

近红外区的光泵钠分子激光振荡*

王祖赓

(华东师范大学物理系, 上海)

提 要

本文报道了以准分子激光泵浦的染料激光激发钠分子, 产生由钠分子 $A^1\Sigma_g^+$ 态到 $X^1\Sigma_g^+$ 态的众多激光输出谱线。当加以谐振腔后, 这些谱线的强度可增加一个数量级。

关键词: 钠分子; 激发光谱; 发射光谱。

一、引 言

近十年来, 对光泵二聚物(dimer)激光进行了较为广泛的研究。使用 I_2 、 Li_2 、 Na_2 、 S_2 、 Se_2 、 Bi_2 、 Te_2 等分子, 已有数以百计的、遍及紫外到近红外光谱区的激光谱线获得运转^[1,2]。

通过光学泵浦钠分子, 已获得了许多激光输出。以激发机制来看, 有的是将 Na_2 激发到较低位的 $A^1\Sigma_g^+$ 态或 $B^1\Pi_u$ 态^[3~5], 有的是以双光子激发 Na_2 到高位偶电子态^[6], 有的是以单光子激发钠分子到高位电子态, 从而产生串级激光辐射^[7~9], 还有是将钠分子激发到高位奇电子态, 产生高位电子态之间的激光输出^[10,11]。从激发方式来看, 大部分以脉冲激光激发^[8,9~11], 从而得到脉冲钠分子激光输出, 一部分是以连续激光激发并加以谐振腔, 从而得到连续钠分子激光输出^[6]。在以脉冲激光激发时, 大多没有加谐振腔, 所得到的单程增益的光泵受激辐射。

本文报道了以准分子激光泵浦的染料激光激发钠分子所产生的、由钠分子 $A^1\Sigma_g^+$ 态到 $X^1\Sigma_g^+$ 态的许多受激辐射。在本工作中, 加了谐振腔, 这时单程增益的受激辐射谱线强度增加一个数量级。显然, 如要获得较好的可调谐支线输出的激光, 必须加谐振腔。

二、激发和发射机制

在本工作中, 以 $XeCl$ 准分子激光泵浦的染料激光激发钠分子, 在使用若丹明 6G 染料时, 染料激光输出的波段范围约为 570 nm 到 610 nm。需要注意的是: 该激发波段范围正好对应于钠分子由基态 $X^1\Sigma_g^+$ 跃迁到激发态 $A^1\Sigma_g^+$ 的强吸收区^[12]。图 1 为有关的钠分子能级示意图。设钠分子经染料激光激发后, 由基态 $X^1\Sigma_g^+$ 的相应振-转能级 1 跃迁到激发态 $A^1\Sigma_g^+$ 的相应振-转能级 2。由玻耳兹曼分布律可知, 处于 $X^1\Sigma_g^+$ 态中较高位的振-转能级(如图 1 中所示的 3), 只有很少的分子布居。于是形成 $A^1\Sigma_g^+$ 态中能级 2 与 $X^1\Sigma_g^+$ 态中能级 3 之间的粒子数反转, 从而产生了对应于能级 2 到能级 3 之间的受激辐射。接着, 通过碰

收稿日期: 1987年5月7日; 收到修改稿日期: 1988年1月30日

* 国家自然科学基金资助课题。

撞弛豫过程使粒子回复到初始能级而完成激光循环。

要注意的是, 由于钠分子的 $X^1\Sigma_g^+$ 和 $A^1\Sigma_u^+$ 态中可具有上百个振动能级, 而每一振动能级又可具有上百个转动能级, 因此对应于具有一定线宽的某一激光输出, 往往在 $X^1\Sigma_g^+$ 态中可以有多个振-转能级被激发, 也即在 $A^1\Sigma_u^+$ 态中可以有多个振-转能级被布居, 从而可产生较为复杂的多线输出。即使 $X^1\Sigma_g^+$ 态中只有一个振-转能级被激发, 即在 $A^1\Sigma_u^+$ 态中只有一个振-转能级被布居, 这时属于同一荧光系列的多条谱线也都有可能产生受激辐射。由分子 $u \rightarrow g$ 态跃迁的选择定则可知, 对应于同一下振动能级 3, 可有两条转动谱线, 它们分别对应于 $\Delta J = +1$ 和 $\Delta J = -1$ (J 为转动量子数)。

为图示清晰和简单起见, 图 1 中未标出该双线。此外, 不同波长的泵浦光(如图 1 中的 λ_1 和 λ_2)可以使处于不同下能级(如图中的 1 和 1')的分子激发到同一激光上能级 2, 从而产生相同波长的激光输出。

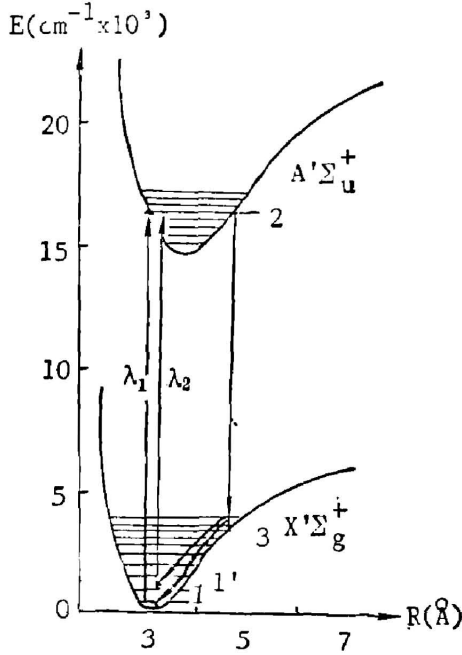


Fig. 1 Related energy levels diagram of the optically pumped Na_2 laser

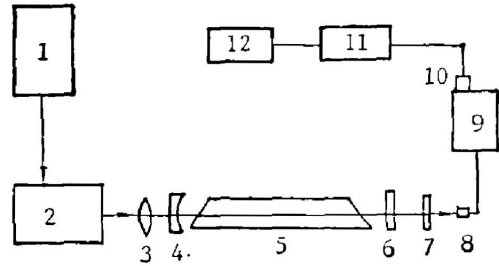


Fig. 2 Experimental set-up

1—XeCl laser; 2—dye laser; 3—focus lens; 4, 6—optical resonator; 5—heat-pipe; 7—filters; 8—fiber; 9—spectrometer; 10—photomultiplier; 11—Boxcar; 12—X-Y recorder

三、实验和激光装置

实验装置如图 2 所示。由 XeCl 准分子激光器(Lambda Physics FL 2002)作为光泵源, 染料激光输出的波段范围为 570 nm 到 610 nm, 在 580 nm 区的输出能量约为 10 mJ, 激光输出脉宽为 15 ns。

由焦距为 50 cm 的透镜将激光束聚焦到钠热管的中心。热管总长为 50 cm, 加热区为 25 cm, 热管两端装有石英布儒斯特窗。热管通常在约 500°C 温度下运转, 这时在热管中的钠分子蒸气约为 0.15 Torr, 而钠原子蒸气压约为 5 Torr 左右。

在热管的入射和出射两端, 分别安装一块球面镜和一块平面输出耦合镜, 以组成光学谐振腔。球面镜对 800 nm 波长区有 99% 以上的反射率, 对泵浦波长则有 98% 的透过率。所使用的输出耦合镜对 800 nm 波长区的反射率有 80% 和 95% 两种, 它们对泵浦光波段均具有高透过率。如果只测量单程增益信号, 则可移去或调偏输出耦合镜。

由热管出射的单程增益信号或通过耦合镜出射的激光信号经过一组合适的滤光片以滤

去剩余的泵浦光后,由光纤将其引入1m光栅单色仪进行分析和由光电倍增管接收,经Boxcar后由X-Y记录器记录。单色仪由标准钨灯和汞灯进行波长定标和校正。

四、结果和讨论

经测定,由热管前向出射的单程定向红外光束的发散角为5 mrad,约与实验中经光学系统后的泵浦光发散角相当。通过适当的反射镜,在热管后向可测得强度约与前向相当的定向红外辐射谱线。另外,这些谱线的强度经加入的谐振腔后,均能得到放大。这些表明实验中所测得的单程红外谱线是受激辐射,而不是由混频等非线性过程所产生的相干辐射。

在实验中,以位于575 nm到610 nm之间的某一波长的染料激光激发钠分子,可测得若干条到十多条位于约800 nm近红外区的钠分子激光线。使用575 nm到610 nm波段内的众多染料激光波长,分别泵浦钠分子,所获得的大量光泵分子激光辐射线位于795 nm到810 nm波段区内。从这些数据和由第二节中对有关激发和发射机制的讨论以及所示的能级图可知,激发的起始能级与激光辐射的下能级之间的能量差,通常要 $>4000\text{ cm}^{-1}$ 以上。这表明,激光把处于 $X^1\Sigma_g^+$ 态底部振-转能级的分子激发到 $A^1\Sigma_g^+$ 态的、位于 16400 cm^{-1} 到 17400 cm^{-1} 区的有关振-转能级,分子发射激光,从而回复到 $X^1\Sigma_g^+$ 态的有关振-转能级要比 $X^1\Sigma_g^+$ 态的底部高 4000 cm^{-1} 以上,即位于 $X^1\Sigma_g^+$ 态的较高部位。当然,泵浦激光还可激发处于较高部位振-转能级上的分子。这时,发射激光后分子将回复到 $X^1\Sigma_g^+$ 态更高位的振-转能级。

图3示出了以波长为601.8 nm的激光输出泵浦钠分子后所记录到的激光辐射线。发射谱中呈现了清晰的钠分子 $X^1\Sigma_g^+$ 态的振动和转动间隔,它们与基态较高部位振-转能级间隔相对应。图3(a)中(a, a')线对与(b, b')线对之间的间隔对应于 $X^1\Sigma_g^+$ 态中相邻的激光下能级(振动能级)之间的间隔,测得的数值为 101.2 cm^{-1} 。b和c谱线之间的间隔为 102.3 cm^{-1} 。a和a'谱线以及b和b'谱线之间的间隔则对应于转动量子数相差为2的转动能级之间的间隔,其值为 11.2 cm^{-1} 。由第二节中的讨论可知,如激光某一上能级的转动量子数为 J ,则线对两谱线所对应的两个激光下能级的转动量子数分

别为 $J+1$ 和 $J-1$ 。图3(a)是在使用谐振腔、而输出腔镜的反射率为95%时所测得的激光发射谱,图3(b)是将此输出镜调偏时所记录的单程受激辐射谱,其纵坐标的标度与图3(a)相同。当然,这时只有5%左右的能量被检测到。实验中发现,该输出腔镜的反射率太高,不属于较好的耦合状态。但即使如此,我们仍可清楚地看到使用谐振腔和谐振腔失去作用时的明显差别。由图中可见,谐振腔可使信号增大十倍左右。

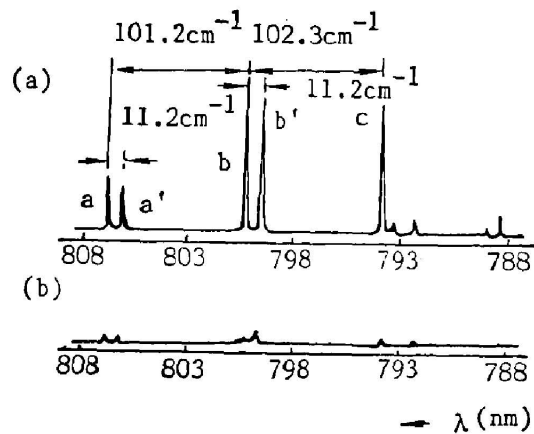


Fig. 3 Na_2 laser emission spectra. Pump wavelength: 601.8 nm. Temperature: 500°C .
(a) with optical resonator; (b) detuning the coupling mirror

图4是以602.2 nm的染料激光泵浦钠分子所记录到的激光发射谱。由图可见,这时谱线较为密集,这显然是由于该波长的激光同时激发了处于相邻振-转能级的分子所造成的。

如果选用在800 nm区反射率为80%的输出腔镜,则可获得较好的效果。这时,激光输出谱线的强度要比使用95%反射率的输出镜时强十多倍。图5(a)和(b)分别示出了使用谐振腔镜和移去腔镜时所测得的激光发射光谱,泵浦波长为585.0 nm。图5(c)为调偏输出腔镜时的情形(图5(a)、(b)和(c)的纵坐标的标度均相同)。显然,由于输出腔镜的反射率为80%,因而所测得的信号强度仅为移去腔镜时的1/5。由图5(a)和(b)相比较可知,使用谐振腔后使激光辐射强度增加了约一个数量级。考虑到泵浦脉宽为15 ns,腔长约为60 cm,蒸气区长25 cm,因而可以估计一个光脉冲在谐振腔内可往返约4次,从而获得不断放大。

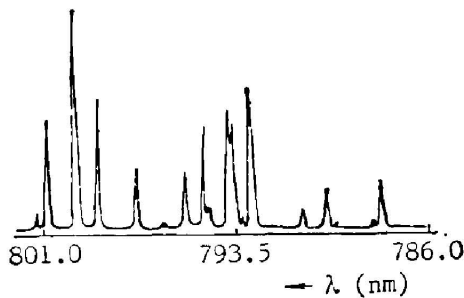


Fig. 4 Na_2 laser emission spectrum.
Pump wavelength: 602.2 nm

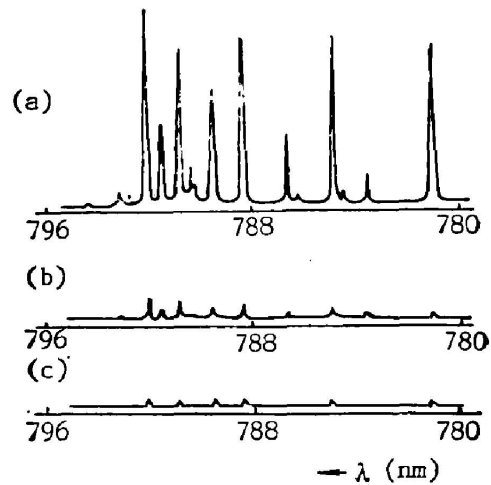


Fig. 5 Na_2 laser emission spectra using output mirror with 80% reflectivity.
Pump wavelength: 585.0 nm.

(a) with resonator; (b) without output mirror;
(c) detuning output mirror

由于分子能级的复杂性,往往不同波长的泵浦光可把处于 $X^1\Sigma_g^+$ 态中不同振-转能级的分子布居到 $A^1\Sigma_g^+$ 态的同一振-转能级上,因而同一波长的钠分子激光可分别由众多的泵浦光波长激发而产生。图6为587.0~591.5 nm区和577.0~580.0 nm区产生797.5 nm钠分子激光的激发光谱。由图6(a)和(b)可见,在上述宽波段范围内(包括该图中未示出的591.5~610 nm、575.0~577.0 nm以及580.0~587.0 nm波段内),除图6(a)中对应于钠原子 $3S \rightarrow 3P$ 的强吸收区,以及图6(b)中对应于钠原子 $3S \rightarrow 4D$ 双光子吸收区,因严重减弱泵浦光强度,从而难以产生分子激光之外,存在许多泵浦波长,它们均能激发产生同一波长的光泵钠分子激光。

图7示出了激光辐射强度与蒸汽温度之间的关系。显然存在温度阈值。在本工作条件下,如果温度低于450°C左右,几乎不能测得激光辐射。这是因为只有在较高温度下才能达到相当的分子浓度。在高于500°C温度时,激光信号渐趋饱和。

图8为激光辐射强度与泵浦能量之间的关系。可见,产生光泵钠分子激光并不需要很大的泵浦能量。通常,几百 μJ 的光泵能量即可,而且能量阈值是很低的。这些都是光泵二

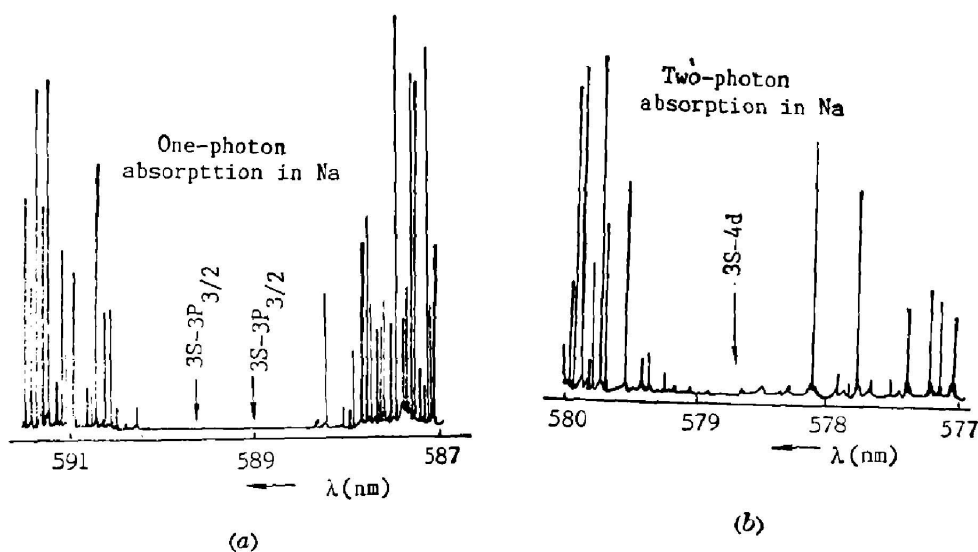


Fig. 6 Excitation spectra for generating 797.5 nm Na_2 laser
(a) in 587.0~591.5 nm region; (b) in 577.0~580.0 nm region

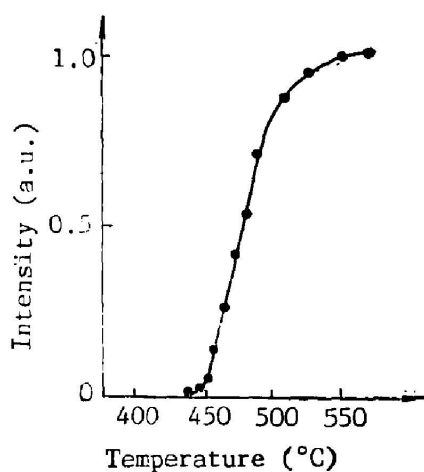


Fig. 7 Dependence of the Na_2 laser intensity on vapor temperature

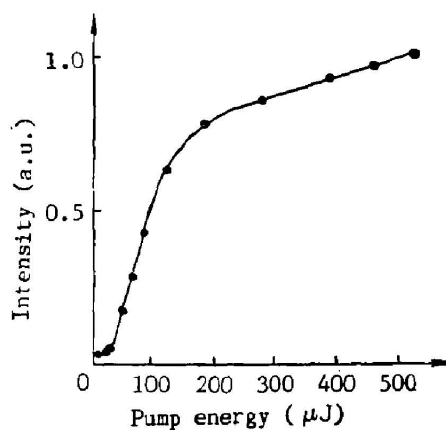


Fig. 8 Dependence of the Na_2 laser intensity on pump energy

聚物分子激光器的特点。

五、结 束 语

以脉冲染料激光泵浦钠蒸气, 在适当的实验条件下, 可以产生位于 795 ~ 810 nm 波段区的大量光泵钠分子激光。由于钠分子介质的高增益、低阈值, 即使不用谐振腔也可测得单

程增益受激辐射。当使用适当的谐振腔时,可以使信号增强约一个数量级以上。

实验工作是在西德 Hannover 大学完成的,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] B. Wellegehausen; *IEEE J. Quant. Elect.*, 1979, **QE-15**, No. 10 (Oct), 1103~1130.
- [2] Catherine N. Man-Pichot and Alain Brilliet; *IEEE J. Quant. Elect.*, 1980, **QE-16**, No. 10 (Oct), 1103~1108.
- [3] M. A. Hennesian, R. L. Herbst and R. L. Byer; *J. Appl. Phys.*, 1976, **47**, No. 4 (Apr), 1515~1518.
- [4] B. Wellegehausen, S. Shandin, D. Friedl and H. Welling; *Appl. Phys.*, 1977, **13**, No. 1 (May), 97~99.
- [5] S. I. Kanorskii, V. M. Kaslin and O. F. Yakushev; *Sov. J. Quant. Elect.*, 1980, **10**, No. 10 (Oct), 1275~1278.
- [6] W. Muller and I. V. Hertel; *Appl. Phys.*, 1981, **24**, No. 1 (Jan), 33~38.
- [7] 王祖庚等; *Opt. Commun.*, 1984, **48**, No. 6 (Jan), 393~402.
- [8] S. Shandin, B. Wellegehausen and Z. G. Ma; *Appl. Phys. B*, 1982, **23**, No. 3 (Nov), 195~200.
- [9] B. Wellegehausen *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**, No. 10 (Nov), 912~914.
- [10] 王祖庚等; *Appl. Phys. B*, 1985, **37**, No. 4 (Aug), 233~238.
- [11] 王祖庚等; *Proceedings of the International Conference on Laser '84*, (K. M. Corcoran, D. M. Sullivan, W. C. Stwalley, STS Press., Mclean, 1985), 291~294.
- [12] H. P. Huber and G. Herzberg; *Molecular Spectra and Molecular Structure. IV. Constants of Diatomic Molecules*, (Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1979), 432~433.

Optically pumped Na₂ laser in near-infrared region*

WANG ZUGENG

(Department of Physics, East China Normal University, Shanghai)

(Received 7 May 1987; revised 30 January 1988)

Abstract

Many laser lines from $A^1\Sigma_u^+$ state to $X^1\Sigma_g^+$ state of molecular sodium were generated by using a excitation source of a dye laser pumped by a XeCl excimer laser. With the aid of a resonator, the laser output was increased by more than 10 times.

Key Words: Na₂; laser spectroscopy; launching spectroscopy.

* Project Supported by the Science Fund of the Chinese Academy of Sciences.