

文章编号: 1001-3806(2005)04-0429-04

脉冲光照射下一维 PSD 响应特性的研究

尚鸿雁, 张广军

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘要: 研究一维位置敏感探测器 (PSD) 的脉冲响应特性及脉冲光照射下光生电流输出的规律, 对准确计算光的入射位置有着十分重要的意义。给出脉冲光函数的表达式, 讨论了 4 种脉冲光模式照射下的 PSD 脉冲响应特性, 并详细研究了“脉冲堆积”现象。结果表明, 如果脉冲光照射时间远远大于 PSD 的响应时间时, 光的入射位置满足一维 PSD 的转化公式; 如果光照射时间小于 PSD 的响应时间时, 只要满足照射时间大于 2.5 倍的时间响应常数, 则停止照射的时间越短, 光入射位置与 PSD 输出电流之间越接近线性关系。

关键词: 脉冲光; 模式; 一维位置敏感探测器; 响应特性; 脉冲堆积

中图分类号: TP212.14 **文献标识码:** A

Response characteristic of 1-D PSD irradiated by pulsed light source

SHANG Hong-yan, ZHANG Guang-jun

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083 China)

Abstract It is important to study the pulse response characteristic of one-dimensional PSD and rules of output photocurrent under the condition of pulsed light irradiation in order to compute the incident position of pulsed light accurately. The function of the pulsed light is presented, and the pulse response characteristic of PSD is discussed in the case of four different modes of pulsed light, and the phenomenon of pulse pile up is also studied. The results show that if the irradiation time of the pulsed light is much greater than the response time, the incident position of pulsed light satisfies the conversion formula of one-dimensional PSD. When the irradiation time of light is less than the response time, as long as irradiation time is 2.5 times greater than the time response constant, the shorter time of stopping irradiation is, the more preferable linear relation between incident position and output currents of PSD is.

Key words pulse light mode; one-dimensional position sensitive detectors (PSD); response characteristic; pulse pile up

引 言

近年来, 国内对位置敏感探测器 (position sensitive detectors PSD) 的研究越来越多。与传统的积分扫描探测器相比, 响应速度快是 PSD 的一个显著特点^[1-3]。在目前的研究中, 大多利用 PSD 的稳态响应确定入射光斑的位置, 由于光源是连续稳定的聚焦激光束, 其照射时间远远大于 PSD 的响应时间, 故 PSD 的瞬态特性不需要加以考虑。然而当把 PSD 应用于粒子物理、高能物理、生物医学、闪烁成像等领域时, 要求 PSD 有足够高的响应速度, 从而能够准确确定高频入射脉冲的位置。因此, 研究一维 PSD 脉冲响应特性, 分析缩短脉冲周期的关键因素, 对消除“脉冲堆

积”现象, 保证含有脉冲入射位置信息的光生电流输出值的准确性有着十分重要的意义。国外已有文献报道有关 PSD 的脉冲响应特性, 但都只分析了 PSD 的宽脉冲响应特性^[4,5]。本文中将从脉冲光的 4 种模式入手, 对 PSD 的脉冲响应特性进行详细的分析, 重点讨论了“脉冲堆积”现象对调制光脉冲周期的限制。

1 一维 PSD 的解析解

PSD 是一种基于横向光电效应的光电位置敏感器件。在完全反偏状态下, 一维 PSD 的结电势差 φ 满足 Lucovsky 方程, 并可以简化为^[2]:

$$\frac{\partial \varphi(x, t)}{\partial t} - \frac{1}{rc} \nabla^2 \varphi(x, t) = f(x, t) \quad (1)$$

式中, r 为单位长度的面电阻; c 为单位面积的结电容, $f(x, t)$ 为外源项, t 为时间, x 为 PSD 光敏面上任意一点的位置。

假设 PSD 光敏面的长度为 l (单位为 mm), 负载及

作者简介: 尚鸿雁 (1976-), 女, 博士, 现从事光学仪器和光电检测技术研究工作。

E-mail: shangheather11@sina.com

收稿日期: 2004-06-21; 收到修改稿日期: 2004-07-26

电极接触电阻为 Q 则边界条件为 $\varphi(Q, t) = \varphi(l, t) = Q$ 初始条件为 $\varphi(x, 0) = Q$

由冲量定理和分离变量法, 可以求出方程 (1) 的解为:

$$\varphi(x, t) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^l \int_0^t f(\zeta, \tau) \sin \frac{n\pi\zeta}{l} \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} \times \exp\left[-\frac{n^2\pi^2}{rc^2}(t-\tau)\right] d\zeta d\tau \quad (2)$$

式中, $f(\zeta, \tau)$ 表示在 τ 时刻 ζ 位置处产生的电流函数。根据欧姆公式:

$$\frac{\partial \varphi(\vec{n}, t)}{\partial \vec{n}} = -ir \quad (3)$$

式中, \vec{n} 为光敏面的法线向量, i 为 PSD 光敏面上产生的电流。可以求出一维 PSD 两电极上所获得的电流分别为:

$$i_1(x, t) = \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{2\pi}{rl^2} \times$$

$$\left\{ \sum_{n=1}^{\infty} n \int_0^l \int_0^t f(\zeta, \tau) \sin \frac{n\pi\zeta}{l} \exp\left[-\frac{n^2\pi^2}{rc^2}(t-\tau)\right] d\zeta d\tau \right\} \quad (4a)$$

$$i_2(x, t) = -\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=l} = -\frac{2\pi}{rl^2} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \times$$

$$n \int_0^l \int_0^t f(\zeta, \tau) \sin \frac{n\pi\zeta}{l} \exp\left[-\frac{n^2\pi^2}{rc^2}(t-\tau)\right] d\zeta d\tau \right\} \quad (4b)$$

式中, $t_c = \frac{rc^2}{\pi^2}$ 称为一维 PSD 的时间响应常数, i_1, i_2 为

PSD 左、右电极输出的电流。

当光生电流输出值不随时间发生变化时, 就认为光生电流输出达到了稳态。把光生电流值变化为稳态输出值的 98% 时所用的时间, 定义为 PSD 的响应时

$$\varphi(x, t) = \frac{2rI_0}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin \frac{n\pi x}{l} \sin \frac{n\pi x_0}{l} \cdot \sum_{k=1}^m \left\{ \left[1 - \exp\left[-\frac{n^2\pi^2}{rc^2}[t-(k-1)T]\right] \right] \times \right. \\ \left. U[t-(k-1)T] - \left[1 - \exp\left[-\frac{n^2\pi^2}{rc^2}[t-t_p-(k-1)T]\right] \right] U[t-t_p-(k-1)T] \right\} \quad (7)$$

PSD 两电极上所获得的电流为:

$$i_1 = \frac{2I_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi x_0}{l} \cdot \sum_{k=1}^m \left\{ \left[1 - \exp\left[-\frac{n^2\pi^2}{rc^2}[t-(k-1)T]\right] \right] \times \right. \\ \left. U[t-(k-1)T] - \left[1 - \exp\left[-\frac{n^2\pi^2}{rc^2}[t-t_p-(k-1)T]\right] \right] U[t-t_p-(k-1)T] \right\} \quad (8a)$$

$$i_2 = -\frac{2I_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos(n\pi) \sin \frac{n\pi x_0}{l} \cdot \sum_{k=1}^m \left\{ \left[1 - \exp\left[-\frac{n^2\pi^2}{rc^2}[t-(k-1)T]\right] \right] \times \right. \\ \left. U[t-(k-1)T] - \left[1 - \exp\left[-\frac{n^2\pi^2}{rc^2}[t-t_p-(k-1)T]\right] \right] U[t-t_p-(k-1)T] \right\} \quad (8b)$$

选取典型值 $I_0 = 0.2 \text{ mA}$, $r = 10 \text{ k}\Omega$, $c = 30 \text{ pF/mm}^2$, $l = 10 \text{ mm}$, 在一束光强恒定, 入射光斑很小的点光源照射下, 经计算得 PSD 的响应时间 $t_m = 4.2 (rc^2/\pi^2)^{1/2}$ 。下面将根据图 1 所示的 4 种不同的脉冲模式, 对一维

间, 记为 t_m 。

从 PSD 的产品手册中可以得到, 一维 PSD 入射光斑与稳态光生电流输出值之间的转化公式为:

$$x = \frac{l}{2} \left(1 - \frac{i_1 - i_2}{i_1 + i_2} \right) \quad (5)$$

2 脉冲光照射下的一维 PSD 瞬态特性分析

设光源为一维源脉冲光, 空间与时间分布可分别采用狄拉克函数和阶梯函数表示:

$$f(x, t) = \frac{I_0}{c} \delta(x - x_0) \cdot \sum_{k=1}^m \{ U \times$$

$$[t - (k-1)T] - U[t - t_p - (k-1)T] \} \quad (6)$$

式中, I_0 为单位面积上 PSD 产生的光电流密度; x_0 为脉冲光入射位置; 脉冲周期 $T = t_p + t_d$, t_p 为光照时间, 即脉冲宽度, t_d 为脉冲间隔, m 为脉冲周期的个数。其形式如图 1 所示。图中与一维 PSD 的响应时间 t_m 相比, 图 1a 是长脉冲、长间隔, 即 $t_p \gg t_m, t_d \gg t_m$; 图 1b 是短脉冲、长间隔, 即 $t_p < t_m, t_d \gg t_m$; 图 1c 是长脉冲、短间隔, 即 $t_p \gg t_m, t_d < t_m$; 图 1d 是短脉冲、短间隔, 即 $t_p < t_m, t_d < t_m$ 。

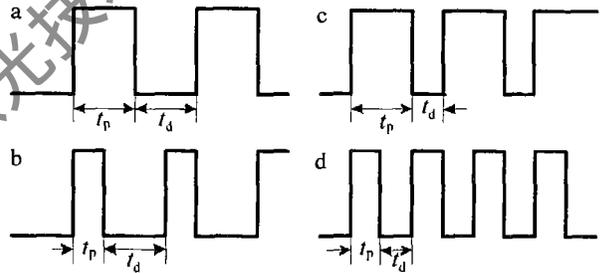


Fig 1 Pulse function

由 (2) 式可求得脉冲光照射下一维 PSD 电势分布:

PSD 在脉冲光照射下的瞬态特性给予逐一分析。

2.1 长脉冲、长间隔 ($t_p \gg t_m, t_d \gg t_m$)

当光脉冲宽度和间隔远远大于 PSD 响应时间时, PSD 的光生电流输出在光照射时间和停止照射时间内

均达到稳态。图 2 中给出了光照射位置与 PSD 光敏面长度的比值 $x_0/l=0, 1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$, $t_p = t_d = 7t_m$ 时, 两个脉冲周期内输出的光生电流 i_i 与 $t/(rc^2/\pi^2)$ 的关系曲线图。

从图 2 可以看出, 在每一个光照位置处, 光生电流输出从 0 变化到稳态值所用的上升时间和从稳态值衰减到 0 所用的下降时间相等, 并且随着光照位置越靠近电极, 光生电流的上升或下降时间越短。

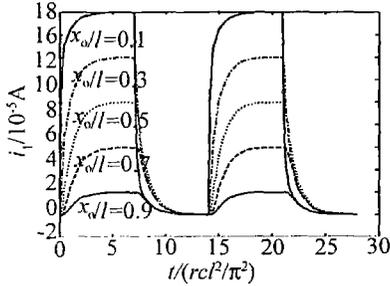


Fig 2 Curve drawing of i_i and $t/(rc^2/\pi^2)$ with different incident positions

在光照射时间内, 当光生电流输出达到稳态时, 满足一维 PSD 的转化公式, 即 PSD 探测到的光能量重心位置与输出电流成线性关系^[7]。图中光生电流脉冲的周期与光脉冲周期相等, 如果要获得稳态光生电流输出值, 则光生电流脉冲函数的占空比应取为 $[t_p - 4 \cdot 2(rc^2/\pi^2)]/T$, 光生电流获取时间向后延迟 $4 \cdot 2(rc^2/\pi^2)$ 。

2.2 短脉冲、长间隔 ($t_p < t_m, t_d \gg t_m$)

当 $t_p < t_m$ 时, 由于光照射时间短, PSD 输出的光生电流值 i_i 随光照射时间 t_p 的延长而逐渐增大, 脉冲宽度 t_p 越小, i_i 的脉冲波形越接近尖脉冲形状。而在光停止照射的时间内, PSD 有足够长的时间使得光生电流的输出达到稳态, 即电流输出为 0 并且下降时间不随光生电流峰值的不同而改变, 如图 3 所示。图中给

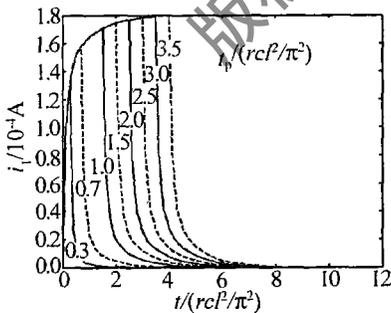


Fig 3 Curve drawing of i_i and $t/(rc^2/\pi^2)$

出了 $x_0/l=0, 1, t_d = 7t_m, t_p/(rc^2/\pi^2)$ 从 0.30~3.5 时, i_i 与 $t/(rc^2/\pi^2)$ 的关系曲线图。此时电流脉冲的周期 $T \gg t_p + 4 \cdot 2rc^2/\pi^2$ 。

图 4 是 $t_d \gg t_m$, 光照射位置与 PSD 光敏面长度的比值 $x_0/l=0, 1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ 时, 瞬态输出的光生电流 i_i 相对于稳态时光生电流输出值的变化量与 $t_p/(rc^2/\pi^2)$ 的关系曲线图。在入射光点位置 $x_0/l=0, 1$

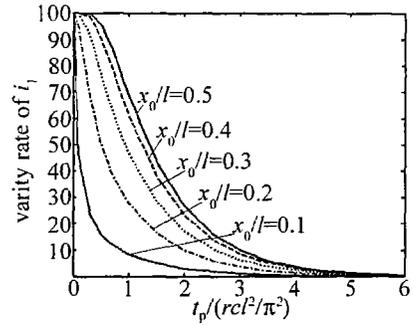


Fig 4 Curve drawing of i_i and $t_p/(rc^2/\pi^2)$ with different incident positions 处, 电流值 i_i 的变化量随着光脉冲宽度 t_p 的增加而减小。入射光点位置越靠近 PSD 中心时, 对同一光脉冲宽度 t_p , 电流值 i_i 的变化量越大, 故导致 PSD 输出的光生电流值不能线性的反映脉冲光的入射位置。

2.3 长脉冲、短间隔 ($t_p \gg t_m, t_d < t_m$)

当 $t_p \gg t_m$ 时, 光生电流的输出可以达到稳态; 当 $t_d < t_m$ 时, 光生电流的输出不能够达到稳态。当光脉冲的下一个周期 ($m > 1$) 到来时, PSD 本身已经存在有一定电势分布, 而新吸收的光能量在扩散过程中就会叠加在现有的电势分布上, 造成 PSD 瞬态输出的光生电流值与前一脉冲照射下输出的电流值相比变大。这种现象被称为“脉冲堆积”现象。

令 $x_0/l=0.5, m=3, t_p/(rc^2/\pi^2)=5.0$ 得到图 5a 不同脉冲间隔 t_d , 光生电流 i_i 与 $t/(rc^2/\pi^2)$ 的关系曲线图, 图 5b 是 5a 图中圈住部分的局部放大。图 6 中给出了随着 t_d 延长, 光生电流 i_i 增加值占稳态电流值的比率关系。

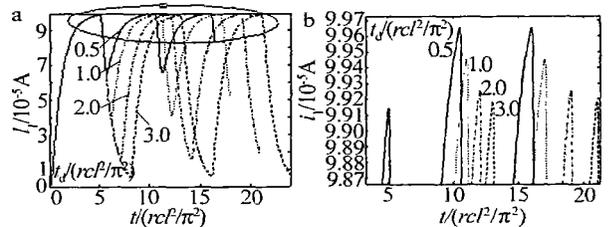


Fig 5 Curve drawing of i_i and $t/(rc^2/\pi^2)$ with different falling time widths a—pulse photocurrents output b—the phenomenon of pulse pile up

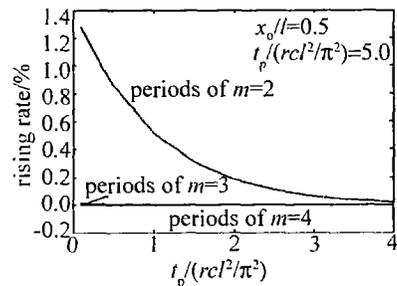


Fig 6 Drawing of rising rate of i_i with probing of t_d

从图 5a 和 5b 中可以清楚地看到由于“脉冲堆积”现象的影响, 在后一个光脉冲周期内输出的光生电流峰值比前一个周期光脉冲照射时得到的峰值偏

大。从图 6 中得出, 光生电流的增加主要集中在第 2 个脉冲周期, 而且下降时间 t_d 越长, 光生电流的增加幅度越小。在第 3 第 4 个脉冲周期以后, 光生电流几乎没有增加, 等于稳态时光生电流的最大值, 所以也满足一维 PSD 的转化公式。原因是根据能量守恒定律, 稳态意味着输出的能量等于吸收的能量。当吸收的能量大于输出的能量时, PSD 就会迅速释放能量以重新达到新的能量平衡, 从而造成最终 PSD 输出的光生电流就是稳态时的最大值。所以, 当 $t_p \gg t_m$, 即使下降时间 t_d 小于 PSD 的响应时间, 经过两个脉冲周期后, 光生电流的输出值将满足 PSD 的光斑定位公式, 不会给测量结果引入误差。

2.4 短脉冲、短间隔^[8] ($t_p < t_m, t_d < t_m$)

这种情况下不论在光脉冲的照射时间内还是停止照射时间内, 光生电流的输出都不能够达到稳态, 同样也会出现“脉冲堆积”现象。令 $m = 6, x_0/l = 0.5$, 得到不同脉冲宽度、脉冲间隔条件下, 光生电流输出的脉冲波形图, 见图 7。

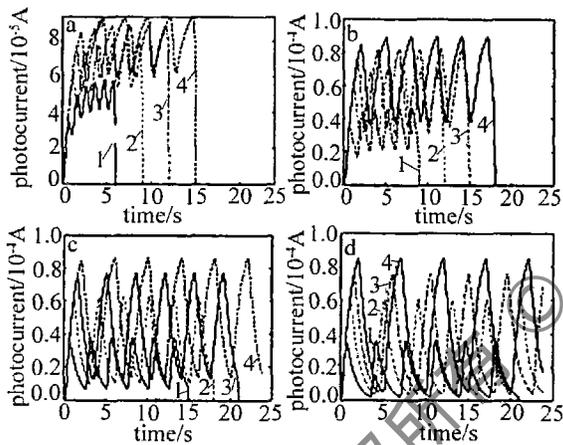


Fig 7 Wave drawing of outputting pulse photocurrent a- $t_d/t_c = 0.5$
 1- $t_p/t_c = 0.5$, 2- $t_p/t_c = 1.0$, 3- $t_p/t_c = 1.5$, 4- $t_p/t_c = 3.0$
 b- $t_d/t_c = 1.0$ 1- $t_p/t_c = 0.5$, 2- $t_p/t_c = 1.0$, 3- $t_p/t_c = 1.5$
 4- $t_p/t_c = 2.0$ c- $t_d/t_c = 2.0$ 1- $t_p/t_c = 0.5$, 2- $t_p/t_c = 1.0$
 3- $t_p/t_c = 1.5$ 4- $t_p/t_c = 2.0$ d- $t_d/t_c = 3.0$ 1- $t_p/t_c = 0.5$
 2- $t_p/t_c = 1.0$, 3- $t_p/t_c = 1.5$ 4- $t_p/t_c = 2.0$

从图中看出, 对于同一个脉冲间隔, 脉冲宽度越长, PSD 输出的光生电流越大。在每一组光脉冲照射下, PSD 输出的光生电流峰值都是逐渐在增加, 经过几个脉冲周期, 光生电流的峰值最终都趋于一个恒定值, 等于在 $t_p \gg t_m, t_d \gg t_m$ 时产生的稳态输出的光生电流峰值。并且占空比 t_p/t_d 越大, 光生电流峰值最终达到的恒定值越大, 达到恒定值所用时间越短。

图 8 是在同一脉冲宽度 (或脉冲间隔), 不同脉冲间隔 (或脉冲宽度), 光斑位置中心与 $1 - (i_1 - i_2)/(i_1 + i_2)$ 的关系曲线。图 8a 中在 $t_p/t_c = 0.5$ 随着 t_d/t_c 比值越大, 光斑位置中心与 $1 - (i_1 - i_2)/(i_1 + i_2)$ 非线性越严重。而图 8b 中, 在 $t_d/t_c = 0.5$ 随着 t_p/t_c 比值

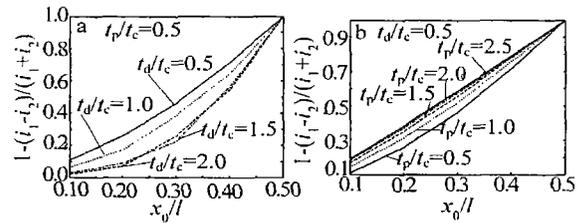


Fig 8 Curve drawing of incident position of light and $1 - (i_1 - i_2)/(i_1 + i_2)$ a- the same pulse width b- the same pulse interval

越大, 光斑位置中心与 $1 - (i_1 - i_2)/(i_1 + i_2)$ 越接近线性关系。在 $t_p/t_c > 2.5$ 时, 光的入射位置与 $1 - (i_1 - i_2)/(i_1 + i_2)$ 基本上为线性关系了。这些充分说明: 当把光源调制成脉冲信号时, 脉冲周期 $T = t_p + t_d$ 不一定要保证 $t_p \gg t_m, t_d \gg t_m$, 占空比为 1:1。只要满足 $t_p > 2.5t_c, t_d/t_c$ 越小, 光的入射位置与 $1 - (i_1 - i_2)/(i_1 + i_2)$ 之间越接近线性关系。

3 结 论

给出了脉冲光照射下一维 PSD 输出光生电流的解析解。从 4 种脉冲光模式入手, 分析脉冲光生电流的周期和输出特性, 对“脉冲堆积”现象进行了详细的讨论。得出当光源的脉冲宽度和间隔满足 $t_p \gg t_m, t_d \gg t_m$ 时, PSD 输出的脉冲光生电流的周期不变, 获得稳态输出脉冲电流值的占空比为 $4.2(rc_l^2/\pi^2):T$ 。当脉冲光满足 $t_p < t_m, t_d \gg t_m$ 时, PSD 输出的光生电流值不能线性的反映光斑能量中心位置。而当脉冲光源被调制成最后两种脉冲信号模式时, 脉冲周期 $T = t_p + t_d$ 不一定要保证 $t_p \gg t_m, t_d \gg t_m$, 占空比为 1:1。只要 $t_p > 2.5(rc_l^2/\pi^2), t_d/(rc_l^2/\pi^2)$ 越小, 光的入射位置与 $1 - (i_1 - i_2)/(i_1 + i_2)$ 之间则越接近线性关系。

参 考 文 献

- [1] LUCOVSKY G. Photoeffects in nonuniformly irradiated p-n junctions [J]. J A P, 1960 31(6): 1088~1095
- [2] 黄梅珍. 位置敏感探测器的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2001. 10~25.
- [3] 袁红星. 位置敏感探测器定位理论与应用研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 1999. 39~45.
- [4] KLEN C A, BIERIG R W. Pulse-Response characteristics of position-sensitive photodetectors [J]. IEEE Trans 1974 ED21(8): 532~537
- [5] DUTTA A K, HATANAKA Y. A study of the transient response of position-sensitive detectors [J]. Solid-State Electronics 1989, 32(6): 485~492
- [6] 尚鸿雁, 张广军. 不同光源模式下二维 PSD 响应特性分析 [J]. 光电工程, 2005 32(1): 1~4
- [7] NARAYANAN C, BUCKMAN A B, BUSCH-VISHNIAC I et al. Position dependence of the transient response of a position-sensitive detector under periodic pulsed light modulation [J]. IEEE Trans 1993 ED40(9): 1688~1694
- [8] DUTTA A K, HATANAKA Y. An analysis for the assessment of position distortion for fast excitation in two-dimensional position-sensitive devices (PSD) [J]. Solid-State Electronics 1991, 34(8): 875~882.