

磷化铟(InP)在太赫兹波段的特性研究

张彩虹, 王媛媛, 马金龙, 金飏兵, 许伟伟, 康琳, 陈健*, 吴培亨

南京大学超导电子学研究所, 江苏南京 210093

摘要 太赫兹(THz)时域光谱(TDS)技术,能同时测量幅值和相位信息,因而能检测到物质丰富的物理化学性质,已逐渐成为科学界一大热点。磷化铟(InP)因其载流子寿命短、质量小等优良性能,正逐渐成为产生和检测 THz 波辐射的首选光电导材料之一。文章利用 THz-TDS 测试技术,在室温氮气环境中,对 n 型 $0.35 \Omega \cdot \text{cm}$ 的 InP 材料在 $0.2 \sim 4$ THz 波段的特性进行了研究。文章根据物理传输模型,利用更准确的迭代方式,选用新的初始值,更快更准确的得到了复折射率,介电常数,电导率等 THz 光学常数,并且用 Drude 模型进行了理论上的模拟计算,所得结果与实验吻合很好,最后还得到了载流子的寿命、迁移率和浓度等 THz 重要参数。

关键词 太赫兹时域光谱技术;太赫兹光学常数;Drude 模型;载流子

中图分类号: O433 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)08-2021-04

引言

太赫兹(THz)波位于红外和微波之间,频率范围约为 $0.1 \sim 10$ THz。近年来,超快技术的发展,为脉冲 THz 波的产生和探测提供了稳定、可靠的激发光源,使得对 THz 波的研究吸引了众多的研究者,尤其是 THz 时域光谱(TDS)技术,近年来已成为一大热点^[1-6]。利用 TDS 技术,可以检测到物质丰富的物理和化学性质,这就决定了 TDS 技术在很多方面可以成为傅里叶变换红外光谱技术和 X 射线技术的互补技术。

光电导天线作为产生和检测 THz 波辐射的光学方法之一,因其能够产生宽频,较高功率的 THz 波辐射而一直备受推崇。制作性能良好的 THz 波辐射光电导天线需采用载流子寿命短,有效质量小,迁移率大,击穿电场高,并具有适当缺陷浓度的衬底半导体材料^[6-12]。磷化铟(InP)材料的载流子寿命远小于 1 ps ,可满足上述需求,是可开发应用的光电导材料^[8-12]。

本文的主要工作是利用传输型 TDS 系统,对 InP 材料在太赫兹波段的特性进行更好的测试分析,并且利用 Drude 模型进行了理论研究,得到了理论和实验吻合很好的结果,从而在实验和理论上对 InP 材料和 TDS 测试技术的认识都有了很大提高,为光电导天线的进一步研究和有效利用打下

了良好的基础。

1 实验

本实验使用的是立陶宛的 Ekspla 公司生产的传输型 TDS 系统(仪器附有使用手册,即, THz Time-domain spectroscopy kit),如图 1 所示。激光器是 Coherent 公司的锁模钛蓝宝石激光器,中心波长 800 nm ,脉冲宽度小于 100 fs ,重复频率 82 MHz 。THz 发射器和探测器都是安装在高阻硅半球透镜上的 GaAs 光电导天线。实验所测样品为 Showa Denko 公司的 n 型 $0.35 \Omega \cdot \text{cm}$ 的 InP 单晶基片。

为避免水汽对 THz 波的强烈吸收,实验中将 THz 光路置于密闭罩中,见图 1,充入氮气,使湿度保持在 3% 以下才进行测量。测量时,样品置于抛物镜 M6 和 M7 之间的中心处,并尽可能与入射光垂直。

2 数据处理及结果与讨论

$E_{\text{ref}}(t)$ 和 $E_{\text{sam}}(t)$ 分别为测量到的参考(无任何样品置入)和透过样品的时域信号, $E_{\text{ref}}(\omega)$ 和 $E_{\text{sam}}(\omega)$ 为经过快速傅里叶变换(FFT)得到的对应频域信号。从而透过样品的传输函数为^[13-16]

收稿日期:2008-06-22,修订日期:2008-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(10778602 和 60721063),科技部“973”项目(2006CB601006)和江苏省基金项目(BK2007713)资助

作者简介:张彩虹,女,1982 年生,南京大学无线电物理专业在读博士研究生 e-mail: zch312@gmail.com

* 通讯联系人 e-mail: chenj63@nju.edu.cn

$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{H}(\omega) &= \frac{\tilde{E}_{\text{sam}}(\omega)}{\tilde{E}_{\text{ref}}(\omega)} = \frac{4\tilde{n}(\omega)}{(\tilde{n}(\omega)+1)^2} \cdot \\ &\exp\left[-i\frac{(\tilde{n}(\omega)-1)\omega d}{c}\right] \cdot FP = P(\omega)e^{-i\phi(\omega)} \quad (1) \\ FP &= 1 + \sum_{j=1}^m \left[\frac{\tilde{n}(\omega)-1}{\tilde{n}(\omega)+1} \exp\left(-i\frac{\tilde{n}(\omega)\omega d}{c}\right) \right]^{2j} \end{aligned} \right.$$

其中, $\tilde{n}(\omega) = n(\omega) - i\kappa(\omega)$ 为样品的复折射率, 实部为折射率, 虚部为消光系数, d 为样品厚度, ω 为角频率, c 为真空中的光速, m 代表由 Fabry-Perot 效应引起的 m 次反射信号。从(1)式很难得到的解析解, 为了得到解析解, 很多文献中, 样品信号只取主峰, 即 $FP = 1$, 在 $\kappa \ll n$ 时, 可以得到近似解

$$\left\{ \begin{aligned} n(\omega) &= \frac{\phi(\omega)c}{\omega d} + 1 \\ \kappa(\omega) &= \frac{c}{\omega d} \ln \frac{4n(\omega)}{\rho(\omega)(n(\omega)+1)^2} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

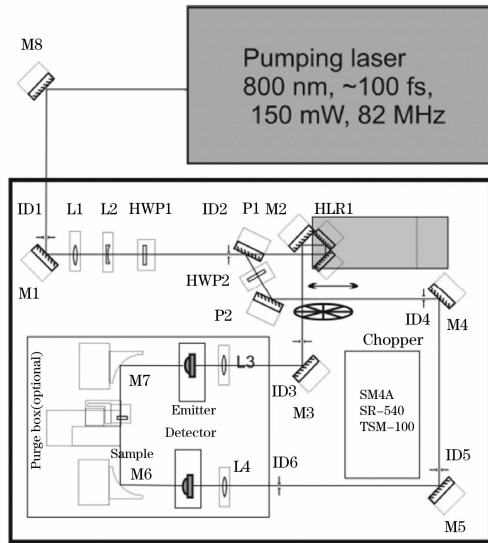


Fig. 1 Schematic diagram of the THz TDS system

为了得到更准确的解, 我们采用迭代的方式。为了使迭代过程更快更准确, 我们采用了不同于文献中的 n 和 κ 初始值^[13-16], 即利用(2)式的结果作为初始值, 然后采用下列迭代过程

$$\left\{ \begin{aligned} \text{Aer}(\omega) &= |H_{\text{theory}(\omega)}| - |H_{\text{experiment}(\omega)}| \\ \text{Per}(\omega) &= \angle H_{\text{theory}(\omega)} - \angle H_{\text{experiment}(\omega)} \\ \text{Error} &= \sum_{\omega} (|\text{Aer}(\omega)| + |\text{Per}(\omega)|) \end{aligned} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} n_{\text{new}}(\omega) &= n_{\text{old}}(\omega) + \epsilon \cdot \text{Per}(\omega) \\ \kappa_{\text{new}}(\omega) &= \kappa_{\text{old}}(\omega) + \epsilon \cdot \text{Aer}(\omega) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

其中, ϵ 为迭代步长, 通常可以取 0.01。当整个误差不再单调减小时, 迭代过程停止。

当得到样品的复折射率后, 我们就可以根据 Drude 模型^[17-19], 得到样品的介电常数, 电导率等光学参数, 即(5)式

$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{\epsilon}(\omega) &= \tilde{n}^2(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\tilde{\omega}(\omega)}{\omega\epsilon_0} \\ \tilde{\epsilon}(\omega) &= \epsilon_1 - i\epsilon_2, \tilde{\sigma}(\omega) = \sigma_1 - i\sigma_2 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\tilde{\sigma}(\omega) = \frac{\sigma_{dc}}{1 + \omega^2\tau^2} - i\frac{\sigma_{dc}\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (6)$$

同时, 我们根据(6)式, 在理论上用 Drude 模型模拟了实验结果。其中 σ_{dc} 为直流时的电导率, τ 为载流子寿命, 将它们作为拟合参数, 而

$$\left\{ \begin{aligned} u &= \frac{e\tau}{m^*} \\ N &= \frac{m^*}{e^2\tau}\sigma_{dc} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

有了这些参数, 我们不难根据(7)式得到载流子的迁移率 μ 和浓度 N 。其中, m^* 为有效质量, InP 的有效质量为 $0.08 m_0$ ^[12], m_0 为电子质量, e 为电子电荷。

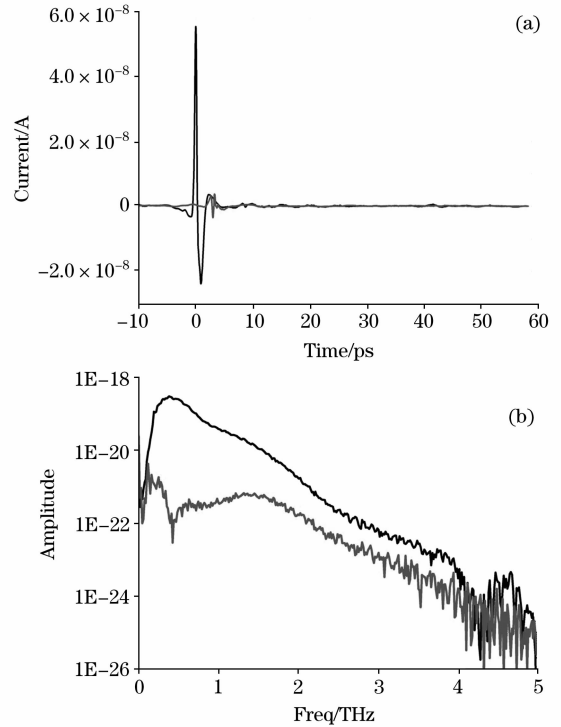


Fig. 2 Experimental THz signal of n -type InP (a) time-domain pulse (b) frequency domain spectra

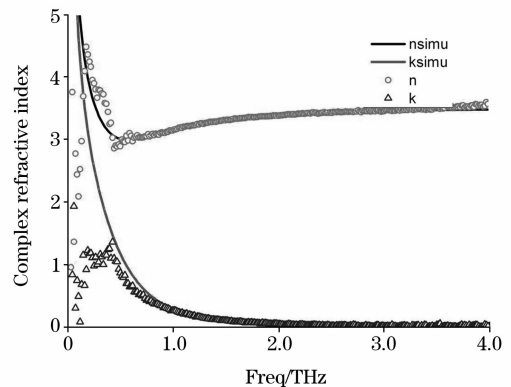


Fig. 3 Complex refractive index of InP, solid line is the simulation results with Drude model

实验中,测量的是 Showa Denko 公司的 n 型 InP 单晶片,厚度 $d=344 \mu\text{m}$ 。图 2 分别为测得的时域脉冲和频谱信号。图 3 为由此得到的复折射率曲线,图 4 分别为介电常数和电导率曲线,其中,各图中名称加上 Simu 的线条为 Drude 模型模拟的理论结果,可以看出,理论曲线和实验结果吻合得很好。最后,可以得到该样品的直流电导率 $\sigma_{dc}=2.8 / \Omega \cdot \text{cm}$,

载流子寿命 $\tau=0.21 \text{ ps}$, 迁移率 $\mu=4 615 \text{ cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$, 浓度为 $N=3.79 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 与厂家给出的规格: $\sigma_{dc}=2.78 \sim 2.86 / \Omega \cdot \text{cm}$, $\mu=4 400 \sim 4 500 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$, $N=3.8 \sim 3.9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 是很吻合的,证明了这一快速 THz 光学参数评价方法的有效性和合理性。

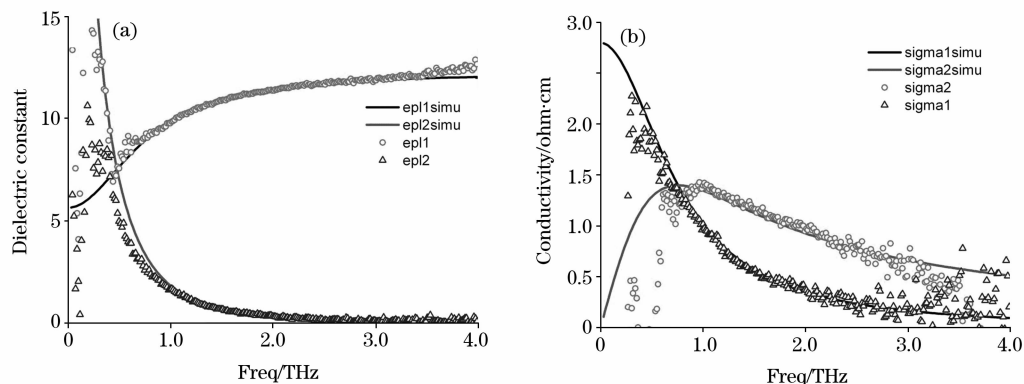


Fig. 4 Optical constant of InP, solid line is the simulation results with Drude model (a) dielectric constant (b) conductivity

3 结 论

本文采用 THz-TDS 测试技术,在室温氮气环境下,对 InP 材料在 $0.2 \sim 4 \text{ THz}$ 波段的特性进行了研究,得到在该波段 InP 的复折射率,介电常数,电导率等各种 THz 光学参

数,并且用 Drude 模型进行了理论上的模拟计算,所得结果与实验吻合很好,在此基础上,得到了直流阻抗,载流子的寿命,迁移率,浓度等重要参数,从而使我们对 InP 的认识有了很大的提高,为光电导天线的进一步研究打下了良好的基础。

参 考 文 献

- [1] Ferguson B, Zhang X C. Natural Material, 2002, 1: 26.
- [2] Tonouchi M. Nature Photonics, 2007, 1: 97.
- [3] ZHAO Guo-zhong(赵国忠). Modern Scientific Instruments(现代科学仪器), 2006, 2: 36.
- [4] ZHANG Xing-ning, CHEN Ji, ZHOU Ze-kui(张兴宁, 陈 稷, 周泽魁). Laser and Optonics Progress(激光与光电子学进展), 2005, 42(7): 35.
- [5] SHEN Jing-ling, ZHANG Cun-lin(沈京玲, 张存林). Nondestructive Testing(无损检测), 2005, 27(3): 146.
- [6] LIU Gui-feng, ZHAO Hong-wei, GE Min, et al(刘桂锋, 赵红卫, 葛 敏, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2008, 28(5): 966.
- [7] SHI Wei, ZHANG Xian-bin, JIA Wan-li, et al(施 卫, 张显斌, 贾婉丽, 等). Chinese Journal of Semiconductors(半导体学报), 2004, 25(12): 1735.
- [8] RUAN Chi, ZHAO Wei, CHEN Guo-fu, et al(阮 驰, 赵 卫, 陈国夫, 等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2007, 36(3): 405.
- [9] Aspnes D E, Studna A A. Phys. Rev. B, 1983, 27(2): 985.
- [10] Liu Tze-An, Masahiko Tani, Makoto Nakajima, et al. Optics Express, 2004, 12(13): 2954.
- [11] Lloyd-Hughes J, Castro-Camus E, Johnston M B. Solid State Communications, 2005, 136: 595.
- [12] <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/>.
- [13] Grischkowsky D, Keiding S, Van Exter, et al. J. Opt. Soc. Am. B, 1990, 7: 2006.
- [14] Duvillaret L, Garet F, Coutaz Jean-Louis. Appl. Opt., 1999, 38: 409.
- [15] Timothy D Dorney, Richard G Baraiuk, Daniel M Mittleman, J. Opt. Soc. Am. A, 2001, 18: 1562.
- [16] Ioachim Pupeza, Rafal Wilk, Martin Koch. Opt. Express, 2007, 15: 4335.
- [17] Ashcroft N W, Mermin N D. Solid State Physics. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1976.
- [18] Kinasewitz R T, Senitzky B. J. Appl. Phys., 1983, 54(6): 3394.
- [19] Ohba T, Ikawa S. J. Appl. Phys., 1988, 64(8): 4141.

Characterizations of InP in Terahertz Region

ZHANG Cai-hong, WANG Yuan-yuan, MA Jin-long, JIN Biao-bing, XU Wei-wei, KANG Lin, CHEN Jian*, WU Pei-heng
Research Institute of Superconductor Electronics, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract Terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS), which directly measures the THz wave's temporal electric field, can give the amplitude and phase of the THz wave pulse simultaneously. THz-TDS is attracting more attention among scientists. InP with short carrier average collision time and low effective mass is growing up as one of the best photoconductive materials for emitting and detecting THz waves. An n-type InP of $0.35 \Omega \cdot \text{cm}$ was characterized over the range from 0.2 to 4 THz at room temperature in the present paper with THz time-domain spectroscopy, which was placed in a closed box purged with dry nitrogen gas. Some THz optical properties, such as complex refractive index, dielectric constant, and conductivity, were extracted, based on more exact iterative method with new initial function. Drude model was also applied for simulation, which fitted well with the experimental results. Finally, the carrier average collision time, density and mobility of the InP were also characterized.

Keywords THz-TDS; THz optical constant; Drude model; Carrier

(Received Jun. 22, 2008; accepted Sep. 20, 2008)

* Corresponding author

敬告读者——《光谱学与光谱分析》已全文上网

从 2008 年第 7 期开始在《光谱学与光谱分析》网站(www.gpxygpx.com)“在线期刊”栏内发布《光谱学与光谱分析》期刊全文,读者可方便地免费下载摘要和 PDF 全文,欢迎浏览、检索本刊当期的全部内容;并陆续刊出自 2006 年以后出版的各期摘要和 PDF 全文内容。2009 年起《光谱学与光谱分析》每期出版日期改为每月 1 日。

光谱学与光谱分析期刊社