

文章编号 1004-924X(2011)07-1451-05

# 碘等离子体受激辐射产生的可行性

鲁建业, 申英杰, 崔 铮

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**针对目前碘激光用化学能作为泵浦源, 体积大, 易产生有毒物质, 且运行时间短, 影响其应用范围等问题, 本文提出利用碘等离子体产生激光辐射的设想。建立了碘 1315 nm 受激辐射的等离子体产生模型; 通过对泵浦光功率密度与离子化电子数密度、自由电子温度等的理论计算, 确定了本实验条件下的最优实验参数范围; 然后在理论计算的参数范围内, 用 Nd: YAG 激光器的二倍频 532 nm 激光泵浦固体碘产生等离子体, 并采集其荧光发射谱; 最后, 通过拟合碘等离子体光谱扫描结果得到发射谱的中心波长位于 1 313 nm, 谱宽为 1. 182 nm。研究结果显示, 通过激发等离子体的途径实现碘原子受激辐射的构想是可行的。

**关键词:**碘等离子体; 荧光发射谱; 受激辐射; 三体复合

**中图分类号:** TN244; O433. 4 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20111907. 1451

## Feasibility of laser stimulated emission produced by iodine plasma

Lu Jian-ye\*, Shen Ying-jie, Cui Zheng

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

\* Corresponding author, E-mail: lujiy@hit.edu.cn

**Abstract:** As the iodine laser is pumped by chemical energies at present, it shows a larger cubage, shorter running time and produces toxic materials easily. These disadvantages limit the application of the iodine laser. To meet the requirements of the miniature, pollution-free and high power iodine laser in practical applications, a new idea for iodine laser production was proposed in this paper. Firstly, a plasma generation model was established to produce a 1315 nm iodine laser stimulated emission. To obtain the optimum parameter range of an experiment in our experiment conditions, the power density of pump light, ionization electron density and the free electron temperature were calculated. Then in the optimum parameter range calculated, the iodine plasma generated by a single longitudinal mode second-harmonic Nd: YAG laser (532 nm) was detected by a spectrometer to obtain its fluorescence emission spectrum. Finally, the fit result for the signal obtained in the experiment shows that the signal peak is located at 1313 nm with a bandwidth of 1. 182 nm. The results reported here demonstrates the possibility that the iodine plasma is acted as laser media to produce stimulated emission.

**Key words:** iodine plasma; fluorescence emission spectrum; stimulated emission; three body recombination

收稿日期: 2010-09-06; 修订日期: 2010-11-18.

基金项目: 可调谐(气体)国防科技重点实验室基金资助项目

## 1 引言

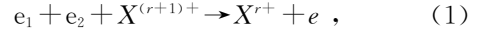
碘激光以其单光子能量大、波长适于在大气和光纤中传输等一系列优点而倍受人们青睐,目前碘激光已被广泛地应用于工业加工<sup>[1-2]</sup>(如切割、焊接等)、能源开采(如开钻油井、拆除废弃的核能反应堆等)以及国防安全<sup>[3-4]</sup>(如激光武器等)等诸多领域,对碘激光产生技术的研究也是目前激光技术的重要研究内容之一。

碘激光始于 1964 年 Kasper 等人<sup>[5-6]</sup>演示的第一个光解烷基碘化合物,高能量碘激光则始于 1970 年 Derwent 等人<sup>[7]</sup>提出的利用 O<sub>2</sub> 第一电子激发态 O<sub>2</sub>(a<sup>1</sup>Δ)与基态碘原子 I(<sup>2</sup>P<sub>3/2</sub>)之间的近共振传能实现粒子数反转的构想,1977 年,基于该构想的碘激光——化学氧碘激光(Chemical Oxygen Iodine Laser, COIL)首次由 McDermott 等人<sup>[8]</sup>实现。目前,虽然 COIL 技术无论在理论还是实验等方面都已经取得了令人瞩目的成就<sup>[9-10]</sup>,但其仍然还存在一些不完善乃至难以克服的问题,如体积庞大、持续发光时间较短等。因此,探索新的激发态碘原子的产生途径是值得尝试的。

本文就利用碘等离子体产生 1.315 μm 受激辐射的可行性进行研究。按照本文的构想,首先直接激励碘分子产生碘等离子体,然后通过三体复合机制<sup>[11]</sup>得到激发态碘原子并实现粒子数反转,进而产生碘激光输出。这一思路的可能优势为(一)由于仍是气体激光器,因此其抗热能力相比固体激光器等要强;(二)激光介质的高温状态可以很好地抑制体系中水汽及分子碘的存在,大大降低激发态碘原子与这些粒子因碰撞而淬灭的几率,从而更有利于粒子数反转的实现。不过,以碘等离子体作为激光介质是否可行还存在相当多的不确定因素。如:如何产生、控制合适的等离子体工作状态,如何解决等离子体的快速冷却与增加激光介质对泵浦能量的吸收效率和增大电子密度从而达到高增益之间的矛盾等。也就是说,三体复合机制能否有效,强烈依赖于等离子体的状态,如等离子体的离子、自由电子温度和密度等,从而也就与等离子体的产生条件密切相关。

## 2 理论描述及实验参数选择

所谓三体复合即离子的电子碰撞复合,是原(离)子的电子碰撞电离的逆过程,是指复合过程中除了正、负带电粒子外还有第三个粒子参与的复合,第三个粒子的作用在于吸收多余的能量。三体复合中的第三体不仅可以是电子,也可以是中性粒子。三体复合过程可表示如下:



式中 X<sup>(r+1)+</sup> 和 X<sup>r+</sup> 分别是 (r+1)<sup>o</sup> 和 r<sup>o</sup> 电离的离子。

在平均原子模型以及电子速度麦克斯韦分布假设下,由经典电子碰撞电离的微分截面表达式

$$d\sigma_n^{\text{ion}} = \frac{\pi e^4}{\epsilon_i (I + \epsilon_n)^2}, \quad (2)$$

出发,可以得到三体复合速率 R<sub>en</sub> 与自由电子数密度 n<sub>e</sub>、电子温度 T<sub>e</sub> 以及主量子数之间近似满足如下关系式<sup>[12]</sup>:

$$R_{en} \propto \frac{n_e^2 n^4}{k T_e R_y Z^*}, \quad (3)$$

其中, k 是玻尔兹曼常数, R<sub>y</sub> 是里德伯常数, Z\* 是有效核电荷数。图 1 和图 2 是根据式(3)计算的三体复合速率与自由电子数密度以及电子温度间的关系。

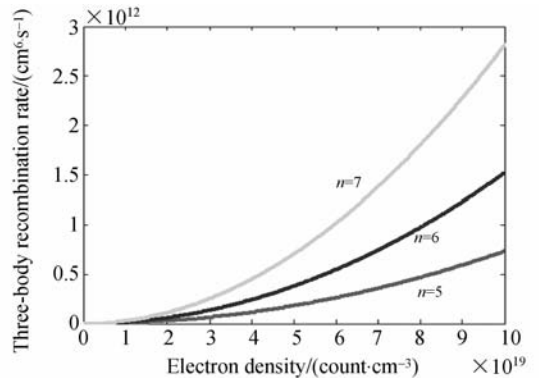


图 1 三体复合速率与自由电子数密度间的关系 (取 T<sub>e</sub> = 10<sup>4</sup> K)

Fig. 1 Relation between three body recombination rate and free electron density

从中可以清楚地看到,在三体复合情况下,自由电子复合到粒子高激发态上的速率远大于复合到粒子低能级的速率,并且随着自由电子数密

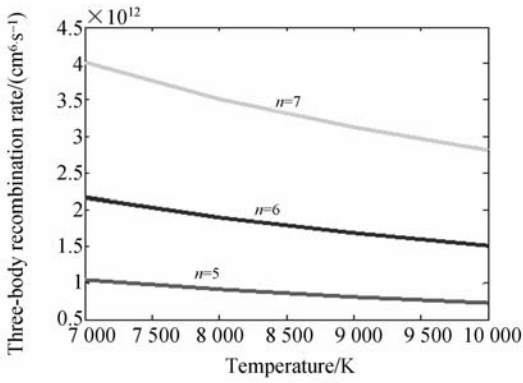


图 2 三体复合速率与自由电子温度间的关系(取  $n_e = 10^{20} \text{ count} \cdot \text{cm}^{-3}$ )

Fig. 2 Relation between three body recombination rate and free electron temperature

度的增加, 三体复合速率急剧上升。因此有效提高电子数密度、降低电子温度是促成三体复合形成的首要努力方向。

利用 1D 等离子体模拟软件<sup>[13]</sup>, 针对本工作现有的实验条件, 计算了功率密度从  $1 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$  到  $15 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$  时泵浦光功率密度与自由电子数密度、电子温度、离化度以及等离子体密度等之间的关系, 结果如图 3~图 6 所示。

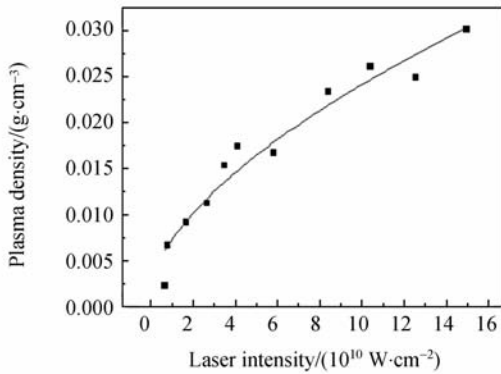


图 3 等离子体密度随激光功率密度的变化

Fig. 3 Plasma density varies with laser intensity

从以上各图可以看到, 随着激光功率密度的增加, 等离子体密度急剧增加(参见图 3), 并且自由电子温度和电子数密度也快速上升(参见图 4 和图 6)。结合三体复合的形成条件, 在本实验条件下, 当泵浦激光功率密度在  $(1.0 \sim 4.0) \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$  区间时, 所获等离子体具有较低电子温度和较高电子数密度, 有利于等离子体三体复合过程的发生。

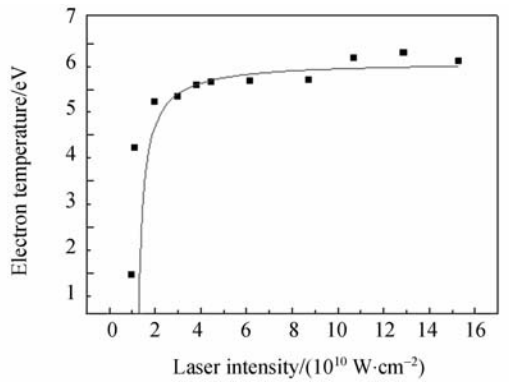


图 4 电子温度随激光功率密度的变化

Fig. 4 Electron temperature varies with laser intensity

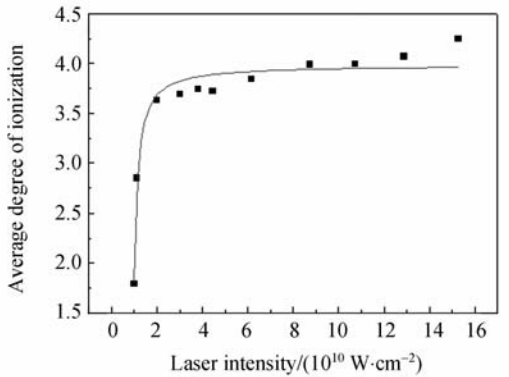


图 5 平均离化度随激光功率密度的变化

Fig. 5 Average degree of ionization varies with laser intensity

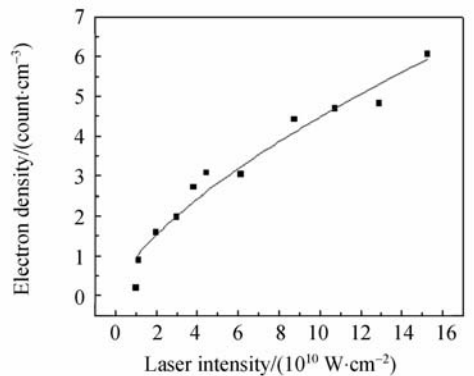


图 6 自由电子数密度随激光功率密度的变化

Fig. 6 Free electron density varies with laser intensity

### 3 实验结果与讨论

实验装置示意图如图 7 所示。实验中使用 Nd:YAG 激光器的二倍频光泵浦固体碘, 具体

实验参数为:泵浦光高斯光束波长 532 nm,脉宽 100 ns,单脉冲能量 300 mJ,重频 10 Hz;聚焦透镜  $\Phi=25.4$  mm、 $f=100$  mm,聚焦光斑大小  $\Phi 100 \mu\text{m}$  左右。由此计算出的泵浦光平均功率密度为  $3.82 \times 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup>。探测所使用的光谱仪为美国 HORIBA JOBIN YVON 公司生产的 SPEX 1250M 光谱仪,探测光纤头口径为  $\Phi 3$  mm,探测点距离透镜焦点大约 10 cm。

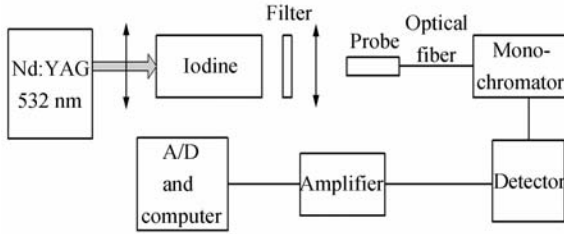


图 7 发射谱测量装置示意图

Fig. 7 Schematic of emission spectrum measurement setup

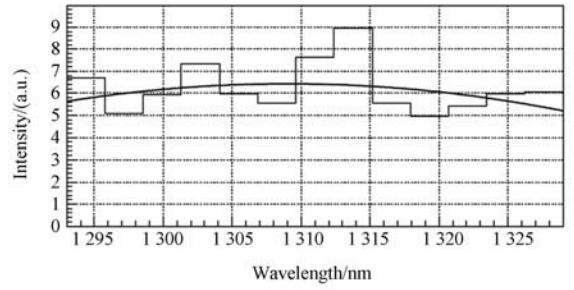
实验中所能激发的等离子体的几何尺度可以估计如下:在以泵浦光光斑中心为圆点、以  $\delta$  为半径的圆形区域内的平均光强可以表示为:

$$I = \frac{E}{\sigma \sqrt{\pi}} \frac{\int_{\pm\delta} \exp(-r^2/\sigma^2) dr}{\pi \delta^2}, \quad (4)$$

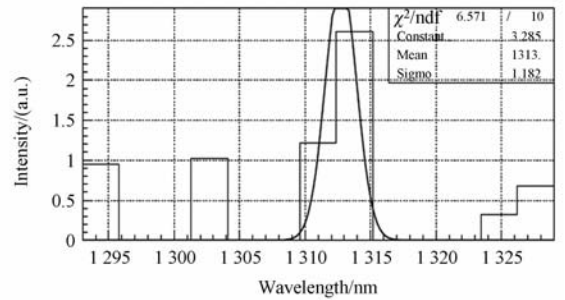
其中  $E$  是单脉冲能量,  $\sigma$  是高斯分布的形状参数。如果假设  $I \geq 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> 为产生等离子体的有效光强(参见图 5),则以本实验参数代入式(4)并对之优化求解可以知道,实验中所产生的等离子体的空间尺度  $\delta$  在 10  $\mu\text{m}$  量级。

实验中观察到碘等离子体的微弱荧光发射谱(如图 8 所示)。通过对所得数据的 Gauss 拟合,所得信号的峰值位置在 1313 nm、谱宽 1.182 nm,拟合  $\chi^2$  值为 6.571。

有关信号微弱的原因,本文认为由于泵浦光功率密度较低,因此只有泵浦光斑中心点附近小区域内的光波才能够有效地激发碘等离子体(参见图 3 和图 5 和表达式),而泵浦光的其余部分的实际效果是气化固体碘。这些因素导致的后果将是:(1)所激发出来的碘等离子体产额很低;(2)由于大量气化的碘分子的存在,经三体复合后处于激发态的碘原子与之碰撞而退激发<sup>[14]</sup>的几率很高。这些因素的存在也就导致了实验中观察到的 1315 nm 光谱信号很弱。



(a) 本底用二阶多项式拟合的结果(图中光滑实线)  
(a) Background based on second order polynomial fitting(the smooth curve in the schematic)



(b) 扣除本底后的高斯拟合结果  
(b) Data based on Gaussian fitting

图 8 Nd:YAG 的二倍频 532 nm 泵浦固体碘产生的部分发射谱

Fig. 8 Parts of emission spectra generated by second-harmonic Nd:YAG laser(532 nm) pumped solid iodine

## 4 结 论

本文建立了碘 1315 nm 受激辐射的等离子体产生模型,通过对泵浦光与离子化电子数密度、电子温度等的理论计算,确定了本实验条件下的最优实验参数范围。在实验中通过对碘等离子体 1.315  $\mu\text{m}$  荧光发射谱扫描中得到了微弱信号,证明通过等离子体途径有可能产生碘的受激辐射光。鉴于目前等离子体产额过低,在下一步的工作中将尝试预主脉冲打靶实验;同时,还将考虑在样品池中冲入缓冲气体(如 Xe 等)来提高电子密度,降低电子温度,并减缓激发态碘原子因与碘分子碰撞而淬灭的几率,以促进粒子数反转条件的形成。

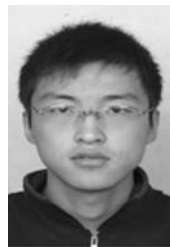
## 参考文献:

- [1] TEI K, SUGIMOTO D, ITO T. Technical progress in industrial COIL [J]. *SPIE*, 2005, 5777: 281-289.
- [2] HALLADA M R, SEIFFERT S L, WALTER R F, et al.. Chemical oxygen iodine laser (COIL) for the dismantlement of nuclear facilities [J]. *SPIE*, 2000, 3931: 149-155.
- [3] SCHULZ W G. Building a chemical laser weapon [J]. *Chemical and Engineering News*, 2004, 82(51): 43-44.
- [4] 李源, 陈治平, 王鹏华. 高能激光武器现状及发展趋势[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(9): 371-37.
- LI Y, CHEN ZH P, WANG P H. Development status and prospect of high-power laser beam weapons [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(9): 371-37. (in Chinese)
- [5] KASPER J V V, PIMENTEL G C. Atomic iodine photo-dissociation laser [J]. *Applied Physics Letters*, 1964, 5(11): 231-233.
- [6] KASPER J V V, PARKER J H, PIMENTEL G C. Iodine-atom laser emission in iodine photolysis [J]. *J. Chem. Phys*, 1965, 43: 1827-1828.
- [7] DERWENT R G, KEARNS D R, THRUSH B A. The excitation of iodine by singlet molecular oxygen [J]. *Chemical Physics Letters*, 1970, 6(116): 532-535.
- [8] MCDERMOTT W E, PCHELKIN N R, BENARD D J. An electronic transition chemical laser [J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(8): 467-470.
- [9] MIKHEYEV P A, ZAGIDULLIN M V, AZYAZOV V N. Chemical oxygen-iodine laser with external production of iodine atoms in CH<sub>3</sub>I/Ar dc glow discharge [J]. *Applied Physics B*, 2010(101): 7-10.
- [10] AZYAZOV V N, VOROBEV M V, VORONOV A. I. Parameters of an electric-discharge generator of iodine atoms for a chemical oxygen-iodine laser [J]. *Quantum Electronics*, 2009, 39(1): 84-88.
- [11] AZRIEL V M, RUSIN L Y. The dynamics of direct three-body recombination of ions [J]. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2008, 2(4): 499-511.
- [12] GUDZENKO L I, SHELEPIN L A [J]. *Sov. Phys. Dokl.*, 1965, 10, 147.
- [13] 鲁建业, 王军, 马玉刚. 纯净靶激光等离子体力学特性的理论模拟[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(5): 550-554.
- LU J Y, WANG J, MA Y G. Theoretical simulations of the mechanical characteristics of laser induced plasma for monatomic target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(5): 550-554. (in Chinese)
- [14] 程丽. 电激励烷基碘化物产生碘激光机制研究[D]. 中国博士学位论文全文数据库, 2008.
- CHENG L. *Research on Mechanism of Producing Iodine Laser by Discharge Alkyl Iodine* [D]. CDFD, 2008. (in Chinese)

## 作者简介:



鲁建业(1969—),男,吉林镇赉人,副教授,主要从事新型激光介质光谱和微弱相干光信号检测方面的研究。Email: lujiy@hit.edu.cn.



崔 钟(1987—),男,黑龙江富锦人,硕士研究生,2009年于哈尔滨理工大学获得理学学士学位,主要从事新型激光介质光谱的研究。E-mail: cui-zheng3333@163.com



申英杰(1984—),男,山东日照人,硕士,2008年于潍坊学院获得理学学士学位,2010年于哈尔滨工业大学获得工学硕士学位,主要从事新型激光介质光谱的研究。E-mail: yingjieyj@163.com