

一维 PSD 瞬态响应特性的有限差分方法研究

陈冬严 林斌 陈钰清

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 国家光学仪器工程技术研究中心, 杭州 310027)

摘要 基于有限差分方法,提出了一种新的 PSD RC 网络传输线模型模拟算法. 利用该算法,得到了一维 PSD 在不同光信号激励下,从开始响应到进入稳态后的各个阶段的精确数值解. 揭示了 PSD 电极对不同照射点的起始响应时间的差异正相关于光入射点与 PSD 几何中心之间的距离. 在高速瞬态探测时,PSD 器件参数限制了激励光脉冲信号的频率,其最高调制速率为 $1/(3.75T_c)$. 模拟计算结果证明了 PSD 稳态位置响应结果与入射光类型和时间无关.

关键词 位置敏感探测器(PSD);有限差分法;响应时间

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

0 引言

位置敏感探测器(Position Sensitive Detector 简称 PSD)^[1,2]是 p-n 结型或肖特基型的半导体器件,它通过横向光电效应,将入射在器件表面光敏面上的激励光转换成光电流. 通过各电极上收集到的光电流信号的比例,可以确定激励光的重心位置. 与其它半导体器件相比,有分辨率高、光谱响应范围宽、位置响应速度快等优点,使其在自动控制、自动聚焦、自动对准、定位等方面获得广泛应用.

描述 PSD 器件的代表性理论有两种,其一是根据电荷守恒所建立的 Lucovsky 方程^[1,3],另一种是从等效电路模型出发,将 PSD 等效成均匀分布的 RC 网络传输线模型^[4,5]. 无论那种模型,以往的理论研究大多采用求解解析解的办法对其进行处理,计算复杂,且在许多情况下只能预知可能存在的某种趋势,具体参数对结果造成的影响无法处理. 有鉴于此,R. L. Cowin, M. Solal 等改用数值方法,利用计算机建立相应的模型并求解^[6,7]. 但是其模型对于光激励的类型和时间没有进行探讨. 本文利用有限差分算法对 PSD 进行数值模拟,计算和研究一维 PSD 在不同类型的激励光下面的响应性能,并对 PSD 的瞬态响应进行了理论探索.

1 PSD 有限差分模型

1.1 结构

图1是一个 p-n-n⁺ 类的 PSD 截面示意图. 衬底为 n 型高阻耗尽层,上面形成一层很薄的电阻率均匀的受光面 p 层,衬底背面形成电导率很高的 n⁺ 层. 当入射光照射到 PSD 的光敏面上时,在入射位置上就产生了与光能成比例的电荷,此电荷作为光

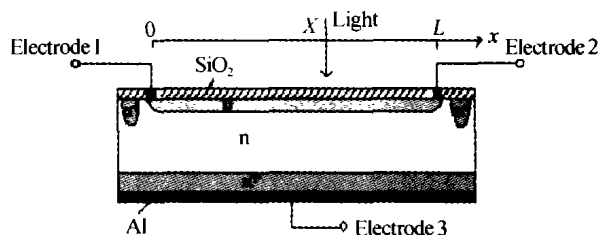


图1 一维 PSD 结构截面图
Fig.1 Schematic diagram of the 1D PSD under illumination (sectional view)

电流通过 p 层由电极输出. 假设坐标原点在电极 1 上,1,2 电极间的距离为 L,激励光入射点离电极 1 的距离为 X,电极 3 接地,则位置表达式为

$$1 - \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2} = \frac{2X}{L} \quad (1)$$

1.2 一维 PSD 有限差分模型

在 PSD 器件分流层电阻率均匀分布,工作在完全反偏状态,光激发电流远大于 p-n 结的反向饱和电流,并且负载及电极接触电阻为零的情况下,根据文献[3],一维 PSD 的 RC 网络微分表达式为

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{1}{RC} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \frac{U}{R_{sh}C} \quad (2)$$

式中, C 是单位面积结电容, R 为面电阻,起分配电流的作用; R_{sh} 是结电阻,反映了 p-n 结漏电流的大小. PSD 的 RC 网络结构如图 2 所示.

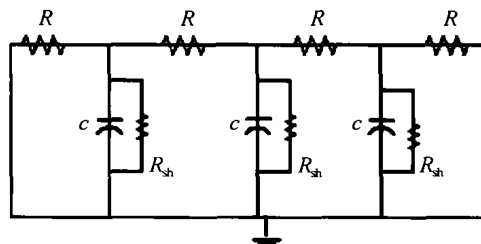


图2 一维 PSD 的 RC 网络示意图
Fig.2 Schematic diagram of the 1D PSD RC transmission-line network

一般情况下, $R_{sh} \gg R$, 所以式(2)可近似为

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{1}{RC} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (3)$$

光生电流在结内的漂移时间在纳秒量级上,与 RC 网络的时间常数相比可以忽略,所以 C 和 R 决定了电流在 PSD 内的传输响应时间. 文献[4]认为一维 PSD 的时间常数为 $T_c = RCL^2/\pi^2$.

方程(3)与一维热传导方程相类似,我们采用 Crank-Nicholson 隐式差分格式^[8],利用 6 点网格并结合数值差分基于中间网格点对其进行差分处理,计算准确度为 $O(h^2 + k^2)$.

假定一维 PSD 的长度为 L,探测响应时间为 T,则将矩形区域 $R = \{(x, t) : 0 \leq x \leq L, 0 \leq t \leq T\}$ 分成 $(n - 1) \times (m - 1)$ 个小矩形,长宽分别为 $\Delta x = h$ 和 $\Delta t = k$,如图 3 所示.

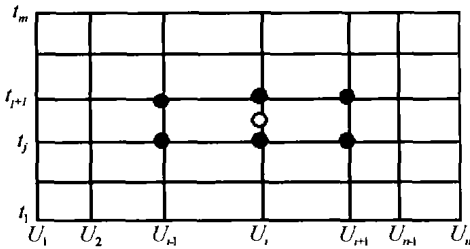


图 3 差分空格样板
Fig. 3 Blank templet of difference

用符号 $U_{i,j}$ 表示 $U(i, j)$, 得到方程(3)的差分方程

$$\frac{U_{i,j+1} - U_{i,j}}{k} = \frac{1}{RC} \frac{U_{i-1,j+1} - 2U_{i,j+1} + U_{i+1,j+1} + U_{i-1,j} - 2U_{i,j} + U_{i+1,j}}{2h^2} \quad (4)$$

假定 j 层各项已知,现求解 j + 1 层,令 $r = c^2 k/h^2$,改写上式,将未知参数放到等式左边,得

$$-rU_{i-1,j+1} + (2 + 2r)U_{i,j+1} - rU_{i+1,j+1} = (2 + 2r)U_{i,j} - rU_{i-1,j} + r(U_{i-1,j} - U_{i+1,j}) \quad (5)$$

这是一个对称且对角占优的三对角线性代数方程,可用追赶法求解.

1.3 初始和边界条件

1.3.1 边界条件

由于外接放大电路的电阻与 PSD 内阻相比很小,可以近似认为 PSD 的电极接地. 于是有

$$U(0, t) = U(L, t) = 0 \quad (6)$$

1.3.2 连续光信号激励

假设有一光强恒定,光斑直径很小的连续光照射在 PSD 表面的节点 X 处,光照位置则可以用 δ 函数表示. 则归一化后的光激励函数为

$$U(x, t) = T(t)\delta(x - X) \quad (7)$$

式中 $T(t)$ 是阶梯函数(step function),

$$T(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases}$$

为了方便讨论,使用归一化的光激励函数,另外在讨论结果的时候,也将结果归一化,这样即使使用的参数不同,所得到的结果可以类比.

1.3.3 脉冲光信号激励

如果光信号不是阶梯连续恒定光,而是方波脉冲,这是调制探测时经常遇到的情况,假设脉冲时间长度为 t_d ,则相应的激励函数为

$$U(x, t) = (T(t) - T(t - t_d))\delta(x - X) \quad (8)$$

$$\text{式中 } T(t - t_d) = \begin{cases} 1 & t > t_d \\ 0 & t \leq t_d \end{cases}$$

2 模拟结果和讨论

2.1 光激励点与探测时间的关系

取 $R = 30 \text{ K}\Omega, C = 3 \text{ pf/mm}^2, L = 10 \text{ mm}$,特征时间 T_c 约为 $1 \mu\text{s}$. 假设光点入射在 3 mm 处,且为连续光激励,经过一个 T_c 时间后,一维 PSD 的各点电压分布随时间和位置的变化如图 4 所示.

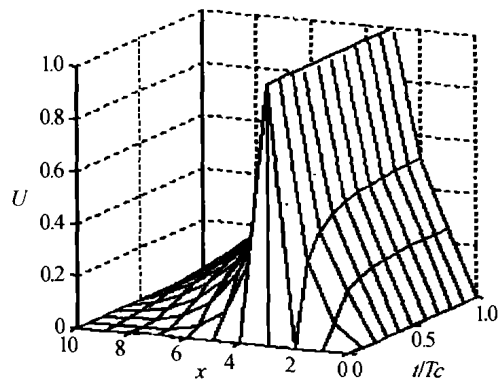


图 4 电压随时间/位置变化关系图
Fig. 4 Voltage response vs normalized time for different illuminated positions

可以看到,在 $(3, t)$ 的位置上,由于光激励的持续注入产生光生电流有了 1 单位的电压,然后迅速扩散, $\Delta t = 2$,其它各点上就产生了电压. 随着探测时间的增加,最终可以达到稳态.

接着研究公式(1)在时域上的准确特性. 考察 5 个特征时间内的 PSD 响应特性,将时间和位置区域各均分 101 个点,位置步长为 0.1 mm,时间步长为 $0.05 \mu\text{s}$,误差为 $\pm 10 \mu\text{m}$ 量级(Hamamatsu 一维 PSD 探测误差^[9]). 各入射点的计算结果见图 5. 其中,水平轴为时间步长数,垂直轴为根据式(1)计算出的光照位置点 X. 从图上可以得到以下两个结论:

1) 各个点上开始响应的的时间有先后,且越靠近 PSD 几何中心,开始响应时间越短. 中心点经过一个步长就开始响应,而 $x/L = 0.1$ 的边缘点直到第三个时间步长才出现响应. 出现这种状况的原因是激励光产生的光生电荷在 PSD 内扩散并到达电极的

时间由于位置的不同而略有差异,从而使 PSD 的响应产生误差.

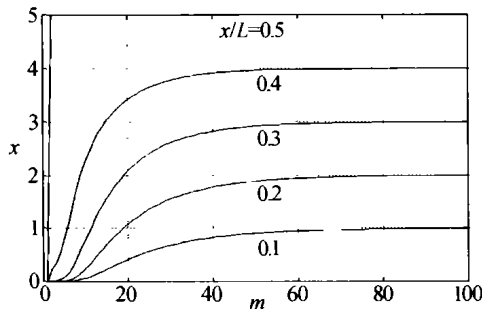


图 5 入射位置点与探测时间关系的计算
Fig. 5 Calculated response-difference vs normalized time for different illuminated positions

2) 一般认为 PSD 的特征响应时间为 $T_c = RCL^2/\pi^2$, 经过这个时间后 PSD 就线性响应了. 但是从实际计算结果看, 经过一个特征时间后, 计算出的位置点的值与最终稳态值的误差呈两头大中间小的特性. 在 PSD 几何中心很小的一个区域内器件的位置响应达到了线性, 而各点随着离中心距离的扩大达到线性响应所需的时间也依次增大. $X/L = 0.4 \sim 0.1$ 的各点到达线性响应的时间与 T_c 的比值依次约为 2.75、3.25、3.75、3.75. 所以, 在探测时间与特征响应时间相比拟时, 一方面必须考虑器件的参数结构, 减小其面电阻和单位面积结电容, 以及器件本身的长度; 另一方面也要考虑 PSD 的使用区域的问题. 当 PSD 在 1~3 倍特征时间内进行探测时, 只能使用相应的线性响应区域. 另外也可以看出, 当使用全部 PSD 有效光敏面时, 激励光脉冲的频率约为 $1/(3.75T_c)$. 这也规定了调制探测时的调制频率上限.

2.2 光激励类型不同对结果的影响

PSD 探测的是入射激励光的能量重心位置, 所以对光斑的大小和形状没有特殊的要求. 这也是 PSD 探测的优势之一.

作者计算了入射光分别为 $T_d = 0.1T_c$ 的脉冲光和各占 1 个和 3 个网格单位的连续阶梯光和光斑. 假定探测时间为 $t = 9T_c$, 光激励点在 $x/L = 0.3$ 的位置, 部分结果见表 1, 其中第一行数值是探测时间与特征响应时间的比值, 第二行开始为 $(U_1 - U_2)/(U_1 + U_2)$, 表征 PSD 的响应位置点.

表 1 PSD 对各类型激励光的响应

t/T_c	0.1	1	3	4	9
阶梯光	0.9995	0.5240	0.4047	0.4011	0.4003
脉冲光	0.9995	0.5233	0.4046	0.4011	0.4001
光斑	0.9992	0.5105	0.4052	0.4017	0.4002

从表中可以看出三种类型光的计算结果完全吻合, 均在 4 倍特征时间左右进入相同的稳态响应. 这也从数值计算的角度证实了 PSD 探测的结果是

激励光的重心.

3 结论

通过构建 PSD 差分网络模型, 采用 Crank-Nicholson 隐式有限差分方法, 对一维 PSD 进行了模拟计算并得出结论如下:

1) 当激励光照射在 PSD 不同点上时, PSD 两端电极的起始响应时间并不相同, 并和距离入射点的远近成正相关.

2) 在 PSD 高速探测中, 激励光的频率受器件参数的限制, 其调制频率上限约为 $1/(3.75T_c)$. 并且应选择合适 PSD 使用区域.

3) 证实了 PSD 探测入射光重心的结论. PSD 稳态响应与入射光类型和时间无关.

本文采用的物理模型、边界条件和计算方法对于 PSD 的其它结构问题均可加以模拟和分析. 采用二维有限差分方法, 还可对二维 PSD 进行模拟.

对 John H. Mathews 教授在有限差分方法中的有益讨论表示感谢.

参考文献

- Lucovsky G. Photoeffects in nonuniformly irradiated p-n junctions. *J Appl Phys*, 1960, **31**(6): 1088 ~ 1095
- 黄梅珍, 唐九耀, 林斌, 等. 梳状型高线性度一维位敏检测器. *光子学报*, 2000, **29**(8): 764 ~ 768
Huang M Z, Tang J Y, Lin B, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(8): 764 ~ 768
- 黄梅珍, 唐九耀, 陈钰清, 等. 一维 PSD 的光电性能解析研究. *电光与控制*, 2000, **80**(4): 55 ~ 59
Huang M Z, Tang J Y, Chen Y Q, et al. *Electronics Optics & Control*, 2000, **80**(4): 55 ~ 59
- Dutta A K, Hatanaka Y. An analysis for the assessment of position distortion for fast excitation in two-dimensional position-sensitive devices (PSD). *Solid-State Electronics*, 1991, **34**(8): 875 ~ 882
- Dutta A K, Hatanaka Y. A study of the transient response of position-sensitive detectors. *Solid-State Electronics*, 1989, **32**(6): 485 ~ 492
- Cowin R L, Watson D L. Surface charge flow in two-dimensional position sensitive silicon detectors. *Nucl Instr and Math(A)*, 1997, **399**(3): 365 ~ 381
- Solal M, Menard L, Charon Y, et al. A silicon continuous position sensitive diode and associated electronics: modeling and simulation. *Nucl Instr and Math(A)*, 2002, **477**(3): 491 ~ 498
- John H. Mathews 著, 陈渝等译. 数值计算方法 (MATLAB 版). 北京: 电子工业出版社, 2002. 396 ~ 400
John H. Mathews. *Numerical Methods Using MATLAB*. Third Edition, Beijing: Publishing House of Electronics

Industry, 2002. 396 ~ 400

handbook. www. hamamastu. com

9 Hamamatsu Photonics K. K. Solid State Division, PSD

Study of the Transient Response of One-dimensional PSD Based on Finite Difference Method

Chen Dongyan, Lin Bin, Chen Yuqing

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, CNERC for Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Received date: 2003-09-16

Abstract One dimensional PSD RC transmission-line network model is computed by means of finite difference method and a generalized mathematical model for different kinds of excitations illuminated on the PSD is developed. Based on these calculations, it is found that the delay time when the electrode begins to response is positively related with the distance between the position where excitations illuminated and the geometrical center of 1D PSD. It is also pointed out that when utilized in high speed transient detection, the upper limit of exciting beam modulation rate is $1/(3.75T_c)$. Finally, the conclusion that PSD's position response is barycenter of the excitation beams and not related with the shape and the duration of the excitations is confirmed.

Keywords Position sensitive detector (PSD); Finite difference; Response time



Chen Dongyan was born in 1979 in Shanghai, China. He received his B. S. degree from Department of Optical Engineering, Zhejiang University in 2002. Now he is pursuing his master degree in the same department. His research interests presently include optoelectronic sensor design and optimization.