

文章编号: 1004-0609(2004)S1-0409-06

用于光波分复用系统的高性能解复用接收器件^①

黄永清, 黄 辉, 王兴妍, 王 琦, 崇英哲, 任晓敏
(北京邮电大学 光通信中心, 北京 100876)

摘 要: 对用于光波分复用(OWDM)系统的高性能解复用接收器件——高性能光探测器的研究作了介绍和分析。这类器件需要同时具备高速、高量子效率、超窄光谱响应线宽的性能。为适应 OWDM 网络的灵活性、智能化和系统集成化的需要, 器件还需具备宽带可调谐的性能。这类器件主要有普通谐振腔增强型(RCE)光探测器、四镜三腔型 RCE 光探测器、一镜斜置三镜腔光探测器、外腔可调谐 RCE 光探测器、液晶可调谐 RCE 光探测器、微机械可调谐 RCE 光探测器及采用 InP 空气隙反射镜的长波长 RCE 光探测器等器件。本文重点介绍了其中部分器件的研究。

关键词: 光纤通信; 光波分复用; 光探测器; 谐振腔; 谐振腔增强型光探测器; 解复用

High performance wavelength demultiplexing photodetectors for optical wavelength division multiplexing systems

HUANG Yong-qing, HUANG Hui, WANG Xing-yan,
WANG Qi, CHONG Ying-zhe, REN Xiao-min
(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The high performance wavelength demultiplexing photodetectors for optical wavelength division multiplexing (OWDM) systems were introduced and analyzed. This type of devices are required to have high-speed, high quantum efficiency and ultra-narrow spectral linewidth simultaneously. Furthermore, it should have wide range tuning for satisfying the flexibility, intelligentizing and integration of systems in the OWDM networks application. This type of devices include resonant cavity enhanced (RCE) photodetectors, four mirror and three-cavity wavelength-selective photodetector, one-mirror-inclined and three-mirror-cavity (OMITMiC) photodetector, external cavity tunable RCE photodetector, tunable RCE photodetector with built-in liquid-crystal layer, micro-electro-mechanical-systems (MEMS) tunable RCE photodetector and long wavelength RCE photodetector with InP/air-gap reflector and so on. Some devices mentioned above were also introduced in detail.

Key words: optical fiber communication; photodetector; resonant cavity; resonant cavity enhanced photodetector; optical wavelength division multiplexing

目前, 光纤通信正在从追求高速、大容量的干线传输向以智能化、集成化、低成本和高可靠性为特征, 以城域网和接入网为发展重点, 以基于 WDM 的全光网络为愿景的新一代光通信网络演进。在新一代光通信网络——智能光网络和全光网络的构建中需要大量动态可调的高性能光电子器

件, 这些器件包括半导体激光器、半导体光探测器、光波长变换器、光滤波器、光衰减器等等。对于用于光波分复用(OWDM)系统的高性能解复用接收器件——高性能光探测器来说, 重点要实现的是高量子效率、高速响应、超窄光谱响应线宽的性能。为适应 OWDM 网络的灵活性、智能化和系统

① 基金项目: 国家“八六三”计划资助项目(2001AA312290); 国家自然科学基金重点资助项目(90201035); 教育部科学技术研究重点资助项目(重点 02028)

作者简介: 黄永清(1963-), 女, 副教授, 硕士。

通讯作者: 黄永清, 北京邮电大学电信工程学院; 电话: 010-62284004, 13701305269; E-mail: yqhuang@bupt.edu.cn

的集成化需要,器件还需具备宽带可调谐的性能。

为实现高性能光探测器的目标,文献[1]提出了谐振腔增强型(RCE)光探测器这一方案,并围绕这一方案做了大量的研究工作。谐振腔增强型(RCE)光探测器的基本结构是将吸收层置于F-P谐振腔当中。由于谐振腔的增强效应,器件在较薄的吸收层情况下可以获得较高的量子效率,减少光生载流子在吸收层的渡越时间,因而,能够同时获得高的量子效率和高响应速度。由于谐振腔的选频特性,器件还具有波长选择性能。但普通的RCE光探测器的量子效率和光谱响应线宽之间存在着相互制约的关系^[2],在普通的RCE型光电探测器方面取得的最好指标为:光谱响应半峰值宽度1.7 nm,量子效率73%,且已达到其理论极限。当吸收层厚度较薄时,通过改变腔长或折射率来实现调谐,会使吸收层在光场中的位置发生变化,从而导致器件量子效率的急剧波动,实现大范围的调谐有一定的困难。

为解决RCE光探测器光谱响应线宽与量子效率的矛盾和大范围调谐问题,提出了两种新型的器件结构:1) 平行多腔结构^[3,4]; 2) 一镜斜置三镜腔结构^[5]。其中的四镜三腔结构光探测器可以同时获得高量子效率和窄光谱响应线宽,所制备的集成器件实现了小于1.4 nm光谱响应线宽和大于50%的量子效率,且其吸收层厚度仅为0.2 μm ^[4]。但在这种平行多腔结构中,平行的子腔间存在相互耦合关系,需要精确设计器件结构才能得到比较细锐的光谱响应。此外,采用单独调节滤波腔来实现波长调谐会导致量子效率的急剧下降,很难实现较大的调谐范围。而在三镜腔结构的光探测器中引入斜镜的方案中,很好地解决了量子效率、光谱响应线宽与器件高速响应之间的矛盾,使器件同时具有窄光谱响应线宽、高速响应及高灵敏度的特性,易于实现和大范围的调谐。器件在119 nm的吸收层下,获得了约75%的峰值量子效率、0.8 nm的光谱响应半峰值宽度(FWHM)。为了实现器件的调谐性能,提出了外腔可调谐RCE光探测器、液晶可调谐RCE光探测器、微机械可调谐光探测器等方案^[6-8],其中外腔可调谐RCE光探测器获得了12 nm波长的调谐范围,而液晶可调谐RCE光探测器的可调谐范围达到8 nm。

在长波长高性能InP基RCE光探测器的研究方面,针对InP基的器件提出了并首次实现了采用InP-空气隙DBR结构的InP基长波长RCE光探测器^[9],为解决InP基材料的DBR反射率低、反射带

宽窄和制备困难的问题提供了有效和切实可行的途径。所制备的器件在波长1.585 μm 处获得了约54.5%的峰值量子效率,以及8 GHz的3dB响应带宽,其中器件的台面尺寸为50 μm × 50 μm 。

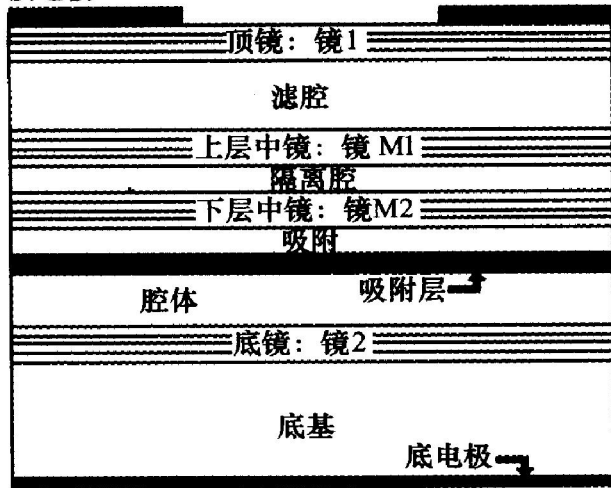
在上述高性能器件的研究和研制过程中,在新工艺、新结构的实现上取得了重大的突破,为高性能解复用接收器件的实用化奠定了基础。本文针对四镜三腔型RCE光探测器、一镜斜置三镜腔光探测器和InP-空气隙反射镜的长波长RCE光探测器作了详细的介绍。

1 四镜三腔型RCE光探测器

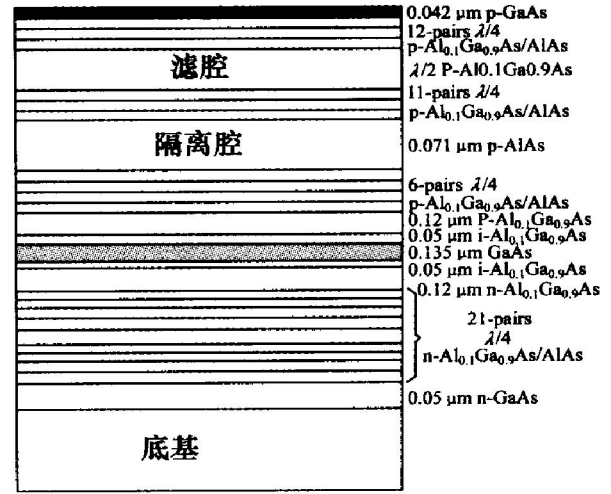
四镜三腔型RCE光探测器的器件结构如图1(a)所示^[4],4个反射镜将整个器件划分为3个腔体(4个反射镜可以由半导体或介质材料的四分之一波长堆栈构成),镜1和镜M1构成了F-P滤波腔;吸收层位于镜M2和底镜2之间,它们共同形成吸收腔;滤波腔和吸收腔之间是隔离腔,它将此两腔联结起来,使之形成一个完整的器件结构,且此器件结构使得光探测器的光谱响应线宽仅由顶部滤波腔决定,探测器的量子效率则仅由底部吸收腔的参数所决定。同时利用这一结构实现了普通RCE型光探测器很难避免的器件光谱响应线宽与其量子效率之间相互制约关系的解耦。

器件的外延生长结构如图1(b)所示。其底部反射镜(Bottom mirror)由一层0.5 μm 厚n掺杂的GaAs缓冲层和一个由20对交替生长的 $\lambda/4$ 厚n掺杂Al_{0.1}Ga_{0.9}As和AlAs材料组成的DBR构成,其中 λ 为设计波长($\lambda=0.85 \mu\text{m}$)。在底部反射镜以上,生长了器件的核心结构——PIN光探测器结构,它由0.12 μm 厚n掺杂的AlAs层和0.05 μm 的本征型Al_{0.1}Ga_{0.9}As层组成的下隔离区、0.135 μm 本征型的GaAs吸收层、0.05 μm 厚的本征型Al_{0.1}Ga_{0.9}As和0.12 μm 厚p掺杂的AlAs层构成的器件上隔离区组成。随后生长了器件吸收腔的顶镜,它由6对交替生长的 $\lambda/4$ 厚p掺杂Al_{0.1}Ga_{0.9}As和AlAs材料组成的DBR构成。顶镜之上为71 nm厚的p型AlAs材料的隔离腔腔体,其次是器件的滤波腔,其下反射镜由11对交替生长的 $\lambda/4$ 厚p掺杂Al_{0.1}Ga_{0.9}As和AlAs材料组成的DBR构成,上反射镜由12对交替生长的 $\lambda/4$ 厚p掺杂Al_{0.1}Ga_{0.9}As和AlAs材料组成的DBR构成,腔体是3 $\lambda/2$ 厚的p掺杂AlAs材料,而器件的最上层为42 nm厚的高p掺杂的GaAs电接触层。

顶电极



(a)



(b)

图 1 四镜三腔型 RCE 光探测器
(a) 一器件的结构示意图; (b) 一器件的外延生长结构

图 2 所示为器件光谱响应, 器件中心响应波长为 861.4 nm。在没有偏压下, 器件的光谱响应线宽为 0.95 nm, 响应度为 0.12 A/W, 量子效率为 17.7%; 当反向偏压为 15 V 时, 器件的光谱响应线宽为 1.47 nm, 响应度为 0.38 A/W, 量子效率为 54.3%。

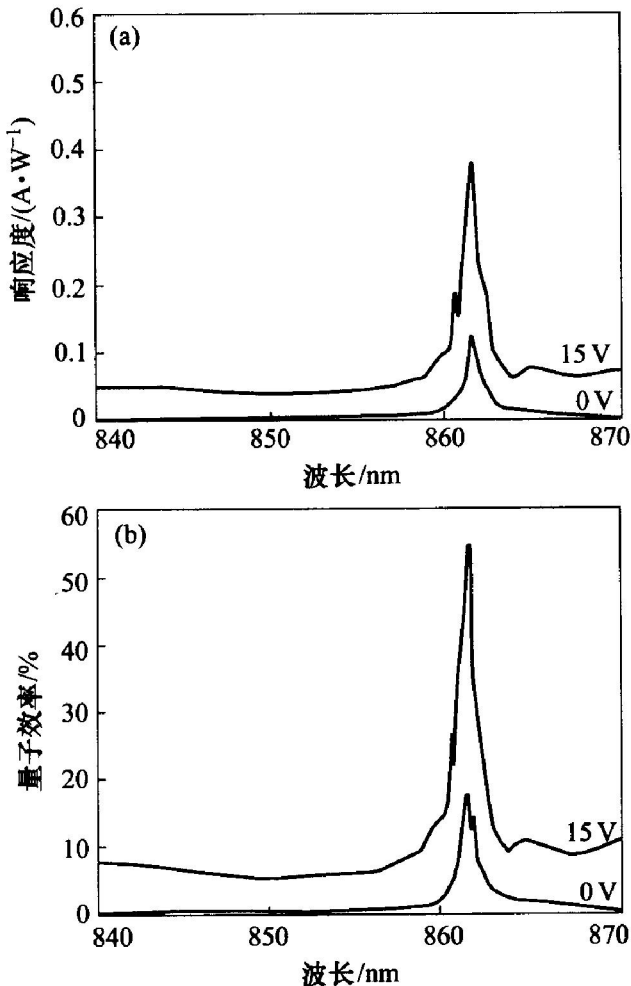


图 2 四镜三腔型 RCE 光探测器的响应度和光谱响应

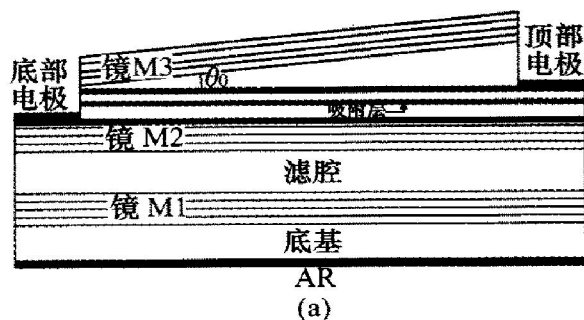
2 一镜斜置三镜腔光探测器

一镜斜置三镜腔结构是一种新型、高性能光探测器结构^[10], 这种结构实现了滤波与吸收效应之间的解耦, 能够同时获得窄的光谱响应线宽和高的量子效率, 很薄的吸收层厚度又使其具有高速响应的特性, 而器件的光谱响应线宽由 F-P 滤波腔单独决定, 易于实现大的调谐范围。

这种新型器件的结构如图 3(a) 所示, 含有 3 个高反射率反射镜。这些高反射镜可以是半导体化合物的 DBR 结构, 也可以是多介质膜。其中底镜和中镜彼此平行构成一个 F-P 腔, 而顶镜相对于底镜和中镜有一个微小倾角 θ_0 。厚度很薄的吸收层则位于中镜和顶镜之间, 与两反射镜一起构成一个快速响应吸收子腔。

经过衬底的光波垂直于入射 F-P 腔滤波后, 形成具有特定中心波长 λ_0 的窄谱光波。这一窄谱光波 λ_0 经吸收层后到达顶镜 M3, 并被其反射, 且被反射的光波将不按原来的路线返回。入射光 λ_0 经 M3 反射后依次以 $2\theta_0, 4\theta_0, 6\theta_0, 8\theta_0, \dots$ 入射角斜射向 F-P 腔, 经 F-P 腔反射的光则依次以 $3\theta_0, 5\theta_0, 7\theta_0, \dots$ 入射角斜射向镜 M3。只要选择适当的 θ_0 , 对于入射光 λ_0 , 此时 F-P 光滤波腔等同于一高反镜, 而这一窄谱光波将被束缚在吸收腔中, 在 F-P 腔与镜 M3 之间来回反射传播, 并多次被吸收层吸收从而确保高的吸收效率。同时由于器件的吸收层较薄, 器件可以获得较高的响应速率。此外, 器

件的波长选择性由 F-P 腔单独决定, 保证了 F-P 腔光滤波器的参数设计可以独立于吸收腔而进行, 因而该滤波器的精细度可以做得很高, 使得器件只对某一特定的极窄范围的光谱光波具有响应, 因而也就使得器件具有了细锐的波长选择能力, 并可以通过调节滤波腔来实现大范围的调谐。



未掺杂	GaAs	20 nm
未掺杂	Al _{0.3} Ga _{0.7} As	100 nm
未掺杂	Al _{0.8} Ga _{0.2} As	250 nm
未掺杂	Al _{0.3} Ga _{0.7} As	600 nm
未掺杂	Al _{0.6} Ga _{0.4} As	77 nm
未掺杂	GaAs	100 nm
p--GaAs	5 × 10 ¹⁹	200 nm
i--GaAs		30 nm
i--GaAs		10 nm
i--In _{0.2} Ga _{0.8} As		7 nm
i--GaAs		480 nm
n--GaAs	5 × 10 ¹⁹	500 nm
未掺杂	Al _{0.9} Ga _{0.1} As	82 nm
未掺杂	GaAs	70 nm
未掺杂	GaAs	490 nm
未掺杂	Al _{0.9} Ga _{0.1} As	82 nm
未掺杂	GaAs	70 nm
未掺杂	GaAs	Buffer 500 nm
未掺杂	GaAs底基	

图 3 一镜斜置三镜腔型光探测器

(a) 一器件的结构简化示意图; (b) 一器件的外延生长结构

器件的外延生长结构如图 3(b) 为所示。器件是在 GaAs 衬底上利用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 生长而成。外延生长底镜 M1、光学厚度 $2\lambda_0$ 的 GaAs 层以及中镜 M2 构成 F-P 滤波腔(中心透过波长 λ_0 为 0.98 μm), 其中 M1 和 M2 由 17 对 $\lambda_0/4$ 光学厚度的 GaAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As 材料薄膜堆栈构成; 生长 PIN 探测器的吸收层由 7 对厚度分别为 7 nm 或 10 nm 的 In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs 量子阱构成; 生长 600 nm 厚的 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 外延层及 250 nm 厚

的 Al_{0.8}Ga_{0.2}As 引导层, 利用选择性湿法刻蚀在 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 外延层上制备出倾角 θ_0 的楔形结构, 最后在楔形结构的斜面上蒸发 6 对 $\lambda_0/4$ 光学厚度的 ZnS/冰晶石的 DBR 构成斜镜 M3。

一镜斜置三镜腔型光探测器的光谱响应如图 4 所示。在 5.0 V 的反向偏压下, 器件的响应峰值波长为 910.42 nm; 光谱响应半峰值宽度(FWHM) 为 0.8 nm; 量子效率为 78%。这是目前光探测器在光谱响应线宽和量子效率两项性能上获得的最好结果。

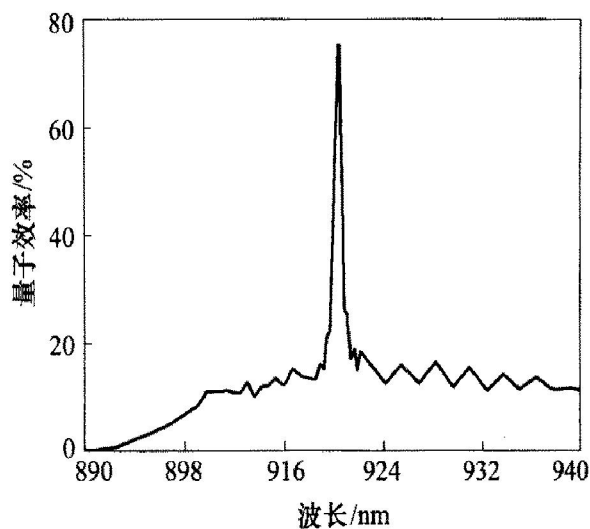


图 4 一镜斜置三镜腔型光探测器的光谱响应

3 采用 InP-空气隙反射镜的长波长 RCE 光探测器

采用 InGaNaAs, GaAsSb 或者 InAs 量子点作为吸收材料可以在 GaAs 基上实现长波长的光电子器件^[9], 但是目前还没有实现工作波长为 1 550 nm 器件的报道。另一方面, 由于 InP Bragg 反射镜生长材料的折射率差较小造成生长困难和器件性能不高。为了解决这一问题, 本文提出并制备了采用 InP-空气隙 DBR 结构的 InP 基长波长 RCE 光探测器, 底镜由腐蚀形成的两对 InP/空气隙 DBR 构成, 开创性地解决了 InGaAsP/InP DBR 反射率低、反射带宽窄的问题。

采用 InP-空气隙反射镜的长波长 RCE 光探测器的结构如图 5 所示, 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。为生长 500 nm 的 InP 缓冲层; 接着生长器件的底镜, 它由 2 对光学厚度为 $\lambda/4$ 的 InP/空气隙薄

层交替组成的 DBR 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), 在设计中心波长 1 550 nm 处反射率接近 99%; 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 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。器件的台面尺寸为 $50\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$ 。

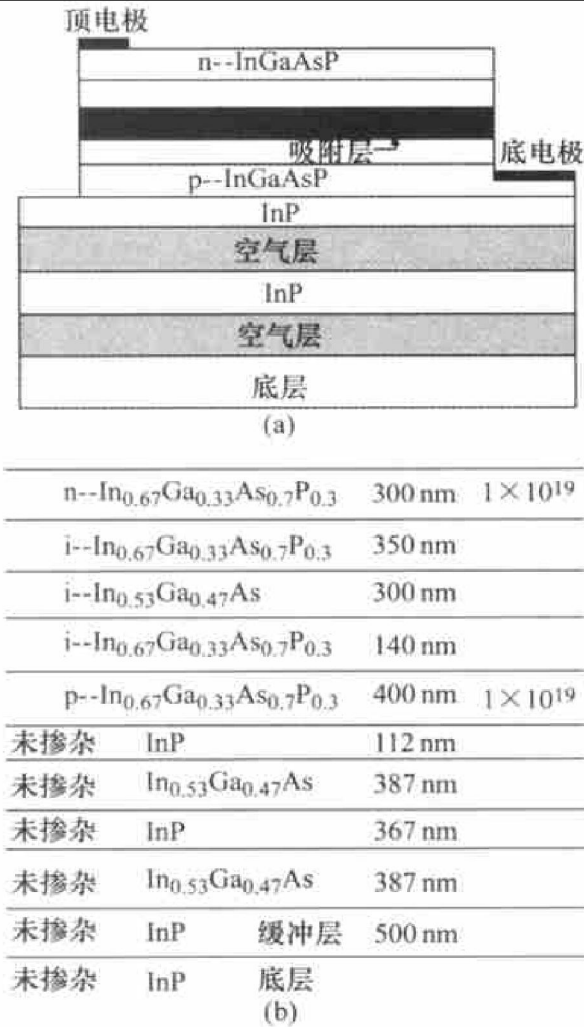
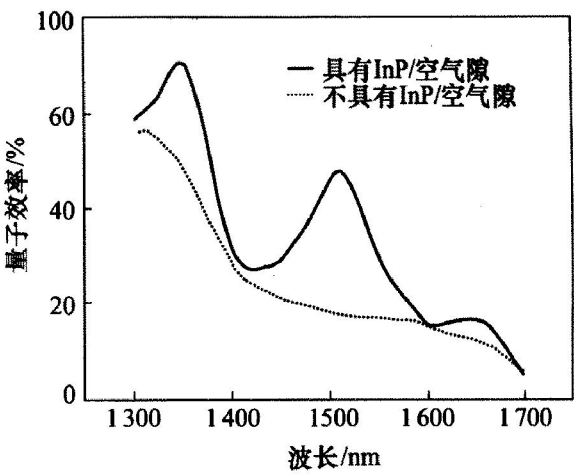


图 5 InP-空气隙反射镜的长波长 RCE 光探测器 (a) 一器件的结构示意图; (b) 一器件的外延结构

器件的光谱响应的测试结果如图 6 所示, 器件在 1 510 nm 处实际峰值量子效率大于 50%, 其半峰值宽度(FWHM)约 65 nm。图中 1 350 nm 处的响应峰是由于外延生长时的组分偏差, 吸收层两侧的隔离层在此波长也具有吸收效应, 并且由于隔离层的厚度大于吸收层的厚度, 所以吸收峰值较高。器件的频率响应如图 7 所示, 从图中可以清楚的看到器件的 3dB 带宽达到了 8 GHz。



6 InP-空气隙反射镜的长波长 RCE 光探测器的光谱响应

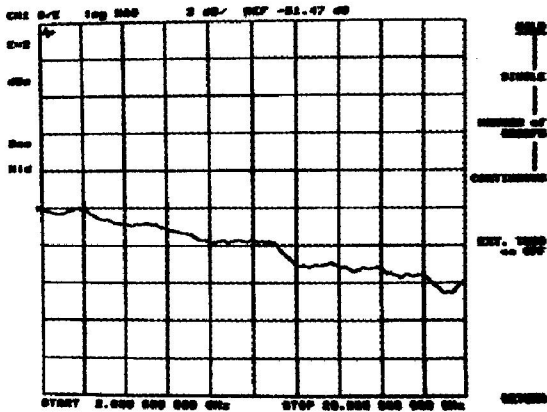


图 7 InP-空气隙反射镜的长波长 RCE 光探测器的高频响应特性

4 结论

对用于光波分复用(OWDM)系统的高性能解复用接收器件——高性能光探测器的研究作了介绍。这类器件以普通谐振腔增强型(RCE)光探测器结构为基础, 在新结构和新工艺方面取得了突破。文中针对四镜三腔型 RCE 光探测器、一镜斜置三镜腔光探测器和采用 InP-空气隙反射镜的长波长 RCE 光探测器作了详细的介绍。这类器件可以实现高量子效率、高速响应、超窄光谱响应线宽和大范围可调谐的性能, 将在未来的光纤通信系统和网络中发挥重要的作用, 具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] Ġnlü S, Strite S. Resonant cavity enhanced photonic devices [J] . Journal of Appl. Phys., 1995, 78(2): 607-639.

[2] Knodl T, Choy K H. RCE Photodetectors Based on VC-

- SEL Structure[J]. IEEE Photonics Technology Letter, 1999, 11(10): 1 289 - 1 291.
- [3] REN Xiao-min, Campbell J C. Theory and Simulations of Tunable Two-Mirror and Three-Mirror Resonant-Cavity Photodetectors with a Built-In Liquid-Crystal Layer [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1996, 32 (11): 1 903 - 1 915.
- [4] LIU Kai, HUANG Yong-qing, REN Xiao-min. Theory and experiments of a three-cavity wavelength-selective photodetector[J]. Applied Optics, 2000, 39(24): 4 263 - 4 269.
- [5] 任晓敏, 黄永清, 刘 凯, 等. 一种新型高性能光电探测器结构的研究[J]. 光电子. 激光, 1998, 9(4): 271 - 274.
- [6] HUANG Yong-qing, LIU Kai, REN Xiao-min, et al. Experimental study on tunable external cavity RCE photodetectors [J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, A27(9): 801 - 804.
- [7] 黄 辉, 成步文, 黄永清, 等. 集成液晶可调谐 RCE 光电探测器的实验研究[J]. 中国激光, 2002, 29 (10): 908 - 910.
- [8] ZHANG Ru-kang. Micromechanical Tunable Optical Filter[J]. Chinese J. of Semiconductors, 2003, 24(4): 347 - 350.
- [9] HUANG Hui, LEI Lei, LI Yan-jun, et al. High coupling efficiency and high speed InP/InGaAs resonant-cavity enhanced photodetector with Micro-pectinated Carrier Collected Layer[A]. APOC2003[C]. Wuhan: SPIE, 2003.
- [10] HUANG Hui, HUANG Yong-qing, REN Xiao-min. Ultranarrow spectral linewidth photodetector based on taper cavity[J]. Electronics Letters, 2003, 39(1): 113 - 114.
- (编辑 李艳红)