

文章编号: 1672-8785(2009)09-0026-04

半导体表面等离子体效应对 THz 波传输特性的影响

傅作明 柯尊贵 吴建平 孙 强 张智光 张旨遥 周晓军

(电子科技大学光电信息学院, 四川成都 610054)

摘 要: 本文提出了一种利用激光照射高阻硅来控制硅片中 THz 波传输特性的方法。利用波长为 808nm 的激光照射高阻硅产生光生电导来控制硅片对 THz 波的吸收系数, 进而控制硅片中 THz 波的传输特性, 并测量了在光强为 $1.9\text{W}/\text{cm}^2$ 的激光照射下硅片对 THz 波的透射特性。在 $1.9\text{W}/\text{cm}^2$ 的激光照射下, 0.07cm 硅片的 THz 波透射量减少了 20%。实验证明, 利用激光控制硅片中的 THz 波传输是可行的。

关键词: THz; 光生等离子体; 复介电常数; 吸收系数; 复折射率

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A

Influence of Photoinduced Surface Plasma in Semiconductor on Transmission Characteristics of THz Wave

FU Zuo-ming, KE Zun-gui, WU Jian-ping, SUN Qiang, ZHANG Zhi-guang, ZHANG Zhi-yao, ZHOU Xiao-jun

(School of Opto-electronic Information, University of Electronic Science and

Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: A method to control the transmission characteristics of the THz wave in a silicon wafer by using a laser to irradiate the surface of a high resistance silicon (H-Si) wafer is presented. First, the laser at the wavelength of 808nm is used to irradiate the H-Si wafer so as to let it generate the photoinduced conductance. Then, the photoinduced conductance is used to control the absorption coefficient of the THz wave and hence to control the transmission characteristics of the THz wave in the silicon wafer. The transmission characteristics of the THz wave in the silicon wafer is measured when it is irradiated by the laser with a light intensity of $1.9\text{W}/\text{cm}^2$. Under the irradiation by the laser with a light intensity of $1.9\text{W}/\text{cm}^2$, the transmission of the THz wave in the 0.07cm silicon wafer is reduced by 20%. The experiment shows that it is feasible to control the transmission of the THz wave in a silicon wafer by using a laser.

Key words: THz; optic-plasma; complex dielectric constant; absorption constant; complex refraction index

1 引言

半导体是反转对称晶体, 由于结构的对称性, 其内部会出现许多特有的现象, 例如: 二阶非线性极化率为零。然而在半导体材料的表面, 由于晶体的规则排列被破坏, 二阶非线性极化率

不再为零, 强激光超短脉冲会在表面产生二次谐波。此外, 半导体材料对短波长的光产生强烈的吸收之后, 会在半导体表面形成高密度的光生等离子体层, 使表面的电导率急剧上升。这一效应可用来改变电磁波包括微波、毫米波、THz 波的传输特性, 这是一个大有用武之地的效应。

收稿日期: 2009-04-16

作者简介: 傅作明 (1986-), 男, 杭州人, 本科生, 主要研究方向是光电工程。E-mail: xsfuzuoming@hotmail.com

要获得 THz 波在半导体中的不同传输特性, 传统的方法是通过半导体进行不同的掺杂以获得不同的电阻率来实现的。本文通过用一束波长为 808nm 的激光照射高阻硅, 使得硅片的电导率发生了变化, 从而提供了一种利用激光照射来控制 THz 在硅片中的传输特性的方法, 并且用实验验证了这种方法的可行性。该方法具有实时控制、控制和被控制器件之间高度隔离、可以和其它器件集成等诸多优点。

2 工作原理

当入射的光子能量大于半导体禁带宽度时 ($h\nu > E_g$), 半导体中的价电子会跃迁到导带, 同时在价带留下一个空穴, 在半导体内部形成电子和空穴数目相等的非平衡载流子, 因此也称为光生等离子体。等离子体的密度决定于入射的光强, 入射光强越强, 产生的等离子体密度越大。并且, 光生等离子体主要在半导体的表面附近形成。半导体表面的高密度光生等离子体会改变半导体的复介电常数、电导率等一系列参数。

根据 Drude 模型, 半导体的复介电常数可以表示为 $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ 。其中复介电常数的实部和虚部可以表示为

$$\begin{aligned}\varepsilon' &= \varepsilon_r - \frac{N e^2 \tau^2}{m^* \varepsilon_0 (1 + \omega^2 \tau^2)} \\ \varepsilon'' &= \frac{N e^2 \tau}{m^* \varepsilon_0 \omega (1 + \omega^2 \tau^2)}\end{aligned}\quad (1)$$

式中, ω 为 THz 波的频率, τ 为载流子的碰撞时间, m^* 为有效质量, ε_0 为硅在真空中的介电常数, ε_r 为硅的相对介电常数, N 为等离子体密度。

根据复介电常数和复折射率之间的关系: $\varepsilon = (n - ik)^2$, 以及光生等离子体密度和电导率的关系: $\sigma = N e^2 \tau / m^*$, 可以将复折射率的实部、虚部表示为

$$\begin{aligned}n^2 - k^2 &= \varepsilon_r - \sigma \tau / \varepsilon_0 (1 + \omega^2 \tau^2) \\ 2nk &= \sigma / \varepsilon_0 \omega (1 + \omega^2 \tau^2)\end{aligned}\quad (2)$$

由吸收系数和消光系数的关系可以知道:

$$\alpha = 2\omega k / c = \frac{\sigma}{nc\varepsilon_0(1 + \omega^2 \tau^2)}\quad (3)$$

由非平衡载流子引起的硅片电导率的增加, 又被称作光生电导率, 光生电导率使得硅片对 THz 波的吸收系数变大。半导体中电子和空穴相对运动的固有频率被称作体频率。THz 波在等离子体中传输时, 会引起等离子体中的载流子、分子等振动, 从而使得 THz 被吸收。当传输的电磁波和等离子体的体频率接近而产生谐振时, 吸收率变大。由于没有光照时硅的载流子浓度较小, 其本征体频率也比较低, 离 THz 波频率较远, 此时的吸收较小。激光照射后产生的大量非平衡载流子使得硅片的体频率增大, 靠近 THz 波频率, 吸收增强。分析等离子体中非平衡载流子的浓度对 THz 波吸收的影响, 对于 THz 波器件的设计具有很好的指导意义。实验主要通过波长为 808nm 的激光照射来产生非平衡载流子, 产生光生电导率, 验证激光照射硅片对 THz 波的控制作用。

3 实验测量

首先, 测量高阻硅本身对 THz 的反射特性。实验时要保持 THz 波源、硅片、探测器始终在同一水平面上。适当调整 THz 波的入射角度和探测器的角度, 保证被硅片反射的 THz 波完全被探测器接收。

实验装置如图 1 所示, 二氧化碳激光器产生波长为 10.6 μm 、功率为 120W 的激光, 通过反射镜 1、2 和聚焦透镜 3 进入 295FIR 远红外谐振腔, 激励甲醇产生功率为 160mW、波长为 118 μm 的 THz 波, 并照射在高阻硅片 4 上, 由红外探头探测 THz 波在高阻硅片上的反射。

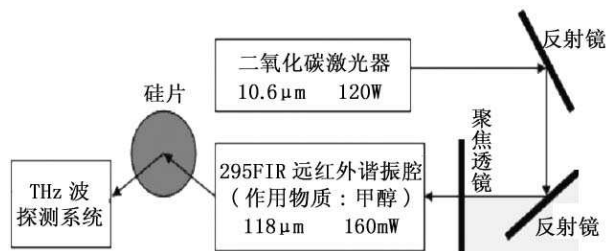


图1 用于测量硅片对 THz 波的反射量的系统

实验使用红外探头测量高阻硅本身对 THz 波的反射特性, 测量了三种功率下硅片对 THz 波的反射率, 测量数据如表 1 所示。

表 1 硅片对 THz 波的反射 (mW)

THz 波功率	硅片反射的功率	反射功率平均值
144	36 ~ 48	42
150	36 ~ 62	49
157	41 ~ 67	53

由表 1 数据计算出来的硅片的平均反射率为

$$\overline{R} = \frac{42 + 49 + 53}{144 + 150 + 157} = 0.32$$

根据参考文献 [1], 在 THz 波下高阻硅的折射率为 $n = 3.42$, 根据反射系数和折射率的关系: $R = ((n - 1)^2 / (n + 1)^2)$, 可以计算出反射系数为 0.3, 比我们实验测量的数值略小一些。

然后, 测量高阻硅本身和在波长为 808nm、光强为 $1.9\text{W}/\text{cm}^2$ 的激光照射下硅片对 THz 波的透射特性。由红外探头和红外相机探测 THz 波通过硅片的透射, 实验系统如图 2 所示。

实验中始终保持 THz 波源、THz 探测器探头 (或者红外相机)、硅片在同一水平线上。激光从侧面照射硅片, 保证激光照射硅片产生的等离子体区是 THz 波在硅片上的入射区。

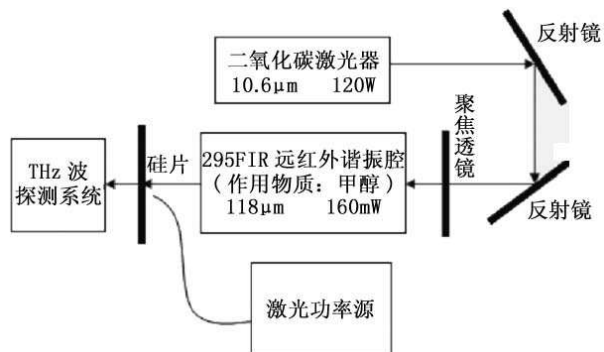
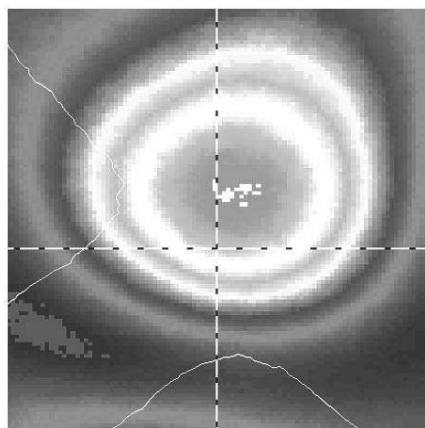
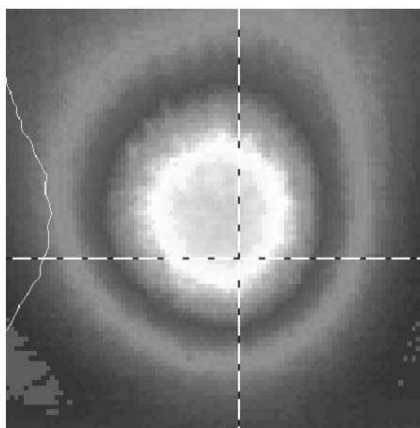


图 2 用于测量硅片对 THz 波的透射量的系统

实验中我们是采用 CCD 红外相机进行探测的。其中颜色越红亮的照片显示相机接收到的

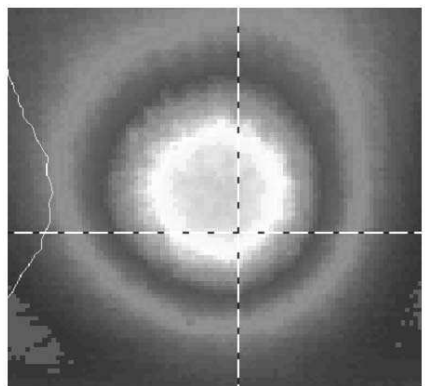


(a)

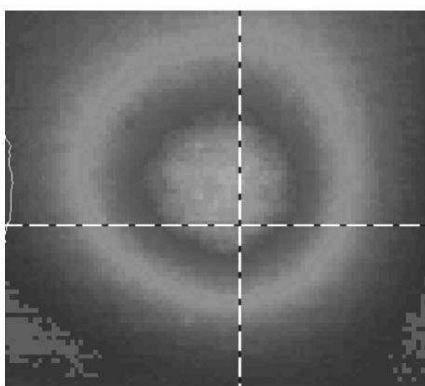


(b)

图 3 无硅片 (a) 和有硅片 (b) 的 CCD 照片



(a)



(b)

图 4 无激光照射 (a) 和有激光照射 (b) 的 CCD 照片

THz 功率越大。实验测量了有硅片和没有硅片的 CCD 照片, 同时还测量了硅片在没有激光照射和有激光照射下的 CCD 照片, 得到的照片如图 3 和图 4 所示。

最后, 实验使用红外探头测量了高阻硅本身和在波长为 808nm、光强为 $1.9\text{W}/\text{cm}^2$ 的激光照射下硅片对 THz 波的透射特性, 测量数据如表 2 所示。

表 2 透射量实验测量数据 (mW)

THz 源功率	无激光照射时的透射功率	激光照射下的透射功率	光照引起的改变量
220	103	86	17
179	86	68	18
196	105	83	22

由表 2 中的数据计算出激光照射对 THz 波透射的平均控制量 T 。

$$T = \frac{17 + 18 + 22}{103 + 86 + 105} = 19.39\%$$

通过上面的实验可以得出, 激光照射对 THz 波的透射特性具有一定的控制作用。激光照射硅片可以减少硅片对 THz 波的透射量。实验中激光对 THz 波透射的控制作用比较弱, $1.9\text{W}/\text{cm}^2$ 的激光可以改变硅片透射量的 20% 左右。控制作用比较弱的主要原因是入射的激光光强太小, 不足以产生足够的光生电导率。加大激光光强可以增强激光的控制作用。

激光照射硅片产生电导率的增加量和入射的激光光强成正比, 入射的光强越大, 电导率增加越大。根据参考文献 [2], 在 $1.9\text{W}/\text{cm}^2$ 的激光照射下, 硅片的电导率会增加大约 $\Delta\sigma = 4.3\text{S}/\text{m}$, 根据式 (3), 增加的光电导使得吸收系数增加 $\Delta\alpha = 4.7\text{cm}^{-1}$ 。这样可以算出激光照射硅片对 THz 波透射的控制量为 $1 - e^{-\Delta\alpha d}$, 其中硅片的厚度 $d = 0.07\text{cm}$ 。通过计算可以得出, 在 $1.9\text{W}/\text{cm}^2$ 的激光照射下, 硅片对 THz 波的透射控制量为 28%。

实验测得的数据比理论计算数据要小, 这可能是由硅片在强激光照射下升温造成的。用

强激光照射硅片会使硅片的温度急剧升高, 硅片温度的升高会产生红外辐射。而 THz 红外探测器对硅片由于温度的升高而产生的红外辐射是有响应的, 这使得激光照射下探测到的 THz 功率偏大, 使得测得的激光对 THz 波透射的控制量偏小。

4 结论

分析了光生等离子体的复介电常数和平衡载流子浓度的关系, 得出了光生电导率和吸收系数之间的函数关系。提出了一种利用激光控制硅片中 THz 波传输特性的方法, 并且用实验验证了这种方法的可行性。与传统的掺杂方法相比较, 该方法具有实时控制、控制和被控制器件之间高度隔离、可以和其它器件集成等诸多优点。实验证明, 当激光照射时, 材料的吸收系数增大, $1.9\text{W}/\text{cm}$ 的激光可以减少硅片对 THz 透射的 20% 左右。实验中控制作用弱的主要原因是照射激光光强太小, 增大照射激光光强就可以提高激光的控制能力。

参考文献

- [1] 田艳, 王洋, 赵国忠. 太赫兹频段硅的光学特性研究 [J]. 现在科学仪器, 2006 (2): 51-54.
- [2] G Koers, G Poesen, J -P Raskin, et al. Photo-induced switching of microwave and millimeter-wave signals on coplanar waveguides [C]. Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter, 2002, Amsterdam: 179-182.
- [3] T Ohba, S Ikawa. Far-infrared absorption of silicon crystals [J]. Appl. Phys., 64, 4141-4143 (1988).
- [4] Martin van Exter, D Grichkowsky. Optical and electronic properties of doped silicon from 0.1 to 2 THz [J]. Appl. Phys. Lett., 1990, 56: 1694-1696.
- [5] Vilson R A, Carlos A B, Roberto R P. All optical control of light on a silicon [J]. Natural, 2004, 431(28): 1081-1084.
- [6] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [7] 钱士雄, 王恭明. 非线性光学 —— 原理与进展 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 2001.
- [8] 戚祖敏. 太赫兹波在军事领域中的应用研究 [J]. 红外, 2008, 29(20): 1-6.