

126-130

# 固体反射光谱的挖孔机制\*

## ——红外吸波材料机理探讨之三

戴松涛

(清华大学现代应用物理系, 激光单原子探测开放研究实验室, 北京, 100084)

张光寅<sup>†</sup> 张存洲

(南开大学物理系, 天津, 300071)

TN213

**摘要** 深入研究了固体反射光谱红外活性模剩余反射带短波边对介电常数变化的敏感性, 并在此基础上研究了强弱振子介电耦合对反射光谱的影响, 发现在一定条件下可以在强振子的剩余反射带内形成局部的低反射率频域。

**关键词** 挖孔, 反射光谱, 剩余反射带。

红外吸波材料

### 引言

选择高频介电常数低的材料及多孔材料可以增宽固体反射光谱中剩余反射带纵频率以上频段的低反射率区<sup>[1~4]</sup>, 有利于红外吸波, 但在其反射光谱中仍存在一定频域的具有高反射率的剩余反射带, 如果能使这一频段的反射率降低, 则可使红外吸波波段进一步拓宽, 此外, 有些光谱选择性材料也需要在其反射光谱的高反射率背景中形成局部的低反射率频域<sup>[5,6]</sup>, 我们把这种在反射光谱的高反射率背景中造成局部频域的反射率降低的现象称为光谱挖孔。

本文基于我们对固体反射光谱敏感性的研究<sup>[6~14]</sup>, 提出一种光谱挖孔机制, 即在反射光谱的敏感频段加入新的振动模, 通过介电耦合实现光谱挖孔。

### 1 固体反射光谱敏感性

固体反射光谱的敏感性是指: 一个反射带受到一个弱振子的迭加作用时, 其谱带形状会发生变化, 这种变化随着弱振子横频率的不同差别很大, 当弱振子的横频率位于某些特殊频段时, 变化异常灵敏, 这种敏感性可用反射率  $R$  对介电常数实部  $\epsilon_r$  与虚部  $\epsilon_i$  的偏微商  $\frac{\partial R}{\partial \epsilon_r}$  和  $\frac{\partial R}{\partial \epsilon_i}$  定量描述<sup>[6,12]</sup>。从固体材料的复介电常数  $\epsilon = \epsilon_r + i\epsilon_i$ 、复折射率  $N = n + ik$  与反射率的普遍联系出发, 可以导出  $\frac{\partial R}{\partial \epsilon_r}$  和  $\frac{\partial R}{\partial \epsilon_i}$  的解析表达式<sup>[7]</sup>为

\* 清华大学理学院科学研究基金资助项目, 编号 95-12  
本文 1996 年 11 月 19 日收到

$$\frac{\partial R}{\partial \epsilon_r} = \epsilon_r F(n, k) - G(n, k), \quad (1a)$$

$$\frac{\partial R}{\partial \epsilon_i} = \epsilon_i F(n, k). \quad (1b)$$

其中

$$F(n, k) = \frac{3n^2 - k^2 - 1}{n(n^2 + k^2)[(n+1)^2 + k^2]^2}, \quad (1c)$$

$$G(n, k) = \frac{n^2 + k^2 + 1}{n[(n+1)^2 + k^2]^2}. \quad (1d)$$

应用式(1)具体分析固体反射光谱的敏感性时,要根据具体的介电函数  $\epsilon(\omega)$  计算  $\frac{\partial R}{\partial \epsilon_r}$  和  $\frac{\partial R}{\partial \epsilon_i}$  的频谱,其极值点附近的频域即反射光谱的灵敏区。

下面考虑固体红外活性的单一振动模,由洛仑兹振子模型<sup>[11,15]</sup>,固体复介电常数的实部、虚部与频率  $\omega$  的关系为

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \frac{S\omega_0^2(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2\omega^2}. \quad (2a)$$

$$\epsilon_i = \frac{S\omega_0^2\omega\gamma}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2\omega^2}, \quad (2b)$$

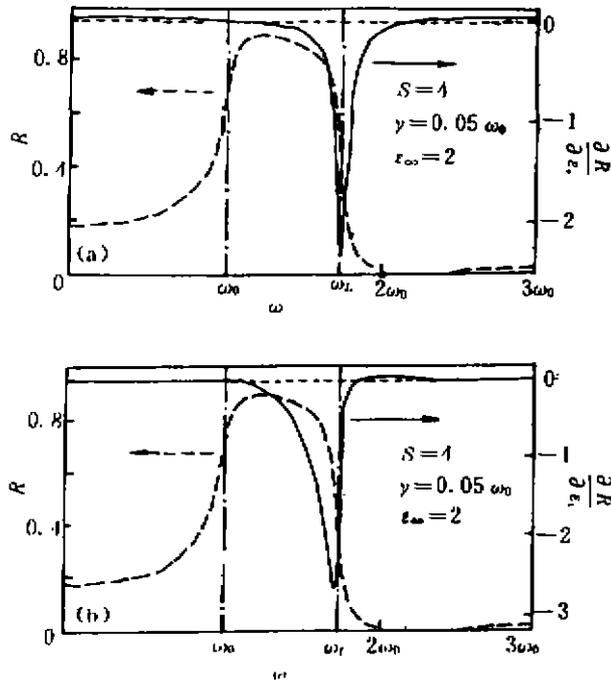


图 1 红外活性模反射光谱的敏感性

(a)  $\frac{\partial R}{\partial \epsilon_r}$  的频谱, (b)  $\frac{\partial R}{\partial \epsilon_i}$  的频谱

Fig. 1 Sensitivity of the reflection spectrum of infrared active mode

(a)  $\frac{\partial R}{\partial \epsilon_r}$  spectrum, (b)  $\frac{\partial R}{\partial \epsilon_i}$  spectrum

其中  $S$  为振子强度,  $\omega_0, \gamma$  分别为该振动模的横频率与阻尼常数,  $\epsilon_\infty$  为高频介电常数. 由式(2)可进一步求得  $n, k$  的频谱及  $R$  的频谱(即反射光谱)<sup>[11]</sup>, 然后将相关量代入式(1), 即可获得  $\frac{\partial R}{\partial \epsilon_r}, \frac{\partial R}{\partial \epsilon_i}$  的频谱. 图 1 给出典型计算结果, 为对照起见, 还给出了反射光谱(虚线). 从图 1 可看出:  $\frac{\partial R}{\partial \epsilon_r}, \frac{\partial R}{\partial \epsilon_i}$  都在反射光谱剩余反射带纵频率  $\omega_L$  ( $\omega_L = [(S + \epsilon_\infty)/\epsilon_\infty]^{\frac{1}{2}}\omega_0$ ) 附近有一个负峰, 在远离  $\omega_L$  处接近于零. 这说明剩余反射带短波边对介电常数的变化具有异常敏感性。

如果在  $\omega_L$  附近使  $\omega_r$  和  $\epsilon_r$  有一个小的增量  $\Delta\epsilon_r$  和  $\Delta\epsilon_i$ , 则会产生  $R$  增量

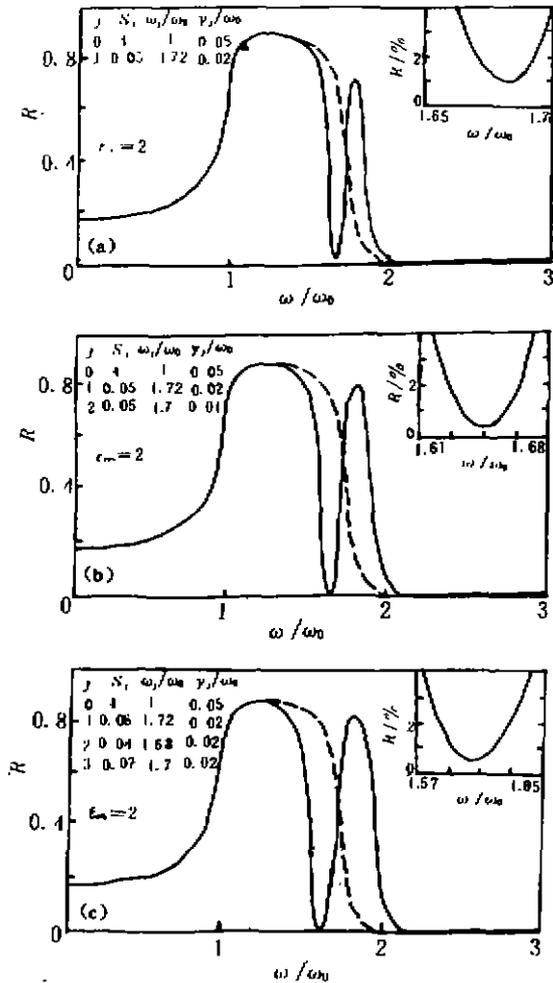


图2 强弱振子介电耦合引起的光谱挖孔  
(a) (1+1), (b) (1+2), (c) (1+3)

Fig. 2 Spectrum hole-digging caused by a dielectric interaction between strong and weak oscillators

弱振子的横频率  $\omega_j (j=1, 2, \dots, m)$  选在靠近  $\omega_L$  的频域. 计算结果表明, 强弱振子介电耦合可以产生光谱挖孔效果. 图 2 给出典型计算结果, 其中虚线代表强振子反射光谱, 实线代表强弱振子介电耦合的反射光谱, 右上角的插图为放大的孔底处反射光谱. 由图 2 可知, 当弱振子的横频率位于强振子的纵频率附近时, 适当选择弱振子的其它参数, 可以在强振子的剩余反射带内挖出具有极低反射率的孔; 适当增加弱振子的数目, 可以使孔增宽, 亦即增加红外吸波带宽.

### 3 讨论

我们认为强弱振子的介电耦合可以通过复合材料来实现. 考虑多种材料的精细复合: 即某一种材料成分较大(称为基本材料), 另几种材料成分较小(称为辅助材料), 辅助材料分

$$\Delta R \approx \frac{\partial R}{\partial \epsilon_r} \Delta \epsilon_r + \frac{\partial R}{\partial \epsilon_i} \Delta \epsilon_i, \quad (3)$$

而  $\frac{\partial R}{\partial \epsilon_r}, \frac{\partial R}{\partial \epsilon_i}$  在  $\omega_L$  附近又是一个绝对值很大的负数, 这必将引起反射率  $R$  有很大变化, 若  $\Delta \epsilon_r > 0, \Delta \epsilon_i > 0$ , 则  $\Delta R < 0$ . 即在纵频率附近使介电常数的实部和虚部的变化为正数, 可以引起反射率下降. 这启发我们利用强弱振子的介电耦合来实现光谱挖孔.

### 2 强弱振子介电耦合引起的光谱挖孔

一个强振子与  $m$  个弱振子同时存在(简记为  $(1+m)$ )时, 总的介电函数可表达为<sup>[1]</sup>

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \sum_{j=0}^m \frac{S_j(\omega_j^2 - \omega^2)\omega_j^2}{(\omega_j^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma_j^2}, \quad (4a)$$

$$\epsilon_i = \sum_{j=0}^m \frac{S_j\omega_j^2\omega\gamma_j}{(\omega_j^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma_j^2}, \quad (4b)$$

下标  $j=0$ , 为强振子的序号,  $j=1, 2, \dots, m$  为弱振子的序号, 式(4)中各量的含义同式(2).

将式(4)代入反射率计算公式<sup>[1]</sup>, 可得到强弱振子介电耦合的反射光谱. 由于在强振子的纵频率  $\omega_L$  附近反射光谱对介电常数的变化最敏感, 所以我们把

散在基本材料中.当该复合材料的不均匀线度远小于入射光波长时,对这种光来说,可视其为均匀的各向同性介质,其有效介电常数可近似看成是各组分介电常数按体积的加权平均<sup>[2]</sup>.若基本材料和辅助材料在某一波段均含有红外活性模,则该复合材料的有效介电常数等效于强弱振子的介电耦合,即可写成式(4)的形式.

#### 4 结论

一个强的洛仑兹振子在其纵频率附近具有异常的反射光谱敏感性,这使得弱振子叠加在该敏感区时,将导致该频域的反射率明显地降低,形成有利于红外吸波的光谱挖孔.这种强弱振子的介电耦合可以通过复合材料来实现.

**致谢** 感谢清华大学陈庭廷教授对本工作的帮助和支持.

#### 参考文献

- 1 张光寅,戴松涛,张存洲. *红外与毫米波学报*,1993,12(2):144
- 2 张光寅,戴松涛,张存洲,等. *红外与毫米波学报*,1995,14(4):283
- 3 张光寅,戴松涛,张存洲. 见: *第六届全国凝聚态光学性质学术会议文集*,贵阳,1992:79
- 4 张光寅,戴松涛,张存洲,等. 见:张存洲,熊光楠,张光寅编辑, *凝聚态光学性质研究进展*,天津:南开大学出版社,1994:171
- 5 戴松涛,张光寅,张存洲. 见:陈良尧,褚君浩,邬建根编辑, *凝聚态光学性质的研究和进展*,上海:复旦大学出版社,1998:83
- 6 戴松涛. *博士论文*,南开大学,1993
- 7 戴松涛,张光寅,张存洲. *物理学报*,1994,43(9):1393
- 8 戴松涛,张光寅,张存洲. 见:张存洲,熊光楠,张光寅编辑, *凝聚态光学性质研究进展*,天津:南开大学出版社,1994:170
- 9 张光寅,王宝明. *物理学报*,1984,33(9):1306
- 10 王宝明,张光寅. *红外研究*,1983,2(2):97
- 11 张光寅,蓝国祥. *晶格振动光谱学*,北京:高等教育出版社,1991
- 12 张存洲,张万林,张光寅. *红外研究*,1984,3(3):216
- 13 曾文生,张贵忠,李增发,等. *红外研究*,1990,9(3):199
- 14 张存洲,张万林,张光寅. *红外研究*,1984,3(4):253
- 15 Lorentz H A. *The Theory of Electrons*, Teubner, 1909
- 16 沈学础. *半导体光学性质*,北京:科学出版社,1992
- 17 莫 党. *固体光学*,北京:高等教育出版社,1996

**HOLE-DIGGING MECHANISM OF SOLID REFLECTION SPECTRUM**  
— **EXPLORATION OF MECHANISMS FOR INFRARED**  
**WAVE-ABSORBING MATERIALS ( I ) \***

Dai Songtao

*(Laser Single Atom Detection Laboratory, Department of Modern Applied  
Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)*

Zhang Guangyin Zhang Cunzhou

*(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)*

**Abstract** On the basis of the thorough investigation of the sensitivity of solid reflection spectrum for dielectric constant fluctuations on the short-wave side of reststrahlen band of infrared active mode, the influence of dielectric interaction between strong and weak oscillators on reflection spectrum was studied. It was found that under certain conditions, a local low-reflectivity region can be formed within the reststrahlen band of a strong oscillator.

**Key words** hole-digging, reflection spectrum, reststrahlen reflection band.

---

\* The project supported by the Foundation of Science College of Tsinghua University