

我国近年来光散射研究的进展

王 华 馥

(南开大学物理系,天津 30071)

本文介绍了近两年来我国在用拉曼散射和布里渊散射研究介电晶体、半导体、金属及半导体超晶格、高温超导体和磁性物质等方面的进展,以及表面增强拉曼和受激光散射研究的情况。

当光照射到物质时会发生散射,散射光中除与激发光波长相同的弹性散射(瑞利散射)外,还有比激发光波长长的(斯托克斯)和短的(反斯托克斯)非弹性散射,后一现象统称为拉曼效应。拉曼效应的频移(即散射光与激发光的频率差)表征了分子振动能量或固体中各种元激发的能量。非弹性光散射在实验上分为拉曼光谱和布里渊光谱。拉曼光谱用光栅进行分光,研究分子振动和固体中能量较高的元激发,如光学声子、电磁激元、电子激发和等离激元等(能量以波数表示,大致在 $10-3000\text{cm}^{-1}$)。布里渊光谱用分辨率高的法布里-珀罗干涉仪进行分光,研究凝聚态物质中能量相对低的元激发,如晶体中的声学声子,磁性物质中的自旋

有截然不同的两种表现,例如缩灭场几率分布就不一样,如图9所示。因此,有必要按静态特征将硬磁畴分为三类。这一新的分类法很快为国际同行所采用,而且具有重要的意义。因为这三类分别与不同的静态特性,不同的VBL数量及不同的互换关系对应,因此它对布洛赫线存贮器的存贮容量极限提出了估算的依据。中国科学院物理研究所关于VBL物理的研究成果,已被国际磁学学术刊物 *J. Magn. Magn. Mat.* 选为满100期纪念刊中的综述文章之一。

我们应该说明,本文仅选择了四个课题的进展作一介绍,而我国的磁学研究工作者在其他许多方面也做了很好的工作,在此不能一一列举。磁学的成就在历史上曾是中华民族的骄傲,有过灿烂的昨天,今天我们应再通过几代人

波(磁振子)等(频移在 $10-100\text{GHz}$ 左右)。拉曼散射还有一个新扩展的领域——非线性拉曼散射,如受激拉曼散射、超拉曼散射和相干反斯托克斯拉曼散射等。光散射研究涉及物理、化学、生物学、矿物学和材料科学等广泛领域,除基础研究及应用基础研究外,还可用于材料的评价,分析检测,以至于工业产品的质量的控制。

在拉曼效应发现(1928年)后不久,我国从30年代初期就开始对分子振动的拉曼光谱进行研究。由于拉曼散射效率较低,摄谱时间长,在以后的年代中,国内外拉曼光谱研究远不如研究同类问题的红外光谱那样普及。60年代初激光出现以后,有了高强度的激发光源,激光拉曼光谱研究才蓬勃开展起来。我国是从70年的艰苦努力,使明天重新放出光彩。

最后,我们感谢戴道生、杨应昌、王荫君、韩宝善和沈保根等同志提供的材料和所作的有益讨论。

- [1] J.W.Shih, *Phys.Rev.*, **38**(1931),2051.
- [2] Y.C. Yang et al., *J. Appl. Phys.*, **52**(1981),2077; **53**(1982), 1958.
- [3] H.Sun et al., *J. Magn. Magn.Mat.*, **87**(1990), L 251.
- [4] 杨应昌等,中国科学(B辑),**34-2**(1991),113.
- [5] Y.C.Yang et al., *Solid State Commun.*,**78**(1991), 317.
- [6] B.G.Shen et al., *Solid State Commun.*,**74**(1990), 893.
- [7] Y.J.Wang, *J.Magn. Magn. Mat.*,**84**(1990),39.
- [8] 方瑞宜等,物理学报,**40-5**(1991),833.
- [9] Y.Cao et al., *Synth. Metals*, **27**(1988),B625.
- [10] B.S.Han et al., *J.de Phys. C*,**8,49**(1988),1877.

代后期重新开始起步的,1981年成立了中国物理学会光散射专业委员会。十年来国内光散射研究水平大大提高,在各领域都做了许多工作,缩小了与国外的差距,有些出色的工作已接近国际研究的前沿。

关于我国光散射研究的历史及发展情况,周仲璧先生在中国物理学会第四届第二次理事会上已作了全面系统介绍^[1],这里不再重复。本文介绍近两年来我国光散射研究的一些情况,内容限于非弹性光散射(不涉及弹性散射),侧重于与物理有关的方面。

一、拉曼散射

拉曼光谱研究的对象可以是各种凝聚态材料,包括介电晶体、半导体、金属、超导体、准二维材料和液晶等,以及化学物质、溶液和生物物质等。

1. 介电晶体

我国在非线性光学晶体等研制方面居于世界前列,过去对这类晶体的拉曼光谱研究甚多,近两年来南开大学、山东大学等单位仍在继续这方面的工作。

值得注意的是离子性晶体的电磁激元(polariton)方面的工作,国外已研究多年,国内研究不多。中国科学院物理研究所进行了非线性光学晶体 KTiOPO_4 的电磁激元研究^[2]。上海交通大学研究了碱土氟化物离子晶体的表面电磁激元。北京工业大学也开展了这方面的工作。

2. 半导体

拉曼散射可以研究半导体中的电子激发,如局域化和非局域化单粒子散射和集体激发(等离子体激发)等,目前我国在这方面的工作较少,主要是研究晶格振动谱方面。

$\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{P}$ 混晶是有潜在应用前景的半导体材料,中国科学院半导体研究所研究了它的长波长声子谱,发现横模和纵模都有双膜行为,即具有类 GaP 和类 AlP 两个光学支^[3]。近年来在拉曼散射和发光研究中多声子效应受到越

来越多的注意,黄昆从理论上阐明了多声子拉曼散射的可能性。中国科学院长春物理研究所^[4]研究了 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 在不同温度下的共振拉曼重现谱,讨论了二级及多声子谱增强的散射机制。

拉曼光谱是评价半导体薄膜结构状态及质量的重要方法,近两年来进行了不少工作^[4],如复旦大学的离子注入激光退火 SOM 上的硅膜研究,华东师范大学的掺氧多晶硅薄膜的微结构研究,南京大学的难熔金属硅化物薄膜研究及微晶硅栅薄膜研究。近年来显微拉曼技术在国内已逐步开展,用聚焦的激发光束对微区进行拉曼光谱分析。中国科学院半导体研究所用此方法对嵌入 Si 衬底上的分子束外延 GaAs 层的微区进行了质量评价。 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 应变层合金型超晶格是一种新型的半导体材料,拉曼光谱在确定超晶格的应变方面是有效的方法。复旦大学从峰位、峰高及声子模式等方面全面分析了材料中的应力、应力分布及界面互混情况。

3. 半导体及金属超晶格

一维周期及准周期超晶格多层膜的声子低频元激发的光散射近年来国外研究较多。在国内南京大学做出了出色的工作^[5]。他们用拉曼散射研究了金属 Nb-Cu 和非晶半导体 $\text{Si}_1:\text{H}/\text{SiN}_x:\text{H}$ 超晶格在约化布里渊区内的折叠现象,界面无序活性声学模的散射及其软化,半导体非晶超晶格中类 TO 模由于界面无序导致的位移和增宽效应,观察到一维准周期 Fibonacci 金属和半导体超晶格中声子激发的自相似 Cantor-set 光谱。

中国科学院半导体研究所研究了混晶 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的双膜行为及 $(\text{GaAl})_n(\text{AlAs})_n$ 超晶格的限制模的基础上研究了 $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 超晶格的纵光学声子模的拉曼散射,观察到限制在 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 混晶层中的类 AlAs 的 LO 限制模。

4. 高温超导体

随着高温超导体材料研究的发展,北京大学^[6]、中国科学院物理研究所、南京大学、复旦

大学、中国科学技术大学和吉林大学等开展了钇钡铜氧和铋锶钙铜氧等材料的陶瓷、单晶和单晶薄膜的拉曼光谱研究,研究了杂质、元素替代、氧缺陷及温度等对声子谱的影响,得到了一些规律性的结果。由于高温超导理论仍在探索中,目前还很难从测得的声子谱中得出高温超导机制方面的结论。

南京大学用拉曼光谱首次发现 YBaCuO 超导体在超导转变温度之上的 $T_0 = 234\text{K}$ 有一结构相变,在 T_0 以下出现 644cm^{-1} 峰,对称性由 $Pmmm$ 变为 $Pmm2$,是与氧八面体旋转有关的相变^[7],这一发现引起了国际同行的重视。

5. 高压拉曼光谱

高压拉曼光谱是研究物质在高压状态下原子、分子和离子的相互作用及排列状态的重要手段,研究内容涉及拉曼活性模的压致效应,模格临爱森参数随压力的变化和压致结构相变等。由于小型金刚石对顶砧压机的不断改进,这方面的工作迅速发展。

吉林大学最早开展高压拉曼光谱研究,北京大学、中国科学院物理研究所也做了一些工作^[8]。近年来吉林大学^[9]对一系列分子晶体进行了研究,对谱线和模格临爱森参数的压致效应总结了变化规律。他们还对一些分子晶体、氧化物晶体和石墨层间化合物等进行了压致相变研究。由于使用了改进的压机,拓宽了压力范围,发现了一系列新的结构相变,并结合高压 X 射线结构分析确定了一部分新相的结构。高聚物聚戊二烯的压致效应及压致转变的研究工作做出了新结果。在超高分子量聚乙烯的高压拉曼光谱研究中发现了压致达维多夫劈裂和费米共振效应。

南开大学^[9]进行了非线性光学晶体 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ 和激光晶体 LnP_3O_4 (Ln 为 La 系元素) 的高压拉曼散射研究,发现了压致结构相变,研究了静水压对 CeP_3O_4 等的铁弹相变的影响,分析了软光学模的非简谐性及其与声学模的耦合。中国科学院半导体研究所^[10]在 77K 下测量了 $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ 混晶类 GaP 的 LO 模的压力行为,与 GaP 进行了比较。

物理

6. 化学、生物学、矿物学等方面的应用

拉曼光谱在这些方面的应用很广,国内一些大学的化学系、分析测试中心、中国科学院的一些化学研究所等单位都做出了不少成果,除见于各该专业学术刊物外,1990 年还举行了分子振动光谱学术报告会和光散射与生命科学讨论会。

二、布里渊散射

如前所述,布里渊散射在原理上也属于拉曼效应,但在方法上与研究对象上与拉曼散射不同。由于实验装置的特殊性及需要非常精细的调节仪器的经验,布里渊谱仪远不如拉曼谱仪那样普遍,国内仅有数家具有此装置。前期的工作主要集中在固体的弹性性质及其变化,近年来中国科学院物理研究所、同济大学、南京大学的研究工作已扩展到晶体相变、超晶格、磁性材料、薄膜和液晶等方面。

多层膜的布里渊散射是比较活跃的领域。南京大学^[11]研究了 bcc/fcc 金属超晶格多层膜的弹性反常,结合拉曼散射中的无序活性模的特征,解释了点阵膨胀效应,研究了周期和准周期 Nb-Cu 超晶格和非晶半导体 Si/SiN_x 超晶格的表面声学波传播特征。南京大学还用布里渊散射在铈酸钡钠晶体中发现了 105K 无公度相变,在相变点附近声速和衰减呈 λ 反常。

中国科学院物理研究所用布里渊光谱方法研究了磁振子散射,在反平行磁化的双层磁膜中发现了新的自旋波模式它是完全非互易的高频模式。此外,该所还研究了石榴石亚铁磁材料的布里渊谱,发现了除体磁振子外的磁振子态密度散射。同济大学研究了六卤素金属化合物 K_2SnCl_6 的弹性常数及声速随温度的变化,从弹性常数的软化发现了 262K 处的结构相变。

三、表面增强拉曼散射 (SERS)

70 年代中期发现 Ag, Cu 和 Au 等的粗糙表面上吸附一些分子时,这些分子的拉曼散射

增强,最大可达 10^6 倍。增强的原因尚无定论。有强调物理增强为主的电磁理论,认为是被粗糙表面的局部电场所增强;有强调化学增强的化学吸附理论,认为增强来自吸附分子与表面物质之间的电荷转移引起的分子极化率增大。它与表面吸附、催化、电化学及单层分子检测等表面现象有密切的联系,也是痕量分析的有力手段之一。国内这方面的工作十分活跃。前期的工作围绕增强因素进行了大量的实验研究,开展了电化学过程、生物大分子和痕量分析等方面的工作。

近两年 SERS 的研究工作不断深入,在吸附物质方面有所进展。吉林大学^[12]和中国科学院应用化学研究所研究了酞菁铜类化合物的 LB(Langmuir-Blodgett)膜在 Ag 岛膜上单分子层的 SERS 和 SERRS(表面增强共振拉曼散射),分析了其取向行为。传统的 SERS 是研究吸附分子的,中国科学院物理研究所^[13]从分子扩展到固体薄膜,用 SERS 技术分析了银颗粒表面淀积的 Si 薄膜,观察到了增强效应。

中国科学院化学研究所^[14]进行了着眼于 SERS 峰强随电压变化的研究,从分子键极化率的计算,可以得到确定分子吸附构形以及吸附随电压变化的信息。从探讨 SERS 过程来看,这是一项别开生面的工作。

在电化学体系中,界面水分子的信息很难获得。厦门大学^[15]采用可有效地破坏 H_2O 分子间氢键的高浓度 ClO_4^- 为主要支持电解质,获得了 H_2O 的强的 SERS 谱。至今 SERS 主要是在水溶液体系中进行的,苏州大学^[16]扩展到非水电化学体系,研究了甲醇溶液中咪唑的 SERS 效应,发现与水体系中的有相当大的差别。

近年来国内对卤素离子对 SERS 的影响又重新发生了兴趣。中国科学院物理研究所^[17]研究了在 Ag 胶体系中添加 KCl 引起的进一步增强,采用各种研究手段证明 KCl 的影响主要是化学方面。该所另一项研究发现,硝基苯甲酸(PNBA)吸附在 Cu 粗糙表面时溶液中 Cl^- 的浓度影响吸附状态, Cl^- 少时,PNBA 以 NO_2^- (硝基)吸附在 Cu 表面上,而当 Cl^- 达到一定浓

度时,则以 $COOH$ (羧基)吸附在 Cu 表面上。

在利用 SERS 和 SERRS 技术提高化学分析和痕量分析灵敏度方面也有进展。武汉大学发展了 SERS 与色谱联用技术,提高了检测灵敏度。利用 SERS 研究生物分子的工作受到重视,中国科学院生物物理研究所、中国科学院物理研究所、中国科学院生态环境研究中心、吉林大学、清华大学、武汉大学等开展了这方面的工作。

四、受激光散射

用巨脉冲激光照射物质时,电场对感生偶极子的非线性贡献变得显著,引起一系列非线性光谱现象,可以看作是拉曼效应的变种,但在原理上和实验装置上都与线性拉曼效应不同。受激拉曼散射(SRS)是非线性拉曼散射之一,具有与激光器发出的激光相同的特性:强度高,方向性好,具有高单色性,可以作为频率范围很宽的一类激光相干光源。国内在受激拉曼散射研究方面很活跃,开展了有机液体、高压气体、光纤和液滴等方面的研究。

近年来进行了以扩展激光范围到近紫外为主要目的的 SRS 研究^[18]。中国科学院上海光学精密机械研究所使用工作于紫外波段的准分子激光作为泵浦源,以高压氢为拉曼介质,获得了氢激发态之间的 SRS;以 Na, Pb, Ba 等金属的蒸气为拉曼介质,实现了受激电子拉曼散射。哈尔滨工业大学以 Na 蒸气为介质,观察了双支受激超拉曼散射。中国科学院物理研究所研究了紫外激光离解四氯化钛产生的钛原子的 SRS。中国科学院长春光学精密机械研究所研究了红外波段的 SRS,实现了仲氢的受激转动拉曼散射。

光导纤维中的 SRS 研究仍是活跃领域。上海交通大学、武汉大学、安徽大学、哈尔滨工业大学及中国科学院上海光学精密机械研究所等单位都在原有工作的基础上获得了新结果。郑州大学^[19]研究了光导纤维中受激四光子混频和受激拉曼散射的联合效应,证实这是导致光纤

产生连续谱的主要原因。

复旦大学^[20]继续进行已取得重要成果的液滴中的 SRS 研究,研究了乙醇和四氯化碳的受激拉曼振荡(SRO)和液滴中的 SRO 与液体池的 SRS 的瞬态特性比较;此外他们还进行了原子激发态的 SRS 研究。该校另一组研究了乙醇的瞬态 SRS,预示了以此压缩激光脉宽和产生可调谐超短光源的可能性^[20]。四川大学在大气的强激光受激转动拉曼散射方面取得了进展。

受激布里渊谱(SBS)的研究工作主要在 SBS 的相位共轭效应及其应用方面^[21]。北京大学研究了伴随自聚焦的 SBS 的相位共轭。四川大学研究了激光谐振腔内的 SBS 相位共轭反射镜,有效地提高了激光输出效率和光束质量。此外,中国科学院上海光学精密机械研究所研究了等离子体的 SBS 光谱的周期性结构,间接地证实了前向散射的存在。

五、展 望

回顾我国光散射研究近十多年来发展的历程,已经从早期的识谱及其分析发展到有深入的物理内容的研究,近几年有些工作已接近国际前沿,但有些基础性的研究仍待提高。

另一方面,随着实验技术的提高,国际上也有一些新的发展值得我们注意,这里略举一二。

时间分辨拉曼光谱是研究快速过程如激发态、相变过程及化学反应过程等的有力手段,采用超短脉冲激光的激发光源和光学多道检测已可以进行纳秒和皮秒过程的研究。国内这种装置目前还不多,用于拉曼研究的则更少。

在低温研究中,国外在液氦温度下的光散射研究已成为常规,在国内虽然在其他物理测量中能做到极低温,但在液氦温度下的光散射研究还是罕见的。

另一个发展领域是激发光源的频率扩展。共振拉曼光谱在国际上早已属于常规手段。拉曼散射理论表明,当激发光的能量等于电子跃

迁能量时,表征散射强度的拉曼散射截面发散,散射强度会变得很高,甚至可增至 10^6 倍,对于研究微弱的散射极为有利。近年来国内已开始见到一些共振拉曼研究工作,但由于可调谐激光用于拉曼散射研究的还不多,这方面的工作有待普及。

频率扩展的一个新发展是傅里叶变换(FT)拉曼光谱仪的出现。通常的拉曼散射的激发光源是可见光(如氩离子激光的 514.5nm 和 488.0nm 等),在一些物质(如含色素的)中由于产生荧光而湮没了拉曼信号。近年来借用 FT 红外光谱技术发展了 FT 拉曼光谱技术,激发光源为红外波段的(如 Nd:YAG 激光,1.06 μm),用迈克耳孙干涉仪分光和近红外探测器探测,避免了荧光的干扰。目前已有商品化的红外 FT 拉曼光谱仪,其灵敏度已接近于可见光的,由于 FT 技术的引入,测量速度和波数精度都大大提高。

布里渊谱仪和拉曼谱仪在频谱范围上有一空白区,目前已出现双通双光栅单色仪,可以一次完成从布里渊谱到拉曼谱的全部实验,覆盖了这一空白区。当然仪器的灵敏度还不能同两台谱仪相比,但至少可以研究这一空白区的一些尚未研究的振动和激发。

在受激光散射方面的一个新进展是冲击受激散射(ISS)。用两束光差频产生一个与被激发物质某一振动频率相等的超短脉冲,该光进入物质后就选择性地冲击某一振动频率,使其强烈振动,然后以探测超短脉冲,借助非线性散射原理探测该冲击激发起来的振动,可以测到振幅、频率、衰减和相位的变化。根据冲击激发起来的频率不同又分为冲击受激布里渊散射和冲击受激拉曼散射,可用于研究分子振动弛豫、晶体结构相变、能量转移和化学反应等。

非弹性光散射是一个跨学科的广泛领域,由于笔者知识面所限,难免挂一漏万,敬希谅解。谨向张鹏翔、莫育俊、张杏奎、张明生、钱士雄、杨经国、徐知三、李郁等同志致谢,感谢他们提供的资料和信息。

量子光学的新近发展

曹 昌 祺

(北京大学物理系, 北京 100871)

本文阐述了量子光学的学科特点和新近发展的四个重要方面: 光场挤压态、腔量子电动力学、超辐射和强光物理。本文对其中一些新概念作了简要的说明, 以使更多的读者能了解其物理实质。

量子光学是一门年青的学科, 它是在 50 年代以后才发展成长起来, 其标志是 Hanbury-Brown 和 Twiss 关于光强关联的实验以及激光的产生。量子光学研究的对象是, 光场的相干和统计性质及光与物质相互作用的量子特征。它既是一门基础学科, 又与新技术的发展有着密切联系, 它的研究成果常具有实际应用的广泛前景。由于光场本质上是量子化场, 因而量子光学不可避免地会与光学中其他一些分支发生交叉。这种交叉并可能随着研究的深入而增长。在本文中我们将对它的新近发展有选择地作一简单介绍。

一、光场挤压态(squeezed state)

在激光出现以前, 也就是说从远古直到本

世纪 50 年代, 人类所接触到的和所使用的光都是混沌光场。这里所谓的混沌光场是指由大量独立的原子(或分子, 或电子, 下同)所发光的总和。由于各个原子发出的光在相位上彼此无关联, 因而在合成时犹如二维无规行走所合成的总距离那样, 总电场的振幅具有高斯误差分布(参见图 1 及下文)。热辐射、固体发光和气体放电所产生的光场都是这样的混沌光场。不同混沌光场之间的差别只在于偏振状态和频谱的不同, 电场振幅的统计特性则都是一样的。

激光的出现, 是一个革命性的变革。从此, 人类使用的光场突破了混沌光场的范畴而扩大到相干态光场。相干态光场也就是完全相干光, 它的各阶相干度都等于 1 (通常的光学干涉现象所涉及的都是相位间关联, 即与一阶相干度有关。Hanbury-Brown 和 Twiss 实验的重要

-
- [1] 周仲壁, 物理, **18**(1989), 600.
 - [2] L. W. Xu, *Chinese Phys. Lett.*, **7**(1990), 469.
 - [3] 汪兆平等, 半导体学报, **11**(1990), 388; 王笑军等, 半导体学报, **11**(1990), 176.
 - [4] 钱佑华等, 半导体学报, **10**(1989), 449; 王云珍等, 同上, 534; 陈存礼等, 同上, 878; 程光煦等, 同上, **12**(1991), 18; 李国华等, 同上, **11**(1990), 238; 徐建国等, 同上, **11**(1990), 822.
 - [5] X. K. Zhang et al., *Phys. Lett.*, **A136**(1989), 312; H. Xia et al., *J. Phys. Condens. Matter*, **1**(1989), 7689.
 - [6] S. L. Zhang et al., *Solid State Commun.*, **66**(1988), 567, 1085.
 - [7] M. S. Zhang et al., *Phys. Rev.*, **B41**(1990), 2003.
 - [8] 赵永年等, 高压物理学报, **3**(1989), 269; Y. N. Zhao et al., *J. Phys. Condens. Matter*, **2**(1990), 8083.
 - [9] G. X. Lan et al., *J. Phys. Chem. Solids*, **51**(1990), 273, 279.
 - [10] 李国华等, 半导体学报, **11**(1990), 709.
 - [11] H. Xia et al., *Solid State Commun.*, **73**(1990), 657.
 - [12] Y. B. Bai et al., *Thin Solid Film*, **180**(1989), 249.
 - [13] Y. J. Mo, *Proc. Twelfth Inter. Conf. on Raman Spectroscopy* John Wiley & Sons, (1990), 310.
 - [14] G. Z. Wu, *J. Mol. Struct.*, **79**(1990), 238; Y. Huang et al., *Spectrochim. Acta*, **46A**(1990)377.
 - [15] 田中群等, 中国科学, B 辑 No. 3(1990), 246.
 - [16] 顾仁敖等, 光学学报, **8**(1989), 1041.
 - [17] P. X. Zhang, *Proc. Twelfth Inter. Conf. on Raman Spectroscopy*, John Wiley & Sons, (1990), 365.
 - [18] 楼洪洪等, 光学学报, **9**(1989), 481, 206; 王骥等, 中国激光, **16**(1989), 25; 单军等, 物理学报, **39**(1990), 754
 - [19] 沈书泊等, 物理学报, **39**(1990), 526.
 - [20] S. X. Qian et al., *Opt. Commun.*, **74**(1990), 414; 钱士雄等, 中国激光, **16**(1989)20; 刘一先等, 中国激光, **17**(1990), 21.
 - [21] 黄勇等, 物理学报, **39**(1990), 67; 杨经国等, 中国激光, **18**(1991), 110.