

光泵浦远红外气体激光器的研究发展

曲彦臣, 陈惠颖, 耿利杰, 赵卫疆

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 远红外激光具有穿透性强、光子能量低、带宽宽、通信传输容量大等优点, 在公共安全、环境探测、生物医学、天文观测、军事以及通信等方面得到了广泛应用。在介绍了远红外波段激光器发展的基础之上, 对产生远红外激光的各种方式进行了对比分析和总结, 讨论了光泵浦远红外气体激光器的技术优势, 并针对近年来远红外激光工作介质及其新谱线进行了归纳。通过对连续和脉冲光泵浦远红外气体激光器发展的回顾, 结合该领域的一些重点研究方向, 给出了未来光泵浦远红外气体激光器的研究趋势。

关键词: 远红外气体激光器; 光泵浦; 效率; 发展

中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)04-1099-07

Research and development for optically pumped far-infrared gas laser

Qu Yanchen, Chen Huiying, Geng Lijie, Zhao Weijiang

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Far infrared laser sources have many properties of strong penetration, low photon energy, wide bandwidth, large transmission capacity of communication, have been widely applications in public security, environmental monitoring, biomedical diagnostics, astronomical observation, military and communicational application, etc. The technological advantages of the optically pumped far infrared gas laser were gave by comparing a variety of ways to produce far infrared laser based on introducing their development. Summarized far-infrared laser mediums and their new lines of the recent years. At last, the research trends of optically pumped far infrared which were summarized by reviewing the continuous and pulsed optically pumped far-infrared gas laser development, combining with some of the key research directions in this field were indicated.

Key words: far infrared gas laser; optically pumped; efficiency; development

收稿日期: 2013-08-14; 修订日期: 2013-09-15

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(HIT.NSRIT.2014043)

作者简介: 曲彦臣(1971-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事可调谐 CO₂ 激光和光泵浦远红外气体激光等方面的研究。

Email: quyanchen@hit.edu.cn

0 引言

远红外激光波长范围在 20~1 000 μm 之间,具有穿透性强、光子能量低、带宽宽、通信传输容量大等优点,在公共安全、环境探测、生物医学、天文观测、军事以及通信等方面得到了广泛应用^[1-9]。远红外激光可由电子学和光学两大类方法获得。比较常用的几种方法中,有些方法虽然输出能量大,但是体积巨大、造价昂贵;有些方法虽然结构紧凑,但是输出能量满足不了实际需求。因此,兼顾了输出能量和体积的光泵远红外激光得到了快速的发展。20 世纪 70 年代,Chang^[10]报导了光泵浦远红外激光器,它作为

远红外领域基本的科学研究工具受到了各国研究人员的普遍关注。

文中就光泵浦远红外气体激光器近几十年的研究发展做了总结和分析。

1 远红外波段激光器的发展

产生远红外激光的方式主要有电子学方法和光学方法。电子学方法主要包括利用自由电子激光器、量子级联激光器等产生远红外激光;光学方法主要包括光泵浦气体远红外激光器,利用超快激光技术、差频技术、参量振荡产生远红外激光。各种方法产生远红外激光的优缺点对比如表 1 所示。

表 1 各种方法产生远红外激光的优缺点

Tab.1 Advantages and disadvantages of various methods of generating far-infrared laser

Methods	Advantages	Disadvantages
Free electron laser	High power and large tuning range	Complicated structure, huge volume, high power consumption and high cost
Quantum-cascade laser	High efficiency, high power, small volume and a compact structure	Complicated structure, complicated growth technology, high threshold current density, high optical loss and immature technology, can't working at room temperature
Ultra-fast laser technology	Narrow pulse width, wide frequency band and high peak power	Poor temporal coherence and low conversion efficiency, low average power and expensive
Difference frequency technology	No threshold, simple experimental equipment, compact and coherent wide-band tunable	Need two pump laser or one double-wavelength laser; low efficiency, limited crystal, complicated structure
Parametric oscillator	Compact structure, good coherence and narrow linewidth, tunable in wide band	Crystal limitation, low output energy
Optically pumped gas far infrared laser	High power in CW, high energy in pulse, wide covering spectrum and mature technology	Low efficiency and a large volume

通过对上述产生远红外激光方法的对比可以发现,除光泵浦气体远红外激光器外,其他产生远红外激光的方法不是结构复杂、造价昂贵、工作条件苛刻,就是输出功率很弱而满足不了实际需要。而光泵浦气体远红外激光器输出能量大、覆盖频谱宽、技术成熟,所以到目前为止,它仍是产生远红外激光常用且实用的方法。典型的光泵浦远红外气体激光器由泵浦源 CO_2 激光器、装有工作物质的谐振腔以及真空系统组成,其装置图如图 1 所示。

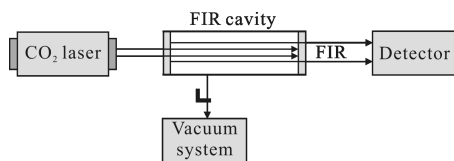


图 1 典型光泵浦远红外气体激光器的装置图

Fig.1 Typical optically pumped far-infrared gas laser

光泵浦远红外气体激光器在问世之初并没有立即被相关的学者们所认可,原因主要有:(1)光泵浦远红外激光器的泵浦源 CO_2 激光器不是非常成熟;(2)当时科研人员只对简单的远红外辐射源感兴趣,排斥操作由两台激光器组成的激光系统。所以虽然光泵浦远红外激光器在 20 世纪 70 年代就已经问世,但是当时结构更简单的电激励远红外激光器仍占主导地位。

但是,相比于电激励远红外激光器,采用光泵浦方式的远红外气体激光器具有更多优点:(1)结构相对简单,容易实现,是理想的实验工具;(2)泵浦机理理论研究相对成熟,具有比较完善的理论模型体系^[11-17];(3)可实现多波长输出;(4)可以以连续或脉冲方式工作,输出功率高(远红外脉冲输出峰值功率最大可达 10 MW^[18-19],连续输出功率超过

1 W^[20]),且其覆盖频率范围很宽;(5)容易实现高集成度和小型化,目前最小的远红外激光器可短于10 cm^[21]。基于上述优势,在20世纪80年代的两次国际会议即亚毫米波及其应用国际会议(1980年更名为红外与毫米波国际会议)和红外物理国际会议之后,世界范围内引发了一场极其活跃的光泵浦气体远红外激光器的研究活动。

近年来,太赫兹(THz)激光器的研制也受到了各国学者的高度关注。THz是指频率在0.1~10 THz(1 THz=1 012 Hz)、波长在30~3 000 μm之间的电磁辐射区域,该区域在20世纪80年代中后期才被正式命名为THz。由于其频率上与左右两侧的毫米波和红外射线均有所重合,命名之前,在无线电物理领域称为亚毫米波,在光学领域则习惯称之为远红外射线。同样是基于上述光泵浦方式的远红外气体激光器的优势,光泵浦方式的THz气体激光器的研制在THz激光器研制领域也是遥遥领先。另外,也正是光泵浦THz气体激光器在国内外掀起的研究热潮,光泵浦远红外气体激光器的研究迎来了一个新的春天。

2 光泵浦远红外气体激光器的工作介质及其谱线

远红外激光介质具有两个显著特点:一是红外吸收系数尽量大且分子有很大的永久偶极矩;二是确保激发振动态能被耦合到同一振动能级的许多其他转动能级并能快速地弛豫到基态,很多摩尔质量小的多原子分子都满足这两个条件。最常用的光泵浦远红外气体激光的工作物质有:甲基卤化物(CH₃X)及其同位素分子、甲醇(CH₃OH)及其同位素分子、重水(D₂O)、氨气(NH₃)、氰化氢(HCN)等。

下面主要针对上述几类工作分子对最近十几年新谱线的发现情况简单介绍如下。

(1) 甲基卤化物及其同位素分子:1995年,Schatz W等人^[22]由CH₃F、CH₃Cl、CH₃Br、CH₃I及其同位素分子得到了将近1 000条远红外激光谱线,波长范围从40 μm一直到毫米区域。2011年,A.De Michele等人用脉冲波导CO₂激光器泵浦CH₃I的同位素分子¹³CD₃I,发现了波长在308.4~1 132.7 μm范围内的18条新激光谱线^[23]。

(2) 甲醇及其同位素分子:人们已经利用CH₃OH得到了大量的远红外激光谱线,且最近几年仍不断有新的谱线被发现。2003年,E.C.C. Vasconcellos等人^[24]利用连续CO₂激光器泵浦¹³CD₃OH,获得了波长在45.3~108.9 μm范围内的4条新谱线。2007年,L.F.L. Costa等人^[25]利用宽带可调谐的¹³CO₂激光器泵浦CH₃OH,获得了波长在58.1~624.6 μm范围内的12支新的THz谱线,同年,他们又利用同样的泵浦源泵浦¹³CH₃OH^[26],获得了波长在42.3~717.7 μm范围内变化的19条新的THz谱线。2009年,Michael Jackson等人^[27]以甲醇的同位素物质¹³CHD₂OH作为工作介质,发现了8条新谱线,波长在33.8~80.9 μm之间,并利用外差技术测量了8支谱线的频率,误差达到10⁻⁷量级。2012年,Michael Jackson等人^[28]利用CH₃OH的同位素分子CH₃¹⁷O¹⁸OH作激光介质,CO₂激光器作为泵浦源,获得了波长在69.7~642.9 μm之间的12条谱线,并且获得了每支谱线的最佳气压和强度。

(3) 重水:1974年,Keilmann等人^[29]利用CO₂激光器泵浦D₂O气体,发现了波长385 μm的激光谱线,之后这支谱线被广泛用于等离子体温度的测量。1976年,D.E.Evans等人以TEA CO₂激光器作为泵浦源,以9P(32)支线泵浦重水气体,获得了波长为66 μm的新谱线^[30]。2000年,E.C.C. Vasconcellos等人利用高Q值F-P腔CO₂激光器做泵浦源设计得到了一个满足短波长激光输出的远红外激光腔,利用该设计在重水介质中发现波长为109.409 μm和85.9 μm的两条新谱线^[31]。

到目前为止,采用光泵浦技术已经发现了超过5 000条的远红外激光谱线。这些谱线的发现对远红外激光机理研究、远红外激光应用等方面起着至关重要的作用。

3 连续光泵浦远红外激光器

1970年,第一台光泵浦远红外气体激光器在贝尔电话实验室诞生^[10]。Chang采用可调谐连续波CO₂激光器泵浦CH₃F,得到了波长为452 μm、496 μm和541 μm的远红外激光,但是其光束质量却不尽如人意。随后,Danielewicz等人^[32]在提高光束质量、使光泵浦远红外激光器实用化方面做出了重要贡献。

1975 年他们成功研制出对于 CO_2 光束高反射率、对于远红外激光部分反射的混合型金属网栅多层介质膜输出镜。用这种输出镜代替小孔耦合不仅使光束质量大大提高,而且使远红外激光的输出能量得到了提高,之后各种其他的输出耦合器也逐渐问世^[33-36]。

光泵浦远红外气体激光器的能量转化效率一般都比较低,主要原因有:(1) 工作介质对泵浦场吸收很微弱;(2) 气体热效应;(3) 激发态对产生的远红外激光有一定的吸收。而最主要的原因则是第一条。光泵浦远红外气体激光器中只有约 10%~20% 泵浦光被工作介质吸收,其余的都损耗在管壁上。所以如何提高光泵浦远红外气体激光器的能量转化效率是该领域的一个主要研究方向。目前有效的方法主要包括:(1) 设计合理的激光器参数。1976 年,Hodges^[37]通过设计适当的波导腔尺寸以及输出镜的耦合小孔直径使 20% 的红外光子转化为远红外输出,并采用温控装置中和了泵浦吸收和远红外吸收之间的矛盾,使只用 100 W 泵浦能量获得 1 W 连续输出成为可能。(2) 添加适合的缓冲气体。缓冲气体可以减小振动瓶颈效应,这个效应正是导致工作气体中激发振动能级上积累粒子以致泵浦光吸收效率减小的主要原因。适当的缓冲气体可以加速激光下能级的粒子向基态振动能级的弛豫,使得在下一个泵浦脉冲来时有足够的粒子将泵浦能量吸收跃迁。1976 年,Chang 和 Lin^[38]通过向远红外激光气体中加入适当的缓冲气体使 496 μm 的远红外激光输出能量提高了 55%。1977 年,Hodges^[39]报道了泵浦功率为 30 W、输出功率为 120 mW、波长为 118.8 μm 的光泵浦 CH_3OH 激光器,能量转化效率为 0.4%。相同的支线,1985 年由 Mansfield 等人^[40]采用 130 W 的泵浦能量泵浦掺入缓冲 He 气得到了 830 mW 的远红外激光输出,能量转化效率提高到 0.638%。

4 脉冲光泵浦远红外气体激光器

1974 年第一届亚毫米波及其应用国际会议上,Coleman 等人^[41]报道的光泵浦 496 μm CH_3F 激光器输出功率就已经超过了当时脉冲放电泵浦气体激光器的功率水平(小于 10 kW)。一年之后,Evans 等人报道的远红外激光器输出达到了 1 MW 的水平。这

一突破吸引了更多的科研人员加入到这个领域的研究中来,以期获得更高能量的远红外输出。1983 年,普林斯顿研究小组的 Semet 等人^[43]用 700 J 的 CO_2 泵浦脉冲获得了 5 J/5 μm 的 385 μm 脉冲,该脉冲是截止目前所报道的能量最大的光泵浦远红外激光器脉冲。

光泵浦远红外气体激光器可以分为共振泵浦和非共振泵浦。共振泵浦是指泵浦辐射频率精确对应着红外吸收跃迁频率,它是在低气压范围内且最佳气压在 67 Pa 以下时最有效的获得远红外激光的方法。大多数光泵浦远红外气体激光器都是共振泵浦,这是因为对于气体工作介质,红外吸收谱线带宽很窄且吸收率很低,需要共振窄带泵浦和较长的作用长度。当用高强度泵浦辐射泵浦远红外激光气体时,即使泵浦光频率和振转跃迁能级所对应的谐振频率没有完全重合也可以得到远红外辐射,这就是非共振泵浦。非共振泵浦的实质就是受激拉曼散射过程,它是非线性过程,且阈值强度约为 1 MW/cm²,所以需要强脉冲激光器做泵浦源。受激拉曼散射是高气压范围内且最佳气压在 266 Pa 以上时产生远红外激光最有效的方式^[44]。1972 年 Fetterman 等人^[45]利用受激拉曼散射实现了 TEA CO_2 激光器非共振泵浦 NH_3 远红外激光器,其失谐量达到 950 MHz。非共振受激拉曼散射机制的理论和实验研究工作主要是由 Temkin^[46]和 DeTemple 等人^[47]最早开始进行的。通过研究成果,他们还成功搭建了脉冲可调谐 CH_3F 拉曼远红外激光器^[48]以及在宽光谱范围连续可调谐的拉曼远红外激光器^[49-50]。近年来,研究人员利用非共振泵浦发现了许多脉冲远红外激光谱线,但这些谱线由于泵浦失谐量太大而不能由连续 CO_2 激光器获得。

光泵浦超短(小于 1 ns)远红外脉冲激光器的研制也是该领域的一个重要研究方向,它可以实现高的激光功率密度,并伴随一些全新的物理现象与规律。然而超短远红外激光脉冲不能由传统的方法得到,原因是:(1) 在远红外波长范围内缺少电光材料,除非用锁模或者调 Q 技术获得超短脉冲;(2) 光泵浦远红外气体激光器是低气压窄带系统^[51],由于在受激介质中产生的光脉冲的持续时间的下限是跃迁线宽的倒数,只有泵浦脉冲是宽带脉冲时超短远红外脉冲才能产生。能够产生远红外短脉冲的包含不同

锁模光泵浦技术的超辐射或者受激拉曼辐射,它们可以得到半高全宽为几百皮秒到纳秒级的波长在151~496 μm 之间的远红外脉冲^[52-58]。1979年, Lee等人^[52]采用锁模 TEA CO_2 激光器同步泵浦 CH_3F 和 D_2O 获得了亚纳秒级的496 μm 和385 μm 超短脉冲。相似的实验装置下 Lemley^[54]实现了355 ps的超短脉冲激光器。1993年, W. Schatz^[51]等人采用高气压 CO_2 激光器泵浦 D_2O 气体得到了脉冲持续时间小于100 ps的超短远红外激光,其功率超过200 kW,光强大于1.5 MW/cm^2 。Rosenberger等人^[55]用了一个复杂的理论和实验研究了超短脉冲的产生。对于宽带泵浦辐射超短脉冲宽度可归因于泵浦辐射每个频率分量的受激拉曼辐射。

另外,远红外激光器的小型化方面也得到了快速发展。1986年, Everitt等人^[59]在亚毫瓦输出量级上把光泵浦连续远红外激光器做到了10 cm量级。在国内,中山大学的罗锡璋等人从1990年开始,用提高工作气压来直接缩短腔长的办法,成功地研制了腔长在15 cm以下的一系列小型光泵远红外激光器^[60],从根本上改变了国外一直沿用的折迭环型腔的小型化方法。

在提高脉冲光泵浦远红外激光器能量转化效率方面,研究人员主要是通过添加缓冲气体的方式来实现这一目标。1985年 Behn等人^[61]向光泵浦385 μm D_2O 激光器中加入六氟化硫、四氟化碳、正己烷,实验发现泵浦效率提高了40%,实验时采用单模 CO_2 激光850 J的能量,在最佳气压下得到了能量为2.6 J的脉冲。

5 结论

从文中的分析可以看出,光泵浦气体远红外激光器相比其他获得远红外激光的激光器具有明显的优势,因此它具有广阔的应用前景。根据具体应用环境,开展高效率、高能量兼具小型化的光泵浦气体远红外激光器的研究,不仅可以拓宽其应用范围,还可以提高其实用性。因此,高效率、高能量兼具小型化的光泵浦气体远红外激光器也是未来研究的主要发展方向。

参考文献:

- [1] Fan W H, Burnett A, Upadhy P C, et al. Far-infrared spectroscopic characterization of explosives for security applications using broadband terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Appl Spectrosc*, 2007, 61(6): 638-643.
- [2] Radoslaw Ryniec, Przemyslaw Zagrajek, Tomasz Trzcinski, et al. Explosives identification model in reflection mode for THz security system [C]//SPIE, 2011, 8119 (4): 811904-1-811904-6.
- [3] Endres C P, Muller H S P, Brunken S, et al. High resolution rotation-inversion spectroscopy on doubly deuterated ammonia, ND₂H, up to 2.6 THz [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2006, 795(1-3): 242-255.
- [4] Peter H, Siegel, Pikov V. THz in biology and medicine: towards quantifying and understanding the interaction of millimeter and submillimeter-waves with cells and cell processes [C]//SPIE, 2010, 7562: 75620H-1-75620H-13.
- [5] Pikov V, Siegel P H. Remote temperature monitoring of cells exposed to millimeter wave radiation using microscopic Raman spectroscopy [J]. *Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 2010: 1-28.
- [6] Francisco S. Determination of death thresholds and identification of terahertz (THz)-specific gene expression signatures [C]//SPIE, 2010, 7562: 75620K.
- [7] Watanabe K, Murakami H. GaAs extrinsic photoconductors for the terahertz astronomy[C]//SPIE, 2007, 6840: 68401F.
- [8] Liang Y Q, Fan W H. Image enhancement techniques used for THz imaging [C]//SPIE, 2011, 8195: 819515-1-819515-6.
- [9] Rieh J S, Jeon S, Kim M. An overview of integrated THz electronics for communication applications [C]//MWSCAS, 2011 IEEE 54th International Midwest Symposium, 2011: 1-4.
- [10] Chang T Y, Budge T J. Laser action at 452, 496 and 541 μm in optically pumped CH_3F [J]. *Opt Commun*, 1970, 9: 423-426.
- [11] Yamanaka M, Homma Y, Tanaka A, et al. On the transverse mode in an optically pumped far-infrared NH_3 laser[J]. *Appl Phys*, 1974, 13: 843-850.
- [12] Tucker J R. Theory of an FIR gas laser [C]//International Conference on Submillimeter Waves and their Applications, 1974: 17-18.
- [13] Henningsen J O, Jensen H G. The optically pumped far-infrared laser: rate equations and diagnostic experiments [J]. *Quantum Electron*, 1975, 11(6): 248-252.
- [14] DeTemple T A, Danielewicz E J. Continuous-wave CH_3F waveguide laser at 496 μm : theory and experiment [J]. *Quantum Electron*, 1976, 12(1): 40-47.
- [15] Temkin R J, Cohn D R. Rate equations for an optically pumped far infrared laser [J]. *Opt Commun*, 1976, 16(2):

- 213–217.
- [16] Tucker J R. Absorption saturation and gain in pulsed CH_3F lasers[J]. *Opt Commun*, 1976, 16(2): 209–212.
- [17] Koepf G A, Smith K. The CW 496 μm methylfluoride laser: review and theoretical predictions [J]. *Quantum Electron*, 1978, 14(5): 333–338.
- [18] Evans D E, Sharp L E, Peebles W A, et al. Far–infrared super–radiant laser action in heavy water [J]. *Opt Commun*, 1976, 18(4): 479–484.
- [19] Evans D E, Guinne R A, Huckridge D A, et al. Time–resolved pulses and wavelength measurements for the 114 μm and 66 μm emissions in the fir superradiant D_2O laser [J]. *Opt Commun*, 1977, 22(2): 337–342.
- [20] Weber M J. Handbook of Laser Science and Technology, vol. II: Gas Lasers [M]. Boca Raton: CRC Press, 1982.
- [21] Tanaka A, Tanimoto A, Murata N, et al. CW efficient optically–pumped far–infrared waveguide NH_3 lasers[J]. *Opt Commun*, 1977, 22: 17–21.
- [22] Schatz W. Generation of tunable far–infrared radiation by optical–pumping molecular gas–lasers [J]. *Infrared Physics & Technology*, 1995, 36(1): 387–393.
- [23] DeMichele A, Moretti A, Pereira D. Optically pumped $^{13}\text{CD}_3\text{I}$: new Terahertz laser transitions [J]. *Appl Phys B*, 2011, 103: 659–662.
- [24] Vasconcellos E C C C, Jackson M, Hockel H, et al. Discovery and measurement of optically pumped far–infrared laser emissions in $^{13}\text{CD}_3\text{OH}$ [J]. *Applied Physics B*, 2003, 77 (6–7): 561–562.
- [25] Costa L F L, Moraes J C S, Cruz F C, et al. CH_3OH optically pumped by a $^{13}\text{CO}_2$ laser: new laser lines and assignments[J]. *Applied Physics B*, 2007, 86(4): 703–706.
- [26] Costa L F L, Moraes J C S, Cruz F C, et al. Infrared and far–infrared spectroscopy of $^{13}\text{CH}_3\text{OH}$: Terahertz laser lines and assignments [J]. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 2007, 241(2): 151–154.
- [27] Jackson M, Petersen T, Zink L R. Frequencies and wavelengths from a new far–infrared lasing gas: $^{13}\text{CHD}_2\text{OH}$ [J]. *Quantum Electronics*, 2009, 45(7): 830–832.
- [28] Jackson M, Nichols A J, Artagnon D, et al. First laser action observed from optically pumped $\text{CH}_3^{17}\text{OH}$ [J]. *Quantum Electronics*, 2012, 48(3): 303–306.
- [29] Keilmann F, Sheffield R L, Leite J R R, et al. Optical pumping and tunable laser spectroscopy of the ν_2 band of D_2O [J]. *Appl Phys Lett*, 1975, 26: 19–22.
- [30] Evans D E, Sharp L E. Far–infrared super–radiant laser action in heavy water [J]. *Optics Communications*, 1976, 18 (4): 479–484.
- [31] De Michele A, Carelli G, Moretti A, et al. A new pulsed CO_2 laser yielding new FIR laser lines from CH_3OD pumped by the 10 P and 10 HP lines [J]. *Phys B: At Mol Opt Phys*, 2004, 37: 1979–1984.
- [32] Danielewicz E J, Plant T K, DeTemple T A. Hybrid output mirror for optically pumped far–infrared lasers [J]. *Opt Commun*, 1975, 13: 366–369.
- [33] Crenn J P, Veron D, Belland P. Theory of the transmission of metal strip gratings on a dielectric substrate: application to submillimeter laser coupling [J]. *Infrared Millimeter Waves*, 1986, 7: 1747–1767.
- [34] Veron D, Whitbourn L B. Strip gratings on dielectric substrates as output couplers for submillimeter lasers[J]. *Appl Opt*, 1986, 25: 619–628.
- [35] Bowden M D, James B W, Falconer I S, et al. Annular slot array output couplers for submillimeter lasers [J]. *Opt Commun*, 1992, 89: 419–422.
- [36] Densing R, Erstling A, Gogolewski M, et al. Effective far infrared laser operation with mesh couplers[J]. *Infrared Phys*, 1992, 33: 219–226.
- [37] Hodges D T, Foote F B, Reel R D. Efficient high–Power operation of the cw far–infrared waveguide laser [J]. *Appl Phys Lett*, 1976, 29(10): 662–664.
- [38] Chang T Y, Lin C. Effects of buffer gases on an optically pumped CH_3F FIR laser [J]. *Opt Soc Am*, 1976, 66: 362–369.
- [39] Hodges D T, Foote F B, Reel R D. High power operation and scaling behavior of CW optically pumped FIR waveguide lasers[J]. *Quantum Electron*, 1977, 13: 491–494.
- [40] Mansfield D K, Horlbeck E, Bennett C L, et al. High power operation of the 119 μm line of optically pumped CH_3OH [J]. *Infrared Millimeter Waves*, 1985, 6: 867–876.
- [41] Plant T K, Newman L A, Danielewicz E J, et al. High power optically pumped far infrared lasers [J]. *Microwave Theory Tech*, 1974, 22: 988–990.
- [42] Evans D E, Sharp L E, James B W, et al. Far–infrared superradiant laser action in methyl fluoride [J]. *Appl Phys Lett*, 1975, 26: 630–632.
- [43] Semet A, Johnson L C, Mansfield D K. A high energy D_2O submillimeter laser for plasma diagnostics [J]. *Infrared Millimeter Waves*, 1983, 4: 231–316.
- [44] Nishi Y, Murai A. FIR laser emissions from population inversion transition by TEA-CO_2 laser pumping [J]. *Infrared Millimeter Waves*, 1990, 11(2): 309–322.
- [45] Fetterman H R, Schlossberg H R, Waldman J. Submillimeter

- lasers optically pumped off resonance [J]. *Opt Commun*, 1972, 6: 156–159.
- [46] Panock R L, Temkin R J. Interaction of two laser fields with a three-level molecular system [J]. *Quantum Electron*, 1977, 13: 425–434.
- [47] Petuchowski S J, Rosenberger A T, DeTemple T A. Stimulated Raman emission in infrared excited gases [J]. *Quantum Electron*, 1977, 13: 476–481.
- [48] Biron D G, Temkin R J, Lax B, et al. High-intensity CO₂ laser pumping of a CH₃F Raman FIR laser [J]. *Opt Lett*, 1979, 4: 381–383.
- [49] Mathieu P, Izatt J R. Continuously tunable CH₃F Raman far-infrared laser[J]. *Opt Lett*, 1981, 6: 369–371.
- [50] Danly B G, Evangelides S G, Temkin R J, et al. A tunable far infrared laser[J]. *Quantum Electron*, 1984, 20: 834–837.
- [51] DeTemple T. Pulsed optically pumped far infrared lasers[J]. *Infrared and Millimeter Waves*, 1979(1): 129–184.
- [52] Lee S H, Petuchowski S J, Rosenberger A T, et al. Synchronous, mode-locked pumping of gas lasers [J]. *Opt Lett*, 1979, 4: 6–8.
- [53] Lemley W, Nurmikko A V. High-intensity subnanosecond transients from synchronously pumped submillimeter-waves lasers[J]. *Appl Phys Lett*, 1979, 35: 33–35.
- [54] Lemley W, Nurmikko A V. Generation of ultrashort pulses in synchronous pumping of near-millimeter wave lasers[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1980, 1(1): 85–94.
- [55] Rosenberger, Chung H K, DE Temple. Sub-T₂ optical pulse generation: application to optically pumped far-infrared lasers [J]. *Quantum Electron*, 1984, 20(5): 523–532.
- [56] Lang P T, Schatz W, Renk K F. Generation of subnanosecond far-infrared laser pulses in a large spectral range with a Raman D₂O laser optically pumped by a continuously tunable CO₂ laser [J]. *Opt Commun*, 1991, 84: 29–36.
- [57] Lang P T. Generation of tunable high power far-infrared radiation by stimulated Raman scattering in gaseous methyl-halides[J]. *Infrared Phys*, 1992, 33: 237–262.
- [58] Lang P T, Heusinger M A, Kass T, et al. Efficient generation of FIR radiation by optical pumping of D₂¹⁸O[J]. *Appl Phys B*, 1992, 55: 347–354.
- [59] Everitt H O, Skatrud D D, DeLucia F C. Dynamics and tunability of a small optically pumped CW far-infrared laser [J]. *Appl Phys Lett*, 1986, 49: 995–997.
- [60] Luo Xizhang, Zheng Xingshi. A unified miniature optically pumped NH₃ FIR cavity laser [J]. *J Infrared Millim Waves*, 1998, 17(4): 299–302. (in Chinese)
罗锡璋, 郑兴世. 一体化的小型腔式光泵 NH₃ 分子远红外激光器[J]. *红外与毫米波学报*, 1998, 17(4): 299–302.
- [61] Behn R, Marc-Andge Dopertuis, Ivar Khelaerg, et al. Buffer gases to increase the efficiency of an optically pumped far infraed D₂O laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1985, 21(8): 1278–1285.