

金属/介质薄膜中声子热辐射的空间和各向异性研究

董欣, 张霞, 孙学博, 元双秀, 徐慧, 苏富芳*

曲阜师范大学物理工程学院, 山东省激光偏光技术重点实验室, 山东 曲阜 273165

摘要 基于理论、实验和仿真相结合的方式, 着重研究了金属/介质(MD)薄膜中声子热辐射的空间特性和各向异性。声子是由于晶格振动产生的元激发, 是物质的内在属性。尽管声子不易调控, 但是声子与其他光学激发的耦合会产生奇异的光学现象。特别是红外到太赫兹范围内的光子与极性介质中的声子强耦合产生表面声子激元(SPhP)。SPhP具有强局域、低损耗等特点, 与等离子体(plasmon polaritons)形成互补, 使得深亚波长光学成为可能。为了进一步了解声子吸收的内在理论基础, 首先通过黄昆方程和超晶格连续介电模型在理论上分析了声子吸收。实验上, 主要以SiO₂声子作为研究对象, 利用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)方法, 分别在Si/Al(150 nm)薄膜和Si衬底上制备出500 nm厚的SiO₂薄膜。基于傅里叶红外光谱仪(FTIR), 在垂直入射下得到热辐射光谱, 通过热辐射光谱分析, 并结合由时域有限差分算法(finite-difference time-domain, FDTD)计算得出的仿真光谱图, 对比了MD薄膜结构和非MD薄膜结构中声子的热辐射, 发现MD薄膜结构更能够有利于声子和SPhP的激发。根据Berreman效应, 纵光学波(LO)声子只在倾斜入射时产生。光谱线没有呈现洛伦兹线型, 因此, 虽然LO声子在垂直入射时测得的热辐射图中不辐射, 但同样影响横光学波(TO)声子辐射谱的线型。另外, 利用FTIR对金属(Si/Al)/介质(SiO₂薄膜)进行热辐射转角测试, 对热辐射转角图分析证明, Si/Al/SiO₂薄膜中SiO₂声子遵循LST(lyddano-sachs-teller)关系, 纵横声子成对出现, 且两种声子的空间辐射特性不同。改变偏振, 发现在S偏振和P偏振下, 声子热辐射呈现不同的模式, 体现出声子的空间各向异性。并且, 声子与光子耦合可以激发SPhP, 反过来, SPhP可以增强声子的吸收。基于MD结构, 能够激发并调控SPhP和声子辐射行为, 为红外器件的实现奠定了基础。

关键词 表面声子激元; 热辐射; 偏振; SiO₂

中图分类号: O469 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)08-2404-05

引言

近年来, 光学人工微结构(optical artificial microstructure)已成为国内外研究和应用的热点之一。其拥有独特的光学特性, 可实现人为调控光与物质相互作用, 以满足人们对微纳米尺度光学器件的需求^[1]。金属/介质(metal/dielectric, MD)是光学人工微纳结构组成基元的重要材料组合方式之一。在这种组合方式中, 由于光子与介质中声子的耦合, 产生表面声子激元(surface phonon polaritons, SPhP)^[2]。在纳米尺度上实现场强局域, 突破衍射限制。在红外波段对纳米光学器件有着深远的影响, 包括各种红外器件^[3]。声子是描述晶格振动的元激发, 是当电磁波与晶格振动相互作用产

生的强吸收。因此, 通过光学人工微纳结构调控声子元激发, 产生调控SPhP, 可以得到比其他材料更优良的性质。在诸多介质材料中, SiO₂是红外波段产生SPhP的优良极性介质材料^[4], 最常见且成本低。更重要的是SiO₂薄膜声子对调控人工光学微结构物理性能方面有着不可忽视的作用, 例如提高超材料反射品质因子^[5]等。综上, 研究MD薄膜结构中SiO₂声子的辐射状态, 无论是在基础研究还是红外器件开发, 都具有重要的意义。

基尔霍夫定律(Kirchhoff's law)告诉我们, 物质的热辐射和吸收是等价的^[6], 而且热辐射与材料中的本征模式紧密相关。在红外, 相干光源比较稀有, 利用红外光学人工微结构热辐射, 可以产生相干光源^[7]。同时, 热辐射又可作为研究红外人工光学微结构手段^[8]。在这个工作中, 从理论上分

收稿日期: 2020-08-03, 修订日期: 2020-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(11705101)资助

作者简介: 董欣, 女, 1995年生, 曲阜师范大学物理工程学院硕士研究生 e-mail: xdong914@gmail.com

* 通讯作者 e-mail: sufufang628@163.com

析了声子的内在禀性。实验上,通过对比 Si/Al/SiO₂ 薄膜和 Si/SiO₂ 薄膜中 SiO₂ 声子的热辐射,研究了 MD 薄膜结构中 SPhP 对声子热辐射的影响,并通过对 Si/Al/SiO₂ 薄膜在不同偏振下进行转角测试,分析了 MD 基元中 SPhP 的热辐射行为,研究了 MD 薄膜 SiO₂ 声子的各向异性和空间辐射特性。同时利用 FDTD Solutions 软件对二者吸收谱进行仿真计算,验证了基尔霍夫定律在两种薄膜中的使用,得到了与前人一致的结果。

1 理论分析

声子是描述晶格振动的元激发。针对长光学波下的晶格振动,可以根据黄昆提出的关于晶格介电行为,在红外波长范围内的宏观模型来求解,即黄昆方程^[9]

$$\begin{aligned}\dot{W} &= b_{11}W + b_{12}E \\ P &= b_{21}W + b_{22}E\end{aligned}\quad (1)$$

式(1)中, W 是长光学波运动的宏观量, P 是宏观极化强度, E 是宏观电场强度, b_{11} , b_{12} , b_{21} , b_{22} 是相互联系的参数。在实际情况下,正负离子间的相对振动会产生电偶极矩,从而导致和电磁波的相互作用,引起红外光区域的强烈吸收。根据超晶格的连续介电模型^[10],求解光学振动的问题可以归结为求解其介电常数的问题。介质对于电场的响应用介电常数 $\epsilon(\omega)$ 来表示,长光学波包含横光学波(transverse optical, TO)和纵光学波(longitudinal optical, LO), $\epsilon(\omega)$ 可如式(2)表示

$$\epsilon(\omega) = \epsilon(\infty) + \frac{\epsilon(0) - \epsilon(\infty)}{\omega_{\text{TO}}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma} \omega_{\text{TO}}^2 \quad (2)$$

式(2)中, ω_{TO} 是长光学波横波的频率, $\epsilon(0)$ 是低频介电常数, $\epsilon(\infty)$ 是高频介电常数。吸收功率与介电常数的虚部 $\epsilon''(\omega)$ 成正比,即吸收能量与介电常数的虚部有关系。根据 LST 关系, $\omega_{\text{LO}}/\omega_{\text{TO}} = [\epsilon(0)/\epsilon(\infty)]^{1/2}$, 其中, ω_{LO} 是长光学波纵波的频率。介电常数的虚部为

$$\epsilon''(\omega) = \epsilon(\infty) \frac{\omega\gamma(\omega_{\text{LO}}^2 - \omega_{\text{TO}}^2)}{(\omega_{\text{TO}}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma^2} \quad (3)$$

根据 LST 关系可知,在一般情况下 $\epsilon(0) > \epsilon(\infty)$, 所以 $\omega_{\text{LO}} > \omega_{\text{TO}}$, 因此 $\lambda_{\text{LO}} < \lambda_{\text{TO}}$ 。声子包含 TO 和 LO 两种模式,根据式(3)可得出,在 $\omega = \omega_{\text{TO}}$ 处有一个吸收峰,这意味着横波的光波促进了横光学波格波的产生。又由 LST 规则,声子产生 LO/TO 劈裂,产生剩余射线带(Reststrahlen band),在此带中电磁波与介质中的声子相互作用,产生 SPhP。特别是极性晶体 SiO₂ 和 SiC,在剩余射线带内,其介电常数有负实部和小的虚部。因此,极性晶体中的 SPhP 在红外辐射、红外器件等方面都有广泛的应用。为探讨 MD 结构中的声子热辐射特性,我们选择了 SiO₂ 薄膜中的声子作为研究对象。

2 实验部分

实验上, SiO₂ 薄膜分别制备在和 Si 衬底上。首先选取清洗好的两片单晶 Si 片作为衬底,采用电子束蒸发(electron beam evaporation)方法在其中一片 Si 衬底上蒸镀 150 nm 厚

的 Al 薄膜,然后利用等离子体增强化学气相沉积(plasma chemical vapor deposition, PECVD)方法生长 500 nm 的 SiO₂ 薄膜。同样利用 PECVD 方法在另外一片 Si 衬底上直接生长 500 nm SiO₂ 薄膜。为了更好地观察 SiO₂ 薄膜的制备状态,运用聚焦离子束(focused ion beam, FIB)方法刻蚀样品,并利用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM) (JSM-6700F),将样品倾斜 45°,观察其样貌特征,如图 1(a) (以 Si/Al 薄膜为衬底的 SiO₂ 薄膜 SEM 图)和(b) (以 Si 为衬底的 SiO₂ 薄膜 SEM 图)所示。可以看出,在两种衬底上 SiO₂ 薄膜的致密度都较高。

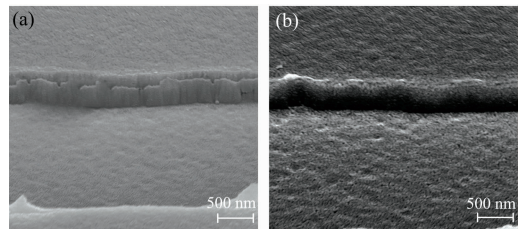


图 1 SiO₂ 薄膜 SEM 图

(a): Si/Al 薄膜衬底上; (b): Si 衬底上

Fig. 1 SEM diagram of SiO₂ thin films

(a): On Si/Al substrate; (b): On Si substrate

热辐射测试是在基于傅里叶红外光谱仪(Fourier transform infrared, FTIR)自行搭建的系统上进行的。测试实验装置如图 2 所示。利用加热器加热 Si/Al/SiO₂ 和 Si/SiO₂ 薄膜样品,辐射出来的光经过透镜聚焦、狭缝隔离噪声和偏振器选偏后,入射到 FTIR 探测器,采集信号。测试中,用加热后白板的辐射作为参考信号。为表征 SiO₂ 声子热辐射的空间分布,搭建系统中,样品放置在一精密旋转台上,可在 0°~360°内旋转样品,旋转精度为 0.01°。在本工作中,旋转角度范围为 0°~70°,每隔 2°采集一个信号,辐射谱的测试范围是 5~19 μm。利用 FDTD Solutions 软件分别对 Si/Al/SiO₂ 薄膜和 Si/SiO₂ 薄膜进行反射谱、透射谱仿真计算,由此计算出吸收谱^[6]。在仿真过程当中, Si, Al 和 SiO₂ 材料参数来自于 FDTD Solutions 软件中的材料库。在 X, Y, Z 方向上 mesh 精度均设为 0.01 μm。

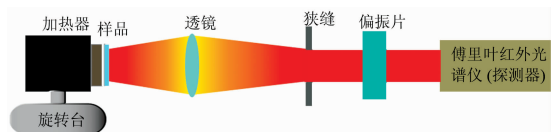


图 2 傅里叶红外光谱仪测量热辐射的装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for measuring thermal radiation with FTIR

3 结果与讨论

3.1 光谱分析

图 3 给出垂直角度下 Si/Al/SiO₂ 薄膜(a, b)和 Si/SiO₂ 薄膜(c, d)热辐射实验测试结果(a, c)和光谱仿真结果(b, d)。图 3(a)是实验测得 Si/Al/SiO₂ 薄膜的热辐射光谱图。由

图 3(a)中可以看出,在 $\lambda=8.37, 9.75$ 和 $12.25 \mu\text{m}$ [图 3(a)中红色箭头所标识位置]处出现辐射峰,其中, $\lambda=9.75 \mu\text{m}$ 处辐射峰最为明显。对比文献[11]和式(3), $\lambda=9.75 \mu\text{m}$ 附近时产生 SPhP 现象,这是典型的 SiO_2 薄膜 TO 吸收谱。图 3(b)是 $\text{Si}/\text{Al}/\text{SiO}_2$ 薄膜的反射(黑色实线)和透射(红色实线)仿真和由计算得到的吸收(蓝色实线)光谱图。由图可看出, $\text{Si}/\text{Al}/\text{SiO}_2$ 薄膜的透射率基本为零,这是由于金属 Al 在这个波段相当于完美导体,入射到上面的电磁波基本被完全反射回去。图 3(c)是实验测得 Si/SiO_2 薄膜的热辐射光谱图。由图中可以看出,在 $\lambda=9.75 \mu\text{m}$ 处为一上升沿,在 $\lambda=9.08 \mu\text{m}$ 处辐射几乎为零。由图 3(d)反射谱(黑色实线)、透射谱(红色实线)以及吸收(蓝色实线)光谱图可知, $\lambda=9.08 \mu\text{m}$ 处于吸收且并未发现 SiO_2 薄膜 TO 辐射峰。

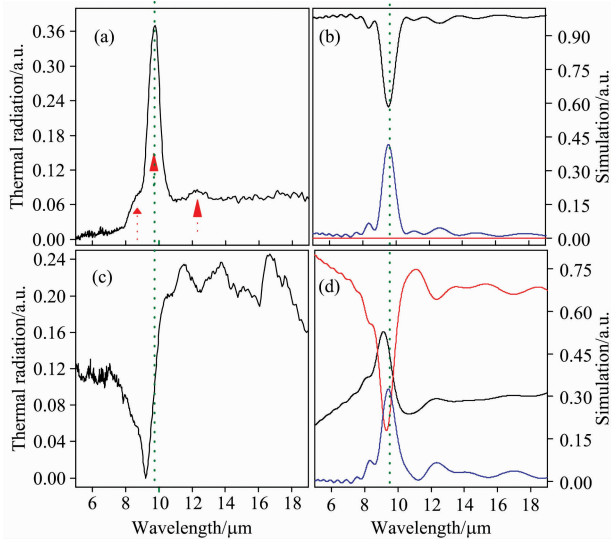


图 3 (a) $\text{Si}/\text{Al}/\text{SiO}_2$ 薄膜和 (c) Si/SiO_2 薄膜垂直角度下热辐射实验光谱图; (b) $\text{Si}/\text{Al}/\text{SiO}_2$ 薄膜和 (d) Si/SiO_2 薄膜垂直角度下反射(黑色实线)、透射(红色实线)、吸收(蓝色实线)仿真光谱图

Fig. 3 Thermal radiation experimental spectra of (a) $\text{Si}/\text{Al}/\text{SiO}_2$ thin films and (c) Si/SiO_2 thin films in the normal incident; Simulation spectra of reflection (black solid line), transmission (red solid line) and absorption (blue solid line) of (b) $\text{Si}/\text{Al}/\text{SiO}_2$ thin films and (d) Si/SiO_2 thin films in the normal incidence

对比两种薄膜中 SiO_2 声子的热辐射,可以看出,在 $\lambda=9.75 \mu\text{m}$ 处,无论是辐射谱还是吸收谱,都有一强的变化峰,而且都不是规则的洛伦兹线型。纵横声子是成对出现的。在横电模式下,纵声子为暗光学模式,不辐射,但是会影响横声子辐射的线型,如图 3 所示。同时,两种薄膜中 SiO_2 声子的热辐射有很大差异。对于 $\text{Si}/\text{Al}/\text{SiO}_2$ 薄膜来说,图 3(a)辐射谱与图 3(b)中的吸收谱基本一致。而对于 Si/SiO_2 薄膜,图 3(c)辐射谱与图 3(d)中的吸收谱不一致。说明 $\text{Si}/\text{Al}/\text{SiO}_2$ 薄膜满足基尔霍夫定律,而 Si/SiO_2 薄膜不满足。对比图 3(a)和(c),可以看出,在 $\lambda=9.75 \mu\text{m}$ 处, $\text{Si}/\text{Al}/\text{SiO}_2$ 薄膜热辐射光谱图中呈现明显的辐射峰,而 Si/SiO_2 薄膜呈现一个

辐射增强的边缘。由上述理论分析,根据式(3),在 $\lambda=9.75 \mu\text{m}$ 附近,满足声子共振辐射条件^[11]。在 $\text{Si}/\text{Al}/\text{SiO}_2$ 体系中,在金属(Al)-介质(SiO_2)界面上,光子与声子产生强相互作用,从而 SPhP 现象产生,辐射谱中在此波长位置呈现一高 Q 值的峰。而 Si/SiO_2 薄膜中,由于没有金属(Al)/介质(SiO_2)界面的存在,不能产生 SPhP,声子振动不能得到增强,因此没有强的辐射峰,仅有一上升沿,如图 3(c)所示。另外, Si 衬底在红外是部分透明的,对比图 3(a)和(c), Si/SiO_2 薄膜中辐射整体较弱,这是由于部分光波透过引起的。结合图 3(a)和(c)可知,无论是 $\text{Si}/\text{Al}/\text{SiO}_2$ 薄膜热辐射光谱图还是 Si/SiO_2 薄膜热辐射光谱图,都并未发现 LO 模声子。由 Berreman 效应可知,LO 声子模式来自于电场的法向分量引起的表面电荷共振^[12]。而图 3 是在垂直角度下测得,因此,LO 声子不满足产生条件。

综上,MD 结构能够产生 SPhP,从而更好地激发薄膜中的声子。在光学人工微纳结构中,MD 界面结合微纳结构,可以调控 SPhP 的行为,引入其他光学模式和耦合,这对红外光学器件的应用前景有着极重要的意义。因此,探究 MD 薄膜中的声子特性对于光学人工微纳结构设计和应用是非常重要的。

3.2 MD 基元中薄膜声子的空间辐射特性和各向异性

为了深入研究 MD 结构中 SiO_2 薄膜声子的空间行为,我们测试了 $\text{Si}/\text{Al}/\text{SiO}_2$ 薄膜在不同偏振不同角度下的热辐射,如图 4 所示。图 4(a)为 $\text{Si}/\text{Al}/\text{SiO}_2$ 薄膜在 P 偏振态下的热辐射转角图。可以看出, $\lambda=9.75 \mu\text{m}$ 位置附近,有一条明亮的条带,随着辐射角度增加不变。在辐射角度大约大于 10° 时,在 $\lambda=8 \mu\text{m}$ 位置附近,出现一条明亮的条带,并且随着角度增大变亮,即辐射增强。 $\lambda=12.12 \mu\text{m}$ 位置附近,有一条暗色的条带,随着辐射角度增大逐渐明显。通过上述对声子的动力学理论分析,可知,LO 和 TO 声子是成对出现的,满足 LST 规则。这一点由实验上的光谱分析得到证实。在图 3(a)中,在波长位置 $7.9 \sim 11 \mu\text{m}$ 范围内,呈现非洛伦兹线型的辐射光谱结构,结合理论和转角测试分析,可知,这个非洛伦兹线型的辐射光谱结构来自 LO 和 TO 声子的 SPhP 共振现象。同理,图 3(a)中波长位置 $11.5 \sim 13 \mu\text{m}$ 范围内的非洛伦兹线型的辐射光谱结构,也来自 LO 和 TO 声子的 SPhP 共振现象。在前期工作中,我们通过改变 $\text{Si}/\text{Al}/\text{SiO}_2$ 薄膜上制备 Al 一维光栅结构的线宽,改变金属-介质-金属中磁共振模式的光谱位置,调控了 $11.5 \sim 13 \mu\text{m}$ 处的声子与磁共振光学模式的耦合,得到 Rabi 劈裂类量子现象^[13]。由此,研究声子的热辐射状态是微纳光子学发展和应用的前提。

图 4(b)为 $\text{Si}/\text{Al}/\text{SiO}_2$ 薄膜在 S 偏振态下的热辐射转角图。在 $\lambda=9.75 \mu\text{m}$ 位置附近明亮的条带,随着辐射角度增大,没有明显变化,这和 P 偏振下相同。但是在 $\lambda=8 \mu\text{m}$ 位置附近,开始就出现一较宽的暗色条带,随着辐射角度的增大,辐射先变强然后逐渐变弱,在大角度下消失。在 $\lambda=12.12 \mu\text{m}$ 位置附近的辐射情况与在 $\lambda=8 \mu\text{m}$ 位置处相似,开始有一暗色的条带,大角度下消失,但是相比较 $\lambda=8 \mu\text{m}$ 位置处的条带,非常微弱。

对比图 4(a)和(b)可知,图 4(a)中,在 $\lambda=8\ \mu\text{m}$ 和 $\lambda=12.12\ \mu\text{m}$ 处,热辐射强度都随着辐射角度的增大而增强。根据前人研究^[14], $\lambda=8\ \mu\text{m}$ 和 $\lambda=12.12\ \mu\text{m}$ 皆为 LO 声子,且遵循 Berreman 效应。而在 $\lambda=9.75\ \mu\text{m}$ 处,热辐射强度不随入射角改变。因此,LO 声子具有角度依赖性,TO 声子不具有角度依赖性。同一种偏振下, SiO_2 薄膜声子随辐射角度的改变呈现出不同的辐射状态,体现了声子的空间辐射特性。同时,比较图 4(a)和(b)两种偏振状态下,在 $\lambda=9.75\ \mu\text{m}$

处,TO 声子空间辐射特性没有变化。但是,在 $\lambda=8\ \mu\text{m}$ 和 $\lambda=12.12\ \mu\text{m}$ 位置附近的 LO 声子,其热辐射强度都随着辐射角度的增大而减小,并在大角度下消失。根据 Berreman 效应,LO 声子热辐射强度应当随着热辐射角度增大逐渐增强。又因 $\lambda=8.37\ \mu\text{m}$ 和 $\lambda=12.25\ \mu\text{m}$ 存在 TO 声子。因此,在 $\lambda=8\ \mu\text{m}$ 和 $\lambda=12.12\ \mu\text{m}$ 位置附近出现较弱热辐射强度。综上,LO 声子仅存在于 P 偏振下,TO 声子在两种偏振下都可存在。由此, SiO_2 薄膜声子的热辐射具有各向异性。

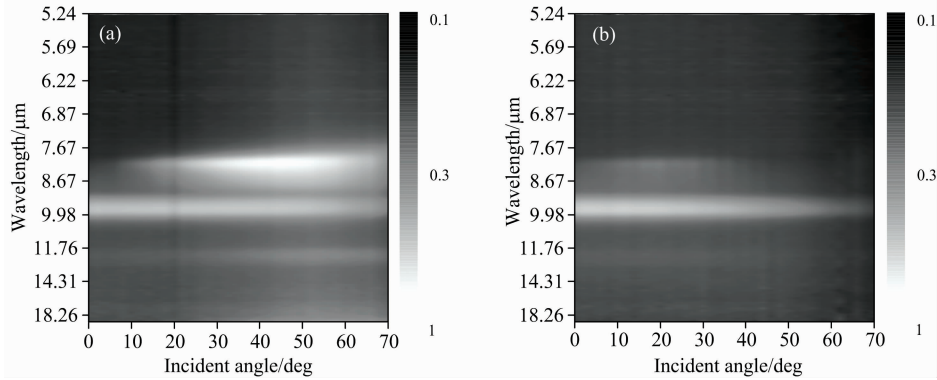


图 4 $0^\circ\sim 70^\circ$ 入射角度下 Si/Al/SiO₂ 薄膜两种偏振下的热辐射转角图

(a): P 偏振下; (b): S 偏振下

Fig. 4 Thermal radiation angle diagram of two kinds of polarizations at the incident angle of $0^\circ\sim 70^\circ$ for Si/Al/SiO₂ thin films

(a): Under P polarization; (b): Under S polarization

SiO_2 薄膜 LO 和 TO 声子热辐射具有不同的空间特性和各向异性。垂直辐射情况下,LO 声子不辐射,是暗模式,TO 声子辐射,是明模式。P 偏振下,在 MD 界面上,这两种模式分别与电磁波强耦合,出现 LO 和 TO 声子的 SPhP 共振现象。图 3(a) 出现窄而强的非洛伦兹线型光谱结构,是这两种模式耦合的结果。而图 3(b)中没有 SPhP 形成,可以看到,声子辐射比较弱且带宽很宽。由此可见,电磁波与声子耦合可以产生 SPhP 现象,SPhP 现象亦可以反过来增强声子吸收。综上,通过对 MD 基元中声子的空间辐射特性和各向异性的研究,可以更加灵活地调节材料中的声子元激发,甚至可以调控 SPhP 的激发,使得材料在红外波段产生更优良的光学性质,以满足人们在红外器件的需求。

4 结 论

理论上利用黄昆方程对声子的介电性质进行了分析。实

验上,利用电子束蒸发和 PECVE 方法制备出 Si/Al/SiO₂ 薄膜和 Si/SiO₂ 薄膜,并对其分别进行了热辐射测试,结合 FDTD Solutions 软件仿真,对他们的光谱行为进行了对比分析。Si/Al/SiO₂ 薄膜中出现一窄的非洛伦兹线型的结构,而 Si/SiO₂ 薄膜中在相应的光谱位置仅有一上升沿结构。对 Si/Al/SiO₂ 薄膜进行热辐射角分辨测试分析表明, SiO_2 薄膜声子热辐射具有空间特性和各向异性。而在 MD 界面上, SiO_2 薄膜声子与电磁波耦合形成 SPhP。在垂直角度下,LO 和 TO 声子的 SPhP 分别是暗模式和明模式,二者的耦合在光谱中呈现一窄的非洛伦兹线型。本工作通过分析 SiO_2 薄膜声子元激发的物理特性,对调控材料中声子元激发提供了新的途径,特别是对于红外波段光学现象的产生和红外光学器件功能的实现具有重要的意义。

References

- [1] Kadic M, Milton G W, van Hecke M, et al. Nature Reviews Physics, 2019, 1(3): 198.
- [2] Foteinopoulou S, Devarapu G C R, Subramania G S, et al. Nanophotonics, 2019, 8(12): 2129.
- [3] Peng C, Ou K, Li G, et al. Optics Express, 2020, 28(8): 11721.
- [4] Hafeli A K, Rephaeli E, Fan S H, et al. Journal of Applied Physics, 2011, 110(4): 043517.
- [5] Tsai W-Y, Wang C-M, Chen C-F, et al. Scientific Reports, 2017, 7: 42076.
- [6] Zhang Z. Nano/Microscale Heat Transfer, America: McGraw-Hill Education, 2007.
- [7] De Zoysa M, Asano T, Mochizuki K, et al. Nature Photonics, 2012, 6(8): 535.
- [8] Shitrit N, Yulevich I, Maguid E, et al. Science, 2013, 340(6133): 724.

- [9] HUANG Kun(黄 昆). Solid State Physics(固体物理学). Beijing: Higher Education Press(北京: 高等教育出版社), 1988.
- [10] HUANG Kun(黄 昆). Progress in Natural Science: Communications From State Key Laboratories of China(自然科学进展: 国家重点实验室通讯), 1994, 4(5): 514.
- [11] Vassants, Huqonin J P, Marquier F, et al. Optics Express, 2012, 20(21): 23971.
- [12] Harbecke B, Heinz B, Grosse P. Applied Physics A, 1985, 38(4): 263.
- [13] Zhang X, Liu H, Zhang Z G, et al. Scientific Reports, 2017, 7: 41858.
- [14] Gunde M K. Physica B-condensed Matter, 2000, 292(3): 286.

Study on the Space and Anisotropy of Phonon Thermal Radiation in Metal/Dielectric Thin Films

DONG Xin, ZHANG Xia, SUN Xue-bo, YUAN Shuang-xiu, XU Hui, SU Fu-fang*

School of Physics and Physical Engineering, Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology, Qufu Normal University, Qufu 273165, China

Abstract Based on the approach to combine theory, experiment and simulation, this paper highlights the space and anisotropy of phonons thermal radiation utilizing metal/dielectric (MD) structure. Phonons, the elementary excitation characterizing the vibrations of lattice, are the eigenstates of materials. Albeit phonons controlled difficultly, the couplings between phonon modes and other photonic excitations enable exotic optical phenomena. Notably, surface phonon polaritons (SPhP) emanate from the coupling between phonon modes of polar dielectrics and photons in the infrared to terahertz. SPhP is featuring tight electromagnetic field confinement, low optical loss, and complementary to those provided by plasmon polaritons, facilitates access to deep subdiffraction optics. Firstly, the paper theoretically analyzed phonons absorption based on the Huang-kun equation and superlattice continuous dielectric model to further understand the internal theoretical foundation of phonons absorption. Experimentally, the research object we took into account was SiO₂ phonons, and then, the 500 nm-thick SiO₂ thin films respectively were synthesized on Si/Al(150 nm) thin films and Si substrate utilizing plasma chemical vapor deposition(PECVD) approach. The thermal radiation spectra were obtained at normal angle, which fourier transform infrared (FTIR) implemented. Phonons thermal radiation spectra in MD structure and in the non-MD structure were compared by analysing thermal radiation spectra and simulation spectra calculated by finite-difference time-domain (FDTD), demonstrating that MD structure was more conducive to stimulate phonons and SPhP. Longitudinal optical (LO) phonons emerge merely at oblique-incident in accordance to Berreman effect. LO phonons was obviously non-radiation due to the thermal radiation spectra obtained at normal- incidence. However, it made a difference on the liner-shaped of transverse optical (TO) phonons. What's more, from the metal(Si/Al)/dielectric(SiO₂ thin films) thermal radiation angle diagram of two kinds of polarizations, we could observe that the SiO₂ phonons in Si/Al/SiO₂ thin films abided by Lyddano-Sachs-Teller (LST) relation, LO phonons and TO phonons appeared in pairs, and the spatial radiation characteristic of the two phonons differed. In addition, the difference between the phonons modes appearing under S polarization and under P polarization existed, verifying the spatial anisotropy of phonons. Especially, the coupling of phonons and photons could stimulate SPhP, in turn, SPhP could enhance the absorption of phonons. Strikingly, the phonon modes and SPhP enable to be stimulated and tuned based on MD structure, which set the stage for the implementation of these appealing concepts in infrared optical devices.

Keywords Surface phonon polaritons; Thermal radiation; Polarization; SiO₂

(Received Aug. 3, 2020; accepted Dec. 26, 2020)

* Corresponding author