

# 微量硼掺杂非晶硅的瞬态光电导衰退及其光致变化\*

张世斌<sup>†</sup> 孔光临 徐艳月 王永谦 刁宏伟 廖显伯

(中国科学院半导体研究所凝聚态物理中心, 表面物理国家实验室, 北京 100083)

(2001 年 4 月 11 日收到, 2001 年 5 月 28 日收到修改稿)

利用 EG&G 的瞬态分析测试仪对微量硼掺杂的高氢稀释非晶硅薄膜的瞬态光电导作了测量, 并研究了长时间曝光处理对瞬态光电导的影响. 发现薄膜的瞬态光电导衰退可以用双指数函数来拟合, 说明在样品的光电导衰退过程中有两种陷阱在起作用, 估算了陷阱能级的位置. 曝光处理后样品的光电导和暗电导不仅没有下降, 而且还有所上升, 薄膜的光敏性有所改善. 很可能曝光过程引起了硼受主的退激活, 导致费米能级向导带边移动, 使有效的复合中心减少, 样品的光电导上升.

关键词: 非晶硅, 瞬态, 光电导, 光致变化

PACC: 6143, 7350, 4250

## 1 引 言

氢化非晶硅薄膜( $a\text{-Si:H}$ )是一种新型的功能材料, 在新能源和信息显示等高新技术领域起着日益重要的作用<sup>[1,2]</sup>. 但其光致退化<sup>[3]</sup>作用严重地限制了它的进一步发展和应用. 为克服其光致退化作用, 各国研究者都作了不懈的努力. 我们近几年也研制了稳定性有明显改进的非晶硅薄膜<sup>[4]</sup>, 这种薄膜与常规的器件级非晶硅薄膜的主要不同点是: 首先, 从微结构来看, 它是在非晶和微晶的过渡区, 即有少量的微晶, 包含在非晶态的母体中; 其次, 在薄膜中进行了微量硼补偿掺杂(0.2%—0.5%). 这种非晶硅薄膜的光电导的光致衰退有明显的改进. 值得注意的是在微量硼掺杂后, 光电导在长时间曝光后, 不仅不衰退, 反而有所上升. 本文将着重报道和讨论这种光电导光致上升的样品的光电导的瞬态响应及其光致变化.

## 2 实 验

利用传统的等离子体增强 CVD 技术, 成功地制备出了高稳定性高光敏性的  $a\text{-Si:H}$  薄膜. 我们以纯  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{B}_2\text{H}_6$ (用氢气稀释到 50ppm)和  $\text{H}_2$  作为反应气

体沉积成膜, 其流量分别为 2sccm, 30sccm 和 20sccm. 衬底温度为 225°C, 沉积时的气压为 117 Pa. 射频(13.56MHz)功率为 15W. 样品被沉积在石英玻璃的毛面上. 沉积完成后在真空中蒸镀了共面铝电极, 样品狭缝的宽度为 0.42mm, 样品的狭缝的长度为 10.148mm. 样品的厚度为 1.80 $\mu\text{m}$ . 为了消除在沉积和操作过程中光照对样品的影响, 样品在开始测试前进行了 200°C 真空退火 1h(退火态).

样品被置于屏蔽良好的样品室中, 通过样品室前面的窗口可以对样品进行光照测量, 而旋去样品室的后盖可以对样品进行原位曝光. 测量用的光源的波长为 670nm 的脉冲激光器, 所提供的是频率为 18Hz 的脉冲信号, 激光器的工作电压为 2.8V. 用来对样品进行曝光处理的光源功率为 100mW/cm<sup>2</sup> 的冷光灯. 曝光处理的时间累计分别为: 1, 10, 30, 360, 720, 1080min. 测量时在样品上加 45V 的直流偏压, 通过测量窗口使激光脉冲加到样品上, 从大小为 1M $\Omega$  的取样电阻获得的电压信号被直接输入 EG&G 的 4400 瞬态测试分析仪. 最后利用计算机从 4400 测量系统进行数据自动采集.

## 3 结果与讨论

图 1 是适量硼掺杂的非晶硅样品的退火态和在

\* 国家重点基础研究发展规划项目(批准号: G2000028201)资助的课题.

<sup>†</sup>Sbzhang@red.semi.ac.cn

不同曝光时间后的一组瞬态光电导衰退曲线. 可以看出所有曲线的形状都很相似, 但曝光后光电导不仅没有下降, 而且随曝光时间的延长一直上升. 对于光电导在曝光后上升的情况, 盛殊然等人曾作过研究和论述<sup>[5]</sup>: 当非晶硅的硼掺杂浓度为 0.3%—0.5% 时样品的光电导的数值最大, 且不衰退, 反而有少许上升. 因为曝光可能使硼受主  $B_4^-$  退激活, 不再起 p 型补偿杂质的作用, 从而导致费米能级  $E_F$  向导带边  $E_c$  移动, 其能级的移动距离可以表示成

$$\Delta E_F(t) \propto \frac{\Delta N_B(t)}{N(E_F)}, \quad (1)$$

式中,  $N(E_F)$  为费米能级  $E_F$  处的陷阱态密度,  $\Delta N_B(t)$  是曝光下变成三配位硼原子的数目. 暗电导激活能  $E_a$  因此而减小, 导致暗电导  $\sigma_d$  增大. 同时费米能级  $E_F$  的上移也使得费米能级以上的一些隙态被电子占据. 由于在电子和空穴的分界能级  $E_{db}$  和  $E_{dp}$  之间的隙态起有效复合中心的作用, 所以也就减少了对电子具有较大复合截面的空穴复合中心的数目, 从而增大了光生电子的  $\mu\tau$  乘积, 导致光电导  $\sigma_{ph}$  增大. 由于  $\Delta E_F(t) \propto N(E_F)^{-1}$ , 所以费米能级  $E_F$  的上移导致的光电导和暗电导增大的效果对于带隙态密度相当低的适量硼补偿的样品尤为明显.

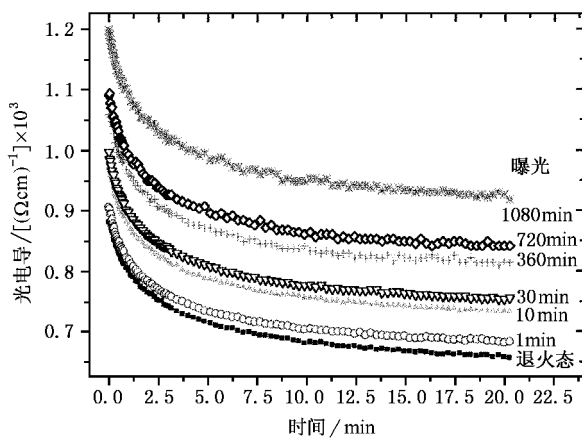


图 1 适量硼掺杂 a-Si:H 样品的退火态和不同曝光时间后的光电导衰退情况

对于半导体的瞬态光电导响应. 如果陷阱填充和腾空有很强的相互作用, 以致于陷阱的占据可以用稳定的费米能级  $E_F$  来描述, 且陷阱位于费米能级之上, 则光生载流子在光照停止后将按指数规律衰退<sup>[6]</sup>. 我们认为这比较适合我们的情况, 所以我

们试着用指数规律拟合实验数据. 但在拟合的过程中发现, 只有用两个指数项之和(双指数)才能很好地拟合图 1 的数据. 采用的双指数函数的形式为

$$y = y_0 + A_1 \exp[-(t - t_0)/t_1] + A_2 \exp[-(t - t_0)/t_2], \quad (2)$$

其中指数前项  $A_1, A_2$  分别代表与两种不同陷阱相联系的衰退过程的初始光电导值. 也就是光照停止前所达到的最大光电导值, 它与载流子寿命和迁移率的乘积  $\mu\tau$  有关.  $t_1, t_2$  分别为两种陷阱的响应时间常数, 其表达式为

$$t_i = \tau \{1 + \alpha (N_i/N_c) \exp[(E_c - E_{t_i})/kT]\} \quad i = 1, 2, \quad (3)$$

其中  $\tau$  为自由载流子的寿命时间,  $N_i$  为陷阱浓度,  $N_c$  为导带边的有效态密度. 当  $t_i \gg \tau$  时, 右边  $\{$  中的 1 可以忽略, (3) 式可以写成

$$E_c - E_{t_i} \approx kT \ln t_i + kT \ln \left( \frac{N_c}{N_i \cdot \tau} \right) \quad i = 1, 2. \quad (4)$$

我们可以利用 (4) 式由测得的  $t_1, t_2$  估计出陷阱能级的位置,  $N_c$  为  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , 如果认为陷阱浓度  $N_i$  的数值与其所处能量位置的隙态密度是同一个量级, 假定为  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 载流子的寿命取为  $1 \mu\text{s}$ . 则两个缺陷能级在退火态分别位于导带下 0.47 eV 和 0.52 eV 附近. 随着曝光过程的进行, 其能级位置则分别上移到导带下 0.46 eV 和 0.51 eV 处.

图 2 是  $A_1, A_2$  随曝光时间的变化曲线. 图 3 是  $t_1, t_2$  随曝光时间的变化曲线. 可以看到,  $A_1, A_2$  都随曝光时间的延长而单调上升, 曝光 14h 后,  $A_1, A_2$  约增加了 1.2 倍, 这表明寿命时间也是增大的, 且最多增大 1.2 倍. 现在来分析响应时间  $t_1, t_2$  的变化. 从图 3 可以看出,  $t_1, t_2$  在曝光开始阶段急剧下降, 达到最小值后又开始上升. 这种非单调的变化可能是多种因素共同作用的结果. 从前面的分析可知, 曝光后  $\tau$  增加, 因而开始阶段  $t_1, t_2$  的下降不是源于  $\tau$  的变化. 从 (3) 式可以看出有两个可能的原因: 陷阱浓度  $N_i$  的减小和陷阱能级位置的上移. 现在我们来估计这两种因素独立作用时可能发生的变化量.  $N_i, N_c$  都减小到原来的 0.68 倍, 而陷阱能级的位置  $E_{t_1}$  和  $E_{t_2}$  都上移了 0.01 eV.  $t_1, t_2$  到达极小值后随曝光时间的继续延长逐渐上升, 则可能主要是由于  $\tau$  的增加. 这种变化很可能与硼受主的退激活

有关,但其详细的物理过程尚不清楚.

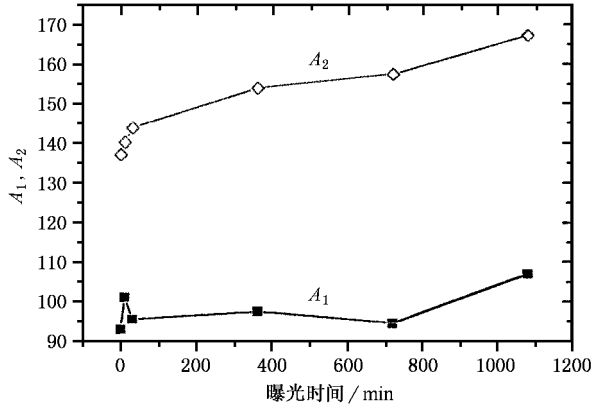


图2  $A_1, A_2$  随曝光时间的变化关系曲线

## 4 结 论

对微量硼掺杂的非晶硅样品的退火态和不同时间曝光后的瞬态光电导衰减进行了测量,发现光电导瞬态衰减曲线可以用双指数函数进行很好的拟

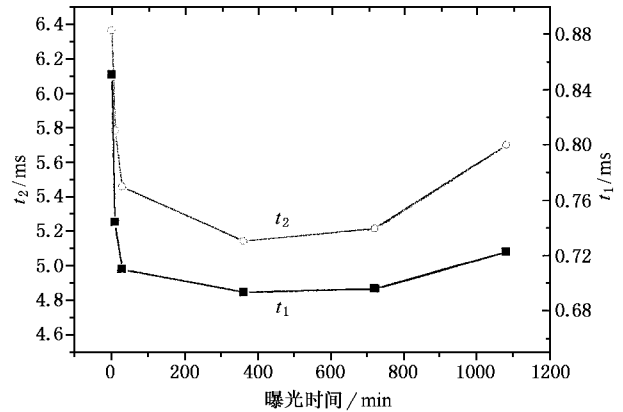


图3  $t_1, t_2$  随样品曝光时间的变化关系曲线

合. 表明光电导的衰退过程中有两种不同的陷阱在起作用. 曝光后样品的光电导不仅没有降低反而有所增大. 这是因为薄膜的隙态密度相当低且退火态的费米能级在带隙中央附近, 曝光使硼受主  $B_4^-$  退激活, 不再起 p 型补偿杂质的作用, 导致费米能级上移.

- [ 1 ] Street R A , Wu X D , Weisfield R , Ready S , Apte R , Nguyen M and Nylen P 1995 *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **377** 757
- [ 2 ] Han D X , Wang W L and Zhang Z 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 1484 ( in Chinese ) [ 韩大星等 1999 物理学报 **48** 1484 ]
- [ 3 ] Staebler D L and Wronski C R 1977 *Appl. Phys. Lett.* **31** 292
- [ 4 ] Sheng S R , Liao X B and Kong G L 1998 *Applied Physics Lett.* **73**

336

- [ 5 ] Sheng S R , Liao X B , Ma Z X , Yue G Z , Wang Y Q and Kong G L 2001 *Solar Energy Materials & Solar Cells* **68** 123
- [ 6 ] Bube R H 1991 *Photoelectronic properties of Semiconductors* ( Cambridge University Press )

## Transient photoconductivity and its light-induced change of lightly boron-doped a-Si:H films<sup>\*</sup>

Zhang Shi-Bin Kong Guang-Lin Xu Yan-Yue Wang Yong-Qian Diao Hong-Wei Liao Xian-Bo

( State Laboratory for Surface Physics , Institute of Semiconductors & Center for Condensed Matter Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100083 ,China )

( Received 11 April 2001 ; revised manuscript received 28 May 2001 )

### ABSTRACT

Transient photoconductivity and its light-induced change were investigated by using a Model 4400 boxcar averager and signal processor for lightly boron-doped a-Si:H films. The transient photoconductivities of the sample were measured at an annealed state and light-soaked states. The transient decay process of the photoconductivity can be fitted fairly well by a second-order exponential decay function, which indicates that the decay process is related with two different traps. It is noteworthy that the photoconductivity of the film increases after light-soaking. This may be due to the deactivity of the boron acceptor  $B_4^-$ , and thus some of the boron atoms can no longer act as acceptors and drives  $E_F$  to shifts upward. Consequently, the number of effective recombination centers may be reduced and so the photoconductivity increases.

**Keywords** : amorphous silicon , transient photoconductivity , light-induced change

**PACC** : 6143 , 7350 , 4250

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China( Grant No. G2000028201 ).