現場の諸問題 2

ヒートパイプオープン*

1. はじめに

水やアルコール、液体 Na 等を熱輸送媒質とするヒートパイプは、可動部分のない伝熱素子として各種の熱交換器、ソーラコレクター、電子機器（除熱）等への応用が進められている。パイプに封入した液体を加熱し、低温部へ効率良く熱輸送を行う装置であるが、このヒートパイプの動作原理を利用して、加熱部で発生させた金属蒸気を、一様な密度を保持したまま一定の空間に閉じ込めるよう工夫した装置をヒートパイプオープンとよんでいる。1969年、C.R. Vidal¹⁾によって開発されたもので、金属蒸気を用いる各種分光実験、非線形光学の実験等で不可欠な存在となっている。

2. 構造と動作原理

Fig. 1 に、最も簡単な構造を持つヒートパイプオープンの構成を示す。中央のステンレスパイプの中には、細かな網目（～100メッシュ/インチ）を持つ金網が同軸状に4～5重挿入されており、その中央部に必要な固体金属粒を入れる。加熱部の両側は、必要に応じて水冷する。パイプの両端は、分光実験等のために透明な窓が取り付けられている。構造は著しく簡単であるが、理想的な動作を得るにはいくつかの注意が必要である。

最初に、必要な金属蒸気圧 P_a とほぼ等しい圧力 P_b のバッファースガス（希ガス等）を封入する。パイプの中央部を加熱すると金網上の金属は蒸発し、中央から両端に向かって拡散する。この時、加熱温度は金属の融点を越えていることが必要である。拡散した金属蒸気は、水冷部近傍の低温部で冷却され金網上に凝縮する。このとき、メッシュがウィック（wick）として働き、液体となった金属は毛細管現象によって再び中央の蒸発部に戻される。このようにして、金属蒸気は両端の窓に達することなくパイプ内の一定空間内を循環する。融点の低いアルカリ金属では、ステンレス製金網を用いることによりこ

Fig. 1 ヒートパイプオープンの構造

の動作をほぼ完全に達成できる。しかし、Mg や Ba 等のアルカリ土類金属、Zn, Cd 等では、低温部での凝固が速く、理想的なヒートパイプ動作を得るには、ウィックの構造と材質、動作蒸気圧等に工夫が必要である。

ヒートパイプオープンの最大の特徴は、加熱用ヒーター入力の精密な制御を行うことなく、一定密度の一様な金属蒸気層を発生・維持できることである。金属蒸気圧 P_a が、バッファースガス圧 P_b と等しくなるまで上昇すると、ガスは中央の加熱部から完全に排除される。 $P_a \approx P_b$ の状態に達すると、蒸気圧はバッファースガス圧によって制限され、ヒーターの入力パワーが多少変化しても蒸気層の空間的な長さが増減するだけで、その圧力は一定に保たれる。したがって、 P_b を測定することにより、蒸気圧曲線に頼ることなく金属蒸気圧を知ることができる。さらに、パイプ内での金属量の減少がほとんどないこと、金属の純化 (purification) が自動的に行われること、金属蒸気層両端での密度勾配が鋭く、蒸気層の長さを正確に定義できること等のすぐれた特徴を持っている。

3. 同軸型ヒートパイプオープン

実験によっては、金属蒸気と各種の原子・分子気体を一定の割合で混合させたいことがある。Fig. 1 のヒートパイプオープンで、 $P_a < P_b$ とすることによって混合気体を得ることはできる。しかし、 $P_a \approx P_b$ の「飽和」状態が達成されていない限り、ヒーターの入力パワー変動がそのまま敏感に P_a 反映される。同時に、蒸気密度の空間的な一様性も保証されず、ヒートパイプオープンの最大の利点は失われてしまう。 $P_a < P_b$ の状態を安定に生成するために考案された装置²⁾を Fig. 2 に示す。Fig. 1 のパイプの外側に同軸構造のヒートパイプを加えたものである。2本のパイプ内には、通常同一の金属を入れる。内側パイプの全圧 P を $P > P_a$ とし、外側のオープンな $P_a \approx P_b$ で動作させる。このとき、内側パイプは、外側パイプ内の金属蒸気によってのみ加熱され、ヒーターの熱

Fig. 2 同軸型ヒートパイプオープン

* Heat-Pipe Oven

変動とはほぼ無関係に一定の金属蒸気分圧を持つことになる。すなわち、外側のヒートパイプオープン⁶⁾は、内側パイプの理想的な熱浴として動作するわけである。内側パイプ内の金属蒸気圧は、外側パイプのバッファガス圧 P_b で知ることができる。また、ヒートパイプモードでの動作が難しい金属については、外側パイプの動作金属として異種金属 (Na 等) を用いてもよい。Fig. 2 の装置によって、内側パイプ内に異なる 2 種類の金属の混合蒸気を発生させることもできる³⁾。

4. コヒーレント VUV 光発生への応用

ヒートパイプオープンが最もその威力を発揮する場合の例として、非線形周波数混合の実験⁴⁾をあげることができる。金属原子気体の大きな非線形感受率を利用して、高出力レーザーの発振波長を他の波長域に変換できる。この技術は、実用的なレーザーの少ない VUV 域においてとりわけ重要で、簡便なコヒーレント光源として種々の分光実験に利用されている。Fig. 3 に、ヒートパイプオープンを用いた VUV 光発生装置の例を示す。筆者らが⁵⁾、波長可変コヒーレント VUV 光発生に用いているもので、異なる周波数 ω_1, ω_2 の色素レーザーパルスを金属蒸気中に集光する⁶⁾。このとき、VUV 光 (周波数 $\omega_{VUV} = 2\omega_1 + \omega_2$) を効率良く発生させるためには、入射レーザー光と発生する VUV 光が、金属蒸気中を同一速度で進むこと (位相整合条件) が必要である。通常、金属蒸気と希ガスを適当な圧力比で混合してこの条件を満足させるが、条件によっては、金属蒸気密度が数%変化すると、VUV 光出力が ~1 オーダも減少することがある。金属蒸気分

圧の高精度な制御が必要となる。Fig. 3 のオープン⁶⁾は、原理的に Fig. 2 の装置と同じである。2 本のステンレスパイプは直交しており、縦のパイプが Fig. 2 の外側パイプに相当する。金属蒸気層の長さが正確に定義できること、安定な蒸気層の発生・維持が比較的容易であること等の特徴を備えている。この装置で生成した Cd と Ar (又は He) の混合気体によって、115~150 nm の波長域で連続的に波長可変なコヒーレント光が得られている^{5,7)}。

文 献

- 1) C. R. Vidal and J. Cooper, J. Appl. Phys. **40**, 3370 (1969).
- 2) C. R. Vidal and F. B. Haller, Rev. Sci. Instrum. **42**, 1779 (1971).
- 3) C. R. Vidal and M. M. Hessel, J. Appl. Phys. **43**, 2776 (1972).
- 4) 例えば, J. F. Reintjes, in *Laser Handbook Vol. 5*, eds. M. Bass and M. L. Stith (North-Holland, Amsterdam, 1985) p. 1.
- 5) K. Miyazaki, H. Sakai and T. Sato, Opt. Lett. **9**, 457 (1984).
- 6) H. Scheingraber and C. R. Vidal, Rev. Sci. Instrum. **52**, 1010 (1981).
- 7) K. Miyazaki, H. Sakai and T. Sato, to be published.

(電総研レーザ・宮崎健創*)

Kenzo MIYAZAKI*
Laser Research Section, Electrotechnical Laboratory,
1-1-4, Umezono, Sakura-mura, Niihari-gun,
Ibaraki 305.

Fig. 3 ヒートパイプオープンを用いたコヒーレント VUV 光発生装置⁷⁾