レーザーノート 2

ケミカル・レーザーの作り方

藤岡 知夫*・小原 實*

Let's Make Chemical Lasers

Tomoo FUJIOKA and Minoru OBARA*

1. はしがき

現在では、種々のタイプのケミカル・レーザーの発振が報告されており、発振波長も近赤外から遠赤外へと広い範囲に存在する。振動遷移で $v=1 \rightarrow 0$ の発振が得られることが、ケミカル・レーザーの特徴の1つである。ケミカル・レーザーの応用分野は、laser-induced fluorescence, optical pumping, および laser-induced chemical reaction, さらに、高出力レーザー光による laser-driven fusion などの広きにわたる。また、ケミカル・レーザー自体も化学反応動力学を研究する道具として用いられる。

ここで、それぞれの用途に合ったケミカル・レーザーの作り方を記述するのはむづかしく、またその作り方自体も現在の研究領域にあるものもある。本文では、パルス・ケミカル・レーザーに限定し、ハロゲン化水素 (H(D)F, H(D)Cl, H(D)Br), CS_2 - O_2 系CO, および光解離ヨウ素原子レーザーの実験室で簡単に作る方法に関して述べたい。

2. ガス・ハンドリング・システム

2.1. 反応ガスの準備

ケミカル・レーザーが普通的气体・レーザーと異なる点は、外部エネルギーの注入がポンピン

グ反応の開始のためである点と、反応後の廃ガス処理の点である。

パルス放電を反応の開始に用いるケミカル・レーザーの典型的な反応ガスの組合せを Table 1 に示す。gas Aとgas B とのそれぞれから1

Table 1 Typical mixture for pulsed-discharge-initiated chemical lasers.

Lasing gas	Gas A	Gas B
HF (DF)	$H_2, D_2, CH_4, C_4H_{10}$	SF_6, CF_4, CCl_2F_2
HCl (DCl)	$H_2, D_2, HI,$	Cl_2
HBr (DBr)	H_2, D_2	Br_2
CO	CS_2	O_2

つのガスを用い混合する。フラッシュを反応の開始に用いる混合ガス系を Table 2 に示す。

Table 2 Typical mixture for flash-initiated chemical lasers.

Lasing gas	Gas A	Gas B
HF (DF)	$H_2, D_2, CH_4,$	$IF_5, UF_6, MoF_6,$
HCl (DCl)	H_2, D_2	Cl_2
HBr (DBr)	H_2, D_2	Br_2
CO	CS_2	O_2
I	$CF_3I, n-C_3F_7I$	—

*慶応大学工学部 (横浜市港北区日吉町832)

*Keio University ; Faculty of Engineering (.832, Hiyoshicho, Kohokuku Yokohama)

ガスの取扱いで注意を要するのは、爆発性、腐食性、毒性のあるガスであろう。爆発性では、 H_2 、 CS_2 などで、腐食性では、 Cl_2 、 Br_2 、 HI などで、毒性では、 Cl_2 、 Br_2 、 CS_2 などのガスが問題となる。 CF_3I 、 $n-C_3F_7I$ などの人体への影響に関しては未知であるので、注意して取扱った方がよい。ガス漏れは、 CS_2 (腐卵臭) Cl_2 、 Br_2 (刺激臭) などは臭いですぐ感知できる。

HF・ケミカル・レーザーで、多量のフッ素ガス (F_2 gas) を用いるタイプに関しては特に注意を必要とするが、これに関してはここでは割愛する。ここで述べるレーザー装置では、 F_2 ガスは取扱えない。

2.2. 配管材料および測定器

2.2.1. 流量計およびバルブ

封じ切り系で構成する場合には、1組のガスを混合器で混合し、レーザー管に導入する。一方、フロー系では、流量計を用いてガスを最適流量比で流す。 Cl_2 、 Br_2 、 HI などの腐食性ガス用流量計は、フロートがガラスまたはテフロン・コーティングしたものをを用いると良い。配管材料はガラス管で良い。 Cl_2 、 Br_2 用などには、テフロン・ニードル・バルブ、コックを用いると良いが、普通のガラス・コックでテフロン・グリースを用いても充分である。HFレーザーの排気側バルブにもこれらのバルブの使用が好しい。

2.2.2. 圧力計

腐食ガスには、ステンレス・スチール、モネル (monel) 製ブルドン・ゲージを用いると良いが、高価である。オイル・マノメータが安価であり、自作できる。普通のガラス製のマノメータにフッ素化オイルを用いるだけでも良いし、3フッ化エチレン・パイプ (3F) を用いれば完璧である。水銀マノメータのガス接触上部を、フッ素化オイルで満しても良いが、長期の使用には耐えない。

2.3. 廃ガスの処理

廃ガスのほとんどは腐食性に富んでいるので、

直接真空ポンプで排気すると、オイルに溶けたり、実験室を汚染する。そのために、レーザー系と排気系との間に、廃ガスのトラップを装着しなければならない。簡単には、液体酸素などでコールド・トラップを1~2段装着するか、HFガスなどにはフッ化ナトリウム (NaF)、ソーダ・ライム ($NaOH+CaO$) などの乾式トラップを用いることもできる。

3. 光学材料

ブリュースタ窓材料には、 CaF_2 、 BaF_2 、 LiF 、 $NaCl$ 、 KCl 、 KBr などの使用が考えられる。 CaF_2 、 BaF_2 などがハロゲン化水素系に対して最も安定であるが、HX- CO_2 エネルギー移乗型レーザーには、 $10.6\mu m$ で不透明 (又は半透明) であるので不適当である。 $NaCl$ はF、HFなどに腐食される。 CS_2/O_2 系でも $NaCl$ 、 KCl などは腐食が生ずる。内部鏡とする場合には、鏡面を不活性ガスでパージすると良い。窓および鏡とレーザー管とのシールには、普通の真空接着剤か、フッ素ゴムOリングなどを用いる。

4. レーザー管の製作

レーザー出力、パルス巾、および発振波長によって、レーザー管の形状に差異がある。しかし、 $\sim 10kW$ 、 $< 1\mu sec$ 程度の出力のケミカル・レーザー光を得るのは簡単である。

4.1. パルス放電タイプ

パルス放電管としては、横型 (Transverse Excitation: TE) および縦型の放電型式をもつタイプがあるが、横型の方が高レーザー・パワー、高圧力動作が可能である。

TEA・ CO_2 レーザー管があれば、そのまま転用することができる。TEタイプのハロゲン化水素および CS_2/O_2 系CO・ケミカル・レーザーの製作は、そのままTEA・ CO_2 レーザーの製作とほとんど同じである。HF、HCl、およびHBrレーザーによる差異は大してないが、腐食の度合によって、電極材料を選択すると良い。

レーザー管はアクリル、PVC、ガラス管など

で充分である。放電状態、フレイム伝搬の状態などを直接観測できるように、アクリルまたはガラス管などの透明管が好しい。材料の加工性から見ると、アクリルが便利である。レーザー管端面はOリング・フランジなどを装着すると良い。

電極のタイプとしては、ピン・プレート型、ヘリカル型、およびダブル・ログスキ型（二重放電型）などがあるが、一般的で最も作り易いピン・プレート型に関して述べる。

ピン電極（カソード）およびプレート電極には、ステンレス・スチール、アルミニウム、ガラスなどが用いられる。 Cl_2 、 Br_2 をハロゲン・ドナーとして用いる場合には、アルミニウムが安定なようである。ガラス管（ $\sim 20\text{mm}\phi$ ）にピンを植え込むには、Mo、Wの細ピンを用い、Fig. 1のような形状にするとパルス放電に対してもクラックが入りにくい。長さ1m、肉厚

Fig. 1. Pin-electrode for glass tube.

3～5mm、内径30～50mm ϕ のアクリル管に100～300ピン植え込むには、1～3mm ϕ のピンが適している。また、ピン電極には、1～3mm ϕ のボルトを用い、アクリル管壁にタップを切り、ねじ込むこともできる。電極間隔は10～30mm位、プレート電極は10～30mm巾、2～5mm厚のものを用いる。平板よりもログスキ型にした方が好しい。一方、ピンに付けるバラスト抵抗は、1～2W程度の0.1～1k Ω のもので良い。ピン電極として、抵抗のリード線を直接用いることも可能である。ピンとパイプの接着および真空シールは、エポキシ、シリコン・ゴム接着剤およ

びトル・シールなどを用い、リークのある場合には、その上から、グリプタールをぬると簡単に修理できる。

4.2. フラッシュ・タイプ

Xeフラッシュなどをポンピング反応の開始およびAlkyl Iodideの光解離の光源とするケミカル・レーザーがある。

電気放電によるポンピング反応の開始では、放電中に種々の解離種が生ずるが、フラッシュ・フォトリシスでは、初期の解離種が明らかであるので、解析する場合に容易である。一方、フラッシュ光のパルス巾は1 μsec までであるので、速い時間分解スペクトルを観測したい場合には、速いパルス電気放電なども用いられる。

光解離では、ほとんどUVの光を用いるので、選択的にUVを出すフラッシュを製作した方が、効率良くレーザー発振できる。レーザー管には石英管が用いられる。

5. レーザー発振のさせ方

反応ガスの準備、レーザー管の製作が済んだら、いよいよ発振させよう。反応ガスの準備で再度注意を促したいのは Br_2 である。 Br_2 は液体（室温）でガラス・アンプルに封入されているが、蒸気圧が高いので、氷、ドライ・アイスなどで冷却して蒸気圧を下げて、ドラフタなどを利用し耐腐食手袋をして所定の容器に移し返える。

以下に、それぞれのレーザーの発振のさせ方に関して述べたい。1つのレーザー管で、種々のケミカル・レーザーを発振させられるが、混合ガスを交換する場合には、以前に用いたガスの除去を完全に行なう必要がある。

5.1. 電気放電型（TEタイプ）

5.1.1. HF・ケミカル・レーザー

2.1. で述べたように、水素ドナーとして H_2 、 CH_4 、 C_4H_{10} などのうち1つと、フッ素ドナーとして SF_6 、 CF_4 、 CCl_2F_2 などのうち1つとの組合せを決定する。水素ドナーとして、プロパン、

都市ガスなどを用いることも可能である。

例えば、 SF_6 と H_2 との混合ガス(SF_6 -rich)を10~100 Torr位封入し、20~30KV, 10~20 nF, のパルス放電を印加すると、

のポンピング反応で、振動励起したHF分子が生成され、振動一回転遷移で $2.6 \sim 3.1 \mu\text{m}$ の発振が得られる。 H_2 を他の水素ドナーに代えると、発振スペクトルが異なるので興味深い。発振パルス巾はガス圧力に依存し、上記の圧力で、 $0.2 \sim 1 \mu\text{sec}$ 位のHF・レーザー・パルス光が得られる。HF・レーザーは高利得であるため、レーザー共振器は低Qのもので構成することが望ましい。不安定共振器などを用いることも可能だし、スーパー・ラディアンズで取り出すことも可能である。発振の繰り返し速度は、レーザー管のガス交換速度に依存する。比較的低出力でよいプログ・レーザーには、10cm位の長さのTE・レーザー管で充分安定な発振が得られる。

5.1.2. HCl・ケミカル・レーザー

代表的なガスの組合せは、 H_2/Cl_2 (H_2 -rich)である。 H_2/Cl_2 系のHCl・レーザーはポンピング反応が連鎖反応であるレーザーである。連鎖反応型のレーザーで注意を要するのは、反応で生ずる衝撃である。それ故、高圧力の実験を行なうには、バッファ・タンクを付けるか、機械強度の大きいレーザー管(反応器)を用いることが必要である。また、1回の反応で混合ガス全部がHClになってしまうので、1回毎に完全にガスを交換する必要がある。レーザー管に O_2 などの混入(空気のリークによる)があると、反応に大きな影響がある。フロー・タイプで実現する場合には、予混合域にflameが逆流するのでflame arresterなどを装置すると良い。発振波長は $3.8 \mu\text{m}$ 域である。

5.1.3. HBr・ケミカル・レーザー

H_2/Br_2 (H_2 -rich)の混合ガスにTE放電を印加するとHBr分子の $4.2 \mu\text{m}$ 域の発振が得られ

る。 $4.2 \mu\text{m}$ のHBrレーザー光は、 CO_2 分子の $(00^0 0) \rightarrow (00^0 1)$ の吸収線波長と一致し、 CO_2 分子の光励起が可能である。そのため、HBr・レーザー光励起 CO_2 レーザー、および CO_2 分子の (001) 準位の振動緩和の研究などに用いられる。

5.1.4. CS_2/O_2 系ケミカル・レーザー

ケミカル・CO・レーザーは、放電励起型よりも高効率であり、発振波長は $4.7 \sim 6 \mu\text{m}$ である。

CS_2 の分圧を高くすると、 CS_2/O_2 の連鎖反応の衝撃によりレーザー管の破損をきたす。また、ガス供給系まで逆火することがあるので注意を要する。反応生成物によるレーザー管窓の汚染が生ずるので、簡単に交換できるようにしておくとう便利である。

5.2. 光解離ヨウ素レーザー

CF_3I , $n\text{-C}_3\text{F}_7\text{I}$ などにXe・フラッシュを照射すると、 $1,315 \mu\text{m}$ の $\text{I} (P_{\frac{1}{2}} \rightarrow P_{\frac{3}{2}})$ レーザー発振が得られる。ヨウ素レーザーは利得が大きいのので、低Qのレーザー・共振器を用いる方が良い。廃ガスのトラップには、コールド・トラップが用いられる。

6. あとがき

以上の「ケミカル・レーザーの作り方」は、著者らの実験室で行ったやり方を述べたものである。ここでは、連続動作型ケミカル・レーザーについては触れなかったが、このタイプに関しては個々の論文を参照して頂きたい。

また、レーザー光検知器についても言及しなかったが、応答速度、波長感度などによりPbS, PbSe, InAs, InSb, Ge: Auなどが用いられる。