

文章编号: 0258-7025(2007)08-1032-05

一种改进型金属-半导体-金属 光电探测器数学模型

范辉, 陆雨田

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 以 E. Sano 的金属-半导体-金属光电探测器(MSM-PD)模型为基础,提出了一种改进型的模型。该模型以多个电流源和电容并联的形式构造,以吸收区过剩电子和空穴总数为研究对象,求解速率方程。另外计算了电容,给出了暗电流与端电压的非线性计算式,改进了传统模型中暗电流的线性计算方法。通过线性叠加给出了该模型光电流的数学解析解。通过在 Matlab 中的模拟计算,表明该模型具有计算量小、准确度高的特点,它不仅能反映一定偏压和光照下光电流的变化,而且能展示光电子在器件中的转化过程。这种模型也能较好地应用于微弱信号的检测模拟。

关键词 光学器件;金属-半导体-金属光电探测器;数学模型;Matlab;光电集成电路

中图分类号 TN 362 文献标识码 A

Improved Numerical Model of Metal-Semiconductor-Metal Photodetector

FAN Hui, LU Yu-tian

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Based on E. Sano's metal-semiconductor-metal photodetector (MSM-PD) model, an improved numerical model is presented. The model is built with parallel current sources and capacitance. The sum of excess electron and photon in absorption layer is studied, and the rate equations are solved. The capacitance is calculated, the nonlinear relationship between the dark current and the terminal voltage is derived, and the linear calculation of the dark current in conventional model is improved. The mathematical expression of the photoelectric current is presented. The simulation analysis by Matlab indicates the calculation is simplified with a higher precision. This model represents the change of photoelectric current under some bias and illumination conditions, and shows the transfer of photoelectron in devices. This model can also be used in measuring and simulating weak signals.

Key words optical devices; metal-semiconductor-metal photodetector; numerical model; Matlab; optoelectronic integrated circuit

1 引言

金属-半导体-金属光电探测器(MSM-PD)由于具有制造工艺简单、响应速度快、小的暗电流、工艺上容易实现探测器阵列等特点,在光纤通信和光电检测系统中得到了广泛应用,是光电集成电路(OEIC)中的重要元件。随着集成电路计算机辅助设计技术的发展,通过建立金属-半导体-金属光电

探测器的数学模型,并利用计算机对其特性进行分析和研究成为光电集成电路设计中的重要组成部分。目前金属-半导体-金属光电探测器的等效电路模型,通常采用 E. Sano^[1] 给出的一个电导和一个电容并联的金属-半导体-金属光电探测器模型,并在 PSPICE 中模拟实现^[2~6]。这种方法能较好地进行直流、交流等分析。但该模型变量较多,需要求解多个微分耦合方程。在电容的计算上,要使用电子

收稿日期:2007-02-07;收到修改稿日期:2007-04-09

作者简介:范辉(1975—),男,山西人,博士研究生,主要研究方向为半导体激光器应用、光电子器件应用等。

E-mail: fanhui7518@yahoo.com.cn

导师简介:陆雨田(1943—),男,江苏人,研究员,博士生导师,目前主要从事大功率全固态激光器及其应用系统的研究。

E-mail: luyutian@mail.shcnc.ac.cn

和空穴的平均浓度,需要求解泊松方程和电流连续性方程,增加了计算量;在暗电流的计算上,忽略暗电流与端电压的非线性关系,以一个暗电导代替,有较大误差。在用 PSPICE 仿真过程中,软件对耦合微分方程的处理也存在较大误差,同时该仿真方法无法跟踪反映金属-半导体-金属光电探测器工作过程中载流子和光子的变化。暗电流的线性化处理也使该模型在微弱信号检测方面存在较大误差。本文以 E. Sano 的金属-半导体-金属光电探测器模型为基础,提出了一种并联多个电流源和电容的改进型金属-半导体-金属光电探测器模型。在模型参数的计算上,以吸收区的电子和空穴总数为研究对象,通过求解速率方程,给出了一般的表达式。在电容的计算上以吸收区单位体积的过剩电子和空穴数代替电子和空穴的平均密度,避免了求解泊松方程和电流连续性方程,极大地减少了计算量,同时在仿真过程中不需求解二阶偏微分方程和少计算一组微分耦合方程组,提高了仿真计算精度。改进了传统模型中以一个暗电导模拟暗电流的方法,充分考虑了金属-半导体-金属光电探测器中金属-半导体界面和金属-绝缘体界面的肖特基热电子发射,绝缘体 Frenkel-Poole 热电子发射,隧穿电流等多种传输机制对暗电流的影响,给出了暗电流与端电压的非线性计算式。通过线性叠加给出了该模型光电流的数学解析解。

2 金属-半导体-金属光电探测器数学模型

金属-半导体-金属光电探测器的典型器件^[1,7]结构如图 1 所示。它由几个部分组成:衬底为半绝缘 GaAs 或 InP 单晶片;光吸收(有源)层为 GaAs 或 InGaAs 的外延层,用于对入射光的吸收;势垒增强层用于提高金属电极与有源层之间的肖特基势垒高度;电极为采用剥离技术形成的交叉指状金属电极。图 2 为金属-半导体-金属光电探测器的一维结构示意图,金属-半导体-金属结构上是两个肖特基结背靠背相连。当外加偏压后,一个结正偏,一个结反偏。其耗尽层厚度和电极间内部电场由外加电压确定。

E. Sano 的金属-半导体-金属光电探测器模型为一个电导与一个电容的并联,即

$$I_{op} = G(t)V_g + C(t) \frac{dV_g}{dt}, \quad (1)$$

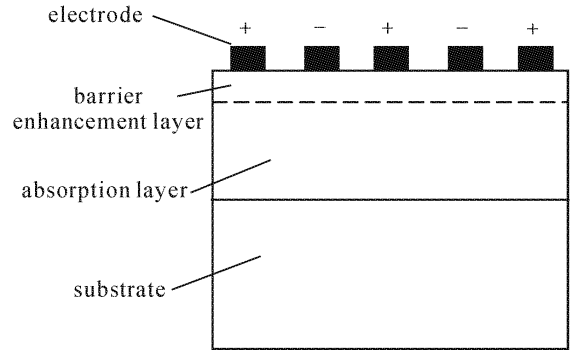


图 1 金属-半导体-金属光电探测器结构截面图

Fig. 1 Cross section of MSM-PD

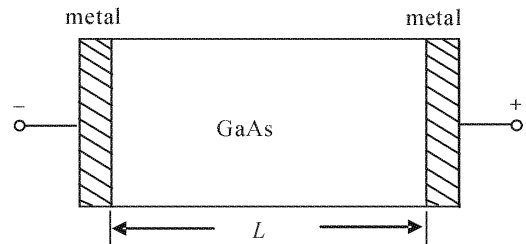


图 2 金属-半导体-金属光电探测器一维示意图

Fig. 2 One-dimensional structure of MSM-PD

式中 I_{op} 为光电探测器的端电流, V_g 为端电压。由于 E. Sano 的计算量过大,因此以金属-半导体-金属光电探测器的吸收区的剩余电子和空穴为研究对象,适当地拟合参数,对文献[1]中的(10),(13)式重新定义参数并改写为

$$G(t) = \frac{C_m C_f q F_g^2 (N v_n + P v_p)}{V_g^2} + G_{dark}, \quad (2)$$

$$C(t) = \frac{C_{gc}(t) C_{ga}(t)}{C_{gc}(t) + C_{ga}(t)} + C_p, \quad (3)$$

式中 $N(P)$ 为吸收区内过剩电子(空穴)总数; $v_n(v_p)$ 为电子(空穴)漂移速度; F_g 为电极间平均电场, $F_g = V_g/L_g$, L_g 为两电极条之间的宽度; C_m 为引入的模型参数; C_f 为考虑电场在吸收区内的衰减而引入的一个参数; G_{dark} 为暗电导; C_p 为寄生电容。由于模型中以吸收区的电子和空穴的总数为研究对象,所以电容计算公式为

$$C_{ga}(t) = C_c A_a \sqrt{\frac{qN(t-\tau_d)\epsilon_0\epsilon_s}{S_e DV_g(t)}},$$

$$C_{gc}(t) = C_c A_c \sqrt{\frac{qP(t-\tau_d)\epsilon_0\epsilon_s}{S_e DV_g(t)}}, \quad (4)$$

式中 C_c 为引入的模型参数; $A_a(A_c)$ 为阳(阴)电极面积; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_s 为相对介电常数; S_e 为有效受光面积; D 为吸收区深度,通常为吸收层厚度; τ_d 为电极下空间电荷区形成时间。以 $C_{ga}(t)$ 为例,分析其量纲。在(4)式中, $N(t-\tau)$ 为吸收区内的

电子总数,计算时不考虑量纲,且为时间函数; $S_e D$ 为有效吸收区的体积,量纲为 m^3 ; $\frac{N(t-\tau)}{S_e D}$ 为有效吸收区内的电子密度,为时间函数,量纲为 m^{-3} ; $\frac{q}{V_g(t)}$ 为时间函数,量纲为 C/V ; ϵ_0 量纲为 F/m , ϵ_s 为比值,故无量纲; A_a 量纲为 m^2 ; C_c 为常数。将各量纲代入(4)式,可得 C_{ga} 为时间函数,单位为 F 。同样 C_{gc} 也为时间函数,单位为 F 。

将(4)式代入(3)式计算的电容与实测值吻合较好。

整理(1)式可得

$$I_{op} = \frac{C_m q N v_n C_f F_g}{L_g} + \frac{C_m q P v_p C_f F_g}{L_g} + I_{dark} + C(t) \frac{dV_g}{dt}, \quad (5)$$

其中第一项为吸收区内过剩电子对金属-半导体-金属光电探测器端电流的贡献 I_n ; 第二项为吸收区内空穴对金属-半导体-金属光电探测器端电流的贡献 I_p ; 第三项为暗电导在端电压作用下产生的暗电流 I_{dark} ; 第四项为本征电容在端电压作用下产生的电流 I_c 。其中本征电容包括:无光照条件下的耗尽层电容(暗电容) C_p 和光照条件下产生电荷引起的存储电容 C_T 。即

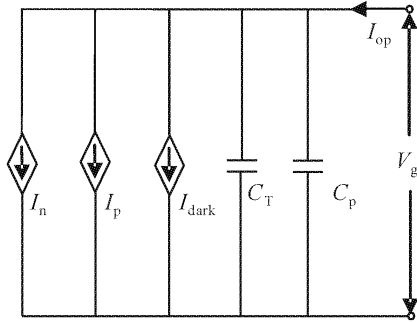


图3 改进型金属-半导体-金属光电探测器等效电路图

Fig. 3 Improved circuit model of MSM-PD

$$I_{op} = I_n + I_p + I_{dark} + I_c, \quad (6)$$

其电路图如图3所示。由(6)式可得,构建一种改进型的金属-半导体-金属光电探测器模型,其结构为电流源、电容并联。从模型可以看出,研究端电流,只需分别考虑吸收区过剩电子和空穴对端电流的影响,暗电流对端电流的影响以及本征电容在端电压作用下产生的电流。将各项电流的计算结果相加即可得出端电流的解析解。

首先研究吸收区过剩电子和空穴对端电流的影响。

金属-半导体-金属光电探测器吸收区过剩电子、空穴的速率方程为^[8,9]

$$\frac{dN}{dt} = G - \frac{N}{\tau_{nt}} - \frac{N}{\tau_{nr}}, \quad (7)$$

$$\frac{dP}{dt} = G - \frac{P}{\tau_{pt}} - \frac{P}{\tau_{pr}}, \quad (8)$$

式中 τ_{nt} (τ_{pt}) 为电子(空穴)漂移渡越时间; τ_{nr} (τ_{pr}) 为电子(空穴)复合寿命; G 为吸收区内单位时间产生的光生载流子数。其中

$$\tau_{nt} = \frac{L_g}{v_n}, \quad \tau_{pt} = \frac{L_g}{v_p}, \quad (9)$$

$$G = \frac{C_i P_{in} (1-R) [1 - \exp(-\alpha D)]}{h\nu}, \quad (10)$$

式中 C_i 为入射系数,表示吸收一个光子产生的电子-空穴对数; P_{in} 为入射到探测器表面的总光功率; R 为入射面反射率; α 为光功率吸收系数; $h\nu$ 为光子能量。

又由文献[9,10]可得

$$v_n = \frac{\mu_n F_g + v_{ns} (F_g/F_{th})^4}{1 + (F_g/F_{th})^4}, \quad v_p = \frac{\mu_p F_g}{1 + \mu_p F_g/v_{ps}}, \quad (11)$$

式中 μ_n (μ_p) 为电子(空穴)迁移率; v_{ns} (v_{ps}) 为电子(空穴)饱和漂移速度; F_{th} 为阈值电场。

将(9),(10),(11)式代入(7),(8)式并求解可得

$$N = \frac{C_i P_{in} L_g \tau_{nr} [1 - \exp(-\alpha D)] [(L_g F_{th})^4 + V_g^4]}{h\nu [L_g (L_g^4 F_{th}^4 + V_g^4) + \tau_{nr} (\mu_n L_g^3 F_{th}^4 V_g + v_{ns} V_g^4)]} \times \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-L_g \tau_{nr} [(L_g F_{th})^4 + V_g^4] t}{L_g [(L_g F_{th})^4 + V_g^4] + \tau_{nr} (\mu_n L_g^3 F_{th}^4 V_g + v_{ns} V_g^4)} \right] \right\}, \quad (12)$$

$$P = \frac{C_i P_{in} L_g \tau_{pr} [1 - \exp(-\alpha D)] (\mu_p V_g + v_{ps} L_g)}{h\nu [L_g (\mu_p V_g + v_{ps} L_g) + \mu_p v_{ps} \tau_{pr} V_g]} \times \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-L_g \tau_{pr} (\mu_p V_g + v_{ps} L_g) t}{L_g (\mu_p V_g + v_{ps} L_g) + \mu_p v_{ps} \tau_{pr} V_g} \right] \right\}, \quad (13)$$

由(12),(13)式可以看出在输入功率一定时,金属-半导体-金属光电探测器过剩区内的电子和空穴数为端电压的函数。利用(12),(13)式可得出 I_n 和 I_p 。

在 E. Sano 的模型中,暗电流用一个暗电导模拟,即暗电流与端电压的关系是线性的,这种近似在不需要精确考虑暗电流特性时是可以接受的,但是

在需要较高的测量精度尤其是微弱信号检测时,这种模拟方法是无法接受的。实际器件的暗电流与端电压的关系是非线性的。其来源主要有:金属-半导体界面和金属-绝缘体界面的肖特基热电子发射;绝缘体 Frenkel-Poole 热电子发射;隧穿电流等。在考虑穿通电压 V_{RT} 的情况下,得到暗电流的解析公式

为^[11~13]

$$I_{\text{dark}} = \beta_D [1 + \lambda_D (V_g - V_{RT})] \tanh[\alpha_D (V_g - V_{RT})], \quad (14)$$

式中 $\beta_D, \lambda_D, \alpha_D$ 分别定义为暗电流条件下的响应度参数、内部电流增益系数和平带电压参数。

由(5),(11)~(13)式可得端电流解析解为

$$I_{\text{op}} = \frac{C_m q v_n C_f F_g}{L_g} \times \frac{C_i P_{\text{in}} L_g \tau_{\text{nr}} [1 - \exp(-\alpha D)] [(L_g F_{\text{th}})^4 + V_g^4]}{h\nu [L_g (L_g^4 F_{\text{th}}^4 + V_g^4) + \tau_{\text{nr}} (\mu_n L_g^3 F_{\text{th}}^4 V_g + v_{\text{ns}} V_g^4)]} \times \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-L_g \tau_{\text{nr}} [(L_g F_{\text{th}})^4 + V_g^4] t}{L_g [(L_g F_{\text{th}})^4 + V_g^4] + \tau_{\text{nr}} (\mu_n L_g^3 F_{\text{th}}^4 V_g + v_{\text{ns}} V_g^4)} \right] \right\} + \frac{C_m q v_p C_f F_g}{L_g} \times \frac{C_i P_{\text{in}} L_g \tau_{\text{pr}} [1 - \exp(-\alpha D)] (\mu_p V_g + v_{\text{ps}} L_g)}{h\nu [L_g (\mu_p V_g + v_{\text{ps}} L_g) + \mu_p v_{\text{ps}} \tau_{\text{pr}} V_g]} \times \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-L_g \tau_{\text{pr}} (\mu_p V_g + v_{\text{ps}} L_g) t}{L_g (\mu_p V_g + v_{\text{ps}} L_g) + \mu_p v_{\text{ps}} \tau_{\text{pr}} V_g} \right] \right\} + \beta_D [1 + \lambda_D (V_g - V_{RT})] \tanh[\alpha_D (V_g - V_{RT})] + C(t) \frac{dV_g}{dt}. \quad (15)$$

3 模拟计算结果

为验证模型,对一种外延的 GaAs 片结构的金属-半导体-金属光电探测器的直流光电特性进行了模拟,其参数主要来自文献[8,14],如表 1 所示。

表 1 金属-半导体-金属光电探测器模型参数

Table 1 Model parameters of MSM-PD

Model parameter	Value	Model parameter	Value
$A_a / \mu\text{m}^2$	2757	R_{dark}	9.1×10^9
$A_c / \mu\text{m}^2$	3114	F_{th}	4.2×10^{10}
α	10^{10}	$\tau_{\text{nr}} / \text{ns}$	0.2
C_p / pF	0.1	$\tau_{\text{pr}} / \text{ns}$	0.65
C_c	0.5	$S_e / \mu\text{m}^2$	3726
C_i	0.38	μ_n	0.55
C_{n0}	10^{-12}	μ_p	0.04
C_f	0.02	λ_D	0.0771
C_m	140	v_{sn}	8.5×10^4
ϵ_n	12.9	v_{sp}	8.5×10^4
$D / \mu\text{m}$	6	β_D	1.01×10^{-9}
$L_g / \mu\text{m}$	3	α_D	6.0
R_s	0.001	V_{RT}	0

根据表 1 中的参数,由(15)式,在 Matlab 中编程、计算、绘制波形图,并与文献[14]中的实验数据进行比较。图 4 为金属-半导体-金属光电探测器暗电流特性模拟结果、测量结果和 E. Sano 模拟结果比较曲线,图 5 为不同输入光功率下的光电流曲线,图 6 为不同端电压下的光电流曲线。结果表明,模

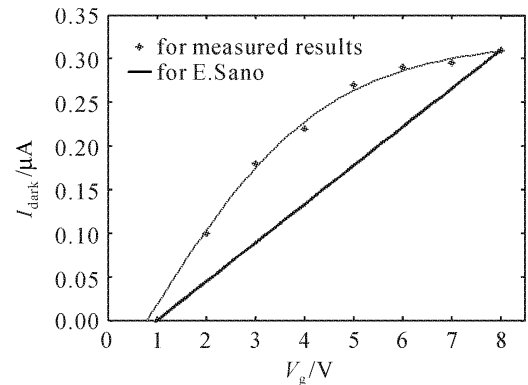


图 4 金属-半导体-金属光电探测器暗电流模拟结果、测量结果和 E. Sano 模拟结果比较曲线

Fig. 4 Comparison between simulated, measured and E. Sano's results for dark current of MSM-PD

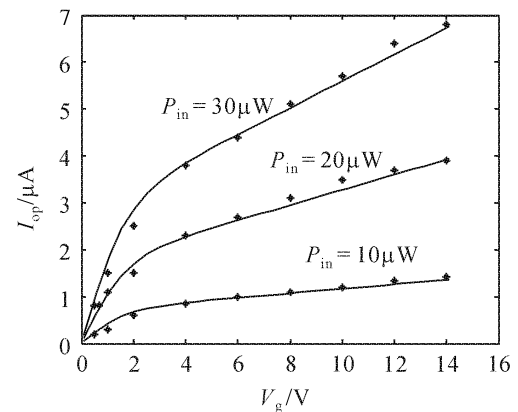


图 5 不同输入光功率下的光电流曲线 (* 为文献[14]中的实验数据)

Fig. 5 Photoelectric current versus bias voltage for different incident light power (* the experimental result of Ref. [14])

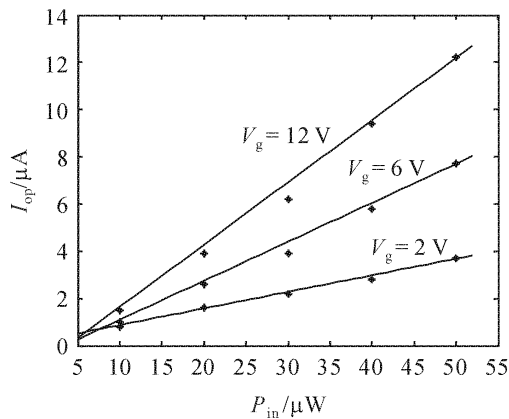


图 6 不同端电压下的光电流曲线

(* 为文献[14]中的实验数据)

Fig. 6 Photoelectric current versus different terminal voltage

(* the experimental result of Ref. [14])

型与实验数据吻合较好。

4 结 论

提出了一种改进型的金属-半导体-金属光电探测器模型。该模型以并联多个电流源和电容的形式构造,通过线性叠加给出了该模型光电流的数学解析解。由于以吸收区过剩电子和空穴总数为研究对象,以吸收区单位体积的过剩电子和空穴数代替电子和空穴的平均密度计算电容,使该模型的计算量大大减少。充分考虑了暗电流的非线性特性,给出了暗电流的一般表达式。在 Matlab 中的仿真表明,该模型具有仿真速度快、准确度高的特点。该模型尤其适用于微弱信号检测的领域,并可以集成到光电集成电路中与别的模型接口使用。

参 考 文 献

- 1 Eiichi Sano. A device model for metal-semiconductor-metal photodetectors and its applications to optoelectronic integrated circuit simulation [J]. *IEEE Trans. on ED.*, 1990, **37**(9): 1964~1968
- 2 Nikhil Ranjan Das, P. K. Basu, M. Jamal Deen. A new approach to the design optimization of HEMT and HBT for

- maximum gain-bandwidth of MSM-based integrated photoreceiver and its noise performance at 1.55 μm [J]. *IEEE Trans. on ED.*, 2000, **47**(11):2101~2109
- 3 Li Shouzhi, Tian Jingmin, Su Qi. Characteristics analysis and SPICE circuit model of versatile photodiode [J]. *Research & Progress of SSE*, 2003, **23**(4):480~483
李守智,田敬民,苏琦. 通用光电二极管 SPICE 模型与特性分析[J]. *固体电子学研究与进展*, 2003, **23**(4):480~483
- 4 Andrew Xiang, Walter Wohlmuth, Patrick Pay *et al.*. Modeling of InGaAs MSM photodetector for circuit-level simulation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(5):716~723
- 5 Gao Jianjun, Gao Baoxin, Liang Chunguang. Equivalent circuit model of metal-semiconductor-metal photodiode [J]. *Journal of Electronics*, 1999, **21**(4):543~548
高建军,高葆新,梁春广. 一个金属-半导体-金属光电探测器等效电路模型[J]. *电子科学学刊*, 1999, **21**(4):543~548
- 6 E. Holger Bottcher, Detlef Kuhl, Frank Hieronymi *et al.*. Ultrafast semiinsulating InP:Fe-InGaAs:Fe-InP:Fe MSM photodetectors; modeling and performance [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(10):2343~2357
- 7 M. Shur. *Physics of Semiconductor Devices* [M]. Prentice-Hall International. Inc., 1990. Chap. 1
- 8 Ma Liqin, Lu Qisheng, Du Shaojun *et al.*. Imitation of the instantaneous change behaviors of photoconductive detectors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3):342~346
马丽芹,陆启生,杜少军等. 光导型光电探测器瞬变行为的仿真[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3):342~346
- 9 Chen Weiyong, Liu Shiyong. Modeling of MSM-PD [J]. *Journal of Electronics*, 1994, **16**(3):327~331
陈维友,刘式庸. 金属半导体金属光电探测器电路模型的研究[J]. *电子科学学刊*, 1994, **16**(3):327~331
- 10 John J. Barnes, Ronald J. Lomax, George I. Haddad. Finite-element simulation of GaAs MESFET's with lateral doping profiles and submicron gates [J]. *IEEE Trans. on ED.*, 1976, **23**(9):1042~1048
- 11 Sun Yachun, Wang Qingkang. Analysis of transient characteristic of metal-semiconductor-metal photodetector [J]. *Optoelectronic Technology*, 2003, **23**(2):121~125
孙亚春,王庆康. 金属-半导体-金属光电探测器的瞬态特性分析[J]. *光电子技术*, 2003, **23**(2):121~125
- 12 Waclaw C. Koscielniak, Jean-Luc Pelouard, Robert M. Kolbas *et al.*. Dark current characteristics of GaAs metal-semiconductor-metal(MSM) photodetectors [J]. *IEEE Trans. on ED.*, 1990, **37**(7):1623~1629
- 13 S. M. Sze. *Physics of Semiconductor Device* [M]. 2nd Edition. New York: Wiley, 1981. Chap. 5
- 14 Li Zhiqi, Wang Qingkang, Shi Changxin. Photoelectric characteristics of GaAs MSM photodetector [J]. *Research & Progress of SSE*, 1992, **12**(3):225~229
李志奇,王庆康,史常忻. GaAs MSM 结构光电探测器的光电特性研究[J]. *固体电子学研究与进展*, 1992, **12**(3):225~229