

# 金属半导体金属光探测器电路模型的研究

陈维友 刘式墉

(吉林大学电子科学系 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区 长春 130023)

**摘要** 本文给出一个可为开发计算机辅助分析软件采用的完整的 MSM-PD 电路模型, 采用该模型对一个 GaAs MSM-PD 的直流光电特性模拟分析结果与已报道的实验结果符合很好。

**关键词** 金属半导体金属光探测器, 电路模型, 计算机辅助分析

## 1 引言

随着光电集成电路(OEIC)的发展,对 OEIC 进行计算机辅助分析(CAA)将成为设计高性能器件的重要手段。器件模型能否准确、简便地反映器件的各方面性能,是决定 CAA 软件质量的关键。半导体激光二极管(LD)和光探测器(PD)是 OEIC 中的两个重要的光电子器件。对 LD 电路模型的研究工作很多,但对金属半导体金属光探测器(MSM-PD)的电路模型的研究工作却很少。E. Sano<sup>[1]</sup>给出的 MSM-PD 模型仅适于瞬态分析。本文在 E. Sano 模型的基础上,结合过剩电子、空穴速率方程得到一个完整的 MSM-PD 电路模型。它可用于直流分析、交流分析和瞬态分析。该模型已加入到我们自行开发的光电集成 CAA 程序-OCAP 中。

## 2 MSM-PD 电路模型

MSM-PD 的基本结构参见文献[1,2]。以下所用符号的物理意义见表1。

MSM-PD 吸收区内过剩电子、空穴的速率方程为

$$\frac{dN}{dt} = N_G - N/\tau_{nr} - N/\tau_{pr}, \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dt} = N_G - P/\tau_{pr} - P/\tau_{nr}, \quad (2)$$

其中  $N_G$  为吸处区内单位时间产生的光子数。

$$N_G = (C_i P_{in} / h\nu) [1 - \exp(-\alpha \cdot D)]. \quad (3)$$

引入一归一化常数  $C_{n0}$  (可看成是一个电容), 并设  $V_n = qN/C_{n0}$ ,  $V_p = qP/C_{n0}$ , 整理(1), (2)式得到

1993-01-11 收到, 1993-07-14 定稿

陈维友 男, 1965年生, 讲师, 从事集成光学和光电集成计算机辅助分析软件开发工作。

刘式墉 男, 1935年生, 教授, 博士生导师, 从事集成光电子学的研究工作。

表 1 符 号 表

$C_c$	电容系数	$A_s(A_c)$	阳(阴)电极面积	$C_i$	入射系数, $C_i P_{in}$ 为 PD 有效吸收功率
$C_{dark}$	暗电容	$C_f$	空间电场衰减系数	$F_g$	电极间平均电场 $F_g = V_g/L_g$
$C_m$	经验参数	$S_e$	有效受光面积	$N(P)$	吸收区内过剩电子(空穴)总数
$C_{n0}$	归一化系数	$\alpha$	光子吸收系数	$P_{in}$	入射到 PD 表面的总功率
$D$	吸收区深度	$L_g$	两电极条间的宽度	$v_{ns}(v_{ps})$	电子(空穴)饱和漂移速度
$F_{th}$	阈值电场	$\mu_n(\mu_p)$	电子(空穴)迁移率	$\tau_{ns}(\tau_{ps})$	电子(空穴)渡越时间
$G_{dark}$	暗电导	$v_n(v_p)$	电子(空穴)漂移速度	$\tau_d$	电极下空间电荷区形成时间
$h\nu$	光子能量	$\tau_{nr}(\tau_{pr})$	电子(空穴)复合寿命		

$$\frac{P_{in}}{R_0} = C_n \frac{dV_n}{dt} + V_n/R_{nr} + V_n/R_{nr}, \quad (4)$$

$$\frac{P_{in}}{R_0} = C_p \frac{dV_p}{dt} + V_p/R_{pr} + V_p/R_{pr}, \quad (5)$$

其中  $R_0 = h\nu/\{qC_i[1 - \exp(-\alpha \cdot D)]\}$ ,  $R_{nr} = \tau_{nr}/C_{n0}$ ,

$$R_{nr} = \tau_{nr}/C_{n0}, \quad R_{pr} = \tau_{pr}/C_{p0}, \quad R_{pr} = \tau_{pr}/C_{p0},$$

$$C_n = C_p = C_{n0}, \quad \tau_{nr} = L_g/v_n, \quad \tau_{pr} = L_g/v_p,$$

$$v_n(F) = \frac{\mu_n F + v_{ns}(F/F_{th})^4}{1 + (F/F_{th})^4}, \quad v_p(F) = \mu_p F / (1 + \mu_p F/v_{ps}).$$

E. Sano 的 MSM-PD 模型为一个电导与一个电容的并联<sup>[4]</sup>,即

$$I_{op} = G(t)V_g + C(t) \frac{dV_g}{dt} \quad (6)$$

其中  $I_{op}$ ,  $V_g$  分别为 PD 的端电流和端电压,

$$G(t) = [C_m q N v_n (C_f \cdot F_g) + C_m q P v_p (C_f \cdot F_g)] / V_g + G_{dark}, \quad (7)$$

$$C(t) = C_T + C_{dark}, \quad (8)$$

$$C_T = C_{gc}(t) C_{gs}(t) / [C_{gc}(t) + C_{gs}(t)],$$

$$C_{gs}(t) = C_c A_s \sqrt{qN(t - \tau_d) \epsilon_0 \epsilon_s} / [S_e \cdot D \cdot V_g(t)],$$

$$C_{gc}(t) = C_c A_s \sqrt{qP(t - \tau_d) \epsilon_0 \epsilon_s} / [S_e \cdot D \cdot V_g(t)].$$

把(7),(8)式代入(6)式,并整理得

$$I_{op} = I_n + I_p + G_{dark} \cdot V_g + C_T dV_g/dt + C_{dark} \cdot dV_g/dt. \quad (9)$$

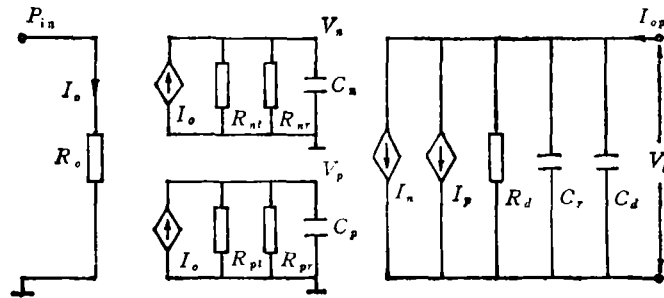


图 1 MSM-PD 电路模型

这里  $I_n = C_m C_{n0} V_n \cdot v_n (C_f \cdot F_f) / L_g$ ,

$I_p = C_m C_{p0} V_p \cdot v_p (C_f \cdot F_f) / L_g$ .

$C_f$  为考虑电场在吸处区内的衰减而引入的一个参数。  $C_f$  与吸收区内空穴密度的关系近似为<sup>[4]</sup>

$$C_f = 0.81 - 0.245(\log_{10} P - 16.0). \quad (10)$$

(10)式适用于  $10^{16} \text{cm}^{-3} \leq P \leq 10^{18} \text{cm}^{-3}$ .

由(4),(5),(9)式可得到图 1 所示的 MSM-PD 等效电路模型。

### 3 模拟分析

#### 3.1 与已报道的实验结果的比较

这里与文献[2]中报道的外延 GaAs 片  $3 \times 3$  结构 MSM-PD 的直流光电特性的实验结果进行了比较。 由于文献[2]给出的数据不全, 这里没有进行光脉冲响应特性的比较。

表 2 模型参数

模型参数(单位)	数 值	模型参数(单位)	数 值
$L_g(\mu\text{m})$	3	$S_o(\mu\text{m}^2)$	3726
$A_o(\mu\text{m}^2)$	2757	$A_c(\mu\text{m}^2)$	3114
$C_f$	0.02	$C_c$	0.5
$C_{n0}$	$10^{-12}$	$C_i$	0.38
$\epsilon_s$	12.9	$\lambda(\mu\text{m})$	0.85
$D(\mu\text{m})$	6	$\alpha$	$\infty$
$\mu_n(\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s})$	5500	$\mu_p(\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s})$	400
$v_{ns}(\text{cm/s})$	$8.5 \times 10^6$	$v_{ps}(\text{cm/s})$	$8.5 \times 10^6$
$F_{th}(\text{V/cm})$	$4.2 \times 10^8$	$\tau_d(\text{ps})$	0.5
$\tau_{nr}(\text{ns})$	0.2	$\tau_{pr}(\text{ns})$	0.65
$C_m$	0.2	$R_{dark}(\Omega)$	$9.1 \times 10^9$
$C_{dark}(\text{pF})$	0.1		

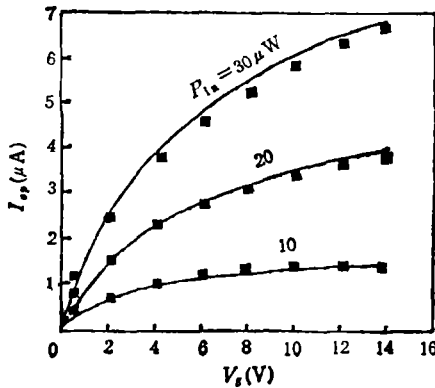


图 2 不同输入光功率下的光电流曲线  
—模拟结果 ■文献[2]中实验数据

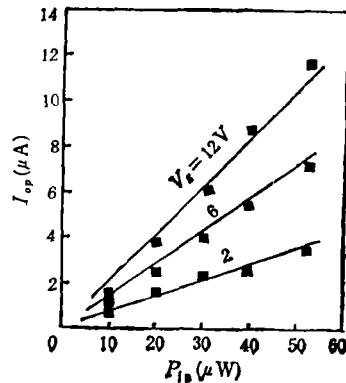


图 3 不同端电压下的光电流曲线  
—模拟结果 ■文献[2]中实验数据

本文采用的模型参数见表 2。图 2 给出了不同光功率下的光电流与端电压的关系的模拟结果和文献[2]中的实验数据。图 3 给出不同端电压下光电流与输入光功率的关系模拟结果和文献[2]中的实验数据。

### 3.2 交流和瞬态分析

作为应用实例,我们对文献[2]中  $3 \times 3$  结构的 GaAs 外延片 MSM-PD 的交流和瞬态特性进行了模拟分析。图 4 给出了端电压为 12V,入射光功率为  $10\mu\text{W}$  的工作点下,交流小信号调制响应,图中给出  $-3\text{dB}$  调制带宽  $\sim 1\text{GHz}$ 。图 5 为端电压为 12V 时的瞬态响应特性,方波光脉冲低电平为 0,高电平为  $30\mu\text{W}$ 。由图得到,  $t_{on} \approx 161\text{ps}$ ,  $t_{off} \approx 546\text{ps}$ 。模拟中发现随端电压下降,  $-3\text{dB}$  调制带宽变窄,  $t_{on}, t_{off}$  增长。

图 6 给出不同取样电阻(与 PD 串联)下的脉冲响应特性,脉冲半宽为  $0.3\text{ps}$ ,峰值功率为  $3.1\text{W}$ 。图中可见,随取样电阻  $R$  的增大,取样电压波形半宽增宽。这是因为  $R$  增大,  $C_T$  和  $C_{dark}$  上的充放电时间增长。

## 4 结论

(1) 给出一个完整的 MSM-PD 电路模型。该模型可加入到现有电路模拟软件中,

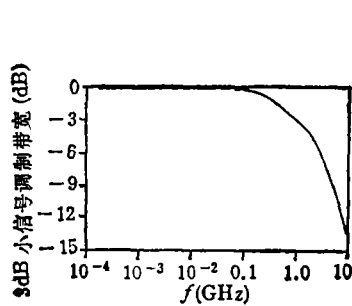


图 4 频率响应特性

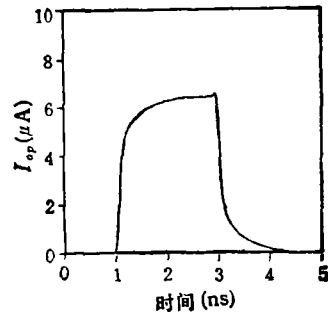


图 5 瞬态响应特性

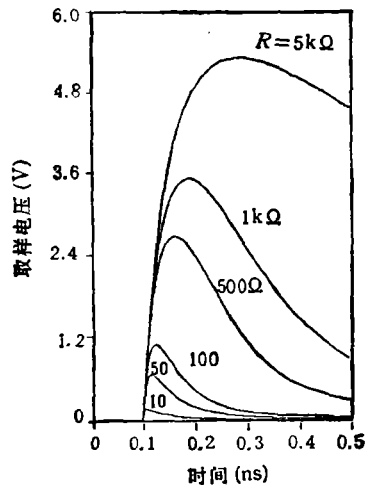


图 6 不同取样电阻下脉冲响应曲线

亦可在开发新型模拟软件中采用。

(2) 对一 GaAs MSM-PD 的直流光电特性的模拟结果与已报道的实验结果符合很好, 作为应用实例, 同时也对该器件的交流和瞬态响应特性进行了模拟。

### 参 考 文 献

- [1] Sano E. IEEE Trans. on ED, 1990, ED-37(9): 1964—1968.
- [2] 李志奇, 王庆康, 史常忻. 固体电子学研究进展, 1992, 12(3): 225—229.

## MODELING OF MSM-PD

Chen Weiyou    Liu Shiyong  
(Jilin University, Changchun 130023)

**Abstract**    A complete model of metal-semiconductor-metal-photodetector (MSM-PD) is presented. It can be implemented in any circuit simulator. Simulated DC characteristics for an MSM-PD are in good agreement with reported results.

**Key words**    MSM-PD, Modeling, CAA