

掠射光栅复合腔调频

吴令安 许祖彦 邓道群 郭东升

(中国科学院物理所)

提要: 本文介绍一种结合了掠射光栅扩束及复合腔式谐振腔优点的脉冲染料激光系统。输出线宽可小于 0.1\AA , 调频范围可达 500\AA 以上, 调频效率超过 30%, 与单独掠射光栅调频腔相比, 输出功率可提高几倍。

Tuning of a compound cavity with a grazing-incidence grating

Wu Ling'an, Xu Zuyan, Deng Daoqun, Guo Dongsheng

(Institute of Physics, Academia Sinica)

Abstract: A pulsed dye laser system combining the advantages of beam expansion by a grating at grazing incidence and compound cavity tuning is described. It can produce an output of less than 0.1\AA linewidth over a tunable range of greater than 500\AA . The tuning efficiency can exceed 30%. Compared with a tuning cavity using just the grazing-incidence grating, the output power can be increased by several factors.

一、引言

在脉冲染料激光系统中采用光栅扩束法既可以调频又可以达到较窄的线宽, 而且装置简单。由于掠射光栅衍射损耗大, 使用光泵为氮分子或倍频 YAG 激光器比较好, 例如 Littman^[1]、Shoshan^[2]、Saikan^[3] 和 Iles^[4] 已报导的工作。用闪光灯泵浦染料激光器, 直接从零级输出, 所得到的功率却太低; 利用复合腔注入的方法^[5], 即让被选模反馈回一个主谐振腔, 输出功率可成倍地提高。

本文介绍两种结构的掠射光栅扩束复合腔系统, 对其输出功率、线宽、调频范围等参数给出了理论和实验结果。

二、理论计算

两种结构的光路如图 1。图中 D 为闪光灯泵浦的染料激光头, S 为光栅, M_1 为全反射镜, M_2 、 M_3 分别为反射率是 r_2 、 r_3 的反射镜。光路的主要特点在于增加了 M_2 , 在结构 A 中 M_2 插在 S 前面, 在结构 B 中 M_2 在 S 后面。

激光束以掠射角入射到 S 后分为两束, 一级经 M_3 反射后回到 S 和染料池, 零级在结构 A 中直接输出, 而在结构 B 中则经 M_2 反射回到 S 和 D 。设结构 A 主谐振腔 M_1DM_2 、结构 B 主谐振腔 M_1DSM_2 和光栅调频腔 M_1DSM_3 的腔长分别为 L_1 、 L_2 和

收稿日期: 1981年8月4日。

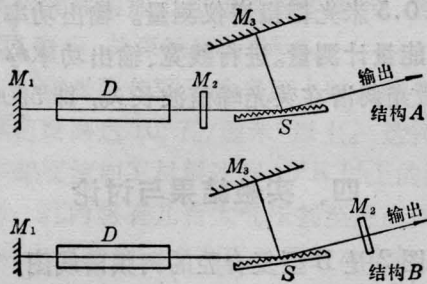


图1 掠射光栅复合腔的光路图

L_3 。令 r_0, r_1 分别为光栅对入射光的零级和一级衍射效率, r'_0, r'_1 分别为光栅对相应的反回光束的衍射效率(对结构 A, 不涉及 r'_0)。

根据文献[5], 被选的第 j 模能抑制宽带的任意第 n 模的必要条件为:

$$\frac{g(\lambda_j)}{g(\lambda_0)} > \frac{\xi_j}{\xi_n \left(1 + \frac{1}{2L}\right) - \frac{g(\lambda_0)}{L}} \quad (n \neq j). \quad (1)$$

式中 $g(\lambda_j)$ 和 $g(\lambda_0)$ 分别为单位时间内第 j 模和染料荧光谱峰模的线性增益系数, ξ_j 和 ξ_n 分别为单位时间内第 j 模和第 n 模的损耗, L 为模数。下面对结构 A 和结构 B 两种情况的损耗分别进行讨论。

结构 A.

在 M_1M_2 宽带谐振腔中单位时间内被抑制的第 n 模的平均损耗率为

$$\xi_n = -\frac{c}{2L_1} \ln r_2 \quad (2)$$

其中 c 为光速。这里忽略了工作物质吸收损耗、 M_1 的散射、吸收和腔的衍射等损耗。考虑到通过 M_3SM_2 的反馈贡献, 在 M_1M_2 宽带振荡腔中单位时间内第 j 模的平均损耗率为:

$$\xi_j = -\frac{c}{2L_1} \ln [r_2 + t^2 r_1 r'_1 r_3 + t^2 r_2 (r_1 r'_1 r_3)^2 + \dots]$$

式中 t 为 M_2 的透过率。对于掠入射情况, $r_1 r'_1$ 很小, 因而可以忽略高次项, 上式可写成:

$$\xi_j = -\frac{c}{2L_1} \ln [r_2 + t^2 r_1 r'_1 r_3 (1 + r_1 r'_1 r_3 r_2)] \quad (3)$$

由(1)、(2)和(3)得到调频条件为

$$\frac{g(\lambda_j)}{g(\lambda_0)} > \frac{\ln [r_2 + t^2 r_1 r'_1 r_3 (1 + r_1 r'_1 r_3 r_2)]}{\left(1 + \frac{1}{2L_A}\right) \ln r_2 + \frac{G(\lambda_0)}{2L_A}} \quad (4)$$

其中 L_A 为模数, $L_A = \frac{2L_1 \delta \lambda}{\lambda^2}$, $\delta \lambda$ 为线宽。

假定激光系统为均匀增宽的, 又已看成是稳态的, 则可用四能级系统的输出功率表达式。没有 M_2 时, 由光栅零级输出调谐波长为 λ_0 的功率为

$$P_{\text{调}} = W r_0 \left(\frac{G(\lambda_0)}{-\ln r_1 r'_1 r_3} - 1 \right) \quad (5)$$

其中 W 为正比于工作物质截面面积及饱和参量的常数。

加 M_2 后由光栅零级输出的功率为

$$P_A = W r_0 t [1 + r_1 r'_1 r_3 r_2 + (r_1 r'_1 r_3 r_2)^2 + \dots] \times \left\{ \frac{G(\lambda_0)}{-\ln [r_2 + t^2 r_1 r'_1 r_3 (1 + r_1 r'_1 r_3 r_2)]} - 1 \right\}.$$

略去高次项,

$$P_A = W r_0 t (1 + r_1 r'_1 r_3 r_2) \times \left\{ \frac{G(\lambda_0)}{-\ln [r_2 + t^2 r_1 r'_1 r_3 (1 + r_1 r'_1 r_3 r_2)]} - 1 \right\} \quad (6)$$

由(5)和(6)式得出 A 型复合腔输出功率比单独光栅调频腔输出功率提高的倍数 M_A 为

$$M_A = \frac{P_A}{P_{\text{调}}}.$$

令 $R_1 = r_1 r'_1, r_3 = 1$,

所以

$$M_A = t(1 + R_1 r_2) \times \frac{\left\{ \frac{G(\lambda_0)}{-\ln [r_2 + t^2 R_1 (1 + R_1 r_2)]} - 1 \right\}}{\left\{ \frac{G(\lambda_0)}{-\ln R_1} - 1 \right\}}.$$

结构 B

在 M_1SM_2 宽带谐振腔中单位时间内被抑制的第 n 模的平均损耗率为

$$\xi_n = -\frac{c}{2L_2} \ln(r_0 r_0' r_2) \quad (8)$$

第 j 模在 $M_1 S M_2$ 腔中振荡, 在 M_1 和 S 之间它的光强应加上调频腔的反馈贡献, 于是单位时间内第 j 模的平均损耗率为

$$\xi_j = -\frac{c}{2L_2} \ln(r_0 r_0' r_2 + r_1 r_1' r_3) \quad (9)$$

由(1)、(8)和(9)得调频条件为

$$\frac{g(\lambda_j)}{g(\lambda_0)} > \frac{\ln(r_0 r_0' r_2 + r_1 r_1' r_3)}{\left(1 + \frac{1}{2L_B}\right) \ln r_0 r_0' r_2 + \frac{G(\lambda_0)}{2L_B}} \quad (10)$$

其中 $L_B = \frac{2L_2 \delta \lambda}{\lambda^2}$ 为模数。

由光栅零级输出的功率为

$$P_B = W r_0 t \left\{ \frac{G(\lambda_0)}{-\ln(r_0 r_0' r_2 + r_1 r_1' r_3)} - 1 \right\} \quad (11)$$

由(5)式和(11)式算出 B 型复合腔输出功率比单独光栅调频腔输出功率提高的倍数 M_B 为

$$M_B = t \frac{\left\{ \frac{G(\lambda_0)}{-\ln(R_0 r_2 + R_1)} - 1 \right\}}{\left\{ \frac{G(\lambda_0)}{-\ln R_1} - 1 \right\}} \quad (12)$$

其中 $R_0 = r_0 r_0'$ 。

三、实验装置

对两种结构的复合腔都进行了实验。激光头为用双直管闪光灯泵浦的染料激光器。染料池长度为 10 厘米, 内径 3 毫米。染料为天津市染料研究所产的 R6G 乙醇溶液, 浓度约 2.5×10^{-4} 克分子/升。光栅为 1800 条/毫米复制光栅, 尺寸 26×26 毫米, 闪耀波长 5000 \AA 。 M_1 、 M_2 、 M_3 为平面镜。结构 A 中 $M_1 M_2$ 的间距 L_1 为 32 厘米, L_3 为 48 厘米; 结构 B 中 $M_1 M_2$ 的间距 L_2 为 48 厘米, L_3 不变。

测量线宽用空气间距为 1 毫米的 F-P 标准具, 照相机的焦距为 500 毫米。调频范

围用 0.5 米光栅摄谱仪测量。输出功率用微焦级能量计测量。进行线宽、输出功率等测量时, 激光调谐在荧光峰值波长 λ_0 , 即 5900 \AA 。

四、实验结果与讨论

图 2 是 B 型复合腔的调频谱线图, 可见调频范围两个边界光同时出现单谱线和宽带谱, 然后只出现以 5900 \AA 为中心的宽带谱。

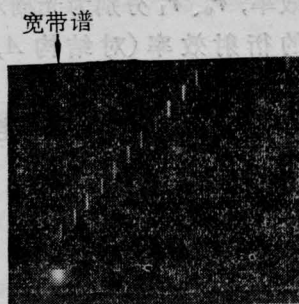


图 2 B 型复合腔的调频范围
入射角 87° , $r_2 = 0.32$, 输入能量 28.7 焦耳

由标准具拍摄的干涉环示于图 3, 测得的线宽最小可达 $0.03 \sim 0.05 \text{ \AA}$ 。根据 Shoshan^[2] 的公式, 算得单程线宽理论值对 83° 入射角为 1.35 \AA 。所测线宽比其他作者在类似情况下用氮分子激光泵浦染料所得的线宽更窄(文献[4]对前作者的工作进行了比较, 另见[6])。显然, 如果入射角更大, 光栅线条更多并用另一光栅代替反射镜 M_3 , 线宽应当可以更窄。



图 3 用标准具测量线宽所得干涉环
 B 型复合腔, 入射角 83° , 测量波长 5811 \AA , 标准具间距 1 毫米, 照相机焦距 500 毫米

调频范围与反射率 r_2 和输入能量的关系分别示于图 4 和图 5。在理论曲线的计算

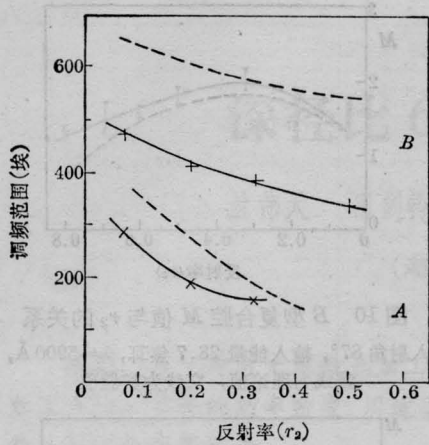


图4 调频范围与反射率 r_2 的关系

入射角 83° , 输入能量 28.7 焦耳, 上面为 B 型复合腔, 下面为 A 型复合腔, 虚线为理论值, 实线为实验值

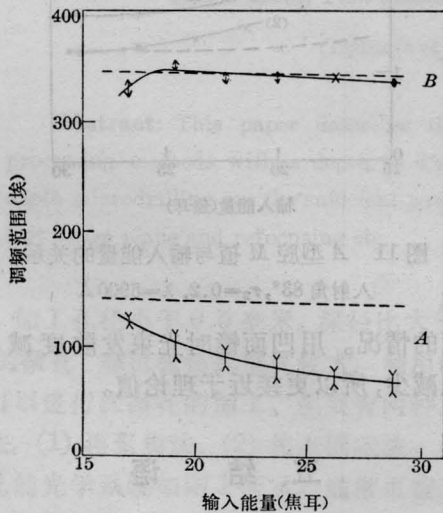


图5 调频范围与输入能量的关系

入射角 87° , $r_2=0.2$ 。上面为 B 型复合腔, 下面为 A 型复合腔。虚线为理论值, 实线为实验值

中, 公式(4)和(10)中模数 L_A 、 L_B 取近似值 50, 即 $\delta\lambda$ 用平均线宽。图 4 中理论值(虚线)偏高的原因是没有将消耗性损耗考虑在内。

图 5 中结构 B 的实验曲线在输入能量降到 19 焦耳以下时开始下降, 是因为这时虽然条件(4)仍然满足, 调频范围两端一直是单谱线, 但两端的损耗较大, 以致于复合腔振荡不起来。结构 A 未出现这个问题是因为其阈值较低, 而输入能量没有降到阈值之下。

入射角为 83° 的复合腔的输出能量与输入能量的关系示于图 6, 同时给出宽带腔和调频腔的输出曲线作为比较。可见, A 型复合腔的激光效率约为 0.04%, 调频效率(即与宽带输出之比)约为 30%。与调频腔相比, 效率提高 25% 以上。对于结构 B, 由于输出镜的耦合损耗, 输出能量与调频腔的相差不多, 因此未画出。但如果入射角增加, 光栅的一级衍射效率下降, 则 A 型和 B 型复合腔的效率相对于调频腔的效率都大大增加, 可达到其二、三倍, 如图 7 所示 87° 的情况。由于光栅尺寸的限制, 掠射光束有一部分从两

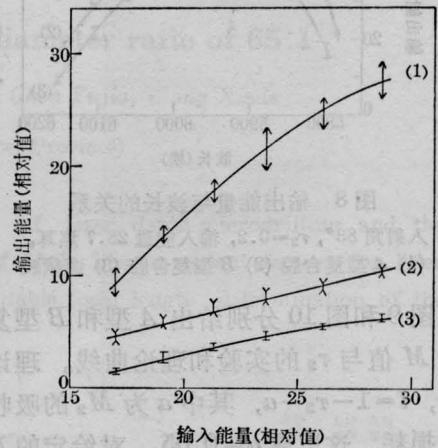


图6 输出能量与输入能量的关系

入射角 83° , $r_2=0.5$, $\lambda=5900 \text{ \AA}$ 。(1) 宽带腔 (2) A 型复合腔 (3) 调频腔

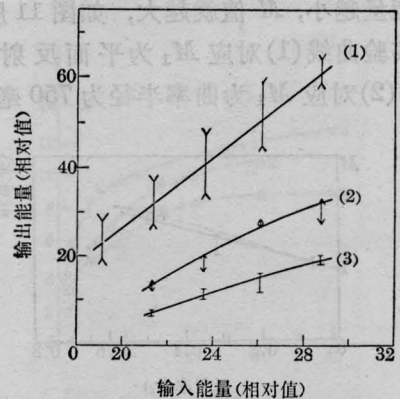


图7 输出能量与输入能量的关系

入射角 87° , $r_2=0.32$, $\lambda=5900 \text{ \AA}$ 。(1) A 型复合腔 (2) B 型复合腔 (3) 调频腔

边损失掉了,所以如果使用足够宽的光栅,激光效率还望可以提高,尤其对 87° 的腔。

三种腔的输出能量与波长的关系示于图 8。对 B 型腔,曲线比较平,调频范围宽。 A 型腔没有 B 型腔那么平,可能是因为这时调频腔反馈的贡献相对少了,宽带腔 M_1M_2 的线型占主导。

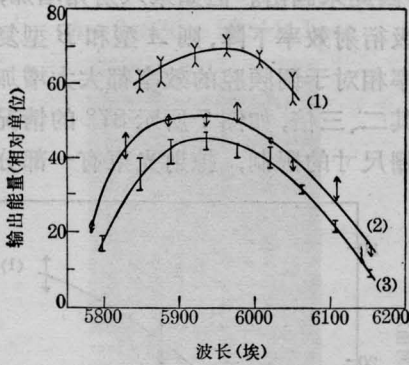


图 8 输出能量与波长的关系

入射角 83° , $r_2=0.2$, 输入能量 28.7 焦耳,
(1) A 型复合腔 (2) B 型复合腔 (3) 调频腔

图 9 和图 10 分别给出 A 型和 B 型复合腔的 M 值与 r_2 的实验和理论曲线。理论计算中, $t=1-r_2-a$, 其中 a 为 M_2 的吸收等各种损耗, 这里取 $a=0.05$ 。对给定的入射角, M 在某一 r_2 值有一峰值。随入射角的增加, 两种腔结构的 M 值都增加, 例如入射角为 83° 时, B 型腔的 M 值小于 1。另外, 当泵浦能量越小, M 值就越大, 如图 11 所示。图中实验曲线 (1) 对应 M_1 为平面反射镜的情况, (2) 对应 M_1 为曲率半径为 750 毫米凹

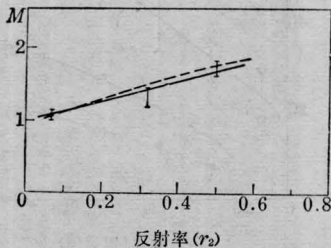


图 9 A 型复合腔 M 值与 r_2 的关系

入射角 83° , 输入能量 28.7 焦耳, $\lambda=5900 \text{ \AA}$, 虚线为理论值, 实线为实验值。

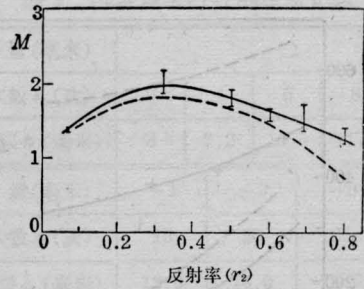


图 10 B 型复合腔 M 值与 r_2 的关系
入射角 87° , 输入能量 28.7 焦耳, $\lambda=5900 \text{ \AA}$,
虚线为理论值, 实线为实验值

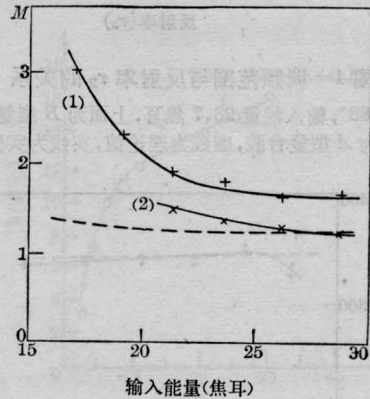


图 11 A 型腔 M 值与输入能量的关系
入射角 83° , $r_2=0.2$, $\lambda=5900 \text{ \AA}$

面镜的情况。用凹面镜时光束发散度减小, 损耗减少, 所以更接近于理论值。

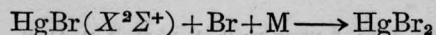
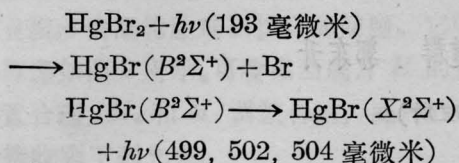
五、结 语

掠射光栅复合腔调频方法是一种简单实用的方法, 可获得较窄的线宽和较大的功率, 在闪光灯泵浦的染料激光器上试验表明, 激光线宽可达 $0.03 \sim 0.05 \text{ \AA}$ 。 A 型腔有较大的能量输出(调频效率可达 30% 以上), 但可调谐范围窄, B 型腔根据光栅衍射效率特性, 可调谐范围可以比调频腔还宽(大于 500 \AA), 但 M 值不及 A 型腔高。总之当光栅入射角大, 或一级衍射效率低, 输入能量或介质增益低, 复合腔调频方法就越显示出优越性。

(下转第 697 页)

在调偏其中一个反射镜时,在上述同样实验条件下曝光100次以上,在谱板上没有看到任何谱线。

用 ArF 准分子激光光解 HgBr₂ 的离解和复合过程如下:



其中 M 代表 He 气。复合时间约为 10 微秒。HgBr₂ 的吸收峰为 198 毫微米,正好落在 ArF 的激光波段(193 毫微米),吸收截面 $\sigma_{\max} = 1.32 \times 10^{-17}$ 厘米^[4]。HgBr₂(1¹Σ_g⁺ → 1¹Σ_u⁺) 的能量间距为 208 毫微米^[4],约 6.3 电子伏,而 ArF 激光光子的能量为 6.4 电子伏,因而 ArF 准分子激光对 HgBr₂ 的光解激发是较为有效的。HgBr₂ 吸收 193 毫微米光子后激发到 HgBr₂(1¹Σ_u⁺) 态,进而 HgBr₂(1¹Σ_u⁺) 态分解为 HgBr(B²Σ⁺) 态和 HgBr(X²Σ⁺) 态,它们都是束缚态,其束缚能为 0.7 电子伏^[5]。[5] 已指出 Br 的两种同位素 Br⁷⁹、Br⁸¹ 的天然丰度为 50.54% 和 49.46%,同位素位移 ~6 Å。据 [6] 给出的数据,我们可以计算 HgBr 两种同位素的跃迁波长。如 HgBr⁸¹(B → X) 跃迁波长可以由下式计算:

$$\begin{aligned} \nu (\text{厘米}^{-1}) &= 23485 + 135.1V' - 0.275V'^2 \\ &\quad - 186.47V'' + 0.967V''^2 + 0.009V''^3 \end{aligned}$$

其中 V' 和 V'' 分别表示上能级和下能级不同的振动量子数。据上式计算可得 HgBr⁸¹(0-21) 跃迁为 4980.3 Å, HgBr⁸¹(0~22) 跃迁为 5013.4 Å, HgBr⁸¹(3-26) 跃迁为

(上接第 702 页)

改善 A 型腔调频范围的方法比较简单,例如将图 1 中全反镜 M₁ 改为全反式布儒斯特棱镜即可。

参 考 文 献

[1] M. G. Littman; *Opt. Lett.*, 1978, 3, No. 4, 138.

5037.4 Å。与我们观察到的三个振动带是符合的。HgBr⁷⁹(B → X) 跃迁可以由类似的公式计算。这样,在不考虑同位素转动效应时,可以算得 HgBr(B → X) 跃迁(0-21) 带的同位素位移约 8.7 Å, (0-22) 带同位素位移约 9.2 Å, (3-26) 带的同位素位移约 10 Å。由于没有标准的同位素谱线图,所以在目前我们不能判别某一条谱线是属于那一个同位素的,也不能确定某一条谱线的 J 值。

根据 HgBr₂ 各能级的能量以及激光光解原理,上述 HgBr₂ 被 ArF 激光光解,得到 HgBr 的激发态,进而产生激光跃迁的能级结构示意图示于图 3。

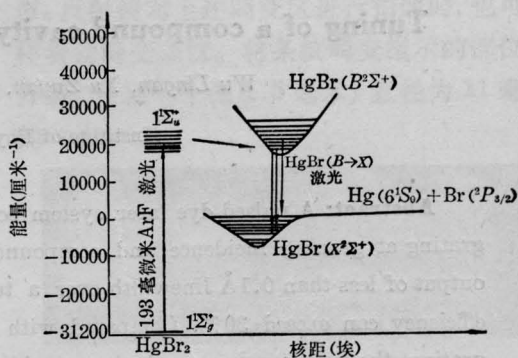


图 3 激光光解 HgBr₂ 得到 HgBr 激光的势能曲线图

参 考 文 献

[1] E. J. Schimitschek et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1977, 31, No. 9, 608.
 [2] W. T. Whitney; *Appl. Phys. Lett.*, 1978, 32, 239.
 [3] 袁才来等;《激光》, 1981, 8, No. 4, 62.
 [4] W. R. Wadt; *J. Chem. Phys.*, 1980, 72, No. 4, 2469.
 [5] J. H. Parks; *Appl. Phys. Lett.*, 1977, 31, 297.
 [6] K. Wieland; *Z. Elektrochem.*, 1960, 64, 761.
 [2] I. Shoshan, U. P. Oppenheim; *Opt. Commun.*, 1978, 25, No. 3, 375.
 [3] S. Saikan; *Appl. Phys.*, 1978, 17, 41~44.
 [4] M. K. Hles et al.; *Opt. Commun.*, 1980, 35, No. 1, 133.
 [5] 许祖彦等;《物理学报》, 1981, 30, No. 6, 820.
 [6] 何迪洁等;《激光》, 1981, 8, No. 1, 49.