

硅基法布里-珀罗微腔的红光发射*

但亚平 姚永昭 王 燕 岳瑞峰 刘理天

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘要: 以 PECVD 为制备工艺, $a\text{-SiO}_2 : \text{H}/a\text{-Si} : \text{H}$ 为分布式布拉格反射镜的多层膜, $a\text{-SiC}_x : \text{H}$ 为中间腔体发光材料, 制备出垂直腔面的发光微腔. 根据模拟结果确定了微腔的多层膜层数和排列顺序, 并在 250 C 下制备出了这种微腔. 将微腔样品分别在不同温度下进行退火, 对退火前后的微腔进行了反射谱和光致发光谱研究. 结果表明, 微腔能激励出波长为 743nm, 半高宽为 9nm 的光, 在 350 C 退火后发光性能进一步提高, 而 450 C 退火后, 性能恶化.

关键词: 微腔; 布拉格反射镜; PECVD; 退火

PACC: 7865J; 7855

中图分类号: TN38⁺.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)S0-0060-05

1 引言

自 1990 年 Canham^[1]发现多孔硅的室温发光后, 人们重新对硅基发光器件表现出浓厚的兴趣, 先后在相关领域做了大量的研究工作. 1995 年 Mazzoleni^[2]等人首次采用电化学腐蚀的方法制备出多孔硅的发光微腔, 微腔激励峰的半高宽为 16nm 左右, 品质因子约为 45. 随后人们仔细研究并改善了电化学腐蚀的工艺条件^[3,4], 使微腔的发光特性大幅提高. 由于铟的发光较强而且在光纤通讯中有着重要的应用, 人们又发展了掺铟的多孔硅微腔^[5], 使多孔硅微腔的性能得到进一步提高. 不过, 制备多孔硅需采用电化学腐蚀的方法, 该方法是非标准的 IC 工艺, 稳定性和兼容性比较差. 为了克服这些缺点同时又保持铟发光强的优点, 近年来 Schubert 等人^[6]制备并研究了掺铟的 Si/SiO₂ 微腔, 获得了很大的成功. 但是, 铟发光往往需要有氧的环境且需高温处理来消除注入引起的晶格损伤, 与 IC 工艺完全兼容比较困难, 而且掺铟微腔的激励波长不可调, 一般固定在 1.536 μm 附近, 因此其应用领域受到一定限制. 另外, 利用量子阱或量子点的发光也是人们研究硅基发光微腔的一个热点^[7,8], 但

这种微腔对工艺要求高, 有待进一步发展. 本文提出采用 PECVD 为制备工艺, 以 $a\text{-SiO}_2 : \text{H}/a\text{-Si} : \text{H}$ 为分布式布拉格反射镜(DBR)的多层膜, $a\text{-SiC}_x : \text{H}$ 为中间腔体发光材料, 制备垂直腔面的发光微腔. PECVD 是成熟的标准 IC 工艺, 兼容性与重复性好, 成本低; $a\text{-Si} : \text{H}$ 和 $a\text{-SiO}_2 : \text{H}$ 的折射率差别大, 可以较少的薄膜层数得到较大反射率; 另外, $a\text{-SiC}_x : \text{H}$ 禁带宽度可调范围大, 通过设计微腔参数, 调节 $a\text{-SiC}_x : \text{H}$ 的发光峰位, 有可能获得整个可见光范围内较强的室温发光, 这对于实现彩色平面显示和硅基光电集成有着非常重要的意义. 本文先通过模拟确定了微腔的多层膜层数和排列顺序, 并在实验中制备出了该结构的发光微腔, 最后对其退火前后的性能进行了深入研究.

2 微腔结构设计

阈值增益是光发射器件的重要参数, 它是指发光器件恰好能激励出光时的增益, 其大小表明器件发光的难易程度. 阈值增益越小, 器件发光越易. 通过模拟不同结构器件的阈值增益可以判断该结构器件发光性能的优劣.

图 1 为光在微腔激活区中传输的示意图. 图中

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 60176031)

但亚平 男, 1975 年出生, 硕士研究生, 主要从事硅基微腔器件的研究.

E 为光场强度, r 为 DBR 的反射系数(与波长有关, 是复数), N 为折射率. 光在微腔中形成自持振荡的条件是: 当光波在两个腔面间经过多次反射回到原处时, 光波的振幅至少应等于起始值, 相位增大了 2π 的整数倍. 这个条件可用下式表示:

$$r_1 r_2 \exp\left(\frac{i4\pi N_1 L}{\lambda_0}\right) \exp[(g - \alpha)2L] = 1 \quad (1)$$

其中 L 是微腔激活区长度; λ_0 为自由空间波长; g 为增益系数; α 为内部损耗系数. 内部损耗通常是由自由载流子吸收和光学不均匀散射引起的.

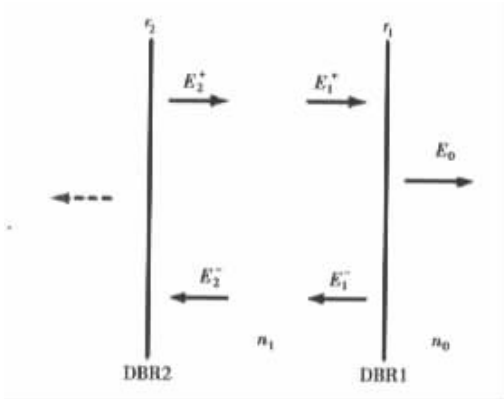


图 1 光在微腔激活区中传输的示意图

Fig. 1 Light propagating in active layer of microcavity

我们将微腔的激光波长设计为 $\lambda=700\text{nm}$, 实验中测量得到 $a\text{-Si:H}$ 、 $a\text{-SiO}_2\text{:H}$ 和 $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 的折射率分别为 3.2、1.591 和 2.518. 在此条件下, 利用公式(1)可以模拟阈值增益随波长的变化关系. 由于影响 α 大小的因素很多, 而且还与具体工艺条件有关, 无法定量, 模拟时我们取 $\alpha=0$, 此时阈值增益的大小只反映微腔结构的优劣. 图 2 比较了不同结构微腔的最小阈值增益.

图 2 中每个坐标点 (x, y) 中的 x 和 y 分别表示顶部和底部 DBR 多层膜的层数. 实线连接的点表示排列顺序为 $a\text{-SiO}_2\text{:H}/a\text{-Si:H}$ (从中间发光区往外看), 虚线连接的点都带下划线, 表示排列顺序相反. 圆圈点表示底部多层膜固定为 7 层, 方块点表示顶部多层膜固定为 6 层.

从图中可以看出, 虚线总体上处于实线的上方, 即它们的最小阈值增益总体上要大一些, 这不利于微腔的发光, 所以这种薄膜排列顺序应当排除. 图中另外两条实线表明, 当顶部和底部 DBR 多层膜分别为 6 层和 7 层时, 微腔的最小阈值增益达到极小, 无论是顶部或底部 DBR 的薄膜层数增加还是减少一

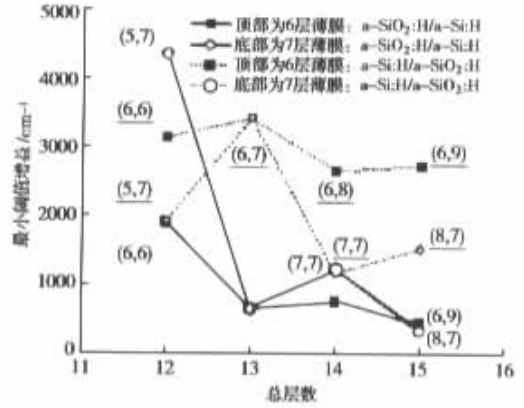


图 2 不同结构微腔的最小阈值增益

Fig. 2 Minimal gain thresholds of microcavities with different structures

层, 最小阈值增益都增大了. 因此, 选择顶部和底部多层膜分别为 6 层和 7 层且排列顺序都是 $a\text{-SiO}_2\text{:H}/a\text{-Si:H}$ (从中间发光区往外看) 比较理想, 如图 3 所示.

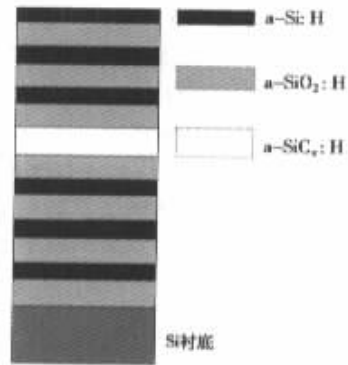


图 3 模拟得到的微腔结构

Fig. 3 Structure of a microcavity obtained by simulations

3 实验

采用中国科学院微电子中心制造的 PECVD-2 型等离子体淀积台, 在电阻率为 $30\sim 50\Omega\cdot\text{cm}$ 的 p 型(100)硅衬底上制备上述结构的微腔. 硅片在放入 PECVD 真空室以前, 先用 40% 的 HF 漂去自然氧化物, 然后用大量的去离子水冲洗. 用氮气吹掉硅片表面的水珠后, 立即将硅片放入 PECVD 真空室内, 开始制备微腔. 淀积时, PECVD 设备下的电极的温度为 250C , 设备射频源频率为 13.56MHz , 输入功

率为 50W. 实验中我们将微腔的激射波长设计在 700nm 处, 由于 DBR 多层膜和微腔发光区的光学厚度分别为 $nd = \lambda/4$ 和 $nd = \lambda/2$ (n 为薄膜的折射率, λ 为微腔的激射波长 700nm), 而折射率采用椭圆仪测量得到, 因此可以计算出各薄膜的设计厚度. a-Si : H、a-SiO₂ : H 和 a-SiC_x : H 各薄膜的反应气流如表 1 所示. 表中同时还列出了各薄膜的折射率和设计厚度.

表 1 各薄膜的反应气流、折射率和设计厚度(其中 SiH₄ 浓度为 10%, Ar 为稀释气体)

Table 1 Refractive indices and expected thicknesses of the films along with their reaction gas flows SiH₄ is diluted to be 10% by Ar.

薄膜	反应气流/sccm	薄膜折射率	薄膜设计厚度/nm
a-Si : H	SiH ₄ =59	3.2	55
a-SiO ₂ : H	SiH ₄ =46, N ₂ O=13	1.591	110
a-SiC _x : H	SiH ₄ =46, CH ₄ =13	2.518	139nm

将微腔样品分为 3 份, 分别记为 a、b、c. a-SiC_x : H 样品分为两份, 分别记为 A 和 B. 样品 b 和 B 在 350℃ 下退火, 样品 c 在 450℃ 下退火. 退火时, 退火炉内通氮气保护, 温度每升高 10℃ 保持 5min, 达到要求的温度后保持 0.5h, 然后自然冷却.

在室温下, 采用日本 Shimadzu 公司制造的 UV-2100S 型紫外-可见光区光谱仪测量反射谱, 用 RENISHAW RM200 型显微共焦拉曼光谱仪测量光致发光光谱, 测量时该仪器的工作条件为: 物镜放大倍数 20 倍, 测量频率 1 次/10s, 功率 0.5mW, 光斑直径 40μm, 激发光波长 514nm.

4 结果与讨论

图 4 是测量得到的微腔的反射谱和光致发光谱以及 a-SiC_x : H 的自发发光谱. 曲线 I 是微腔的反射谱, 它有多反射谷, 分别位于 831、745、662.5、596、545nm. 其中 745nm 处的反射“谷”最深, 是微腔的 F-P 模, 它与设计值 700nm 存在一定的差别. PECVD 工艺不能非常精确地控制薄膜厚度, 实际生长的薄膜厚度与设计值之间可能存在着较大的误差, 因此我们分析实测的 F-P 模与设计值之间的差别主要来自光发射层厚度的误差. 曲线 II 是微腔的光致发光谱. 光致发光谱有 3 个发光峰, 分别位于 825.9、743 和 661.6nm 处, 它们与反射谱中位于 831、745 和 662.5nm 处的反射谷一一对应. 反射谱

中其他几个反射谷, 在微腔的光致发光谱中找不到与之对应的发光峰. 由于在这些波长处, 微腔的增益不足以抵消损耗, 所以光致发光谱中没有观察到相应的发光峰. 曲线 III 是 a-SiC_x : H 的自发发光谱, 它的半高宽很大, 表现出典型的非晶材料的发光特性. 相对于 a-SiC_x : H 的发光强度, 微腔在 743.26nm 处的发光主峰强度增益为 4.9 倍, 考虑到激发光入射到微腔内时已有很大的损耗, 实际的强度增益应该比该值大得多. 另外, 它半高宽为 9nm, 这比许多文献报道的结果要好^[2,9].

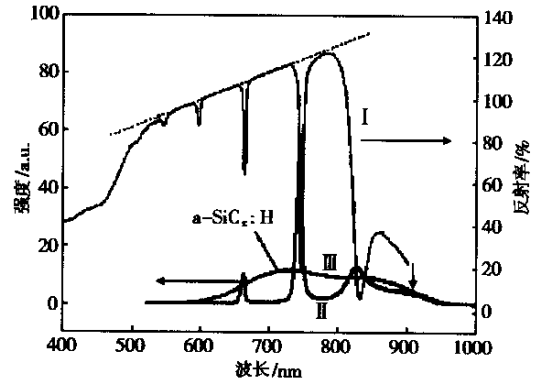


图 4 微腔(样品 a)的反射谱、光致发光谱以及 a-SiC_x : H (样品 A)的自发发光谱

Fig. 4 Reflectivity and PL spectra of microcavity (sample a) along with spontaneous emission of a-SiC_x : H (sample A)

将样品 b 和 B 在 350℃ 下进行了退火处理. 它们的光致发光谱如图 5 所示. 图中还给出了 b 样品的反射谱(曲线 I). 样品 b 的反射谱和 a 的(图 4 中曲线 I)类似, 反射谱有 5 个“谷”, 分别位于 842、756.5、672、604.5、553nm 处, 与样品 a 的反射谱(图 4 中 I 曲线)相比, 这些“谷”都发生了红移. 曲线 III 是 a-SiC_x : H 的光致发光谱, 相对于图 4 中 a-SiC_x : H 的发光, 强度增加了约 1 倍. 曲线 II 是样品 b 的光致发光谱. 与反射谱相对应, 微腔的光致发光谱中有三个明显的峰: 754.48、670.9 和 839.9nm, 相对于退火前, 它们的绝对强度都明显增大, 这主要是由于 a-SiC_x : H 自发发光强度增大了的缘故. 相对于 a-SiC_x : H 自发发光, 754.48nm 处发光主峰的相对强度增益为 5.3 倍, 比退火前要大, 原因可能有两个: (1)退火后薄膜变得更为致密, 多层膜界面平整度更好, 对光的散射减弱了^[3]; (2)多层膜之间存在的应力对光有较大的吸收^[10], 退火之后, 这种应力

得到了释放,微腔的出射光也因此有所增强.另外,754.48nm 处发光主峰的半高宽从退火前的 9nm 变为 7.3nm,这也表明退火提高了微腔的性能.

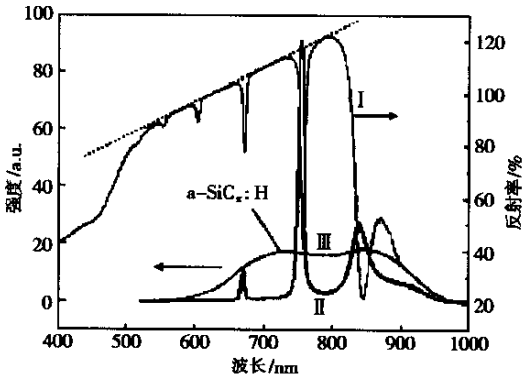


图 5 350℃下退火后微腔(样品b)的反射谱和光致发光光谱以及 a-SiC_x:H(样品B)的自发光光谱

Fig. 5 Reflectivity and PL spectra of microcavity (Sample b) along with spontaneous emission of a-SiC_x:H (Sample B) after annealing at 350℃

为了进一步考察微腔的退火效应,将样品c在450℃下退火,退火后的光致发光光谱如图6所示.图中有3个发光峰,它们的峰位(半高宽)分别为536.24(18)、736.06(29)和833.15(51).相对于图4

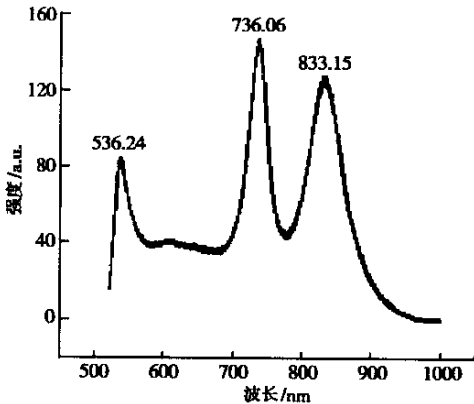


图 6 450℃下退火后微腔的荧光谱

Fig. 6 PL spectrum of the microcavity annealing at 450℃

和图5,这些发光峰呈现一定程度的蓝移,半高宽变大,绝对强度都大幅减小.因此,450℃下退火后,微腔的发光特性严重恶化了,由于在此温度下退火,薄膜中的氢已经大量释放,释放的氢气无法迅速逃逸出微腔,可能会在微腔的内部形成气泡,破坏了微腔

的结构,造成性能恶化.

5 结论

本文提出并制备了一种新型垂直腔面的发光微腔.该微腔以PECVD为制备工艺,a-SiO₂:H/a-Si:H为DBR多层膜,a-SiC_x:H为中间腔体发光材料.在设计波长为700nm的条件下,理想的微腔结构应该选择顶部和底部多层膜分别为6层和7层,且排列顺序都是a-SiO₂:H/a-Si:H(从中间发光区往外看).实验结果表明,微腔的发光特性与设计值基本吻合,它能激射出波长为743nm、半高宽为9nm的发光峰.350℃下退火后,该发光峰红移至754nm,半高宽变为7.3nm;450℃下退火,微腔发光性能恶化,此时微腔结构可能已遭破坏.

参考文献

- [1] Canham L T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers. *Appl Phys Lett*, 1990, 57(10): 1046
- [2] Mazzoleni C, Pavesi L. Application to optical components of dielectric porous silicon multilayers. *Appl Phys Lett*, 1995, 67(20): 2983
- [3] Setzu S, Letant S, Solsona P, et al. Improvement of the Luminescence in p-type as-prepared or dye impregnated porous silicon microcavities. *J Lumin*, 1999; 80(1~4): 129
- [4] Lü Ming, Xu Shaohui, Zhang Songtao, et al. Optical properties of organic microcavity based on porous silicon Bragg reflector. *Acta Phys Sin*, 2000, 49(10): 2083 (in Chinese)[吕明, 徐少辉, 张松涛, 等. 基于多孔硅分布 Bragg 反射镜的有机微腔的光学性质. *物理学报*, 2000, 49(10): 2083]
- [5] Lopez H A, Fauchet P M. Room-temperature electroluminescence from erbium-doped porous silicon. *Appl Phys Lett*, 1999, 75(25): 3989
- [6] Schubert E F, Vredenberg A M, Hunt N E J, et al. Giant enhancement of luminescence intensity in Er-doped Si/SiO₂ resonant cavities. *Appl Phys Lett*, 1992, 61(12): 1381
- [7] Iacona F, Franzo G, Moreira E C, et al. Silicon nanocrystals and Er³⁺ ions in an optical microcavity. *J Appl Phys*, 2001, 89(12): 8354
- [8] Lu Z H, Lockwood D J, Baribeau J M. Quantum confinement and light-emission in SiO₂/Si superlattices. *Nature*, 1995, 378(6554): 258
- [9] Mulloni V, Pavesi L. Electrochemically oxidised porous silicon microcavities. *Mater Sci Eng*, 2000, B69-70: 59
- [10] Pucker G, Bellutti P, Pavesi L. Photoluminescence from (Si/SiO₂)_n superlattices and their use as emitters in [SiO₂/Si]

Red Light Emission from Si-Based Fabry-Perot Microcavities^{*}

Dan Yaping, Yao Yongzhao, Wang Yan, Yue Ruifeng and Liu Litian

(*Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: A microcavity prepared by PECVD is proposed. Its distributed Bragg reflectors are composed of periodically stacked a-SiO₂ : H/a-Si : H layers and the active layer is filled with a-SiC_x : H. The structure of a microcavity is determined through simulating. In experiment, a microcavity is prepared at 250 C and annealed at different temperatures. Reflectance and PL spectra are recorded on as-deposited and annealed samples. It is indicated that the as-deposited sample performs well and even better after annealed at 350 C, however worse after annealed at 450 C.

Key words: microcavity; Bragg reflector; PECVD; annealing

PACC: 7865J; 7855

Article ID: 0253-4177(2003)S0-0060-05

^{*} Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60176031)

Dan Yaping male, was born in 1975, postgraduate for MSc. He is engaged in the research on silicon-based microcavity devices.

Received 16 September 2002, revised manuscript received 22 October 2002

©2003 The Chinese Institute of Electronics