

物性的光散射研究

张鹏翔

(中国物理学会光散射专业委员会)

一、光散射原理和提供的物性信息

一束射入物质的光，就是一根探针。当光再从物质中走出时，便携带了有关物质的各种信息。折射、反射、吸收等常规光测量，提供了关于物质的许多宏观信息。然而，最丰富的更深层次的信息，是光与物质发生非弹性散射时携带出来的^[1]。从粒子碰撞的角度最容易理解光散射的原理。光束由光子组成，光子具有能量 ω 、动量 \mathbf{K} ，当它进入物质时，就和物质中激

发的量子——元激发(准粒子)发生碰撞，进行能量和动量的交换。大量研究已经使人们确信，物质中存在着许多种元激发，例如物质中原子的热振动就是一种最常见的元激发，它可以用声波及其量子声子描写。类似的还有磁振子(又称自旋波，是磁性的或自旋系统中的元激发)、等离激元、极化激元等。这些元激发都是有能量 $\hbar\Omega$ ，有动量 \mathbf{q} 的准粒子。一般都可以与光子发生碰撞，并遵守能量、动量守恒定律(参见图 1)：

$$\omega_{散} = \omega_{入} \pm \Omega, \quad (1)$$

$$\mathbf{K}_{散} = \mathbf{K}_{入} \pm \mathbf{q}. \quad (2)$$

由此不难看出，如果入射光的频率 $\omega_{入}$ 和标志光子动量的 $\mathbf{K}_{入}$ 已知，实验上再测出散射光的频率 $\omega_{散}$ 及其动量 $\mathbf{K}_{散}$ ，人们便立刻得到了物质中与光相互作用的元激发能量 $\hbar\Omega$ 、动量 \mathbf{q} 。几乎物质中元激发的所有性质，以及物质本身的性质都可由此导出，并加以研究。

图 2，图 3 都是实验记录下来的散射光谱，不难看出，散射光所携带的信息不只限于元激发的能量、动量。有关散射截面的理论分析表明，散射光的强度，除与入射光强成比例之外，主要由两个因素决定：(1)参与散射的元激发的强度(功率谱)；(2)该元激发与光的耦合强弱。分析散射光强度便可以提供相应的信息。例如参与散射的是热激发的声子，则人们可以预料，当样品温度升高时，热声子数目多，散射强度会大。实验上人们的确据此测量了“声子的温度”。同样温度下，同样是声子的散射，不同物质组成，声子散射强度可能不同，这就是物质光弹耦合强弱不同引起的。据此人们可以测量物质的光弹耦合系数。

散射峰的形状(线型)，也带有物质的信息。

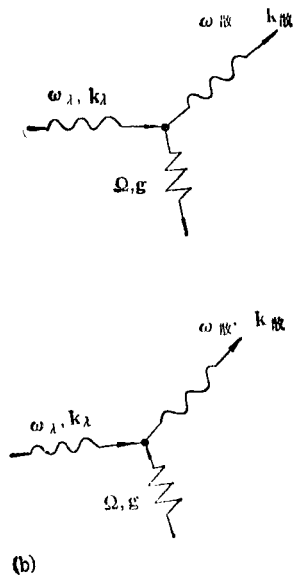
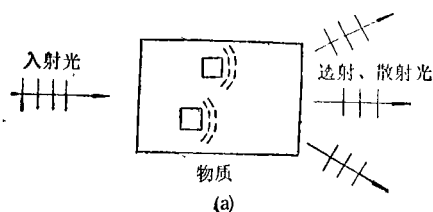


图 1 光散射过程

通常非弹性散射峰具有洛伦兹(Lorentz)线型,这是由导出元激发振幅的运动方程决定的,其谱线宽度,则与该元激发的“寿命”有关。元激发产生后,通过与其他激发、物质中的缺陷等相互作用而转化、死亡。所以,研究线型、线宽和磁共振实验中测量共振线宽一样,可以提供相应元激发的弛豫机制、弛豫过程方面的信息。

晶体的对称性、分子的对称性、元激发的激发方式也会反映到散射光谱中来。这是对散射截面研究的结果。入射、散射光的方向,偏振不同时散射谱会发生改变,即在某一散射配置下出现一些模式而另一种配置下可能出现不同的模式。因此,人们可以借助光散射研究晶体、分子的对称性及其变化,例如相变研究、铁电体中软模的研究等。

表 1 归纳了光散射实验中各个可测的实验参数和相应的信息,可供参考。

表 1

散射光参量	信息
频移	固体中各种元激发的能谱、分子振动谱、电子能级、杂质或缺陷能级
波矢	各种元激发传播的方向、动量
强度	元激发的强度、元激发与光的耦合强弱(光弹耦合常数、磁光耦合系数等)
线型线宽	元激发的性质、寿命、阻尼、弛豫
选择定则偏振	元激发(晶体、分子)的对称性

下面我们给出几个例子,看看光散射研究可以给出的信息,以及这些信息可以用在哪些方面。

图 2 是电子工业中最常用的半导体 Si 的喇曼散射谱^[2]。图 2 中(a)的几条线是单晶 Si 在不同温度下的散射。分析后可知:(1)它们是横光学支声子和纵光学支声子引起的散射,两种声子频率相同,因此只有一个散射峰,这种声子的“能量”位于 520 cm^{-1} 。不同温度下,散射峰的宽度不同。说明低温下线宽窄,这些声子在低温下和其他激发、缺陷相互作用少,“活得长”,而高温下则寿命短。图中(b)是从非晶态 Si 膜上得到的谱,它与单晶硅很不相同。因此,

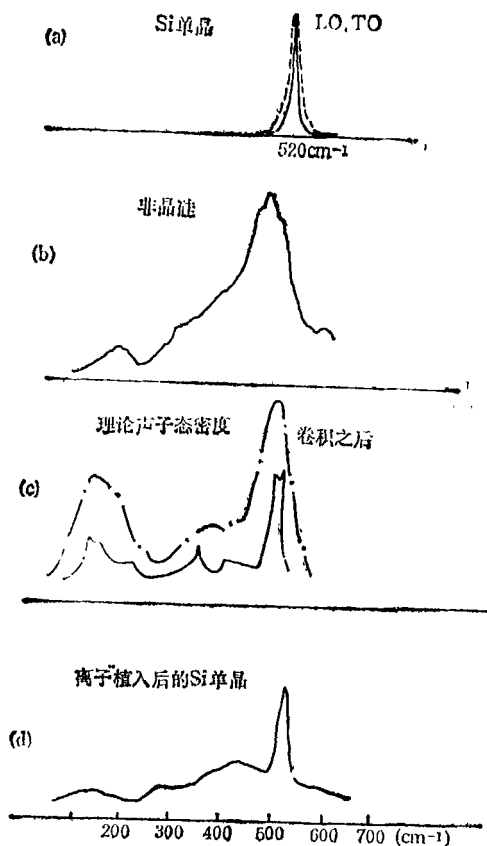
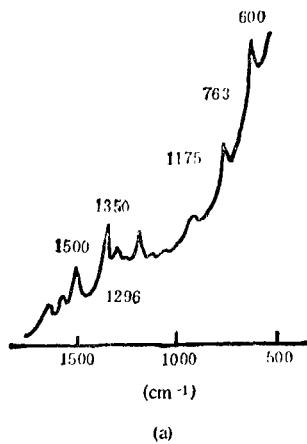


图 2 各种 Si 材料的喇曼散射谱

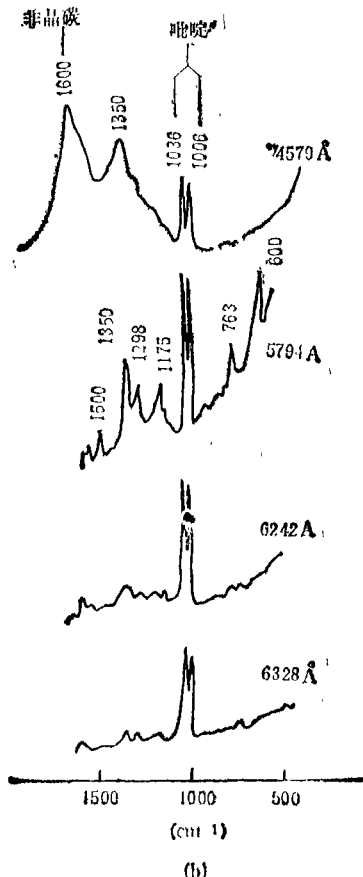
不管原因如何,实验上人们可以用喇曼散射区别一个 Si 材料,是晶态还是非晶态。图中(c)是一个理论研究的 Si 中光散射结果,是按 Si 中不同能量下的声子可能数目(即态密度),得到的散射谱(虚线是经过仪器线宽的卷积处理后的结果)。图中(c)和(b)的大致类似,说明在非晶态材料中声子的喇曼散射谱代表了或者说提供了关于声子态密度方面的信息。(d)是从经过离子注入处理后的单晶硅上得到的散射谱。这个谱象是(a)谱和(b)谱的叠加。经过离子注入的 Si 表面形成了很薄的一层非晶层,而这一层下面的 Si 还是晶态的,因此散射中光和这两部分 Si 都起了作用,散射谱便是这两者的叠加。不同波长的激光在 Si 中可以走的距离不同(光吸收不同),因此得到的(d)谱也会不同,这样人们实际上就可以研究 Si 材料的不同

同深度下的性质。

图 3 是从胶体 Ag 颗粒表面上得到的喇曼



(a) 邻硝基苯甲酸在 Ag 胶上的 SERS 谱;



(b) 共吸附于 Ag 胶上的三种物质的 SERS 谱
(非晶碳、吡啶、邻硝基苯甲酸)

图 3 SERS 共吸附谱

谱^[3]。分析表明, Ag 胶体颗粒上的物质分子可能有几种,而且大约只在 Ag 的表面上铺了一个单分子层。因此用许多其他的方法是很难知道这是些什么元素、什么分子的。然而,通过比较和分析表面增强喇曼谱,我们知道这是吡啶、邻硝基苯甲酸和非晶碳的散射谱叠加,原因是散射谱中的各峰是由这三种物质单独光散射谱组成的。这样,我们就识别了在 Ag 颗粒表面上的极其微量的几种分子。当然,它们在不同激光波长散射中相对强度很不一样;这实际上是三种物质在 Ag 胶体颗粒上吸附状态不同造成的。因此,除了进行物质的识别之外,光散射在这一情况下,还能得出物质分子和金属 Ag 表面之间的相互作用(吸附)信息。

下面例子将是很简单明了的。在某个部队的军械仓库里丢失了一批武器,公安人员在屋顶被扒开的洞口附近,发现有一小根棉布纤维挂在洞口的小钉子上,这是罪犯留下的唯一物证。专家们做了远红外光吸收或者喇曼散射光谱(注:这两种方法是类似而又互补的),结果从光谱上立刻查清这是一种涤纶纤维,从而为寻找罪犯提供了线索,而且罪证本身,这根小小的纤维,也没有因为要“被分析”而被破坏。类似的例子很多,例如名画真伪的判别,古董的鉴定,矿物的分析等,激光散射法都能发挥它的作用。

光束可以进入空气中、溶液中、控制温度的杜瓦瓶内(从液氮到上千度的高温),或者特殊设计的高压容器(高达几百千巴)里。只要光能到达的地方,我们就可以用激光散射法。还有人在培养晶体的单晶炉上使用过这种技术。显然,在一些工业生产线上很快也会用光散射的设备进行实时监控。和一般分析测量手段(如电子探针、离子探针、X 光、化学分析等)相比,光子这个探针的一个优点就是对被研究、监测的环境要求低,可以进行原位(in situ),实时实地测量。

激光散射的另一个优点是无接触的(光的接触)和非破坏的。除了会发生光化学、光物理过程的物质之外,光散射测量是非破坏性的,前

例中对罪犯的衣服纤维分析,已经说明了非破坏的重要性。

第三个优点是,它提供的信息是“分子水平”的。我们知道X光法提供以“原子”的电子壳层为特征的信息,电子探针、离子探针等等也类似。也就是说,它们提供的信息是物质中有哪些原子的特征X光谱、电子探针谱等,对了解这些原子之间是怎样结合的,就无能为力了。光散射中的喇曼散射是光与物质分子中原子之间的振动产生的非弹性散射,而分子中原子的一系列振动,对于分子来说是有分子自己的特点的,换句话说,不同的分子有不同的特征振动谱。这样根据喇曼谱就可以识别不同的分子,我们前面举的第二个例子就是这种情况,所以说光散射提供信息的水平是“分子水平”的。这在许多情况下是难得的,非常关键的。例如,在一个化学反应中间,可能生成了一些更有用的物质分子、准分子,人们还没认识,怎样测出来呢?可能由哪些原子组成,是清楚的,要知道的是原子之间的结合、分子的构成,用光散射就很方便了。

光散射测量研究物质的第四个特点是综合性。凡是可以和光发生散射的元激发,都可以同时地反映到散射谱上来。我们举的第二个例子就是同时三种分子的特征散射谱(我们只得出了谱的一段),都在散射中一次出现了。这些还都是分子振动谱。其实不同种类的元激发也会同时出现的。图4就是一张从金属超晶格(成分调制膜)材料上得到的激光布里渊散射谱。(a)谱和(b)谱分别是有检偏器时得到的谱,理论证明:当检偏器与起偏器偏振设置相同时,得到的是声子散射谱;而两者成 90° 放置时得到的是磁振子谱。测量时若不加检偏器得到的便既有声子散射,也有磁振子(自旋波)的散射。而声子谱中又同时测到了表面声波和界面声波(sezawa wave),后者实际上是一种新的声子模式,用光散射的方法最近才发现的^[4]。磁振子谱也可同时测到表面磁振子、体磁振子的散射。还应指出的是,这些声子、磁振子、分子振动等激发,并不是由人为外界产生的,而是“热”

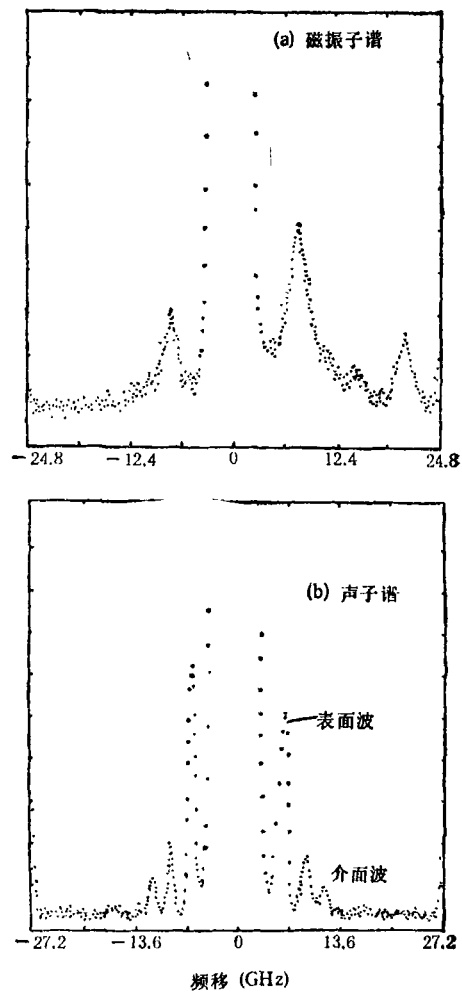


图4 金属超晶格(Fe-Pd)的布里渊散射谱

激发的。只要不是绝对零度,就可以测量。这也就给人们的研究带来了极大的方便。当然,人们也可以人为地外界有意识激发起各种元激发,那样又会有更确定的其他信息提供出来。

由于光散射的这些优点,使得它被广泛地用在各种研究、生产领域中。在化学(有机、无机、高分子、物理化学)、生物学、物理学、医学、材料科学、矿物学等方面都受到极大的重视。

二、仪器设备和分类

光散射得到广泛的应用是在激光问世以后。激光的问世和光谱仪器的迅速发展,为光

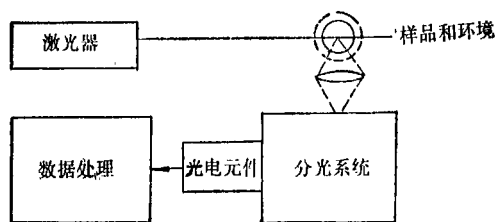


图5 光散射谱仪

散射实验提供了物质基础。激光的单色性(能量单一)、准直性(动量单一)和它的高亮度,为光散射提供了实验条件。由图5所示的光散射谱仪,可以方便地按(1)和(2)式得到基本的散射信息。

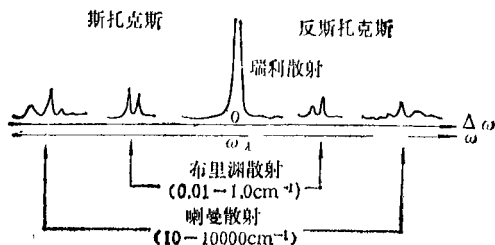


图6 光散射谱分类

典型的光散射谱及其分类如图6所示。以入射光频率 ω_0 为界,散射光频率增加的散射称为反斯托克斯(Stokes)散射,这是入射光“吃掉”元激发,能量增加后的散射光。散射光频率减少的称为斯托克斯散射,这是入射光在介质中“产生”元激发,使自己能量减小的散射。按照相对入射光频率的频移区分,频移近似等于零的称为瑞利散射(RLS),频移稍大(0.01—0.1 cm^{-1})的称为布里渊散射(BS),频移更大的(10—10000 cm^{-1})称为喇曼散射(RS)。所以叫这几个名字,是相应的科学家最早发现研究了这些散射。瑞利(L. Rayleigh)最早研究了天空呈蓝色的原因^[9],并导出了散射光强与光频率 ω 的四次方成正比的关系。太阳光是白光,包括红、橙、黄、绿、蓝、青、紫各种颜色,波长短、频率高的蓝、紫光在天空中穿过时散射强度大,因此,天空总是呈美丽的浅蓝色。这种散射并不使光的频率改变,称为瑞利散射(RLS)。后来布里渊(L. Brillouin)研究了液体中声波对

物理

光的散射^[6],发现散射光中会有频率变化的成分。这在光散射研究史上是新的里程,人们开始认识到散射光对入射光可以有频移。这种散射被称为布里渊散射(BS)。1928年印度科学家喇曼(C. V. Raman,)发现分子的振动也会引起带频移的散射光^[7],频移大小是分子振动频率。借此人们可以方便地按散射谱识别分子,象按“指纹”识别人一样。这一散射后来称为喇曼散射(RS)。喇曼因此而获得了1930年的诺贝尔物理奖。那时人们对这些散射的理解是狭窄的。现在,用量子力学的语言,从粒子碰撞模型看,这些过程是统一的,这些射散之间的物理差别也不那么截然了。有时人们说喇曼散射时也包括了布里渊散射和瑞利散射。当然,区别还是存在的,命名则主要根据使用的仪器。

三、光散射的重要分支和应用

这里我们只对主要分支作简略介绍(参见图7)。

1. 共振散射^[8]

前面我们形象地用粒子碰撞描述了光散射过程,从微观的角度还可以用能级跃迁的图象描述光散射。处于基态的电子被入射光激发到中间态上(中间态可以是实能级也常常是虚能级),然后再落回到一个基态的振动激发态上,这时发出散射光并产生一个振动(或元激发)。可以想象当入射激光频率和基态与激发态的能级差相等时,散射光的强度会成数量级的增加。严格理论也的确给出了散射截面与入射光频率的共振关系,因此这时发生的散射就被称为共振散射。共振散射也有共振喇曼散射(RRS)、共振布里渊散射(RBS),共振瑞利散射等多种。散射强度的增加当然使实验变得简单,弱的信号更容易测出。除此之外很重要的一点是发生共振散射时,物质中的电子被激发到某一实能级上,而不同激发态能级上的电子与声子(或其他元激发)的相互作用不同。这样通过调谐激光波长,使共振散射发生在不同能级上,就可以研究相应能级下的电子-声子(或其他元激发)

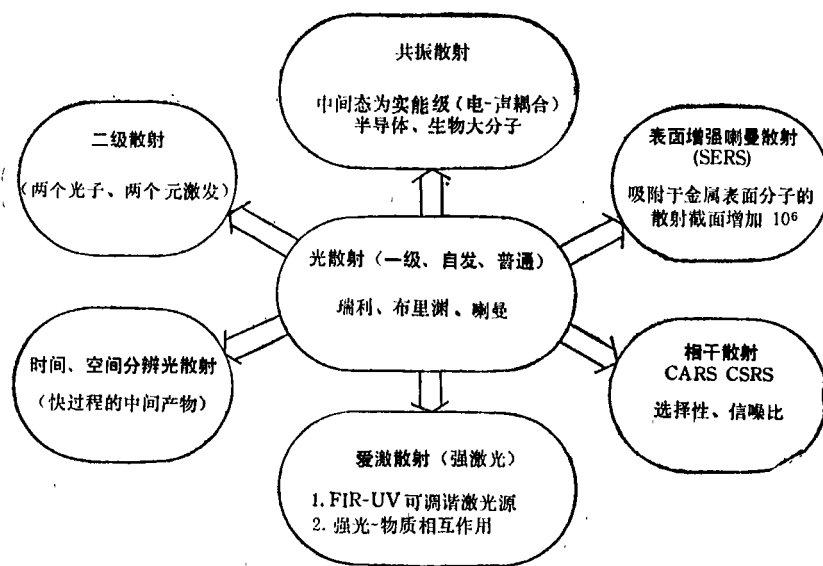


图7 光散射分支

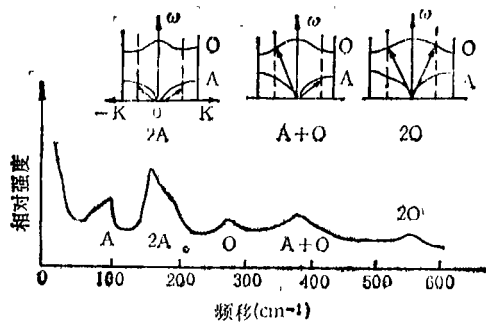


图8 带缺陷的GdS单晶的喇曼谱

耦合。这些更为细致的信息用其他方法是很难得到的。目前在半导体研究中就广泛地采用共振喇曼技术,并取得丰富的成果。此外许多有机大分子如蛋白质、核酸等研究中也常用共振喇曼获取信息。

2. 二级散射

在(1)和(2)式中我们均假定入射光子和一个元激发发生碰撞。为什么不可以有两个甚至更多个元激发一起和入射光作用呢?如果是这样又会有那些新的信息呢?事实上,实验上的确发现了两个元激发(两个声子)同时和光子碰撞的过程。图8就是GdS样品的喇曼散射谱。除声子(A)和光声子(O)的一级散射外,还

有些奇怪的峰,分析表明,其频率分别为A, O声子频率的组,因此是二级散射。由于两个元激发同时和光子相互作用,动量守恒的要求可以在整个布里渊区内满足(而一级散射中仅限于布里渊区中心千分之一的范围)。参加散射的元激发也扩大到整个布里渊区。这自然又提高了信息量。记录到二级散射的条件是:(1)元激发的数量多,这样发生光与两个元激发同时作用的机会才大;(2)记录系统的灵敏度高。

3. 受激散射

这是强激光照射物质时发生的散射过程。当强激光进入物质时,会将许多电子激发到某一能级,形成占位数反转。这时若有一自发辐射,就会感应其他电子也跃迁到基态的振动激发态上。这时出现的散射光是方向性强、亮度大的相干辐射,这种相干辐射有时是一系列等间距的散射光(间距为某一振动态能量)。受激散射也有受激瑞利(SRLS)、受激布里渊(SBS)、受激喇曼(SRS)等几种。这些散射不仅提供强光和物质相互作用的信息,产生的相干散射光的质量更好,因此是产生可调谐激光的新方法。通常的散射光比入射光弱几个数量级,而受激散射发出的光可以很强,转换效率可达20—

60%。国内外都已用这种方法产生了从远红外到紫外的脉冲激光,已经有了商用产品。

4. 时间和空间分辨散射

物理、化学过程的中间状态一直是人们关心的问题。当过程变化很快或者中间状态(可能是一系列的)持续时间很短(例如 10^{-15} s)时,要抓住中间产物,弄清它的物性,就不那么容易了,许多研究手段这时都显得无能为力了,而光散射则被证明是独具特色的手段。ps 和 fs 脉冲激光的发展以及 OMA(光学多道分析仪)这类检测方法的出现使一些极快的物理、化学过程能够用光散射法研究。加上前面提到过的光散射的优点,这一方法受到了广泛重视。例如,人们用时间分辨光谱研究了 GaAs 中电子-空穴对的光激发动态过程,分子晶体中声子的动力学过程,聚合过程,卤化银中激子的弛豫行为,溶液相中光化学反应的中间物的振动模式,光离化、光碎裂过程等。上述例子不都是普通散射的时间分辨测量。普通散射,在极短时间里只能给出很弱的信号,因此许多时间分辨测量都与各种能给出强信号手段联合起来,如时间分辨的共振喇曼散射(TR^3)、时间分辨的受激散射、时间分辨的 CARS 等。

利用空间分辨散射,通常是将入射、散射光路与显微镜装在一起,这样可以观测样品不同部位的散射谱,据此研究样品的组成和不均匀性等。这在矿物研究、材料科学中是不可缺少的。以目前研究、合成很多的液氮、室温超导材料为例,显然在目前的工艺水平上并非整块材料都是良好的超导体,那么不同部位的结构、成分就可以用空间分辨的喇曼光谱研究了。

5. 相干反斯托克斯喇曼散射(CARS)和相干斯托克斯散射(CSRS)

这是一种非线性的光散射过程。可以认为这是相干的入射光与元激发(如喇曼活性的振动模式)发生相干作用,从而发出相干的散射光的结果。实验上采用两束激光同时作用在物质上($\omega_1 > \omega_2$),其中一束可调,使 $\omega_1 - \omega_2 \rightarrow \Omega$ 。根据(1)和(2)式,对于 CARS 过程,以 ω_1 兼做探测光,则有

$$\omega_s = \omega_1 \pm (\omega_1 - \omega_2) = \begin{cases} \omega_1 + \Omega, \\ \omega_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_1 \pm (\mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2) = \begin{cases} \mathbf{K}_1 + \mathbf{q} \\ \mathbf{K}_2 \end{cases} \quad (4)$$

对于 CSRS,以 ω_2 兼做探测光,有

$$\omega_s = \begin{cases} \omega_1 \\ \omega_2 - \Omega \end{cases} \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_s = \begin{cases} \mathbf{K}_1 \\ \mathbf{K}_2 - \mathbf{q} \end{cases} \quad (6)$$

这种散射实际上是四波混频过程(两束入射、一束散射、一束元激发)。散射光的特点是:(1)强度大;(2)方向性好;(3)可以通过调谐一束入射光而有选择地与某一特定激发耦合。除信噪比非常高之外,可以有选择地研究相应能级(振动模式)上的特殊过程。这在一般光散射中是难于实现的。CSRS 中往往会有荧光干扰,所以 CARS 受到更多的重视,还出现了时间分辨的 CARS 技术。除用做一般研究外,已经用 CARS 于放电过程的诊断、燃烧过程中氢在火焰中的分布等很实际的题目上。

6. 超喇曼散射(HRS)

和 CARS, CSRS 类似, HRS 也是非线性的光散射过程,但它只用一束光(ω_1)入射,在倍频光($2\omega_1$)附近检测散射光。用量子力学的语言说,是同时湮没两个人射光子($\omega_1 \times 2$),产生(或消灭)一个元激发 Ω ,并在 $2\omega_1 \pm \Omega$ 的频率发出散射光的过程。超喇曼涉及的电子-模式(元激发)耦合参数 $\left(\frac{\partial \beta}{\partial Q}\right)_0$ 与 CARS 的 $\left(\frac{\partial \alpha}{\partial Q}\right)$ 不同。

它们有不同的对称性选择定则。因此,在一般喇曼散射中非活性的模式在 HRS 中可以是活性的、能够测量的。这一点是 HRS 的基本特点和长处。一般说来,所有红外活性模式也是 HRS 活性的,而红外、普通喇曼散射均为禁止的所谓“沉默”模式在 HRS 中也常常可以测到。这在某些情况下是需要的。

HRS 的信号往往很弱,这使它的应用受到限制,发展也较慢。利用共振散射的大散射截面可以部分地弥补上述不足。

7. 表面增强喇曼散射 (SERS)

Fleishmann, Jeanmaire, Albrecht 等人发现并确证, 当吡啶分子被吸附在适当氧化还原处理过的 Ag 电极表面时, 该分子的喇曼散射截面增加 10^6 ! 这一结果立刻在物理、化学、表面界面等研究领域引起轰动. 是什么原因引起这么大的散射增强? 哪些金属和哪些分子可以产生这一效应? 这个效应在表面探测、催化、电化学等研究中会有哪些应用? 这一系列问题立刻成了人们研究的热门对象.

目前除了电极表面之外, 人们还在超高真空系统中蒸镀的金属表面上、金属胶体颗粒表面以及普通金属板经过适当处理后表面上都进行了 SERS 实验. 这些不仅为研究 SERS 机制提供更多信息, 也为 SERS 的应用提供了更多的可能. 关于 SERS 的机制, 人们进行了大量研究, 提出了十几种理论模型. 目前较普遍的观点是, SERS 活性的表面往往产生被增强了的局域电场, 而分子在金属上的吸附也导致增强. 前者是物理的、长程的, 后者是化学的、短程的. 但是定量的理论还不成熟, 也有人持有很不相同的观点^[9,10]. 尽管理论上还在争论, 然而利用 SERS 的研究, 却同时多方面地开展起来了. 已经用这一技术研究了腐蚀、催化的中间产物、金属及热分解过程等, 并取得令人瞩目的结果.

SERS 的发展还证实, 不仅喇曼散射, SERS 活性的表面上二次谐波、荧光、光吸收都会发生增强, 因此又出现了表面增强光谱学 (SES)^[9].

上面简单地介绍了光散射的几个重要分支. 这里必须做两点说明: 第一, 还有一些光散射的分支是很重要的, 例如激发态下的光散射, 这里没有介绍. 再如倒(逆)喇曼 (IRS)、喇曼感生克尔效应 (RIKES) 等, 也是光散射新分支^[11,12]. 第二, 各分支之间不是独立的. 它们彼此之间相互渗透、交叉, 产生了更新更有效的物性研究手段. 除前面已提到的时间分辨共振喇曼 (TR³)、时间分辨受激光散射之外, 还有共振表面增强喇曼散射 (RSERS), 共振二级散射, 共振超喇曼散射等.

四、目前最活跃的新领域和新趋势

可以说, 上面说到的光散射各分支目前都还是相当活跃的. 其中以表面增强喇曼散射、共振喇曼散射和受激光散射为最. SERS 的机制还没有取得一致的认识^[9,10], 而它又有众多的可能应用, 因此受到各方面专家的高度重视. 除在光散射会议上有大量文章之外, SERS 也深入到一些专业(如电化学、表面、催化、量子光学、非线性光学)会议上.

在可见光光散射不断取得成果的推动下, 人们纷纷转向紫外光谱区^[13]. 许多物质分子的能级落在紫外, 很容易发生共振散射, 一些金属的表面或体的等离激元频率在紫外, 因而或许对 SERS 更有利. 大家知道, 在紫外光作用下可以发生分子的激发、电离、催化反应等, 用光去探测这些过程显然是方便的. 因此, 最近出现了紫外共振喇曼散射、紫外时间分辨喇曼散射等工作, 研究从固体到大分子、生物膜等对象. 紫外光散射研究还有一重要意义, 就是为利用同步辐射光源做各种研究准备物质的、理论的基础.

随着超短脉冲激光器的发展, 快速接收系统的完善(如 OMA), 人们能够研究的快过程的时间域越来越短, 就是说时间分辨率越来越高, 这种时间分辨光散射研究也是最活跃的领域之一. 时间域已经达到 ps 和 fs 量级, 为快速物理、化学过程提供了难得的信息.

在发展各种散射谱技术的同时, 人们也立刻应用这些技术到一些正在发展的新领域中. 例如, 喇曼散射的相当大一部分工作集中在蛋白质、核酸、酶、生物膜等生物介质上^[14], 其重要性和成果可从每届会议上看到. 在新材料研究中, 光散射不断取得重要结果, 如在半导体超晶格中发现布里渊区的折叠效应; 在金属超晶格(又称成分调制膜)中发现相干的磁振子(自旋波)激发, 声子的介面模式^[15], 平行、反平行磁化的双层磁膜中自旋波的新模式等^[12]. 可以说在非晶态材料、有机材料、气体、液体、等离子体的

(下转第 486 页)