

doi: 10.3788/LOP47.091406

# 碘原子发生技术研究进展

李留成 唐书凯 多丽萍\*

(中国科学院大连化学物理研究所化学激光重点实验室, 辽宁 大连 116023)

**摘要** 在传统的氧碘化学激光器(COIL)中,一般是直接向单重态氧气流中加入碘分子,通过消耗单重态氧的能量来解离碘分子获得基态碘原子,这种加碘方式在 COIL 发展中存在着较大的局限性,限制了其小信号增益、输出功率以及化学效率。相反,直接加入碘原子的技术不但可以避免这些缺点,还可以拓宽 COIL 的应用领域范围,因此碘原子发生技术成为近年来国际上气流化学激光领域的研究热点之一。介绍了放电解离产生碘原子的研究进展和化学法碘原子发生的研究历程以及最新进展,归纳整理了化学法碘原子发生器研究中的关键技术和问题,预测了未来的发展趋势,指出了发展过程中需要解决的问题。

**关键词** 氧碘化学激光器(COIL);原子碘;碘原子;放电解离;化学法

**中图分类号** TN248.5

**OCIS** 140.1550 140.0140

**文献标识码** A

## Research Progress of Atomic Iodine Generation

Li Liucheng Tang Shukai Duo Liping

(Key Laboratory of Chemical Laser, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian, Liaoning 116023, China)

**Abstract** In conventional chemical oxygen-iodine lasers (COIL), molecular iodine is injected directly into the main gas flow of singlet delta oxygen. Then ground state atomic iodine is obtained by the dissociation of molecular iodine with the consumption of energy of singlet delta oxygen molecules. This way of atomic iodine generation limits the small signal gain, output power, and chemical efficiency in the developments of COIL. In contrast, an alternative technique of injecting atomic iodine directly can not only avoid the above mentioned drawbacks, but also broaden the application field of COIL. Recently, a great deal of efforts are devoted to new methods in which the ground state atomic iodine is produced by either discharge dissociation or chemical reactions. The history of atomic iodine generation developments and recent research progress of atomic iodine generation by electrical discharge methods and chemical methods are presented. The critical techniques of atomic iodine generation are summarized. The development trends are predicted and problems needed to be solved are pointed out.

**Key words** chemical oxygen-iodine laser(COIL); atomic iodine generator; iodine atoms; discharge dissociation; chemical methods

## 1 引言

碘原子是氧碘化学激光器(COIL)的出光介质,它直接影响着 COIL 的性能和工作模式。传统的连续波超音速 COIL 主要是由单重态氧发生器、碘蒸气发生器、超音速混合喷管、光腔及真空系统等几部分组成<sup>[1]</sup>。其中,  $O_2(^1\Delta)$  是通过化学方法或放电方法产生的<sup>[2]</sup>, 而作为激射介质的碘原子则是由碘分子发生器蒸发出的碘分子蒸气在超音速混合喷管及光腔中与  $O_2(^1\Delta)$  碰撞解离而产生的。此过程中每解离一个碘分子需要消耗 4~6 个单重态氧分子,这就限制了碘蒸气的加入量,因为,如果大量加入碘分子,产生的单重态氧将全部用于解离碘分子而无法抽运产生激发态碘原子,从而不能激射出光。因此,传统的连续波 COIL 中碘分子蒸气的流量一般是氯气流量即总氧的 2%~5%。由于腔镜尺寸和气流速度的限制,注气气流流经光腔后还

收稿日期: 2009-10-09; 收到修改稿日期: 2009-11-20

作者简介: 李留成(1978—),男,博士,研究员,主要从事化学激光、模拟计算和反应动力学等方面的研究。

E-mail: liliucheng@dicp.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: dlp@dicp.ac.cn

有剩余的单重态氧,能量损失很多,限制了 COIL 的化学效率。

鉴于以上问题,如果能够获得大流量的碘原子,就可以将发生的碘原子直接与单重态氧混合传能,激光出光。那么通过调节碘原子的加入比例,可以调节激光输出功率,提高 COIL 的化学效率;如果加入的碘原子足够多,配合激光调 Q 技术,就可以改变激光工作模式,可以产生巨脉冲能量的重复频率的脉冲激光器。有了高峰值功率密度的脉冲激光,利用变频技术就可以有效拓宽激光输出波长。

目前的碘原子发生技术主要有紫外光解离<sup>[3]</sup>、放电等离子体解离碘化物产生碘原子<sup>[4,5]</sup>、化学方法产生碘原子<sup>[6~8]</sup>等。本文重点介绍了放电解离碘原子发生技术和化学方法产生碘原子技术,并对其中存在的问题、未来发展趋势及需要重点解决的问题等进行了归纳整理和分析总结。

## 2 放电解离碘原子发生技术研究进展

基于 COIL 的运行条件和使用要求,碘原子的发生技术必须满足:总气压要大于 2660 Pa;碘粒子数密度不小于  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ;气体温度不大于 350 K。气体放电等离子体解离产生碘原子的研究主要集中在俄罗斯列别捷夫物理所和捷克科学院物理所<sup>[6,9~11]</sup>。V. N. Azyazov 等<sup>[9,10]</sup>研究发现,直流放电出口处  $\text{CH}_3\text{I}$  解离效率大约为 50%, $\text{CH}_3\text{I}$  低流量(0.1~0.2 mmol/s)下可获得 80%~90%解离效率,经过传输与复合,加入单重态氧气流时碘原子效率只有 20%~30%,电效率约为 3%。最后得出碘原子从产生到使用中间的传输时间要小于 10 ms 才好。2004 年,P. A. Mikheyev 等<sup>[12]</sup>研究发现,直流辉光放电得到碘原子最高粒子数密度为  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,Ar 为载气总压达到 3990 Pa,碘甲烷解离率达到 80%~100%,HI 解离率达到 100%,使用  $\text{CH}_3\text{I}$  时电能使用效率大约为 40%,而 HI 达到了 80%。仔细研究发现这个结果值得怀疑,因为实验中测量的是碘分子而不是碘原子。实验使用激光诱导荧光(LIF)方法,在放电区下游 20~30 ms 以后检测碘分子的浓度来推得碘原子的浓度,这里假设经过 20~30 ms 后碘原子全部复合为碘分子,还假设  $\text{CH}_3\text{I}$  和 HI 初始加入的气流中没有  $\text{I}_2$ 。但碘化物分解很严重,尤其是 HI。因此报道的 HI 解离率和电效率如此之高不足为奇了。P. A. Mikheyev 等<sup>[13]</sup>还用二极管频率扫描的方法测量碘原子 3~4 之间的吸收谱线得到碘原子的粒子数密度,最高达到  $3.6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,Ar 为载气,总压达到 2660 Pa,可以用于 COIL。唐书凯等<sup>[6,11]</sup>主要是使用射频放电技术,得到的最高碘原子粒子数密度为  $1.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,使用  $\text{CH}_3\text{I}$  或  $\text{CF}_3\text{I}$  最高解离效率达到 20%,电效率为 4%~6%。总之,气体放电解离碘原子发生技术得到的碘原子浓度还不够高,电效率还不够大,用于 COIL 还有待技术改进和提高。

## 3 化学法碘原子发生技术的发展历程

2000 年,V. Jirasek 等<sup>[14]</sup>首次提出了利用化学反应产生 F 或 Cl 原子然后再通过与 HI 快速反应产生碘原子的方法,理论模拟表明  $\text{ClO}_2/\text{NO}/\text{HI}$  化学反应系统的碘原子产率可以达到 80%。随后 O. Spalek 等<sup>[15]</sup>根据理论模拟的结果首先对  $\text{ClO}_2/\text{NO}/\text{HI}$  体系进行了实验研究,其实验条件相当于 COIL 的亚音速混合区域,各种气体都用  $\text{N}_2$  进行了稀释,他们在实验中获得了 20%~50%的碘原子产率,后来通过改进<sup>[16]</sup>又获得了 70%~100%的碘原子产率。

2004 年,O. Spalek 等<sup>[17]</sup>首先将化学法产生碘原子应用在了超音速 COIL 上,进行了出光实验,获得最大增益为 0.35%,所用的  $\text{Cl}_2$  流量为 27 mmol/s,得到了 310 W 的激光输出功率。这是化学法产生碘原子用于 COIL 系统首次获得激光输出,尽管获得的化学效率只有 12.7%,甚至低于传统加碘分子时的化学效率。2005 年,O. Spalek 等<sup>[18]</sup>将激光输出功率提高到了 430 W( $\text{Cl}_2$  流量为 40 mmol/s),小信号增益(SSG)为 0.4%/cm,但化学效率仍然仅为 11.8%。

值得注意的是,前几次实验都是直接将  $\text{ClO}_2/\text{NO}/\text{HI}$  等反应气体在亚音速区注入主气流,因此 HI 等可能会与主气流中的  $\text{O}_2(^1\Delta)$  等发生相互作用,发生对产生碘原子不利的影响。为此,V. Jirasek 等<sup>[19]</sup>考察了先通过独立的侧壁反应器  $\text{ClO}_2/\text{NO}/\text{HI}$  体系产生碘原子然后再注入主气流的实验方案。他们先考察了碘原子的产生过程,获得了  $1.6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  的碘粒子数密度,碘原子产生效率为 100%(相对于  $\text{ClO}_2$  或 HI),根据理论估算出的 SSG 应该为 1%/cm;在与 COIL 对接的实验中,发现碘原子发生器内仍然残留有一部分

HI,未反应的 HI 进入激光腔后与  $O_2(^1\Delta)$  相互作用形成  $HO_2$  自由基从而对  $O_2(^1\Delta)$  形成严重猝灭,受此猝灭效应的影响,测得的最大 SSG 只有  $0.35\%/cm$ (平均为  $0.25\%/cm$ ),最大激光输出功率只有  $145\text{ W}$  ( $28\text{ mmol/s Cl}_2$ )。

由于  $ClO_2$  不是商业出售的气体,将来在大规模应用时可能会面临生产和使用量方面的问题,因此从 2004 年开始,捷克物理研究所开始专注于研究以 F 原子为中间体的碘原子产生化学体系的实验研究。与  $ClO_2/NO/HI$  相比, $F_2/NO/HI$  的一个重要优点就是可以使用商业出售的气体;它的缺点就是燃烧室内的气体温度太高,以至于喷射到 COIL 光腔内后仍有  $250\sim 500\text{ K}$ 。2002 年,V. Jirasek 等<sup>[20]</sup>对  $F_2/NO/HI$  系统中 F 原子和 I 原子的化学产生进行了详细的数学模拟,发现如果采用直接向主气流中加入  $F_2/NO/HI$  气体,F 原子和 I 原子的产生距离太长,很难直接在 COIL 亚音速区域实现。2004 年,M. Censky 等<sup>[21]</sup>在小型装置上研究了  $F_2/NO/HI$  体系化学反应产生碘原子的情况,实验测得的最高碘原子粒子数密度为  $3\times 15\text{ cm}^{-3}$ 。

2005 年,美国空军武器实验室也开始研究化学方法产生碘原子,K. B. Hewett 等<sup>[22]</sup>使用类似于 HF 激光器的燃烧室反应器研究了以 F 原子为中间产物的化学反应来产生碘原子的方法,主要是  $F_2+H_2$  反应热解  $F_2$  产生 F 原子,然后与 HI 反应产生碘原子,获得了  $75\%$  的碘原子转化率(相对于 HI)。

由于关于  $F_2/NO/HI$  体系的研究都只是专注于碘原子的产生,因此并没有与 COIL 进行对接,所得的碘原子浓度指的是燃烧室内的浓度。2007 年,V. Jirasek 等<sup>[23]</sup>为了模拟 COIL 的真实条件,使用了更高的气体流量和压力( $n_{F_2}=1.5\text{ mmol/s}$ , $20\text{ kPa}$ )来研究碘原子的产生。他们通过提高  $F_2/N_2$  中的  $F_2$  浓度以及使用未经稀释的 HI 和 NO 获得了很高的碘原子产生效率(相对于  $F_2$  为  $40\%$ )和碘原子粒子数密度( $20\text{ kPa}$  时反应器内约为  $4\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ )。O. Spalek 等<sup>[24]</sup>通过使用新设计的碘原子发生器,在激光腔内获得了较高的碘原子粒子数密度( $3.2\times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ )和碘原子产率(相对于  $F_2$  为  $100\%$ ,相对于 HI 为  $60\%$ ),根据测得的碘原子浓度和温度,估算出可能的 SSG 约为  $0.4\%\sim 1.1\%/cm$ 。

2008 年,V. Jirasek 等<sup>[25]</sup>利用  $F_2/NO/DI$  体系在光腔内产生了  $3.2\times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$  的碘原子粒子数密度,碘原子浓度提高的原因在于适当的反应器设计以及减少稀释气体所导致的温度上升( $1300\sim 2400\text{ K}$ ),高温不但加速了原子的生成,也减少了原子的复合,以至于在较大的  $F_2$  流量条件下,仍获得了较高的碘原子转化率和相当均匀的碘原子分布。但测得的 SSG 却相当低(最大只有  $0.22\%/cm$ ),甚至比根据碘原子浓度、温度等实验数据估算出来的还要低。他们认为过量 DI 的氧化副产物  $DO_2$  自由基对  $O_2(^1\Delta)$  的严重猝灭导致了这个现象,还认为虽然  $F_2/NO/DI$  体系在产生碘原子方面非常有效,但若不能解决  $DO_2$  副产物对  $O_2(^1\Delta)$  猝灭问题,仍然无法顺利应用于 COIL。

## 4 化学法碘原子发生技术的关键因素及讨论

### 4.1 HI-NO 加入顺序对碘原子产率和小信号增益的影响

实验研究发现,不同的 HI 和 NO 气体加入顺序对碘原子产生和 SSG 都有影响,而且加入顺序对二者的影响是相反的<sup>[26]</sup>。HI 和 NO 气体的加入顺序示意图如图 1 所示。

当先加入 NO 时,实验发现碘原子浓度在垂直于气流方向上非常不均匀,而且产率较低。而当先加入 HI 时,实验发现碘原子产率明显提高,在最优化条件下甚至可以达到  $100\%$ (相对于  $ClO_2$ ),这可能是由于在这种情况下 Cl 原子在靠近超音速喷嘴处才开始形成,而且随后就进入了气体压力较低的主气流中,因此三体复合等损耗过程对其影响变小了,有更多的 Cl 原子可以转化为碘原子。因此,先加入 HI 有利于碘原子的生成。

当加入  $O_2(^1\Delta)$  主气流测量 SSG 时,发现先加入 HI 时测得的 SSG 较小,而先加入 NO 时测得 SSG 较大。这可能是由于先加入 HI 时,此时  $F_2$  还未来得及与 NO 反应产生 F 原子,因此反应器内的 HI 转化率过低,从而导

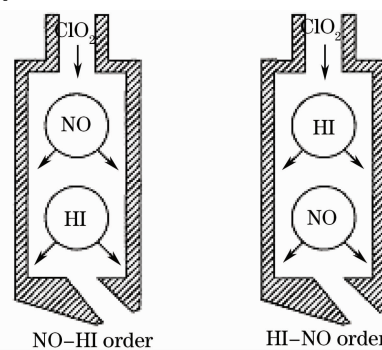


图 1 两种不同的 HI 和 NO 加入顺序  
Fig. 1 Two kinds of injection orders of NO and HI gaseous reactants

致大量还没来得及反应的 HI 进入光腔中形成 HO<sub>2</sub> 自由基,而 HO<sub>2</sub> 自由基严重猝灭 O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ),所以先加入 HI 不利于 SSG;而先加入 NO 则使得 HI 的转化率较高,从而减少了进入光腔内的 HI 量,也即减少了有害的 HO<sub>2</sub> 自由基,因此有利于增大 SSG。

#### 4.2 N<sub>2</sub> 稀释比对碘原子产率和小信号增益的影响

早期的化学法产生碘原子的实验通常在小型的碘原子反应器上进行,而且 F<sub>2</sub>,NO,HI 等气体都用载气 N<sub>2</sub> 进行了稀释。但是随着反应器压力的增大,碘原子产率则迅速下降,这可能是由 N<sub>2</sub> 参与的三体复合效应造成的。后期的化学法产生碘原子实验<sup>[23~25]</sup> 为了克服上述缺点,都采用了更高浓度 F<sub>2</sub>(体积分数为 20%, F<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>)以及无稀释气的纯 NO 和 HI 方案,企图减少 N<sub>2</sub> 稀释气体的产生的三体复合作用,同时提高反应室内的温度。实验结果发现,即使采用非常高的反应器压力仍然可以获得很高的碘原子产率,这一方面是因为 N<sub>2</sub> 压力的降低导致原子和自由基的三体复合效应减弱,另一方面是因为更高的反应室温度提高了 Cl 原子和碘原子产生速率,同时也降低了三体复合的速率。

在提高 F<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 浓度并采用纯 HI 和 NO 气体后,随之而来的一个缺陷就是光腔内的温度也相应升高。但根据实验测得的光腔温度和碘原子浓度进行的 SSG 估算表明<sup>[24]</sup>,尽管温度上升了但 SSG 仍旧在增加,如表 1 所示。所使用的 SSG 计算公式为

$$g = \sigma_{3-4} \frac{[I]_{\text{total}}}{2} \frac{Y_{\Delta}(1+2K) - 1}{Y_{\Delta}(K-1) + 1}, \quad (1)$$

式中  $\sigma_{3-4}$  是碘原子 3-4 跃迁的截面积( $\sigma_{3-4} = 1.3 \times 10^{16} T^{-0.5} \text{ cm}^2$ ),  $K$  为能量抽运反应  $O_2(^1\Delta_g) + I(^2P_{3/2}) \rightleftharpoons O_2 + I(^2P_{1/2})$  的平衡常数,  $K = 0.75 \exp(401.4/T)$ ,  $Y_{\Delta}$  为单重态氧产率,  $[I]_{\text{total}}$  为光腔中碘原子总粒子数密度。

表 1 各种实验条件下的小信号增益估算值(单重态氧产率为 60%)

Table 1 Estimated small signal gain values under various conditions ( $Y_{\Delta} = 60\%$ )

$[I]_{\text{total}} / (10^{15} \text{ cm}^{-3})$	$T_{\text{cavity}} / \text{K}$	Equilibrium constant	Small signal gain / ( $\% \text{ cm}^{-1}$ )
0.7	280	3.10	0.4
1.15	320	2.59	0.58
1.4	310	2.70	0.73
2.65	400	2.02	1.08

#### 4.3 DI 对小信号增益的影响

实验发现,当 DI 正合适或不足量时,SSG 的实验值与估算值差别不大,而当 DI 过量时则二者差别很大<sup>[25,27]</sup>。图 2 为典型的 SSG 随着 DI 流量的变化关系图,在图 2 中的实验条件下<sup>[27]</sup>,F<sub>2</sub> 流量  $n_{F_2}$  为 2.57 mmol/s, F<sub>2</sub> 转化为 F 原子的转化率为 80%,则 F 原子流量约为 2.1 mmol/s。从图中可以看到 DI 的流量存在一个最佳值(约等于 F 原子的流量 2.1 mmol/s),在最佳值之前,SSG 随着 DI 流量几乎一直在线性增大,而过了最佳值之后就开始下降。

实验测量 SSG 发现所有的实验值都远远低于根据(1)式得到的估算值,而 DI 流量越大则差值越大(表 2 中实验 1~4 和 5~7)<sup>[27]</sup>。这可能是由于过量的 DI 在氧化性的 O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ)氛围中生成了有害的猝灭性物种造成的,过量的 DI 很可能与 O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ)反应生成了 DO<sub>2</sub> 自由基(或其他物种),而 DO<sub>2</sub> 严重地猝灭 O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ)分子(HO<sub>2</sub> 对 O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ)的猝灭速率常数  $k_{HO_2} = 3.3 \times 10^{11} \text{ cm}^3/\text{s}$ ,文献上没有 DO<sub>2</sub> 对 O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ)的猝灭值,但推测  $k_{DO_2}$  或许与  $k_{HO_2}$  类似)。

另外,反应  $F + I_2 \rightarrow IF + I$  生成的 IF 也会快速地猝灭激发态碘原子( $k = 1.3 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$ ),M. Censky 等通过数值模拟计算,声称过量的 DI 或许可以消耗一部分 IF 从而削弱其危害。但实际上实验结果显示过量的 DI 对 SSG 是有害的,DI 过量得越多,测到的 SSG 就会越小

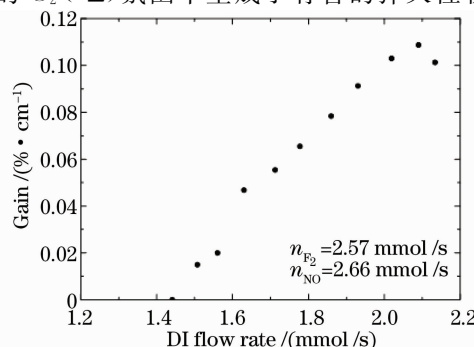


图 2 DI 流量对 SSG 的影响

Fig. 2 Effect of DI flow rate on small signal gain

(如表 2 所示)。

表 2  $F_2$  以及 DI 流量对 SSG 的影响

Table 2 Effect of the flow rates of  $F_2$  and DI on small signal gain

Exp. No.	$n_{F_2}/$ (mmol/s)	$n_{NO}/$ (mmol/s)	$n_{DI}/$ (mmol/s)	$g_{exp}/$ (%/cm)	$[I]_{total}/$ ( $10^{14}/cm^3$ )	T/K	$g_{est}/$ (%/cm)	$g_{est}-g_{exp}/$ (%/cm)
1	1.2	2.13	0.7	0.12	3.4	220	0.24	0.11
2	1.34	2.17	1.75	0.15	7.0	300	0.38	0.25
3	1.37	2.17	2.97	-0.33	11.2	337	0.54	0.87
4	1.37	2.17	5.0	-0.65	12.0	467	0.43	1.08
5	2.57	2.66	1.2	-0.02	5.2	510	0.17	0.19
6	2.57	2.66	1.6	0.07	6.8	410	0.27	0.20
7	2.57	2.66	2.1	0.15	9.1	240	0.60	0.45

基于此事实,认为如果能够找到迅速消除有害物种(HI,  $HO_2$ ,  $DO_2$  等)的化学捕获剂,在其进入光腔之前就予以清除,那么就有可能补偿 DI 造成的坏影响,在一定程度上增大 SSG。V. Jirasek 等<sup>[27]</sup>尝试了使用过量的 NO 来捕获  $DO_2$  自由基(NO 与  $DO_2$  的反应很快,其速率常数  $k=8.1 \times 10^{-12} \text{ cm}^3/\text{s}$ ),获得了一定的效果,结果如图 3 所示。实验表明,SSG 随着 NO 的增加一直在增加,即 NO 对于 SSG 是起到正效果的。图中  $F_2$  流量为 2.6 mmol/s,在前半段 NO 流量小于  $F_2$  的流量( $n_{NO} < n_{F_2}$ ),可以认为是由于随着 NO 的增加 F 原子的产量也随之增加,因而导致 SSG 增大;而在后半段,F 原子已经不再增加,可以认为由于 NO 的增加导致了有害  $DO_2$  自由基减少从而造成其对 SSG 的负面影响降低。

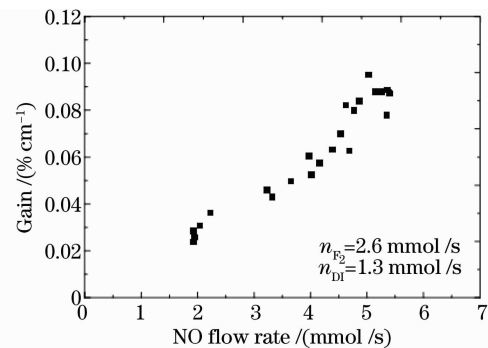


图 3 NO 流量对 SSG 的影响

Fig. 3 Effect of NO flow rate on small signal gain

## 5 结 论

用于 COIL 的放电等离子体技术解离产生碘原子技术的弱点是碘原子产生浓度不够高,碘流量不够大,总体电效率不高,不具备放大性。基于  $F_2 + NO$  或  $ClO_2 + NO$  反应产生 F 原子或 Cl 原子进而与 HI 或 DI 反应的化学法生成碘原子的技术方案用于 COIL 上没有得到理想的结果,其中的原因及内在本质的有待进一步研究。尽管如此,化学方法产生碘原子仍不失为一个高效产生碘原子的有效手段和技术途径。化学碘原子发生器不需要外接电能,具备很好的放大性,因此化学燃烧法大流量碘原子发生及应用技术的研究对提高和扩展 COIL 的整体效率和应用领域是非常有意义的。

但化学法产生碘原子用于 COIL 仍还有很多问题值得探索和研究。一是化学燃烧产生的含有碘原子的混合气体物种比较复杂,种类比较繁多,与传统氧碘激光器相比是全新的气体组分,对活性工作介质有无负面影响。二是化学法产生的含有碘原子的气流一般是高温混合气体,而 COIL 工作所需要的是低温环境。在化学法产生碘原子问题上,今后发展的关键问题是寻找对  $O_2(^1\Delta)$  和 I 影响较小的化学反应体系,或者寻找到能够迅速消除有害物种(HI,  $HO_2$  等)的化学捕获剂,在其进入光腔之前就予以清除。

总体来说,目前化学法产生碘原子处于比较成熟的阶段,已经获得了大流量高浓度的碘原子源,尽管在与 COIL 进行对接时发现了一些问题,但如能解决这些问题,必将是氧碘化学激光发展进程中的一大突破。

## 参 考 文 献

- 1 Duo Liping, Yang Bailing. Gas Flow Chemical Lasers Diagnostics [M]. Beijing: Science Press, 2005  
多丽萍, 杨柏龄. 气流化学激光测试诊断技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2005
- 2 Duo Liping, Li Liucheng, Wang Zengqiang *et al.*. Recent development of electric oxygen-iodine laser [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(11): 15~21  
多丽萍, 李留成, 王增强 等. 电激励氧碘激光器研究最新进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(11): 15~21
- 3 R. F. Tate, M. Harris, B. T. Anderson *et al.*. Short-pulse photolytic iodine laser [C]. *SPIE*, 2000, **4065**: 658~665

- 4 Duo Liping, Li Guofu, Yu Haijun *et al.*. Study of pulsed discharge of gases simulated in N<sub>2</sub>-chemical oxygen-iodine laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2315~2318  
多丽萍, 李国富, 于海军 等. 模拟 N<sub>2</sub>-氧碘化学激光器混合气体脉冲放电实验研究 [J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2315~2318
- 5 J. Schmiedberger, V. Jirasek, M. Censky *et al.*. RF discharge generation of I atoms in CH<sub>3</sub>I and CF<sub>3</sub>I for COIL/DOIL [C]. *SPIE*, 2009, **7131**: 71310E
- 6 Tang Shukai, Duo Liping, Yu Haijun *et al.*. Experimental study of combustor of combustion driven all gas-phase iodine laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1403~1406  
唐书凯, 多丽萍, 于海军 等. 燃烧驱动全气相化学碘激光燃烧室实验研究 [J]. 中国激光, 2009, **36**(6): 1403~1406
- 7 O. Spalek, V. Jirasek, J. Kodymova *et al.*. Chemical generation of atomic iodine for COIL [C]. *SPIE*, 2002, **4631**: 34~42
- 8 Li Liucheng, Duo Liping, Yang Bailing. Chemical kinetics simulation for H+NCl<sub>3</sub>+HI chemical laser system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 367~373  
李留成, 多丽萍, 杨柏龄. H+NCl<sub>3</sub>+HI 化学激光体系动力学模拟 [J]. 中国激光, 2009, **36**(2): 367~373
- 9 V. N. Azyazov, P. A. Mikheyev, M. V. Vorobyov *et al.*. Properties of a dc glow discharge iodine atom generator [C]. *SPIE*, 2009, **7131**: 71310A
- 10 V. N. Azyazov, M. V. Vorob'Ev, A. I. Voronov *et al.*. Parameters of an electric-discharge generator of iodine atoms for a chemical oxygen-iodine laser [J]. *Quantum Electronics*, 2009, **39**(1): 84~88
- 11 V. Jirasek, J. Schmiedberger, M. Censky *et al.*. Generation of I atoms for oxygen-iodine lasers using RF discharge dissociation of various I donors [C]. *40th AIAA Plasma Dynamics and Lasers Conference, San Antonio*, 2009, **4064**: 1~9
- 12 P. A. Mikheyev, A. A. Shepelenko, A. I. Voronov *et al.*. Production of iodine atoms by dissociating CH<sub>3</sub>I and HI in a dc glow discharge in the flow of argon [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2004, **37**(22): 3202~3206
- 13 P. A. Mikheyev, A. A. Shepelenko, A. I. Voronov *et al.*. Atomic iodine production in a gas flow by decomposing methyl iodide in a dc glow discharge [J]. *Quantum Electronics*, 2002, **32**(1): 1~4
- 14 V. Jirasek, O. Spalek, J. Kodymova *et al.*. Chemical generation of atomic iodine for chemical oxygen-iodine laser. I. modelling of reaction systems [J]. *Chemical Physics*, 2001, **269**(1-3): 167~178
- 15 O. Spalek, V. Jirasek, J. Kodymova *et al.*. Preliminary experimental results on chemical generation of atomic iodine for a COIL [C]. *SPIE*, 2001, **4184**: 111~115
- 16 O. Spalek, V. Jirasek, M. Censky *et al.*. Chemical generation of atomic iodine for the chemical oxygen-iodine laser. II. experimental results [J]. *Chemical Physics*, 2002, **282**(1): 147~157
- 17 O. Spalek, M. Censky, V. Jirasek *et al.*. Chemical oxygen-iodine laser using a new method of atomic iodine generation [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(5): 564~570
- 18 O. Spalek, V. Jirasek, M. Censky *et al.*. Chemical oxygen-iodine laser with atomic iodine generated via Cl or F atoms [C]. *SPIE*, 2005, **5777**: 181~186
- 19 V. Jirasek, O. Spalek, M. Censky *et al.*. Chemical oxygen-iodine laser with instantaneous production of atomic iodine from gaseous reactants [C]. *SPIE*, 2005, **6053**: 605307
- 20 V. Jirasek, O. Spalek, J. Kodymova *et al.*. Modeling of the chemical generation of atomic iodine in a chemical oxygen-iodine laser [C]. *SPIE*, 2002, **4631**: 43~52
- 21 M. Censky, O. Spalek, V. Jirasek *et al.*. Chemical generation of atomic iodine for a COIL via atomic fluorine [C]. *SPIE*, 2004, **5334**: 60~69
- 22 K. B. Hewett, G. D. Hager, P. G. Crowell. Chemical generation of iodine atoms [J]. *Chemical Physics*, 2005, **308**(1-2): 159~169
- 23 V. Jirasek, O. Spalek, M. Censky *et al.*. Generation of atomic iodine via fluorine for chemical oxygen-iodine laser [J]. *Chemical Physics*, 2007, **334**(1-3): 167~174
- 24 O. Spalek, V. Jirasek, M. Censky *et al.*. Chemical oxygen-iodine laser with atomic iodine generated via fluorine atoms [C]. *SPIE*, 2007, **6735**: 673506
- 25 V. Jirasek, M. Censky, O. Spalek *et al.*. Chemical oxygen-iodine laser with atomic iodine generated via fluorine atoms [J]. *Chemical Physics*, 2008, **345**(1): 14~22
- 26 M. Censky, O. Spalek, V. Jirasek *et al.*. Development of COIL with chemically generated atomic iodine [C]. *SPIE*, 2006, **6611**: 661102
- 27 V. Jirasek, O. Spalek, M. Censky *et al.*. Study of COIL active medium with atomic iodine generated via fluorine atoms [C]. *SPIE*, 2009, **7131**: 71310M