

最近の技術から

アルゴンエキシマレーザー

佐々木 亘

大阪府立大学工学部 〒591 堺市百舌鳥梅町4丁 804

半導体の光プロセッシングや、核融合プラズマ中の軽元素の密度測定など、100 nm 近傍の波長域の、高出力の真空紫外レーザーに対する要請が高まっている。最近、電子ビーム励起アルゴンエキシマレーザーによってこの波長域でも、かなりの高出力発振が得られるようになってきた¹⁾。

Ar エキシマレーザーは、希ガスエキシマレーザーのなかで最も波長が短く、126 nm で発振し²⁾、非常に高利得であるため高出力が得られる可能性がある。また、スペクトル幅が広いため、波長可変発振も可能である³⁾。しかし、レーザー共振器用の反射鏡および波長選択素子などの光損傷のため、その最大出力が制限され、エキシマレーザーの特徴が必ずしも生かされていなかった。

最近、われわれのグループで、光共振器用光学素子として、熔融石英またはシリコンを反射鏡に、 MgF_2 を出力鏡に用いることを試み、126 nm における Ar エキシマレーザーの高出力化に成功し、その応用面が開かれた¹⁾。

エキシマとは、励起状態でのみ存在する分子で、図 1 に示すようなポテンシャル曲線を有する。高速電子によって励起された Ar イオン、 $Ar^*(4p)$ および $Ar^*(4s)$ は、図に示す (1) ~ (5) の過程を経て、エキシマ状態 $Ar_2^*(^1\Sigma_u^+)$ および $Ar_2^*(^3\Sigma_u^+)$ を作る。この $Ar_2^*(^1\Sigma_u^+)$ から解離的なポテンシャル曲線をもつ基底状態への遷移により、126 nm を中心とする発光をする。希ガスエキシマの生成過程には三体衝突の過程を多く含むため、効率よくエキシマを生成するには、20~50 気圧の高気圧動作が必要となる。このような高気圧での安定なグロー放電は、非常に困難なため、電子ビーム励起が不可欠で、現在まで放電励起による発振は得られていない。

励起用電子ビーム装置は、基本的にはマルクス電源、パルス成形回路およびダイオード部から成り、電子ビーム励起希ガスハライドレーザーに用いられるものとほぼ同じである⁴⁾。電子ビームを発生するダイオード部は、

横打込み型、同軸型および縦打込み型があるが、高気圧動作の希ガスエキシマレーザーでは、同軸型が多く用いられる。現在、わが国ではパルスパワー技術は、あまり普及していない。マルクス電源は、二、三の既製品が得られるが、パルス成形回路およびダイオード部は既製品がなく、使用者が自ら設計して特注するか、外国製にたよらざるをえない。今後、電子ビーム励起エキシマレーザーの応用が盛んになるためにも、国内におけるパルスパワー技術の急速な普及が強く望まれる。

図 2 に、われわれが用いられている電子ビーム装置を示す。ブルームラインは三重の同軸円筒で、同軸円筒間の絶縁とコンデンサーの誘電体の両方を兼ねて純水を用いた。ダイオード部は、直径 80 mm の陰極円筒の中心に、肉厚の薄い陽極パイプ (直径 5 mm または 10 mm) を配置した同軸型である。陰極中には電子放出用のタンタルブレイドが 4 枚あり、その長さを変えてダイオードのインピーダンスを調整する。加速電圧 700 keV、電子ビーム電流 30 kA がえられる。電子ビームは陽極パイプを通り抜けて、中の Ar ガスを励起する。陽極パイプには、肉厚 70 μm の SUS 304 のパイプを用いた。Ti パイプのほうが同じ肉厚なら機械的強度が強く、電子ビームの透過率も 30% 程よいが、現在のところ入手困難である。

陽極パイプの両端は、高圧共振器室に開いており、その中に共振器鏡を設置する。この波長域では、透過窓材は MgF_2 と LiF のみで、しかも、かなり吸収があるので、内部鏡型共振器をもちいる。LiF は強い真空紫外光で失透するため、 MgF_2 を出力窓に用いた。厚さ 5 mm で、透過率 50% のものを使用した。しかし、 MgF_2 板の真空紫外における透過率はかなりの個体差があり、同じ厚さでも 70% の透過率を有するものもあり注意を要する。最近、 MgF_2 板は、 ArF^* などの希ガスハライドエキシマレーザーに、多く使用されるようになってきたので、今後、品質が安定してくるものと思われる。

図 3 に、ダイオード部の電圧波形 (V_d) と波長 126 nm のレーザー発振波形 (L_p) の一例を示す。600 kV 以上

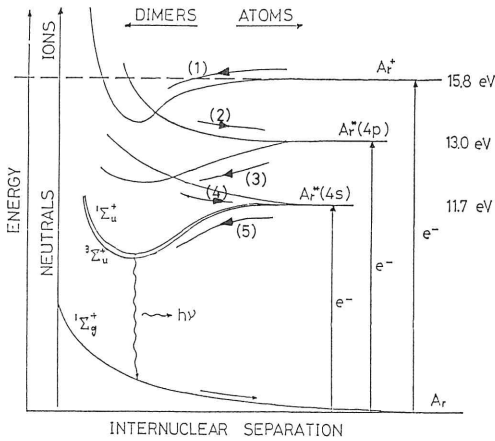


図1 アルゴンエキシマのポテンシャル曲線とエキシマの生成過程

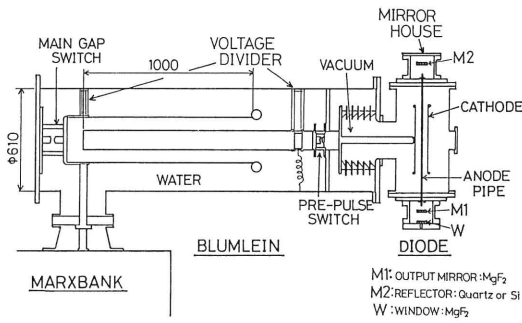


図2 同軸型電子ビーム励起装置

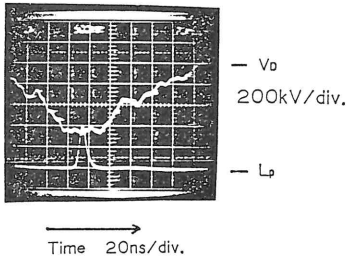


図3 ダイオード電圧波形 (V_d) およびレーザーパルス波形 (L_p)

の電圧が 50 ns 以上継続し、レーザーパルスは半値幅約 10 ns で、2 MW 以上の高出力発振が得られている。発振スペクトル幅は、1.7 nm であった。この波長域では、先にも述べたように、光学素子の光損傷のスレッシュホールドが、レーザーの最大出力を大きく左右する。表 1 に、光共振器用反射鏡材料の相違による最大レーザー出力を示す。従来この波長域では、80% 程度の高い反射率を有する Al 蒸着膜 (真空紫外域では Al 表面の

表 1 種々の反射鏡材における最大レーザー出力

| | Al-MgF ₂ 共振器 | 石英-MgF ₂ 共振器 | Si-MgF ₂ 共振器 |
|-------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Energy (mJ) | 14.4 | 16 | 21 |
| Power (MW) | 1.2 | 2.3 | 3.4 |

酸化によって極度に反射率が低下するため、Al 膜の上に MgF₂ を蒸着する) のみが用いられていたが、表 1 に示すような 1.2 MW 以上の発振出力では、顕著な光損傷を受ける。われわれは、Ar エキシマレーザーが高い利得を有することに着目し、熔融石英および Si を反射鏡に用いて高出力発振に成功した。熔融石英および Si の反射率は、理論計算では、それぞれ 25% と 50% であるが、研磨状態および表面状態によって大きく変化する。研磨の平面度も、可視領域に比べて波長が短くなった分だけ精度が厳しくなる。さらに、真空紫外域では、微細な研磨傷が大きい散乱損失となるので、特殊な研磨法が必要となる。われわれが用いた熔融石英と Si の、126 nm における反射率の実測値は、それぞれ、20% と 25% であった。熔融石英-MgF₂ (出力鏡) で 2.3 MW、Si-MgF₂ で 3.4 MW の出力が、素子の光損傷なしに安定して得られた。

図 4 に、Al-MgF₂ 共振器と石英-MgF₂ 共振器における、レーザー出力のガス圧依存性を示す。25 気圧から急激に発振が立ち上がり、石英の場合、35 気圧以上で出力が飽和する。レーザーパルスの半値幅は、圧力上昇とともに減少する。図には示していないが、Si-MgF₂ 共振器の場合は、40 気圧でも顕著な飽和は見られず、さらにガス圧を上げることによって出力の増大が期待できる。熔融石英や Si 反射鏡は光損傷は受けないが、石英

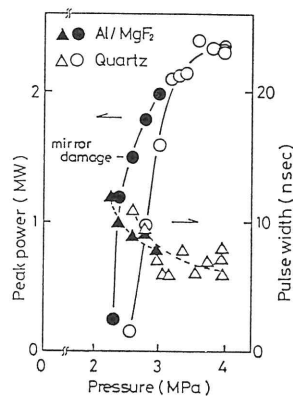


図4 レーザー出力とレーザーパルス幅のガス圧依存性

と Si では、他の条件が同一でもレーザーパルス波形が異なる。このような高出力の真空紫外光に対する、固体の反射率や吸収係数のデータはほとんどないが、強いレーザー光によって反射率などが急激に変化している可能性も考えられる。

高出力真空紫外レーザーは、ようやく安定した発振が得られたばかりで、それ自身まだ解決しなければならない問題があるが、半導体やプラズマへの応用だけでなく、反ストークスラマンレーザーの励起光源や、THG による 100 nm 以下のコヒーレント光の発生などへの応用も期待できる。さらに、これを用いた、真空紫外域におけ

る光物性なども興味ある応用である。

文 献

- 1) Y. Uehara, W. Sasaki, S. Saito, E. Fujiwara, Y. Kato, M. Yamanaka, K. Tsuchida and J. Fujita: Opt. Lett., **9** (1984) 539.
- 2) W.H. Hughes, J. Shannon and R. Hunter: Appl. Phys. Lett., **24** (1974) 488.
- 3) W.G. Wrobel: Rep. IPP1/186, Max Planck Institute for Federal Republic of Germany (1981, unpublished).
- 4) 藤原関夫, 加藤義章, 山中千代衛: レーザー研究, **9** (1981) 46.

(1985年2月22日受理)