

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0337-04

# n 型和 p 型硅半导体材料的太赫兹时域光谱研究

金彬<sup>1</sup> 李彤<sup>2</sup> 周庆莉<sup>1</sup> 施宇蕾<sup>1</sup> 张存林<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>北京市太赫兹波谱与成像重点实验室, 省部共建太赫兹光电子重点实验室, 首都师范大学物理系, 北京 100048)  
(<sup>2</sup>天津工程师范学院 电子工程系, 天津 300222)

**摘要** 利用太赫兹 (THz) 时域光谱技术对两种重要的半导体材料 n 型硅 (n-Si) 样品和 p 型硅 (p-Si) 样品进行了研究。通过测量自由空间的参考信号和透过样品的 THz 信号, 经过快速傅里叶变换等一系列数据处理, 获得了它们在 0.5~2.0 THz 频率范围内的光学参数。结果表明, 在该频率范围内两种样品的折射率和相对介电常数实部基本不随频率变化, 而 p-Si 样品的消光系数和相对介电常数虚部随频率增大而下降的幅度明显大于 n-Si 样品。此外, 通过计算获得了两种材料的复电导率和介电损耗, 发现 n-Si 样品和 p-Si 样品两者在 THz 波段都具有良好的介电特性, 适合作为半导体基片材料在 THz 波段工作。

**关键词** 材料; 太赫兹时域光谱; 半导体基片; 光学常数

中图分类号 O433.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0337

## Investigation of n-Si and p-Si Semiconductors by Terahertz Time-Domain Spectroscopy

Jin Bin<sup>1</sup> Li Tong<sup>2</sup> Zhou Qingli<sup>1</sup> Shi Yulei<sup>1</sup> Zhang Cunlin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China

<sup>2</sup>Department of Electronic Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China

**Abstract** Two kinds of semiconductor substrates, n-Si and p-Si, are investigated by the terahertz (THz) time-domain spectroscopy. The reference signals of free space and the sample signals are measured, and a series of optical parameters of these two samples in the range of 0.5~2.0 THz are calculated. The refractive index and real part of complex relative permittivity of n-Si are independent of frequencies, as well as p-Si. The extinction coefficient and imaginary part of complex relative permittivity of p-Si decrease with the increasing frequency, and this phenomenon is much more obvious than that of n-Si. The complex conductivity and dielectric loss also have been calculated. The obtained results indicate that n-Si and p-Si have good dielectric properties and can be used to work in the THz range.

**Key words** materials; terahertz time-domain spectroscopy; semiconductor substrate; optical constant

## 1 引言

太赫兹 (THz) 辐射是从 0.1~10 THz 的电磁辐射, 介于微波与红外波段之间。随着 THz 时域光谱技术的建立和发展, 该技术可用于计算多种材料在 THz 波段的光学参数。THz 时域光谱技术, 通常利用飞秒激光脉冲照射电光晶体, 通过非线性光学效应中的光整流效应产生 THz 脉冲, 电光取样技术检测 THz 时域波形, 分析从样品透射或样品表面反射的 THz 时域波形, 来计算得到材料在 THz 波

段的光学参数。

硅 (Si) 单晶是一种重要的半导体基础材料, 它在太阳能电池的制备和金属陶瓷、航天材料等方面也有着重要应用。在众多 Si 材料中, 以 n 型硅 (n-Si) 和 p 型硅 (p-Si) 两种较为常见, 它们广泛地应用于二极管和三极管等电子元件和一些光学器件的制造。因此, 为了更好地了解 n-Si 和 p-Si 的特性及一些以它们为主要制作材料的光学器件在 THz 波段下的工作状况, 取得 n-Si 和 p-Si 在此波段的光学

**作者简介:** 金彬 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事太赫兹光谱技术方面的研究。E-mail: jinbin111111@163.com

**导师简介:** 张存林 (1961-), 男, 教授, 主要从事太赫兹及红外波谱与成像等方面的研究。

E-mail: Cunlin Zhang@mail.cnu.edu.cn (通信联系人)

常数十分必要。

D. Grischkowsky 等<sup>[1]</sup>曾在 0.2~2.0 THz 范围内研究过高阻单晶硅的 THz 透射光谱特性;目前对 Si 样品的载流子动力学的研究也不少<sup>[2~4,8~10]</sup>。本文利用透射式 THz 时域光谱技术详细研究了 p-Si 和 n-Si 这两种重要半导体基片材料的 THz 光谱特性。通过测量分别经过自由空间和样品的 THz 时域谱,计算了 p-Si 基片和 n-Si 基片的复折射率、复相对介电常数、介质损耗和电导率,并对这两种材料的参数进行分析和比较,给出了有意义的结果。

## 2 实验方法和装置

图 1 为 THz 时域光谱技术的实验装置示意图<sup>[5]</sup>。本实验激光器的飞秒激光脉冲宽度为 100 fs,中心波长为 800 nm,重复频率为 82 MHz。飞秒激光经分束镜(PBS)分为两束,其中一束经频率为 2 kHz 的斩波器(Chopper)斩波后,以布儒斯特角入射 InAs 晶体的表面。在 InAs 表面产生的 THz 脉冲经过两对离轴抛物面镜(PM)和高阻硅镜(Si Wafer)后聚焦于 ZnTe 探测晶体上。由分束镜分出的另一束光作为探测光也通过 ZnTe 晶体,THz 的辐射电场通过电光效应使经过该电光探测晶体的探测光偏振态发生变化,从而反映出了 THz 电场的变化。THz 辐射时域波形由探测光对抽运光的时间延时来追踪测量,锁相放大器(lock in)将信号放大。实验中,抽运光的平均功率为 840 mW,探测光的平均功率为 80 mW。

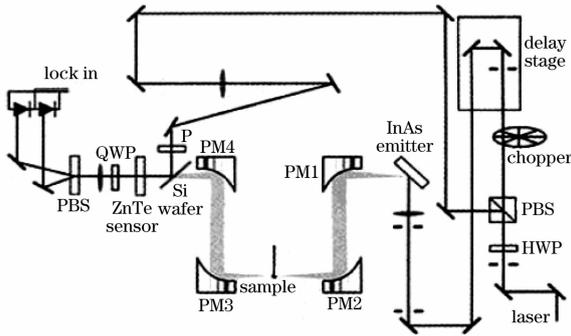


图 1 THz 时域光谱技术实验装置示意图

Fig. 1 The schematic experimental setup

n-Si 和 p-Si 基片的厚度为 0.5mm,将其放于两个离轴抛物面镜之间。为了避免水蒸汽对 THz 脉冲的吸收,整个实验过程中,系统的 THz 传输部分处于氮气之中。经过 InAs 表面反射的飞秒激光脉冲部分虽然也随着 THz 脉冲一起传播,但由于能量较

小,对实验结果影响不大。

## 3 数据处理方法

分别将参考的和穿过样品的 THz 时域谱进行快速傅里叶变换,得到相应的频域谱。样品透射率为  $T(\omega, \phi) = E_{\text{sam}}(\omega, \phi) / E_{\text{ref}}(\omega, \phi)$ 。复折射率为  $\tilde{n}_s(\omega) = n(\omega) - i\kappa(\omega)$ ,其中  $n(\omega)$  为折射率, $\kappa(\omega)$  为消光系数。折射率和消光系数公式<sup>[6]</sup>:

$$n(\omega) = \phi(\omega)c/\omega d + 1, \quad (1)$$

$$\kappa(\omega) = \ln\{4n(\omega)/\rho(\omega)[n(\omega) + 1]^2\}c/\omega d, \quad (2)$$

式中  $\phi(\omega)$  为样品光与参考光的位相差, $\rho(\omega)$  为样品光与参考光的振幅比, $c$  为光速。

样品的复相对介电常数  $\tilde{\epsilon} = \epsilon_r - i\epsilon_i$ ,其中介电常数实部和虚部分别为:

$$\epsilon_r = n^2 - \kappa^2, \quad (3)$$

$$\epsilon_i = 2n\kappa, \quad (4)$$

介质损耗由下式给出<sup>[7]</sup>:

$$\tan \delta = \kappa(\omega)/n(\omega), \quad (5)$$

样品的复电导率  $\tilde{\sigma} = \sigma_r - i\sigma_i$  由复相对介电常数  $\tilde{\epsilon}(\omega)$  得到:

$$\sigma_r = \epsilon_0 \omega \epsilon_i, \quad (6)$$

$$\sigma_i = \epsilon_0 \omega (\epsilon_r - 1), \quad (7)$$

## 4 实验结果和分析

由于实验结果频域谱在 0.5 THz 以下和 2.0 THz 以上范围内,信号偏小,信噪比较低,故频域谱范围取 0.5~2.0 THz。

图 2 为穿过自由空间和样品的 THz 时域信号。从图中可以看出, n-Si 比 p-Si 具有更好的透射率,说明 p-Si 对 THz 的吸收比 n-Si 更大;穿过 n-Si 和

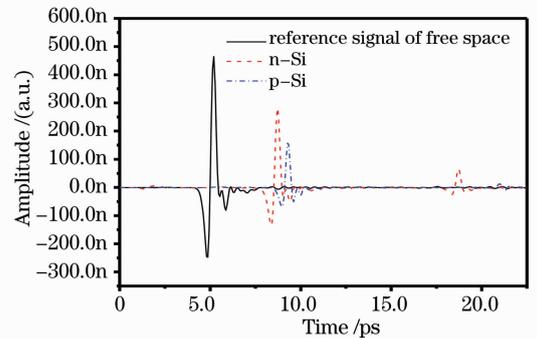


图 2 穿过自由空间的参考信号和穿过样品的 THz 信号的时域波形图

Fig. 2 Time-domain signals transmitted through the free space (solid line), n-Si (dashed line) and p-Si (dashed dot line), respectively

p-Si 样品的 THz 时域信号相比于参考信号都有着一定的时间延迟,且 p-Si 对于 n-Si 有 0.54 ps 的时间延迟,这是由于 p-Si 的折射率比 n-Si 的大而形成光程差所致。在 18.7 ps 和 20.4 ps 处我们也可以分别看到 n-Si 和 p-Si 的由于样品的前后表面反射形成的回波。

利用(1)式、(2)式,可以算得 n-Si 和 p-Si 样品在 THz 波段下的折射率和消光系数。折射率如图 3(a)所示。两者在 0.5~2.0 THz 范围内都保持不变,平均折射率分别为  $\tilde{n}_n=3.11$ 、 $\tilde{n}_p=3.44$ 。通过两者的折射率差计算它们第一个回波的时间延迟,为 1.65 ps,这与图 2 中数据基本一致。

消光系数表征样品的吸收特性。如图 3(b),两个样品的消光系数在 0.82 THz 以上均小于 0.1,并随着频率的升高而减小,但 p-Si 样品在 0.5~0.6 THz波段的消光系数却明显大于其他区域,说明在 THz 波的透射过程中,p-Si 样品对低频波段的 THz 波吸收较多。

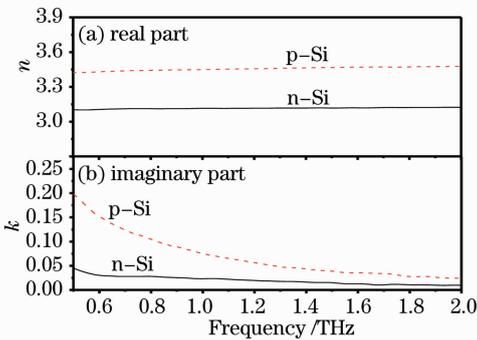


图 3 n-Si 样品和 p-Si 样品的复折射率随频率变化图。

(a) 实部; (b) 虚部

Fig. 3 Frequency dependence of complex refractive indexes for n-Si (solid line) and p-Si (dashed line)

两个样品的复相对介电常数由(3)式、(4)式获

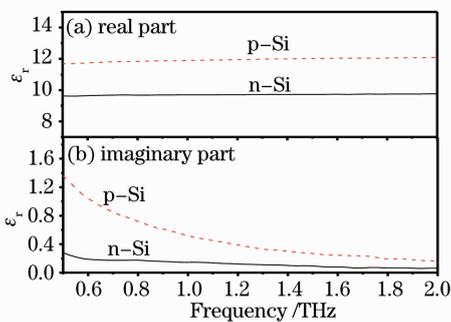


图 4 n-Si 和 p-Si 的复相对介电常数随频率变化图。

(a) 实部; (b) 虚部

Fig. 4 Frequency dependence of complex relative permittivities for n-Si (solid line) and p-Si (dashed line)

得。其实部如图 4(a)所示,不随频率的变化而变化。图 5(b)为复相对介电常数虚部,图中两条曲线都随频率升高而呈下降趋势,其中 n-Si 变化不大,p-Si 由于比 n-Si 对 THz 波吸收大,在低频处尤为显著。

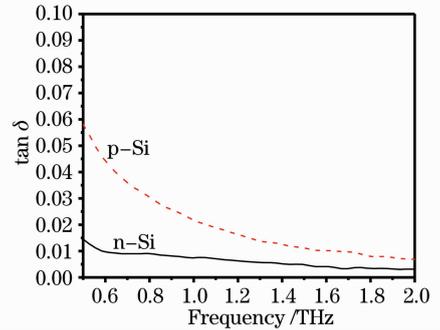


图 5 n-Si 和 p-Si 的介质损耗随频率变化图

Fig. 5 Frequency dependence of dielectric losses for n-Si (solid line) and p-Si (dashed line)

图 5 为计算所得两个样品的介质损耗与频率的关系图。图中可见,在 0.5 THz 处 p-Si 的介质损耗  $\tan \delta$  约为 n-Si 的 4 倍,随频率的上升而下降,至 2.0 THz 处降为 2 倍。两种材料的介质损耗值均小于 0.1。这说明作为半导体基片,n-Si 和 p-Si 在 THz 波段工作具有良好的介电性能,适合在 THz 波段工作,但由于在此实验中 p-Si 对低频波段的 THz 波存在着较大损耗,故 n-Si 明显要好于它。

通过公式(6),我们能够算得样品的复电导率的实部,如图 6 所示。在测量的 0.5~2.0 THz 范围内,n-Si 的电导率变化不大,而 p-Si 随着频率的升高而下降。在 0.5 THz 处,p-Si 的电导率为 n-Si 的 8 倍,在 2.0 THz 处却降为约 3 倍。这种 p-Si 在 0.5~2.0 THz 频段的下降趋势在消光系数[图 3(b)]、相对介电常数虚部[图 4(b)]、介质损耗(图 5)、电导率(图 6)这一系列相关参数与频率的关系图中都有体

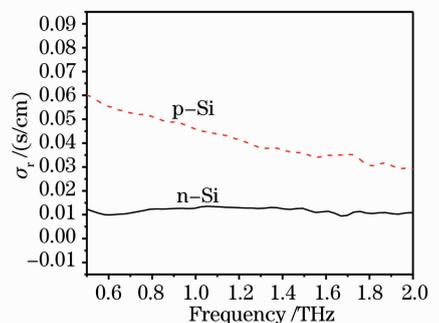


图 6 n-Si 和 p-Si 的电导率随频率变化图

Fig. 6 Frequency dependence of electrical conductivity for n-Si (solid line) and p-Si (dashed line)

现,说明 p-Si 相比较 n-Si 对 THz 低频波段的能量吸收较大,有待于进一步的讨论研究。

## 5 结 论

本文应用了 THz 时域光谱技术测量了 n-Si 和 p-Si 两种半导体材料在 THz 波段的光学性质。在 0.5~2.0 THz 范围内, n-Si 和 p-Si 的折射率和复相对介电常数实部都基本不变; n-Si 的消光系数、复相对介电常数虚部、电导率随频率变化不大,而 p-Si 的这些参数随着频率的升高而降低趋势十分明显。介质损耗值的计算结果表明,两种材料工作在 THz 波段都具有良好的介电特性,且 n-Si 要优于 p-Si。

## 参 考 文 献

- 1 D. Grischkowsky, S. Keiding, Martin van Exter *et al.*. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1990, **7**(10): 2006~2015
- 2 D. G. Cooke, A. N. MacDonald, A. Hryciw *et al.*. Transient terahertz conductivity in photoexcited silicon nanocrystal films[J]. *Phys. Rev. B*, 2006, **73**: 193311-1~193311-4
- 3 Martin van Exter, D. Grischkowsky. Carrier dynamics of electrons and holes in moderately doped silicon[J]. *Phys. Rev. B*, 1990, **41**(17): 12140~12149
- 4 David G. Cooke, A. Nicole MacDonald, Aaron Hryciw *et al.*. Ultrafast terahertz conductivity of photoexcited nanocrystalline silicon [J]. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2007, **18**: S447~S452
- 5 Zhang Zhenwei, Cui Wweili, Zhang Yan *et al.*. Terahertz time-domain spectroscopy imaging[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2006, **25**(3): 217~220  
张振伟,崔伟丽,张岩等. 太赫兹成像技术的实验研究[J]. 红外与毫米波学报, 2006, **25**(3): 217~220
- 6 Wang Xiaohong, Zhang Liangliang, Hu Ying *et al.*. Applications of terahertz pulse in the DNA molecule[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(3): 385~391  
王晓红,张亮亮,胡颖等. THz 辐射在 DNA 光谱研究中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, **26**(3): 385~391
- 7 Hu Ying, Zhang Cunling, Shen Jingling *et al.*. Time-domain terahertz spectroscopy of (100)MgO and (100)LaAlO<sub>3</sub> substrates[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(6): 1772~1776  
胡颖,张存林,沈京玲等. (100)MgO 和 (100)LaAlO<sub>3</sub> 高温超导基片材料 THz 时域光谱研究[J]. 物理学报, 2004, **53**(6): 1772~1776
- 8 K. P. H. Lui, F. A. Hegmann. Ultrafast carrier relaxation in radiation-damaged silicon on sapphire studied by optical-pump-terahertz-probe experiments[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**: 3478~3480
- 9 M. C. Beard, G. M. Turner, C. A. Schmuttenmaer. Transient photoconductivity in GaAs as measured by time-resolved terahertz spectroscopy[J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **62**: 15764~15777
- 10 S. E. Ralph, Y. Chen. Subpicosecond photoconductivity of In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As; intervalley scattering rates observed via THz spectroscopy [J]. *Phys. Rev. B*, 1996, **54**: 5568~5573