Relation of internal quantum efficiency with absorber length

在实验中, 器件总长度 6 mm, 吸收区长度从 1 mm 到 5 mm, 步长 1 mm, 对应 4 mm 长

的吸收区, 可测得波导探测器的最大响应电流以及最大量子效率为 47%, 此值明显低于计算值, 这种差别通过趋势线表现为吸收区越长, 内量子效率的实验值比计算值低的越多, 说明还有其它吸收和损耗, 且随着器件长度的增加而变大。因此, 实验曲线与理论曲线有斜率的差异, 实际内量子效率应为:

$$\eta_i = k[1 - \exp(-\alpha L')] \quad (12)$$

式中 $k < 1$ 是比例系数, 反映了器件的损耗情况, $L' (= S_{0A}L/S)$ 为实际吸收长度, 根据不同长度下内量子效率的实验结果, 取 $\alpha = 95 \text{ cm}^{-1}$, $k = 0.65$ 得趋势线, 虽与理论曲线有差别, 但基本趋势一致, 可通过讨论其它吸收和损耗进行修正。

结 论 由以上分析可见, 几何光学法是分析垂直耦合结构的简单、有效手段, 是进行结构设计的基础, 并普遍适用于各种材料。根据理论分析和实验结果表明, 要获得较高的耦合效率需适当减小波导与吸收层的折射率差。在具体结构中, 可增加匹配层, 以降低反射率, 提高透射率, 并尽可能消除其它吸收和损耗的影响。

参 考 文 献

- [1] B. Bode, R. Müller, G. Böhm *et al.*, Monolithic integration of GaAs-AlGaAs quantum well lasers with directional couplers using vertical coupling of light. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1996, **8**(12): 1591~ 1593
- [2] Robert, J. Deri, Monolithic integration of optical waveguide circuitry with III-V photodetectors for advanced lightwave receivers. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1987, **11**(8): 1296~ 1313
- [3] D. B. Hall, C. Yeh, Leaky waves in a heteroepitaxial film. *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**(5): 2271~ 2274
- [4] A. Splett, T. Zinke, K. Petermann *et al.*, Integration of waveguides and photodetectors in SiGe for 1.3 μm operation. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1994, **6**(1): 59~ 61
- [5] V. P. Kefan, P. G. May, F. K. Legoues *et al.*, Si/SiGe heterostructures grown on SOI substrates by MBE for integrated optoelectronics. *J. Crystal Growth*, 1991, **111**: 936
- [6] S. Luryi, T. P. Pearsall, H. Temkin, Waveguide infrared photodetectors on a silicon chip. *IEEE Electron Device Lett.*, 1986, **EDL-7**(2): 104~ 107

Analysis of Optical Coupling in Vertically-Coupling Structure of Waveguide and Photodetector Absorber

Li Na Ren Zhongjie Li Gupzheng Liu Enke

(Xi'an Jiantong University, Department of Electronic Engineering, Xi'an 710049)

(Received 3 July 1997; revised 16 September 1997)

Abstract The coupling efficiency between the waveguide and detector absorber layer is discussed on the basis of the geometric optics method. The dependence of the coupling efficiency on the refractive index distribution and length of absorption region in the vertically-coupling structure is analysed.

Key words waveguide, photodetector absorber, the coupling efficiency.