

两能谷效应对 GaAs 光电导天线载流子运输的影响

张李伟¹ 尚丽平¹ 唐金龙² 夏祖学¹ 邓琥¹

(¹西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621010)
(²西南科技大学理学院, 四川 绵阳 621010)

摘要 光电导天线(PCA)产生太赫兹(THz)辐射受光生载流子运输情况的影响很大。考虑到 GaAs 材料光电导天线两能谷效应,修正了德鲁德-洛伦兹模型,得到了载流子运输情况并与经典扩散-漂移模型仿真结果进行了对比。同时采用了时域有限差分方法(FDTD)耦合载流子密度,仿真太赫兹辐射时域波形,并与太赫兹时域光谱系统(THz-TDS)测量时域波形对比。结果表明,两能谷效应修正的德鲁德-洛伦兹模型仿真辐射时域波形与 THz-TDS 测量波形吻合,14 μm 和 34 μm 小孔径 GaAs 偶极子光电导天线在波长为 800 nm,脉冲半峰全宽为 30 fs,脉冲重复频率为 75 MHz,平均功率为 327 mW 的钛宝石飞秒激光器照射条件下,GaAs 材料衬底两能谷效应引起的载流子运输变化对 THz 辐射起关键作用。

关键词 物理光学;太赫兹;光电导天线;扩散漂移模型;德鲁德-洛伦兹模型;载流子运输

中图分类号 O441.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.102601

Two-Valley Effect on GaAs Photoconductive Antenna's Carrier Transport

Zhang Liwei¹ Shang Liping¹ Tang Jinlong² Xia Zuxue¹ Deng Hu¹

¹ School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology,
Mianyang, Sichuan 621010, China

² School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China

Abstract Photo-carrier transport has great influence on photoconductive antenna (PCA) terahertz electromagnetic wave. In this paper, involved with GaAs material's two-valley effect, the Drude-Lorentz model is updated, and to some extent, the carrier transport conditions is obtained and compared with the simulation result of classical Diffusion-Drift model. Carrier density is coupled with the finite difference time domain (FDTD) method to simulate terahertz radiation's time domain waveform which then be compared with THz-TDS's measurement of the time-domain waveform. The results show that Drude-Lorentz model's simulation time-domain waveform updated by two-valley effect is more similar with THz-TDS's measurement waveform. When 14 μm and 34 μm aperture photoconductive antenna irradiated by titanium gem femtosecond laser, with its wavelength of 800 nm, pulse half width of 30 fs, pulse repetition frequency of 75 MHz, average power of 327 mW, the carrier's transport changes caused by GaAs substrate's two-valley play a key role in THz radiation.

Key words physical optics; terahertz; photoconductive antenna; diffusion-drift model; Drude-Lorentz model; carrier transport

OCIS codes 260.2110; 260.3090; 260.5150

1 引言

光电导天线(PCA)是产生太赫兹(THz)辐射的一种重要方法,具有高功率和宽频带的特点,受到了广泛

收稿日期: 2012-05-09; **收到修改稿日期**: 2012-07-02; **网络出版日期**: 2012-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(11176032)资助课题。

作者简介: 张李伟(1987—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹光电导天线模拟方面的研究。

E-mail: zhanggliwei@126.com

导师简介: 尚丽平(1968—),女,教授,硕士生导师,主要从事光电检测与太赫兹技术等方面的研究。

E-mail: shangliping@swust.edu.cn

关注^[1,2]。经过 20 多年研究,光电导天线的辐射机理从唯象模型发展到理论模型,如采用扩散-漂移(DD)模型和时域有限差分(FDTD)方法分析半导体器件载流子输运^[3]、模拟光电导开关的输出电流特性^[4]、分析 PCA 的辐射特性^[5];采用德鲁德-洛伦兹(DL)模型从机理出发,研究 PCA 辐射远场时域特性^[6,7]。然而,GaAs 材料的两能谷效应所引起的载流子输运变化对 THz 辐射起关键作用,上述模型未考虑该效应。

本文在介绍 PCA 的工作机理基础上,用 DD 模型和 DL 模型分析了光生载流子输运;仿真得到了线性工作模式下 14 μm 和 34 μm 小孔径偶极子 GaAs 光电导天线的电流密度曲线,并将瞬态电流密度耦合到 FDTD 中,得到 THz 远场辐射时域波形。仿真结果表明,引入 GaAs 材料两能谷效应的 DL 模型与 PCA 实际辐射更吻合。

2 PCA 机理分析

2.1 PCA 辐射机理

PCA 辐射 THz 机理如图 1 所示。首先,飞秒激光经过凸透镜聚焦后光斑落在 PCA 两电极中间,GaAs 材料主要以本征吸收 800 nm 激光光子能量,使直接带隙 1.42 eV 的电子由价带跃迁到导带形成非平衡的电子-空穴对,如图 2 所示;然后,非平衡的电子-空穴在偏置电压产生的强电场作用下分别向电极两端运动,使原本高阻态($10^8 \Omega/\text{cm}$)的本征 GaAs 光电导电阻率下降 6 个数量级,PCA 从高阻态到导通态可以在皮秒甚至亚皮秒量级时间内完成^[8],当激光停止照射后,大量的光生载流子由于复合而消失;最后,由于瞬态的非平衡电子-空穴输运在 PCA 垂直方向向外辐射出 THz 电磁波。

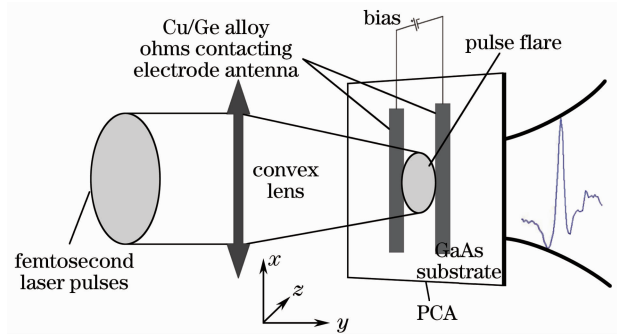


图 1 PCA 辐射 THz 机理

Fig. 1 Mechanism of PCA radiation THz

2.2 采用 DD 模型对光生载流子输运的分析

DD 模型从宏观角度把半导体器件中的载流子看成是连续不断的“流体”,用引入波尔兹曼分布的泊松方程

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{q n_i}{\epsilon} \left[\exp\left(\frac{-q\varphi}{kT}\right) - \exp\left(\frac{q\varphi}{kT}\right) + N_D - N_A \right], \quad (1)$$

电流密度方程

$$\mathbf{J} = q(\mu_n n + \mu_p p)(\mathbf{E}_b + \mathbf{E}) + qD_n \nabla n - qD_p \nabla p, \quad (2)$$

电流连续性方程

$$q \frac{dn}{dt} = \nabla \cdot \mathbf{J}_n + q(G - R), \quad (3)$$

$$q \frac{dp}{dt} = -\nabla \cdot \mathbf{J}_p + q(G - R), \quad (4)$$

来描述器件特性,式中 φ 为静电势, q 代表电子所带电荷量, n 、 p 、 N_D 、 N_A 分别代表电子、空穴、施主杂质和受主杂质的浓度, ϵ 为光电导体的相对介电常数, \mathbf{J} 表示电流密度矢量, \mathbf{J}_n 、 \mathbf{J}_p 分别表示电子和空穴的流密度矢量, D_n 、 D_p 分别代表电子和空穴的扩散系数, μ_n 、 μ_p 分别代表电子和空穴的迁移量, G 表示光生载流子的产生率, R 表示光生载流子的复合率。

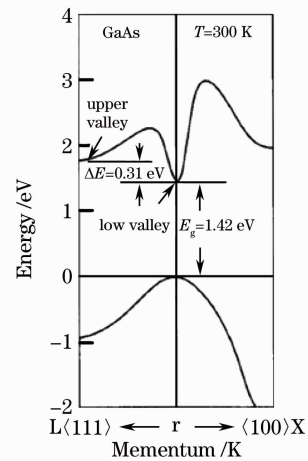


图 2 GaAs 能带图

Fig. 2 Energy-band structures of GaAs

$$G(x, y, z, t) = \frac{\alpha I_0}{h\nu} \cdot \exp[-\alpha(z_0 - z)] \cdot \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2}\right] \times \exp\left\{-\left[t - (z_0 - z) \cdot \frac{\sqrt{\epsilon_s}}{c} - t_0\right]^2 / \sigma_t^2\right\}, \quad (5)$$

式中 α 为激光吸收系数, I_0 为激光光强, $h\nu$ 为光子能量, σ_x 与 σ_y 为光斑表面大小, σ_t 为脉冲的作用时间, t_0 为激光达到峰值功率的时间^[5]。

$$R = \frac{np}{\tau_{n0}n + \tau_{p0}p}, \quad (6)$$

式中^[5] τ_{n0} 、 τ_{p0} 分别为电子空穴载流子寿命。

2.3 采用 DL 模型对光生载流子输运的分析

DL 模型忽略半导体中的扩散效应, 将光生载流子视为电子气, 影响其密度的因素主要有电荷量 q 、载流子密度 n 、载流子漂移速度 v 。光生载流子密度变化由两个方面产生:

1) 载流子密度的变化, 即

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{n}{\tau_c} + G, \quad (7)$$

式中 τ_c 为 GaAs 内部 EL₂ 杂质陷阱对电子的捕获时间, 它小于电子-空穴对的复合时间。

2) 漂移速度的变化

在偏压下, 光生载流子运动速度与时间关系可以表示为

$$\frac{dv_n}{dt} = -\frac{v_n}{\tau_s} + \frac{q}{m}E, \quad (8)$$

(8)式以电子为例, 空穴有相同关系。 τ_s 为载流子漂移速度从零达到稳态值所需要的弛豫时间(GaAs 约为 1 ps)^[9]。

$$\mu = \mu_0 \frac{1 + \frac{V_{\text{sat}}}{\mu_0 E_b} \left(\frac{E_b}{E_{\text{th}}}\right)^4}{1 + \left(\frac{E_b}{E_{\text{th}}}\right)^4}, \quad (9)$$

因此, 电流密度随时间的变化关系为

$$J(t) = \frac{\sigma(t)E_b}{1 + \frac{\sigma(t)\eta_0}{1 + \sqrt{\epsilon}}}, \quad (10)$$

$$\sigma(t) = e\mu n(t), \quad (11)$$

式中 $\sigma(t)$ 为表面电导率, η_0 为自由空间波阻抗, 大小为 377 Ω , ϵ 为光电导体的相对介电常数。

2.4 GaAs 两能谷效应对载流子迁移率的修正

影响漂移速度的内部因素是电子迁移率, GaAs 材料具有高迁移率的主能谷在布里渊区中心, 低迁移率的次能谷沿 $\langle 111 \rangle$ 轴方向, 能量比主能谷高 0.31 eV, 如图 2 所示。随着电场的增加, 主能谷中的电子约 60% 以上可以被激发到未被占据的次能谷, 产生微分负阻, 形成畴, 引起电场屏蔽。(9)式为迁移率经验公式^[10], 能够表征 GaAs 材料两能谷效应引起迁移率随电场变化的情况。

Kirawanich 等^[5]用 Caughey 等^[11]的迁移率公式^[11]仿真了 PCA 辐射特性, 但无法正确描述 GaAs 材料的载流子漂移速率, 如图 3 点划线所示。GaAs 两能谷效应修正后的公式[(9)式]描述了转移电子效应对漂移速率的影响, 如图 3 实线所示。迁移率公式^[11]为

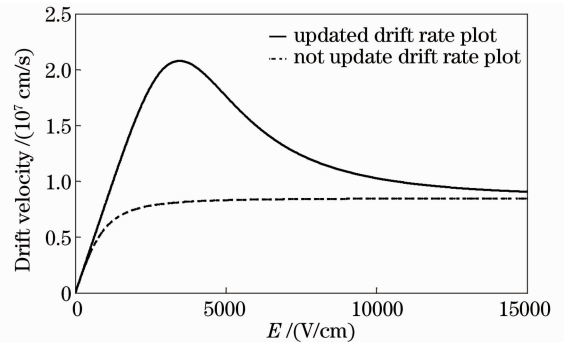


图 3 根据两能谷模型修正和未修正 GaAs 漂移速度-电场特性曲线

Fig. 3 Calculated drift velocity-field characteristics for GaAs based on a two-valley model updated and not updated plot

$$\mu(E) = \frac{\mu_0}{\sqrt{1 + (\mu_0 E_b / V_{sat})^2}}, \tag{12}$$

(9)式、(12)式中 μ_0 为温度在 300 K, 无外加电场条件下电子迁移率, 取值为 $8000 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$; V_{sat} 为强场条件下电子的饱和速率, 取值为 $8.5 \times 10^6 \text{ cm/s}$; E_{th} 为阈值电场, 大小为 3.4 kV/cm 。对于空穴有类似公式。

3 34 μm 和 14 μm GaAs 小孔径偶极子 PCA 仿真与实验研究

图 4 为自主研发的采用 GaAs 作为衬底, 欧姆接触 Cu/Ge 合金作为电极天线的两款小孔径 PCA。图 5 为分别用 DD 模型和两能谷效应修正的 DL 模型对载流子输运情况的仿真图, 图 6 为采用 FDTD 方法得到远场时域波形与 THz-TDS 系统测量实验波形对比结果。

表 1 给出了仿真条件。该仿真是在线性模式^[12]、没有达到 GaAs 材料雪崩碰撞电场(约 350 kV/cm)^[13] 情况下进行的。图 5 所示为仿真得到的 34 μm 孔径 GaAs 光电天线载流子的密度随时间变化曲线。由图看出, 光照前高阻态的 GaAs 载流子密度为 0, 激光脉冲照射后, 由于激光脉冲半峰全宽小于 GaAs 载流子寿命(约 600 fs), 光生载流子数目迅速线性增长, 在强场作用下漂移运动; 激光关断后, 由于复合和 EL₂ 能级缺陷作用, 光生载流子数目呈指数衰减。引入双能谷效应的 DL 模型对迁移率和 EL₂ 缺陷复合进行修正后, 漂移速度的显著变化使得激光照射后载流子密度延迟短、关断后拖尾小。表 2 为测量与仿真数据对比。

表 1 PCA 实验与仿真条件

Table 1 PCA experimental and simulation conditions

Parameter	Value
Bias E_b / V	35,55
Aperture $D / \mu\text{m}$	14,34
Laser pulse half wide / fs	30
Laser wavelength λ / nm	800
Laser average power P / mW	327
Temperature T / K	300

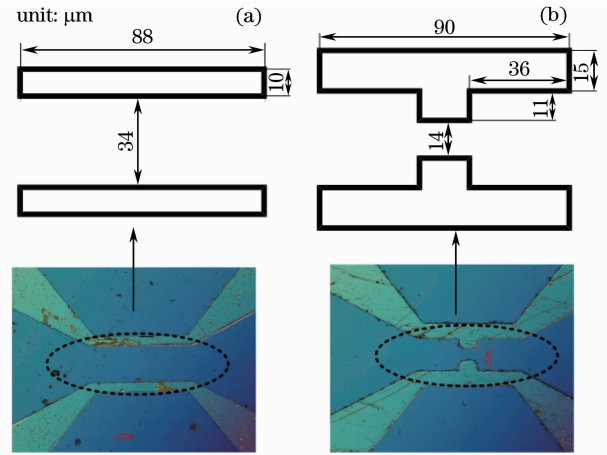


图 4 PCA 尺寸与实物图。(a) 34 μm 孔径 GaAs 偶极子; (b) 14 μm 孔径 GaAs 偶极子

Fig. 4 PCA size and physical picture. (a) 34 μm aperture GaAs dipole; (b) 14 μm aperture GaAs dipole

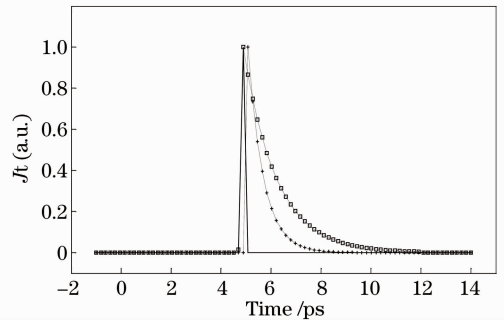


图 5 DL 模型和 DD 模型仿真载流子密度随时间的变化
Fig. 5 DL model and the DD model to simulate carrier concentration versus time

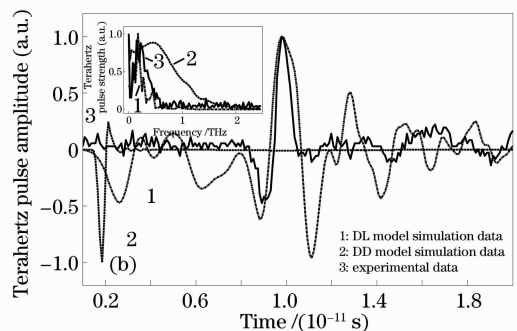
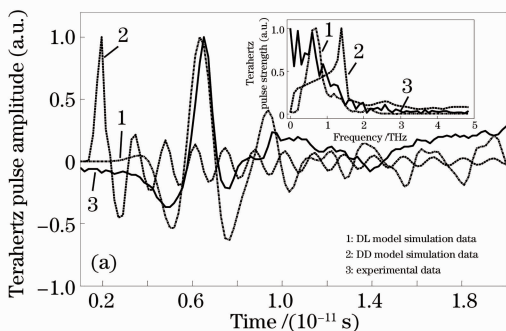


图 6 PCA 时域、频域仿真和实验图(插图为仿真和实验 FFT 变化后频谱图)。(a) 34 μm 孔径 GaAs 偶极子; (b) 14 μm 孔径 GaAs 偶极子

Fig. 6 PCA time domain, frequency domain simulation and experiments data (inserted plot shows the simulation and experiments data's FFT spectrogram). (a) 34 μm aperture GaAs dipole; (b) 14 μm aperture GaAs dipole

由图 6 和表 2 可以看出,对于 34 μm PCA,采用 DL 模型仿真得到 2.660 ps 的脉冲宽度与 THz-TDS 测量值完全相同;采用 DD 模型仿真得到 1.386 THz 频谱峰值与测量值 0.693 THz 有较大差异。表明,DL 模型考虑 GaAs 的两能谷效应后仿真所得到的脉冲波形与实验测量值吻合较好、对应的频域谱峰值更接近;而 DD 模型仿真得到的数据则与实验测量数据误差较大。综上所述,从 PCA 辐射机理出发,DL 模型较 DD 模型能够更完善、准确地描述载流子的输运情况。

表 2 测量与仿真数据对比

Table 2 Comparison the data of measurement and simulation

Antenna design	Project	Pulse width /ps	Peak-peak width /ps	Spectrum peak /THz
34 μm	THz-TDS measurement	2.660	1.520	0.693
	DL model	2.660	1.330	0.594
	DD model	1.330	0.950	1.386
14 μm	THz-TDS measurement	2.485	0.859	0.150
	DL model	2.291	0.955	0.175
	DD model	0.764	0.477	0.475

4 结 论

DD 模型和 DL 模型在对 PCA 的仿真中都包含有限的载流子寿命、瞬变载流子迁移率^[14,15]等影响因素。DL 模型引入两能谷效应对 GaAs 材料迁移率修正后,能更加完善地表征强场下载流子迁移率的变化。通过对载流子输运情况的仿真以及采用 FDTD 方法仿真 PCA 载流子密度产生远场辐射波形与 THz-TDS 测量值进行对比可知,两能谷效应对 GaAs 材料 PCA 载流子输运有很大的影响;对 DL 模型的修正能够更加有效、正确地反应 PCA 辐射情况。

参 考 文 献

- 1 Cheng Wei, Wang Yingxin, Zhao Ziran. New research progress of photoconductive terahertz source[J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(6): 597~604
程 伟,王迎新,赵自然. 光电导太赫兹源新进展[J]. 激光与红外, 2011, **41**(6): 597~604
- 2 Xie Yuan, Wang Yana, Liu Wei *et al.*. Comparative study on GaAs photoconductive semiconductor switch[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(6): 063201
谢 媛,王娅娜,刘 维等. 砷化镓光导开关的比较研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(6): 063201
- 3 M. Sirbu, S. B. P. Lepaul, F. Aniel. Coupling 3-D maxwell's and boltzmann's equations for analyzing a terahertz photoconductive switch[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, **53**(9): 2991~2998
- 4 Z. Xing. Numerical physics of subpicosecond electrical pulse generation by nonuniform gap illumination[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1996, **32**(9): 1672~1679
- 5 P. Kirawanich, S. J. Yakura, N. E. Islam. Study of high-power wideband terahertz-pulse generation using integrated high-speed photoconductive semiconductor switches[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, **37**(1): 219~228
- 6 Z. S. Piao, M. Tani, K. Sakai. Carrier dynamics and terahertz radiations in photoconductive antenna[J]. *Appl. Phys.*, 2000, **39**(2000): 96~100
- 7 J. T. Darrow, X. C. Zhang, D. H. Auston *et al.*. Saturation properties of large-aperture photoconducting antennas[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, **28**(6): 1607~1616
- 8 Huang Zhen, Yu Bin, Zhao Guozhong. The THz emission properties of small-aperture photoconductive antenna[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 110~114
黄 振,于 斌,赵国忠. 小孔径光电导天线产生太赫兹波的辐射特性[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 110~114
- 9 Gong Renxi, Zhang Yimen, Shi Shunxiang *et al.*. Analysis of lock-on and time delay in high-voltage GaAs PCSS's[J]. *Acta Optical Sinica*, 2001, **21**(11): 1372~1376
龚仁喜,张义门,石顺祥等. 高压 GaAs 光导开关的锁定及延迟效应机理分析[J]. 光学学报, 2001, **21**(11): 1372~1376
- 10 T. Horio, T. Ikoma, H. Yanai. Computer-aided analysis of GaAs n-i-n structures with a heavily compensated i-layer[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1986, **33**(9): 1242~1250
- 11 D. M. Caughey, R. E. Thomas. Carrier motilities in silicon empirically related to doping and field[J]. *Proc. IEEE*, 1967,

55: 2192~2193

- 12 M. SZE. Physics of Semiconductor Device (Third Edition)[M]. Xi'an Jiao Tong University Press, 2008. 6
施敏. 半导体器件物理(第三版)[M]. 西安交通大学出版社, 2008. 6
- 13 Shang Liping, Deng Hu, Liu Juan *et al.*. Terahertz time-domain spectrum system based on photoconductive semiconductor switch with offset voltage[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(3): 95~99
尚丽平, 邓琥, 刘娟等. 基于光导开关脉冲偏置电压的太赫兹时域光谱系统[J]. 光电工程, 2011, **38**(3): 95~99
- 14 Jia Wanli. Experimental and Theoretical Analysis of THz Generate by GaAs Photoconductive Switches[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007
贾婉丽. GaAs 光电导开关产生太赫兹电磁波的实验机理论分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2007
- 15 Ni Zhengji, Chen Lin, Wang Shuling *et al.*. Electrons intervalley transfer gain in bulk GaAs[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 658~662
倪争技, 陈麟, 王淑玲等. 砷化镓内电子谷间散射引起的增益[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 658~662