

# 从光子晶体效应到表面等离子波的实时演变\*

韩家广 Abul K. Azad 张伟力<sup>†</sup>

(美国俄克拉荷马州立大学电子与计算机工程系 俄克拉荷马州静水城 74078)

许景周 陈坚 张希成<sup>††</sup>

(美国伦斯勒理工学院太赫兹研究中心 纽约州特洛伊 12180)

**摘要** 文章报道了激光诱导太赫兹表面等离子谐振效应。采用激光抽运-太赫兹波探测技术,实时改变单晶硅中的载流子浓度,使其介电特性从类绝缘体演变为类金属导体,以支持表面等离子谐振效应,进而实现太赫兹波在周期性亚波长单晶硅孔阵列中的实时可控制谐振增强传输。同时还通过实验观测到太赫兹波从光子晶体效应到表面等离子波的实时演变。文章作者采用 Fano 模型对实验结果进行模拟分析,获得了与实验数据一致的理论拟合。

**关键词** 太赫兹波 表面等离子谐振效应 激光抽运-太赫兹波探测 亚波长孔阵列 单晶硅

## Real-time transition of a photonic crystal effect to a surface plasmon resonance

HAN Jia-Guang Abul K. Azad ZHANG Wei-Li<sup>†</sup>

(School of Electrical and Computer Engineering, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma 74078, USA)

XU Jing-Zhou CHEN Jian ZHANG X. - C. <sup>††</sup>

(Center for THz Research, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York 12180, USA)

**Abstract** We report the experimental observation of light induced terahertz surface plasmons. By use of an optical pump-terahertz probe technique, an instantaneous transition is induced between two interesting optical phenomena, an out-of-plane photonic crystal effect and surface-plasmon resonance, in a thin silicon film perforated with an array of subwavelength holes. The dielectric function of silicon is essentially altered by the intense ultrafast laser pulses due to photo-generated free carriers, whereby the silicon array becomes metallic and favors the coupling and propagation of surface plasmons in the terahertz regime. The plasmonic resonances are well fitted by the Fano model.

**Keywords** Terahertz waves, surface plasmons, optical pump-terahertz probe, array of subwavelength holes, silicon

## 1 引言

电磁波在周期性亚波长金属孔阵列中的传输增强效应引起了研究者的极大兴趣。一方面,由于该现象背后所蕴涵的丰富而深刻的物理机制尚未被人们所完全理解;另一方面是因为这一效应在近场光

学、纳米光刻技术、生物传感探测和集成光子器件等诸多领域具有的广泛应用前景<sup>[1,2]</sup>。通常,人们认为这一效应是由于入射电磁场和金属表面等离子体相互作用,形成表面等离子倏逝波(surface plas-

\* 2007-05-28 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: wvzhang@okstate.edu

<sup>††</sup> 通讯联系人. Email: zhangxc@rpi.edu

mons, SPs)的结果<sup>[3]</sup>。入射电磁波以 SPs 的形式耦合通过周期性分布的亚波长金属孔阵列,而 SPs 在金属孔的另一表面再次辐射形成电磁波,实现传输增强效应。这一现象在电磁波的不同频段,包括微波、太赫兹波和可见光波段均得到了广泛而深入的研究。

太赫兹光谱技术的发展为在该波段研究 SP 的谐振增强效应提供了优越的技术手段<sup>[4-7]</sup>。众所周知,具有高载流子浓度的半导体材料,其复合介电函数的实部在太赫兹波段为负值,其介电特性通常表现出类金属行为,可支持 SP 效应。最近,采用太赫兹时域光谱技术(THz-TDS),在高掺杂浓度的单晶硅薄片上制作的周期性亚波长孔阵列中,实验观察到了显著的 SP 谐振增强效应<sup>[5,6]</sup>。然而,具有低载流子浓度的半导体,其复合介电函数的实部通常为正值,具有类似绝缘体的介电特性,不支持 SP 效应。本文研究具有类绝缘体特性的半导体中的 SP 效应。采用光抽运-太赫兹探测技术,改变半导体载流子浓度,使其介电特性从类绝缘体到类金属实时可控制。在以低载流子浓度半导体为基质的周期孔阵列中,实现了的太赫兹波的 SP 谐振传输增强效应。更为有趣的是,通过改变激光激发强度,实验观察到太赫兹波从光子晶体效应到 SP 谐振传输增强效应的演变过程。

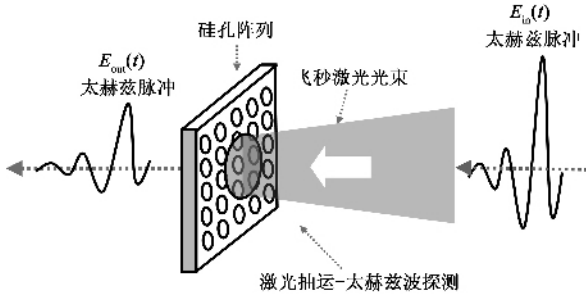


图1 激光抽运-太赫兹波探测实验的原理图

## 2 实验方法、结果和理论分析

实验中,太赫兹脉冲的产生是采用 2 mm 厚的 ZnTe 晶体,获得带宽为 2.5 THz 的亚皮秒超短脉冲。探测器同样采用 ZnTe 晶体,厚度为 1 mm。光抽运-太赫兹探测系统的激励源采用中心波长 800 nm、平均输出功率 750 mW、重复频率 1 kHz、脉冲宽度 100 fs 的台式掺钛蓝宝石再生放大系统(Spectra-Physics)<sup>[8]</sup>。实验样品采用面积为 10 mm × 10 mm,厚度为 30 μm 的 n 型单晶超薄硅片,其电阻率为 10

Ω cm 载流子浓度为  $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。周期为 160 μm 的椭圆形(80 μm × 40 μm)通孔方阵采用传统的微电子加工技术制作在超薄硅片上<sup>[5,7]</sup>。图 1 所示为激光抽运-太赫兹波探测实验的示意图。飞秒激光脉冲经过缩束,准直照射在通孔阵列样品上,光斑直径为 1.8 mm。单晶硅表面(约 10 μm 厚度)的介电常数在光激励下得到调制。与激光脉冲同步的太赫兹脉冲焦斑在样品表面与激光光斑重合,但尺寸相对较小(约 1.5 mm),以保证太赫兹脉冲经过的样品表面具有均匀的载流子分布。

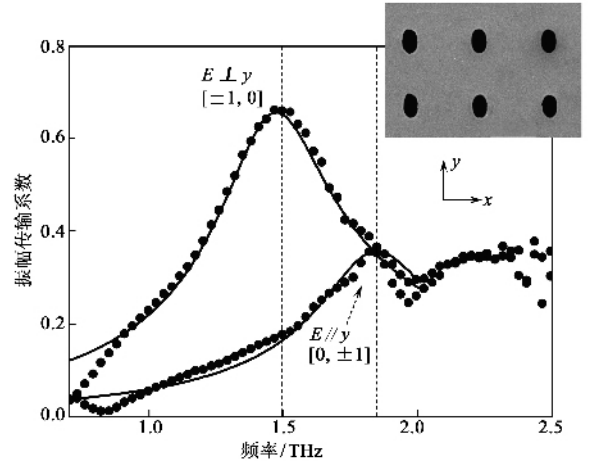


图2 在 111 mW 激光激励下,太赫兹脉冲通过亚波长硅孔阵列随频率变化的振幅传输系数实验值(圆点)和采用 Fano 模型的理论拟合(实线)。入射太赫兹电场分别垂直和平行于椭圆孔长轴方向。插图为亚波长硅孔阵列样品的扫描电子显微镜照片

图 2 是入射太赫兹电场分别垂直和平行于椭圆孔长轴方向,在 111 mW 激光激励下,太赫兹脉冲通过样品随频率变化的振幅传输系数实验值(圆点)。该系数是太赫兹电场经过孔阵列和直接穿过空气的传输振幅之比,  $|E_{\text{sam}}(\omega)/E_{\text{air}}(\omega)|$ 。可以清楚地看到,孔阵列的两个不同取向分别对应 1.50 [ ± 1 ρ ] THz 和 1.85 [ 0, ± 1 ] THz 的 SP 谐振峰,分别对应能量归一化透过率 460% 和 137%,具有显著的 SP 谐振增强效应。在 1.95 THz 处的波谷是 Wood's anomaly 效应的结果<sup>[9]</sup>。在正入射条件下,周期性金属方孔阵列的 SP 谐振响应模式通常可由如下公式表述<sup>[3]</sup>:

$$\lambda_{\text{sp}}^{m,n} = L(m^2 + n^2)^{\frac{1}{2}} \text{Re} \left( \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

这里 L 是孔的周期,  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  是太赫兹入射界面两种材料的介电系数(由于介质为空气,  $\epsilon_1 = 1$  对于激光激励下具有金属特性的硅,  $\epsilon_2 = \epsilon_{\text{Si}} + i\epsilon_{\text{Im}}$ ) m 和 n 是整数模指数。

电磁波在周期孔阵列中的传输,其物理过程通常认为是由于两种散射效应相互作用的结果,一种是处于连续状态的电磁波和介质之间的直接散射过程,另一种是处于离散状态的电磁波和介质之间的共振响应过程,即 SP 谐振效应。整个过程可以用 Fano 模型来描述<sup>[10-12]</sup>,

$$T(\omega) \propto T_b \left( 1 + \sum_{\nu} \frac{q_{\nu}}{\varepsilon_{\nu}} \right)^2 / \left[ 1 + \left( \sum_{\nu} \frac{1}{\varepsilon_{\nu}} \right)^2 \right], \quad (2)$$

其中  $\varepsilon_{\nu} = (\omega - \omega_{\nu}) / (\Gamma_{\nu} / 2)$ ,  $|T_b|$  是来自零阶连续散射态的贡献,离散的共振态由响应频率  $\omega_{\nu}$ , 线宽  $\Gamma_{\nu}$  以及 Breit - Wigner - Fano 耦合系数 来表征。图 2 的实线给出了基于 Fano 模型的拟合结果,理论与实验值有很好的吻合。

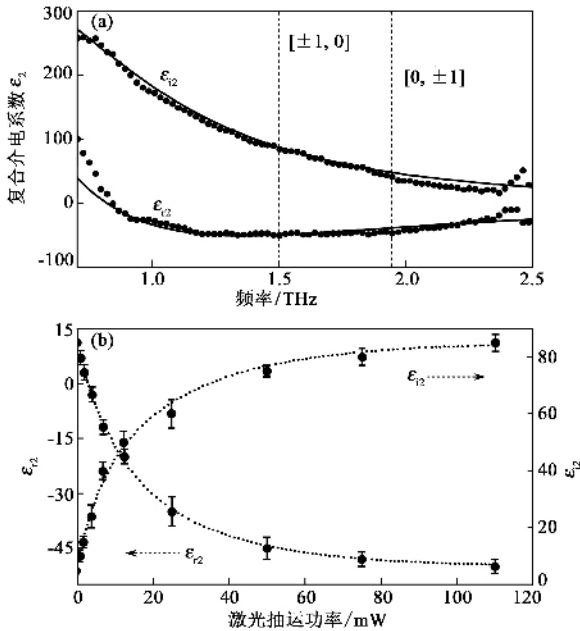


图 3 (a) 在 111 mW 激光激励下的单晶硅随频率变化的复合介电函数的实验值(圆点)及采用 Drude - Smith 理论模型的拟合结果(实线);(b) 在 1.50 THz 处,单晶硅随激光激励强度变化的复合介电函数的实验测量结果(圆点)

上述实验结果表明,以低载流子浓度半导体为基质的周期性孔阵列,在 111 mW 的激光激励下,其太赫兹脉冲传输特性表现出异常增强效应。其根本原因在于,在一定强度的激光激励下,单晶硅的介电函数发生实质性变化,表现出明显的金属特性,此时的亚波长硅孔阵列可支持 SP 谐振增强效应。图 3(a) 为 111 mW 激光激励下实验测得的单晶硅随频率变化的复合介电函数  $\varepsilon_2 = \varepsilon'_{i2} + i\varepsilon''_{i2}$  (圆点)<sup>[13]</sup>。当频率高于 0.8 THz 时,介电函数的实部变为负值,表现出类金属特性。研究发现,此时硅的介电函数

较好地符合 Drude - Smith 模型,其电导率可表述为<sup>[14,15]</sup>

$$\sigma(\omega) = \frac{\varepsilon_0 \omega_p^2 \tau}{(1 - i\omega\tau)} \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{(1 - i\omega\tau)^n} \right], \quad (3)$$

其中  $\omega_p = \sqrt{Ne^2 / \varepsilon_0 m^*}$  为等离子体频率,  $N$  为载流子密度,  $m^*$  为载流子的有效质量,  $e$  为电子电荷,  $\varepsilon_0$  为真空介电常数,  $\tau$  为载流子弛豫时间,  $C_n$  为  $n$  阶比例系数。根据介电函数与电导率的关系,  $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_r + i\varepsilon_i = \varepsilon_{\infty} + i\sigma(\omega) / \omega \varepsilon_0$ , 可以得到相应的 Drude - Smith 复合介电函数的理论值,如图 3(a) 实线所示。其中  $\tau = 0.20 \text{ ps}$ ,  $C_1 = -0.98$ , 相应的载流子浓度为  $N = 0.99 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。当频率大于 0.8 THz 时,理论与实验结果相吻合。

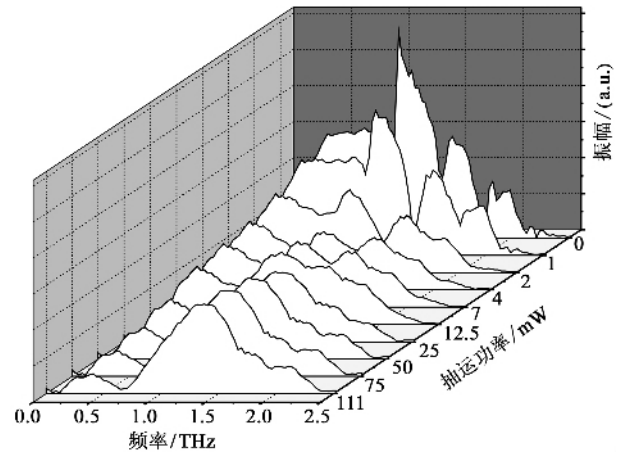


图 4 不同激光激励强度下太赫兹脉冲通过亚波长硅孔阵列的傅里叶变换振幅光谱

为进一步研究太赫兹脉冲 SP 谐振效应的动态演变过程,在实验中我们将激光激励强度从 0 逐步增加到 111 mW。图 3(b) 给出了在 1.50 THz 时对应的每一激励强度下硅的复合介电函数的实验值(圆点)。可以清楚地发现,介电函数实部随着光抽运强度增加从正值到零再到负值的变化过程。当激光功率大于 3 mW 时,硅表现出金属特性,这为实现 SP 谐振增强效应提供了可能。图 4 给出了不同光激励强度下太赫兹脉冲通过亚波长硅孔阵列的傅里叶变换振幅光谱。在较低光激励强度下,太赫兹脉冲的传输特性主要表现为光子晶体效应,其谐振频率分别为 0.97, 1.40 和 1.78 THz<sup>[16]</sup>。随光激励强度增加,光子晶体效应逐渐减弱,SP 谐振效应明显增强。当激光功率增加到 12.5 mW 时,在 1.60 THz 附近出现新的谐振峰(SPs)。继续增加光激励强度,可以发现 SP 谐振峰的红移以及传输振幅的进一步增强。这一现象主要是由于随激光激励功率的增

加,硅孔阵列的金属特性逐渐增强,从而使得 SP 谐振效应得以增强。当光激励强度达 25 mW 时,太赫兹脉冲能量传输透过率为 25.5%。当激光功率增加到 111 mW 时,其能量透过率增至 45%,对应于 460% 的高归一化透过率<sup>[7]</sup>。

### 3 结束语

可调谐、可控制 SPs 的研究对于实现集成光子学及器件的突破性进展具有重要意义。本文利用激光抽运-太赫兹波探测技术,在低掺杂单晶硅制作的周期性微孔阵列中实现了太赫兹 SP 谐振增强传输效应。通过改变激光激励强度,实现了太赫兹波段 SP 谐振效应的实时可控制。同时,实验观测到太赫兹波从光子晶体效应到表面等离子谐振效应的实时演变过程。该研究结果为实现可调谐、可控制 SPs 提供了一种新途径,将在太赫兹光电子技术和集成器件中具有重要应用前景。

#### 参 考 文 献

[ 1 ] Ebbesen T W , Lezec H J , Ghaemi H F *et al.* Nature , 1998 , 391 : 667

- [ 2 ] Barnes W L , Dereux A , Ebbesen T W. Nature , 2003 , 424 : 824
- [ 3 ] Raether H. Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings. Berlin Springer - Verlag , 1988
- [ 4 ] Qu D , Grischkowsky D , Zhang W. Opt. Lett. , 2004 , 29 : 896
- [ 5 ] Azad A K , Zhao Y , Zhang W. Appl. Phys. Lett. , 2005 , 86 : 141102
- [ 6 ] Saxler J , Rivas J G , Janke C *et al.* Phys. Rev. B , 2004 , 69 : 155427
- [ 7 ] Zhang W , Azad A K , Han J G *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2007 , 98 : 183901
- [ 8 ] Ferguson B , Zhang X C. Nature Materials , 2002 , 1 : 26
- [ 9 ] Wood R W. Phys. Rev. , 1935 , 48 : 928
- [ 10 ] Fano U. Phys. Rev. , 1961 , 124 : 1866
- [ 11 ] Genet C , Van Exter M P , Woerdman J P. Opt. Commun. , 2003 , 225 : 331
- [ 12 ] Fan W , Zhang S , Minhas B *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2005 , 94 : 033902
- [ 13 ] Zhang W , Azad A K , Grischkowsky D. Appl. Phys. Lett. , 2003 , 82 : 2841
- [ 14 ] Turner G M , Beard M C , Schmittenmear C A. J. Phys. Chem. B , 2002 , 106 : 11716
- [ 15 ] Smith N V. Phys. Rev. B , 2001 , 64 : 155106
- [ 16 ] Jian Z , Mittleman D. Appl. Phys. Lett. , 2005 , 87 : 191113



· 物理新闻和动态 ·

## Efimov 效应

在 1970 年,一位俄罗斯青年 V. Efimov 在他的博士论文中提出了一个新的量子现象,即两个微观粒子(例如中性原子或中子等)在一般情况下它们之间只存在微弱的相互作用,当有第三个粒子加入时,则在一定的条件下就会产生一种强相互作用,并可形成多种构形的束缚态。换句话说,就是产生了一个稳定的三粒子集团。当时,Colorado 大学的 C. C. Greene 教授对这个现象的评价是“不可思议”。因为原来的两个粒子似乎突然接通了开关,把与它们相距有一定长度(约有 500—1000 个氢原子大小的长度)的第三个粒子吸引过来并组成一个三粒子集团,所以他把这个现象称为 Efimov 现象,而将这个三粒子集团称为 Efimov 三粒子集团。

在随后的 10 年间,想用实验来观察 Efimov 三粒子集团的工作可以说是毫无进展。直到 1999 年, Greene 教授与他的合作者 B. Esry 和 J. Burke 等共同提出了一个设想,他们认为产生 Efimov 效应的条件应该是在处于超冷状态下的原子气体。在 2005 年,奥地利 Innsbruck 大学以 Rudi Grimm 教授为首的研究组终于在 10nK 的超冷温度下,在铯原子气体中观察到了 Efimov 三粒子集团。

众所周知,在短程范围内,原子间的相互作用主要是由化学键决定,而在长程范围内,原子间的作用主要是范德瓦尔斯力。Efimov 效应发生的区域应该是属于范德瓦尔斯力的作用范围。原子在范德瓦尔斯力的作用下,原子外层的电荷会发生重新排列而形成电偶极子,这时偶极子产生的电场就可吸引其相邻的原子,这就是 Efimov 效应的物理图像。另一方面, Efimov 效应的实验工作对研究量子物理内三粒子间的相互作用开启了一扇巧妙的窗户,因为在一般情况下物理学家们很难控制微观粒子间相互作用的强弱,但通过 Feshbach 共振就比较容易实现对超冷原子气体间相互作用的调节。由于 Efimov 效应适用于各种微观粒子,这就对研究氦核(它是由一个质子和二个中子组成的三粒子集团)在超冷温度下如何由弱库珀对发生相互作用后转变为玻色-爱因斯坦凝聚下的单一量子态提供有用的信息,这实际上是一种 BCS 理论与 BES 凝聚态之间的交叉效应。

(云中客 摘自 Physics News Update #822 , 1 May 2007)