

# 钠双原子分子 $2^3\Pi_u \rightarrow 1^3\Sigma_g^+$ 跃迁 近红外发射光谱

吕志伟 王 隰 何伟明 周耕夫 马祖光  
(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

**摘 要** 用紫外激光泵浦  $\text{Na}_2$  分子高位电子态, 观察到了位于  $0.98\sim 1.04\ \mu\text{m}$  谱区峰值在  $1.0\ \mu\text{m}$  附近的近红外发射谱, 判断其来源于单三重态分子间能量转移后的  $2^3\Pi_u \rightarrow 1^3\Sigma_g^+$  跃迁。

**关键词** 钠双原子分子, 三重态跃迁, 光谱。

## 1 引 言

碱金属二聚物研究一直是人们十分感兴趣的课题, 已进行了相当多的研究, 钠双原子分子中从紫外到近红外谱区大量的荧光跃迁和受激发射光谱已经被观察到了, 有许多还获得了激光振荡。然而, 主要是来源于分子单重电子态之间的跃迁, 已观察到的三重态之间的跃迁则很少。主要原因是由于从单重基态到三重激发态之间跃迁的光学禁戒造成了三重态粒子数布居的困难。目前都是通过粒子的碰撞能量转移或是通过单三重态间的扰动所形成的混合态使三重激发态获得粒子数集聚, 这在很大程度上限制了对三重态的研究, 以致现在人们对三重态的了解仍然很少, 有待进一步的深入研究。

Allegrini 等<sup>[1]</sup>早在 1980 年利用染料激光共振激发  $\text{Na } 3P$  原子态就已观察到了钠双原子分子位于  $0.9\sim 1.2\ \mu\text{m}$  谱区峰值在  $1.04\ \mu\text{m}$  和  $1.1\ \mu\text{m}$  的荧光发射谱。利用紫外激光激发  $\text{Na}_2$  分子高位电子态, 王祖赓等<sup>[2]</sup>(用  $\text{Nd}:\text{YAG}$  三倍频的  $354.719\ \text{nm}$  和  $354.706\ \text{nm}$  泵浦)报道了获得峰值在  $1.03\ \mu\text{m}$  附近的受激发射, 王骥等<sup>[3]</sup>(用  $\text{N}_2$  激光  $337.1\ \text{nm}$  和  $\text{XeF}$  激光  $351.1\ \text{nm}$  泵浦)也报道获得的  $0.98\sim 1.01\ \mu\text{m}$  峰值在  $0.995\ \mu\text{m}$  的荧光发射谱。但上述作者均没有对此光谱进行详细讨论, 其来源至今尚不清楚。

本文工作利用紫外染料激光在  $339.568\ \text{nm}$  附近泵浦钠双原子分子, 也观察到了位于  $0.98\sim 1.04\ \mu\text{m}$  谱区峰值在  $1.0\ \mu\text{m}$  附近的荧光发射谱, 并确定其来源于由  $2^1\Pi_u$  态到  $2^3\Pi_u$  态粒子数转移所形成的  $2^3\Pi_u \rightarrow 1^3\Sigma_g^+$  三重态之间的跃迁。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示。XeCl 准分子激光器(Lambda Physik 公司 EMG201MSC)输出波长

\* 本项工作得到国家自然科学基金资助。

收稿日期:1994 年 11 月 27 日; 收到修改稿日期:1995 年 3 月 9 日

308 nm, 脉宽 25 ns, 用来泵浦染料激光器(Lambda Physik 公司 FL2002E), 染料采用 PTP, 输出光谱范围为 335~347 nm, 最大输出能量约 2 mJ, 激光脉宽 14 ns, 线宽 0.016 nm。钠蒸气在热管炉中产生, 管长 67 cm, 加热区长约 24 cm, 窗片为熔石英玻璃, 其中充入氩缓冲气体。脉冲染料激光聚焦后直接入射到热管炉中, 产生的荧光信号经滤光片滤光(>640 nm 通过)、透镜汇聚, 由石英光纤耦合到 0.5 m 扫描单色仪中(SPEX1870), 光栅为 600 1/mm, 闪烁波长为 1.25  $\mu\text{m}$ 。荧光信号由光电倍增管探测(RCA8852), 再由 Boxcar 积分平均器处理(EG&G 公司 M162, M165), X-Y 记录仪记录(K200)。Boxcar 由光触发器触发(EG&G 公司 M1301), 泵浦激光能量由能量计探测(ED200), 示波器监视(TeK7834)。

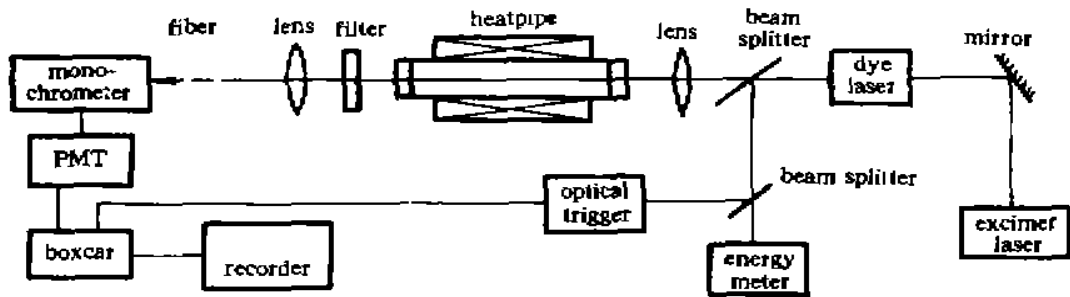


Fig. 1 Experimental setup

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 荧光谱观察

当泵浦波长为 339.568 nm, 热管炉中填充 2 kPa 氩缓冲气体, 加热温度为 550  $^{\circ}\text{C}$  时, 观察到的激光感生荧光谱如图 2。其中位于 819 nm 的是钠原子  $3D-3P$  跃迁谱线, 在更高分辨率下可以看出其双线结构。从 690~810 nm 峰值在 800 nm 谱带是人们熟知的  $\text{Na}_2 1^1\Sigma_g^+ \rightarrow 1^1\Sigma_g^+$  跃迁谱带<sup>[4]</sup>。峰值在 688 nm 附近的发射谱带为受激发射, 最早由王祖赓等观察到<sup>[2]</sup>, 来源于钠双原子分子中的四波混频过程<sup>[5]</sup>。位于 910 nm 附近的强受激发射最早报道见文献<sup>[6, 7]</sup>, 其主要来源为  $\text{Na}_2 2^1\Pi_u \xrightarrow{\sim 2.54 \mu\text{m}} 3^1\Sigma_g^+ \xrightarrow{\sim 910 \text{ nm}} 1^1\Sigma_g^+$  级联跃迁的第二步<sup>[8]</sup>。820~900 nm 谱带是来自于  $\text{Na}_2 1^3\Sigma_g^+ \rightarrow 1^3\Sigma_g^+$  三重态间的跃迁, 首先由马祖光等观察到<sup>[6, 7]</sup>, 其后又有许多作者用光泵浦<sup>[9]</sup>, 放电泵浦<sup>[10]</sup>和电子束泵浦<sup>[11]</sup>分别观察到, 并予以进一步证实。

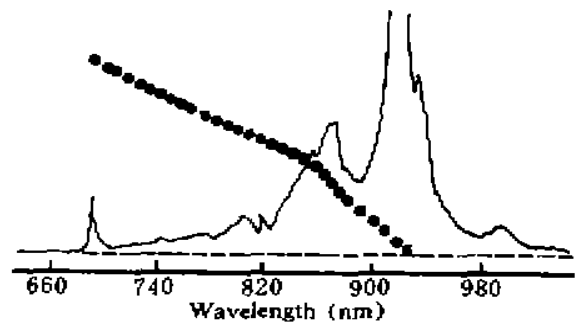


Fig. 2 Emission spectrum in the region of 0.6~1.06  $\mu\text{m}$  from sodium vapor ( $\lambda_p = 339.568 \text{ nm}$ ,  $P_{Ar} = 2 \times 10^3 \text{ Pa}$ ,  $T = 550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). The dotted line represents the responsivity of the photomultiplier

除上述各谱带外, 本实验中还观察到了位于 0.98~1.04  $\mu\text{m}$  峰值在 1  $\mu\text{m}$  附近的发射谱带(见图 2), 考虑到光电倍增管大致的光谱响应范围为 260~920 nm, 在 1  $\mu\text{m}$  附近响应灵敏度已经很低, 此谱带的实际发射强度比记录到的谱带强度明显要大。在以往报道中, 王祖赓等<sup>[2]</sup>和王骥等<sup>[3]</sup>的实验与本实验所采用的泵浦方式相差不多, 均为紫外光泵浦, 观察到的

谱带范围与峰值位置也比较相似。Allegrini 等<sup>[1]</sup>采用的则是共振激发钠原子  $3S \rightarrow 3P$  跃迁(波长为 589 nm), 泵浦方式与本实验明显不同, 获得的光谱区域也更宽, 这与其通过激发态原子间碰撞形成激发态分子的激发机制相一致。但以上工作均没有对此发射谱带的来源加以分析, 而有待进一步的研究做出判断。

### 3.2 激发上能态确定

近紫外激光 339.568 nm 泵浦钠蒸气, 可以激发钠双原子分子的  $2^1\Pi_u$  态, 这在过去用相近波长泵浦的实验中已有许多例证<sup>[12, 13]</sup>。为了判别 339.568 nm 泵浦时的激发上能态, 作者在与泵浦激光相近的后向接收荧光发射信号(后向接收的目的是减小泵浦激光的干扰), 观察到了 300~460 nm 范围内的两个发射谱带, 见图 3。310~360 nm 范围内峰值在 345 nm 附近的谱带为  $2^1\Pi_u \rightarrow 1^1\Sigma_g^+$  跃迁谱, 其中 310~340 nm 对应于反斯托克斯跃迁, 此结果与 Verma 等<sup>[12]</sup>的研究结果相一致, 这表明  $2^1\Pi_u$  态得到了激发。另一方面, 激发  $2^1\Pi_u$  态的同时伴随有紫色扩散带的发射<sup>[1, 13]</sup>, 图 3 中 430~460 nm 谱带即为紫色扩散带, 此谱带几乎在细节上都与 Bahns 等<sup>[13]</sup>的观察结果相一致。因此, 可以认为 339.568 nm 确实激发了  $2^1\Pi_u$  态。

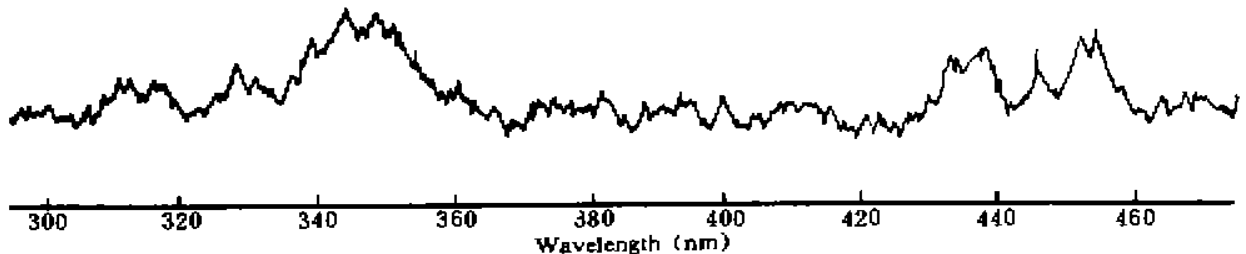
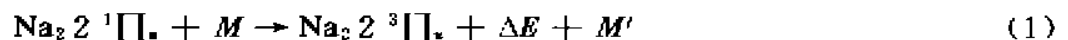


Fig. 3 Emission spectrum in the region of 300~460 nm from sodium vapor,  $\lambda_p = 339.568$  nm,  $P_p = 667$  Pa,  $T = 500$  °C

### 3.3 $2^3\Pi_u$ 态粒子数布居的可能

按照 Jeung<sup>[14]</sup>给出的势能曲线, 考虑从  $2^1\Pi_u$  态及  $2^1\Pi_g$  态以下各电子态向下能态的跃迁, 可以产生 1  $\mu\text{m}$  附近发射谱带的跃迁主要有  $2^1\Pi_u \rightarrow 2^1\Sigma_g^+$  和  $2^3\Pi_u \rightarrow 1^3\Sigma_g^+$ 。而文献[3]的分析表明,  $2^1\Pi_u \rightarrow 2^1\Sigma_g^+$  跃迁的 Franck-Condon(F-C)因子非常分散, 其对应的发射光谱范围也非常宽, 没有明显的峰值, 对应于 1  $\mu\text{m}$  附近跃迁的 F-C 因子也比较小, 因此, 作者认为由  $2^1\Pi_u \rightarrow 2^1\Sigma_g^+$  跃迁产生本实验中 1  $\mu\text{m}$  附近谱带的可能性较小。

用紫外激光激发  $2^1\Pi_u$  态, 通过碰撞能量转移使  $2^3\Pi_u$  态获得粒子, 从而产生  $2^3\Pi_u \rightarrow 1^3\Sigma_g^+$  跃迁的紫色扩散带发射已为人们所熟知<sup>[1, 13]</sup>。由于  $2^1\Pi_u$  态与  $2^3\Pi_u$  态势能位置相近, 且势能曲线存在交叉, 碰撞能量转移过程具有比较高的效率。与此过程相似,  $2^3\Pi_u$  态可以由碰撞能量转移过程:



获得粒子。其中  $M$  为碰撞伙伴, 可以是缓冲气体原子或钠原子, 也可以是钠分子。 $\Delta E$  为碰撞前后钠分子态的能量差。由于  $2^1\Pi_u$  态势阱完全位于  $2^3\Pi_u$  态势阱之中<sup>[14]</sup>, 且相距很近, 两个能态的大量振转能级几乎处于相同的能量位置和相同的核间距范围, (1) 式所描述的碰撞过程中  $\Delta E$  几乎为零, 并且碰撞前后钠分子的核间距几乎不变, 因此应该有较高的转移效率。

### 3.4 $2^3\Pi_u \rightarrow 1^3\Sigma_g^+$ 跃迁的 F-C 因子

利用 Jeung<sup>[14]</sup>给出的势能曲线, 采用非谐振子模型求解振动能级薛定谔(Schrodinger)方程, 本文数值计算了  $\text{Na}_2 2^3\Pi_u \rightarrow 1^3\Sigma_g^+$  跃迁的 F-C 因子(见表 1)和 Deslandre 表(见表 2)。由

表中可见,  $2^3\Pi_u \rightarrow 1^3\Sigma_g^+$  跃迁的 F-C 因子比较集中, 具有较大 F-C 因子的跃迁构成了一条 Condon 抛物线, 其中一支正对应于  $0.98 \sim 1.03 \mu\text{m}$  谱区, 并且以  $1 \mu\text{m}$  附近的多个跃迁为最强, 如表 1 和表 2 中划线的跃迁所示。Condon 势物线的另一支则对应于  $900 \sim 960 \text{ nm}$  范围。这两个光谱范围内的发射谱带在实验中均观察到了(见图 2 的荧光谱), 理论计算与实验观察符合得很好。

Table 1. Franck-Condon Factors for the  $2^3\Pi_u(v')$   $\rightarrow$   $1^3\Sigma_g^+(v'')$  transitions of  $\text{Na}_2$

$v'/v''$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	33	237	<u>327</u>	<u>254</u>	<u>111</u>	28	6	2	2	0	0	0	0	0	0
1	47	152	38	16	<u>160</u>	<u>243</u>	<u>184</u>	94	42	16	5	0	0	0	0
2	97	128	1	105	91	1	65	<u>169</u>	5	<u>99</u>	50	19	4	0	0
3	163	55	56	68	3	96	79	0	55	<u>140</u>	<u>134</u>	84	40	13	15
4	195	1	94	0	76	34	17	99	4	3	80	<u>133</u>	<u>113</u>	66	31
5	167	23	48	32	46	13	81	7	78	90	13	23	<u>105</u>	<u>131</u>	13
6	121	75	2	66	0	63	7	50	2	3	79	53	0	59	7
7	79	99	14	40	27	28	24	49	68	75	11	36	81	14	51
8	46	86	57	4	53	0	52	0	64	8	44	50	2	72	0
9	25	61	89	7	36	25	18	30	0	27	45	7	59	7	74
10	12	37	91	41	6	47	0	44	57	50	0	60	3	49	0
11	4	20	78	102	13	29	43	4	47	0	61	0	69	6	104
12	1	9	49	101	51	2	54	8	0	26	22	37	23	37	0
13	0	4	27	81	83	6	32	39	17	47	1	48	6	54	84
14	0	2	15	53	72	16	12	40	27	30	13	20	25	17	72
15	0	8	34	69	41	0	36	42	6	34	0	37	3	7	62
$v'/v''$	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	22	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	29	29	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	2	22	27	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	26	0	<u>100</u>	44	11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	38	45	<u>138</u>	<u>131</u>	63	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	13	15	29	<u>130</u>	<u>158</u>	78	7	3	0	0	0	0	0	0	0
10	60	45	31	7	<u>121</u>	<u>189</u>	68	14	0	5	3	0	0	0	0
11	0	91	78	7	61	<u>158</u>	22	21	21	0	12	15	0	4	6
12	108	22	0	62	21	49	<u>139</u>	30	1	43	40	0	17	18	0
13	28	61	67	11	37	24	69	0	<u>100</u>	<u>89</u>	0	48	46	0	24
14	1	84	36	7	50	0	0	<u>169</u>	61	88	<u>168</u>	1	74	40	1
15	12	2	48	0	50	22	83	2	<u>169</u>	16	<u>110</u>	<u>100</u>	2	68	0

Table 2. Deslandre table for the  $2^3\Pi_u(v') \rightarrow 1^3\Sigma_g^+(v'')$  transition of  $\text{Na}_2$ 

$v', v''$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	9558	9668	<u>9763</u>	<u>9856</u>	<u>9946</u>	10036	10130	10223	10317	10412	10507	10644	10741	10839	10894	11132
1	9441	9548	9640	9731	<u>9819</u>	<u>9907</u>	<u>9998</u>	10089	10180	10273	10366	10499	10593	10688	10742	10972
2	9324	9429	9518	9607	9693	9778	9867	<u>9955</u>	1004	<u>10135</u>	10255	10354	10446	10538	10591	10815
3	9213	9315	9403	9489	9573	9656	9743	<u>9829</u>	9916	<u>10004</u>	<u>10092</u>	10218	10307	10397	10448	10667
4	9106	9205	9291	9375	9457	9538	9623	9707	9791	9877	9963	<u>10086</u>	<u>10173</u>	10260	10316	10523
5	9006	9104	9188	9270	9350	9429	9512	9594	9677	9761	9844	9964	<u>10049</u>	<u>10135</u>	10183	10391
6	8911	9006	9088	9169	9247	9325	9405	9486	9567	9649	9730	9847	9930	10014	10061	10264
7	8817	8911	8991	9070	9147	9222	9301	9380	9459	9539	9619	9733	9814	9896	9942	10140
8	8775	8868	8947	9025	9101	9176	9253	9332	9410	9489	9568	9681	9762	9842	9888	10084
9	8639	8729	8806	8882	8955	9028	9103	9178	9254	9331	9407	9516	9594	9672	9716	9905
10	8551	8639	8715	8789	8860	8932	9006	9079	9153	9228	9303	9410	9486	9562	9605	9789
11	8466	8552	8626	8699	8769	8839	8911	8983	9055	9129	9202	9307	9381	9455	9497	9678
12	8383	8467	8540	8611	8680	8748	8818	8890	8960	9033	9104	9206	9279	9352	9393	9569
13	8301	8384	8454	8524	8592	8659	8728	8797	8867	8937	9007	9107	9178	9250	9290	9462
14	8262	8344	8414	8483	8550	8616	8685	8753	8828	8892	8961	9060	9131	9201	9241	9412
15	8183	8263	8332	8400	8465	8530	8598	8665	8732	8800	8868	8965	9034	9108	9142	9309

$v', v''$	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0	11232	11331	11434	11534	11635	11736	11836	11892	11940	12093	12140	12295	12344	12455	12507
1	11070	11163	11266	11363	11461	11559	11656	11711	11752	11906	11952	12102	12149	12247	12336
2	10910	11003	1110	1194	11289	11384	11478	11531	11577	11720	11765	11910	11956	12051	12137
3	10758	10849	10943	11035	11127	11219	11311	11362	11406	11546	11589	11730	11774	11866	11950
4	10612	10701	10798	10881	10971	11001	11149	11199	11242	11378	11419	115578	11599	11689	11770
5	10478	10564	10653	10740	10837	10915	11001	11058	11091	11223	11264	11397	11439	11526	11605
6	10349	10433	10520	10604	10689	10775	10859	10906	10947	11075	11115	11245	11285	11370	11447
7	10223	<u>10305</u>	10389	10472	10555	10638	10720	10766	10806	10931	10970	11096	11136	11218	11293
8	10166	<u>10247</u>	<u>10330</u>	10412	10494	10576	10657	10703	10742	10866	10904	11029	11068	11149	11323
9	9984	10062	<u>10143</u>	<u>10222</u>	10301	10380	10458	10502	10539	10659	10695	10815	10853	10931	11802
10	9867	9943	10022	<u>10099</u>	<u>10176</u>	10253	10329	10372	10409	10525	1056	10678	10715	10791	10080
11	9753	9828	9905	9980	<u>10055</u>	10131	10285	10247	10283	10396	10431	10545	10581	10655	10733
12	9643	9716	9791	9865	9938	<u>10012</u>	10085	10125	10160	10271	10305	10417	10451	10524	10580
13	9505	9606	9679	9751	9823	9895	9966	<u>10000</u>	<u>10040</u>	10148	10181	10290	10324	10395	10495
14	9403	9554	9626	9697	9768	9839	<u>9910</u>	9940	9983	<u>10090</u>	10122	10230	10264	10334	10387
15	9379	9448	9519	9589	9658	9728	9796	<u>9835</u>	9868	<u>9972</u>	<u>10084</u>	10108	10142	10210	10272

### 3.5 $2^3\Pi_u \rightarrow 1^3\Sigma_g^+ \rightarrow 1^3\Sigma_g^+$ 级联跃迁

$2^3\Pi_u \rightarrow 1^3\Sigma_g^+$  跃迁在产生 0.98~1.03  $\mu\text{m}$  和 900~960 nm 谱带发射的同时, 为  $1^3\Sigma_g^+$  态提供了粒子数来源, 应有相应的级联跃迁  $1^3\Sigma_g^+ \rightarrow 1^3\Sigma_g^+$  产生。实验中确实观察到了来源于  $1^3\Sigma_g^+ \rightarrow 1^3\Sigma_g^+$  跃迁的 820~900 nm 光谱, 此发射谱带已为多个实验所证实<sup>[6, 7, 9~11]</sup>。为进一步判明  $2^3\Pi_u \rightarrow 1^3\Sigma_g^+ \rightarrow 1^3\Sigma_g^+$  级联跃迁, 作者测量了 950 nm 和 868 nm 光谱发射的时间逻辑顺序<sup>[15]</sup>, 结果表明, 950 nm 光谱发射超前 868 nm 发射 1.6 ns, 与此两谱带来源于级联跃迁的判断相一致。这进一步证明了 1  $\mu\text{m}$  附近谱带是来自于  $2^3\Pi_u \rightarrow 1^3\Sigma_g^+$  跃迁。

综上所述, 可以判定用 339.568 nm 泵浦钠蒸气所获得的 0.98~1.03  $\mu\text{m}$  谱带是来源于钠双原子分子  $2^3\Pi_u \rightarrow 1^3\Sigma_g^+$  三重态间的跃迁。

**结 论** 钠双原子分子中位于  $1\ \mu\text{m}$  附近发射谱带虽然多年前就已观察到了, 但一直未能判明其来源。本文利用紫外激光  $339.568\ \text{nm}$  泵浦, 从实验上再次观察到了此谱区的荧光发射, 并判明其来源于  $2^3\Pi_u \rightarrow 1^3\Sigma_g^+$  跃迁。同时, 也为钠双原子分子三重态研究提供了新的信息。

### 参 考 文 献

- [1] M. Allegrini, L. Moi, New laser-excited bands in  $\text{Na}_2$ . *Opt. Commun.*, 1980, **32**(1): 91~95
- [2] Z.-G. Wang, Y.-C. Wang, G. P. Morgan *et al.*, Cascade stimulated emission in the sodium dimer. *Opt. Commun.*, 1984, **48**(6): 398~402
- [3] 王 骥, 马祖光, 曹建颖,  $\text{Na}_2$  峰值位于  $9650\ \text{\AA}$  及  $9700\ \text{\AA}$  荧光辐射的可能归属. 量子电子学, 1985, **2**(3): 210~214
- [4] K. K. Verma, J. T. Bahns, A. R. Rajaei-Rizi *et al.*, First observation of bound-continuum transition in the laser-induced  $A^1\Sigma_g^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+$  fluorescence of  $\text{Na}_2$ . *J. Chem. Phys.*, 1983, **78**(6): 3599~3613
- [5] Lu Zhiwei, Wang Qi, Ma Zuguang, Coherent emission around  $688\ \text{nm}$  from sodium diatomic molecules. *International Conference on Nonlinear Optical Physics and Applications (Digest of ICNOPA'93)*, Nanjing, China, 1993, 172
- [6] 马祖光, 紫外泵浦  $\text{Na}_2(b^3\Sigma_g^+) \rightarrow \text{Na}_2(x^3\Sigma_g^+)$  的发射光谱. 光学学报, 1982, **2**(3): 233~239
- [7] S. Shahdin, B. Wellegehausen, Z. G. Ma, Ultra-violet excited laser emission in  $\text{Na}_2$ . *Appl. Phys. (B)*, 1982, **29**(3): 195~200
- [8] P. Bernage, P. Niay, H. Bocquet, Laser transitions among the  $C^1\Pi_u$ ,  $3^1\Sigma_g^+$ ,  $A^1\Sigma_g^+$ , and  $X^1\Sigma_g^+$  states of  $\text{Na}_2$ . *J. Mol. Spectrosc.*, 1983, **98**(2): 304~314
- [9] J. Huennkens, S. Schaefer, M. Ligare *et al.*, Observation of the lowest triplet transitions  $3^3\Sigma_g^- \rightarrow 3^3\Sigma_g^+$  in  $\text{Na}_2$  and  $\text{K}_2$ . *J. Chem. Phys.*, 1984, **80**(10): 4794~4799
- [10] M. Palle, S. Milosevic, D. Veza *et al.*, The absorption and emission observations of the sodium near-infrared spectrum. *Opt. Commun.*, 1986, **57**(6): 394~399
- [11] Da Xing, Ken-ichi Ueda, Q. Zhang *et al.*,  $\text{Na}_2 c^3\Sigma_g^+ \rightarrow a^3\Sigma_g^+$  bound-free emission by electron-beam excitation. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, **8**(5): 917~922
- [12] K. K. Verma, T. W. Vu, W. C. Stwalley, Reanalysis of the  $C^1\Pi_u$  state of  $\text{Na}_2$  based on ultraviolet argon ion laser fluorescence. *J. Mol. Spectrosc.*, 1982, **91**(2): 325~347
- [13] J. T. Bahns, W. C. Stwalley, Observation of gain in the violet bands of sodium vapor. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**(9): 826~828
- [14] G. Jeung, Theoretical study on low-lying electronic states of  $\text{Na}_2$ . *J. Phys. B: Atom. & Mol. Phys.*, 1983, **16**(23): 4289~4297
- [15] Lu Zhiwei, Wang Qi, Ma Zuguang, Measurement of the time sequence of  $\text{Na}_2$  spectra by using a boxcar averger, Laser and Optoelectronics, Sui-Sheng Me, Bing-Kun Zhou, Editor, *Proc. SPIE*, 1993, **1979**: 670~673

## Near-Infrared Spectrum of $2^3\Pi_u \rightarrow 1^3\Sigma_g^+$ Transition in Sodium Dimer

Lü Zhiwei    Wang Qi    He Weiming    Zhou Gengfu    Ma Zuguang

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(Received 27 November 1994; revised 9 March 1995)

**Abstract** The near-infrared emission in the spectral region of  $0.98 \sim 1.04\ \mu\text{m}$  with peak around  $1.0\ \mu\text{m}$  has been observed by excitation of high-lying state of  $\text{Na}_2$  with UV dye laser, and the emission is attributed to the  $2^3\Pi_u \rightarrow 1^3\Sigma_g^+$  transition in  $\text{Na}_2$ .

**Key words** sodium diatomic molecule, triplet transition, spectrum.