

文章编号: 1001-3806(2015)04-0488-04

InSb 光电导太赫兹源材料性质及辐射场研究

潘武, 张红林, 徐政珂, 黄书麟

(重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065)

摘要: 为了研究碲化铟(InSb)半导体材料光电导太赫兹辐射过程,用数值计算方法分析材料内载流子迁移率和表面电流,以及不同性质抽运激光器对太赫兹波近场强度的影响,用宏观电磁场理论和微观半导体理论分析材料表面电流,比较了InSb和GaAs材料的太赫兹波功率谱曲线。结果表明,InSb材料载流子弛豫时间越长,载流子迁移率越大;表面电流与载流子寿命和弛豫时间成正比;宏观电磁场理论更适于分析表面电流;抽运激光饱和能量密度越大,太赫兹近场辐射强度越强;抽运激光脉冲宽度越短,太赫兹近场辐射强度越强;InSb光电导辐射太赫兹波功率比GaAs高。该结果为基于InSb光电导太赫兹辐射源的研究奠定了一定的基础。

关键词: 激光物理;太赫兹辐射;碲化铟光电导;载流子迁移率;表面电流;飞秒脉冲抽运

中图分类号: TN365

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.04.013

Research of characteristics of InSb photoconduction terahertz wave radiation material and its radiation field

PAN Wu, ZHANG Honglin, XU Zhengke, HUANG Shulin

(College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to study the photoconduction terahertz radiative process of InSb semiconductors, carrier migration rate and surface current were simulated. Effect of femtosecond pulse lasers with different properties on the near field terahertz (THz) intensity was also analyzed. Surface current in the semiconductor material was analyzed with macroscopic electromagnetic theory and microscopic semiconductor theory respectively. Power spectrum curves of InSb and GaAs material were compared. The researches show that: the longer the InSb carrier auger relaxation time, the bigger the InSb carrier migration rate; the surface current is proportional to the carrier life and relaxation time; macroscopic electromagnetic theory is suitable for analyzing surface current; the bigger the saturated laser energy density, the stronger the near field THz intensity; the shorter the laser pulse width, the stronger the near field THz intensity; InSb material power is higher than GaAs material. The results lay a theoretical foundation for study on InSb photoconduction THz radiation.

Key words: laser physics; THz radiation; InSb photoconduction; carrier migration rate; surface current; femtosecond pulse pump

引言

太赫兹(terahertz, THz)波位于微波与红外波段之间,频率为(0.1~10)THz,处于经典理论向微量子理论的过渡区^[1]。THz技术是一门重要的前沿学科,其中THz辐射源技术尤为重要。光电导天线作为THz波辐射常见方法之一,是目前太赫兹波辐射源研究的重要方向。

在太赫兹辐射理论分析中,光电导天线理论计算是研究重点。用光电导天线方法计算THz波近场辐

射时,需考虑影响THz波近场强度的光电导材料载流子迁移率及光电导材料的表面瞬态电流等因素。当使用不同性质飞秒激光脉冲时,产生的THz波电场强度也会不同。本文中重点分析碲化铟(InSb)光电导材料载流子迁移率、光电导材料表面瞬态电流,探讨不同性质抽运激光器对产生的太赫兹近场强度的影响,并比较了基于InSb和GaAs材料的THz波功率谱。

1 光电导辐射太赫兹波原理

光电导天线是目前产生和探测太赫兹波最常用的方法之一。它是利用光子能量大于半导体材料禁带宽度的超短脉冲激光抽运半导体材料,使材料内部产生空穴电子对,然后这些空穴电子对在外加偏置电场的作用下做加速运动,从而形成一个瞬态的光电流,然后

作者简介:潘武(1966-),男,博士,教授,主要研究方向为光电子技术及系统、光通信器件及系统等。

E-mail: panwu@cqupt.edu.cn

收稿日期:2014-05-14;收到修改稿日期:2014-06-16

这个光电流辐射出低频 THz 脉冲^[2]。图 1 为典型的光电导辐射太赫兹波的示意图。传统光电导材料都是采用 GaAs, InP 等化合物半导体, 本文中采用的材料是 InSb。这些光电导材料产生 THz 波的物理机制是一样的, 不同的是相比于传统材料, InSb 的载流子浓度大、迁移率高, 有利于 THz 波辐射。在 InSb 材料上一般用铱、铜、锂合金做电极, 与 InSb 材料形成欧姆接触, 电极之间的空隙一般为几个毫米^[3]。

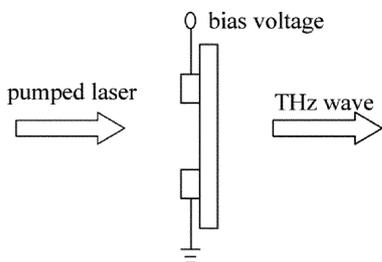


Fig. 1 Diagram of photoconductive terahertz radiation

2 光电导材料中载流子迁移率和表面瞬态电流

2.1 光电导材料的载流子迁移率

当抽运激光照射到半导体材料上时, 会在半导体材料内部产生光生载流子, 这些光生载流子在偏置电场作用下沿固定方向运动形成瞬态电流, 载流子迁移率大小是影响光电导辐射的关键因素^[4]。InSb 具有很高的载流子迁移率, 是被广泛关注的太赫兹辐射材料^[5]。本文中研究 InSb 材料, 计算并分析该材料内载流子的迁移率。

考虑到俄歇弛豫机制的主要作用, InSb 材料内载流子迁移率用下式表示^[6]:

$$\mu(t) = \frac{q\tau_s}{m^*} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) \right] \quad (1)$$

式中, q 为电子电量, τ_s 为载流子弛豫时间, m^* 为电子的有效质量。由于俄歇弛豫在 InSb 半导体中的主要作用, τ_s 近似等于俄歇弛豫时间。俄歇弛豫时间 τ_{Aug} 可由下式得出^[7]:

$$\tau_{Aug}^{-1} = C_2 n(t) = 7.5 \times 10^{-9} n(t) \quad (2)$$

式中, C_2 为俄歇弛豫系数, $n(t)$ 表示为载流子的浓度,

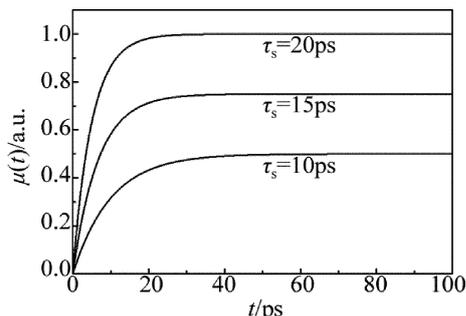


Fig. 2 InSb mobility curve under different carrier relaxation time

变化范围一般在 $(10^{15} \sim 10^{19}) \text{cm}^{-3}$ 。图 2 所示为 InSb 在不同载流子弛豫时间下的迁移率曲线, 由图可知, 载流子弛豫时间越长, 载流子迁移率越大。

很高的电子迁移率使 InSb 材料具备制成高电导率光电导材料的潜质, 而电导率是影响表面电流以及 THz 近场辐射强度的关键因素。因此, InSb 材料作为光电导辐射太赫兹波材料具有比较好的应用前景。

2.2 光电导材料的表面瞬态电流

光生载流子运动产生皮秒量级的瞬态电流, 进而由瞬态电流辐射出具有太赫兹频率的电磁波。由电磁场理论推导出的光生载流子运动产生的电流^[8]为:

$$j_s(t) = \frac{(1 + \sqrt{\epsilon_r})\sigma_s(t)}{\eta_0\sigma_s(t) + (1 + \sqrt{\epsilon_r})} E_b \quad (3)$$

式中, ϵ_r 表示 InSb 材料相对介电常数, $\epsilon_r = 1.9994 \times 10^{12}$; E_b 为外加偏置电场, 本文中采用偏置电压为 40V, 天线缝隙为 1mm, 则 $E_b = 4 \times 10^4 \text{V/m}$; $\sigma_s(t)$ 为使用光吸收模型^[9] 计算出的电导率大小, η_0 为 InSb 材料的特征阻抗。对不同性质的载流子, 其载流子寿命 τ_c 和弛豫时间 τ_s 也各不相同, 对应的瞬态电流也将不同。

当使用 1550nm 的激光抽运 InSb 材料时, 取不同性质的载流子得出的瞬态电流结果如图 3 所示, 从图 3 中曲线可看出, 载流子寿命相同时, 载流子弛豫时间越大, 瞬态电流越强; 载流子弛豫时间相同时, 载流子寿命越长, 瞬态电流越强。出现该现象的原因是根据光吸收模型^[9], $\sigma_s(t)$ 与载流子寿命 τ_c 和弛豫时间 τ_s 成正比, 而根据(3)式可知, 电流 $j_s(t)$ 的大小与 $\sigma_s(t)$ 成正比, 因此 $j_s(t)$ 与载流子寿命 τ_c 和弛豫时间 τ_s 成正比, $j_s(t)$ 随着 τ_c 和 τ_s 的增大而增大。因此从材料选择方面, 可根据实际情况选择具有较高寿命和弛豫时间的载流子的材料, 为太赫兹波辐射创造有利条件。

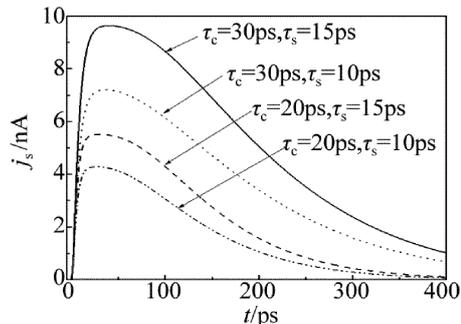


Fig. 3 InSb transient current under different carriers

根据半导体理论, 总电流为漂移电流和扩散电流之和^[10], 总电流强度为:

$$\vec{J} = \vec{j}_{\text{drf}} + \vec{j}_{\text{dif}} \quad (4)$$

式中, \vec{j}_{drf} 为漂移电流, 它是由于外加电压加大, 而电极

间缝隙却很小,使得光电导体的偏置电场非常大,电子空穴对的定向运动形成的电流, \vec{j}_{dir} 为扩散电流,是指载流子从浓度高的区域向浓度低的区域移动,电子和空穴的分布不均匀所导致的扩散运动形成的电流。

在用半导体理论研究 InSb 材料的电流时,要求其大小,需确定 InSb 材料的光生载流子浓度和载流子迁移率。比较利用半导体理论微观分析获得的 InSb 材料表面电流与利用电磁场理论分析的结果,将载流子迁移率和浓度计算公式带入(4)式中,图4为两种方法的比较曲线,实线为图3中 $\tau_c = 20\text{ps}$, $\tau_s = 10\text{ps}$ 时得出的电流曲线,虚线为采用半导体理论计算到的电流曲线,采用的参量 $\tau_s = 10\text{ps}$ 。图中纵坐标取值为相对量,无量纲。从图4看出,两条曲线的走势基本一致,达到峰值的时间基本相同,约为25ps。图中两条曲线的最大差别在于使用半导体理论得出的虚线曲线走势更为平缓,而使用电磁场计算方法得出的实线走势更为陡峭,在几十皮秒时就开始迅速衰减,在300ps以后电流大小趋近于0。两条曲线在200ps以后出现差别较大的原因是使用半导体物理学分析方法没有考虑光生载流子的寿命问题,只考虑了载流子很短的弛豫时间 τ_s ,而电磁场推导出来的电流公式考虑了所有影响因素,包括载流子很短的寿命 τ_c 。由于 InSb 材料的载流子寿命短,在100ps之后载流子浓度快速下降,所以使用电磁场方法计算得到的结果更贴近于实际情况。

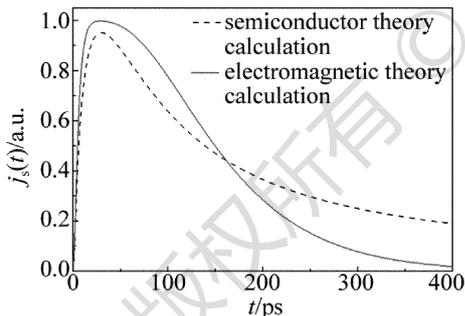


Fig. 4 Current curves obtained with two kinds of methods

3 不同性质的飞秒抽运激光对太赫兹辐射场的影响

若不同性质的飞秒激光器抽运,得到的 THz 辐射场也不同。当使用不同饱和能量密度的飞秒激光抽运 InSb 材料时,产生的 THz 波近场电场强度 $E_{\text{near}}(t)$ 也各不相同。图5所示为使用不同饱和能量密度的飞秒激光抽运 InSb 得出的结果,计算参量为:载流子寿命 $\tau_c = 20\text{ps}$,载流子弛豫时间 $\tau_s = 10\text{ps}$,抽运激光脉冲宽度 $\Delta t = 100\text{fs}$,抽运光波长为 1550nm,飞秒激光饱和能量密度 F 分别为 $4 \times 10^{-11} \mu\text{J}/\text{cm}^2$, $6 \times 10^{-11} \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 和 $8 \times 10^{-11} \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。由图5可看出,饱和能量密度 F 越

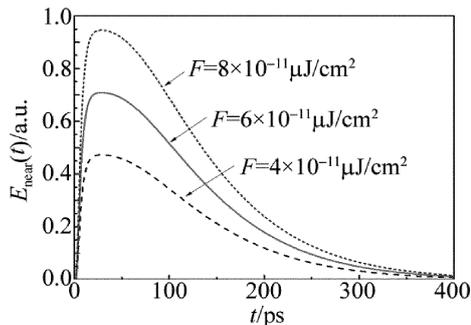


Fig. 5 THz field under different laser saturation energy density

大,产生的 THz 辐射场幅值越大。这是由于更强的飞秒激光可产生更高的载流子浓度,从而产生较大的电流,进而产生更强的太赫兹波。

当使用不同脉冲宽度的飞秒激光脉冲抽运 InSb 材料时,产生的 THz 波的近场强度也各不相同。图6为使用不同脉冲宽度的飞秒激光抽运 InSb 得出的结果,计算参量为: $\tau_c = 20\text{ps}$,载流子弛豫时间 $\tau_s = 10\text{ps}$,抽运光波长为 1550nm,抽运激光饱和能量密度 $F = 8 \times 10^{-11} \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。由于一般实验中用的飞秒激光器发出的激光脉冲一般在几十飞秒至几百飞秒之间,因此本文中对比了脉宽 50fs, 100fs 和 200fs 的飞秒激光抽运 InSb 材料的 THz 近场强度的大小。由于脉冲越短的飞秒激光抽运 InSb 可产生更高的载流子迁移率和电导率,从而产生更强的表面瞬态电流,进而增大 THz 近场强度的幅值。

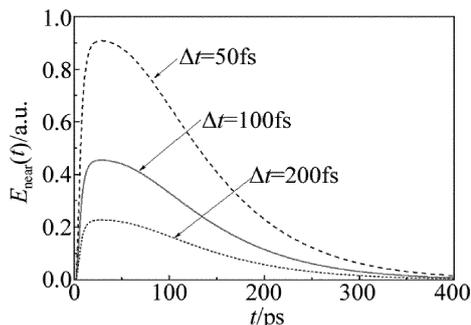


Fig. 6 THz field under different pulse width femtosecond laser

4 太赫兹辐射场的功率谱分析

光电导产生 THz 波机理可用电流瞬冲模型解释,即光生载流子加速运动产生皮秒量级的表面瞬态电流,从而辐射出 THz 波。表面瞬态电流 $j_s(t)$ 和 THz 近场辐射 $E_{\text{near}}(t)$ 的关系^[8]如下式所示:

$$E_{\text{near}}(t) = [-\eta_0 / (1 + \sqrt{\epsilon_r})] j_s(t) \quad (5)$$

对近场辐射 $E_{\text{near}}(t)$ 进行频域变换,应用 MATLAB 中的 pwelch 函数对近场辐射 $E_{\text{near}}(t)$ 进行功率谱估计。采用 pwelch 函数得出的是时间序列信号的功率如何随频率分布。由于在 $E_{\text{near}}(t)$ 的计算中设置的时

间步长为 1ps,因而设置 pwelch 函数中的抽样频率 $f = 1\text{THz}$,计算得出的功率谱曲线如图 7 所示,仿真所用抽运光波长为 1550nm,抽运激光饱和能量密度 $F = 8 \times 10^{-11} \mu\text{J}/\text{cm}^2$,抽运激光脉冲宽度 $\Delta t = 100\text{fs}$,InSb 载流子参量为 $\tau_c = 20\text{ps}$, $\tau_s = 10\text{ps}$ 。从图 7 中可以看出,仿真得到 InSb 光电导产生的 THz 波中心频率为 0.2THz,峰值功率约为 1.7mW。

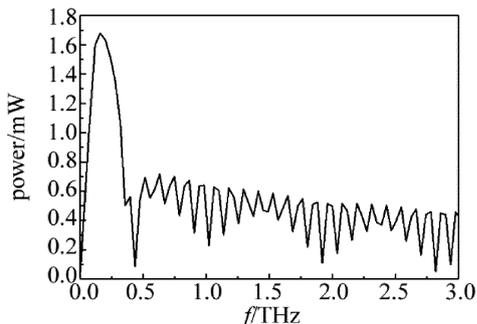


Fig. 7 THz wave power spectrum curve of InSb photoconduction

本文中计算了 GaAs 材料近场辐射结果,如图 8 所示,为近场 THz 辐射的频谱。计算中用的抽运光波长为 800nm,GaAs 载流子寿命 $\tau_c = 1\text{ps}$,载流子弛豫时间 $\tau_s = 0.5\text{ps}$,在 0.1THz 附近 GaAs 材料光电导辐射 THz 波功率达到峰值,峰值功率为 $0.228 \mu\text{W}$,GaAs 辐射源为微瓦量级,InSb 辐射源为毫瓦量级。因此,从理论上 InSb 材料的光电导辐射源具有较好的应用前景。

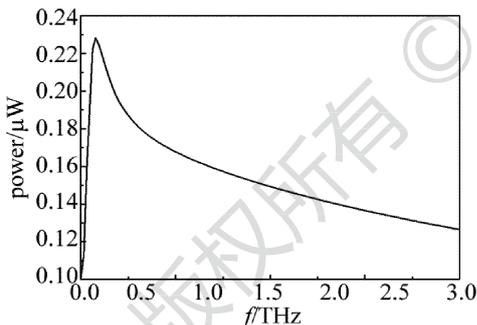


Fig. 8 THz wave power spectrum curve of GaAs photoconduction

5 结 论

分析了 InSb 材料中的载流子性质,不同性质载流

子会产生不同的表面电流,利用电磁场理论计算了光电导材料表面电流。结果表明,电流的产生与载流子寿命和弛豫时间有关,载流子弛豫时间越长,寿命越长,表面电流越强。分析了不同性质飞秒激光器对 THz 辐射功率的影响,结果表明,饱和能量密度越高,脉冲宽度越短的飞秒激光器能够产生强度越高的 THz 近场辐射。分析了基于 InSb 材料光电导辐射 THz 波功率谱,THz 波中心频率为 0.2THz,最大功率为 1.7mW,比常见 Si,GaAs 等材料辐射的功率高。所以基于 InSb 材料辐射 THz 波的方法有较高的研究价值。

参 考 文 献

- [1] ZHU B, CHEN Y, DENG K, *et al.* Terahertz science and technology and its applications[J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2008, 27(4): 304-307 (in Chinese).
- [2] SUN B, YAO J Q. Generation of terahertz wave based on optical methods[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(10): 1349-1359 (in Chinese).
- [3] PAN W, HUANG S L, LI T T, *et al.* Terahertz photoconductive radiation theory research of InSb[J]. Laser Technology, 2013, 37(2): 239-242 (in Chinese).
- [4] SCHOCHE S, JUNXIA S, BOOSOLIS A, *et al.* Terahertz optical-Hall effect characterization of two-dimensional electron gas properties in AlGaIn/GaN high electron mobility transistor structures[J]. IEEE Applied Physics Letters, 2011, 98(9): 1-3.
- [5] BICIUNAS A, MALEVACH Y, KROTKUS A, *et al.* Excitation wavelength dependences of terahertz emission from surfaces of InSb and InAs[J]. Electronics Letters, 2011, 47(21): 1186-1187.
- [6] ZHANG T Y, CAO J C. Study of the surface and far fields of terahertz radiation generated by large-aperture photoconductive antennas[J]. Chinese Physics, 2004, B13(10): 1742-1746.
- [7] ZUDOV M A, MITCHELL A P, CHIN A H, *et al.* Terahertz magneto-spectroscopy of transient plasmas in semiconductors[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 94(5): 3271-3277.
- [8] PAN W, HUANG S L, LI G X, *et al.* Theoretical study of terahertz radiation through InSb photoconduction [J]. Laser and Infrared, 2013, 43(4): 438-441 (in Chinese).
- [9] JAMES L H, TAE I J. A review of the terahertz conductivity of bulk and nano-materials[J]. Journal of Infrared, Millimetre and Terahertz Waves, 2012, 33(9): 871-925.
- [10] LIU E K, ZHU B S, LUO J S, *et al.* Semiconductor physics[M]. 4th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 1997: 116-145 (in Chinese).