

文章编号: 0253-2239(2001)01-0101-05

一种新型的光控光导半导体开关解析模型*

龚仁喜^{1), 2)} 张义门¹⁾ 石顺祥¹⁾ 张玉明¹⁾ 孙艳玲¹⁾

1) 西安电子科技大学微电子所, 西安 710071
2) 广西大学电气工程学院, 南宁 530004

摘要: 建立了一个新型的光控光导半导体开关(简称光导开关)解析模型,该模型通过拉氏变换求解了连续性方程,考虑了载流子的表面复合和体复合效应、载流子输运过程中的载流子-载流子散射效应和漂移速度的负微分效应、光作用过程的丹倍效应和光的反射、光强随深度的衰减效应。计算了光导开关的几个重要参数并获得了开关电流和输出电压等的波形。计算表明光强与光电导的关系在所谓的“线性模式”下并非是严格线性的。最后将计算结果与实验结果进行了比较,两者相符较好。

关键词: 拉氏变换; 光导开关; 解析模型; 丹倍效应

中图分类号: O436 文献标识码: A

1 引 言

光导开关具有极其优良的特性,如上升时间短(几十皮秒量级)、响应速度快(几十皮秒量级)、传输功率大(几十兆瓦量级)、同步精度高、光电隔离好、抗干扰能力强、动态范围宽等,在产生高功率微波^[1]、大功率^[2]和超短超快^[3,4]电脉冲以及其他众多领域表现出卓越的性能。它的问世,引起半导体学界和光电学界的极大关注,人们对其理论及应用进行了广泛的研究,并建立了一些理论模型^[5~14]。然而这些模型大都为数值模型且没有考虑载流子-载流子的散射效应、载流子漂移速度的负微分效应以及表面复合等效效应,实际上这些效应对光导开关性能有着重要的影响。本文提出了一个线性工作模式下的解析模型。该模型通过拉氏变换求解了连续性方程,考虑了载流子的表面复合和体复合效应、载流子输运过程中的载流子-载流子散射效应和漂移速度的负微分效应、光作用过程的丹倍效应(即体光生伏特效应)和光的反射、光强随深度的衰减效应;计算了光导开关几个重要的参数并获得了开关电流和输出电压等的波形。计算表明光强与光电导的关系在所谓的“线性模式”下并非是严格线性的。最后将计算结果与实验结果进行了比较,两者相符较好。

2 模 型

2.1 电流连续性方程的求解

图 1 为光导开关的结构示意图。设入射光脉冲

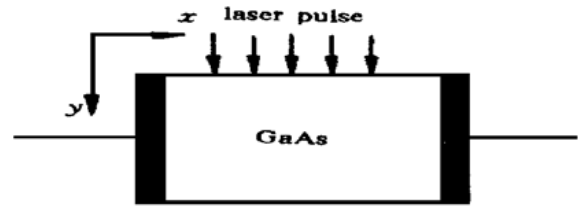


Fig. 1 Schematic diagram of PCSS

的强度为 I_0 , 脉宽为 T , 样品为本征 GaAs 光导开关, 其长度为 L , 宽度为 W , 厚度 $d \gg d_a$ (光的吸收深度 $d_a = 1/\alpha$, α 为吸收系数), 受光面的反射率为 R , 则光强随深度 y 和时间 t 的分布为

$$I(y, t) = (1 - R) I_0 [U(t) - U(t - T)] e^{-\alpha y}, \quad (1)$$

单位时间通过单位面积的光子数分布为

$$N_d(y, t) = \frac{I(y, t)}{h\nu TLW}, \quad (2)$$

光生载流子的产生率为

$$G(y, t) = N_d(y, t) \alpha \beta = g_0 [U(t) - U(t - T)] e^{-\alpha y}. \quad (3)$$

其中 $U(t)$ 为单位阶跃函数, $g_0 = (1 - R) \times I_0 \alpha \beta / (h\nu TLW)$, β 称为量子效率(表示吸收一个光子产生的电子-空穴对数), $h\nu$ 为光子的能量。

入射光是均匀地普照在光导开关上的, 假定吸收系数 α 满足 $\alpha d \gg 1$, 光在很薄的表层内几乎全部

* 国家自然科学基金资助项目(69781002)。

收稿日期: 1999-04-08; 收到修改稿日期: 1999-12-06

被吸收,从而在该层中产生大量的非平衡载流子,这些载流子将在光入射的方向上产生一“内建电场”,达到稳定时的这一电场称为丹倍电场,这种效应就称丹倍效应.这时在平行于入射光的方向上,载流子的扩散系数可用双极扩散系数来表示.考虑丹倍效应后,可将电子和空穴的连续性方程统一写为

$$\frac{\partial \Delta p(y, t)}{\partial t} = D_{pn} \frac{\partial^2 \Delta p(y, t)}{\partial y^2} - \frac{\Delta p(y, t)}{\tau_{pn}} + g_0 [U(t) - U(t - T)] e^{-\alpha y}, \quad (4)$$

边界条件:

$$\lim_{y \rightarrow \infty} \Delta p(y, t) = 0, \Delta p(0, t) = \frac{D_{pn}}{S_{pn}} \frac{\partial \Delta p}{\partial y} \Big|_{y=0},$$

初始条件: $\Delta p(y, 0) = 0, \quad (5)$

式中 p 为双极载流子浓度, $D_{pn} = \frac{2D_n D_p}{D_n + D_p}, \tau_{pn}, S_{pn}$ 分别称为双极扩散系数、双极载流子寿命和双极表面复合速度. D_n, D_p 分别为电子、空穴扩散系数.

对方程两边及边界条件关于 t 取拉氏变换得

$$P(y, s) = \frac{\eta(1 - e^{-Ts})}{(S_{pn} + \alpha D_{pn})(\alpha^2 - \lambda^2) D_{pn} s} e^{-\lambda y} - \frac{g_0(1 - e^{-Ts})}{(\omega_0 - s)s} e^{-\alpha y}, \quad (6)$$

其中 $P(y, s) = L[\Delta p(y, t)], \eta = g_0(S_{pn} + \alpha D_{pn}), \omega_0 = \alpha^2 D_{pn} - \frac{1}{\tau_{pn}}, \lambda = \sqrt{\frac{s + 1/\tau_{pn}}{D_{pn}}}$.

方程两边关于 t 取拉氏反变换得

$$\Delta p(y, t) = [\Delta p_1(y, t) + \Delta p_3(y, t)] * \frac{\exp[-y^2/4D_{pn}t - t/\tau_{pn}]}{\sqrt{\pi t/D_{pn}}} + [\Delta p_2(y, t) + \Delta p_4(y, t)] * \frac{y \exp[-y^2/4D_{pn}t - t/\tau_{pn}]}{2\sqrt{D_{pn}\pi t^3}} + g(y, t),$$

$$\Delta p_1(y, t) = \frac{\eta \omega_2}{D_{pn}} \left[-\frac{1/\tau_{pn} - \omega_1}{\omega_1(\omega_0 + \omega_1)} \exp(-\omega_1 t) - \frac{1/\tau_{pn} + \omega_0}{\omega_0(\omega_0 + \omega_1)} \exp(\omega_0 t) + \frac{1}{\omega_1 \omega_0 \tau_{pn}} \right] U(t), \quad (7a)$$

$$\Delta p_2(y, t) = \frac{\eta \omega_3}{D_{pn}} \left[\frac{1}{\omega_1(\omega_0 + \omega_1)} \exp(-\omega_1 t) + \frac{1}{\omega_0(\omega_0 + \omega_1)} \exp(\omega_0 t) - \frac{1}{\omega_1 \omega_0} \right] U(t), \quad (7b)$$

$$\Delta p_3(y, t) = \frac{\eta \omega_2}{D_{pn}} \left[-\frac{1/\tau_{pn} - \omega_1}{\omega_1(\omega_0 + \omega_1)} \exp[-\omega_1(t - T)] - \frac{1/\tau_{pn} + \omega_0}{\omega_0(\omega_0 + \omega_1)} \exp[\omega_0(t - T)] + \frac{1}{\omega_1 \omega_0 \tau_{pn}} \right] U(t - T), \quad (7c)$$

$$\Delta p_4(y, t) = \frac{\eta \omega_3}{D_{pn}} \left[\frac{1}{\omega_1(\omega_0 + \omega_1)} \exp[-\omega_1(t - T)] + \frac{1}{\omega_0(\omega_0 + \omega_1)} \exp[\omega_0(t - T)] - \frac{1}{\omega_1 \omega_0} \right] U(t - T), \quad (7d)$$

$$g(y, t) = \frac{g_0}{\omega_0} \left([\exp(\omega_0 t) - 1] U(t) - [\exp[\omega_0(t - T)] - 1] U(t - T) \right) \exp(-\alpha y), \quad (7e)$$

其中 $\omega_1 = \frac{1}{\tau_{pn}} - \frac{D_{pn}}{D^2}, \omega_2 = \frac{D_{pn}}{D}, \omega_3 = \frac{D_{pn}}{D^2}, D = \frac{D_{pn}}{S_{pn}}, *$ 为卷积运算符.

总的载流子分布为: $p(y, t) = p_0 + \Delta p(y, t), p_0$ 为暗态载流子浓度($p_0 = n_i$, 即本征载流子浓度).

2.2 光导开关的传输线模型分析

光导开关可用图 2 所示的传输线等效电路来表征.

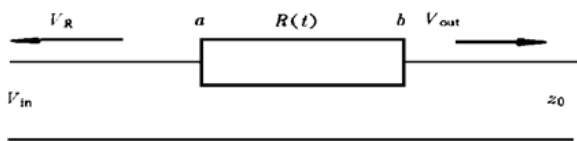


Fig. 2 Equivalent circuit of photoconductive semiconductor switch

由电路图可得

$$V_a = V_{in} + V_R, \quad (8)$$

$$V_b = V_{out}, \quad (9)$$

$$\frac{V_a - V_b}{R(t)} = \frac{V_{out}}{Z_0} = -\frac{V_R}{Z_0}, \quad (10)$$

式中 Z_0 为输出负载阻抗.

2.3 迁移率模型

由于光生载流子的浓度很高,外加电场很强,载流子之间的相互作用及载流子漂移速度的负微分效应已很显著,这两种效应都会显著地影响载流子的迁移率.因此,本模型在外加电场的方向上考虑了这两种效应.载流子之间的相互作用使用了 Dorkel 给出的载流子-载流子散射表达式^[15]来表征:

$$\mu_c = \frac{2.00 \times 10^{17} T_0^{1.5}}{\sqrt{np} \ln(1 + 8.28 \times 10^8 T_0^2 / \sqrt{np})}, \quad (11)$$

$T_0 = 300 \text{ K}$ 。载流子漂移速度的负微分效应使用了 Huang Dihui 给出的速度-电场表达式^[16]

$$V(t) = \frac{v_0 [E(t)/E_0] + v_s [E(t)/E_0]^2}{1 + [E(t)/E_0]^2}, \quad (12)$$

其中 $v_0 = E_0 \mu_0$, μ_0 为低场迁移率, E_0 为一拟合参数 ($E_0 \approx 3000 \text{ V/cm}$), $v_s = 8 \times 10^6 \text{ cm/s}$, 为电子的饱和速度。相应的迁移率可表示为

$$\mu_c = \frac{V(t)}{E(t)}, \quad (13)$$

总的电子迁移率可表示为

$$\frac{1}{\mu_n} = \frac{1}{\mu_c} + \frac{1}{\mu_e}. \quad (14)$$

2.4 电导率及电导的计算

电导率分布为

$$\sigma(y, t) = q(\mu_n + \mu_p)p(y, t) \approx q\mu_n p(y, t) = \sigma_0 + \Delta\sigma(y, t) \approx \Delta\sigma(y, t), \quad (15)$$

$\sigma_0 \approx q\mu_n p_0$, $\Delta\sigma(y, t) \approx q\mu_n \Delta p(y, t)$ 分别为暗电导率和光生电导率。 q 为电子电量, μ_n 、 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率 ($\mu_n \gg \mu_p$)。令电导

$$G(t) = G_0 + \Delta G(t) \approx \Delta G(t), \quad (16a)$$

式中 $G_0 = q(\mu_n + \mu_p)p_0 \frac{Wd}{L}$

和 $\Delta G(t) = q(\mu_n + \mu_p) \frac{W}{L} \times$

$$\int_0^{d_a} \Delta p(y, t) dy \approx q\mu_n \Delta p(t) \frac{W}{L}$$

分别为暗电导和光生电导。式中

$$\Delta p(t) = \int_0^{d_a} \Delta p(y, t) dy. \quad (16b)$$

2.5 主要参数的计算

由方程(10)可得

$$E(t)L = V_a - V_b = \frac{R(t)V_{\text{out}}}{Z_0} = \frac{R(t)V_{\text{in}}}{2Z_0 + R(t)} = \frac{V_{\text{in}}}{2Z_0 G(t) + 1}. \quad (17)$$

由(14)式、(16a)式、(17)式求解 $E(t)$ 得

$$E(t) = 2E_0 \sqrt{\frac{a_0}{3}} \cos\left[\frac{\arccos(3b_0/a_0 m)}{3}\right], \quad (18)$$

其中

$$a_0 = (3q - p^2)/3, \\ b_0 = (2q^2 - 9pq + 27r)/27,$$

$$p = \frac{A_0 \mu_c v_s / E_0 + v_s / E_0 - B_0 \mu_c}{\mu_c},$$

$$q = \frac{A_0 \mu_0 \mu_c + \mu_0 + \mu_c - B_0 v_s / E_0}{\mu_c},$$

$$r = \frac{B_0(\mu_0 + \mu_c)}{\mu_c},$$

$$A_0 = \frac{2Z_0 W d_a q \Delta p(t)}{L},$$

$$B_0 = \frac{V_{\text{in}}}{E_0 L}.$$

开态电导为

$$G(t) = q\mu_n \left[\frac{W}{L} \right] \Delta p(t). \quad (19)$$

开态电阻为

$$R(t) = \frac{L}{q\mu_n W \Delta p(t)}, \quad (20)$$

输出电压为

$$V_{\text{out}} = \frac{Z_0}{2Z_0 + R(t)} V_{\text{in}}, \quad (21)$$

开关电流为

$$I(t) = \frac{V_{\text{out}}}{Z_0} = \frac{V_{\text{in}}}{2Z_0 + R(t)}, \quad (22)$$

输出功率为

$$P_{\text{out}}(t) = \frac{V_{\text{out}}^2(t)}{Z_0}, \quad (23)$$

电压传递效率为:

$$\eta_v(t) = \frac{V_{\text{out}}(t)}{V_{\text{in}}} = \frac{Z_0}{2Z_0 + R(t)}. \quad (24)$$

3 计算结果与实验结果的比较

根据该模型, 计算了光导开关的开态电导, 开关电场随时间的变化关系和电导随光强的变化关系; 分析了开关长度、入射光能等对光导开关性能的影响。

下面给出模拟结果及其与实验结果的比较。所使用的主要参数为: $I_0 = 41.5 \text{ } \mu\text{J}$, $L = 1.5 \text{ mm}$, $W = 3 \text{ mm}$, $\lambda = 0.53 \text{ } \mu\text{m}$, $\mu_0 = 7500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, $\mu_p = 350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, $d_a = 10 \text{ } \mu\text{m}$, $V_{\text{in}} = 2000 \text{ V}$, $T = 14.9 \text{ ns}$ 。

3.1 光导开关的开态电导与入射光能的关系

光导开关的开态电导与入射光能的关系如图 3 所示。由图可知, 光电导与光强的关系只在极有限的范围内可以看成是线性的。当光能较大或较小时, 都表现出明显的非线性。光能较小时主要是由

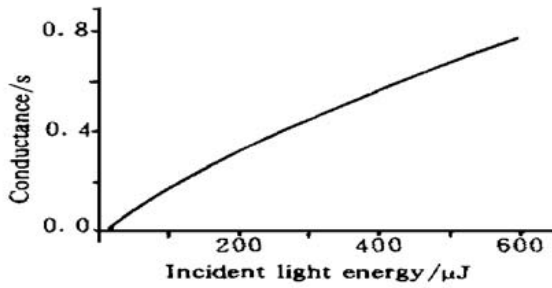


Fig. 3 Switch conductance vs. incident light energy

于开关中的电场较强从而使电子的漂移速度进入负微分区引起的,而光能较强时则主要是载流子-载流子之间的散射使迁移率下降所致。

3.2 开态电阻与开关隙长度的关系

开态电阻与开关隙长度的关系如图 4 所示,由图可知:开态电阻与开关隙长度的平方成正比。

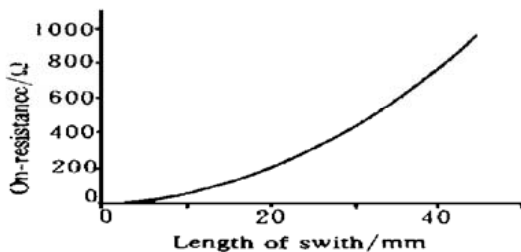


Fig. 4 On-resistance vs. gap length of switch

3.3 开关电场随时间的变化关系

开关电场随时间的变化关系如图 5 所示,可以看出,电场随时间的变化是与输入脉冲的波形相位相反的。

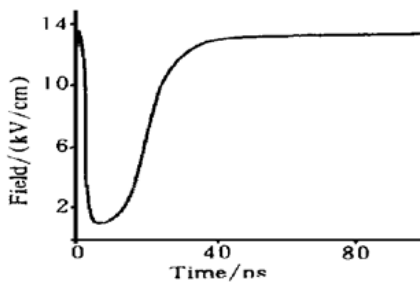


Fig. 5 Switch field vs. time

3.4 开关电流、输出电压波形及与实验的比较

模型获得的开关电流和输出电压波形如图 6 和图 7 所示。实验的输出电压波形如图 8 所示。输出

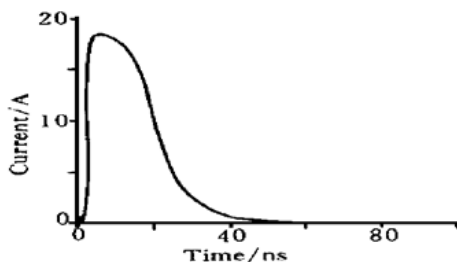


Fig. 6 Current through switch vs. time

电压峰值约 900 V, 峰值电压转换效率为 45% 左右,与模型结果基本相符。

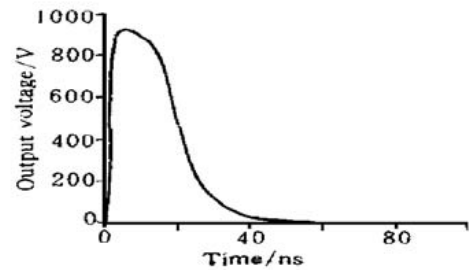


Fig. 7 Output voltage vs. time

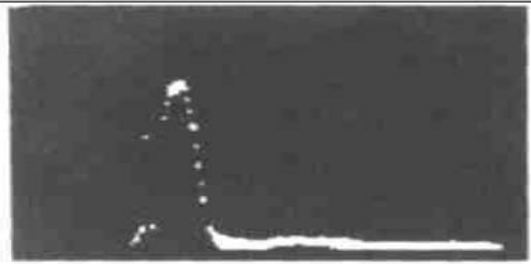


Fig. 8 Measured waveform of output voltage

结论 本文基于光导开关载流子输运过程所遵循的连续性方程,通过拉氏变换获得了光导开关中载流子随时间及深度分布的解析表达式;根据光导开关的传输线等效电路,得到了表征光导开关特性的一些重要参数,并由此分析了光导开关的工作机理,光强与光电导的关系在所谓的“线性模式”下并非是严格线性的,这已由实验和本文的理论所证实。通过本文可以看出,计算线性工作模式下光导开关的有关参量时,把迁移率均看成常数是不甚合理的。

参 考 文 献

- [1] 黄裕年. 用光导半导体开关产生高功率微波. 半导体光电, 1998, **19**(2): 101~106
- [2] 施 卫, 梁振宪, 徐传骧. 高倍增 GaAs 光电导开关的设计与研制. 西安交通大学学报, 1998, **32**(8): 19~23
- [3] Loubriel G M, Helgeson W D, McLaughlin D L *et al.*. Triggering GaAs lock-on switches with laser diode arrays. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1991, **ED-38**(4): 692~695
- [4] Krokell D, Grischowsky D, Ketchen M B. Subpicosecond electrical pulse generation using photoconductive switches with long carrier lifetime. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**(11): 1064~1047
- [5] Morse J D, Poene M D. Characteristics and modeling of high voltage photoconductive switching devices. *Proc. IEEE Seventeenth Power Modulator Symposium*, 1986, 211~213
- [6] 石顺祥, 王永昌. 新型光导开关瞬时特性的研究. 西安电子科技大学学报, 1995, **22**(1): 8~13
- [7] 石顺祥, 鲍吉龙, 朱立峰 等. 高压 PS 光导开关瞬时特

- 性. 西安电子科技大学学报, 1993, **20**(3): 33~ 37
- [8] 石顺祥, 鲍吉龙, 王永昌等. 新型高效率微带型光导开关脉冲产生器输出特性的研究. 光学学报, 1994, **14**(3): 313~ 317
- [9] Iverson A E, Smith D. Mathematical modeling of photoconductor transient response. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1987, **ED-34**(10): 2098~ 2107
- [10] Eiichi Sano, Tsugumichi Shibata. Fullwave analysis of picosecond photoconductive switches. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **26**(2): 372~ 377
- [11] ElChazaly S M, Joshi R P. Electromagnetic and transport considerations in subpicosecond photoconductive switch modeling. *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, 1990, **38**(5): 629~ 637
- [12] Hudgins J L, Bailey D W, Dougal R A *et al.*. Streamer model for ionization growth in a photoconductive power switch. *IEEE Trans. Power Electron.*, 1995, **10**(5): 615~ 620
- [13] 施 卫, 梁振究, 冯 军. Monte Carlo 方法在高倍增 GaAs 光电导开关模拟中的应用. 西安交通大学学报, 1998, **32**(4): 1~ 3
- [14] Zhao Hanmin, Jung H. Hur, Gunderson M A. Avalanche injection model for the lock-on in III V power photoconductive switches. *J. Appl. Phys.*, 1993, **13**(5): 1807~ 1812
- [15] 张义门, 任建民. 半导体器件计算机模拟. 北京: 电子工业出版社, 1991. 25~ 26
- [16] Huang Dihui, Lin H C. DC and transmission line model for a high electron mobility transistor. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1989, **37**(9): 1361~ 1369

A New Analytical Model for Optically Controlled Photoconductive Semiconductor Switches

Gong Renxi^{1),2)} Zhang Yimen¹⁾ Shi Shunxiang¹⁾ Zhang Yuming¹⁾ Sun Yanling¹⁾

[1), *Microelectronics Institute of Xidian University, Xi'an 710071;*
[2), *Electrical engineering School of Guangxi University, Nanning 530004*]

(Received 8 April 1999; revised 6 December 1999)

Abstract: A new analytical model for photoconductive semiconductor switches (PCSS) is proposed considering the surface and bulk recombinations, the carrier-carrier scattering and the negative differential effect of the carrier drift velocity in their transport process, Dembet effect, optical reflection and attenuation with depth during the optical action. Some important parameters characterizing PCSS, such as on-resistance and switching efficiency etc, have been simulated. Also the waveforms of the switch current and output voltage have been obtained. The calculations show that the relation between photo-conductance and incident light intensity is not strictly linear but nonlinear in what is called linear operational mode of the switch. The good agreement has been obtained by comparing the calculation with the experimental data.

Key words: Laplace transform; photoconductive semiconductor switches; analytical model; Dembet effect