

文章编号: 0258-7025(2004)11-1385-06

谐振腔增强型光探测器的高速响应性能研究

黄永清, 黄 辉, 任晓敏

(北京邮电大学光通信中心, 北京 100876)

摘要 高速长波长光探测器是高速光纤通信系统和网络的关键器件,它要求光探测器具有宽的频率响应带宽和高量子效率。常用的 PIN 光探测器由于量子效率和高速性能均受到吸收层厚度的牵制,使得二者相互制约,成为一对矛盾。谐振腔增强型(RCE)光探测器为这一矛盾的解决提供了有效的方案。基于谐振腔增强型光探测器的实际设计和制作模型,分析了器件吸收层中的光场分布,并将其运用于载流子的连续方程,从理论上详细地分析了器件的高速响应特性,给出了计算结果。针对研制的高速长波长谐振腔增强型光探测器,进行了理论分析和实际器件测试的结果比较,得到了比较一致的结果。

关键词 光通信;光探测器;长波长;频率响应;谐振腔增强型光探测器

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

Characteristic Analysis of the High Frequency Response for High-Speed Long Wavelength Resonant Cavity Enhanced Photodetectors

HUANG Yong-qing, HUANG Hui, REN Xiao-min

(Center of Optical Communication, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract High speed and long wavelength photodetector is the key device for high-bit-rate optical fiber communication systems and optical networks that need wide frequency bandwidth and high external quantum efficiency simultaneously. It is well known that to increase the speed of PIN photodetector, the absorbing layer thickness should be reduced. The reduction of the absorbing layer thickness means a reduction in the quantum efficiency. So for conventional PIN photodetectors, there is a tradeoff between the quantum efficiency and the device frequency bandwidth through the absorbing layer thickness. One effective solution to this conflict is to use a resonant cavity enhanced (RCE) photodetector. In the RCE photodetector, the absorbing layer is put inside a Fabry-Perot cavity. This means a very thin absorbing layer thickness can be used to achieve a high quantum efficiency and wide frequency bandwidth. In this paper, analyses of light field distribution in the absorption layer of RCE photodetector based on practical design and manufacture are performed. The expression of light field distribution is used in the continuity equations to the frequency response of the RCE photodetector. The frequency response of long wavelength RCE photodetector is analyzed and calculated. The result of analyses and calculation is almost identical with the measuring result of the wide frequency bandwidth RCE photodetector manufactured. That device is an InP-based long wavelength resonant cavity enhanced photodetector with InP-Air gap reflectors and has 8 GHz frequency bandwidth and about 60% external quantum efficiency with the active area of $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$.

Key words optical communication; photodetector; long wavelength; frequency response; resonant cavity enhanced photodetector

收稿日期:2003-07-02;收到修改稿日期:2003-10-08

基金项目:国家 863 计划(编号:2001AA312290)和国家自然科学基金重大研究计划项目(批准号:90104003)资助课题。

作者简介:黄永清(1963—),女,北京人,北京邮电大学电信工程学院副教授,硕士,主要从事光纤通信技术研究。E-mail:

yqhuang@bupt.edu.cn

1 引 言

高速长波长光探测器是高速光纤通信系统和网络的关键器件,它要求光探测器具有宽的频率响应带宽和高量子效率。谐振腔增强型(RCE)光探测器是将薄的吸收层置于谐振腔内,利用谐振腔对入射光束进行选频探测,并借助于光波多次往复通过吸收层的强化吸收机制,使得在吸收层很薄的情况下仍能获得很高的量子效率。同时,由于采用很薄的吸收层,使得器件的高速响应较传统的 PIN 光探测器得到了很大的提高。因此,高量子效率、高响应速度和具有波长选择性能的谐振腔增强型光探测器成为光通信系统和网络的关键器件之一^[1~3]。

由于谐振腔的增强机制,谐振腔增强型光探测器的量子效率较高,可以达到近 100%^[4,5]。较薄的吸收层,使得器件可以实现超过 100 GHz 的高速性能,甚至超过 200 GHz 也是可能的^[6,7]。

在谐振腔增强型光探测器的设计中,一般是将器件看作在谐振腔中加入 PIN 探测器来进行分析的^[4,8,9]。但是在谐振腔增强型光探测器的实际设计和制作中,器件的结构和上述的分析模型有所不同,一般需要在吸收层的两侧加入隔离层。其目的是防止高掺杂层的杂质扩散到吸收层,以及用作渐变层。此外加入了隔离层可以相应减小器件的结电容对探测器的高频响应的影响。本文基于谐振腔增强型光探测器的实际设计和制作模型详细分析了该器件的量子效率和高速响应特性,给出了计算结果。

2 理论分析

2.1 器件的结构

器件的分析采用如图 1 的模型。谐振腔两端的反射镜一般由介质或半导体材料的四分之一波长堆栈构成,两个反射镜的场反射系数分别为 $r_1 e^{-j\psi_1}$ 和 $r_2 e^{-j\psi_2}$,其中 ψ_1, ψ_2 表示由于场在反射镜上的反射而引起的相位偏移。吸收层被放置在两个端面反射镜之间,其厚度为 d 。吸收层的两侧是隔离层,其厚度为 L_1 和 L_2 。 P^+ 区和 N^+ 区的厚度为 L_P 和 L_N 。

在这一结构中,一般 P^+ 区, N^+ 区和隔离层为相同的材料构成。这样吸收层以外的这几个区域的折射率、吸收系数和相位常数分别为 n_{ex}, α_{ex} 和 β_{ex} 。其中相位常数 $\beta_{ex} = 2\pi n_{ex} / \lambda$, λ 为光波波长。吸收层的折射率、吸收系数和相位常数分别为 n, α 和 β 。相应的相位常数为 $\beta = 2\pi n / \lambda$ 。

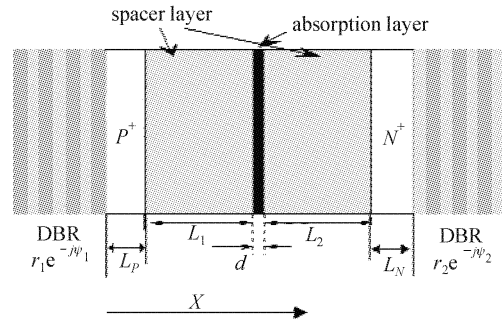


图 1 谐振腔增强型光探测器的设计和制作模型
Fig. 1 Design and manufacture model of RCE photodetector

2.2 吸收层中的光场分布

采用 M. Selim Ünlü 等^[4]提出的方法来分析光场在吸收层中的分布。可以得到

$$E_f(x) = \frac{t_1 \cdot E_i}{1 - r_1 r_2 e^{-\alpha d - \alpha_{ex}(L_1+L_2+L_P+L_N)} e^{-j[2\beta_{ex}(L_1+L_2+L_P+L_N)+2\beta d + \psi_1 + \psi_2]}} \cdot e^{-\frac{1}{2}[\alpha_{ex}(L_1+L_P)+\alpha(x-L_1-L_P)]} e^{-j[\beta_{ex}(L_1+L_P)+\beta(x-L_1-L_P)]} \quad (1)$$

$$E_b(x) = \frac{t_1 \cdot E_i}{\Gamma e^{-\frac{1}{2}[\alpha_{ex}(L_2+L_P)+\alpha(L_1+L_P+d-x)]} e^{-j[\beta_{ex}(L_2+L_N)+\beta(L_1+L_P+d-x)]}} \quad (2)$$

式中, $\Gamma = r_2 e^{-\frac{1}{2}[\alpha_{ex}(L_1+L_2+L_P+L_N)+\alpha d]} e^{-j[\beta_{ex}(L_1+L_2+L_P+L_N)+\beta d + \psi_2]}$; $E_f(x)$ 为谐振腔内的前向传输波电场分量; $E_b(x)$ 为谐振腔内的后向传输波电场分量; E_i 为入射光波电场分量; t_1 为入射端反射镜的传输系数。谐振腔中的场分布为

$$E(x) = E_f(x) + E_b(x) \quad (3)$$

吸收层中的光功率的分布和 $|E(x)|^2$ 成正比,可以推出 $|E(x)|^2$ 为

$$|E(x)|^2 = \frac{t_1^2 \cdot |E_i|^2}{1 - 2r_1 r_2 e^{-\alpha d - \alpha_{ex}(L_1+L_2+L_P+L_N)} \cos\theta + r_1^2 r_2^2 e^{-2[\alpha_{ex}(L_1+L_2+L_P+L_N)+\alpha d]}} \cdot f(x) \quad (4)$$

$$f(x) = e^{-\alpha x} + a_1 e^{\alpha x} + a_2 \cos(b_1 x + b_2) \quad (5)$$

其中

$$a_1 = r_2^2 e^{-2[\alpha_{ex}(L_2+L_N)+\alpha d]}$$

$$a_2 = 2r_2 e^{-[\alpha_{ex}(L_2+L_N)+\alpha d]}$$

$$b_1 = 2\beta$$

$$b_2 = -[\psi_2 + 2\beta d + \beta_{ex}(2L_2 + 2L_N)]$$

由式(4)和(5)可以看到在吸收层中的光功率分布由 $f(x)$ 决定, $f(x)$ 定义为光功率分布函数。 $f(x)$ 的分布决定了光生载流子的分布—光生电子和空穴的分布,从而决定了器件的高速响应和量子效率等性能。

2.3 频率响应

在吸收层中的电子和空穴满足连续性方程

$$\frac{\partial p(x,t)}{\partial t} + v_p \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} = G(x,t) - R(x,t) \tag{6}$$

$$\frac{\partial n(x,t)}{\partial t} + v_n \frac{\partial n(x,t)}{\partial x} = G(x,t) - R(x,t) \tag{7}$$

其中 $n(x,t)$ 和 $p(x,t)$ 分别为自由电子和空穴的浓度; $G(x,t)$ 为电子-空穴对的产生函数; $R(x,t)$ 为电子-空穴对的复合函数; v_p 和 v_n 分别为空穴和电子的漂移速度。

在分析和设计中,做了如下简化:1) 在使用时异质结处于耗尽层的强电场中,因此可以忽略异质结界面的电荷俘获时间限制的影响;2) 在使用时整个耗尽区的电场强度足够大,可以忽略耗尽区中电子-空穴的复合;3) 和光电流相比,热激发产生的暗电流很小,可以忽略其影响;4) 由于采用大带隙接触层,吸收层外的扩散电流的影响可以忽略。

$G(x,t)$ 和 $f(x)$ 成正比。假设光探测器接收的光信号为正弦调制,则 $G(x,t)$ 可以写成

$$G(x,t) = g_0 f(x) [1 + m e^{j\omega t}] \tag{8}$$

式中 g_0 为常数; m 为调制深度; ω 为调制信号的角频率。 $p(x,t)$ 和 $n(x,t)$ 可以表示为

$$p(x,t) = p_0(x) + p_1(x) e^{j\omega t} \tag{9}$$

$$n(x,t) = n_0(x) + n_1(x) e^{j\omega t} \tag{10}$$

$p_0(x)$ 和 $n_0(x)$ 分别为 $p(x,t)$ 和 $n(x,t)$ 的直流分量; $p_1(x)$ 和 $n_1(x)$ 分别为 $p(x,t)$ 和 $n(x,t)$ 的交流分量。将式(8)~(10)代入式(6)和(7),有

$$\frac{dp_1(x)}{dx} + j \frac{\omega}{v_p} p_1(x) = \frac{mg_0}{v_p} f(x) \tag{11}$$

$$\frac{dn_1(x)}{dx} - j \frac{\omega}{v_p} n_1(x) = -\frac{mg_0}{v_p} f(x) \tag{12}$$

在边界处,有 $p(d) = 0, n(d) = 0$, 求方程(11)和(12)满足边界条件的解,有

$$p_1(x) = \frac{mg_0}{v_p} e^{-j\omega x/v_p} \left[\frac{e^{(j\omega/v_p - \alpha)x} - e^{(j\omega/v_p - \alpha)d}}{j\omega/v_p - \alpha} + a_1 \frac{e^{(j\omega/v_p + \alpha)x} - e^{(j\omega/v_p + \alpha)d}}{j\omega/v_p + \alpha} + a_2 e^{j\omega x/v_p} \frac{j\omega \cos(b_1 x + b_2) + b_1 \sin(b_1 x + b_2)}{b_1^2 - \left(\frac{\omega}{v_p}\right)^2} - a_2 e^{j\omega d/v_p} \frac{j\omega \cos(b_1 d + b_2) + b_1 \sin(b_1 d + b_2)}{b_1^2 - \left(\frac{\omega}{v_p}\right)^2} \right] \tag{13}$$

$$n_1(x) = \frac{mg_0}{v_p} e^{-j\omega x/v_n} \left[\frac{e^{-(j\omega/v_n + \alpha)x} - 1}{j\omega/v_n + \alpha} + a_1 \frac{e^{-(j\omega/v_n - \alpha)x} - 1}{j\omega/v_n - \alpha} + a_2 e^{-j\omega x/v_n} \frac{j\omega \cos(b_1 x + b_2) - b_1 \sin(b_1 x + b_2)}{b_1^2 - \left(\frac{\omega}{v_n}\right)^2} - a_2 \frac{j\omega \cos b_2 - b_1 \sin b_2}{b_1^2 - \left(\frac{\omega}{v_n}\right)^2} \right] \tag{14}$$

由式(13)和(14)可以推导出器件中的电流密度 $J(\omega)$ 为

$$J(\omega) = \frac{q}{d + L_1} \left[\int_0^d v_p p(x,t) dx + v_p p(0,t) L_1 \right] + \frac{q}{d + L_2} \left[\int_0^d v_n n(x,t) dx + v_n n(d,t) L_2 \right] = J_0 + J_s(\omega) e^{j\omega t} \tag{15}$$

式中 $J_s(\omega)$ 为电流密度的交流分量

$$J_s(\omega) = \frac{q}{d + L_1} \left[\int_0^d v_p p_1(x) dx + v_p p_1(0) L_1 \right] + \frac{q}{d + L_2} \left[\int_0^d v_n n_1(x) dx + v_n n_1(d) L_2 \right] \tag{16}$$

q 为电子电荷; J_0 为电流密度的直流分量。由 $J_s(\omega)$ 可以推出器件的频率响应 $F(\omega)$

$$F(\omega) = 20 \lg \left| \frac{J_s(\omega)}{J_s(0)} \right| \tag{17}$$

考虑器件的串联电阻 R 和结电容 C 的影响,器件的频率响应应为

$$F_{RC}(\omega) = 20 \lg \left| \frac{J_s(\omega)/J_s(0)}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \right| \tag{18}$$

对于图 1 的结构,器件的结电容为

$$C = \frac{\epsilon_{ex} \epsilon_i S}{\epsilon_i (L_1 + L_2) + \epsilon_{ex} d} \tag{19}$$

式中, ϵ_{ex} , ϵ_i 分别为隔离层材料和吸收层的介电常数; s 为器件受光面的面积。

3 计算结果及讨论

分析式(18),(19)可知,当器件的结电容较大时,它的频率响应主要由器件的 R, C 决定。器件的结电容和探测器受光面的面积 s , 吸收层的厚度 d 及隔离层的厚度 L_1, L_2 相关。在器件的设计工作波长下,假设隔离层的厚度之和为 L_i , 有

$$L_1 + L_2 = L_i \quad (20)$$

利用式(18)和(20)可以优化器件的高速性能,得到优化的器件隔离层的厚度。

分析器件的频率响应,发现它和光功率在吸收层的分布是密切联系的。从式(5)的光功率分布函数 $f(x)$ 的表达式可以看出,光功率的分布与反射镜2的反射系数、吸收层的吸收系数、吸收层的厚度、隔离层的厚度及 P^+ 区和 N^+ 区的厚度、吸收层的相位常数有关。光在吸收层中的分布为驻波,其周期为 $\lambda/(2n)$, 当器件的设计波长为 1550 nm 时,以 InP 基器件为例,吸收层采用 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, 则折射率 $n=3.555$, 驻波的周期为 218 nm。驻波在吸收层中的分布通过影响光生载流子产生的位置而影响器件的高速响应性能,因此必须很好地选择吸收层的位置,使其置于隔离层之间的最佳位置,以达到驻波分布的优化。

假设在器件的设计中心波长处有最优的量子效率时, $L_1 + L_2$ 为 490 nm; d 为 300 nm, s 为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$; R 为 50Ω 。器件高频响应的 3 dB 带宽随着隔离层厚度 L_1 的变化情况如图 2 所示。从图中可以看出器件的 3 dB 带宽随着 L_1 的变化存在两个峰值,第一个峰值在 144 nm 处,第二个峰值在 378 nm 处,其间隔约为 $\lambda/(2n_{ex})$ 。在两个 3 dB 带宽的峰值处,器件在吸收层中的光功率分布如图 3 所示,两

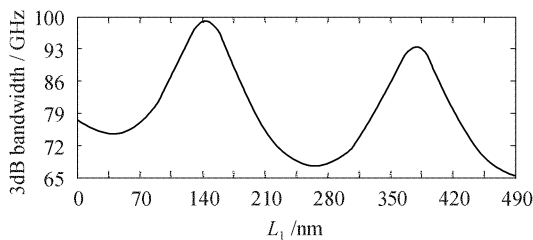


图 2 谐振腔增强型光探测器随隔离层厚度 L_1 变化的 3 dB 响应带宽

Fig. 2 3 dB frequency response bandwidth of RCE photodetector as a function of spacer layer thickness L_1

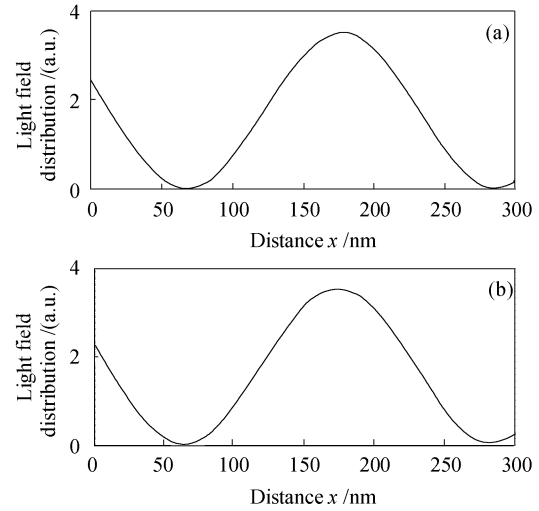


图 3 谐振腔增强型光探测器在吸收层中的光功率分布 (a) 在第一个峰值情况下; (b) 在第二个峰值情况下

Fig. 3 Light field distribution of RCE photodetector within the absorption layer

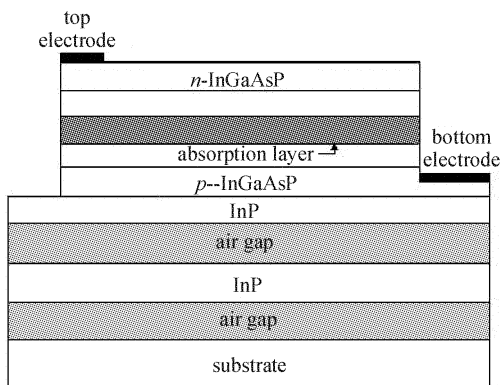
(a) at the first peak of frequency response bandwidth; (b) at the second peak of frequency response bandwidth

种情况的光功率的分布基本相同。由于在第一个峰值时隔离层的厚度 L_1 较薄,使得吸收层靠近 P^+ 区,而空穴的漂移速度较电子的漂移速度低,因此这种情况下的 3 dB 响应带宽要高于在第二个峰值的情况,是最佳状态,在设计的工作波长上有最大的量子效率和最高的响应速度。

图 4 为 InP-空气隙分布式布拉格反射镜(DBR)结构的 InP 基长波长谐振腔增强型光探测器,其底镜由腐蚀形成的两对 InP/空气隙分布式布拉格反射镜构成,从而解决了 InGaAsP/InP 分布式布拉格反射镜反射率低、反射带宽窄的问题,实现了 InP 基高速长波长谐振腔增强型光探测器^[10]。它是利用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术在 InP 衬底上外延生长而成的。首先生长 500 nm 的 InP 缓冲层;接着生长器件的底镜,它由两对光学厚度为 $\lambda/4$ 的 InP/空气隙薄层交替组成的分布式布拉格反射镜构成(底部的两层厚度为 387 nm InGaAs 利用选择性腐蚀液除去,形成空气隙),在底镜上继续生长 400 nm 厚的 p 掺杂 $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3}$ 底电极接触层;其上为 140 nm 厚的本征型 $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3}$ 隔离层;接着生长 300 nm 厚的本征型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 吸收层;350 nm 厚的本征型 $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3}$ 隔离层;300 nm 厚的 n 掺杂 $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3}$ 顶电极接触层。入射光由器件顶部正入射。器件的台面积为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 。

| | | |
|---|--------|--------------------|
| $n\text{-In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3}$ | 300 nm | 1×10^{19} |
| $i\text{-In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3}$ | 350 nm | |
| $i\text{-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ | 300 nm | |
| $i\text{-In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3}$ | 140 nm | |
| $p\text{-In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3}$ | 400 nm | 1×10^{19} |
| undoped-InP | 112 nm | |
| undoped- $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ | 387 nm | |
| undoped-InP | 367 nm | |
| undoped- $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ | 387 nm | |
| undoped-InP buffer | 500 nm | |
| undoped-InP substrate | | |

(a)



(b)

图 4 采用 InP-空气隙分布式布拉格反射镜结构的高灵敏度、高速 InP 基长波长谐振腔增强型光探测器

(a) 外延结构; (b) 结构示意图

Fig. 4 High speed and high reflectivity long wavelength

RCE photodetector with InP/air gap Bragg mirrors

(a) schematic diagram of the epitaxial structures;

(b) schematic cross section of the photodetector

采用传输矩阵法进行分析, 可以计算出器件的底镜在设计中心波长 1550 nm 处反射率接近 99%, 反射相位 ψ_2 约为 180° 。采用前述的分析和计算方法, 可以得到器件的频率响应如图 5 所示, 器件的 3 dB 带宽为 9.47 GHz。实际测得的器件频率响应如图 6 所示, 可以清楚地看到器件的 3 dB 带宽达到了 8 GHz, 波形和计算结果十分相近, 且 3 dB 带宽和计算结果接近。二者的微小差别是由于器件在生长和后工艺制作中造成的误差等原因形成的。根据理论分析, 由于器件的台面积较大, 导致器件的结电容较大, 这时器件主要是由结电容 C 限制了其高频响应。图 7 为器件的台面积为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 时计算得到的频率响应, 器件的带宽可以达到 24.5 GHz。可见通过进一步减小器件结电容的影响, 器件的 3 dB 带宽可以得到很大的提高。可以采用特殊图案欧姆接触层来减小器件的结电容^[11], 这一方案可以有效地降低器件的结电容, 而器件的受光面面积不

会受到影响, 从而大大提高器件的高频响应带宽。

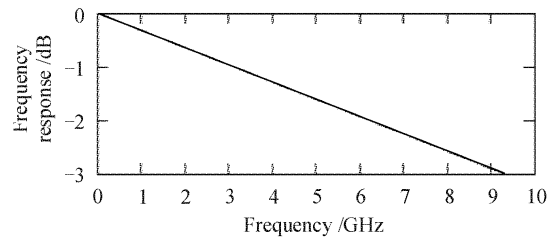


图 5 计算得到的谐振腔增强型光探测器的频率响应

Fig. 5 Calculated frequency response of the RCE photodetector

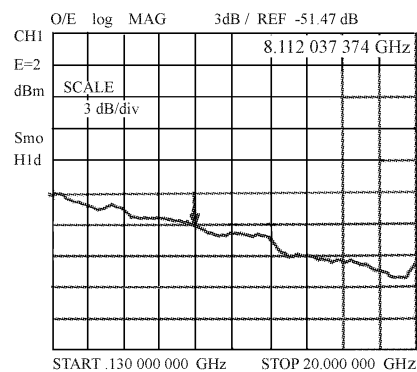


图 6 采用 InP-空气隙分布式布拉格反射镜结构的高速 InP 基长波长谐振腔增强型光探测器的高频响应特性

Fig. 6 Measured frequency response of the high speed

and high reflectivity long wavelength RCE

photodetector with InP/air gap Bragg mirrors

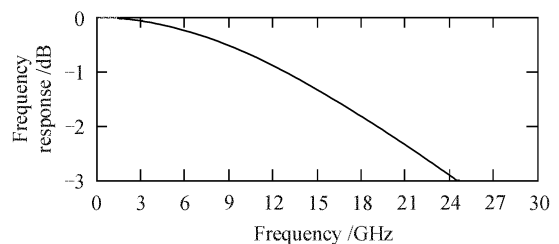


图 7 台面积为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 时计算得到的谐振腔增强型光探测器的频率响应

Fig. 7 Calculated frequency response of the RCE photodetector when $s = 30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$

4 结 论

基于谐振腔增强型光探测器的实际设计和制作模型分析了器件吸收层中的光场分布和光功率分布, 并将其运用于载流子的连续方程, 从理论上详细地分析了器件的高速响应特性, 给出了计算结果。对我们研制的长波长谐振腔增强型光探测器, 给出了比较一致的理论分析和实际测试结果。

参 考 文 献

- 1 G. N. Rouskas, M. H. Ammar. Multidestination communication over tunable-receiver single-hop WDM networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1997, **15**(3):501~511
- 2 Huang Hui, Zhang Ruikang, Wang Qi. Experimental study on one mirror inclined three mirror cavity photodetectors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **B11**(6):440~444
- 3 Zhong Yuan, Pan Zhong, Li Lianhe *et al.*. A novel resonant cavity enhanced (RCE) photodetector with a flat-top and steep-edge response [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(4):347~350
钟 源, 潘 钟, 李联合 等. 一种具有平顶陡边响应的新型谐振腔增强型(RCE)光电探测器的理论分析及模拟[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(4):347~350
- 4 M. S. Ünlü, S. Strite. Resonant cavity enhanced photonic devices [J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**(2):607~639
- 5 C. C. Barron, C. J. Mahon, B. J. Thibeault *et al.*. Resonant-cavity-enhanced pin photodetector with 17 GHz bandwidth-efficiency product [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(21):1796~1797
- 6 B. M. Onat, M. Gökkavas, E. Özbay *et al.*. 100-GHz resonant cavity enhanced Schottky photodiodes [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(5):707~709
- 7 K. Kishino, M. S. Ünlü, J. I. Chyi *et al.*. Resonant cavity-enhanced (RCE) photodetectors [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(8):2025~2034
- 8 Hsin-Han Tung, Chien-Ping Lee. Design of a resonant-cavity-enhanced photodetector for high-speed applications [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(5):753~760
- 9 Joseph A. Jervase, Yousef Zebda. Characteristic analysis of resonant-cavity-enhanced (RCE) photodetectors [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(7):1129~1134
- 10 Hui Huang, Yongqing Huang, Xingyan Wang *et al.*. Long wavelength resonant cavity photodetector based on InP/air-gap Bragg reflectors [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(1):245~247
- 11 Ren Xiaomin, Huang Hui, Huang Yongqing *et al.*. High speed and high sensitivity resonant cavity enhanced (RCE) photodetector [P]. China, Practicality and new type, ZL 01 2 75368. 8. 2002. 6