

# MSM 光探测器瞬态特性的二维分析及优化设计\*

于弋川<sup>1</sup> 邹勇卓<sup>1</sup> 何建军<sup>2</sup> 何赛灵<sup>1</sup>

(1 浙江大学光及电磁波研究中心 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2 Lightip Technologies, Inc. Ottawa, ON K1K 4R8, Canada)

**摘 要** 应用有限差分方法对金属-半导体-金属光探测器进行二维分析, 全部数值模拟工作都是基于半导体物理的基本微分方程完成的. 结合模拟结果对金属-半导体-金属光探测器的瞬态响应进行了分析, 以特性分析结果为基础针对探测器的响应速度和响应率等性能指标进行了二维结构上的优化设计.

**关键词** MSM 光探测器; 有限差分; 二维分析; 瞬态响应; 优化设计; Si

**中图分类号** TN36 **文献标识码** A

## 0 引言

金属-半导体-金属结构光探测器 (Metal-Semiconductor-Metal Photo-Detector) 简称 (MSM-PD) 可以看作由背靠背的肖特基光电二极管组成, 叉指状电极被制备在探测器的有源光吸收层上, 用叉指做电极, 叉指间隙做光敏面, 它的提出改善了传统肖特基光电二极管的性能. MSM-PD 工艺简单, 除了通常的晶体生长之外, 只需要通过蚀刻、蒸发和剥离等技术将电极作成叉指状即可. MSM-PD 制作容易、低电容、低暗电流、大带宽灵敏度积, 以及从晶体生长到器件制作的整个过程与 FET 完全兼容等特点, 使其已成为光电集成电路 (OEIC), 高速光通信接收器以及高速光控数字集成电路中的重要元件<sup>[1~3]</sup>.

最近国内外在 MSM-PD 的设计和制作方面取得了很大的成绩, 最近已有文章报道, 基于 InP 材料的工作于 1.55  $\mu\text{m}$  波长的 MSM-PD, 其传输速率已经超过了 78 GHz<sup>[2]</sup>. 而基于硅基底的 MSM 探测器因其可以工作于 850 nm 波长这一光通信窗口, 同时又可以在制作上利用现有成熟的 Si 基集成电路工艺, 得到了人们的普遍关注<sup>[4,5]</sup>. 在器件的模拟设计方面, 目前大部分文章中都是使用数值方法或半解析的方法建立起一维的模型<sup>[6,7]</sup>, 在这些模型建立的过程中都做了比较多的近似而降低了其通用性, 所以并不能完全满足模拟设计的需要. 本文基于有限差分方法对 Si 基 MSM-PD 进行二维模拟和瞬态响应分析. 结合瞬态分析的结果, 综合考虑 MSM-PD 的响应速度和响应率, 给出了叉指状电极的电极宽度、电极间隔宽度以及有源层的厚度等重

要结构参数的优化设计.

## 1 数值模拟方法

### 1.1 分析模型建立与边界条件

基本半导体方程可以用来分析一个任意的半导体结构, 该结构可以被作为各种工作条件下完整独立的器件. 在半导体问题中, 电势  $\Psi'$  用以下 Poisson 方程描述<sup>[8,9]</sup>

$$\nabla'^2 \Psi' = -q(N_d - N_a + p' - n')/\epsilon \quad (1)$$

电子密度  $n'$  和空穴密度  $p'$  的连续性方程分别为

$$\frac{\partial n'}{\partial t'} = \nabla' \cdot \mathbf{J}'_n / q + G' - U' \quad (2)$$

$$\frac{\partial p'}{\partial t'} = -\nabla' \cdot \mathbf{J}'_p / q + G' - U' \quad (3)$$

在上述基本方程中,  $q$  表示单位电荷的电量;  $N_d$  和  $N_a$  分别表示施主掺杂浓度和受主掺杂浓度;  $\epsilon$  代表介电常量;  $G'$  代表光生载流子的产生率;  $U'$  表示载流子的复合率. 半导体中有电子运动所产生的电流密度  $\mathbf{J}'_n$  以及由空穴运动所产生的电流密度  $\mathbf{J}'_p$  分别为

$$\mathbf{J}'_n = -q\mu_n n' \nabla' \Psi' + q \nabla' (n' D_n) \quad (4)$$

$$\mathbf{J}'_p = -q\mu_p p' \nabla' \Psi' - q \nabla' (p' D_p) \quad (5)$$

电子和空穴的扩散系数分别为

$$D_n = kT\mu_n / q, D_p = kT\mu_p / q \quad (6)$$

在式(4)~(6)中,  $k$  为玻尔兹曼常量,  $T$  为温度,  $\mu_n$  和  $\mu_p$  分别为电子和空穴在半导体吸收层材料中的迁移率. 在由式(1)~(5)组成的一系列方程中总共有三个未知量, 分别为电势  $\Psi'$ , 电子密度  $n'$  和空穴密度  $p'$ , 通过对上述方程组求解得到这三个未知量就可以分析半导体器件的特性.

为了简化计算, 在本文中使用了表 1 的规则对变量进行归一化. 在归一化因子中,  $4a'$  为图 1 的计算区域在  $x$  方向上的长度,  $\tau_d$  为弛豫时间

$$\tau_d = \epsilon / (q\mu_n N_d) \quad (7)$$

\* 浙江省自然科学基金资助项目 (项目编号: 20044131095)  
Tel: 0571-87952640 Email: yuyich@coer.zju.edu.cn  
收稿日期: 2004-12-20

对载流子复合率的处理采用 Shockley-Read 关系<sup>[8]</sup>, 当电子和空穴在吸收层材料中有相同的寿命  $\tau_m$  以及具有位于禁带中间位置的单一复合中心时, Shockley-Read 关系可以写为

$$U_{SR} = \frac{(p'n' - n_i^2)}{\tau_m(p' + n' + 2n_i)} \quad (8)$$

式中,  $n_i$  为吸收层材料的本征载流子浓度.

在边界条件的处理上<sup>[8,9]</sup>, 在半导体吸收层与电极接触的位置将形成肖特基势垒接触, 在这些位置上对于电势以及载流子密度将有狄利克雷边界条件; 在所选分析区域的侧面边界、上表面两电极之间的边界部分以及分析区域的下表面的浮动边界, 对电势和载流子密度诺依曼边界条件将被施加.

表 1 模拟中变量归一化规则

变量名(归一化前)	归一化因子	变量名(归一化后)
$\Psi'$	$kT/q$	$\Psi$
$n'$	$N_d$	$n$
$p'$	$N_d$	$p$
$x'$	$a'$	$x$
$y'$	$a'$	$y$
$t'$	$\tau_a$	$t$
$G'$	$N_d/\tau_a$	$G$
$U'$	$N_d/\tau_a$	$U$

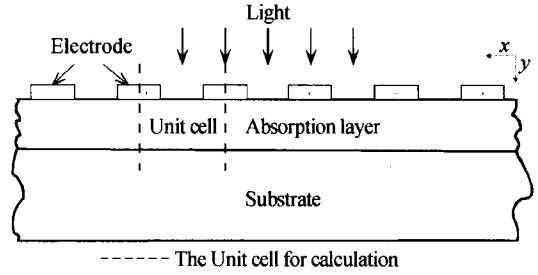


图 1 MSM-PD 的切面图

Fig. 1 Cross section of the MSM-PD

## 1.2 基本方程的离散化与求解

$$\Psi(i, j) =$$

$$\frac{\Psi(i+1, j) + \Psi(i-1, j) + \Psi(i, j+1) + \Psi(i, j-1)}{4}$$

$$\left[ \frac{ha}{2} \right]^2 [n(i, j) - p(i, j) - 1] \quad (9)$$

$$\frac{\partial n(i, j)}{\partial t} = \left[ \frac{2}{ha} \right]^2 [B_n(i, j) - n(i, j)C(i, j)] + G - U \quad (10)$$

$$\frac{\partial p(i, j)}{\partial t} = \left[ \frac{2}{ha} \right]^2 \left[ \frac{\mu_p}{\mu_n} \right] [(B_p(i, j) - p(i, j)D(i, j))] + G - U \quad (11)$$

式中

$$a = a' \sqrt{q^2 N / \epsilon k T} \quad (12)$$

$$B_n(i, j) = \frac{n(i+1, j) \exp \left[ \frac{\Psi(i, j) - \Psi(i+1, j)}{2} \right] + n(i-1, j) \exp \left[ \frac{\Psi(i, j) - \Psi(i-1, j)}{2} \right]}{4} + \frac{n(i, j+1) \exp \left[ \frac{\Psi(i, j) - \Psi(i, j+1)}{2} \right] + n(i, j-1) \exp \left[ \frac{\Psi(i, j) - \Psi(i, j-1)}{2} \right]}{4} \quad (13)$$

$$B_p(i, j) = \frac{p(i+1, j) \exp \left[ \frac{\Psi(i+1, j) - \Psi(i, j)}{2} \right] + p(i-1, j) \exp \left[ \frac{\Psi(i-1, j) - \Psi(i, j)}{2} \right]}{4} + \frac{p(i, j+1) \exp \left[ \frac{\Psi(i, j+1) - \Psi(i, j)}{2} \right] + p(i, j-1) \exp \left[ \frac{\Psi(i, j-1) - \Psi(i, j)}{2} \right]}{4} \quad (14)$$

$$C(i, j) = \frac{\exp \left[ \frac{\Psi(i+1, j) - \Psi(i, j)}{2} \right] + \exp \left[ \frac{\Psi(i-1, j) - \Psi(i, j)}{2} \right]}{4} + \frac{\exp \left[ \frac{\Psi(i, j+1) - \Psi(i, j)}{2} \right] + \exp \left[ \frac{\Psi(i, j-1) - \Psi(i, j)}{2} \right]}{4} \quad (15)$$

$$D(i, j) = \frac{\exp \left[ \frac{\Psi(i, j) - \Psi(i+1, j)}{2} \right] + \exp \left[ \frac{\Psi(i, j) - \Psi(i-1, j)}{2} \right]}{4} + \frac{\exp \left[ \frac{\Psi(i, j) - \Psi(i, j+1)}{2} \right] + \exp \left[ \frac{\Psi(i, j) - \Psi(i, j-1)}{2} \right]}{4} \quad (16)$$

本文使用正方形网格对计算区域的进行划分, 网格边长为  $h$ , 用  $i(0 \leq i \leq m)$  表示格点在  $x$  方向的

位置, 用  $j(0 \leq j \leq n)$  表示格点在  $y$  方向的位置. 首先把电流密度表达式(4)和式(5)带入载流子连续性

方程式(2)和式(3)中,得到仅含未知量  $n$  和  $p$  的两个方程,然后采用有限差分法用五点差格式<sup>[10]</sup>在图 1 的计算区域内对式(1)和新得到的两个方程进行离散化,离散化结果如式(9)~(16).

利用超松弛法叠代求解离散方程组,从而得到每一时刻下区域内的电势分布和载流子密度分布.求解的基本算法如图 2.

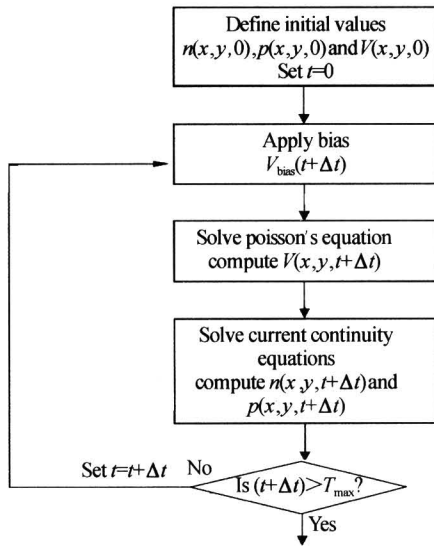


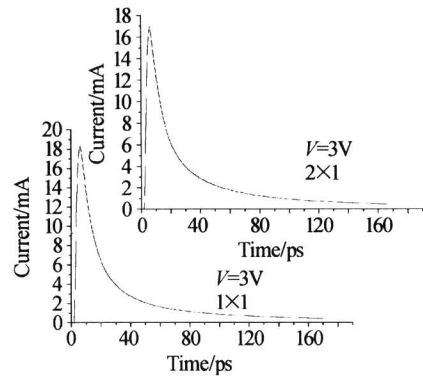
图 2 对 MSM 光探测器进行模拟的基本算法框图  
Fig. 2 Algorithm for the time-dependent simulation

## 2 器件瞬态响应分析和优化设计

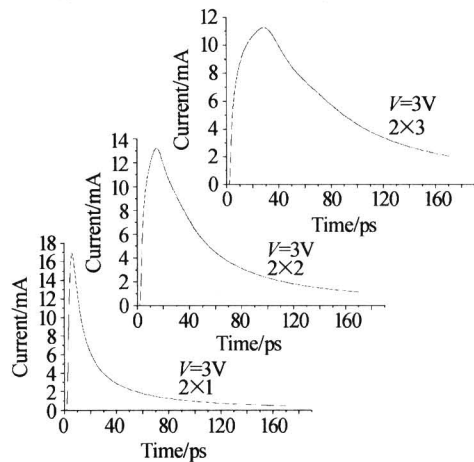
本文中所分析的 MSM-PD 以  $n$  型掺杂的硅材料(Si)为有源区材料. 掺杂浓度  $N_d = 2.78 \times 10^{14} / \text{cm}^3$ , 电子迁移率  $\mu_n = 1500 \text{ cm}^2 / \text{Vgs}$ , 空穴迁移率  $\mu_p = 600 \text{ cm}^2 / \text{Vgs}$ . 室温下的本征载流子浓度为  $n_i = 1.48 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ . 硅材料吸收层的禁带宽度  $E_g$  为  $1.16 \text{ eV}$ , 金属与硅材料之间的肖特基势垒  $\Phi_b$  是  $0.8 \text{ V}$ . 入射光波长为  $0.6 \mu\text{m}$ , 有源区材料对此波长的光的吸收系数为  $0.4 / \mu\text{m}$ , MSM-PD 受光面的长和宽均为  $1 \text{ mm}$ . 在瞬态分析中选用矩形光脉冲信号为输入光信号, 脉冲持续时间为  $2.5 \text{ ps}$ , 光强度为  $10 \text{ mW}$ .

在模拟中, 固定外加偏置电压为  $3 \text{ V}$ 、有源层厚度为  $2.5 \mu\text{m}$ . 在图 3(a)中, 比较了具有相同电极间隔不同电极宽度的探测器性能. 图中对结构的标记  $a \times b$  代表叉指电极宽度为  $a \mu\text{m}$ , 电极间透光区的间隔为  $b \mu\text{m}$ . 两种结构的瞬时响应曲线基本相同;  $1 \times 1, 2 \times 1$  结构下响应曲线的半极大全宽(FWHM)分别为  $11.6 \text{ ps}, 11.7 \text{ ps}$ , 也基本相同. 探测器的瞬时响应是光生载流子在电场作用下在有源区运动情况的反映. 而光生载流子只在电极之间的透光区因为材料对入射光的吸收而产生, 在电极覆盖下的有源区是不产生光生载流子的; 同时有源材料中电场的

大小不受电极宽度的影响. 因为电极宽度的变化对光生载流子的产生以及电场的大小都不产生贡献, 所以瞬时响应也不受电极宽度变化的影响.



(a) The widths of the electrode stripe are different



(b) The air spaces between the electrodes are different

图 3 Si 基 MSM-PD 的载流子电流瞬态响应曲线  
Fig. 3 Transient response of carrier current for detectors formed on Si

在图 3(b)中, 比较了具有相同电极宽度不同电极间隔的探测器性能. 从图中可以看出随着电极间隔宽度变大, 电流的最大值将变小, 同时电流的上升时间与下降时间都将变长;  $2 \times 1, 2 \times 2, 2 \times 3$  三种结构下响应曲线的半极大全宽(FWHM)分别为  $11.7 \text{ ps}, 38.9 \text{ ps}, 76.4 \text{ ps}$ . 由此得到 MSM 光探测器的瞬时响应与电极间隔宽度之间的关系: 探测器的响应速度将随着电极间隔宽度变大而变慢. 造成这种现象的原因是在相同外加偏置电压作用下, 正负电极之间间隔越小, 则在有源材料的光吸收区形成的电场就越强, 在这样的强场作用下, 材料吸收入射光子产生的电子和空穴在电场作用下更有可能达到饱和速度, 这样可以在短时间内被收集到电极下从而缩短响应时间.

通过以上对探测器瞬态特性的分析, 得到: 提高 MSM 探测器的响应速度需要减小电极间隔宽度; 而提高探测效率则电极宽度应尽可能小而电极间隔宽度尽可能大, 一般探测器设计时要保证有  $50\%$  以

上的入射光能量能够被探测器接收,这样就要求叉指电极宽度与电极间隔宽度比要小于等于1. 综合以上结果,在满足探测效率要求的情况下同时为了达到最快的响应速度,选用1作为叉指电极宽度与电极间隔宽度比. 同时考虑到实际工艺条件的限制,在Si基MSM-PD的优化设计中选取电极宽度和电极间隔宽度分别为 $1\ \mu\text{m}$ .

图4(a)中给出了外加偏置电压为3V、电极间隔宽度和叉指电极宽度都为 $1\ \mu\text{m}$ ( $1\times 1$ )时,有源层厚度分别为 $0.5\ \mu\text{m}$ 、 $2.5\ \mu\text{m}$ 的MSM探测器的电流瞬态响应曲线. 由图可见有源层厚度越小,瞬时响应时间越短,有源层厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 、 $2.5\ \mu\text{m}$ 时响应曲线的半极大全宽(FWHM)分别为8.1 ps和11.6 ps. 这是因为有源层厚度很薄,整个有源区内的电场都很强而且光生载流子被电极所收集所经过的距离也非常短,这样将大大缩短光生载流子被电极收集所用的时间,与之对应探测器可以达到更短的瞬时响应时间. 但是,如果有源层厚度很小,则探测器对入射光的吸收也将非常有限,这样将降低到探测器的响应率. 所以要综合考虑响应时间和响应率来选取有源层厚度. 在这里使用以下品质因数

(Fig. of merit)Q来综合评价MSM光探测器的瞬时响应时间与响应率

$$\text{Fig. of merit} = \frac{R}{W} \quad (17)$$

式中, $R$ 表示探测器的响应率, $W$ 为瞬时响应曲线的半极大全宽. 由定义可知品质因数越大,探测器的性能越好. 图4(b)给出了外加偏置电压为3V,电极间隔宽度和叉指电极宽度都为 $1\ \mu\text{m}$ 时,品质因数与有源层厚度之间的关系. 从图可见,随着有源层厚度厚度的增大,品质因数先快速增加,然后非常缓慢地下降,当有源层厚度在 $2.3\sim 4.5\ \mu\text{m}$ 之间的范围内变化时,品质因数始终保持最大. 因此最终选择的优化的Si基MSM光探测器结构是叉指电极宽度为 $1\ \mu\text{m}$ ,电极间隔宽度为 $1\ \mu\text{m}$ ,有源层厚度的范围为 $2.3\sim 4.5\ \mu\text{m}$ . 很明显,分析得到的优化设计结构可以在满足探测效率要求的情况下达到最小的响应时间,从而得到最快的响应速度.

### 3 结论

本文基于有限差分方法对金属-半导体-金属(MSM)光探测器进行二维分析,结合模拟结果对MSM光探测器的瞬态响应进行了分析. 以对探测器瞬态响应分析得到的结论为基础,开展了针对探测器响应时间与响应率的二维结构分析,得到了优化的MSM光探测器结构. 因为全部的数值模拟过程都是基于半导体物理的基本微分方程而完成的,这为进一步优化设计复杂探测器的性能和结构奠定了基础.

#### 参考文献

- 1 Chó S Y, Seo S W, Brooke M A, *et al.* Integrated detectors for embedded optical interconnections on electrical boards, modules, and integrated circuits. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, **8**(6):1427~1434
- 2 Droge E, Bottcher E H, Kollakowski St. 78 Ghz distributed InGaAs MSM photodetector. *Electronics Letters*, 1998, **34**(23):2241~2243
- 3 张永刚,单宏坤,周平,等. 掺铁 InP 肖特基势垒增强 InGaAs MSM 光探测器. *光子学报*, 1995, **24**(3):223~225  
Zhang Y G, Shan H K, Zhou P, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 1995, **24**(3):223~225
- 4 MacDonald R P, Tarr N G, Syrett B A, *et al.* MSM photodetector fabricated on polycrystalline silicon. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, **11**(1):108~110
- 5 Yang M, Rim K, Rogers D L, *et al.* A high-speed, high-sensitivity silicon lateral trench photodetector. *IEEE Electron Device Letters*, 2002, **23**(7):395~397

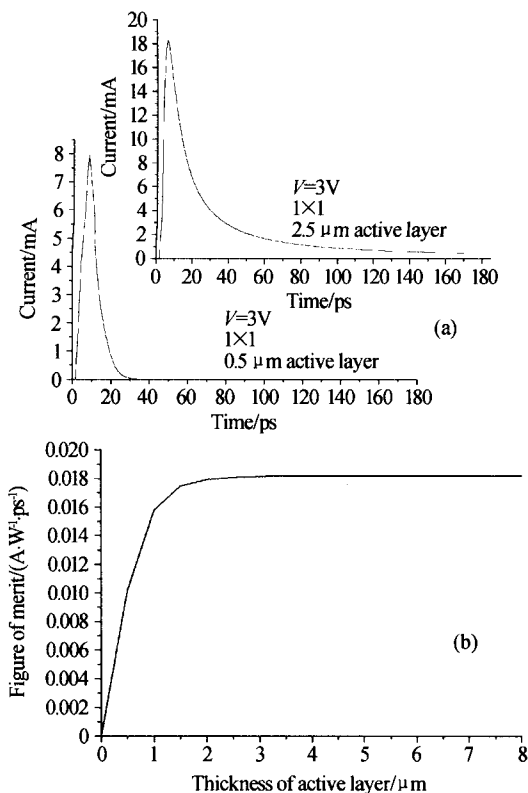


图4 (a)不同有源层厚度下,载流子电流瞬态响应曲线, (b)品质因数与有源层厚度关系图

Fig. 4 (a) Transient response of carrier current for detectors formed on Si, when the thicknesses of the active layer are different, (b) The relation between the thickness of the active layer and the Fig. of merit

- 6 Liou L C, Nabet B. Simple analytical model of bias dependence of the photocurrent of metal-semiconductor-metal photodetectors. *Applied Optics*, 1996, **35**(1): 15~23
- 7 Sarto A W, Van Z B J. Photocurrents in a metal-semiconductor-metal photodetector. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, **33**(12): 2188~2194
- 8 Kurata M. Numerical analysis for semiconductor devices. Lexington, MA: Heath, 1982. 10~126
- 9 Selberherr S. Analysis and Simulation of Semiconductor Devices. New York: Springer-Verlay, 1984. 8~148
- 10 倪光正, 钱秀英. 电磁场数值计算. 北京: 高等教育出版社, 1996. 139~170
- Ni G Z, Qian X Y. Numerical Simulation of Electromagnetic Field. Beijing: Advanced Education press, 1996. 139~170

## Analysis and Optimization of MSM-PD's Characteristics Using a Two Dimensional Numerical Method

Yu Yichuan<sup>1</sup>, Zou Yongzhuo<sup>1</sup>, He Jianjun<sup>2</sup>, He Sailing<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre for Optical and Electromagnetic Research, State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Yu-Quan, Hangzhou 310027

<sup>2</sup> Lightip Technologies, Inc. Ottawa Canada, ON K1K 4R8

Received date: 2004-12-20

**Abstract** A 2D finite-difference method is developed to study a Metal-Semiconductor-Metal PhotoDetector (MSM-PD). The time-domain numerical simulation is based on the Poisson equation and continuity equations for electrons and holes. The transient response of the photodetector is analyzed. An optimized design of MSM-PD is given to achieve a fast response while keeping a satisfactory responsivity.

**Keywords** MSM photodetector; Finite difference method; 2D; Transient response; Optimization; Si



**Yu Yichuan** was born in 1980. He received the B. S. Degree in optical engineering from Zhejiang University in 2002. He is presently working towards his Ph. D. Degree at Zhejiang University. His research interest is semiconductor optoelectronic devices for optical communications.