

两种材料除折射率因素外,还考虑到了以下两个因素:(1) PECVD 方法制备的 $a\text{-SiO}_2\text{:H}$ 是一种 IC 常规工艺,在薄膜质量和厚度方面都非常容易控制;(2) PECVD 方法为低温工艺,与常规硅工艺兼容性好.如果 PECVD 工艺上能做到薄膜缺陷态密度低,膜厚精确控制、重复性好,与 MBE 和 MOCVD 等方法相比无疑具有优越的性能价格比.

我们提出的结构中另一个核心部分是采用 PECVD 方法制备的 $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 中间光发射层.如果该发光层具有较强的荧光发射,适当地选择其厚度和折射率,通过 DBR 在一维方向对光子的限制,荧光强度将会大大增强,同时谱线的半高宽也将大大减小.因为 $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 是一种在光电子领域中前景非常广阔的半导体材料,我们可以通过改变化学组分 x 来改变其光学带隙,从而使 $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 薄膜在整个可见光范围内实现室温发光.从原理上讲,通过设计微腔参数、调节光发射层和 DBR 的薄膜厚度和折射率,理论上可获得整个可见光范围内强的、高单色性的、荧光峰位可精确控制的室温发光,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.

3 模拟

理论表明,组成布拉格反射腔多层膜的折射率差别越大,获得相同的反射率所需的膜层数越少.薄膜层数过多一方面在工艺上成本高,另一方面由于残余应力多层膜也容易破裂,因此我们选取折射率差别很大的 $a\text{-Si:H}$ 与 $a\text{-SiO}_2\text{:H}$ 作为布拉格反射腔多层膜. F-P 腔内是荧光特性很好的 $a\text{-SiC}_x\text{:H}$, 起发光和选波的作用.如果选择中心发射波长为 λ , 理论表明,反射器各层的厚度应该为: $d_i = \lambda / (4n_i)$ (i 为 $a\text{-Si:H}$ 或者 $a\text{-SiO}_2\text{:H}$); 而 $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 的厚度应该为:

$$d_{\text{SiC}} = \lambda / (2n_{\text{SiC}}) \quad (1)$$

利用介质薄膜特征矩阵^[5]可以很容易地求得一个多层膜的反射率.用 Matlab 为编程工具,中心波长设为 700nm,模拟结果表明,顶部反射镜面为 6 层薄膜,底层为 7 层,且按图 1 的顺序排列是最佳结果,我们可以用尽可能少的薄膜层数得到尽可能大的反射率(98%).

从图 1 中可以看出,当

$$600\text{nm} < \lambda < 850\text{nm} \quad (2)$$

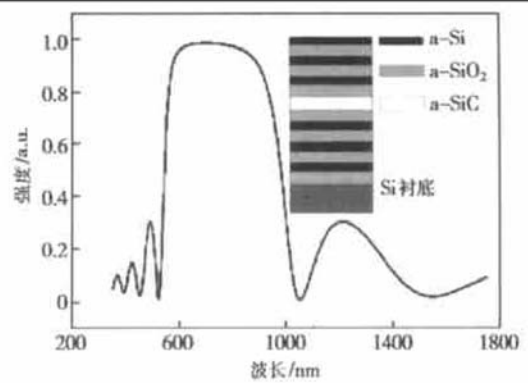


图 1 器件结构和底层布拉格反射器的反射谱

Fig. 1 F-P microcavity structure and reflectance of $a\text{-Si}/a\text{-SiO}_2$ distributed Bragg reflector

薄膜的反射率总是大于 0.9. 由(1)、(2)两式可得出,为了保证器件能正常工作, F-P 腔内 $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 的厚度应该满足: $120\text{nm} < d_{\text{SiC}} < 170\text{nm}$, 也就是说,只要 $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 的厚度在上述范围内,器件应该有相应波长的光射出.分子束外延可以精确控制薄膜的厚度,PECVD 的弱点在于生长速度过快,难以精确控制薄膜的厚度.我们模拟了 SiO_2 薄膜厚度的误差对布拉格腔反射率的影响,如图 2 所示.从图 2 中可以看出,如果某一层 SiO_2 薄膜有 10% 的误差,中心波长大约有 10nm 的偏移;如果每一层 SiO_2 薄膜

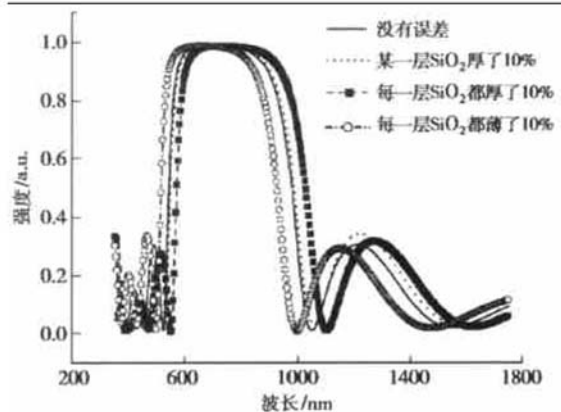


图 2 SiO_2 薄膜厚度误差对布拉格镜反射率的影响

Fig. 2 Influence of SiO_2 thickness on reflectance of distributed Bragg reflector

都有 10% 的误差,中心波长大约偏移 50nm. 由于中心波长附近 $\pm 100\text{nm}$ 的区域内光波的反射率变化都很小,因此基本不会影响器件的正常工作.就我们现有的实验设备而言,片内薄膜厚度均匀性 $< 5\%$,不同批次的样品厚度起伏 $< 7\%$,因此 PECVD 工艺

制备该器件是可行的. 由于光是在 F-P 腔中谐振增益后发射出来的, $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 的厚度决定了出射光的波长, 因此工艺上如何精确控制 $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 的厚度, 得到人们所需要的特定波长的光, 是一个很重要的问题. 实验中我们采取低功率、高温、低气压等条件将 $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 的生长速度降低到了 5nm/min .

4 实验验证

根据上述模拟结果, 我们利用 PECVD 设备制备了硅基法布里-珀罗微腔器件, 用 RENISHAW RM 200 型显微共焦喇曼光谱仪测量器件的发光特性, 测量的光致发光谱如图 3. 从图中可以看出, $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 光致发光谱的强度相对很小而半高宽很宽. 发光器件的谱线是由一个很尖的主峰和一个小

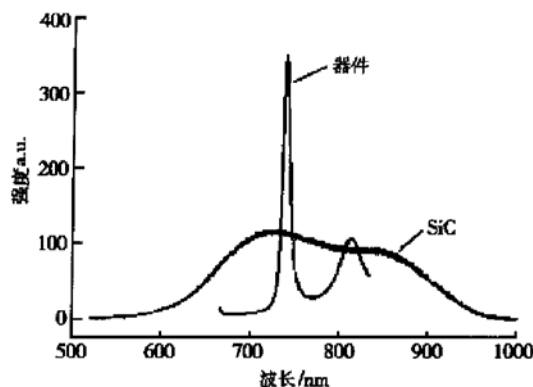


图 3 器件和 $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 的光致发光谱

Fig. 3 Photoluminescence of $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ and F-P microcavity

的侧峰构成. 主峰位于 742nm 附近, 半高宽为 9.33nm , 强度比 $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 明显增加, 这说明 F-P 腔起到了增益和限制的作用. 主峰的测量值与设计值之间的差距有以下几个原因, 首先是各层膜的界面问题, 在 PECVD 生长时气体之间的切换控制不好会使各层膜的界面不够陡峭; 其次在设计各层厚度时没有考虑折射率的色散关系, 这个问题在设计

短波长发光器件时会更为严重. 第三, 我们的样品是在 50mm 硅片上制备的, 测量前未对样品进行切割封装, 因此生长过程中膜厚有一定的不均匀性, 另外, 由于 PECVD 室的背景真空不够高, 局部的缺陷等都会造成漏光现象, 出现了右侧的小发光峰.

5 结论

本文提出的微腔结构设计灵活性高、易于制作、成本低, 如采用计算机控制薄膜生长, 解决工艺可控性和重复性问题, 器件的光学特性将能很好地控制并重复. 模拟和实验的结果表明, 反射器薄膜的厚度误差对器件的性能影响很小, $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 层的厚度最终决定了出射光的波长; 采用 PECVD 法能够制备出性能良好的红光发光器件.

参考文献

- [1] Murtaza S S, Nie H, Campbell J C, et al. Short-wavelength, high-speed, Si-based resonant-cavity photodetector. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1996, 8(7): 927
- [2] Pavesi L, Mazzoleni C, Tredicucci A, et al. Controlled photon emission in porous silicon microcavities. *Appl Phys Lett*, 1995, 67(23): 3280
- [3] Li Cheng, Yang Qingqing, Zhu Jialian, et al. Silicon-based Bragg reflector for resonant cavity photodetector. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2000, 21(5): 483 (in Chinese) [李成, 杨沁清, 朱家廉, 等. 用于共振腔光电探测器的 Si 基 Bragg 反射器. *半导体学报*, 2000, 21(5): 483]
- [4] Wang Yan, Yue Ruifeng. Raman and photoluminescence properties of hydrogenated amorphous silicon carbide alloys with low carbide concentration. *Vacuum Science and Technology*, 2001, 21(1): 38 (in Chinese) [王燕, 岳瑞峰. 高温退火前后低碳含量 $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 薄膜结构和荧光特性的研究. *真空科学与技术学报*, 2001, 21(1): 38]
- [5] Tang Jinfa, Zheng Quan. *Applied film optics*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1984 (in Chinese) [唐晋发, 郑权. *应用薄膜光学*. 上海: 上海科学技术出版社, 1984]

Room Temperature Luminescent Properties of Si-Based Fabry-Perot Microcavity^{*}

Wang Yan, Dan Yaping, Yue Ruifeng and Liu Litian

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

Abstract: A new kind of Fabry-Perot microcavity structure is presented in which the Si/SiO_xN_y distributed Bragg reflectors (DBR) with a-Si_{1-x}C_x acting as spontaneous emission layer are fabricated by plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD). The modified photon density of state of Fabry-Perot microcavity in one dimension will result in the enhancement of the spontaneous emission at the photon energies corresponding to the microcavity resonance. Besides, the linewidth of the spontaneous emission will be reduced greatly at the microcavity resonance. By adjusting the thickness and refractive index of the spontaneous emission layer and the DBR sublayer, the luminescence peak position can be controlled precisely. By means of simulation and experiment, this device makes silicon-based materials possible candidate for the room temperature visible light emission media.

Key words: Fabry-Perot microcavity; silicon carbide; photoluminescence

PACC: 7855; 4260D

Article ID: 0253-4177(2003)01-0068-04

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

Wang Yan female, was born in 1967, associate professor. She is devoted to the research on nanoelectronic devices, deep submicron devices, and microstructure as well as electrical and optical properties of silicon-based materials.

Received 26 March 2002, revised manuscript received 3 July 2002

© 2003 The Chinese Institute of Electronics