

新型三腔谐振腔增强型光探测器的 理论分析和数值模拟*

刘 凯 李建新 黄永清 任晓敏

(北京邮电大学光通信中心 北京 100876)

提要 提出了一种新的谐振腔增强型(RCE)光探测器结构,它将器件结构中的谐振腔分为三个子腔。分析表明,采用这种新结构的光探测器在保留了RCE光探测器优点的同时,还实现了器件量子效率及其光谱响应线宽之间制约关系的解耦,因而可以同时获得窄的光谱响应线宽($< 1 \text{ nm}$),高的量子效率($> 90\%$)和高的响应速度。该器件可望在密集波分复用(DWDM)光通信系统中得到广泛应用。

关键词 谐振腔增强型探测器,波分复用,光电器件

1 引 言

近年来,随着光波分复用通信技术研究与应用的高速发展^[1],作为其关键技术之一的具有波长选择特性的光探测器的研究也日益引起人们的关注。因而,K. Kishino 和 M. Selim Ünlü 提出了一种全新的器件结构——谐振腔增强型(RCE)光探测器结构^[2],即将吸收层插入由两个反射镜构成的谐振腔中构成整个器件。谐振腔的选模作用使RCE光探测器具有波长选择特性,而谐振腔的谐振光增强效应使器件可以在较薄的吸收层情况下获得较高的量子效率,从而实现了器件量子效率和其带宽的载流子渡越时间分量之间相互制约关系的解耦。对于这种新型器件结构,人们进行了大量的理论^[3,4]和应用^[5,6]方面的研究,并获得了许多成果。

根据RCE型光探测器的理论,组成谐振腔的两个反射镜的反射率越高,器件的光谱响应线宽越窄。但是,为获得最高的器件量子效率,又要求它们必须满足关系式 $R_t = R_b \cdot e^{-\alpha d}$,其中 R_t 和 R_b 分别代表顶镜和底镜的反射率,而 α 和 d 分别表示吸收层的吸收系数和厚度^[2],这时器件的光谱响应线宽较宽($> 20 \text{ nm}$),即在RCE器件的量子效率和其光谱响应线宽之间存在着相互制约的关系^[7]。为了解决这一问题,又提出了两种新的器件结构:一种是平行三镜腔结构^[4],另一种是一镜斜置三镜腔结构^[7],但是这两种结构的器件依然存在着自身的不足。为此,本文提出了一种新的光探测器结构,它将RCE器件的谐振腔分为三个子腔——滤波腔、隔离腔和吸收腔。与上面提到的两种器件结构相类似,应用该结构的器件可以同时实现量子效率与带宽的载流子渡越时间分量之间及其光谱响应线宽之间相互制约关系的解耦。此外,它的量子效率和光谱响应线宽可以在相应的子腔中分别予以优化,而且在制造工艺上也没有特殊的

* 国家自然科学基金(编号:69625101)、国家教委留学回国人员科研启动基金和国家863计划资助项目。

收稿日期:1998-11-24;收到修改稿日期:1999-01-14

技术要求。也就是说,采用这种器件结构,制造可以同时具有高量子效率、高响应速度和窄线宽的光探测器会变得更加容易。

2 理论分析

2.1 器件结构

器件结构如图 1 所示,其中的 4 个反射镜可以由半导体或介质材料的四分之一波长堆栈构成。镜 1 和镜 M_1 构成 F-P 滤波腔;吸收层位于镜 M_2 和底镜之间,它们共同形成吸收腔;以上两腔之间是隔离腔,它把上两个子腔联结起来,使之形成一个完整的器件结构。

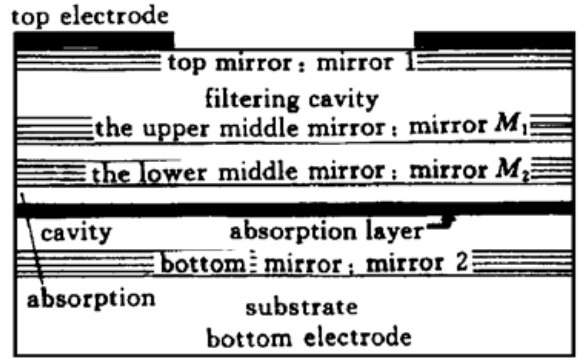


图 1 器件结构

Fig. 1 The proposed device structure

2.2 分析模型

器件的分析模型如图 2 所示。其中 R_1, R_{M_1}, R_{M_2} 和 R_2 分别表示镜 1, M_1, M_2 和镜 2 的反射率, $n_i (i = 0, f, s, a, b, c, 1)$ 为各相应区域的材料折射率; $\alpha_i (i = 0, f, s, a, c, 1)$ 为各部分的损耗系数, α_b 为吸收层的吸收系数; f 区为由镜 1 和镜 M_1 界定的滤波腔; s 区为位于镜 M_1 和镜 M_2 之间的隔离腔; b 区表示厚度为 l_b 的吸收层,它位于隔离层 a 和 c 之间;镜 M_2, a, b, c 区和镜 2 共同构成吸收腔。 $E_{xR}, E_{xL} (x = 0, f, s, a, b, c, 1)$ 分别表示各区中的右行波和左行波光场,区域 0 和 1 分别表示光入射区域和器件生长的衬底。

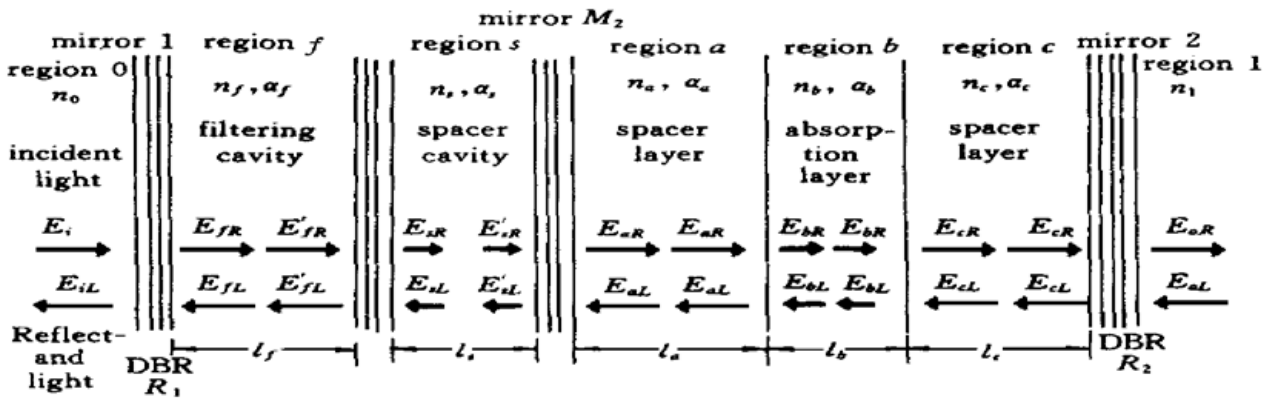


图 2 分析模型

Fig. 2 Analysis model

2.3 量子效率

根据图 2 和参考文献[8],可以得到输入光波和输出光波之间有下列关系

$$\begin{bmatrix} E_{iR} \\ E_{iL} \end{bmatrix} = S_{FC} \cdot U_{SC} \cdot S_{AC} \cdot \begin{bmatrix} E_{oR} \\ E_{oL} \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中, S_{FC} 为滤波腔的传递矩阵, S_{AC} 为吸收腔的传递矩阵, U_{SC} 代表光通过隔离腔时所对应的相位变化矩阵。为计算探测器的量子效率, 设

$$S = S_{FC} \cdot U_{SC} \cdot S_{AC}$$

$$S' = S_{FC} \cdot U_{sc} \cdot S_{M_2} \cdot S_{ab} \quad (2)$$

其中, S_{M_2} 和 S_{ab} 分别为镜 M_2 和隔离层 a 的传递矩阵, 则由公式(1), (2) 和文献[8] 可以得到器件的量子效率为

$$\eta = \frac{1}{|S|^2} \cdot \left[\left| S'_{22} - S'_{12} \cdot \frac{S_{21}}{S_{11}} \right|^2 \cdot (1 - e^{-\alpha_b l_b}) + \left| S'_{11} \cdot \frac{S_{21}}{S_{11}} - S'_{21} \right|^2 \cdot (e^{\alpha_b l_b} - 1) \right] \cdot \frac{n_b}{n_0}$$

2.4 反射镜的反射率

镜面的反射率可分别由其传递矩阵得到

$$R_i = (|S_{i21}/S_{i11}|)^2 \quad i = 1, 2, M_1, M_2 \quad (3)$$

为计算从镜 1 到镜 M_2 的多层膜结构等效反射镜的反射率, 首先需求出其传递矩阵, 为

$$S_1' = S_{FC} \cdot U_{sc} \cdot S_{M_2} \quad (4)$$

则其反射率 R_1' 可求得为

$$R_1' = [|(S_1')_{21}/(S_1')_{11}|]^2 \quad (5)$$

3 数值模拟

在数值模拟中, 我们做了如下假设。中心吸收波长 λ_0 为 $0.85 \mu\text{m}$ 。反射镜由 $\text{AlAs}/\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ 材料的四分之一波长堆栈构成, 镜 1 和镜 M_1 结构相同, 亦即 $R_1 = R_{M_1}$ 。F-P 滤波腔、隔离腔和吸收腔中的隔离层由 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ 构成, 而吸收物质为 GaAs 材料。此外设 $n_f l_f = 2\lambda_0$, $3.5n_s l_s = \lambda_0$, $n_a l_a + n_b l_b + n_c l_c = 5\lambda_0$ 。以下为上述假设条件下的模拟结果。

3.1 镜面反射率

由文献[2]可知, 对于 RCE 光探测器, 为得到最高的量子效率, 须满足条件 $R_t = R_b \cdot e^{-\alpha l}$ 。比较本文器件结构可以发现, 如果 R_1' 近似等于或接近镜 M_2 的反射率, 则可以通过适当选择的 R_{M_2} 使上述条件得到满足。也就是说, 这时光探测器的量子效率特性将仅由吸收腔的参数来决定。这就使得我们可以很容易地在某种程度上优化光探测器的结构, 从而优化它的整体性能。幸运的是, 实际情况就是如此。

模拟结果如图 3 和图 4 所示。在模拟中, 假设 F-P 滤波腔和吸收腔的谐振波长相互匹配, 计算是在其谐振波长(亦即其中心吸收波长)上进行的。

图 3 给出了当 R_{M_2} 为常数时 R_1' 随 R_1 ($R_{M_1} = R_1$) 的变化关系。点划线、虚线和实线分别表示 R_1 , R_{M_2} 和 R_1' 的变化情况。可以看出, 当 R_{M_2} 为常数时, 在谐振波长处, 随着 R_1 由 10% 增加到接近 100%, R_1' 也由等于 R_{M_2} 逐渐减小, 其最大改变量约为 10%。图 4 给出了 R_1 固定时 ($R_{M_1} = R_1$), R_1' 随 R_{M_2} 的变化关系。图中虚线表示 R_1 , 点划线为 R_{M_2} 的变化曲线, 实线表示 R_1' 的变化情况。可以看出当 R_1 为常数时, 在谐振波长处 R_1' 随 R_{M_2} 的增加而增加, 并且两者幅值相差不大, 最大不超过 10%。

综上所述, 可知在谐振波长处, R_1' 主要由 R_{M_2} 决定, 或者说它近似地独立于 R_1 和 R_{M_1} 的影响。结合 RCE 光探测器的最大量子效率条件可知, 新型光探测器的量子效率特性可以通过适当选择其吸收腔的参数来独立优化, F-P 滤波腔的参数对其近似地没有影响, 因而在两个腔之间实现了相互解耦。

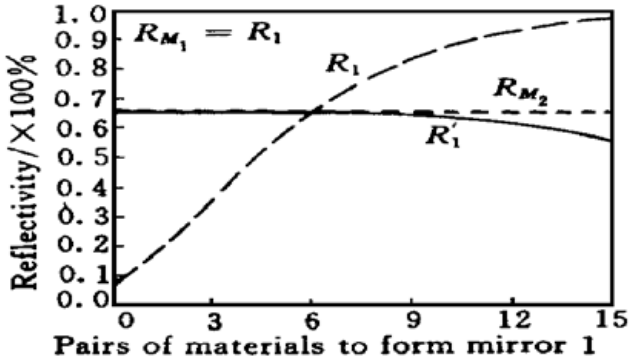


图 3 R_1, R_1' 和 R_{M_2} 与组成镜 1 的 DBR 材料对数的关系

Fig. 3 The value of R_1, R_1' and R_{M_2} versus the pairs of materials that form the Mirror 1

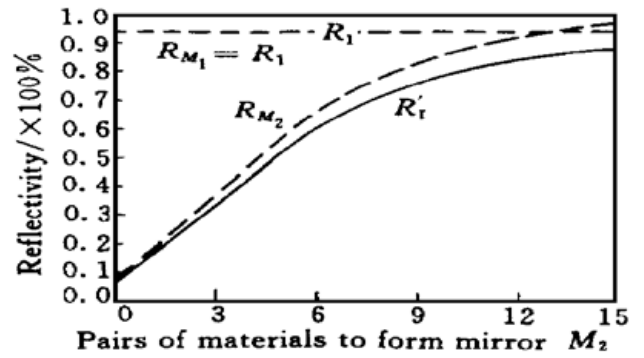


图 4 R_1, R_1' 和 R_{M_2} 与组成镜 M_2 的 DBR 材料对数的关系

Fig. 4 The value of R_1, R_1' and R_{M_2} versus the pairs of materials that form the Mirror M_2

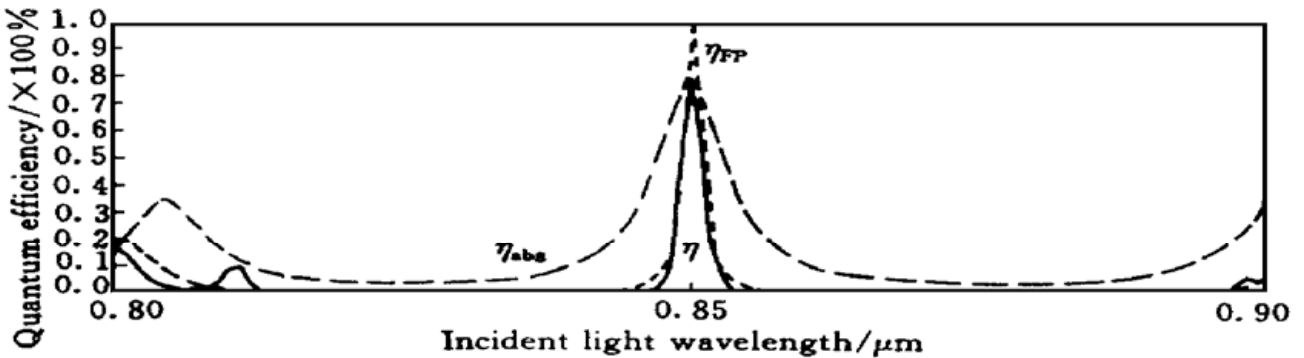


图 5 器件的量子效率谱

Fig. 5 The quantum efficiency spectrum of the device

3.2 量子效率

用于进行器件量子效率特性模拟的参数适用于由 GaAs/AlAs 材料构成的常规短波长器件, 它们分别为 $n_f = n_s = n_a = n_c = 3.418(n_{\text{AlGaAs}} - 0.25)$, $n_b = 3.52(n_{\text{GaAs}})$, $\alpha_f = \alpha_s = \alpha_a = \alpha_c = 0.005 \mu\text{m}^{-1}$, $\alpha_b = 1 \mu\text{m}^{-1}$ 。镜 1 和镜 M_1 由 13 对 AlAs/Al_{0.25}Ga_{0.75}As 材料的四分之一波长堆栈构成。镜 M_2 由 5 对 AlAs/Al_{0.25}Ga_{0.75}As 材料的四分之一波长堆栈构成。镜 2 则由 16 对 AlAs/Al_{0.25}Ga_{0.75}As 材料的四分之一波长堆栈构成。

图 5 是探测器的量子效率谱。其中实线代表整个光探测器的量子效率谱, 虚线为其顶部 F-P 滤波腔的透射谱, 点划线则代表了底部吸收腔的量子效率谱。从中可以看出, 器件的光谱响应线宽仅由其顶部滤波腔决定, 当镜 1 和镜 M_1 的反射率高达 97% 时, 这一响应线宽可以窄到小于 1 nm。此外, 由于实

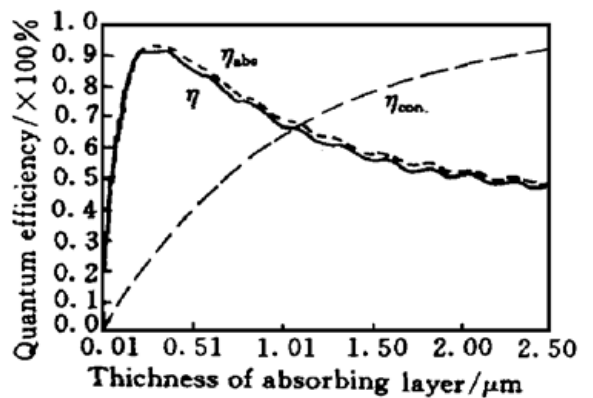


图 6 器件(实线)及其吸收腔(短划虚线)的量子效率与吸收层厚度的关系

Fig. 6 The quantum efficiency of the device (real line) and its absorption cavity (short dashed line) against thickness of the absorption layer

线的峰值与点划线的峰值具有相同的幅值,可以判定探测器的量子效率由其底部吸收腔的参数所决定。

图 6 显示了光探测器及其吸收腔的量子效率与吸收层厚度的相互关系,实线和虚线代表了新型光探测器及其吸收腔的量子效率变化情况,而点划线则为常规的 PIN 型光探测器件的量子效率随吸收层厚度的变化情况。由图可知,常规 RCE 光探测器的最大量子效率条件对于本文中提出的器件仍然成立。此外,为了得到大于 90% 的量子效率,常规的 PIN 型光探测器需要至少 $2.5 \mu\text{m}$ 厚的吸收层,而 RCE 器件则只需要 $0.2 \mu\text{m}$ 。这意味着,光探测器带宽的载流子渡越时间分量大大减少,即实现了光探测器的响应速度与其量子效率的解耦。因而,新型探测器可以获得更高的响应速度。

参 考 文 献

- 1 C. A. Brackett. Dense wavelength division multiplexing networks: Principles and applications. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 1990, **8**: 948~ 964
- 2 M. S. Ünlü, S. Strite. Resonant cavity enhanced photonic devices. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**(2): 607~ 639
- 3 M. S. Ünlü, K. Kishino, H. J. Liaw *et al.*. A theoretical study of resonant cavity-enhanced photodetectors with Ge and Si active regions. *J. Appl. Phys.*, 1992, **71**(8): 4049~ 4058
- 4 Xiaomin Ren, Joe C. Campbell. Theory and simulations of tunable two-mirror and three-mirror resonant cavity photo-detectors with a built-in liquid-crystal layer. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(11): 2012~ 2025
- 5 Kafai Lai, Joe C. Campbell. Design of a tunable GaAs/AlGaAs multiple-quantum-well resonant-cavity photodetector. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **30**(1): 108~ 114
- 6 Scott T. Wilkinson, Nan M. Jokerst, Richard P. Leavitt. Resonant-cavity-enhanced thin-film AlGaAs/GaAs/AlGaAs LED's with metal mirrors. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(36): 8298~ 8302
- 7 Xiaomin Ren, Joe C. Campbell. A Novel Structure: One Mirror Inclined Three-Mirror Cavity High Performance Photodetector. Technical Proceedings: International Topic Meeting on Photoelectronics (ITMPE'97), Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1997. 81~ 84
- 8 Liu Kai, Huang Yongqing, Ren Xiaomin. Analysis of resonant-cavity-enhanced-photodetectors considering the inter-layer refractive index differences. *J. of Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 1998, **9**(5): 360~ 363, 371 (in Chinese)

Studies of a New Type of Resonant-cavity-enhanced Photodetectors

Liu Kai Li Jianxin Huang Yongqing Ren Xiaomin

(Optical Communications Center, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract In this paper, a new type of resonant cavity enhanced (RCE) photodetector which divides the resonant cavity into three subcavities is proposed. The analysis shows that a narrower spectral response line-width ($< 1 \text{ nm}$) can be obtained with a high quantum efficiency up to 90%. This means that the quantum efficiency can be decoupled from both the response speed and the spectral linewidth with such a photo-detectors. This type of photo-detector may be proved useful for dense wavelength division multiplexing (DWDM) applications.

Key words resonant cavity enhanced (RCE) photo-detector, wavelength division multiplexing (WDM), photoelectric devices