

# 钾原子中多种受激辐射参与的混频过程\*

王 勇\*\* 贾锁堂 秦莉娟 周国生\*\* 王祖赓

(华东师范大学物理系, 上海 200062)

(中国科学院上海光学精密机械研究所,

华东师范大学量子光学联合开放实验室, 上海 201800)

**摘 要** 当双光子共振激发钾原子于  $6S$  能级时, 由光泵受激辐射和电离复合受激辐射参与的六波或四波混频, 产生了位于紫外和紫区的诸多相干辐射, 文中对多种混频机制进行了分析和讨论, 并对所测得的相干辐射线进行了标识.

**关键词** 电离复合受激辐射, 六波混频.

## 1 引 言

在金属蒸气中, 由双光子共振激发的四波或六波混频过程产生紫外相干辐射的研究, 已有不少报道<sup>[1~5]</sup>, 但尚未见由电离复合受激辐射参与的混频过程的报道. 本文用 YAG 泵浦的脉冲染料激光器双光子共振激发钾原子  $6S$  能级, 测量到由泵浦光与多种红外受激辐射六波或四波混频产生的紫外和紫区的相干辐射. 文中对多种混频机制进行了分析和讨论.

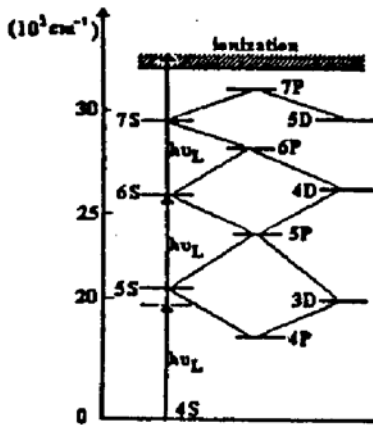


Fig. 1 Part energy-level scheme of atomic potassium

## 2 实验装置

实验装置与文献[6]所描述的相同. YAG 脉冲激光经倍频后泵浦染料激光器, 输出激光的波长调谐范围为  $700 \sim 750 \text{ nm}$ , 最大输出能量  $10 \text{ mJ}$ , 激光线宽和脉宽分别为  $0.3 \text{ cm}^{-1}$  和  $2.5 \text{ ns}$ . 钾分子和钾原子的混合蒸气加热十字型热管产生, 工作温度为  $280 \text{ }^\circ\text{C} \sim 540 \text{ }^\circ\text{C}$ . 在热管的前向探测光辐射, 经测定, 热管前向出射的定向辐射的发散角约为  $8 \text{ mrad}$ , 与泵浦光的发散角相当.

\* 本课题得到国家自然科学基金资助. \*\* 山西大学物理系, 太原 030006

收稿日期: 1993年6月23日; 收到修改稿日期: 1993年9月13日

### 3 结果与讨论

图 1 示出了钾原子的部分能级以及有关的激发和受激跃迁. 实验中当泵浦光的输出波长  $\lambda_L$  调谐到  $4S \rightarrow 6S$  双光子跃迁共振波长 728.45 nm 时, 可由热管炉前向测得如图 2 所示的位于紫外和紫区的定向辐射. 现按辐射线的标号, 将实验测得的波长值、各谱线相对强度、由分析所确定的混频机制以及按各机制所计算得的辐射线波长值一并列于表 1 内. 为清楚起见, 本文将所分析得到的混频方式归纳为如下几类:

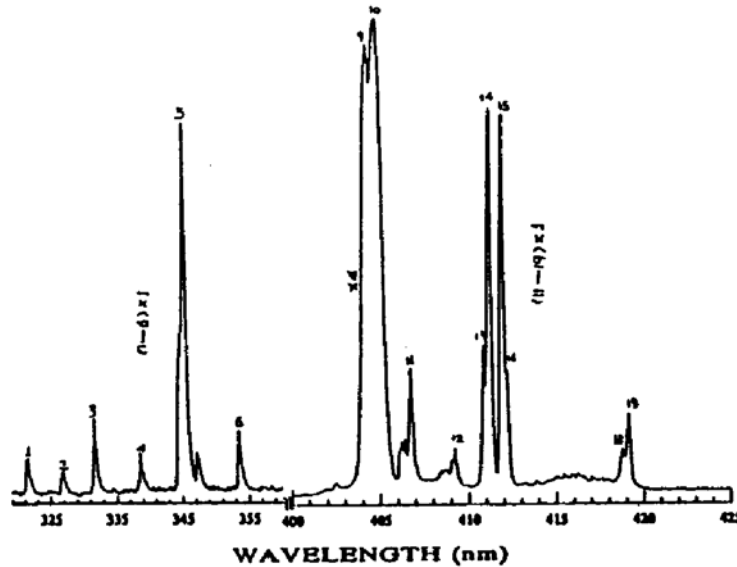


Fig. 2 Part coherent radiation lines

Table 1

No.	$\lambda$ (nm) (ex)	$\lambda$ (nm) (cal)	relative intensity	wave-mixing mechanism
1	321.1	321.00	16.5	$2\omega_L + \omega(5P, 5S)$
2	326.3	326.35	11.5	$2\omega_L + \omega(5P, 3D)$
3	331.2	331.24	32.0	$2\omega_L + \omega(6S, 5P)$
4	338.7	338.65	14.3	$2\omega_L - \omega(6S, 5P) - \omega(5P, 3D) + \omega(5S, 4P)$
5	344.5	344.61	163.2	$2\omega_L - \omega(6S, 5P) - \omega(5P, 5S) + \omega(5S, 4P)$
6	353.8	353.87	6.5	$2\omega_L + \omega(7P, 7S)$
7	393.5	393.47	7.3	$2\omega_L - \omega(7S, 6P) - \omega(6P, 6S) + \omega(7P, 7S)$
8	402.3	402.35	33.9	$2\omega_L - \omega(6S, 5P) - \omega(7P, 7S) + \omega(7P, 5D)$
9	404.4	404.41	659.2	$2\omega_L - \omega(6S, 5P_{1/2})$
10	404.7	404.72	667.3	$2\omega_L - \omega(6S, 5P_{3/2})$
11	406.9	406.97	140.1	$2\omega_L - \omega(6S, 5P) - \omega(7D, 5P) + \omega(7P, 7S)$
12	409.6	409.72	37.6	$2\omega_L - \omega(6S, 5P) - \omega(6P, 4D) + \omega(7S, 6P)$
13	411.6	411.68	63.3	$2\omega_L - \omega(5P_{3/2}, 3D_{5/2})$
14	411.9	411.95	153.6	$2\omega_L - \omega(5P_{1/2}, 3D_{3/2})$
15	412.7	412.63	169.8	$2\omega_L - \omega(6S, 5P) + \omega(5P_{1/2}, 3D_{3/2}) + \omega(5P_{3/2}, 5S)$
16	413.0	412.94	78.1	$2\omega_L - \omega(6S, 5P) + \omega(5P_{1/2}, 3D_{3/2}) - \omega(5P_{1/2}, 5S)$
17	414.8	414.93	5.3	$2\omega_L - \omega(6S, 5P) - \omega(6P, 4D) + \omega(7S, 6P)$
18	420.3	420.21	24.2	$2\omega_L - \omega(5P_{1/2}, 5S)$
19	420.7	420.81	61.4	$2\omega_L - \omega(5P_{3/2}, 5S)$

### 3.1 泵浦激光与起始于 6S 态的受激辐射的四波混频

表 1 中序号 3、9、10 的相干辐射是由泵浦激光与 6S → 5P 受激辐射的四波混频而产生。其中 9、10 的混频方式为： $\omega_{uv} = 2\omega_L - \omega_{IR}$ ，序号 3 的方式  $\omega_{uv} = 2\omega_L + \omega_{IR}$ ，这时  $\omega_L$  为泵浦光频率， $\omega_{IR}$  为 6S → 5P 的受激辐射频率，图 3 示出了这两种混频方式。从表 1 看到，在所有测得的相干辐射中，序号 9、10 的强度最大。众所周知，相干辐射强度  $I_{uv} \propto |\chi^{(3)}|^2 I_L^2 I_{IR}$ ，而三阶极化率  $\chi^{(3)} \propto (\Omega_i - \omega_L)^{-1} (\Omega_j - 2\omega_L)^{-1} (\Omega_k - \omega_{uv})^{-1}$  (其中  $I_L$  和  $I_{IR}$  分别为激光和参与混频的受激辐射的强度， $\Omega_i = (E_i - E_g) / (\hbar - i\Gamma_i)$ )，由于对应于 6S → 5P 的受激辐射强度比起串级受激辐射强度要大，且  $\chi^{(3)}$  中的分母有两个共振项： $\Omega(6S, 4S) - 2\omega_L$  和  $\Omega(5P, 4S) - \omega_{uv}$ ，因此  $\chi^{(3)}$  以及相对应的  $I_{uv}$  很大。相比之下，对序号为 1 的相干辐射来说，虽然同样有 6S → 5P 的受激辐射参与四波混频，但  $\chi^{(3)}$  的分母只有一个共振项  $\Omega(6S, 4S) - 2\omega_L$ ，且这类混频中的相位匹配较难满足<sup>[5]</sup>，因而对应的  $I_{uv}$  较小。

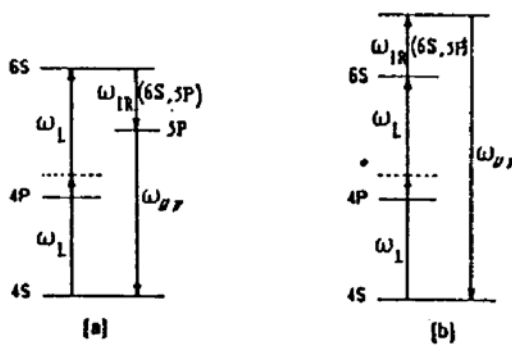


Fig. 3 Coupling schemes for generating 404.41 nm radiation (a) and 331.24 nm radiation (b)

### 3.2 泵浦激光与串级受激辐射的四波混频

原子由 6S 态向 5P 态的受激跃迁，使 5P 态获得了布居，并形成 5P 态与 5S 态和 3D 态之间的粒子数反转，从而可产生 2.71 μm 和 3.14 μm 的第一级串级受激辐射。同样，又可形成 5S 态与 4P 态以及 3D 态与 4P 态之间的布居反转，并可产生 1.25 μm 和 1.18 μm 的第二级串级受激辐射。图 1 示出了这一毓过程。上述这些串级受激辐射与泵浦激光四波混频的结果，产生了表 1 中序号为 1、2、13、14、18、19 的相干辐射。然而与上述起始于 6S 态的受激辐射混频过程相比，这些相干辐射

的强度较弱。显然，这是由于串级受激辐射强度较 6S → 5P 光泵受激辐射强度要弱，且  $\chi^{(3)}$  的分母只有一个共振项  $\Omega(6S, 4S) - 2\omega_L$  的缘故。

### 3.3 泵浦激光与光泵受激辐射、串级受激辐射的六波混频

表 1 中序号 4、5、15、16 的相干辐射属泵浦光与光泵受激辐射、串级受激辐射的六混频，混频方式为： $\omega_{uv} = 2\omega_L - \omega_{IR} - \omega'_{IR} + \omega''_{IR}$  ( $\omega_{IR}$ 、 $\omega'_{IR}$ 、 $\omega''_{IR}$  分别为受激辐射、第一串级受激辐射或第二串级受激辐射的频率)，它们所对应的相干辐射强度  $I_{uv} \propto |\chi^{(5)}|^2 I_L^2 I'_{IR} I''_{IR}$ ，而五阶极化率  $|\chi^{(5)}| \propto (\Omega_i - \omega_L)^{-1} (\Omega_j - \omega_L)^{-1} (\Omega_k - 2\omega_L)^{-1} (\Omega_l - 2\omega_L + \omega_{IR})^{-1} (\Omega_m - 2\omega_L + \omega'_{IR} - \omega''_{IR})^{-1} (\Omega_n - \omega_{uv})^{-1}$  在这类混频中所对应的  $\chi^{(5)}$  中含有 2 ~ 3 个共振分母项，因而相干辐射强度仍然较大。图 4(a) 示出了序号为 5 的相干辐射的混频机制，在对应的  $\chi^{(5)}$  的分母中就有  $\Omega(6S, 4S) - 2\omega_L$ ， $\Omega(5P, 4S) - 2\omega_L + \omega_{IR}(6S, 5P)$ 、 $\Omega(5S, 4S) - 2\omega_L + \omega_{IR}(6S, 5P) + \omega'_{IR}(5P, 5S)$  这三个共振项。

### 3.4 泵浦激光与电离复合受激辐射的四波、六波混频

表 1 中序号为 7、8、11、12、17 的相干辐射，很可能是电离复合受激辐射与泵浦光混频的结果 (图 2 中，在现行标度下，序号为 7、8、17 强度太小无法画出)。众所周知，双光子共振激发钾原子到 6S 能级后，可由第三个泵浦光子使原子电离，即产生所谓“双光子共振、三光子电离”过程，而电离后的原子离子与最子复合可使高位态获得布居，从而产生相应的受

激辐射, 例如图 1 中增出的  $7P \rightarrow 7S$  等. 此外, 注意到能级越高寿命越长, 例如  $6S$  态的寿命为 68 ns,  $6P$  态为 310 ns,  $5D$  态为 569 ns<sup>[7]</sup>, 因而虽然激光激励后在  $6S$  态有大量的粒子布居, 但仍有可能产生  $6P \rightarrow 6S$  受激辐射<sup>[8,9]</sup>. 图 4(b) 例举产生表 1 中序号为 12 的相干辐射的混频机制.

**结 论** 通过钾原子的双光子共振激发, 产生了位于紫区和紫外区的各相干辐射, 分析了由光泵受激和串级受激辐射以及电离复合受激辐射参与四波或六波混频机制, 并由此标识了所获得的相干辐射线.

### 参 考 文 献

- [1] 王祖赓, 唐小玲, 张开昌等 由钠分子-原子系统中双光子混合共振四波混频产生的可调谐紫外相干辐射. *中国科学, A*, 1987, **30**(1): 1045~1051
- [2] S. L. Deng, L. J. Qin, H. Y. Jin *et al.*, A new process for generating broadly tunable UV coherent radiation—Two-step hybrid resonance four-wave mixing in molecule-atom system. *Proc. SPIE*, 1992, **1726**: 264~268
- [3] Z. J. Jabbour, M. S. Malcuit, J. Huennekens, Broadly tunable near-infrared six-wave mixing processes in potassium vapor. *Appl. Phys. (R)*, 1991, **52**(4): 281~289
- [4] S. G. Dieev, G. B. Hadjichristov, I. L. Stefanov, Observation of forbidden five wave mixing in potassium vapor. *Opt. Commun.*, 1992, (4/6): 295~298
- [5] P. L. Zhang, Y. C. Wang, A. L. Schawlow, Generation of coherent UV radiation by optical wave-mixing processes in atomic potassium. *J. O. S. A. (B)*, 1984, **1**(1): 9~14
- [6] 贾锁堂, 王 勇, 邓仕兰等 钾蒸气中双光子激发产生  $2^3\Pi_u \rightarrow a^3\Sigma_u^+$  扩散带受激辐射. *光学学报*, 1993, **13**(10): 865~868
- [7] Luo Yeunglong, Lin Kingchuen, Liu Deankuo *et al.*, Collisional deactivation for K in high-lying  $^2S$  and  $^2D$  states by  $H_2$ . *Phys. Rev(A)*, 1992, **46**(7): 3834~3839
- [8] 李永放, 金海燕, 郭芳霞, 双光子共振激发的电离复合产生的受激电子辐射. *中国激光*, 1991, **18**(7): 528~530
- [9] C. Y. Robert Wu, F. Roussel, Two-photon and multiphoton ionization Spectrum of  $Na_2$ . *J. Phys. (B)*, 1985, **18**(2): 239~350

## Wave-Mixing Processes with Various Stimulated Radiation in Atomic Potassium

Wang Yong    Jia Suotang    Qin Lijuan    Zhou Guosheng    Wang Zugeng

(Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062)

(Joint Laboratory for Quantum Optics, Shanghai INstitute of Optics and Fine Mechanics, Academic Sinica, and East China Normal University, Shanghai 201800)

(Received 23 June 1993; revised 13 September 1993)

**Abstract** Via six- and four-wave mixing processes with "ionization-recombination stimulated radiation and other optically pumped stimulated radiation, UV and violet coherent radiation lines were generated for two-photon pumping of atomic potassium. The mixing schemes are discussed in this paper.

**Key words** ionization-recombination stimulated radiation, six-wave mixing.

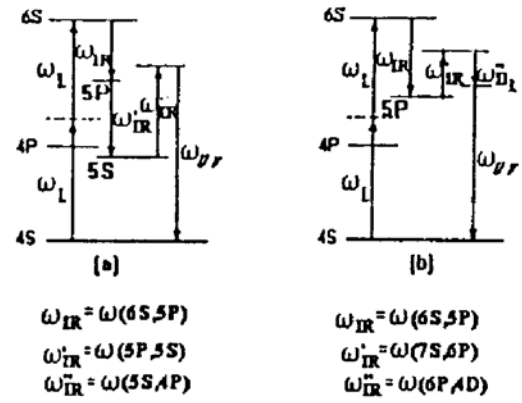


Fig. 4 Coupling scheme for generating 344.61 nm (a) and 409.61 nm (b) radiation