

# 用于高能 X 光测量的 Si-PIN 阵列探测器\*

彭宇飞, 马 冰, 石金水

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 设计了用于高能 X 光测量的小面积 PIN 硅光电二极管阵列探测器, 通过理论计算和 EGSnrc 蒙特卡洛软件模拟分析了 Si-PIN 的探测灵敏度、线性电流和时间响应。根据理论研究可知, 该探测器适用于大注量率、高能韧致辐射光的空间分辨力(3 mm)和时间分辨力(8 ns)的测量。并在理论设计的基础上进行了部分实验, 采用小面积 PIN 硅光电二极管和放大电路, 在“神龙一号”直线感应加速器上进行高能 X 光的测量, 初步得到了 PIN 硅光电单元的响应结果, 为阵列小面积 PIN 光电管阵列的实用设计提供优化基础。

**关键词:** 阵列探测器; 高能 X 光; 灵敏度; 时空分辨直线感应加速器

**中图分类号:** TL814 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20102203.0651

电流型 PIN 半导体探测器具有灵敏度高、时间响应快的特点, 随着微加工工艺的完善, 易实现空间和空间分辨, 被广泛应用于脉冲辐射场的探测。PIN 可用于带电粒子的探测, 也可通过中性粒子与介质作用产生次级带电粒子, 实现对 X 光、 $\gamma$  光、中子的探测<sup>[1-2]</sup>。PIN 探测 X 光的原理比较简单, PIN 灵敏层与 X 光相互作用, 反应方式主要为光电效应、康普顿效应和电子对效应, X 光在半导体中沉积能量并激发出电子-空穴对, 载流子在外加反向偏压下向两极漂移形成信号电流。将输出信号放大采集, 可得到光通量的时间分布。待测高能 X 光由 20 MeV 强流直线感应加速器产生, 为 0~20 MeV 的宽韧致辐射谱; 电子束脉冲宽度(FWHM)约为 70 ns, X 光的焦斑直径(FWHM)约 1.5 mm<sup>[3]</sup>。为了测量高能 X 光的时间变化和空间分布, 以及采用 Rollbar 法测量焦斑尺寸<sup>[4]</sup>, 要求 1 维 PIN 阵列探测器有较高的时间分辨(约 8 ns)和空间分辨(小于 3 mm)能力。本文按照实际需求, 设计了 PIN 阵列探测器, 计算并分析了主要性能, 如线性电流、灵敏度和时间响应。

## 1 1 维 PIN 阵列探测器设计

PIN 阵列探测器理论设计包括几个方面: (1) 按空间分辨的要求确定所需的阵列单元宽度或面积范围; (2) 根据待测光的能谱特征和灵敏度要求, 确定探测介质材料和灵敏层(I 层)厚度范围; (3) 由探测灵敏度和待测光强, 分析单元的线性范围, 反馈给尺寸设计; (4) 根据材料和尺寸范围确定响应时间, 反馈给尺寸设计和材料选择; (5) 由待测光能谱特性、探测器的能谱响应和能量线性要求, 确定如何改善能量线性。

由于各性能对设计的要求存在矛盾, 设计中需要不断反馈和调和, 以得到符合实际要求的设计, 同时考虑到工艺简单性, 确定采用  $\phi 2$  mm 的圆形 Si-PIN 管, 取 I 层厚度为 250  $\mu\text{m}$ 。1 维硅 PIN 阵列探测器结构设计示意如图 1 所示。

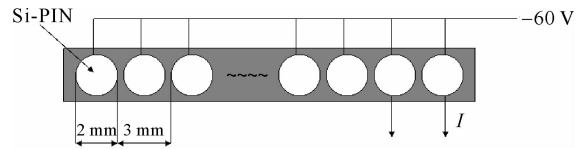


Fig. 1 Schematic view of one-dimensional PIN array detector

图 1 1 维 PIN 阵列探测器示意图

## 2 PIN 阵列单元探测器性能计算

### 2.1 工作原理和输出线性电流

PIN 管的输出线性与偏压在灵敏层内形成的电场、入射辐射在灵敏层中产生的载流子空间电荷密度等诸多因素有关<sup>[1]</sup>。PIN 反偏下的输出伏安特性如图 2 所示, 其中,  $E_d$  为灵敏区的沉积能量(MeV),  $E_d = 0$  对应无沉积能量的情况,  $E_d > 0$  对应不同沉积能量下的特性曲线,  $R_L$  为输出电路的负载电阻,  $U, I$  分别为 PIN 两端的电压和输出电流。

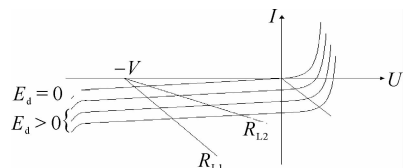


Fig. 2 Volt-ampere characteristic of PIN

图 2 PIN 的伏安特性

\* 收稿日期: 2009-12-04; 修订日期: 2009-12-21

作者简介: 彭宇飞(1985—), 男, 湖南株洲人, 硕士研究生, 研究方向为强流粒子束; bangyf03@gmail.com。

根据图 2 可知:影响线性的因素包括反偏电压、负载电阻和沉积能量,而沉积能量则取决于 PIN 管的灵敏面积和厚度。在一定范围内,增大反偏电压和减小负载电阻可获得更好的线性。根据文献[1]中的贯穿辐射近似描述和实际参数来估算线性电流密度  $F(j)$  和电流  $j$  值。

$$F(j) = \left( \frac{2AR_L}{V^2} + \frac{d^3}{2\mu_p \epsilon \epsilon_0 V^2} \right) j - \left( \frac{AR_L}{V} \right) \quad (1)$$

式中: $A$  为灵敏层有效面积; $V$  为外加反向偏压; $d$  为灵敏层厚度; $\mu_p$  为 300 K 下空穴迁移率; $\epsilon$  为硅介电常数; $\epsilon_0$  为真空电容率。

线性电流密度的选择根据式(1)的值偏离第一项线性项 1% 而定。对于尺寸为  $\phi 2 \text{ mm} \times 250 \mu\text{m}$  的 PIN 管,线性电流可达 1.87 A,远高于可能输出的电流值。线性电流密度随着面积减小可迅速提高,因此通常不需担心小面积 PIN 的输出线性问题。对于大面积 PIN,在注量较大时,必须考虑输出饱和的问题。

## 2.2 灵敏度及其能量线性

灵敏度是探测器最重要的参数之一,提高灵敏度的办法有 3 种:(1)使用转换靶,如通过聚四氟乙烯将光能量部分转换为电子,通过闪烁体将高能 X 光转换为可见光等;(2)增大探测体积,即增大面积和径向厚度;(3)采用高反应截面的探测介质,采用高  $Z$  材料,如锗、砷化镓等探测高能 X 光。对于要求高时间和空间分辨的硅 PIN 管阵列探测器,采用转换靶会降低分辨能力;国内第二代、第三代半导体材料近年取得了长足发展,但其 PIN 工艺不成熟,还在基础研究阶段。因此需要协调增大灵敏层厚度与灵敏面积和空间分辨、时间分辨之间的矛盾。

### 2.2.1 灵敏度的 MC 计算

本文采用 MC 软件电子-光子簇射模拟(EGSnrc)来模拟 20 MeV 电子轰击厚 Ta 靶产生高能 X 光、高能 X 光经过空气等介质衰减和 X 光与探测介质相互作用沉积能量的过程。EGS 是一个开放软件、常用于计算穿透性光子和电子在物质中的耦合输运,可用来计算穿透粒子在物质中的通量和剂量分布等信息。

计算模型如图 3 所示。PIN 管的灵敏层主要是低掺杂的 I 层,因此直接使用本征硅厚度,以简化 PIN 的模型。EGSnrc 模拟得到硅 PIN 管前的高能 X 光通量和能谱、硅片中的能量沉积。PIN 灵敏层对高能 X 光的灵敏度计算方法如下<sup>[1,5]</sup>

$$S = \frac{Q}{\Phi} = \frac{E_d e / \omega}{\Phi} \quad (2)$$

式中: $\omega$  为硅中产生一对电子空穴对所需的平均能量,取 3.67 MeV; $Q$  为 X 光与硅作用产生的次级电子总电荷; $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ; $\Phi$  为入射硅层的 X 光注量( $\text{cm}^{-2}$ )。取  $2 \times 10^7$  个粒子进行模拟,结果如表 1 所示。该估算值可以作为确定设计的参考,但是实际灵敏度应以实验标定为准。

表 1 EGSnrc 模拟 X 通量与 PIN 中的能量沉积的结果

Table 1 EGSnrc-simulation results of X-ray flux and energy deposition in PIN

$E_d/\text{MeV}$	$Q/\text{C}$	$\Phi/\text{cm}^{-2}$	$S/(\text{C} \cdot \text{cm}^2)$
$5.66 \times 10^{-13}$	$7.12 \times 10^{-16}$	$3.59 \times 10^2$	$1.98 \times 10^{-18}$

根据 X 光各能区照射量和注量的关系<sup>[4]</sup>,可以加权得到能谱光的注量-照射量关系,采用热释光剂量片得到测量点的照射量,即可估算出 PIN 的理论输出电荷和电流,可与实验值比较。

### 2.2.2 能量线性及其改善

用 EGSnrc 计算得到硅 PIN 的灵敏度随光子能量的关系如图 4 所示,可知硅 PIN 探测较低能 X 射线时比较灵敏,而“神龙一号”高能韧致辐射的低能成分比较显著,因此硅 PIN 的灵敏度较高。根据模拟可得到不同能量光子在介质中沉积能量随径向深度的关系,如果要提高较高能区(如 6 MeV)的灵敏度,需要增加灵敏层厚度到几 mm。但是 PIN 的工艺难以实现几 mm 的 I 层,同时增大厚度会增加响应时间。由于能量线性较差,为了提高精度,应当保证阵列上入射的光谱基本一致。对于“神龙一号”加速器,在  $\theta < 2^\circ$  内 X 光能谱近似不变<sup>[6]</sup>,可以不考虑能量响应的非线性。

在条件不理想的情况下,为了改善能量线性同时提高灵敏度,可以在 PIN 前加一层聚四氟乙烯<sup>[5]</sup>,可以获得很好的线性,并将高能区的能量线性提高 1 个量级,不同聚四氟乙烯厚度下  $S-E$  曲线如图 5 所示。采用

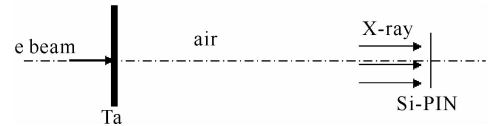


Fig. 3 Schematic view of simulation using EGSnrc

图 3 EGSnrc 模拟示意图

EGSnrc 可模拟不同厚度的聚四氟乙烯对灵敏度及其能量线性的影响,并根据被测光的能区选择最优厚度。但是次级电子在聚四氟乙烯层中散射会形成阵列单元之间的串扰,会限制空间分辨能力,光子散射对 mm 级阵列单元形成的串扰根据模拟结果知可以忽略。据 EGSnrc 模拟可知,对于 2 mm 厚度的聚四氟乙烯层,2 个单元之间的串扰可达百分之几。

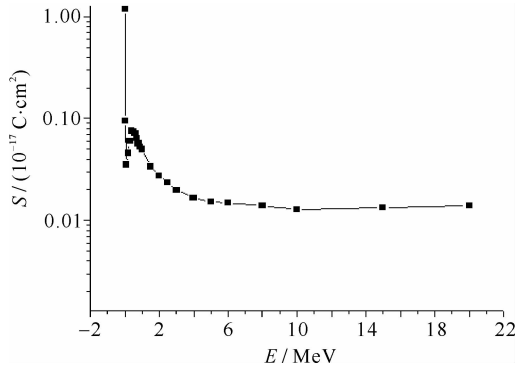


Fig. 4 Sensitivity-energy plots of 250  $\mu\text{m}$  little area PIN

图 4 250  $\mu\text{m}$  厚小面积 PIN 的 S-E 曲线

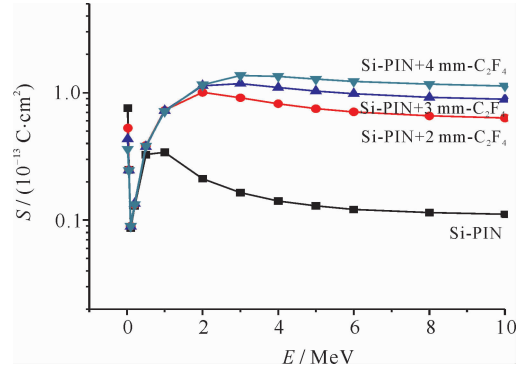


Fig. 5 Sensitivity increase and linearity improvement of PIN using PTFE with different thickness

图 5 不同厚度聚四氟乙烯对 PIN 灵敏度及能量线性的改善

### 2.3 时间响应

实现较高的时间分辨且在测量高能 X 光脉冲时不引起明显畸变,是实时测量的重要目标。根据测得的钨致辐射靶上电子束流强的时间分布,可知波形上下沿在 25 ns 左右,根据线性系统对脉冲响应的一般规律,探测半高宽应小于待测信号宽度的 1/3,因此探测阵列单元的时间响应设计目标在 8 ns。

PIN 半导体探测器时间响应来自两个方面:一是载流子在 PIN 结间的漂移时间,当所加偏压足够大使载流子漂移速率饱和时,载流子漂移时间取决于灵敏层厚度;二是探测器结间电容 C 和负载阻抗 R 构成的时间常数 RC 值。在面积较大、灵敏层很薄时以后者为主,对小面积 PIN 则以前者为主<sup>[7]</sup>。

高偏压下,如灵敏区电场强度在  $2 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$  V/cm 时,电子和空穴漂移速率近似不变  $v_e \approx 1 \times 10^7$  cm/s,  $v_p \approx 7.5 \times 10^6$  cm/s,根据 I 层厚度,可以计算出载流子漂移时间约分别为 2.5 ns 和 3.3 ns。采用砷化镓等高 Z 材料可以大大减小漂移时间,可到亚 ns 级。

PIN 管的结电容根据平板电容模型计算得到为 1.68 pF,负载电阻为 50  $\Omega$ ,时间常数为 0.084 ns,实际上,杂散电容对时间常数影响很大,需要实验标定。从计算可知,小面积 PIN 的时间响应较好,为信号采集放大电路的时间响应留下一定量余量。

### 3 实验结果

初步实验采用重庆光电研究所提供的小面积 PIN 硅光电二极管和放大电路,在“神龙一号”直线感应加速器上进行高能 X 光初步测量实验,初步得到了阵列单元在不同光照射量及不同光衰减条件下的响应结果,采用滤波后得到较平滑的响应波形。图 6 和图 7 分别为未滤波和经 TEK 示波器内部 20 MHz 滤波后的两次 X 光测量结果。经过分析噪声出现与主峰的时间关系,已确定噪声来自加速器脉冲功率系统的空间电磁辐射干

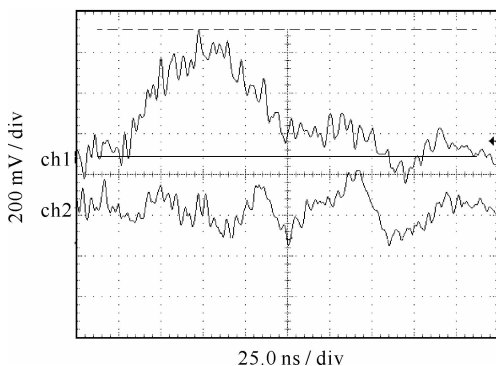


Fig. 6 Unfiltered PIN output wave

图 6 未滤波的 PIN 输出波形

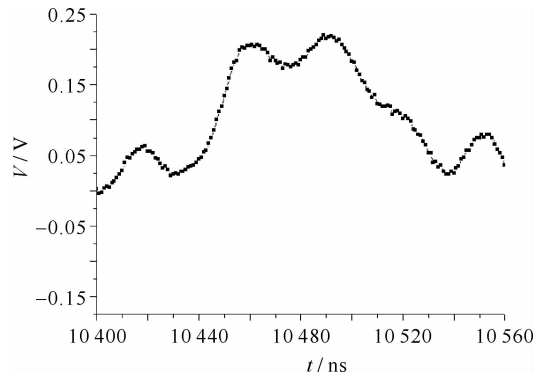


Fig. 7 PIN output wave filtered through 20 MHz lowpass

图 7 经 20 MHz 低通滤波的 PIN 输出波形

扰,根据其高频特性,采用 20 MHz 低通滤波可以将其有效滤除。PIN 对光脉冲的响应脉宽在 75 ns 左右,与电子束脉冲宽度符合。PIN 单元探测器的定量结果有待进一步实验。

## 4 结 论

给出了小面积硅 PIN 线列探测器的设计,通过理论计算和 EGSnrc 蒙卡模拟的方法计算了 PIN 的主要性能。从系统的角度出发,总结了 PIN 光电管单元设计的步骤,结合实际需求分析了各性能之间的关系,确定了设计参数。根据理论研究可知,该探测器可适用于闪光照相用“神龙一号”加速器大注量率、高能 X 光的空间分辨(3 mm)和时间分辨(8 ns)测量。实验得到了阵列单元在不同光照射量及不同光衰减条件下的响应结果,得到约 75 ns 的脉冲信号(FWHM),并通过合适的滤波措施去除了加速器脉冲功率系统噪声,得到了较干净的波形,为线列 PIN 光电管阵列的实用化设计提供了优化基础。进一步实验将得到线列单元对高能 X 光响应的定量结果,并与理论设计进行比较。

**致 谢** 感谢重庆光电研究所李万涛老师和但伟老师提供 PIN 放大电路及硅 PIN 管,并为实验提供了宝贵的建议。

## 参考文献:

- [1] 刘庆兆. 脉冲辐射场诊断技术[M]. 北京:科学出版社, 1994:173-185. (Liu Qingzhao. Diagnostic technology of impulse radiation. Beijing: Science Press, 1994:173-185)
- [2] 郭宏生,何锡钧,彭太平. 大面积 PIN 探测器性能参数实验测量[J]. 原子核物理评论, 2005, **22**(3):272-275. (Guo Hongsheng, He Xijun, Peng Taiping. Measurements of parameters on large area PIN detector. *Nuclear Physics Review*, 2005, **22**(3):272-275)
- [3] 丁伯南,邓建军,王华岑,等.“神龙一号”直线感应加速器[J]. 高能物理与核物理, 2005, **29**(6):604-610. (Ding Bonan, Deng Jianjun, Wang Huacen, et al. Dragon- I linear induction electron accelerator. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2005, **29**(6):604-610)
- [4] 施将君,刘军,刘进. 高能 X 射线源尺寸测量方法的 Monte Carlo 模拟[J]. 清华大学学报, 2007, **47**(s1):951-954. (Shi Jiangjun, Liu Jun, Liu Jin. Monte Carlo simulations of high energy X-ray source spot sizes. *Journal of Tsinghua University*, 2007, **47**(s1):951-954)
- [5] 欧阳晓平,王义,曹锦云,等. 高灵敏大面积硅 PIN 探测器阵列[J]. 核电子学与探测技术, 2000, **20**(5):329-331. (Ouyang Xiaoping, Wang Yi, Cao Jinyun. High-sensitivity large-area Si PIN detectors array. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2000, **20**(5):329-331)
- [6] 施将君,谢龙,管永红. 高能闪光照相 X 射线能谱的理论研究[J]. 强激光与粒子束, 1999, **11**(4):439-444. (Shi Jiangjun, Xie Long, Guan Yonghong. Theoretical research on X-ray spectra in the flash radiography. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(4):439-444)
- [7] 徐荣昆,周殿忠,李正宏. 小灵敏面积 PIN 半导体探测器性能改进[J]. 核电子学与探测技术, 1995, **15**(4):254-257. (Xu Rongkun, Zhou Dianzhong, Li Zhenghong. The improvement of small sensitive area PIN semiconductor detector behavior. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 1995, **15**(4):254-257)

## Si PIN detectors array for high energy X-ray measurement

Peng Yufei, Ma Bing, Shi Jinshui

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-106, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** One-dimensional little-area Si PIN detectors array for high energy X-ray measurement was developed. The sensitivity, linear output current and time response of the Si PIN were calculated theoretically and also simulated using MC software EGSnrc. According to the theoretical study, little-area Si PIN detectors array can be used to detect high intensity and high energy X-ray with better spatio-temporal resolution(3 mm-8 ns). Primary experiments were carried out based on the theoretical design on “Dragon- I ” linear induction electron accelerator using the Si-PIN photoelectric cell and the corresponding amplifier. Reasonable response of Si-PIN photoelectric cell was gained for optimum design of practical one-dimensional little-area Si PIN detectors array.

**Key words:** detector array; high energy X-ray; sensitivity; spatio-temporal resolution linear induction electron accelerator