

高稳定线性调谐 GaAs 基波长可调谐共振腔增强型探测器*

王杰¹⁾ 韩勤^{1)†} 杨晓红¹⁾ 倪海桥²⁾ 贺继方²⁾ 王秀平¹⁾

1) (中国科学院半导体研究所, 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

2) (中国科学院半导体研究所, 超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

(2011 年 3 月 1 日收到; 2011 年 3 月 18 日收到修改稿)

研制了一种 GaAs 基波长可调谐共振腔增强型探测器. 采用分子束外延设备生长 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱作为器件的有源区, 无偏压时器件的响应峰波长在 1071 nm, 器件在 21 V 的直流调谐电压下, 实现了波长大于 23 nm 的调谐. 统计结果表明, 当调谐电压大于 5 V 时, 调谐电压与响应波长之间具有稳定、精确的对应关系, 且近似线性调谐, 同时对器件响应峰的特性进行了理论分析.

关键词: GaAs, 共振腔增强型探测器, 高稳定, 线性调谐

PACS: 85.60.Gz, 85.60.Bt, 85.85.+j

1 引言

目前的光通信网络正向着超高速率、超大容量信息比特的传输趋势发展, 信道间隔小, 信道数目的增加, 使得密集波分复用 (DWDM) 技术成为光通信领域研究的焦点. 波长的精确度和高度的稳定性是 DWDM 技术中对光电器件的最重要、最基本的要求, 这种高速响应的单稳频集成光源还必须具有一定的波长可调谐功能, 以便实现与信道标准的精确对准^[1-4]. 谐振腔增强型探测器 (RCE-PD) 所特有的波长选择性以及高量子效率和高响应速度兼容的特性使其在波长选择接收器件中备受关注.

基于微机电系统 (MEMS) 的可调谐 RCE-PD, 其结构与其他 MEMS 可调谐光电器件类似, 一般包括上 Bragg 反射镜 (DBR), 空气隙, 半导体腔 (量子阱有源区) 以及下 DBR 几个部分^[5,6], 通过给空气隙两端加反向偏压, 利用静电力的作用改变空气隙厚度, 从而改变 Fabry Perot (F-P) 腔的腔长, 实现

波长的选择性及可调谐性. 对于 GaAs 基波长可调谐光电器件, 由于禁带宽度以及晶格常数的限制, 很难获得长通信波段的器件, 大部分报道的器件中心波长都是在 850 nm 附近^[7-9].

本文报道了一种 GaAs 基波长可调谐共振腔增强型探测器. 采用 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱结构, 将传统 GaAs 基可调谐 RCE-PD 的中心波长拓展到 1064 nm 附近, 在静电驱动下实现了大于 23 nm 的波长调谐, 同时对器件的调谐性能及响应谱半高宽做了相应分析.

2 器件结构及研制

图 1 所示为波长可调谐 RCE-PD 的器件结构简图. 利用 Veeco Gen II MBE 系统所生长的 1064 nm 波长可调谐共振腔增强型探测器的材料结构, 自下而上依次为: n^+ 掺杂的 GaAs 衬底以及缓冲层、23 对 n 型掺杂的 GaAs/AlAs DBR 反射镜, 其上为半绝缘

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB302802)、国家高技术研究与发展计划 (批准号: 2007AA03Z421) 和国家自然科学基金 (批准号: 60376025, 61176053) 资助的课题.

† E-mail: hanqin@red.semi.ac.cn

的有源区, 由两组 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱组成, 每组量子阱包含 3 层 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$

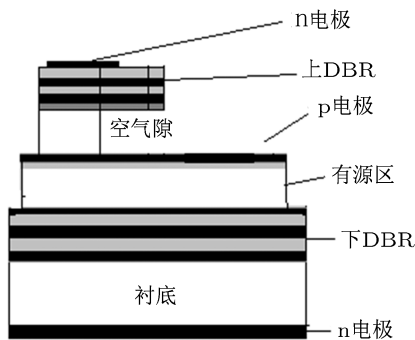


图1 波长可调谐 RCE-PD 器件结构简图

阱层, 由 GaAs 间隔开, 接下来是 3 对 p 型掺杂的 AlAs/GaAs DBR 以及 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 腐蚀截止层、半绝缘的 GaAs 牺牲层、12 对 n 型掺杂的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 上 DBR 以及 GaAs 电极接触层, 如图 2 所示。器件采用异面电极, 器件的 n 型电极为衬底的共用电极, 而 p 电极及有源区通过腐蚀的方法分离开来。

器件的研制过程包括光刻及湿法腐蚀等成熟的相关工艺。第 1 步首先制作顶部 n 型电极; 第 2 步衬底减薄并大面积溅射底部 n 型电极; 第 3 步

采用 $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ 腐蚀液湿法腐蚀悬臂台, 暴露 GaAs 牺牲层; 第 4 步再采用上述非选择性腐蚀液湿法腐蚀器件有源区, 将器件隔离开来; 第 5 步采用 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7/\text{H}_2\text{O}_2$ 系腐蚀液选择性腐蚀去掉牺牲层的 GaAs, 释放悬臂; 第 6 步通过 lift-off 剥离制作器件的 p 型电极, 整个器件制作完毕。最终制作完成的器件 SEM 侧视图如图 3 所示。

n- $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{GaAs}(\text{DBR}) \times 12$
i-GaAs 牺牲层 2060 nm
p- $\text{Al}_{0.5}\text{GaAs}$ 251.2 nm
p-GaAs/AlAs(DBR) $\times 3$
i-GaAs 122.6 nm
i- $\text{In}_{0.25}\text{GaAs}/\text{GaAs}$ Qws $\times 3$
i-GaAg 92.0 nm
i- $\text{In}_{0.25}\text{GaAs}/\text{GaAs}$ Qws $\times 3$
i-GaAs 122.6 nm
n- $\text{Al}_{0.5}\text{GaAs}$ 82.7 nm
n-GaAs/AlAs(DBR) $\times 23$
n-GaAs 衬底与缓冲层 300 nm

图2 波长可调谐 RCE-PD 外延片结构

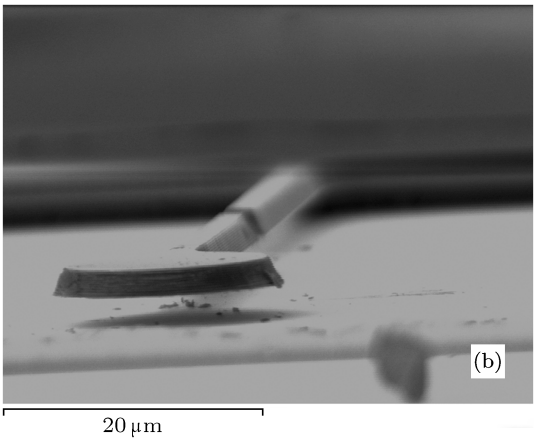
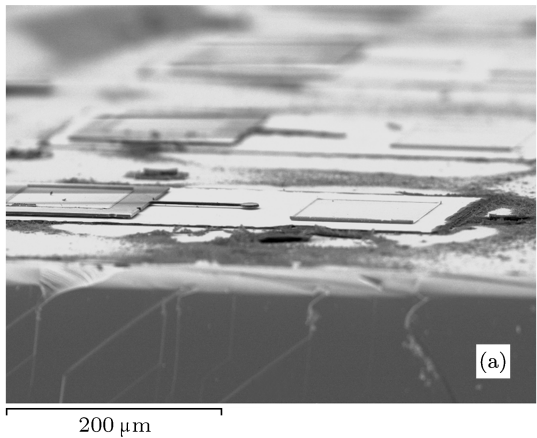


图3 波长可调谐 RCE-PD 器件的 SEM 侧视图 (a) 整体器件侧视图; (b) 器件悬臂梁部分的局部放大图

3 分析与测试

根据 Pezeshki 等提出的空气隙与半导体腔耦合的理论, MEMS 波长可调谐垂直腔型光电器件大致有 3 种结构: 半导体耦合腔 (SCC)、空气耦合

腔 (ACC) 以及扩展腔 (EC)。对于 SCC 结构, 半导体有源区作为谐振腔其厚度为 $\lambda/2$ 的整数倍, 空气隙作为上 DBR 的一部分其厚度为 $\lambda/4$ 的奇数倍。对于 ACC 结构, 半导体腔的厚度为 $\lambda/4$ 的奇数倍, 作为下 DBR 的一部分, 空气隙作为一个谐振腔其厚

度为 $\lambda/2$ 的整数倍. 而对于 EC 结构, 在空气隙与半导体界面处镀一层抗反射膜 (AR), 空气隙与半导体整体作为谐振腔厚度为 $\lambda/2$ 的整数倍, 这种结构也代表了 ACC 与 SCC 的一种折中模式 [5]. 我们可以用 Fabry Perot (F-P) 腔理论来处理空气腔 (包括

上 DBR 与空气隙), 将厚度可变的空气腔整体作为一个上反射镜, 分析其有效反射率及有效相位的变化. 依照这种分析, F-P 腔的两个端面反射率分别为 R_{tm} (上 DBR 的反射率) 和 R_c (空气隙与下面半导体界面反射率). 有效反射率及有效相位分别为

$$R_{\text{eff}} = \frac{R_c + R_{tm} + 2\sqrt{R_c R_{tm}} \cos(\pi + \phi_g)}{1 + R_c R_{tm} + 2\sqrt{R_c R_{tm}} \cos(\pi + \phi_g)}, \quad (1)$$

$$\phi_{\text{eff}} = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{R_{tm}}(1 - R_c) \sin(\pi + \phi_g)}{\sqrt{R_c}(1 + R_{tm}) + \sqrt{R_{tm}}(1 + R_c) \cos(\pi + \phi_g)} \right), \quad (2)$$

这里光在空气隙中的往返相移 $\phi_g = 2\beta L_g + 2(\beta - \beta_0)L_{tm}$, $\beta = 2\pi/\lambda$, L_g 为空气隙厚度, L_{tm} 为上 DBR

有效长度. 定义相位耦合因子为 $\gamma_\phi = d\phi_{\text{eff}}/d\phi_g$, 得到:

$$\gamma_\phi = \frac{R_{tm}(1 - R_c^2) + \sqrt{R_{tm} R_c}(1 - R_c)(1 + R_{tm}) \cos(\pi + \phi_g)}{R_c(1 + R_{tm})^2 + 2\sqrt{R_{tm} R_c}(1 + R_c)(1 + R_{tm}) \cos(\pi + \phi_g) + R_{tm}(1 + R_c^2 + 2R_c \cos 2\phi_g)}, \quad (3)$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\gamma_\phi \Delta L_g}{L_{bm} + L_c + \gamma_\phi(L_g + L_{tm})}. \quad (4)$$

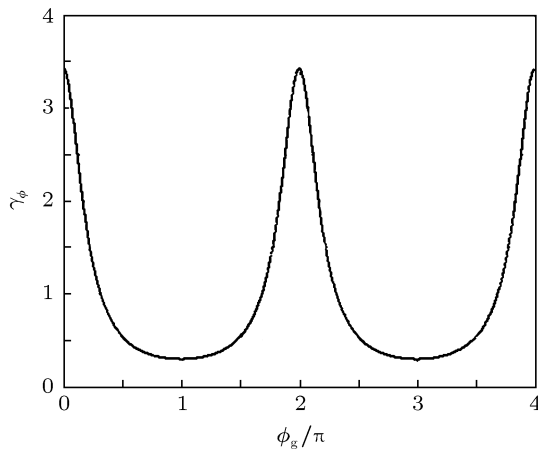


图4 利用 F-P 模型分析得到的相位耦合因子 γ_ϕ 与光在空气隙中的往返相移 ϕ_g 之间的关系

由此可见, 相位耦合因子 γ_ϕ 越大, 空气隙的变化 ΔL_g 就越能有效地转化为波长变化, 从而波长调谐速率也就越快. 图4为利用 F-P 腔模型处理空气隙, 计算得到的相位耦合因子 γ_ϕ 与光在空气隙中的往返相移 ϕ_g 之间的曲线关系图. 从图中我们可以得到: SCC 结构时 ($\phi_g = \pi$), 对应的相位耦合因子 γ_ϕ 最小, 波长调谐速率也就最慢; ACC 结构时 ($\phi_g = 2\pi$), 对应的相位耦合因子 γ_ϕ 最大, 波长调谐速率也就最快, 但是这种结构中, 半导体有源区的光最弱, 不利于器件的探测性能. 因此, 我们设计的器件采用了二者的折中模式.

在测试器件的响应谱之前, 我们对器件的暗电流特性做了测试, 发现其暗电流很小, 在 -5 V 的反向电压范围内, 器件的暗电流保持在 10^{-10} A 量级,

这有利于器件在 0 偏压状态下的探测. 随后, 我们对器件在 0 V 偏压下的响应谱进行了测试, 发现当调谐电压 V_T 为 0 V 时, 器件的响应谱峰在 1071 nm 处, 这是因为我们在设计器件的材料结构时, 将空气隙层的厚度做了适当增加, 这样使得器件的初始波长位置有些微红移, 有利于增大调谐范围及调谐速率 [10,11].

增加调谐电压 V_T , 可以使得上 DBR 反射镜在静电吸引的作用下向衬底移动, 改变耦合腔的腔长, 从而实现波长的蓝移. 测试中, 我们发现当 V_T 增加到 5 V 时, 器件的响应峰位置开始出现蓝移, 移动量为 1 nm, 随着 V_T 继续增加, 响应峰波长继续蓝移, 当 V_T 增加到 21 V, 达到我们测试所用的直流电压源的上限, 此时响应峰波长蓝移到 1048 nm. 至此, 波长调谐量达到 23 nm, 见图5所示.

从图5我们可以看出, 随着 V_T 的增加, 响应谱峰位置蓝移, 响应峰的峰值也逐渐增大; 当波长蓝移到 1064 nm 左右, 此时的响应峰值最高, 随后峰值位置逐渐降低. 这是因为有源区量子阱为 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$, 其吸收峰的位置在 1064 nm 附近, 这与我们 MBE 生长实测的量子阱 PL 谱的峰值位置基本相符.

波长可调谐 RCE-PD 的响应谱测试需要保证两点: 一是需要精度高的单色光源; 二是需要精确到 $20\text{ }\mu\text{m}$ 以内的微区聚焦耦合系统. 上述测试器件响应谱所用的光源为光栅单色仪, 其单色性本身比可调谐激光器的单色性要差, 另外, 光束经过聚焦

透镜投射到器件的上 DBR, 以类似倒圆锥型斜入射, 见图 6(a). 此时的入射光束中, 除了正入射的光之外, 还有大部分光是以斜入射的方式进入器件有源区, 根据传输矩阵理论^[12], 此时每个膜层的相位厚度

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} N_j d_j \cos \theta_j \quad (5)$$

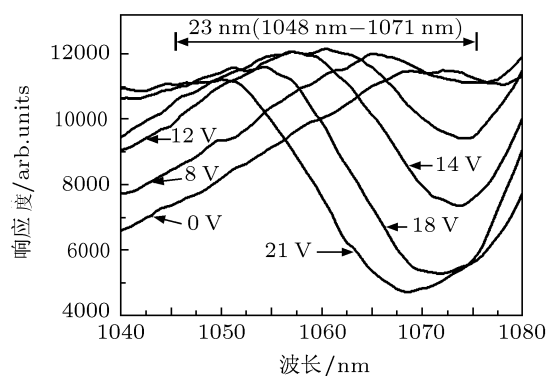


图 5 器件响应峰的调谐特性测试 调谐电压 V_T 由 0 V 增加到 21 V, 响应峰波长从 1071 nm 蓝移到 1048 nm 调谐量达到 23 nm

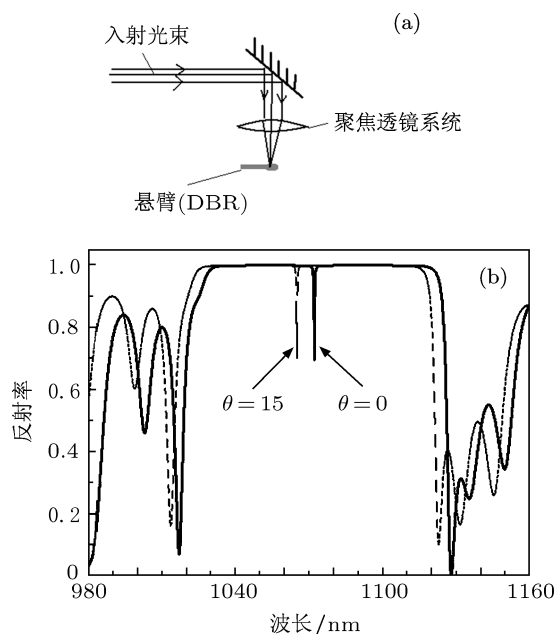


图 6 (a) 器件响应谱测试系统简图; (b) 不同入射角的光对器件模式峰波长的影响, θ 在 0° — 15° 变化时, 模式峰位置从 1072 nm 蓝移到 1065 nm

都与正入射的情况不同, 这会导致器件模式峰的位置偏移. 图 6(b) 为利用传输矩阵法计算得到的器件反射谱的曲线, 从模拟的结果可以看出, 当入

射角 $\theta_0 = 15^\circ$ 时, 器件的模式峰位置相对正入射的情形偏移了 7 nm. 这就说明, 倒圆锥型的光束入射到器件时, 我们测到的响应谱实际上是各种不同角度入射光的响应谱的叠加效果, 而这些不同角度入射光的响应峰值位置是有偏差的, 这就造成了我们所测到的响应峰的半高全宽延宽效应. 因此, 器件实际的响应峰的半高全宽应比实际测到的值要窄很多.

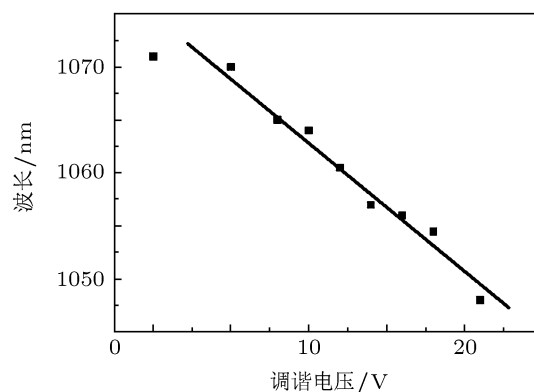


图 7 波长可调谐 RCE-PD 器件调谐稳定性的统计结果

波长可调谐器件不但要求有宽的调谐范围, 还要求器件调谐具有高稳定性, 并且调谐电压与响应波长能精确对准. 为此, 我们对同一调谐电压下器件的响应谱进行多次测试, 并采取反复变换调谐电压的方法测试其稳定性, 图 7 所示的统计结果表明, 该器件的调谐电压与响应峰波长具有稳定、精确的对应关系, 且当调谐电压 V_T 大于 5 V 以后, 调谐电压与响应波长之间呈近似线性关系, 这对器件的应用性是至关重要的.

4 结 论

利用 MBE 外延生长 GaAs 基外延片, 并研制成功 1064 nm 单悬臂波长可调谐共振腔增强型探测器. 器件在不加调谐电压时的响应峰波长位置为 1071 nm, 与设计值相符; 在 21 V 的静电调谐电压范围内, 实现了波长大于 23 nm 的蓝移; 同时, 多次反复测试的统计结果表明, 器件的调谐电压与响应波长之间具有稳定、精确的对应关系, 且近似线性调谐, 这有利于器件的实际应用.

- [1] Selim Ü M, Samuel S 1995 *J. Appl. Phys.* **78** 607
- [2] Saif I M, Ming C W 2003 *Proc. SPIE* **5246** 448
- [3] Kalman R F, Fan J C, Kazovsky L G 1994 *IEEE J. Lightwave Technol.* **12** 1263
- [4] Tulchinsky D A, Boos J B, Park D, Goetz P G, Rabinovich W S, Williams K J 2008 *IEEE J. Lightwave Technol.* **26** 408
- [5] Larson M C 1996 *Ph. D. Dissertation* (Stanford: Stanford University)
- [6] Pezeshki B, Harris J S 1992 *Patent U S* 5 291 502
- [7] Wu M S, Vail E C, Li G S, Yuen W, Chang H C J 1996 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8** 98
- [8] Larson M C, Massengale A R, Harris J S 1996 *Electron. Lett.* **32** 330
- [9] Li M Y, Yuen W, Chang H C J 1997 *Electron. Lett.* **33** 1122
- [10] Vail E C, Li G S, Yuen W, Chang H C J 1997 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **3** 691
- [11] Chang H C J 2000 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **6** 978
- [12] Kang J F, Zheng Q 1984 *Applied Film Optics* (Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers) p94 (in Chinese) [康晋发, 郑权 1984 应用薄膜光学 (上海: 上海科学技术出版社) 第 94 页]

High stability and linear tuning wavelength tunable resonant cavity enhanced photo-detector grown on GaAs*

Wang Jie¹⁾ Han Qin^{1)†} Yang Xiao-Hong¹⁾ Ni Hai-Qiao²⁾
He Ji-Fang²⁾ Wang Xiu-Ping¹⁾

¹⁾ (State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

²⁾ (State Key Laboratory for Superlattices and microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(Received 1 March 2011; revised manuscript received 18 March 2011)

Abstract

A wavelength tunable resonant cavity enhanced photo-detector grown on GaAs is fabricated. The quantum wells of $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ in the active region are grown by molecular beam epitaxy. The peak of the response spectrum at 0 work bias is located at 1071 nm. When the tuning voltage rises from 0 V to 21 V, the peak shows a blue shift of 23 nm, reaching 1048 nm. Statistical results show that there is a stable accurate corresponding relation between the tuning voltage and the response peak. The relation is approximately linear when the tuning voltage is greater than 5 V. Some theoretical analysis is performed on the test results.

Keywords: GaAs, resonant cavity enhanced photo-detector, high stability, linear tuning

PACS: 85. 60. Gz, 85. 60. Bt, 85. 85. +j

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No.2006CB302802), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA03Z421), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60376025, 61176053).

† E-mail: hanqin@red.semi.ac.cn