

α -Si:H 摄像管靶的光谱响应和最佳靶厚*

海宇涵

(中国科学院电子学研究所, 北京)

摘要 用动态系统测量了 α -Si:H 靶电压对光谱响应的影响, 发现对短波响应影响较大. 推导了靶光电流 i_s 和饱和电压 V_s 的计算公式, 发现 $V_s \propto [(\mu_p \tau_p)^{-1}, \omega^2]$. 从测量的 V_s 值, 计算了 $\mu_p \tau_p$ 值. 发现它随入照光波长的缩短而减小. 估算了对单色光和对白光的最佳靶厚.

关键词 摄像管靶; 非晶硅; 光谱响应; 饱和电压; 最佳靶厚

一、序 言

α -Si:H 靶摄像管起始于 1979 年^[1-3], 由于它有高灵敏度、高分辨率、低暗电流和价廉易造等优点, 很有开发前景. 它还有一个突出的优点, 就是光谱响应复盖整个可见光区, 很适合彩色摄像. 因此对其光谱响应进行研究是有意义的.

用动态测试台研究摄像管靶面, 提供改进的信息, 是一种有效方法. 我们曾用于非晶硅靶摄像管的研制^[4,5], 收到很好的效果. 用动态测试台直接测量靶面光谱响应, 不但能更好地了解靶面性能, 而且对某些理论问题的探讨特别有用.

本文测量了 α -Si:H 靶面的光谱响应, 研究了它的特点和光电流产生机制, 推导了饱和电压的计算公式, 给出了最佳靶厚的选择方法, 对 α -Si:H 靶面研究具有一定的指导意义.

二、 α -Si:H 靶面的光谱响应

我们用摄像管动态测试台(清华大学制)研究 α -Si:H 靶面性能. 为了测量光谱响应, 附加一台可自动记录的 44W 型平面光栅单色仪, 用石英光缆将单色光引向靶面. 并用石英真空热电偶加以校准. 测量示意图如图 1 所示. 此动态系统测量的光电流与封离的样管有较大的差别, 约低 1/2, 但是成比例地降低, 容易校正, 因此测量数据是有价值的.

图 2 是测量的 15V 靶压下的靶面等能光谱响应, 峰值在 $0.58 \mu\text{m}$, 长波限 $0.8 \mu\text{m}$. 短波响应的下降是由于光的反射, 长波响应的下降还由于光吸收的减少, 部分光透过膜层.

1989 年 10 月 20 日收到, 1990 年 6 月 25 日修改定稿.

* 国家自然科学基金资助项目.

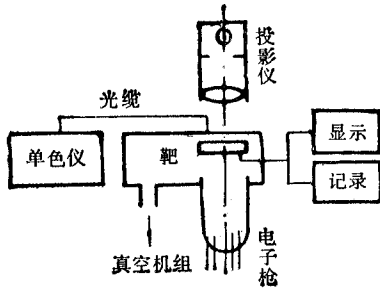


图1 靶面性能和光谱响应的动态测量

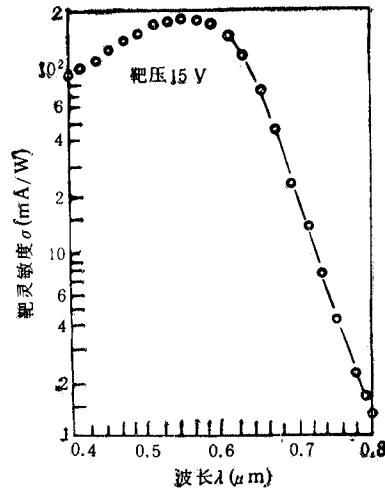


图2 a-Si:H 靶面的光谱响应

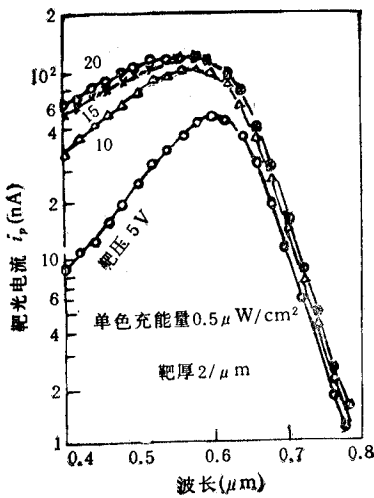


图3 不同靶压下的等能光谱响应
(注: 图中的单色充能是单色光, 靶厚为 $2\mu\text{m}$)

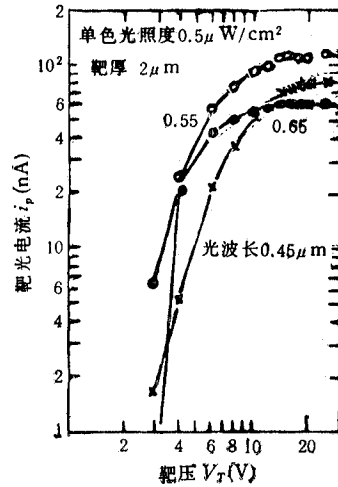


图4 等能单色光的伏安特性

改变靶压对光谱响应的影响示于图3。图中曲线有几个明显的特点。随着靶压的增高, 响应亦将增长, 但短波和长波响应的变化情况不同。短波部分增长较快, 特别是5—10V之间, 10—15V增长逐渐减慢, 20V以上不变。而长波部分增长较慢, 且15V以上不再变化。为了了解这种变化, 我们选择红($0.65\mu\text{m}$)、绿($0.55\mu\text{m}$)、兰($0.45\mu\text{m}$)三种光来测量伏安特性, 结果示于图4。这三种光的伏安曲线都有饱和特性, 其变化情况反应了前述的光谱响应的特点。对于饱和特性, 这三种光有区别: (1) 饱和电压不同, 短波光的较高, 长波光的较低; (2) 饱和电流的幅值不同, $0.55\mu\text{m}$ 光的最大, $0.45\mu\text{m}$ 光的次之, $0.65\mu\text{m}$ 光的最小。这些现象, 我们将给予适当解释。

三、漂移场中的光电流

首先研究在电场 E 下的漂移光电流。考虑离表面深 x 处的片层 dx 内的光电子激发 (图 5)。此处照度 $I(x)$ 为

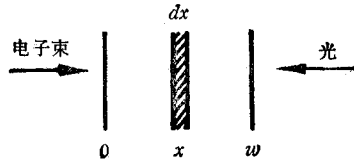


图 5 a-Si:H 靶面分析简图

$$I(x) = I_0(1 - r) \exp[-\alpha(w - x)] \quad (1)$$

式中 I_0 为入射光照度, r 为 a-Si:H 的反射率, α 为吸收系数, w 为膜厚。则片层内电子-空穴对的相对光激发率 p_1 为

$$p_1 = \eta dI/I_0 = \eta(1 - r)\alpha \exp[-\alpha(w - x)] dx \quad (2)$$

式中 η 为光激发的量子效率。光生空穴达到表面的过程, 受漂移长度 S

$$S = \mu_p \tau_p E \quad (3)$$

限制。 μ_p 、 τ_p 分别是空穴的漂移迁移率和寿命, E 为电场。假定膜层内的电场是均匀的, 则达到表面的几率 p_2 按 Lampart 定律为

$$p_2 = \exp(-x/S) \quad (4)$$

这时的总效率 Y_p 为

$$\begin{aligned} Y_p &= \int_0^w \eta(1 - r)\alpha \exp[-\alpha(w - x)] \exp(-x/S) dx \\ &= \eta(1 - r) \frac{\alpha S}{\alpha S - 1} [\exp(-w/S) - \exp(-\alpha w)], \quad \alpha S \neq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

$$Y_p = \eta(1 - r) \frac{w}{S} \exp(-w/S), \quad \alpha S = 1 \quad (6)$$

则光电流密度 i_p 为

$$i_p = e I_0 Y_p \quad (7)$$

式中 e 为电子电荷。入射光照度 I_0 的单位为 $\text{ph/cm}^2 \cdot \text{s}$, 若用 W/cm^2 , 则光电流密度 (A/cm^2) 的公式为

$$i_p = I_0 \lambda Y_p / 1.2395 \quad (8)$$

式中 λ 为光的波长, 单位为 μm 。于是得到

$$i_p = \eta(1 - r)\lambda I_0 [\alpha S / (\alpha S - 1)] [\exp(-w/S) - \exp(-\alpha w)] / 1.2395, \quad \alpha S \neq 1 \quad (9)$$

$$i_p = \eta(1 - r)\lambda I_0 (w/S) \exp(-w/S) / 1.2395, \quad \alpha S = 1 \quad (10)$$

我们后面要证明在较高的靶压下, i_p 大致与靶的信号电流密度 i_s 接近。

四、靶的信号电流

为了分析靶的信号电流,我们画出摄像管工作的等效电路于图6. 首先研究电子束刚扫描某靶元(r_e, C_e)后,即电子束开关 S_b 断路期间,在恒定光照下表面电位 V_b 的变化. 当时间 $t = 0$ 时, $V_a = V_T, V_b = 0$. 另外为了简化,设靶元光敏电阻 r_e 为恒量,并服从欧姆定律,于是

$$(V_a - V_b)/r_e = i_1 \quad (11)$$

由等效电路有

$$C_e d(V_a - V_b)/dt = i_2 \quad (12)$$

$$i_1 + i_2 = 0 \quad (13)$$

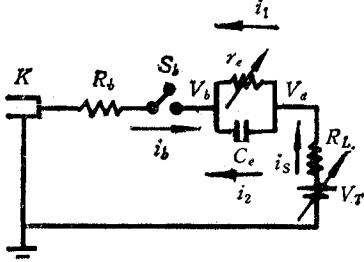


图6 a-Si:H 靶摄像管工作的等效电路

解(11)~(13)式,有

$$V_b = V_T[1 - \exp(-t/(r_e C_e))] \quad (14)$$

当 $t = T$ 时, T 为一幅时间,靶表面电位上升到最大值 V_{b_0}

$$V_{b_0} = V_T[1 - \exp(-T/(r_e C_e))] \quad (15)$$

若 $T \ll r_e C_e$ 时,(15)式可简化为

$$V_{b_0} \approx V_T T / (r_e C_e) \quad (16)$$

此一幅时间后,电子束扫描该靶元,即 S_b 接通,表面电位将下降

$$V_b \approx V_{b_0} \exp[-t/(R_b C_e)] \quad (17)$$

式中 R_b 为电子束电阻,设服从欧姆定律,则束电流

$$i_b = V_b / R_b = V_{b_0} \exp[-t/(R_b C_e)] / R_b \quad (18)$$

设电子束使该靶元充电的时间为 T' ,则信号电流 i_s 为

$$\begin{aligned} i_s &= \frac{1}{T'} \int_0^{T'} i_b dt \approx V_{b_0} C_e [1 - \exp(-T'/(R_b C_e))] / T' \\ &\approx V_{b_0} C_e / T \end{aligned} \quad (19)$$

(19)式中假定了 $R_b C_e < T'/2$. 将(16)式代入有

$$i_s = \frac{V_T T}{r_e T'} = V_T / \left(r_e \frac{T'}{T} \right) = V_T / R \quad (20)$$

(20)式中 R 为靶面总光电阻。(20)式表明信号电流 i_s 就是靶压 V_T 下的光电流. 当然这是非常简化下的结论.

五、饱和电压和最佳靶厚

由(20)式,我们可以将信号电流 i_s 用(10)和(9)式来很近似地表达,即

$$i_s \approx \eta(1-r)\lambda I_0 \frac{\alpha S}{\alpha S - 1} \left[\exp\left(-\frac{w}{S}\right) - \exp(-\alpha w) \right] / 1.2395, \quad \alpha S \approx 1 \quad (21)$$

$$i_s \approx \eta(1-r)\lambda I_0 \frac{w}{S} \exp\left(-\frac{w}{S}\right) / 1.2395, \quad \alpha S = 1 \quad (22)$$

而漂移长度 S 为

$$S = \mu_p \tau_p E = \mu_p \tau_p V_T / w \quad (23)$$

现在利用(21)–(23)式来研究饱和电压和最佳靶厚的选择等问题。

1. 饱和电压和饱和光电流

我们重新研究图 4 中单色光的伏安特性。在靶压较高时, $\alpha S \gg 1$, 在(21)式中与靶压有关的部分就是方括号内的指数部分, 我们称它为光电流的靶压变化因子 δ , 即

$$\delta = \exp(-w/S) - \exp(-\alpha w) \quad (24)$$

只需研究 δ 随靶压的变化, 就知道光电流随靶压的变化。当漂移长度 $S \rightarrow \infty$ 时, 得最大值 δ_∞

$$\delta_\infty = 1 - \exp(-\alpha w) \quad (25)$$

若定义饱和电压 V_s 是与 0.9 倍饱和光电流对应的靶压值, 则对应的变化因子 $\delta/\delta_\infty = 0.9$, 即

$$\frac{\exp(-w/S) - \exp(-\alpha w)}{1 - \exp(-\alpha w)} = 0.9 \quad (26)$$

$$V_s = \frac{-w^2}{\mu_p \tau_p \ln [0.9 + 0.1 \exp(-\alpha w)]} \quad (27)$$

可见饱和电压 V_s 与空穴迁移率和寿命之积 $\mu_p \tau_p$ 成反比, 此点与文献[6]一致。当 $\alpha w > 2$ 时, (27)式可简化为

$$V_s \approx 10w^2 / (\mu_p \tau_p) \quad (28)$$

即饱和电压同时正比于靶厚之平方 w^2 。

在同一靶面, 对于不同波长的入射光, w 是相同的, 饱和电压不同的原因主要是 $\mu_p \tau_p$ 值不同。将(27)式变为

$$\mu_p \tau_p = \frac{-w^2}{V_s \ln [0.9 + 0.1 \exp(-\alpha w)]} \quad (29)$$

便可由测量的 V_s 值求 $\mu_p \tau_p$ 值。图 4 中可以得到 0.65、0.55 和 0.45 μm 三种光 (照度 0.5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$) 照射下的靶面饱和电压值, 它们分别是 10、13 和 18V。即饱和电压随入射光波长的减短而增高; 这同文献[7]的实验结果相符。由文献[8]可查得 $a\text{-Si:H}$ 膜的吸收系数 α , 并由 $w = 2\mu\text{m}$, 可算出这三种光对应的 $\mu_p \tau_p$ 值, 它们分别是 4.0×10^{-8} 、 3.1×10^{-8} 和 $2.2 \times 10^{-8} \text{cm}^2 \text{V}^{-1}$ 。这意味着 $\mu_p \tau_p$ 值随入射光波长的减短而减小。P. Zanzucchi^[9] 测量了 $a\text{-Si:H}$ 膜的光电导, 得到了 $\eta \mu_n \tau_n - \lambda$ 曲线 (μ_n 、 τ_n 分别是光生电子的迁移率和寿命), 在比 0.65 μm 更短的波段, $\eta \mu_n \tau_n$ 随波长的减短而减小。在这些波长范围, $\eta = 1$, 实际上就是 $\mu_n \tau_n$ 的变化情况; 这与我们得到的 $\mu_p \tau_p$ 的变化情况相似。甚至对前述的三种光, $\mu_n \tau_n$ 的相对比值也同我们的 $\mu_p \tau_p$ 的接近。在比 0.65 μm 更长的波段, $\eta \mu_n \tau_n$ 值随波长的增长迅速减小 (我们没有进行测量)。R. Loveland^[10] 认为, 这是由于孪生复合过程而使 η 减小的缘故; 而未必与 μ_n 或 τ_n 有关。至于波长越短 $\mu_p \tau_p$ 值越小的原因还不太清楚。D. Carlson^[11] 认为载流子寿命依赖于照度; 光照引起准费米能级的位移和引入新的

复合中心。D. Staebler^[12] 发现了光照下可逆的光电导变化(称 Staebler-Wronski 效应), 他认为这种新的隙态的引入产生较短的载流子寿命。由于短波光具有较大的能量, 自然有较大的变化。

对于 $\mu_p\tau_p$ 值, S. Oda^[13] 从他的 *a*-Si:H 靶的测量, 估计为 $1 \times 10^{-8} \text{cm}^2\text{V}^{-1}$ 。但他的靶灵敏度要比我们的低得多。文献 [11] 从 *a*-Si:H 膜的扩散长度测量估计为 $2 \times 10^{-8} \text{cm}^2\text{V}^{-1}$ 。所以我们估算的 $2-4 \times 10^{-8} \text{cm}^2\text{V}^{-1}$ 还是可信的。

从计算的 $\mu_p\tau_p$ 值(参考了测量的饱和电压值), 可由(21)式计算饱和光电流值。对 0.65、0.55 和 0.45 μm 三种光分别为 130, 215 和 151 nA/cm^2 。比较这三种光下的测量值 120、230 和 160 nA/cm^2 , 是比较接近的。这就解释了第二节中提出的饱和光电流幅值不同的原因。

2. 最佳靶厚的选择

此问题应根裕教授曾仔细研究过^[14], 本文提出利用变化因子 δ 的方法, 可能要简便些。令 $d\delta/dw = 0$, 便得到单色光的最佳靶厚。由于电场 E 与靶厚 w 有关, 寻找最佳靶厚时采用固定电场或固定靶压, 其结果是有区别的。先考虑电场是不变的, 则最佳靶厚 $w_p(\lambda)$ 为

$$w_p(\lambda) = \frac{S}{\alpha S - 1} \ln(\alpha S) \approx \frac{1}{\alpha} \ln(\alpha \mu_p \tau_p E) \quad (30)$$

电场 E 的取值对计算结果有影响, 一般取最佳管子工作的电场, 比如 $10^5 \text{V}/\text{cm}$ 。 $\mu_p\tau_p$ 前面已算出, 三种光差别不大, 对结果的影响也较小, 为了简便, 采用相同的值 $2 \times 10^{-8} \text{cm}^2\text{V}^{-1}$ 。三种光的 α 值差别较大, 还是采用文献 [8] 的数据。由(30)式计算, 0.65、0.55 和 0.45 μm 三种光的最佳靶厚分别是 4.6、0.58 和 0.14 μm 。可见三种光的最佳靶厚有很大差别, 红光宜厚, 兰绿光宜薄。

对于白光应如何选取最佳靶厚? 先计算这三种光和三个最佳靶厚的变化因子 δ , 列于表 1。

表 1 三种光和三种靶厚下的变化因子 δ

$w(\mu\text{m})$	$\lambda(\mu\text{m})$		
	0.45	0.55	0.65
0.14	0.99	0.71	0.06
0.58	0.97	0.97	0.22
4.6	0.80	0.80	0.69

由表 1 可见 0.14 和 0.58 μm 靶厚显然太薄了, 因红光的 δ 值太小; 而 4.6 μm 靶厚又太厚, 兰绿光的 δ 值下降太多。0.58—4.6 μm 这个范围太大了, 不能作选取的依据。为此我们画出三种光的 $\delta-w$ 曲线, 示于图 7。三条线皆有峰, 分别对应三个单色光最佳靶厚。兰

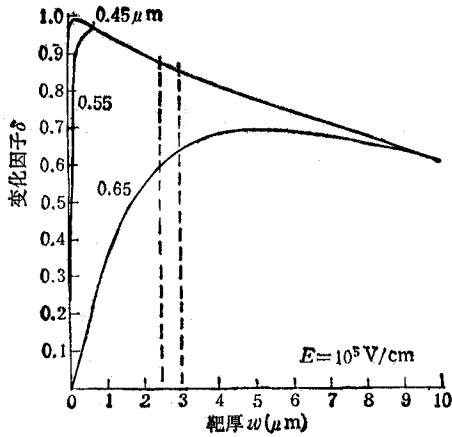


图7 电场一定时,三种光的变化因子 δ 与靶厚 w 的关系

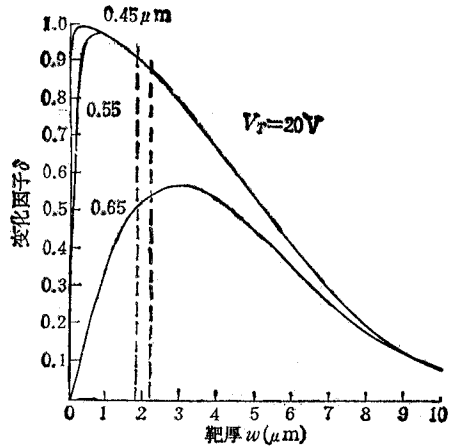


图8 靶压固定时,三种光的变化因子 δ 与靶厚 w 的关系

绿光的峰在薄靶区,较尖,上升很快,下降亦较快。红光峰在厚靶区,上升也较快,但下降缓慢。显然应在兰绿光的下降区和红光曲线的上升区选取。我们提出一个办法,即使绿光和红光的 δ 值均能保持其峰值的 0.9 倍以上,为最佳靶厚选区。由图 7,这个选区为 2.5—3 μm 。

如果靶压 V_T 固定,则(30)式应改写为

$$w_p(\lambda) = \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{\alpha \mu_p \tau_p V_T}{2 w_p} \right) + \frac{w_p^2}{\alpha \mu_p \tau_p V_T} \quad (31)$$

此式可用迭代法计算。若把靶压 V_T 定为 20V (这是常用的靶压),则 0.65、0.55 和 0.45 μm 三种光对应的最佳靶厚分别是 2.9、0.63 和 0.17 μm 。这与固定电场的数值相比,兰绿光差别不大,红光相差较大。原因是靶厚较厚时,靶电场减小至较小的值,甚至光电流达不到饱和值。图 8 是靶压 $V_T = 20\text{V}$ 时三种光的变化因子与靶厚的关系曲线,若仍定保住 90% 峰值的范围,最佳靶厚在 1.9—2.2 μm 范围。此值亦比固定电场时小。一般情况下,以固定电场的选取为宜。

当然以上的选取是从光敏性考虑的,从靶惰性方面考虑,还是希望更厚一些。具体选择还要结合应用场合来进行。

六、结 论

用动态测试系统直接测量了 α -Si:H 靶面的光谱响应。测量了不同靶压下的光谱响应,发现靶电场对短波响应影响较大,对长波响应影响较小。并测量了红、绿、兰三种单色光的伏安特性,存在两个特点:其一是饱和电流幅值按绿、兰、红排列;其二是饱和电压值短波较高,长波较低。

用漂移长度限制光电流的方法,推导了非晶硅靶光电流的计算公式,并证明了在强电场下它与靶信号电流近似相等。

还计算了饱和电压,它与空穴迁移率和寿命之积成反比,而与靶厚的平方近似成正比。并由测量的 V_s 值,计算了 $\mu_p\tau_p$ 值,发现长波光的 $\mu_p\tau_p$ 值较大,短波光的 $\mu_p\tau_p$ 值较小。

我们定义了变化因子。分固定电场或固定靶压两种情况,推算了单色光的最佳靶厚;并用变化因子与靶厚的关系曲线,估计了对白光的最佳靶厚范围。

参 考 文 献

- [1] I. Imamura, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **35**(1979), 349.
- [2] 海宇涵等,关于开展非晶硅靶摄像管的探索性研究的报告,中国科学院电子学研究所内部资料,北京,1979年。
- [3] 刘亚坤,科学报,1985年3月17日,第1版。
- [4] 海宇涵等,高灵敏度 α -Si:H 靶摄像管的研制,中国电子学会第四届年会论文集,北京,1987年 p.77.
- [5] 海宇涵等,电子科学学刊,**10**(1988),528—535.
- [6] S. Oda, et al., *Amorphous Semiconductor Technologies and Devices*, edited by Y. Hamakawa, Ohmsha, Tokyo, (1983), p.113.
- [7] S. Ishioka, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **22**(1983),Suppl., 22—1,461.
- [8] D. Carlson, *Advances in Amorphous Silicon Solar Cells*, Proc. 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., San Diego, (1980), p.291.
- [9] P. Zanzucchi, et al., *J. Appl. Phys.*, **48**(1977), 5227.
- [10] R. L.Loveland, et al., *J. Non-Cryst. Solids*, **13**(1973/74), 55.
- [11] D. Carlson, C. Wranski, *Amorphous Semiconductors*, ed. M. Brodsky, Spring-Verlag, Berlin, (1979), p.302.
- [12] D. Staebler, C. Wranski, *Appl. Phys. Lett.*, **31**(1977), 292.
- [13] S. Oda, et al., *J. Appl. Phys.*, **52**(1981), 7275.
- [14] 应根裕等,非晶硅摄像管靶面研究,北京电子学会年会报告,北京1985年。

PHOTORESPONSE AND OPTIMAL THICKNESS OF α -Si:H TARGET FOR VIDICON

Hai Yuhan

(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing)

Abstract The effect of the α -Si:H target voltage on the spectral photosensitivity is measured in a demountable apparatus with interchangeable targets. It is found that the effect of target voltage on the photoresponse increases when the light wavelength decreases. The target photocurrent i_s and saturation voltage V_s are analysed. It is shown that $V_s \propto [(\mu_p\tau_p)^{-1}, w^2]$. $\mu_p\tau_p$ is calculated from measured V_s value. It is found that $\mu_p\tau_p$ value decreases when the light wavelength decreases. The optimal thicknesses of α -Si:H targets for homogeneous light and achromatic light are estimated.

Key words Vidicon target; Amorphous silicon; Photoresponse; Saturation voltage; Optimal thickness