

# 微晶硅薄膜带隙态及微结构的研究\*

彭文博<sup>1)</sup> 刘石勇<sup>1)</sup> 肖海波<sup>1)</sup> 张长沙<sup>1)</sup> 石明吉<sup>1)</sup> 曾湘波<sup>1)†</sup> 徐艳月<sup>2)‡</sup> 孔光临<sup>1)</sup> 俞育德<sup>1)</sup>

1) 中国科学院半导体研究所材料科学重点实验室, 北京 100083)

2) 中国农业大学应用物理系, 北京 100083)

(2008 年 12 月 18 日收到, 2009 年 1 月 16 日收到修改稿)

研究了氢化微晶硅薄膜费米能级以上的带隙态密度分布与薄膜微结构关系. 采用拉曼谱和红外谱表征不同 H 稀释比制备的微晶硅薄膜的微结构. 薄膜带隙态密度分布由调制光电流的相移分析技术测得. 采用三相模型(非晶相、晶相和界面相)分析了薄膜带隙态密度与薄膜微结构的关系. 结果表明, 材料的带隙态密度随着界面相的增加而增加, 当界面体积分数达到最大时, 薄膜的带隙态密度也最大, 即材料的带隙态密度与界面体积分数正相关.

关键词: 带隙态, 界面相, 微晶硅, 调制光电流

PACC: 7320A, 7830G, 7280N

## 1. 引 言

非晶硅薄膜适合做光伏电池的最大特点是光吸收率高, 具有较高的光敏性; 同时, 其吸收峰与太阳光谱峰相近, 有利于太阳光利用, 是极富吸引力的光伏材料<sup>[1]</sup>, 但非晶硅薄膜的光致衰退一直是制约其发展的一个障碍<sup>[2]</sup>. 与非晶硅薄膜相比, 氢化微晶硅薄膜具有稳定的光电特性和更好的长波响应, 成为目前光伏领域关注的热点之一<sup>[3-5]</sup>. 微晶硅薄膜实质上是微小晶粒镶嵌于非晶基质中的复相材料, 晶粒、界面和非晶相等复杂微结构都与带隙态紧密相关, 这些是影响材料光电性能和稳定性的最主要因素, 也是目前微晶硅薄膜研究和应用的难点之一.

带隙态密度测试常用的方法有电子自旋共振法 (ESR)<sup>[4,6]</sup>和恒定光电导法 (CPM)<sup>[7,8]</sup>, 但是 ESR 难以得到带隙态的分布, 而 CPM 则局限于探测费米能级以下的带隙态. Oheda<sup>[9]</sup>提出用调制光电流相移分析技术来探测非晶半导体费米能级以上的带隙态密度分布, 目前这种方法已经开始被应用于微晶硅带隙态分布的探测<sup>[8,10]</sup>. 在微结构研究方面, 国内外多个研究组做了大量工作<sup>[10-19]</sup>. 薄膜的晶化率、晶粒尺寸、氢含量和致密程度等一直是微结构研究中关注的焦点. 近年来, 界面相逐渐得到了广泛的重视,

岳国珍曾使用拉曼谱和光致发光谱表征界面<sup>[15]</sup>, Smets 等<sup>[16]</sup>使用红外吸收谱对界面性质进行了定性表征. Das 等<sup>[17]</sup>提出可把界面相作为微晶硅薄膜中的第三相. 然而对界面相的认识和表征还有待进一步深入, 尤其是界面相与薄膜带隙态密度的量化方面, 尚未见报道.

本文采用调制光电流相移分析技术测量了氢稀释系列微晶硅样品的带隙态分布, 对其微结构由拉曼散射谱和红外吸收谱进行表征, 重点研究微晶硅材料带隙态密度与薄膜界面相之间的关系. 实验结果表明, 薄膜带隙态密度与界面相体积分数正相关, 由此我们认为界面相的性质是影响薄膜带隙态密度的重要因素.

## 2. 实 验

本文使用甚高频等离子体增强化学气相沉积 (60 MHz) 系统沉积氢化微晶硅薄膜, 衬底选用的是单面抛光熔融石英片和单面抛光高阻硅片, 薄膜沉积在两种衬底的非抛光面上. 氢稀释比  $R_H$  ( $R_H$  定义为  $H_2$  含量与  $SiH_4$  含量之比) 分别为 11.67, 13.33, 15, 16.67; 沉积温度为 170 °C; 腔室压力为 130 Pa; 功率密度为 0.7 W/cm<sup>2</sup>. 薄膜厚度均保持在

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB202604) 和国家自然科学基金 (批准号: 60576036) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: xbzeng@semi.ac.cn

‡ 通讯联系人. E-mail: yyxu@semi.ac.cn

1  $\mu\text{m}$ 左右. 石英衬底样品表面蒸共面铝电极, 缝宽为 0.4 mm, 用于调制光电流相移测试.

盛殊然等<sup>[20]</sup>曾对调制光电流相移分析技术的原理进行了详细介绍: 由于带隙态能级对导带中输运电子的陷阱作用, 调制光信号与从样品测得的调制光电流信号间会存在相移, 通过分析这一相移对调制频率的依赖关系可以确定费米能级以上带隙态的能量分布.

图 1 是我们使用的调制光电流相移的测试系统框图. 实验中使用 670 nm 的激光器作为调制光源, 调制频率从  $10^0$  到  $10^5$  Hz 变化. 调制光电流相移信号通过 NF5640 锁相放大器获得.

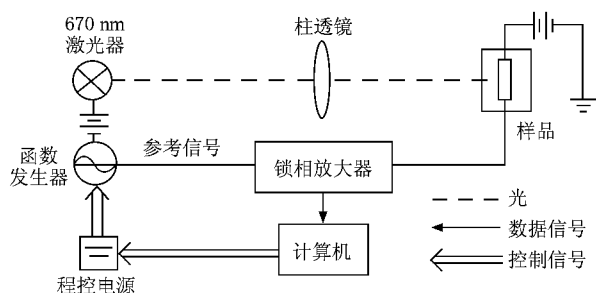


图 1 调制光电流相移测试框图

此外, 通过拉曼散射谱和红外吸收谱我们对薄膜的微结构进行了表征. 拉曼测试使用的是 Renishaw 公司的 RM2000 型显微共焦拉曼光谱仪, 激发光波长为 514 nm, 功率密度为  $0.37 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$ . 红外吸收测试使用 Niconet 6700 型傅里叶变换红外光谱仪, 在透射模式下进行, 分辨率为  $4 \text{ cm}^{-1}$ . 所有测试均在室温下进行.

### 3. 结果与讨论

通过调制光电流相移分析技术我们得到了微晶硅薄膜的带隙态密度分布, 这些带隙态能级位于费米能级以上距导带底  $0.42\text{--}0.55 \text{ eV}$  的范围内. 如图 2 所示, 样品带隙态密度并不随着 H 稀释比的变化而单调变化: 随 H 稀释比的增加, 薄膜带隙态密度先增大后减小. 在我们所考查的范围内,  $R_{\text{H}} = 11.67$  的薄膜带隙态密度最小, 而  $R_{\text{H}} = 15$  的薄膜带隙态密度达到最大. 考虑到这一复杂变化过程可能与不同 H 稀释比下制备的样品微结构的变化有关, 为此我们对薄膜样品进行了拉曼测试.

样品的拉曼测试结果如图 3(a)所示, 自下而上

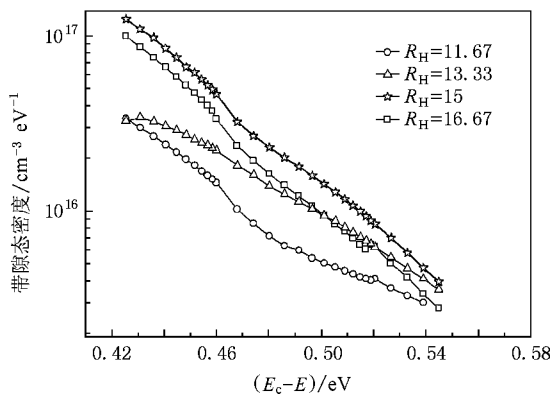


图 2 调制光电流相移分析得到的不同 H 稀释比  $R_{\text{H}}$  下制备的微晶硅薄膜带隙态密度分布

分别对应氢稀释比  $R_{\text{H}}$  依次增加所制备薄膜的拉曼谱. 随着  $R_{\text{H}}$  的增加, 样品的拉曼谱在  $517 \text{ cm}^{-1}$  附近出现尖峰, 表明样品的晶化程度逐渐增强. 图 3(b) 显示的是对一个已微晶化样品的拉曼谱类 TO 模进行高斯拟合的结果, 从图中可看到三个特征峰:  $480 \text{ cm}^{-1}$  是非晶相的特征峰位,  $520 \text{ cm}^{-1}$  附近的拉曼峰与薄膜中出现的晶态成分有关<sup>[21]</sup>. 对于晶体硅而言, 其拉曼散射峰位出现在  $520 \text{ cm}^{-1}$  附近, 但在微晶硅中, 由于受到晶粒尺寸的限制, 峰位向低波数方向移动, 且晶粒越小移动越大<sup>[22]</sup>. 根据相关长度模型(适用于晶粒大于  $4 \text{ nm}$ )<sup>[22]</sup>和键极化模型<sup>[23]</sup>(适用于晶粒小于  $4 \text{ nm}$ ), 我们通过这一特征峰的峰位和半峰宽计算得到了样品的晶粒平均尺寸约为  $2.05\text{--}6.21 \text{ nm}$ . 进一步考虑了拉曼测试时样品表面温度<sup>[24]</sup>以及自身的应力<sup>[25]</sup>对晶相的散射峰位的影响, 样品中的晶粒平均尺寸至少应在  $2.05 \text{ nm}$  以上.  $500 \text{ cm}^{-1}$  附近的高斯拟合峰由多种因素引起, 既包括晶粒表面<sup>[15, 26]</sup>或晶粒间界键角膨胀<sup>[15, 27]</sup>所引起的散射成分, 也与小晶粒<sup>[17, 28]</sup>的散射有关. 根据文献<sup>[25]</sup>, 晶粒平均尺寸约为  $1 \text{ nm}$  小晶粒(纳米硅)的拉曼散射峰位于  $500 \text{ cm}^{-1}$  附近, 而我们的样品晶粒平均尺寸大于  $2 \text{ nm}$ , 因此认为在我们的样品拉曼谱中  $500 \text{ cm}^{-1}$  附近的拉曼散射主要来源于界面贡献. 文献<sup>[15, 18]</sup>给出的晶相体积分数  $f_{\text{c}}$  和界面体积分数  $f_{\text{gb}}$  的定义如下:

$$f_{\text{c}} \equiv (I_{\text{g}} + I_{\text{gb}}) / (I_{\text{g}} + I_{\text{gb}} + Y I_{\text{a}}), \quad (1)$$

$$f_{\text{gb}} \equiv I_{\text{gb}} / (I_{\text{g}} + I_{\text{gb}} + Y I_{\text{a}}), \quad (2)$$

其中  $Y$  取  $0.9$ ,  $I_{\text{g}}$ ,  $I_{\text{a}}$ ,  $I_{\text{gb}}$  分别表示晶粒、非晶、界面高斯拟合峰的积分强度. 通过 (1) (2) 式我们计算得到样品的微结构信息, 结果列于表 1. 在我们的样品

中,晶相体积分数最大的样品为  $R_H = 16.67$ ,而界面体积分数最大的样品为  $R_H = 15$ ,值得注意的是界面体积分数的变化趋势与图 2 测得的带隙态密度变化趋势相同.为了确定界面体积分数的变化趋势,我们进一步对样品进行了红外测试.

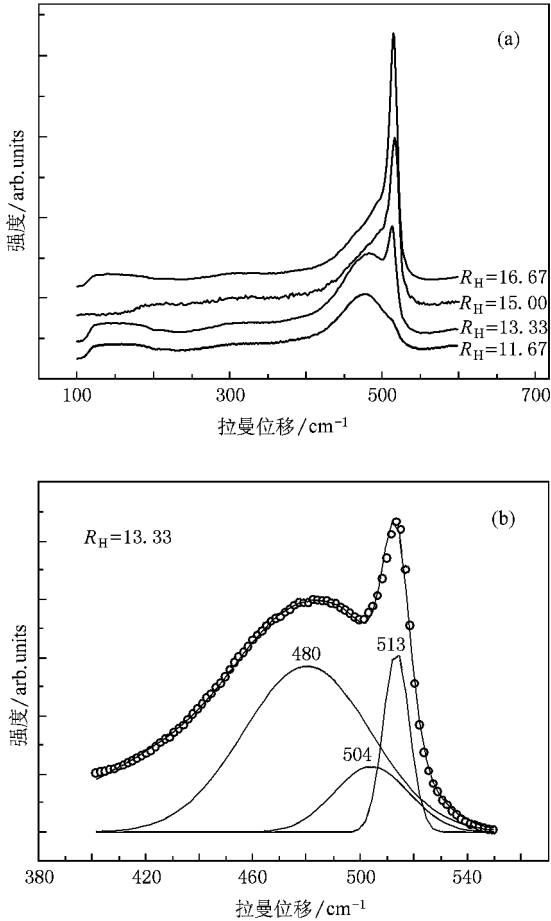


图 3 样品的拉曼谱 (a)不同氢稀释比  $R_H$  的情形 (b)  $R_H = 13.33$  的硅薄膜拉曼谱类 TO 模高斯分解图

表 1 薄膜微结构参量及带隙态密度随氢稀释比  $R_H$  的变化

$R_H$	$f_c / \%$	$f_{gb} / \%$	$R_{it} / \%$	$M / 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$
11.67	9.53	6.23	3.25	3.26
13.33	31.53	17.01	10.18	4.67
15.00	57.21	27.29	30.73	10.80
16.67	72.76	22.095	27.32	8.13

注:  $f_c$  是拉曼晶相体积分数;  $f_{gb}$  是拉曼界面体积分数;  $R_{it}$  是红外界面结构因子;  $M$  是调制光电流相移测试探测能量范围内的带隙态密度的总和

红外测试的结果如图 4 (a) 所示.我们所关注的是  $2000\text{--}2100 \text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰,这一吸收峰与 SiH 键的伸展振动模式有关<sup>[29,30]</sup>,在非晶硅中, SiH 和

SiH<sub>2</sub> 的伸展振动吸收中心分别在  $2000$  和  $2090 \text{ cm}^{-1}$  处<sup>[31-33]</sup>.根据 Smets 等<sup>[16]</sup>的研究结果,在微晶硅的红外伸展模的吸收谱中除了非晶相中的 SiH 键的贡献外,还出现了一些新的成分:极低位伸展模 (ELSM),以  $1895, 1929$  和  $1950 \text{ cm}^{-1}$  为中心,对应于低氢化的非晶硅组织,这些组织与钝化晶界及填充微空洞有关;中位伸展模 (MSM),以  $2040 \text{ cm}^{-1}$  为中心,由纳米硅表面的 SiH 团簇所引起<sup>[34]</sup>;窄高位伸展模 (NHSM),以  $2083, 2103$  和  $2137 \text{ cm}^{-1}$  为中心,分别对应于微晶硅晶粒表面的 SiH, SiH<sub>2</sub> 和 SiH<sub>3</sub> 键;高位伸展模 (HSM),以  $2120$  和  $2150 \text{ cm}^{-1}$  为中心,分别对应于非晶/微晶界面处的 SiH<sub>2</sub> 和 SiH<sub>3</sub> 键伸展模式.这些模式只伴随着薄膜中微晶颗粒的出现而出现.而由于理想晶粒内部不应存在 SiH 键,因此引起这些吸收的 SiH 键应与微晶硅薄膜中的界面相关.图 4 (b) 是我们一个典型微晶硅样品红外伸展模吸收谱的高斯分解图.

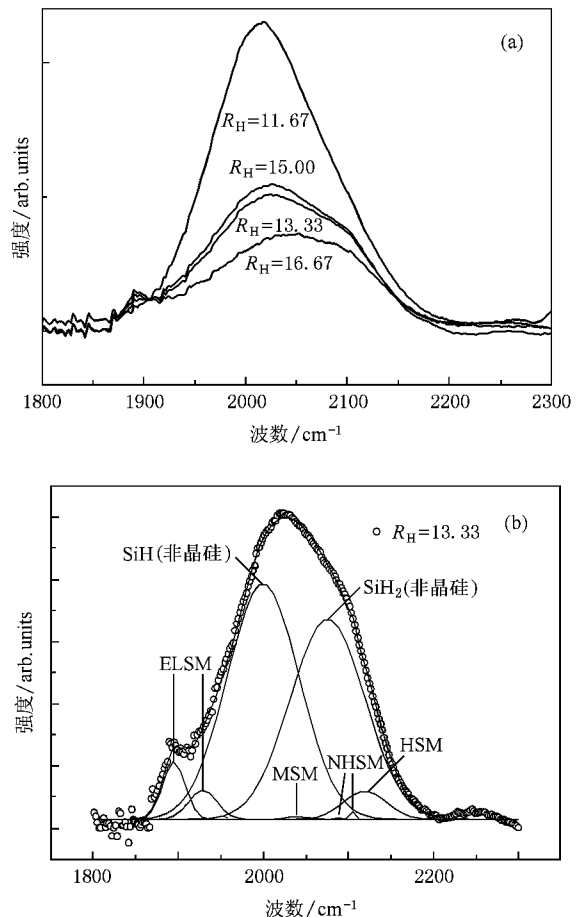


图 4 样品的红外吸收谱 (a)不同氢稀释比制备的样品的红外伸展模的吸收谱 (b)  $R_H = 13.33$  的硅薄膜红外伸展模吸收谱的高斯分解图

类比拉曼界面体积分数  $f_{gb}$ , 我们提出红外界面结构因子, 定义如下:

$$R_{if} \equiv (I_{ELSM} + I_{NHSM} + I_{MSM} + I_{HSM}) I_{total}. \quad (3)$$

此结构因子用以表征微晶硅薄膜中界面相所占体积分数. 这里  $I_{ELSM}$ ,  $I_{NHSM}$ ,  $I_{MSM}$ ,  $I_{HSM}$  分别表示各特征模式的积分强度,  $I_{total}$  为整个红外伸展模的积分强度. 由图 4 得到的  $R_{if}$  如表 1 所列.

表 1 反映的是薄膜微结构与带隙态密度随氢稀释比变化的关系. 由表 1 可知, 随着氢稀释比  $R_H$  的增加, 薄膜的晶相体积分数  $f_c$  逐渐增大, 这与预期相符<sup>[35]</sup>. 而分别用拉曼和红外两种方法得到的界面体积分数表现出与晶相体积分数不同的规律: 先是随着  $R_H$  的增加, 界面体积分数增加,  $R_H = 15$  的样品界面体积分数达到最大, 而后  $R_H$  进一步增加到 16.67 时, 界面体积分数并不继续增大, 即晶相体积分数最大的样品其界面体积分数并非最大, 这与岳国珍等<sup>[15]</sup>报道的结果一致.

把薄膜的微结构与带隙态的变化(图 2)结合起来, 我们发现带隙态密度的变化规律与晶相体积分数非单调相关, 既不是一般理解的晶化程度越高非晶相越少带隙态密度越小, 也不是如文献 6 所报道的晶相体积分数最大的样品带隙态密度最大. 在我们的样品中, 带隙态密度最大的样品是界面体积分数最大的样品. 由表 1 和图 2 可见, 带隙态密度最低的  $R_H = 11.67$  样品处于由非晶刚开始轻微晶化

的区域( $f_c = 9.53\%$ ), 其晶粒较小分散于非晶母体中, 虽然也有一定的界面体积分数, 但这种界面是非晶与晶粒之间的界面, 包裹晶粒的非晶相起到了钝化晶界的作用<sup>[36]</sup>, 因此这种界面性质较好, 缺陷态较少. 而随着晶相体积分数  $f_c$  的增大, 这时的界面相主要变为由晶粒间界占主导, 由于晶粒增多且体积变大, 一方面晶粒在生长过程中彼此竞争生长空间会使晶粒间界处性质恶化产生大量缺陷态<sup>[37]</sup>, 另一方面晶粒间界处于两有序结构之间, 本身相当于一突变层, 结构缺陷较多. 因此, 带隙态密度的变化与晶相体积分数的变化没有直接关系, 而与界面体积分数的变化趋势相同. 由以上分析, 我们提出微晶硅材料的带隙态密度主要由界面相的情况决定, 了解界面处带隙态的性质对于研究微晶硅的稳定性有重要的意义, 这也是我们下一步要研究的内容.

## 4. 结 论

我们采用调制光电流相移分析技术, 测得微晶硅样品的费米能级以上的带隙态密度分布. 以拉曼光谱和红外吸收光谱两种实验方法表征薄膜结构, 提出用红外界面结构因子  $R_{if}$  来定量表征界面相. 我们的实验结果表明, 微晶硅带隙态变化与界面相正相关, 这一现象目前尚未见报道.

- [1] Carlson D E, Wronski C R 1976 *Appl. Phys. Lett.* **28** 671
- [2] Staebler D L, Wronski C R 1977 *Appl. Phys. Lett.* **31** 292
- [3] Meier J, Fluckiger R, Keppner H, Shah A 1994 *Appl. Phys. Lett.* **65** 860
- [4] Finger F, Carius R, Dylla T, Klein S, Okur S, Gunes M 2003 *IEEE Proc. Circuits Devices Syst.* **150** 330
- [5] Yan B J, Yue G Z, Guha S 2007 *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **989** 335
- [6] Neto A L B, Dylla T, Klein S, Repmann T, Lambert A, Carius R, Finger F 2004 *J. Non-Cryst. Solids* **338—340** 168
- [7] Carius R, Merdzhanova T, Finger F, Klein S, Vetterl O 2003 *J. Mater. Sci. Mater. Electron* **14** 625
- [8] Chaudhuri P, Das D, Ray P P, Gupta N D, Roy D, Longeaud C 2004 *J. Non-Cryst. Solids* **338—340** 236
- [9] Ohedaz H 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 6693
- [10] Guillet J, Niikura C, Bouree J E, Kleider J P, Longeaud C, Bruggmann R 2000 *Mater. Sci. Eng. B* **69—70** 284
- [11] He Y L, Zhou H N, Liu X N, Cheng G X, Yu S P 1990 *Acta Phys. Sin.* **39** 1796 (in Chinese) [何宇亮、周衡南、刘湘娜、程光照、余是东 1990 物理学报 **39** 1796]
- [12] Zhang X D, Zhao Y, Gao Y T, Zhu F, Wei C C, Sun J, Geng X H, Xiong S Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3910 (in Chinese) [张晓丹、赵颖、高艳涛、朱锋、魏长春、孙建、耿新华、熊绍珍 2005 物理学报 **54** 3910]
- [13] Chen Y S, Gao X Y, Yang S E, Lu J X, Gu J H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4122 (in Chinese) [陈永生、鄒小勇、杨仕娥、卢景霄、谷锦华 2007 物理学报 **56** 4122]
- [14] Zhou B Q, Liu F Z, Zhu M F, Gu J H, Zhou Y Q, Liu J L, Dong B Z, Li G H, Ding K 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2172 (in Chinese) [周炳卿、刘丰珍、朱美芳、谷锦华、周玉琴、刘金龙、董宝中、李国华、丁琨 2005 物理学报 **54** 2172]
- [15] Yue G Z, Lorentzen J D, Jing L, Han D X, Wang Q 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 492
- [16] Smets A H M, Matsui T, Kondo M 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 033506

- [ 17 ] Das D , Bhattacharya K 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 103701
- [ 18 ] Hao H Y , Liao X B , Zeng X B , Diao H W , Xu Y , Kong G L 2006 *J. Non-Cryst. Solids* **352** 1904
- [ 19 ] Kong G L , Zhang D L , Yue G Z , Liao X B 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 4210
- [ 20 ] Sheng S R , Kong G L , Liao X B , Xia C Y , Zheng H D 1997 *Chin. J. Semicond.* **18** 513 ( in Chinese ) [ 盛殊然、孔光临、廖显伯、夏传钺、郑怀德 1997 半导体学报 **18** 513 ]
- [ 21 ] Wang Q , Yue G Z , Jing L , Han D X 2000 *Solid State Commun.* **113** 175
- [ 22 ] Richter H , Wang Z P , Ley L 1981 *Solid State Commun.* **39** 625
- [ 23 ] Zi J , Buscher H , Faller C , Ludwig W , Zhang K , Xie X 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 200
- [ 24 ] Balkansky M , Wallis R F , Haro E 1983 *Phys. Rev. B* **28** 1928
- [ 25 ] Anastassakis E , Liarokapis E 1987 *J. Appl. Phys.* **62** 3346
- [ 26 ] Gerbi J E , Abelson J R 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 1463
- [ 27 ] Veprek S , Sarott F , Iqbal Z 1987 *Phys. Rev. B* **36** 3344
- [ 28 ] Viera G , Huet S , Boufendi L 2001 *J. Appl. Phys.* **90** 4175
- [ 29 ] Lucovsky G , Nemanich R J , Knights J C 1979 *Phys. Rev. B* **19** 2064
- [ 30 ] Zhu X H , Chen G H , Zhang W L , Ding Y , Ma Z J , Hu Y H , He B , Rong Y D 2005 *Chin. Phys. B* **14** 2348
- [ 31 ] Luo Z , Lin X Y , Lin S H , Yu C Y , Lin K X , Yu Y P , Tan W F 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 169 ( in Chinese ) [ 罗志、林璇英、林舜辉、余楚迎、林揆训、余云鹏、谭伟锋 2003 物理学报 **52** 169 ]
- [ 32 ] Li S B , Wu Z M , Zhu K P , Jiang Y D , Li W , Liao N M 2007 *Acta Phys. Chem.* **23** 1252 ( in Chinese ) [ 李世彬、吴志明、朱魁鹏、蒋亚东、李伟、廖乃镗 2007 物理化学学报 **23** 1252 ]
- [ 33 ] Xu Y Y , Liao X B , Kong G L , Zeng X B , Hu Z H , Diao H W , Zhang S B 2003 *J. Cryst. Growth* **256** 27
- [ 34 ] Vignoli S , Morral A F , Butte R , Meaudre R , Meaudre M 2002 *J. Non-Cryst. Solids* **299** 220
- [ 35 ] Hao H Y , Kong G L , Zeng X B , Xu Y , Diao H W , Liao X B 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3327 ( in Chinese ) [ 郝会颖、孔光临、曾湘波、许颖、刁宏伟、廖显伯 2005 物理学报 **54** 3327 ]
- [ 36 ] Yue G Z , Yan B J , Ganguly G , Yang J , Guha S , Teplin C W 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 26350
- [ 37 ] Yan B J , Yue G Z , Yang J , Guha S , Williamson D L , Han D X , Jiang C S 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 1955

## Gap states and microstructure of microcrystalline silicon thin films \*

Peng Wen-Bo<sup>1)</sup> Liu Shi-Yong<sup>1)</sup> Xiao Hai-Bo<sup>1)</sup> Zhang Chang-Sha<sup>1)</sup> Shi Ming-Ji<sup>1)</sup>  
Zeng Xiang-Bo<sup>1)†</sup> Xu Yan-Yue<sup>2)‡</sup> Kong Guang-Lin<sup>1)</sup> Yu Yu-De<sup>1)</sup>

1) *Key Laboratory of Semiconductor Material Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*

2) *Department of Applied Physics, China Agricultural University, Beijing 100083, China*

( Received 18 December 2008 ; revised manuscript received 16 January 2009 )

### Abstract

The density of states ( DOS ) above Fermi level of hydrogenated microcrystalline silicon (  $\mu\text{c-Si:H}$  ) films is correlated to the material microstructure. We use Raman scattering and infrared absorption spectra to characterize the structure of the films made with different hydrogen dilution ratios. The DOS of the films is examined by modulated photocurrent measurement. The results have been accounted for in the framework of a three-phase model comprised of amorphous and crystalline components, with the grain boundary as the third phase. We observed that the DOS increases monotonically as the grain boundary volume fractions  $f_{\text{gb}}$  is increased, which indicates a positive correlation between the DOS and the grain boundary volume fraction.

**Keywords :** gap states , grain boundary , microcrystalline silicon , modulated photocurrent

**PACC :** 7320A 7830G 7280N

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant No. 2006CB202604 ) and the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60576036 ).

† Corresponding author. E-mail : xbzeng@semi.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail : yyxu@semi.ac.cn