

寻求光泵 FIR 激光器工作物质的一种方法

许福永 陈孟尧 赵克玉 杜立

(兰州大学无线电物理与计算机科学系)

提要: 用“双基团振动”和“直线型三基团振动”的物理模型解释了已有光泵 FIR 激光器的工作机理, 并由此得到了寻求光泵 FIR 激光器工作物质的一种方法。

A method of searching for working materials of optically pumped FIR lasers

Xu Fuyong, Chen Menyao, Zhao Keyu, Du Li

(Department of Radio Physics and Computer Science, Lanzhou University)

Abstract: The mechanism of the known working materials for optically pumped FIR lasers is explained on the basis of the physical model of di-group vibration and linear tri-group vibration. Mathematical derivation shows a fairly good result. Based on this result a method of searching for working materials of optically pumped FIR lasers is obtained.

目前, 利用光泵远红外(FIR)激光器在六七十种分子中已发现了千余条 FIR 谱线。改换 FIR 激光的频段, 需要更换激光器的工作物质; 提高 FIR 激光器的输出功率, 则需要转换效率较高的工作物质。然而, 目前已有的工作物质中产生较高的 FIR 激光功率的为数不多, 且功率转换效率很低。为了获得新的 FIR 谱线和提高 FIR 激光器的输出功率及其转换效率, 寻求 FIR 激光器新的工作物质是很必要的。

一、析光泵 FIR 激光器工作物质的辐射机理

光泵 FIR 激光器绝大部分采用 CO₂ 激光器作为泵浦源。FIR 公认的工作机理是如

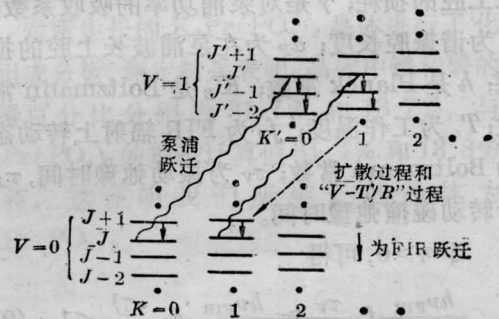


图1 泵浦跃迁吸收与 FIR 跃迁辐射

图1所示的“振转跃迁”模型^[1]。图中V是分子振动能级量子数, J是分子总角动量子数, K是总角动量在分子对称轴上的投影角动量子数。跃迁辐射有几种形式, 一种是泵浦后直接造成的(1, J', K')与(1, J'-1, K')能级间的跃迁, 称为直接泵浦粒子数反

收稿日期: 1985年3月18日。

转跃迁辐射,第二种是泵浦跃迁后落到下能级(1, $J'-1, K'$)上的粒子继续往更低的(1, $J'-2, K'$)能级上跃迁,称为级联辐射跃迁;第三种是由于泵浦抽空了基振动态(0, J, K)上的粒子,从而在它与其上一能级(0, $J+1, K$)间形成粒子数反转分布而产生跃迁辐射,称为抽运反转跃迁辐射。另外,量子数 K 不同的能级中,随工作物质不同,其 J 能级的间隔有时相同。于是一条泵浦线可以在不同 K 的能级中同时发生泵浦吸收而产生许多 FIR 辐射,即所谓“多线辐射”现象。

泵浦功率 P_P 转换为 FIR 激光功率 P_{FIR} 的最大效率 η 由文献[1]给出为:

$$\eta = \frac{P_{\text{FIR}}}{P_P} = \frac{1}{(1+g_i/g_j)} \left(\frac{\nu_{\text{FIR}}}{\nu_P} \right) \times \left(\frac{T}{A+T} \right) \left(\frac{\gamma L}{\gamma L + a_P} \right) \times \left(1 - \frac{h\nu_{\text{FIR}}}{K_B T_C} f_j \frac{\tau_V}{\tau_{\Delta J}} \right) \quad (1)$$

其中 g_i, g_j 分别为上下转动能级的简併度, ν_{FIR}, ν_P 分别为 FIR 辐射频率与泵浦频率; T 为 FIR 腔输出镜的透过率; A 为在 FIR 波长上腔的损耗; γ 是对泵浦功率的吸收系数; L 为谐振腔长度; a_P 为在泵浦波长上腔的损耗; h 是 Planck 常数; K_B 是 Boltzmann 常数; T_C 为工作温度; f_j 为 FIR 辐射上转动态的 Boltzmann 常数; τ_V 为振动弛豫时间, $\tau_{\Delta J}$ 为转动碰撞弛豫时间。

令 $\eta > 0$, 可得

$$\frac{h\nu_{\text{FIR}}}{K_B T_C} f_j \frac{\tau_V}{\tau_{\Delta J}} = \frac{h\nu_{\text{FIR}}}{K_B T_C} f_j \frac{\tau_{\Delta J}^{-1}}{\tau_V^{-1}} < 1 \quad (2)$$

这就是 J. R. Tucker 在 1974 年提出的“Tu_c ker 模型”的正增益判据^[2]。由(1)与(2)式可见,比值 $\frac{\tau_{\Delta J}^{-1}}{\tau_V^{-1}}$ 越小, η 越高。

在已知的千余条光泵 FIR 谱线中,效率最高的是 CH_3OH 的 $119 \mu\text{m}$ 谱线,其输出连续波功率可达 400 mW, $\eta=1.33\%$; 其次是 CH_2F_2 , 它在 4 W 功率的泵浦下可产生 44

mW 的 $165.9 \mu\text{m}$ 谱线的功率输出, $\eta=1.1\%$ 。但对大多数 FIR 谱线, η 一般低于 10^{-5} 甚至 10^{-9} 。

二、用“基团”模型分析已有的 FIR 辐射的工作物质

附表中列出了可查找到的 63 种 FIR 辐射的工作物质,按其化学结构,大体可分为如下几类。

1. 卤代烷类化合物(1~24);
2. 醇类化合物(25~33);
3. 甲基与一价分子基团的化合物(包括醚、胺、腈、炔烃, 34~38);
4. 烯炔类化合物(39~41);
5. 醛类化合物(42~48);
6. 卤代炔类化合物(49);
7. 酸类化合物(50);
8. 非有机类化合物(51~63)。

借助有机化学中对分子化学键和分子基团特征频率的分析结果^[3], 分类考察工作物质分子, 可以发现大多数分子可近似简化为“双基团振动”和“直线型三基团振动”模型, 而且它们的振动特征频率处于 CO_2 激光的频率范围。例如对卤代烷类分子甲基卤 CH_3-X (X 表示 $\text{F}, \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$), 由于 $\text{C}-\text{H}$ 键的振动特征频率很高, 约 3000 cm^{-1} ^[3], 故在 CO_2 激光泵浦下, $\text{C}-\text{H}$ 键不振动, CH_3 基团可视为一个整体。这样, 可将分子的振动简化为图 2 所示的“双基团振动”模型。可化为这种模型的还有第 2、3 类中含有 $-\text{OH}, -\text{SH}, -\text{NH}_2, -\text{CN}$ 等大多数分子以及第 4~8 类中的一些分子, 如 $\text{HCHO}, \text{NH}_2\text{NH}_2, \text{HF}, \text{CH}_2=\text{CHCN}$ 等。

另外, 对于卤乙烷 ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{X}$)、乙醇 ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$)、甲醚 (CH_3OCH_3)、氯乙烯 ($\text{CH}_2=\text{CHCl}$)、水 (H_2O) 及二氧化硫 (SO_2) 等分子, 则可近似化为“直线型三基团振动”模型, 如图 3 所示。

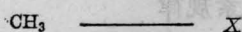
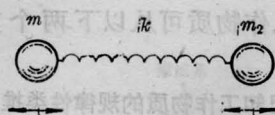


图2 双基团振动模型

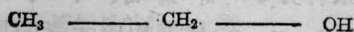


图3 直线型三基团振动模型

对于“双基团振动”模型的分子的伸缩振动,可以近似看作是简谐振动,其振动的本征波数为^[3,4]:

$$\begin{aligned} \tilde{\nu}_0 &= \frac{1}{2\pi C} \sqrt{k \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \\ &= 1303 \sqrt{K \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)} \quad (3) \end{aligned}$$

式中 C 为光速, $K = 10^{-5} k \text{ dyn/cm}$, k 为键力常数, m_1 、 m_2 分别是两基团的质量, 而 M_1 、 M_2 则是对应的原子量。

“直线型三基团振动”模型的振动频率可应用力学的方法求得^[5]。

求得本征波数为:

$$\begin{aligned} \tilde{\nu}_{01} &= \frac{\omega_1}{2\pi C} \\ &= 1303 \sqrt{\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}} \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\nu}_{02} &= \frac{\omega_2}{2\pi C} \\ &= 1303 \sqrt{\frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}} \quad (5) \end{aligned}$$

式中已将各基团质量 m_1 、 m_2 、 m_3 分别换为原子质量单位 M_1 、 M_2 、 M_3 了, 则 $A = M_1 M_2 M_3$, $-B = K_1 M_3 (M_1 + M_2) + K_2 M_1 (M_2 + M_3)$, $C = K_1 K_2 (M_1 + M_2 + M_3)$ 。对于不同的化学键 K 值不同, 单键 K 取 4~6, 双键 K 取 8~12, 三键 K 取 12~18^[3]。

经过对 CH_3OH 、 CH_3Cl 、 NH_2NH_2 等一些分子的计算表明, 由(3)式计算出的振动本

征波数均在 CO_2 激光的泵浦波数范围内。这说明符合“双基团振动”模型的一些分子具有红外(CO_2 激光)吸收的振动能级。而对于符合“直线型三基团振动”模型的 $\text{CH}_2=\text{CHCN}$ 、 CH_3OCH_3 、 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{F}$ 等一些分子由(4)与(5)式计算出的本征波数与泵浦波数吻合得不太好。这是由于对振动模型作了过于简单的近似, 而忽略了各基团间相互影响的缘故。

计算表明, 对于“双基团振动”模型的分子的转动惯量处于与 FIR 谱区对应的范围, 这说明它们具有 FIR 谱区的转动能级间隔。而对于“直线型三基团振动”模型的分子, 其转动惯量的计算值比实际值稍大, 这是由于将化学键视为刚性键, 并忽略了各基团间的相互影响之故。上述不同类型的分子, 其 I 值均在几乎相同的数量级上, 这表明它们的转动跃迁辐射都在 FIR 谱区内。

根据化学中各种共价键的电矩数据^[6], 分析已有的光泵 FIR 激光器的工作物质分子, 可以发现它们都是带有一定固有电矩的极性分子。因为固有电矩的存在, 使得 FIR 辐射成为偶极辐射。由量子力学可知受激辐射的跃迁几率为

$$B_{J' \rightarrow J} = \frac{4\pi^2}{3\hbar^2} |e\gamma_{J' \rightarrow J}|^2 \quad (6)$$

其中 e 为电荷量, $\gamma_{J' \rightarrow J}$ 为 J' 态和 J 态之间的坐标矩阵元, $|e\gamma_{J' \rightarrow J}|$ 则为电矩。由此可见, 跃迁几率与固有电矩的平方成正比。有些分子, 例如乙烷(CH_3CH_3)等, 虽具有红外区的振动能级和远红外区的转动能级间隔, 但因它们的固有电矩为零, 故它们不能产生 FIR 辐射。而卤乙烷($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{X}$)则不同, 由于 $\text{C}-\text{X}$ 键具有较大的固有电矩^[6], 所以它们可以产生 FIR 辐射。

另外为使 FIR 辐射的跃迁几率足够大, 则要求工作物质分子的能级结构不能过于复杂, 这等价于要求工作物质分子的结构不能太复杂。因为分子的诸能级间总的跃迁几率为 1, 若能级密集、复杂, 则分配到每一对能

级间的跃迁几率将减小;其次,分子结构复杂将导致分子线度增大,质量增加,从而转动惯量增大而使转动常数减小,为产生 FIR 辐射就要有较大的 J 值,这样随着能级的增高跃迁几率也将减小。因此,工作物质有较小的分子量和较简单的结构,对于提高 FIR 辐射的跃迁几率是有利的。

三、工作物质的必备条件及其规律性

根据以上分析,光泵 FIR 激光器的工作物质需要具备如下条件:

(1) 工作物质分子应具有强烈的红外泵浦吸收跃迁;

(2) 工作物质分子应具有足够大的电矩,其电偶极矩 ≥ 1 德拜^[7],组成分子的基团应是那些具有较大电吸引力或排斥性的原子团,如卤素、碳、氧、羟基、氨基等;

(3) 工作物质分子应具有 FIR 谱区的转动能级跃迁,分子结构不能太复杂,分子量不能太大。文献[7]指出分子量应小于 75 原子质量单位,而文献[8]又认为应不多于 6 个原子且至少有一个重原子。但对这两种说法都有不少例外,如 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{I}$ 、 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ 、 $\text{CH}_2\text{OHCH}_2\text{OH}$ 、 CH_3OCH_3 、 $(\text{HCHO})_3$ 等。因此,只要分子转动惯量不大就可以。若分子中化学键较短,则分子量可稍大。由于化学键长多在 0.1~0.2nm 之间,故一条直链上的化学键数不宜多于三条。一般而言,分子量较小,原子数较少有利于大功率 FIR 输出;

(4) 工作物质分子应具有较小的热化速率 τ_d^{-1} 和较大的振动弛豫速率 τ_r^{-1} 。文献[8]指出,原子数不多于 6 且有一个重原子的分子将有助于增大 τ_r^{-1} 和有利于对泵浦功率的吸收。

基于上面对光泵 FIR 激光器工作物质的辐射机理和已知工作物质特点的分析,

选择新的工作物质可从以下两个方面来考虑。

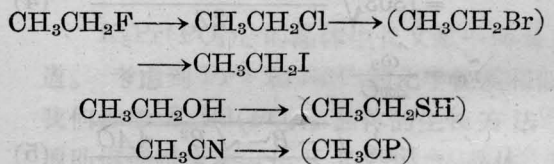
(一)从已知工作物质的规律性类推

1. 同位素规律

工作物质中某一原子用其同位素原子代替,仍可能成为光泵 FIR 激光器的工作物质。从分子结构上考虑,同位素规律应适合于工作物质分子中的任何一个原子。一般说来,对某种分子 $\text{X}_{n_1}\text{Y}_{n_2}\text{Z}_{n_3}$ (X、Y、Z 代表元素符号, n_1 、 n_2 、 n_3 代表相应元素的原子数),若每种原子有两种同位素,则该同位素分子的数目为 $\prod_{i=1}^3 (n_i + 1)$ 。例如甲醇 CH_3OH (CH_4O),则有 20 种同位素分子。因此,根据同位素规律可从已知的工作物质分子推出其相应的同位素分子作为新的工作物质。然而由于自然界中各种元素的同位素的自然丰度差别很大,故某些同位素分子非常稀少或不易合成,从而不能成为一种有效的的光泵 FIR 激光器的工作物质。

2. 某些工作物质分子的同族元素互代规律

在元素周期表上属于同一族的元素,其化学性质相似,在某些工作物质中可以互代。例如卤族元素(F、Cl、Br、I),氧与硫,氮与磷等。根据这一规律可以预言一些新的工作物质。例如



上面括号中的分子是目前尚未使用过的。应该指出,同族元素互代对分子能级产生的影响较之于同位素互代的影响要大得多。因为前者的分子质量变化较大。因此,同族元素互代规律仅适用于对分子特征频率影响不大的场合,例如 CH_3X 和 CH_3NH_2 等某些分子基团。由这类分子的“双基团振动”模型可知,决定分子能级的主要是双基团分子的约化质

附表 已有的光泵 FIR 激光器的工作物质

| 编号 | 名称 | 结构简式 | 谱线数 | 备注 |
|----|--------------|-----------------------------------|-----|----|
| 1 | 氟甲烷 | $^{12}\text{CH}_3\text{F}$ | 22 | |
| 2 | 氟甲烷 | $^{13}\text{CH}_3\text{F}$ | 10 | |
| 3 | 氟氘甲烷 | $^{12}\text{CD}_3\text{F}$ | 26 | |
| 4 | 氟氘甲烷 | $^{13}\text{CD}_3\text{F}$ | 10 | |
| 5 | 氯甲烷 | $\text{CH}_3^{35}\text{Cl}$ | 28 | |
| 6 | 氯甲烷 | $\text{CH}_3^{37}\text{Cl}$ | | |
| 7 | 氯氘甲烷 | CD_3Cl | | |
| 8 | 溴甲烷 | $\text{CH}_3^{79}\text{Br}$ | 35 | |
| 9 | 溴甲烷 | $\text{CH}_3^{81}\text{Br}$ | | |
| 10 | 碘甲烷 | CH_3I | 25 | |
| 11 | 碘氘甲烷 | CD_3I | | |
| 12 | 溴氟甲烷 | $\text{CF}_3^{79}\text{Br}$ | 1 | |
| 13 | 溴氟甲烷 | $\text{CF}_3^{81}\text{Br}$ | 1 | |
| 14 | 二氟甲烷 | CH_2F_2 | 13 | |
| 15 | 一氟氯甲烷 | CHCl_2F | | |
| 16 | 二氟氯甲烷 | CHClF_2 | 3 | |
| 17 | 二氯甲烷 | CH_2Cl_2 | 1 | |
| 18 | 三氯氘甲烷 | CD_2Cl_2 | 7 | |
| 19 | 四氟甲烷 | CF_4 | | |
| 20 | 氟乙烷 | $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{F}$ | 31 | |
| 21 | 1, 1-二氟乙烷 | CH_3CHF_2 | 4 | |
| 22 | 1, 1, 1-三氟乙烷 | CH_3CF_3 | 1 | |
| 23 | 氯乙烷 | $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{Cl}$ | 4 | |
| 24 | 碘乙烷 | $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{I}$ | 2 | |
| 25 | 甲醇 | CH_3OH | 233 | |
| 26 | 氘羟基甲醇 | CH_3OD | 47 | |
| 27 | 一氘甲醇 | CH_2DOH | 19 | |
| 28 | 二氘甲醇 | CHD_2OH | 11 | |
| 29 | 三氘甲醇 | CD_3OH | 21 | |
| 30 | 氘化甲醇 | CD_3OD | 31 | |
| 31 | 甲硫醇 | CH_3SH | 23 | |
| 32 | 乙醇 | $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ | 21 | |

| 编号 | 名称 | 结构简式 | 谱线数 | 备注 |
|----|----------|--------------------------------------|-----|----------------------------------|
| 33 | 乙二醇 | $\text{CH}_2\text{OHCH}_2\text{OH}$ | 42 | |
| 34 | 甲醚 | CH_3OCH_3 | 6 | |
| 35 | 甲胺 | CH_3NH_2 | 32 | |
| 36 | 乙腈 | CH_3CN | 45 | |
| 37 | 异腈 | CH_3NC | 3 | |
| 38 | 丙炔 | $\text{CH}_3\text{C}\equiv\text{CH}$ | 15 | |
| 39 | 氯乙烯 | $\text{CH}_2=\text{CHCl}$ | 28 | |
| 40 | 1,1-二氟乙稀 | $\text{CH}_2=\text{CF}_2$ | 48 | |
| 41 | 丙稀腈 | $\text{CH}_2=\text{CHCN}$ | 19 | |
| 42 | 甲醛 | HCHO | | |
| 43 | 一氘甲醛 | DCHO | 7 | |
| 44 | 氘化甲醛 | DCDO | 9 | |
| 45 | 乙醛 | CH_3CHO | 6 | |
| 46 | 丙炔醛 | $\text{HC}\equiv\text{CCHO}$ | 4 | |
| 47 | 三聚甲醛 | $(\text{HCHO})_3$ | 13 | |
| 48 | 甲酰氟 | FCHO | 11 | |
| 49 | 氟代乙炔 | $\text{HC}\equiv\text{CF}$ | 1 | |
| 50 | 甲酸 | HCOOH | 90 | |
| 51 | 水 | H_2O | 2 | |
| 52 | 重水 | D_2O | 55 | |
| 53 | 一氘硫化氢 | DHS | 1 | |
| 54 | 硫化氘 | D_2S | 2 | |
| 55 | 臭氧 | O_3 | 3 | |
| 56 | 二氧化硫 | SO_2 | 3 | |
| 57 | 硫氧化碳 | OCS | 1 | |
| 58 | 氟化氢 | HF | 6 | HF 激光泵浦 |
| 59 | 二氧化氯 | ClO_2 | 5 | |
| 60 | 氟化氰 | FCN | 1 | |
| 61 | 氨 | NH_3 | 49 | 其中有7条为 N_2O 激光泵浦 |
| 62 | 磷化氢 | PH_3 | 44 | |
| 63 | 肼 | NH_2NH_2 | 10 | |

量 $\mu_M = \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)^{-1}$, 而一般 $M_2 > M_1$, 故能级主要决定于 M_1 (即 CH_3), 这时用同族元素互代规律对能级的影响较小。而对于 CH_2F_2 、 CH_2Cl_2 、 $\text{CH}_2\text{OHCH}_2\text{OH}$ 、 HCHO 、 NH_2NH_2 等分子, 其能级主要决定于 F、Cl、O、N 等原子, 经计算表明, 同族元素互代规律不适用于这类分子。

(二) 根据简化模型和与已知的工作物质分子相似的化学结构, 寻找新的工作物质

由第二部分的分析可以发现下列物质有可能产生 CO_2 激光泵浦的 FIR 辐射。

- (1) 丙烷 ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$);
- (2) 丙酮 (CH_3COCH_3);
- (3) 碳酸 (OHCOOH);
- (4) 乙酸 (CH_3COOH);
- (5) 甲硫醚 (CH_3SCH_3);
- (6) 二甲胺 (CH_3NHCH_3);
- (7) 丁炔 ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}\equiv\text{CH}$);
- (8) 乙胺 ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{NH}_2$)。

上述物质的特点是振动吸收能级间的波数 (在 $950 \sim 1300 \text{ cm}^{-1}$ 之间) 和 CO_2 泵浦激光的谱区较大部分重迭, 分子线度中等, 分子量不大, 转动惯量在 $10^{-38} \sim 10^{-39} (\text{g}\cdot\text{cm}^2)$ 之间,

分子为非对称型, 都有一定的电矩, 而且在附表中可以找到与它们相似或相近的分子结构。

用简化的“基团振动”模型说明工作物质的辐射机理, 是一种简易的分析方法。该法简明直观, 可用它迅速判断一种物质是否可以作为工作物质, 甚至预言新的工作物质。当然, 这种方法还有某些不足之处, 如不够严格等, 尚需进一步研究。

参 考 文 献

(上接第 350 页)

参 考 文 献

- [1] Tolles. W. M. *et al.*; *Appl. Spectrosc.*, 1977, **31**, 253~272.
- [2] K. Schofield, M. Steinberg; *Opt. Engineering*, 1981, **20**, No. 4, 501.
- [3] Stanley M. Klainer; *Opt. Engineering*, 1983, **22**, No. 3, 281.
- [4] Charles C. Wang, L. I. Davis Jr., *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **25**, No. 1, 34.
- [5] Russell K. Lengel; *J. Chem. Phys.*, 1977, **67**, No. 5, 2085.
- [6] Russell K. Lengel; *J. Chem. Phys.*, 1978, **68**, No. 12, 5309.
- [7] Calvin Chen, John W. Daily; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 8, 1357.

- [1] 傅恩生, 黄贡; 《红外物理与技术》, 1980, No. 6, 43.
- [2] Tucker J. R.; *Int. Conf. on Submillimeter Waves and their Applications*, Atlanta, Georgia USA, June 5-7, E7 (1974).
- [3] 南京大学化学系有机化学教研室编; 《有机化学》, 上册, p. 339~402.
- [4] [美] E. H. 威切曼著, 复旦大学物理系译; 《量子物理学》, 科学出版社, 1978 年, p. 412~420.
- [5] [美] H. 戈德斯坦著, 汤家镛, 陈为恂译; 《经典力学》, 科学出版社, 1981 年, p. 393.
- [6] 南京大学化学系有机化学教研室编; 《有机化学》, 上册, p. 18.
- [7] Danielewicz E. J., Weiss C. O.; *IEEE J. Quant. Elect.*, 1978, **QE-14**, No. 10, 704.
- [8] Danielewicz E. J. *et al.*; *IEEE J. Quant. Elect.*, 1980, **QE-16**, No. 4, 402.

- [8] David H. Campbell; *Appl. Opt.*, 1984, **23**, No. 5, 689.
- [9] David R. Crosley; *Opt. Engineering*, 1981, **20**, No. 4, 511.
- [10] J. H. Bechtel; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 13, 2100.
- [11] Calvin Chen, John W. Daily; *Appl. Opt.*, 1980, **23**, No. 12, 1963.
- [12] Paul M. Doherty, David R. Crosley; *Appl. Opt.*, 1984, **23**, No. 5, 713.
- [13] P. M. Selzer, Charles C. Wang; *J. Chem. Phys.*, 1979, **71**, No. 9, 3786.
- [14] G. H. Dieke, H. M. Crosswhite; *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1962, **2**, 97~199.
- [15] William R. Anderson *et al.*; *Combustion and Flame*, 1982, **48**, 163~176.
- [16] M. Alden *et al.*; *Lund Reports on Atomic Physics LPAP-1*, 1981.