

用光电流谱研究多孔硅微腔的光电特性*

熊卫华 熊祖洪 陆 舒

(复旦大学应用表面物理国家重点实验室, 上海 200433)

摘要: 利用光电流谱对全硅基多孔硅微腔的吸收特性进行了研究, 在光电流谱中观察到 $\lambda_1 = 742\text{nm}$ 主峰。同时也对多孔硅微腔的 PL 谱和单层多孔硅的光电流谱进行了测量, 结合有效折射率方法和菲涅耳公式, 对照 PL 谱和单层多孔硅的光电流谱, 对常温下多孔硅微腔的光电流谱进行解释。

关键词: 光电流; 多孔硅微腔; PL 谱

PACC: 7240; 7865; 7855

中图分类号: TN 304. 1⁺ 2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)09-1127-04

1 引言

自多孔硅产生以来, 日益受到科学界的重视, 其主要原因是它不同于单晶硅的光学特性, 即在被光或者电激励时, 多孔硅能在室温下发射强的可见光^[1]。利用光致发光谱, 人们对多孔硅的发光特性进行了广泛的研究^[2-4], 同时对多孔硅进行钝化等多种方式的后处理^[3, 4], 已经可以得到发光强度和稳定性都比较好的多孔硅材料, 为高性能的光电材料开辟了新的方向。

1995 年, Pavesi 等人^[5]用光学微腔的方法实现了多孔硅的宽发射峰的窄化, 也就是把发光层夹在两个 Bragg 反射镜之间, 利用光在反射镜之间的来回干涉达到选模的目的, 而且通过改变微腔各层的光学厚度可以使窄峰的峰位在一定范围内可调。目前, 人们把两个 Bragg 反射镜用周期排列的高、低折射率的多孔硅层代替, 从而实现了全多孔硅基微腔^[6-8]。随着对多孔硅的发光特性的深入研究, 人们对多孔硅的光吸收特性也进行了广泛的研究^[9-11]。但是, 对全硅基多孔硅微腔结构的吸收特性的研究很少有报道。本文就是利用光电流谱技术对多孔硅微腔的光电特性进行研究。

2 原理

当一束光入射到多层膜上, 若忽略光的吸收和散射, 则光会在多层膜的各个界面上反射、透射和再入射。研究入射光在第一个界面上的总体反射和最后一个界面的总体透射的典型方法有两种: 即有效折射率(鲁阿德方法)^[12]和传输矩阵法。对于图 1 的

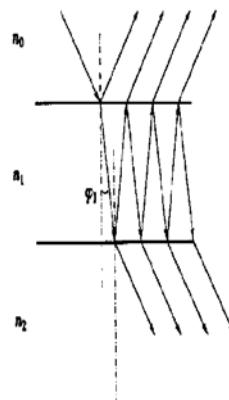


图 1 光路示意图

FIG. 1 Diagram of Light Path

模型, 由菲涅耳公式, 可以得到上表面的反射率:

$$R = \frac{(n_0 - n_2)^2 \cos^2(\delta/2) + (n_0 n_2 / n_1 - n_1)^2 \sin^2(\delta/2)}{(n_0 + n_2)^2 \cos^2(\delta/2) + (n_0 n_2 / n_1 + n_1)^2 \sin^2(\delta/2)} \quad (1)$$

* 上海市科委资助项目。

其中 $\delta = 4\pi n_1 d \cos \varphi / \lambda$; n_0, n_1, n_2 为上、中、下三层的折射率; d 为中间介质层的厚度; φ 为光在中间层的折射角; λ 为入射的波长。但由于光在多孔硅微腔中的传输涉及到多次反射、折射和再入射, 因此, 不能采用像一束光入射到多层膜的模型来计算反射谱。本文中采用如图 2 中的简化方法来计算光从上表面入射经两个 Bragg 反射镜作用后的反射谱, 即先用有效折射率方法得到中心层两边的等效折射率, 这样就把微腔多层膜简化为单层膜结构, 只是该单层膜的两边介质为等效介质 N_1 和 N_2 , 再根据菲

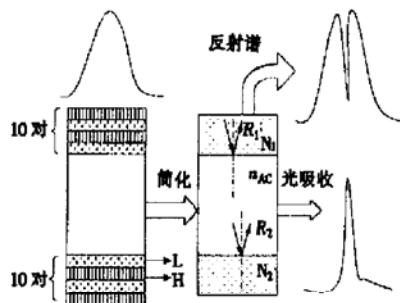


图 2 理论计算模型

FIG. 2 Theoretical Model of Porous Silicon Microcavities

涅耳公式计算微腔表面的反射谱。若 n_H, n_L, n_{AC} 分别为两个分布对称的 Bragg 反射镜的高、低折射率层和中心层的折射率; d_H, d_L, d_{AC} 分别为它们的厚度, 则中心波长 λ 应满足下述二个关系式:

$$\begin{cases} n_H d_H = n_L d_L = \lambda/4 \\ n_{AC} d_{AC} = m\lambda/2 \end{cases} \quad (2)$$

在采用正入射的情况下, 上下的高低折射率层将构成 $\lambda/4$ 层, 而中心层构成 $\lambda/2$ 层, 根据菲涅耳公式和鲁阿德方法^[9]可以得到中心层上下的等效介质 N_1 和 N_2 的等效折射率:

$$Y_1 = Y_2 = (n_H/n_L)^2 n_H$$

由于中心层为 $\lambda/2$ 层, 所以 $\delta = 2\pi$, 由公式(1)可以计算出在截面 1 上的反射率 $R_1 = (\frac{Y_1 - Y_2}{Y_1 + Y_2})^2 = 0$, 即中心波长可以完全进入到中心层。而高低折射率层皆为 $\lambda/4$, 所以 $\delta = \pi$, 由公式(1)也可以得到 $R_2 = (\frac{1 - Y}{1 + Y})^2$, 其中 $Y = Y_1^2/n_{AC}$, 当 $Y \gg 1$ 时, $R_2 \approx 1 - \frac{4}{Y}$, 把 Y 代入可得到 $R_2 = 95.2\%$ 。因此, 由我们结构决定的中心波长可以在微腔内多次被反射, 并多次被吸收, 而其它波长的光很少能进入到中心层, 因而在中心波长处应该表现为吸收极大化。通过改变 n_{AC} ,

d_{AC} 就可以改变中心波长而达到选模的目的。

3 实验

采用脉冲电化学方法^[1, 11]制备多孔硅微腔样品, 用 P-Si 衬底, 晶面是 (100), 电阻率约为 $0.008\text{--}0.02\Omega \cdot \text{cm}$, 多孔硅的腐蚀溶液配比为 $\text{HF} : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1 : 2$ 。样品制备时设计的结构参数为: 高、低折射率层和中心层的折射率 n_H, n_L 和 n_{AC} 分别为 $2.18, 1.42$ 和 1.23 , 各层的厚度 d_H, d_L 和 d_{AC} 分别为 $87.9, 134.9$ 和 622.7nm 。根据这些参数选择了以下的实验条件: 高折射率层的腐蚀电流密度为 $j_H = 6.71\text{mA/cm}^2$, 腐蚀时间为 $t_H = 9.32\text{s}$; 低折射率层的腐蚀电流密度为 $j_L = 50\text{mA/cm}^2$, 腐蚀时间为 $t_L = 2.06\text{s}$; 中心层的腐蚀电流密度为 $j_{AC} = 82.79\text{mA/cm}^2$, 腐蚀时间为 $t_{AC} = 7.36\text{s}$ 。为了得到更加平整的多孔硅膜层和更加均匀的界面, 腐蚀电流用脉冲电流方式^[8], 其占空比(一个脉冲周期中参与腐蚀和不参与腐蚀的时间比)为 $9\text{ms}/10\text{ms}$ 。在腐蚀过程中, 通过计算机控制交替改变电流密度就可以得到折射率高、低交替变换的多层多孔硅。电化学腐蚀过程在无光和室温条件下进行。在样品的上表面蒸上点状的 Al 电极, 背面全部蒸上 Al 电极。样品结构如图 3 所示。

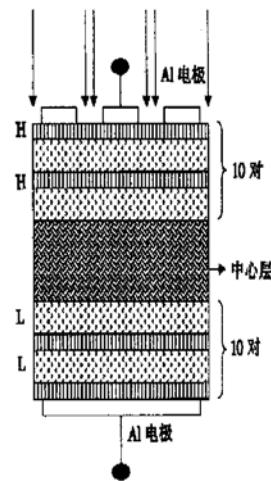


图 3 多孔硅微腔结构示意图

FIG. 3 Diagram of Porous Silicon Microcavities Structure

光电流测试过程中, 光源采用 300W 的碘钨灯, 通过单色仪分光, 然后通过透镜聚焦正入射到样品上, 用斩波器对光进行调制, 调制频率为 247Hz , 样

品的光电流信号通过锁相放大器进行测量, 并用计算机进行实时控制和数据收集。同时用 441.6nm 的激光作为激发光, 以大于 30°的斜入射方式照射到样品上, 对多孔硅微腔进行 PL 谱的测量。

4 结果和讨论

图 4 是样品在不同偏压下的光电流谱。可以看到在短波方向有四个峰, 分别为 $\lambda_1 = 742\text{ nm}$, $\lambda_2 = 708\text{ nm}$, $\lambda_3 = 666\text{ nm}$ 和 $\lambda_4 = 629\text{ nm}$ 。如果对多孔硅进行侧面光照射, 也就是让光不经过 Bragg 反射层从侧面直接入射到样品的中心层, 其它的实验条件都

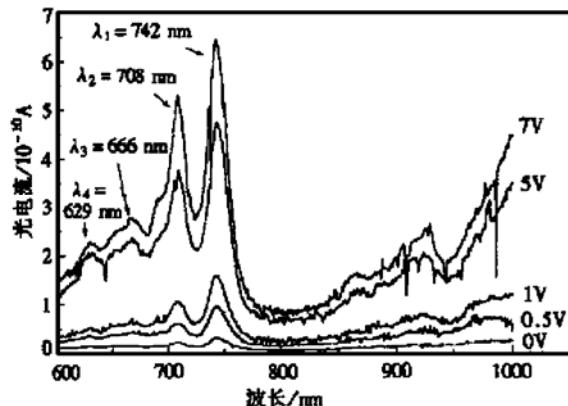


图 4 不同偏压下的多孔硅微腔的光电流谱

FIG. 4 Normal-Incidence Photocurrent Spectra of Porous Silicon Microcavities Under Different Bias Voltages

不改变, 进行光电流测量, 其结果如图 5 所示。从图中可以看到一个很宽的大峰, 和图 4 有很大的差异, 表明中心单层多孔硅对 600—800nm 的光都有吸收, 而光从正面入射时, 微腔结构仅对满足公式(2)的光才产生强吸收, 从而在谱图上表现出相应波长出现光电流峰, 利用公式(2)理论计算得到设计的中心波长 $\lambda = 766\text{ nm}$, 这与光电流谱中的 $\lambda_1 = 742\text{ nm}$ 比较吻合, 二者之间的差异 $\Delta\lambda = 24\text{ nm}$ 。由于腐蚀生长条件的微小差异, 实际样品中的 n_H 、 n_L 和 n_{AC} 与设计的 n_H 、 n_L 和 n_{AC} 的数值可能有微小的差异, 这个差异对 $\Delta\lambda$ 有一定的影响。而其他的三个峰也可能由样品的不均匀性和高低折射率层的吸收引起。随着偏压的增大, 光电流信号也随之增大, 但是峰位并没有移动, 这是因为偏压增大, 多孔硅中由于光子激发的自由载流子在电场的作用下运动加快, 从而光电流增强。在长波方向光电流也在逐渐增大, 这与硅的本

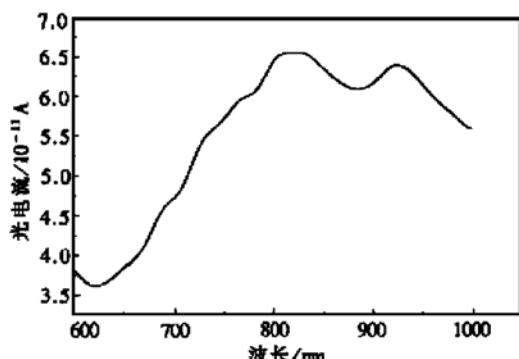


图 5 多孔硅微腔的侧向光电流谱

FIG. 5 Lateral-Incidence Photocurrent Spectrum of Porous Silicon Microcavities

征吸收有关, 因为这里已经接近硅的带边了。最后又对样品进行了 PL 谱的测量, 结果如图 6 所示。和图 4 对比可以发现 PL 谱和光电流谱的波峰对应得非常好, λ_1 是发光主峰, 而 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 是来自于样品的不均匀性和中心层外的两个 Bragg 反射镜的微弱发光^[12]。既然 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 的光可以从微腔上表面透出, 根据光路可逆原理, λ_2 、 λ_3 和 λ_4 就应该也可以从上表面进入微腔, 并经过多次的反射、折射再反射, 而在光电流谱上也就反映为 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 的波长处出现三个次峰。

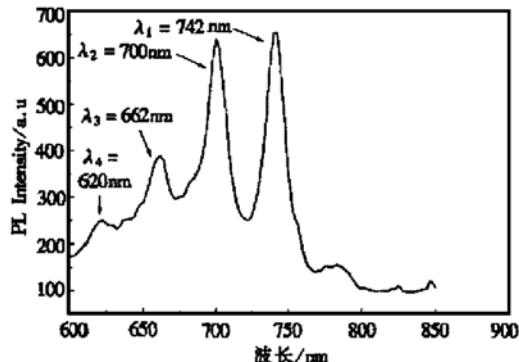


图 6 多孔硅微腔的 PL 谱

FIG. 6 PL Spectrum of Porous Silicon Microcavity

5 结论

用光电流谱的方法对多孔硅微腔结构的光吸收特性进行了研究, 发现多孔硅微腔和单层多孔硅的光吸收特性的差异, 后者的吸收峰是一个很宽的大峰(半高宽约 300nm), 而前者可以在 600—800nm 的范围内实现单波长的吸收(其吸收峰的半高宽为

16nm), 为实现单波长的光吸收器件提供了一种新的途径.

参考文献

- [1] L. Teanham, Silicon Quantum Sire Array Fabrication by Electrochemical and Chemical Dissolution of Wafers, *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**(10) : 1046—1048.
- [2] XUE Fangshi, Investigation on Excited States for Electrons in Porous and Their Spectra, *Chinese Journal of Semiconductors*, 1997, **18**: 161—168[薛舫时, 多孔硅中的电子激发态及其光谱研究, *半导体学报*, 1997, **18**: 161—168].
- [3] LIU Xiaobing, XIONG Zuhong, SHI Xianghua *et al.*, Surface Passivation of Porous Silicon by SiO_x and Al₂O₃ films, *Chinese Journal of Semiconductors*, 2000, **21**: 38—43[刘小兵, 熊祖洪, 史向华, 等, 经SiO_x和Al₂O₃钝化的多孔硅及其光致发光特性, *半导体学报*, 2000, **21**: 38—43].
- [4] GU Yi, WU Xinglong, TANG Ning *et al.*, Origin of Enhanced Photoluminescence in Si-Covered POPS, *Chinese Journal of Semiconductors*, 2000, **21**: 132—136[顾沂, 吴兴龙, 唐宁, 等, 有Si覆盖的部分氧化多孔硅的光致发光研究, *半导体学报*, 2000, **21**: 132—136].
- [5] L. Pavesi and C. Mazzoleni, Controlled Photon Emission in Porous Silicon Microcavities, *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(22): 3280—3282.
- [6] L. Pavesi and P. Dubos, Random Porous Silicon Multilayers: Application to Distributed Bragg Reflectors and Interferential Fabry-Perot Filters, *Semicon. Sci. Technol.*, 1997, **12**: 570—575.
- [7] M. Araki, H. Koyama and N. Koshida, Controlled Electroluminescence Spectra of Porous Silicon Diodes with a Vertical Cavity, *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(20) : 2956—2958.
- [8] M. ARAKI, H. KOYAMA and N. KOSHIDA, Optical Cavity Based on Porous Silicon Superlattice Technology, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, **35**: 1041—1044.
- [9] Hongtao Shi, Youdou Zheng, Yongbin Wang and Renkuan Yuan, Electrically Induced Light Emission and Novel Photocurrent Response of a Porous Silicon Device, *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(6) : 770—772.
- [10] G. Lerondel, F. Madeore, R. Romestain and F. Muller, Direct Determination of the Absorption of Porous Silicon by Photocurrent Measurement at Low Temperature, Thin Solid Film, 2000, **316**: 216—224.
- [11] X. Y. Hou, H. L. Fan, F. L. Zhang, M. Q. Li, M. R. Yu and X. Wang, Pulsed Anodic Etching: Aneffective Method of Preparing Light-Emitting Porous Silicon, *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(17) : 2323—2325.
- [12] ZHANG Zhiming, SHEN Yuanhua and CHEN Huifen, Optics, Beijing: High Education Publishing Company[章志鸣, 沈元华, 陈惠芬, 光学, 北京: 高等教育出版社].

Absorption of Porous Silicon Microcavities via Photocurrent Measurement*

XIONG Wei-hua, XIONG Zu-hong and LU Fang

(National Key Laboratory of Surface Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The absorption properties of porous silicon microcavities are studied via photocurrent measurement. In the photocurrent spectra, the main peak ($\lambda_1 = 742\text{nm}$) are observed. For comparison, the photoluminescence spectrum of porous silicon microcavities and the photocurrent spectrum of single layer porous silicon are also studied. Combining the effective refractive index model and Fresnel formula, and contrasting with PL spectrum and the photocurrent spectrum of single layer porous silicon, the explanation of the photocurrent spectra is given.

Key words: photocurrent; porous silicon microcavities; PL spectrum

PACC: 7240; 7865; 7855

Article ID: 0253-4177(2001)09-1127-04

* Project Supported by Science and Technology Committee of Shanghai.

Received 3 October 2000, revised manuscript received 1 January 2001

© 2001 The Chinese Institute of Electronics