

- [4] B. A. 福克, 空间、时间和引力理论, 科学出版社, (1965).
- [5] J. 韦伯, 广义相对论与引力波, 科学出版社, (1977).
- [6] R. Adler et al., Introduction to General Relativity, New York, McGraw-Hill, (1975), 2ed.
- [7] П. К. 洛萨夫斯基, 黎曼几何与张量解析, 高等教育出版社, (1958).
- [8] 郭汉英、吴詠时、李根道, 物理学报, 23-5(1974), 303.
- [9] 秦荣先, 物理, 8-4(1979), 332.
- [10] 邹振隆、张平华、王祝翔, 物理 3-2(1974), 100.
- [11] 邹振隆, 科学通报, 19-1(1974), 13.
- [12] 方励之, 科学通报, 19-2(1974), 49.
- [13] J. R. Oppenheimer and H. Snyder, *Phys. Rev.*, 55(1939), 455.
- [14] 中国科技大学天体物理组, 物理学报, 25-4(1976), 273.
- [15] 戴文赛, 天体的演化, 科学出版社, (1977).
- [16] R. H. Dicke, The Theoretical Significance of Experimental Relativity, New York, London, (1965).
- [17] *Science News*, 106-8-9(1974), 116.
- [18] 邹振隆等, 4(1979), 366.
- [19] GBL, *Physics today*, 30-6 (1977), 17.

气相的弛豫过程及其实验研究

严海星

(中国科学院力学研究所)

(一)

微观粒子(分子、原子、电子、离子等)的不同自由度之间的能量传递, 通常称作一种弛豫过程. 在气相和凝聚相中都有弛豫过程, 本文只谈气相.

众所周知, 分子有多种自由度: 平动(T), 转动(R), 振动(V), 电子(E)等. 例如, 双原子分子有三个平动自由度, 二个转动自由度, 一个振动自由度, 分子的外层电子也可以处于不同的状态. 多原子分子有多个振动自由度, 可分析成若干振型.

气体中分子高速地自由运动, 与其它粒子高频地碰撞. 例如, CO₂ 在 300 K 下, 压力为一托时, 粒子数密度为 3.2×10^{16} 厘米⁻³, 平均热运动速度为 3.8×10^4 厘米/秒, 一个粒子每秒内受到其它粒子 8.7×10^6 次碰撞.

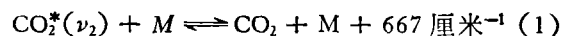
在碰撞过程中, 粒子平动的方向和动量、内部运动的状态甚至化学组成会发生改变, 分别被称作弹性碰撞、非弹性碰撞和反应碰撞.

在非弹性碰撞中, 内部自由度的能量与平动能之间的交换可以用简单的物理考虑来估算. 只有当发生碰撞过程的时间长短 $\tau_c \lesssim$ 内部自由度运动的特征时间 τ_i 时, 才可能发生明显

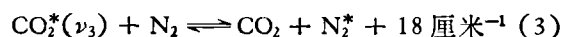
的能量交换. 而 τ_c 可用粒子飞过分子间相互作用力较大即位势剧烈变化的区域(特征长度为 a) 所化费的时间来估计, 即 $\tau_c \sim a/\bar{v}$, \bar{v} 为平均热运动速度. 如 Cl₂ 在 300K 下, $\bar{v} = 2.8 \times 10^4$ 厘米/秒, a 为 2×10^{-8} 厘米, 因此 $\tau_c = 7.15 \times 10^{-13}$ 秒. 对于 V-T 弛豫, τ_i 可用振动特征频率 ν 的倒数来估计, Cl₂ 的基振动频率为 556 厘米⁻¹ = 1.7×10^{13} 赫, 即 $\tau_i = 5.88 \times 10^{-14}$ 秒. τ_c 较 τ_i 大一个量级, 预期 V-T 跃迁几率甚小, 实验测得为 2.2×10^{-5} . 对于 R-T 弛豫, τ_i 可用平均的转动周期来估算, Cl₂ 在 300K 的转动周期为 2×10^{-12} 秒, 比 τ_c 显著地大, 因此预期转动弛豫速率极快, 实验测得 R-T 跃迁几率为几分之一.

可以把非弹性碰撞分成十类^[1]. 其中 T-T, R-R 速率极快, 跃迁几率接近于 1, 实验测量十分困难, 研究得极少. 关于 R-E 过程至今亦了解甚少. 长期以来, 研究得比较充分的是 V-T, V-V 和 R-T 过程. 例如 CO₂-N₂ 激光体系(见图 1)中常见的

V-T 过程



分子间 V-V 过程



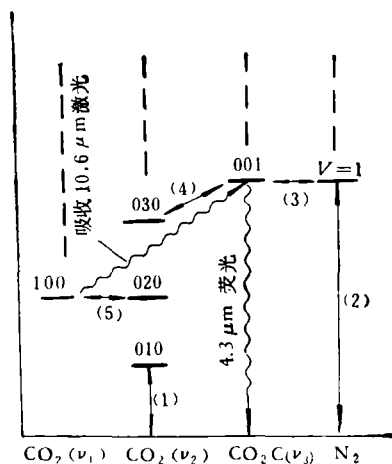
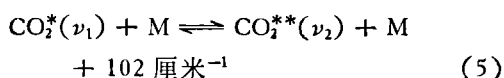
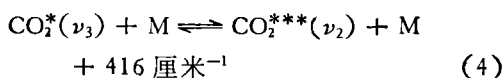
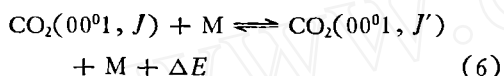


图1 CO₂-N₂ 激光体系中的弛豫过程

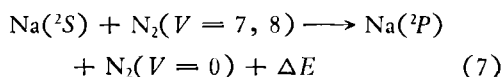
分子内 V-V 过程



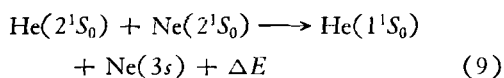
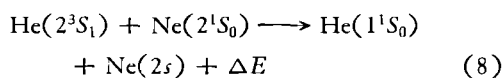
R-T 过程



其中能量差均为与平动的交换。近年来,发现转动在一些分子的振动弛豫过程中有重要的作用。R-T 交换极快,一些从表面上看是 V-T 的过程,由于实际上是 V-R 或 V-R, T 过程,因而有高的速率。E-V 和 E-T 过程是光化学中感兴趣的过程,大都发生在电子激发态的原子与别的粒子之间。如测 N₂ 振动温度的 Na 线倒逆法就是依据一种 E-V 过程

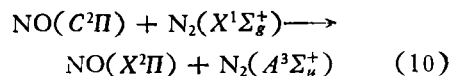


研究得较多的 E-E 过程是发生在原子的电子激发态之间的,如 He-Ne 激光所依据的是



近来对光化学和短波长激光器的研究,增加了对分子的电子激发态间传能的认识,如

物理



所谓弛豫过程就是指这些非弹性碰撞。它与反应碰撞也有密切的关系。本文涉及的主要是分子的弛豫过程。

(二)

弛豫过程在许多物理、力学、化学问题中起着重要的甚至核心的作用。研究弛豫过程有重要的实际意义。

激光自发明以来得到飞速的发展,并且对几乎所有科学技术领域产生了巨大而深远的影响。在各类器件中,气体激光种类最多,优点突出,发展很快,应用极广。在所有气体激光器中,传能过程都起着极其重要的作用。正是由于不同能级的激励、消激发的传能速率不同,才能在一定条件下,在某些能级之间产生粒子数反转,从而产生激光。可以说,气体激光的研究,从发明、发展到应用,都离不开对粒子的微观性质特别是微观动力学过程的认识。而大能量气体激光大都采用高速流动技术,如气动激光、化学激光、流动电激励激光。其中的关键问题,本质上都是带有弛豫效应的非平衡流体力学问题。

回顾一下气动激光发明的历史,就可以明显看出弛豫研究的重要意义^[2]。在 40—50 年代,由于研究高速空气动力学的需要,对气体的弛豫过程进行了广泛的实验和理论研究,积累了大量的数据和丰富的知识。在 60 年代激光发明后,一些力学家和物理学家很快就想到利用非平衡喷管流依靠不同能级弛豫时间的不同来产生粒子数反转。先由理论分析提出了这一新概念,然后用已有的弛豫数据对具体的激光体系进行非平衡流的理论计算,预言了器件的可能性,最后才实际上发明了它。这是一个理论指导实践的极好例证,表明关于微观过程的基础研究可以对科学实验有巨大的能动作用。

由于现有器件尚不能很好地满足激光武器、激光核聚变、激光分离同位素、激光化学等

重要应用的需求,因此探索新激光体系的工作,各国都在积极进行。而要想探索激光新体系,就必须研究各种体系的传能过程。此外,对激光器件性能的改进和关于激光的动力学过程、激光分离同位素、激光化学等的研究,也都离不开关于弛豫过程的知识。

弛豫与气体动力学也有非常密切的关系。Clarke 的专著^[3]和文章^[4],评述了带有弛豫效应的气体动力学的新近发展。在激波中,各种物理量突变,内部自由度跟不上平动的变化,气体内出现复杂的能量交换过程。要研究激波性质、激波结构、激波中的物理、化学过程和激波对飞行体的影响,就需要研究这些弛豫过程。此外,许多流体力学课题也逐步深入到微观领域,近年来提出的所谓物理气体动力学,主要内容之一就是研究带有振动和化学非平衡的高速流动问题。

弛豫、传能从二十年代起就为化学家所关心。化学反应就是化学键的断裂和重新结合。微观粒子的解离、电离、复合、电荷转移,形成准分子等都是在碰撞过程中发生的。而分子的内部自由度(主要指振动自由度)处于激发态常常使键容易断裂,化学反应容易进行。激发态粒子的性质及其对于化学反应的影响,在微观化学反应动力学中,是重要的研究课题。激光问世后,用激光选择性地激励和检测粒子,大大促进了化学动力学的发展^[5]。

声波和有限振幅波的传播,也是与弛豫有关的重要领域。高频振动的波中,内部自由度跟不上这种高频变化,因此,波的传播速度和吸收系数等重要参数依赖于体系的弛豫特性。关于这方面的工作,详见 Clarke 的评述^[4]。

总之,关于微观粒子的弛豫(传能)过程和碰撞动力学的研究,是许多重要现象的微观基础。这一课题处于物理、力学、化学的边缘。

(三)

三十年代以来,许多人(包括一些著名的物理学家、力学家、化学家)从事弛豫的实验和理

论研究。实验是采用各种手段来检测某些与微观的传能过程有关的物理量,得到该体系的弛豫时间,并研究弛豫机制。理论工作又分成碰撞动力学和统计模型两大部份。前者是用经典或量子力学,由粒子的相互作用势算出碰撞跃迁几率。后者是研究描述弛豫过程的模型、方程,以及各自由度、各能级的粒子数分布等,将碰撞跃迁几率与宏观可测参量联系起来,与宏观过程联系起来。

普遍采用的实验手段是超声、气动和激光^[6]。由于测得的一般不直接是描述微观过程的数据,所以总要辅以必要的理论分析。因此,十分需要碰撞动力学和统计模型的知识。

激光出现后,由于它的突出优点,很快就成为弛豫实验的主要手段。今天,可以说,任何对微观过程的精细研究,都离不开激光。但激光实验一般都限于不太高的温度($\leq 1000\text{K}$),更换样品时需有适当的激光器件与之匹配。

激光荧光法是 Javan 及其同事 1966 年首先采用的^[7]。以 CO_2 体系为例,说明实验的物理机制。在室温下,处于平衡状态的分子服从 Boltzmann 分布,处于 100 和 001 能级的 CO_2 分子数分别为

$$n(100) = 1.26 \times 10^{-3} n_0$$

和

$$n(001) = 1.24 \times 10^{-5} n_0,$$

n_0 为基态分子数。当样品被脉冲(脉宽 $\sim 1\mu\text{s}$)的 10.6μ 激光照射后,分子中发生快速的由 100 到 001 的跃迁(参见图 1)。若使脉冲达到饱和,即吸收激光后

$$\begin{aligned} n'(001) &= n'(100) \\ &= \frac{1}{2} (1.26 \times 10^{-3} + 1.24 \times 10^{-5}) n_0 \\ &= 0.63 \times 10^{-3} n_0. \end{aligned}$$

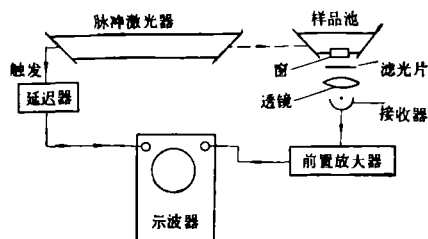


图 2 激光荧光实验装置简图

假设脉冲甚短,脉冲期间的重新集居可以忽略。 001 能级的过集居,可用等效温度 T_v 描述

$$\exp(-3380/T_v^{001}) = (0.63 \times 10^{-3}n_0)/n_0$$

即 $T_v^{001} = 460\text{K}$, 类似地由

$$\exp(-1998/T_v^{100}) = (0.63 \times 10^{-3}n_0)/n_0$$

得到 $T_v^{100} = 270\text{K}$. 也就是说,采用强脉冲激光瞬时地“加热”了 001 并“冷却”了 100 能级。 CO_2 中 ν_3 振型对应的自发辐射(荧光)波长为 4.3μ (参见图 1), 它的强度正比于该振型的振动能。监视此荧光随时间的变化,即可得到过集居的 001 能级返回平衡态的弛豫时间 τ 。激发态分子的消激发有三种机制

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{rad}}} + \frac{1}{\tau_d} + \frac{1}{\tau_{\text{col}}}$$

其中 $1/\tau_{\text{rad}}$ 是由于自发辐射造成的辐射衰减,它通常是与压力无关的常数,在 $\text{CO}_2(001)$ 能级的情况,约为 400秒^{-1} 。 $1/\tau_d$ 为激发态分子扩散到器壁而造成的消激发,它取决于激发态分子的扩散系数和样品池的尺寸。它与压力成反比,因此一般只在压力甚低($\leq 1-2$ 托)时才有明显效应^[8]。实验测得室温下 $\text{CO}_2(001)$ 的碰撞消激发速率为 $330 \text{托}^{-1} \cdot \text{秒}^{-1}$,因此在我们感兴趣的压力范围内(≥ 5 托),碰撞造成的弛豫效应 $1/\tau_{\text{col}}$ 是主要的。利用不同压力下测得的衰减常数 $1/\tau$,经过一定的理论分析,便能得到振动弛豫速率^[9]。实验装置如图 2。此法装置简单,应用得最广泛。

Javan 及其同事 1968 年又采用了另一种技术——激光双共振来研究弛豫过程^[10]。其装置见图 3。与激光荧光法不同,激励样品采用选

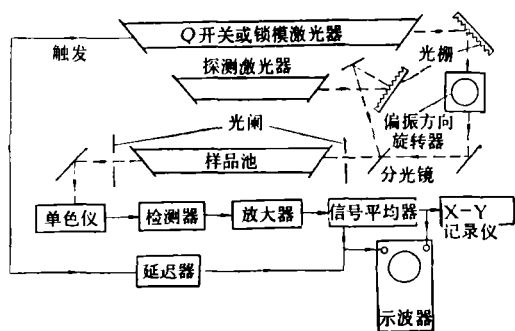


图 3 激光双共振实验装置

频的短脉冲、大功率激光器;用另一束连续的小功率单频激光,与激励光束在时间、空间上重叠,检测样品中某个能级上的粒子数的变化。如果样品池内进行放电,便检测增益;否则就测吸收的瞬时变化。为了监视特定的能级,常常用单色仪将所需的信号分出。为增强信号,所用的样品池一般要长得多,脉冲激光的能量也大得多。以 CO_2 为例,由图 4 可见, CO_2 分子吸收短脉冲 10.6μ 的 $P(20)$ 支激光,造成 $00^0 1$ 的 $J=19$ 能级的粒子数骤增。检测用的 9.6μ 的 $P(20)$ 支与它有共同的激光上能级,它的信号体现了 $00^0 1$ 的 $J=19$ 能级和 $02^0 0$ 的 $J=20$ 能级的粒子数的变化。再经过一定的理论分析,便可得出 $00^0 1$ 能级的转动弛豫速率^[11]或 ν_1 与 ν_2 振型间的 Fermi 共振传能速率^[12]。例如,由于转动弛豫速率($\sim 1 \times 10^7 \text{托}^{-1} \cdot \text{秒}^{-1}$)远大于 Fermi 共振传能速率($\sim 1.4 \times 10^5 \text{托}^{-1} \cdot \text{秒}^{-1}$),也大于其它可能过程的速率,因此 9.6μ 的 $P(20)$ 支在初始阶段的变化体现了转动弛豫的效应。还可以利用 9.4μ 谱带的其它 P 支谱线,监视受扰动后 $00^0 1$ 的其它转动能级的粒子数变化,从而得到转动弛豫速率与 J 的依赖关系^[13]。可以把激光双共振技术看作激光荧光法的补充和发展。它有一些激光荧光法所不及的优点:可测单个能级的弛豫速率;可测与激励光束波长十分接近的跃迁;可测荧光很弱或禁戒跃迁的能级。但它的实验装置和技术都要复杂得多,并且要求激励激光与探测激光互相匹配。后一点,对于我们感兴趣的体系,并不是随意能满足的。

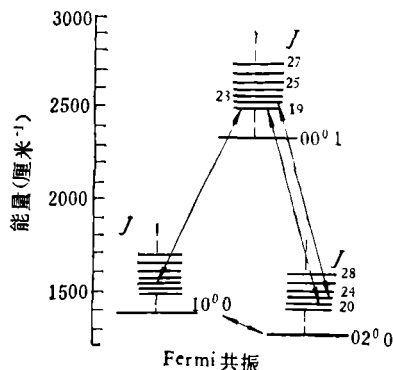


图 4 CO_2 分子的一些振转能级(未包括 $02^0 0$ 态)

激光光声法,是将连续激光斩波后照射在样品上,再用拾音器检测样品中气压的微小变化。样品吸收与之匹配的激光后处于振动激发态,再通过V-V(能量差 ΔE 交给或取自平动)和V-T过程弛豫,这将造成平动温度的周期性变化,即气压的变化。而V-V过程的机制(即 ΔE 的不同)和速率及V-T速率都会影响振动能(即吸收的激光能)交给平动的速度。这种影响体现在压力信号的大小或压力脉冲相对于激光脉冲的相位延迟上。通过复杂的理论分析,便可得到速率和关于弛豫机制的知识^[13]。此法可用来研究弛豫机制,是一个突出的优点。但其结果受理论模型的精确性影响颇大,而且须以其它实验得到的精度很高的弛豫数据为基础。

也有人采用激光脉冲增益测量等技术来确定弛豫速率。测量激光器在一定条件下的增益或脉冲波形,再由理论分析反推出某个过程的弛豫速率(认为其它过程的速率均已知),也为不少人采用。但此法是间接的,往往在很大程度上受理论模型和其它过程数据的可靠性影响,结果难于精确可靠。

自四十年代以来,气动技术一直是测定弛豫速率的重要手段,用得最多的是激波管。激波波阵面中平动温度突跃,对于多数气体,转动弛豫与平动弛豫相差不多,都只需几次碰撞(对于转动弛豫较慢的气体,可以用激波管测其转动弛豫速率)就可达到平衡。而T,R-V间的传能速率甚慢,随着振动的逐渐激发,平(转)动温度将逐渐降低,这也体现为密度在突跃后的渐变(见图5)。用干涉仪、纹影仪测密度的这种渐变,就可得到振动弛豫速率。近来用得更为普遍的是测量激波后红外辐射随时间的变化。与荧光一样,这种红外辐射与相应振型的振动能成正比,由衰减常数便可求得弛豫速率。初期,激波管只能用来研究V-T过程,1966年开始用来研究V-V过程^[14]。实验装置见图6,图中两套检测系统是为了同时测定两种波长的光辐射。使用激波管,很容易在大范围内改变温度、压力和组分,所以至今仍是测定高温数据的

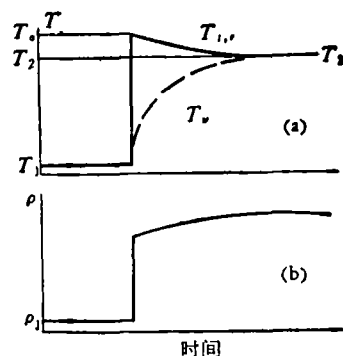


图5 激波波前之后的弛豫

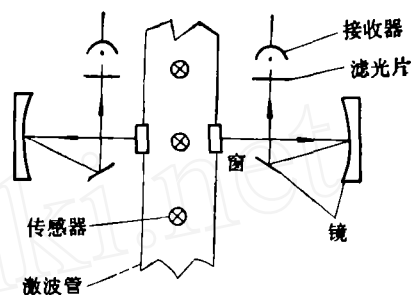


图6 激波管测弛豫时间装置

主要方法。但它的精度较差,样品中难免混入微量杂质,数据常很分散,且难于在较低温度下($\leq 1000\text{K}$)作实验。还有人利用反射激波后的高温高压气体,通过喷管膨胀,在下游测量振动温度,再借助非平衡流的理论分析,用尝试法反过来确定弛豫时间。目前,此法采用得较少。

超声波的吸收和频散,自三十年代以来就被用来测定弛豫时间。开始也主要用来研究V-T过程,随着实验技术的提高和理论分析的发展,已可用来研究V-V和R-T过程。实验精度较高。由于实验条件所限,一般都只用于室温及不太高的温度。实验设备相当复杂,作实验和进行数据处理也较麻烦。

(四)

从历史上看,对弛豫过程的研究在五十年代曾是一个高潮,以航空和宇航事业为背景,六十年代中期以来掀起了一个新的热潮,与激光密切相关。此期间弛豫研究所选择的对象,大都取自新激光体系的探索、激光分离同位素、激

(下转第315页)

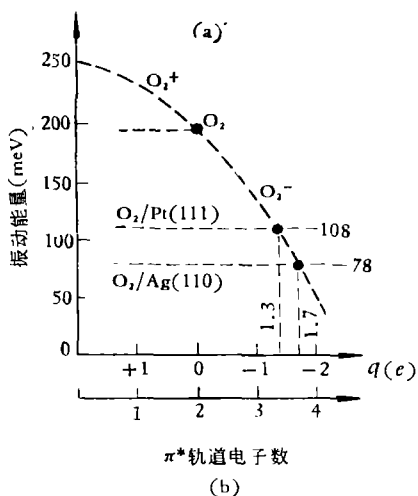
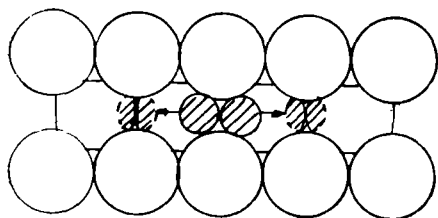


图 12

- (a) Ag(110) 面上分子 O_2 吸附(影圈)模型. 显示约在 -160°C 时形成分子前兆态;
 (b) 分子 O_2^+ 的振动能作为转移到反键轨道 π^* 电子数的函数

所以关于表面振动的实验研究对于研究表面的稳定性、表面重构和表面吸附原子的构型具有重要意义。还应当指出,表面振动对研究全反射的机理、拉曼散射以及其他粒子束的非弹性散射都很有影响。

参 考 文 献

- [1] R. F. Wallis, *Lattice Dynamics of Crystal Surface*, (1973), Pergamon Press.
- [2] J. L. Bleustein, *Appl. Phys. Lett.*, **13**(1968), 412.
- [3] Yu. V. Gulyaev, *Zh. Eksp. Teor. Fiz. Pis. V Red.*, **9**(1969), 63
- [4] D. L. Mills and E. Burstein, *Reports on Progress in Physics*, **37-7**(1974), 817.
- [5] N. Marchall and B. Fisher, *Phys. Rev. Lett.*, **28**(1972), 811
- [6] John de Klerk, *Phys. Today*, **25-11** (1972), 32.
- [7] H. Froitzheim *Electron Energy Loss Spectroscopy*, in *Electron Spectroscopy for Surface Analysis* (Edited by H. Ibach, 1977. Verlag Berlin).
- [8] R. F. Wallis, in *Proceedings of The Fourth International Conference on Solid Surface and The Third European Conference on Surface Science*, **II**(1980), 723.

(上接第 288 页)

光化学等课题。

弛豫过程的实验研究现在已达到相当高的水平。已对若干非常快速的传能过程,如转动弛豫、 H_2O 的弛豫、 CO_2 的 ν_1 与 ν_2 振型间的 Fermi 共振传能等,进行了测量;同时激发和监视几个能级,研究复杂的过程;测量极低气压下的激光荧光来确定激发态分子的扩散系数;确定弛豫机制等等。

研究弛豫过程的一个重要特点,是将理论工作和实验研究紧密结合起来。用低至 100K 的弛豫实验数据来检验碰撞理论计算的结果。将精确的实验测量与严密的理论分析结合起

来,才得以实现快速、复杂过程和弛豫机制的研究。

随着实验技术的发展,随着碰撞理论的不完善,随着以微观粒子碰撞作为物理机制的各种课题的深入研究,对弛豫过程的研究有广阔的发展前景。它可能会继续预见一些新现象,成为一个生长点。除了可以紧密联系许多有实用意义的课题外,它还有理论价值:检验和发展微观动力学模型和计算方法,研究微观粒子的相互作用势等,使我们对原子、分子的知识更加丰富;从长远看,它还可能对力学理论体系的微观化作出贡献。

(下转第 320 页)

(2) 为了探索波长为 $1-2\ \mu\text{m}$ 的激光源, 发展了多种两价过渡金属元素掺杂的固体激光器。例如: 晶体 Ni:MgF_2 在 77K 时用 YAG 泵浦可得 $1.61-1.74\ \mu\text{m}$ 的激光, 连续单模偏振输出 100 mW, 调 Q 输出脉宽 500 ns, 峰值功率 140 W。晶体 $\text{CO}_2:\text{MgF}_2$ 已得到波长为 $1.63-2.08\ \mu\text{m}$, 功率 100 mW 的连续输出。现已有可能生长 $\phi = 3.7\ \text{cm}$, $l = 7.5\ \text{cm}$ 的大晶体, 可望得到 10 W 连续输出或单次脉冲输出 100 mJ。晶体 Ni:MgO 在 80K 已获得 $1.32\ \mu\text{m}$ 波长, 9 W 连续输出或 6.5 W 的单模输出。

(3) 在波长短于有机染料的紫外截止限范围, 晶体 $\text{Ce}^{3+}:\text{YLF}(\text{LiYF}_4)$ 中离子 Ce^{3+} 由 $5d$ 到 $4f$ 的跃迁产生波长为 325 nm 和 309 nm 的两个吸收峰。用 KrF 激光泵浦该晶体可产生上述两波长的激光, 单次脉冲输出为 3 mJ, 能量转换效率达 7%。

2. 准分子激光器

关于准分子激光器, 会议有不少报道。包括电子束激励卤化物(如 XeF , Xe_2Cl 等)准分子, 以产生紫外和可见的可调谐激光器; 在 Ar-Xe-CCl_4 系统中观察到准分子 Xe_2Cl 的激光, 中心波长为 518 nm, 在蓝、绿色光范围内可调谐; 还有用高电流密度、短脉冲激励准分子 KrF, 获得激光输出为 24 J/l 或 500 MW/l, 效率达 10%。

3. 其它激光器

(1) 在波长为 $16\ \mu\text{m}$ 附近的激光器的探索。包括可用可调 CO_2 激光泵浦 NSF (氮-硫-氟) 分子, 可得 $618-658\ \text{cm}^{-1}$ 的激光; FCIO 分子在光泵下, 可得 $16.3-17.7\ \mu\text{m}$ 之间的 34 条新谱线, 输出功率为 4 mW。

(2) Javan 教授研制成功一种小型高压 CO_2 激光器, 器件长不到 30 cm, 连续输出可达几十瓦。

(3) 电子束激励的空心阴极紫外激光器的研制也正在深入进行。

除了上述三大方面外, 会上还提出了激光化学, 激光应用于物理以及其它方面的应用, 共有文章 55 篇; 激光等离子体及激光核聚变方面的文章 8 篇; 理论方面的文章 24 篇。此处不再赘述。

在第十一届国际量子电子学会议上, 王大珩先生被特邀在会上作了有关中国激光研究的专题报告, 此外我国代表在会议上共宣读了八篇论文, 其中不少是属于前沿性的基础研究工作, 受到与会的注意, 就论文的数量和质量来说都是前所未有的。愿我们共同努力, 使我国在量子电子学这个研究领域取得更大的成就。
(叶佩弦 张绮香)

参 考 文 献

[1] Digest of Technical Papers (Eleventh International Quantum Electronics Conference, 1980).

(上接第 315 页)

参 考 文 献

- [1] A. B. Callear, in Photochemistry and reaction Kinetics (ed. by P. G. Ashmore et al.). ch. 7, Cambridge Univ. Press (1967).
- [2] J. D. Anderson, Jr., Gasdynamic Lasers: An Introduction, Academic Press (1976).
- [3] J. F. Clarke & M. McChesney, Dynamics of Relaxing Gases, Butterworths, 2nd ed. (1976).
- [4] J. F. Clarke, *Rep. Prog. Phys.*, 41-6(1978), 807.
- [5] C. B. Moore (ed.), Chemical and Biochemical Applications of Lasers, vol. 1-3(1974, 1977), Academic Press.
- [6] J. D. Lambert, Vibrational and Rotational

- Relaxation in Gases, Oxford Univ. Press (1977).
- [7] A. Javan et al., *Appl. Phys. Lett.*, 8-3(1966), 63; *Phys. Rev. Lett.*, 17-5(1966), 233.
- [8] M. Margottin-Maclou et al., *Appl. Opt.*, 10-8 (1971), 1768.
- [9] 严海星, 力学学报, 3(1980), 319.
- [10] C. K. Rhodes, M. J. Kelly & A. Javan, *J. Chem. Phys.*, 48-12(1968), 5730.
- [11] R. R. Jacobs et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-10-5(1974), 480.
- [12] R. R. Jacobs et al., *Phys. Rev.*, A, 11-1(1975), 54.
- [13] M. Huetz-Aubert et al, *Physica*, 93C-2(1978), 237.
- [14] R. L. Taylor et al., 11th Symp. (Intern.) on Combustion, The Combustion Institute, (pub. 1967), 49; *J. Chem. Phys.*, 50-4(1969), 1720.