レーザー解説 2

負グロー型金属蒸気レーザー

藤 井 寛 一*

(1980年12月11日 受理)

Negative Glow Type Metal Vapor Laser

Kan-ichi FUJII*

(Received December 11, 1980)

1. まえがき

金属蒸気レーザーとは、He, Ne, Ar等のバッファガス中に少量のCd, Zn等の金属蒸気が混入した、いわゆる混合気体放電をレーザー媒質として用い、放電プラズマによって励起された各種金属原子あるいは金属イオンから放射される光をレーザー光として取り出すレーザー方式を総称した呼び名である。稀ガスと金属蒸気との組み合わせによって、He-Cd, He-Zn, Ne-Cu, Ne-Al等々の名で呼ばれる種々のレーザーが構成され、それらによって得られる波長は紫外から可視、赤外に至る広い領域に分布しているのが特徴である。

レーザー励起源として、気体放電を構成するプラズマのどの部分を利用するかによって、原理、管構造、ならびにその呼称等に自ら差異が生じ、それぞれに固有の特徴が得られる。負グロープラズマを利用する場合を負グロー型金属蒸気レーザーといい、陽光柱プラズマを用いる場合を陽光柱型金属蒸気レーザーという。同様の考え方によって、原理的にはファラデー暗部型、陽極グロー型、あるいは陰極暗部型等々の

レーザー方式が可能であるが、実現には至っていない。

本解説では、負グロー型金属蒸気レーザーを取り扱う。負グロープラズマを利用するレーザーであるにも拘わらず、一般にホローカソード型金属蒸気レーザーと呼ばれることが多いため、負グロー型金属蒸気レーザーという名に、かえって違和感をもたれる向きがあるかも知れない。しかし、ホローカソードは、負グローを能率よく利用するための陰極構造に因んでつけられた名称であるため、原理ならびに陽光柱型との相異を明確にする観点から、本解説では負グロー型と呼ぶ。

第2節において負グロー型レーザーの歴史を振りかえり、最近の動向を紹介する。第3節において、負グロー利用技術について詳しく述べる。はじめに負グロープラズマの特徴が明らかにされ、次いでホローカソード放電の原理と特徴、ホローカソード効果等について放電物理学的観点から解説が試みられ、最後にレーザー管の構造と設計原理が紹介される。第4節では、筆者らの研究の中心である白色光レーザーを引用して、レーザー発振特性の一例を紹介し、最

* 茨城大学工学部電気工学科 (〒316 日立市中成沢町 4-12-1)

* Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University (Nakanarusawa-machi Hitachi, 315)

近主として米国において顕著な成果が見られた紫外および赤外域連続発振レーザーについても、その概要を紹介する。

陽光柱型金属蒸気レーザーに関しては励起機構を中心に昨年度解説がなされている¹⁾ので、それを参照願いたい。負グロー型白色光レーザーとの比較の関係で、4.1節において陽光柱型He-Se白色光レーザーについて若干ふれるにとどめる。

2. 負グロー型レーザーの歴史

2.1 負グロー型稀ガスレーザーの歴史

負グローがレーザーの励起源に応用された歴史は古く、稀ガスレーザーの励起に応用されることから始った。1964年に、英国はMullard研究所のJ. Smith²⁾がHe-Ne混合気体放電および純Ne放電を用いてNe I 1.15 μ 線を発振させたのが最初である。1965年には、V. P. Chevotayev³⁾がNe 632.8nm, 609.6nm, 1.15 μ 線その他の多数の赤外発振を得た。1966年には、小林、老門ら⁴⁾がNe 1.15 μ 線を、I. Agár biceann, A. Agafitei ら⁵⁾がNe 1.15 μ 1.16 μ 線をそれぞれ発振させた。1970年にはC. S. Willet⁶⁾がCO₂ 10.5 μ 線の発振を得た。1974年にはM. Jánossy, L. Csillag ら⁷⁾がHe-Kr 469.4nm線を発振させた。しかし、これらのレーザーにおいては、スパッタリング作用によって気化した陰極金属蒸気がレーザー作用に悪影響を及ぼすことから、後述の金属蒸気レーザーへと次第に変遷してゆくことになる。

2.2 負グロー型金属蒸気レーザーの歴史

負グローを金属蒸気レーザーに応用する試みもまた、可成り以前から行われてきた。1965年にSpectra-Physics社のR. L. Byer ら⁸⁾がHe-Hg混合気体放電を用いてHg II 615nm線のパルス発振に成功したのが最初の例である。しかし、この場合は、スパッタリング作用によって生成された陰極金属蒸気を使用するのではなく、水銀溜をヒーターで加熱して気化した水銀蒸気をホローカソード内に送り込む方式であったので、

原理的には2.1項で述べたレーザーに近い。その後1971年に至り、この615nm線はW. K. Schuebel⁹⁾によって連続発振が報告された。

1970年に至り、バッファガスイオンのスパッタリング作用によって陰極金属を蒸発させ、これをレーザーに利用する。いわゆる「金属蒸気自給方式」のレーザーが、日本、アメリカ、ソ連において、それぞれ独立に開発された。期せずして三者とも、バッファガスとしてHeを用い、金属蒸気としてCdを用いた。

浅見、菅原、常盤、飯島ら¹⁰⁾はCd II 533.8, 537.8及びCd II 635.5, 636.0, 723.7, 728.4, 806.7, 853.1, 887.8nmの7本の新しい連続発振線¹¹⁾およびZn II 491.2, 492.4, 610.3, 747.9, 758.6nmの5本の新しい連続発振線¹²⁾を得た。前記W. K. SchuebelはCd II 533.8, 537.8, 635.5, 636, 723.7, 728.4nmの6本の新しい連続発振線を得た。³⁾ソ連のE. K. Karabut ら¹⁴⁾はCd II 533.8, 537.8, 806.7nmおよびZn II 492.4, 758.8nm線の連続発振を得た。

つまり、ほぼ同じ時期に、同じレーザー媒質を用いて光の三原色を構成する二色(赤, 緑), および赤外域にわたる多数のレーザー発振線が得られたのである。しかし、三者は全く独立に研究を進めたのであり、レーザー管の構造が著しく異なることからして大変興味深い。尚、Cd II 441.6nm線(青)の連続発振は陽光柱型He-Cdレーザーによって、米国Utah大学のG. R. Fowles¹⁵⁾らが既に成功を納めて居り、上述の日, 米, ソ, 研究においても連続発振が得られた。その結果、赤, 緑, 青の三原色レーザー光が、負グロー型Cd II スペクトルによって得られることが明らかとなった。ちなみに陽光柱型では赤および緑の連続発振線を得ることができない。

2.3 負グロー型レーザーの最近の動向

最初、稀ガスレーザーに応用された負グローは、後に金属蒸気レーザー、とくにHe-Cdレーザーに応用されて著しい特徴を発揮した。それは陽光柱型では得られない赤および緑の連続

発振が実現できることから、極めて良質の白色光レーザー¹⁶⁾が実現したことによる。Cd以上に色再生特性の優れた金属材料が期待できないことから、材料はCdに固定したまま、レーザー管の構造の改良¹⁷⁾¹⁸⁾設計原理の考案等々^{19)~21)}レーザー管のハードウェア技術を中心に研究が続けられている。レーザー管の設計、性能向上等の研究に不可欠であるレーザープラズマ諸量の計測に関する研究^{22)~24)}も精力的に進められている。可視光をカバーする金属材料として、Cdの他にZnが用いられ²⁵⁾両者によってほぼ満足のゆくスペクトルが得られているが、金属ハライドを用いる方式^{26) 28)}も多く研究されている。出力特性を改善するために異種ガス混合する方法²⁹⁾レーザー装置の小型化に関する研究³⁰⁾等々、種々の研究が盛んに行われている。

一方、この数年間、活発に研究が進められている紫外域および赤外域の連続発振を得るホローカソードレーザー³¹⁾は、上記白色あるいは可視域レーザーが1アンペア程度の放電を利用するのに対して数10アンペア前後の大電流を用いる点が特徴的である。大電流放電を用いるため、熱にかかわる諸問題の処理や放電の安定化等、解決すべき問題が多く残されているが、連続発振紫外線レーザーが得られた意義は大きい。

歴史的に回顧して興味深く感じられるのは、金属蒸気を自給する負グロー型連続発振金属蒸気レーザーを得るために最初に試みられたのは、NASA Graduate trainingセンターにおけるCuホローカソードを用いた実験³²⁾であったということである。しかし、そこでは数100ミリアンペアの放電々流を流すような比較的弱い放電を利用したため、Cu蒸気が十分に得られず、レーザー発振には至らなかった。当時成蹊大学の研究グループにおいても、真鍮製ホローカソードを用いてCuおよびZn蒸気を自給するレーザー方式の開発を目的として研究が進められていたが、金属蒸気圧が不足するという同様の問題に直面していた。そこで、スパッタリング作用だけでは十分な蒸気圧が得にくい陰極材料の使用を改め、融点が低く、気化しやすいCdおよび

Znを陰極材料として使用し、熱的な蒸発を併用することが試みられた。その結果、放電電流の値が0.5アンペア程度の放電を用いて予想した以上の成功をおさめるに至った。

その後、1974年に至り、L. Csillagら³³⁾は放電々流が1~1.5アンペア程度の放電を用いてCu II 780.8nm線の連続レーザー発振に成功した。そして、米国のコロラド州立大学においてCuホローカソードが従来の放電電流値よりも1桁大きい数10アンペアの大電流放電のもとで利用され、紫外、可視および赤外域連続発振の成功へとつながった³⁴⁾

注目すべきホローカソードレーザーの一つに、ハンガリーのK. Rózsaらによって、ここ数年来研究が続けられている高電圧ホローカソード放電を用いた稀ガスレーザー³⁵⁾³⁶⁾および金属蒸気レーザー³⁷⁾³⁸⁾がある。原理的には阻止放電を利用するレーザー方式であり、電子エネルギーとして数100~1000eVを得ることが期待される。³⁵⁾³⁹⁾⁴⁰⁾阻止放電を利用する技術は、同軸型レーザー管の設計原理を考案する段階で既に応用されている⁴¹⁾が、そこでは文字通り無益な放電を阻止する目的に利用された。Rózsaらの研究は、これを高い電子エネルギーを得る方法として活用した⁴²⁾ものであり、その意義は大きい。

ホローカソード型稀ガスイオンレーザーに関する研究も、ハンガリーのM. Jánossyらによって続けられており、He-Kr, He-Ar, He-Ne Ne-Xe等の混合気体放電によって種々の連続発振線が得られている⁴³⁾

3. 負グロー利用技術

3.1 負グロープラズマの特徴

負グローは冷陰極グロー放電において、陰極暗部に隣接して生ずる(後述の図2参照)。放電機構的には陰極暗部で加速され、高いエネルギーを得た電子の衝突電離作用によって負グロープラズマが生成される。陰極暗部から負グローに突入する電子の初期エネルギーを U_0 、陰極暗部の長さを d とすれば、陰極から x の距離にある負グロー中の電子エネルギー U_x は

$$U_x = U_0 \exp \left(- \int_a^x \tau dx \right) \quad (1)$$

で表わされる⁴⁴⁾ ここで τ は陰極面に対して垂直の方向にとった単位長あたりの電子のエネルギー損失率を表わし、次式で与えられる。

$$\tau = f \frac{\sqrt{C_e}}{\lambda} \cdot \frac{1}{v_e} \quad (2)$$

但し、 f は電子の衝突エネルギー損失係数、 $\bar{C}_e$ は電子の平均熱運動速度、 λ は電子の平均自由行程、 v_e は電子の管軸方向への移動速度を表す。このことから、負グローに突入した電子は進行方向の距離とともに指数関数的にそのエネルギーを失うことがわかる。電子は負グロー中において全エネルギーを消耗し尽すのである。そしてこれとひきかえに電子密度が増加するであろうことは容易に推測できる。

Fig. 1. Electron groups in a 600 μ A discharge in 0.58 nm helium. The probe is facing the cathode in the negative glow (C. D. S. means cathode dark space) (ref. (45)).

Fig. 1 に D. H. Pringle ら⁴⁵⁾ がプローブ測定によって得た電子エネルギーならびに電子密度の、陰極暗部と負グローとの境界からの距離依存特性を示す。電子群が、平均エネルギーの異なる三つのグループに分類されている。第一のグ

ループは primary group もしくは fastest group と呼ばれるもので、陰極暗部で加速されたエネルギーをもって負グローに突入してくる電子群である。第二のグループは secondary group と呼ばれ、primary group による衝突電離の結果生ずる電子群、第三のグループは ultimate group もしくは slowest group と呼ばれ、エネルギーを消耗し尽して熱平衡状態となった電子群である。primary group は電子エネルギーにおいて ultimate group より 2 桁程度大きい、密度においては 4 桁程度小さい。つまり、負グロープラズマの特徴は、電子エネルギーおよび電子密度が、陰極暗部との境界 (Saum) からの距離と共に大きく変化することである²²⁾⁴⁵⁾ 陰極暗部に近い部分では高エネルギー、低密度特性が得られ、負グローの末端部では、低エネルギー、高密度特性が得られることがわかる。

一方、負グローが有する光学的特徴として次のようなことが明らかにされている。

- (1) 高いエネルギー準位からの遷移によるスペクトル線 (一価あるいは二価イオンのスペクトルが放出される)⁴⁶⁾
- (2) 陰極金属蒸気スペクトルが観測される⁴⁷⁾
- (3) 負グロー内で発生した光が陰極表面から光電子を放出させる (γ_p 作用)⁴⁸⁾

光学的特徴は電気的特徴に伴い、必然的に生ずる。筆者らの研究目的は、高い電子エネルギーと陰極金属蒸気スペクトルに着目してこれらをガスレーザーに応用することであった。

3.2 ホローカソード放電ならびにホローカソード効果

陰極を平行平板、U 字型あるいは円筒形とし、互いに向き合った陰極面の内側に負グローが現われるようにした陰極をホローカソードという⁴⁷⁾ ホローカソードは、負グローを狭い空間内に閉じ込め、放電を増強する目的に使用される。陰極間隔を減ずるか、ガス圧力を低下するか、あるいは放電電流を増加するかして、陰極間に現われる二つの負グローを合体して一つにすると、放電の増強作用、いわゆるホローカソード効果⁴⁹⁾

が生じ、次のような特徴が現われる。

電気的特徴として

- (1) 同一放電々流に対し、放電維持電圧が低下する。
- (2) 同一放電々圧に対し、陰極電流密度が増加する。
- (3) ある条件のもとで、電圧—電流特性が負になる。
- (4) 陰極暗部長が短縮する。
- (5) 負グロー中の高エネルギー電子および低エネルギー電子の密度が高い。

光学的特徴として

- (1) 放出光量が増加する。⁽⁴⁶⁾⁽⁴⁸⁾
  - (2) 陰極金属蒸気のスペクトル強度が増す。⁽⁵⁰⁾⁽⁵¹⁾
- これらの特徴を生かし、かつ、金属蒸気の閉じ込めが都合よく行えるように、ホローカソードレーザーが設計される。

3.3 レーザー管の構造と設計原理⁽⁴¹⁾

Fig. 2⁽⁴¹⁾ (a) に冷陰極グロー放電の構造を示す。放電々流の値を一定の値に保った状態で電極間距離を増加すると陽光柱だけがその長さを増し、負グロー、陰極暗部、ファラデー暗部等の長さは変わらない。レーザーには長い光路が必要であるから、陽光柱はレーザーにとって極めて都合がよい。He-Neレーザーをはじめ、各種ガスレーザーに陽光柱が用いられるゆえんで

Fig. 2. Relation between discharge structure and light emission: (a) structure of the low-pressure, cold cathode glow discharge, AG: anode glow, PC: positive column, FDS: Faraday dark space, NG: negative glow, and CDS: cathode dark space; (b) crossed-field type or transverse electric field (TE) type discharge; (c) parallel-plane type hollow-cathode discharge (ref. (41)).

ある。逆に電極間距離を減少してゆくと陽光柱のみがその長さを減じ、他の部分はかわらない。それゆえ、負グローのみの長い光路をつくるにはFig. 2 (b) に示すように陰極と平行に、負グローのファラデー暗部寄りの末端に陽極をおき、かつ、両電極の長さを増加すればよい。つまり、陽光柱が管軸方向に長さを増すのに対して負グローは管軸に垂直（陰極に平行）の方向にその長さを増すことになる。

Fig. 2 (c) に示すように、2枚の平板陰極を用いれば、二つの負グローが重畳した強力な負グローを得ることができる。光の通過を妨げないように、環状の陽極を用いる。これが平行平板型ホローカソード放電管の原理である。この電極を何組が組み合わせてゆけばFig. 3に示すような長い負グローの光路を得ることができる。これをセクション型平行平板ホローカソード放電管という。平行平板陰極のかわりにFig. 4に示すような円筒陰極を用いれば、さらに強力に

Fig. 3. Sectional-type of parallel-plane hollow-cathode discharge tube; NG: negative glow (ref. (41)).

Fig. 4. Sectional-type of cylindrical hollow-cathode discharge tube (ref. (41)).

Fig. 5. Flute-type discharge tube for whitelight laser oscillation (ref. (41)).

重畳した負グローを利用することができる。

Fig. 5 のように、ただ一本の円筒を用いた場合を笛型ホローカソード放電管と呼ぶ。ホローカソード内で発生した陰極金属蒸気をその中に閉じ込めておくのに便利な構造であり、初めて白色光レーザー発振を実現することができたレーザー管¹⁶⁾である。笛型レーザー管では10本の陽極を用いるので、これを単一の陽極にしたい場合はFig. 6 および Fig. 7 に示すような、同軸

Fig. 6. Concentric-cylinder type laser tube utilizing a perforated hollow-cathode (ref. (41)).

Fig. 7. Concentric cylinder-type laser tube utilizing a slotted hollow-cathode (ref. (41)).

Fig. 8. Structure of a laser tube which utilizes a new hybrid hole hollow-cathode: the larger holes (4mm) are for negative glow confinement and the smaller holes (1.6mm) are for diffusion of Cd vapor. TC represents the thermocouple (ref. (19)).

構造の放電管⁵²⁾が便利である。この場合、陽極円筒内に Cd 金属を挿入するため、スパッタリング作用を利用することができず、熱作用によってのみ Cd が気化される。同軸型の場合、多量の Cd 金属がレーザー管内に貯蔵できるので長寿命に適するが、陰極の構造を決定することが難しく、Fig. 8 に示す陰極構造（ハイブリッドホール型¹⁹⁾²⁰⁾と呼ぶ）によってようやく白

色光レーザーが得られた。ホローカソード内への負グローの閉じ込めと、Cd 蒸気の拡散とを独立に行う点が独創点である。ガス温度、したがってドップラー巾を低下する目的で陰極を外側に、そして陽極を内側に配置した白色光レーザー管¹⁸⁾を Fig. 9 に示す。これは新たに考案された新型レーザー管であり、二つの円筒陰極を用いるところから、ツインカソード型と名付けられている。

Fig. 9. End view of twin-cathode type laser tube, where Cd is the cadmium, G the grid electrode, and the meshed circle the lasing zone (ref. (19)).

4. 負グロー型金属蒸気レーザーの発振特性

4.1 白色光レーザー

Fig. 10 に Cd⁺ のエネルギー準位図⁴¹⁾を示す。図に示した赤、緑、青の三原色レーザー光が同時に発振して白色光レーザーとなる。この白色光レーザーによって天然色の再生が可能となり、Fig. 11 の色度図¹⁸⁾から理解できるように、その色再生特性は極めて優れている。Fig. 12 に白色光レーザーが得られる条件を示す。(a) は笛型の場合¹⁶⁾ (b) 図は同軸型の場合¹⁹⁾を示す。同軸型レーザー管で白色光レーザーが得にくかった一因がホローカソードの有効面積の損失およびホローカソード効果の減少にあったことが、ごく最近明らかになった¹⁹⁾すなわち、同軸型で

Fig. 10 Partial energy diagram of Cd ion and visible laser transitions (wavelength in nm) which are obtained with hollow-cathode type He-Cd laser tube (ref (41)).

Fig. 11. CIE chromaticity diagram showing reproducing characteristics of He-Cd⁺ laser (solid line), Ar-Kr⁺ laser (broken line), and Japanese color TV (chain line). (ref. 16)).

はCd蒸気の拡散を促進するために多数の孔ををホロカソードにあけた。これらの孔の部分は発光に寄与しないばかりでなく、互に向き合った陰極面が発揮するホロカソード効果（発光強度の増加）を著しく減退させ、白色光の発振を困難にさせていた。これを防ぐために、できるだけ陰極面の損失を防ぎ、かつCd蒸気の

(a)

(b)

Fig. 12. The condition for white light laser oscillation: (a) flute type (ref. 16), (b) concentric cylinder type (ref. 19); solid line: hybrid hole laser, broken line: slotted hollow-cathode laser.

拡散が十分に行えるように工夫したのがハイブリッドホール型レーザー管¹⁹⁾であり、安定した白色光発振が得られるようになった。

Table 1に、レーザー管の構造と陰極面積の損失の程度、発振特性の関係¹⁹⁾を示す。この観点から、笛型のもつ利点が再確認されつつある。一方ツインカソード型¹⁸⁾は、ガス温度を低下し、白色レーザー光のドップラー巾を減少させる目的で開発された新型レーザー管であり、放電物

Table 1 Relation among the loss of cathode area, type of cathode construction, and scillation characteristics (ref. (19)).

		(41) perforated	hybrid (this paper)			(41) slotted flute	(16)
			Mark I	Mark II	limited		
hole for confining	number cross section(cm ²)	156	80	32	16	54	10
		27.30	13.99	5.59	2.80	21.6	1.26
hole for diffusion	number cross section(cm ²)	—	76	124	140	—	—
		—	2.13	3.47	3.93	—	—
total cross-section of holes (cm ²)		27.30	16.12	9.06	6.73	21.60	1.76
loss of cathode area (%)		27.2	16.0	9.0	6.7	21.5	1.7
oscillation characteristics		yellow (red & green)	white	under testing	plan only	white	white
cathode metal		stainless steel					copper
size of cathode		4 mm inner diameter, 80 cm long, and 100.5 cm ² surface area.					

Table 2 Summing up of laser oscillation of high current hollow-cathode metal ion lasers.

Kind of metal ion	Buffer gas	Region of wavelength(nm)	Number of oscillation line	Reference
Cu ⁺	He, Ne, Ar, Xe	248.6-2000.4	42	(55) (61) (65) (66) (67) (68) (73)
Ag ⁺	He, Ne	224.3-2079.4	53	(56) (57) (61) (67)
Au ⁺	He	226.4- 859.9	22	(58) (67) (68)
Al ⁺	Ne	358.7- 747.1	5	(59) (65)
Cr ⁺ (Cr)	He	844.7- 871.1	8	(69)

理学的に新しい原理が応用されている点で従来の同軸管と異なる。今後さらに検討が続けられるであろう。

最近、陽光柱型 He-Se⁺レーザーに巧みな光学系を用いて白色光レーザーが得られている。⁵³⁾ He-Seレーザーは可視域に数10本の発振線をもつレーザーであるが、従来はそれらを制御することが困難であると考えられてきた。しかしこの度、それらの中から三原色のみを描出して白色光レーザーが得られた。負グロー型 He-Cd⁺白色光レーザーとの比較において興味深い。

Fig. 13⁵⁴⁾ に示すように負グロー型白色光レ

ーザーは定常状態において定電流特性¹⁶⁾¹⁹⁾を呈するため、レーザーに利用される放電々流の値は1アンペア以下である。レーザー出力を増加させる観点からは放電々流が自由に増加できることが望ましい。放電物理学的観点からも大変興味深い現象であることから、定電流特性が発生する機構とその防止策に関する研究⁵⁴⁾が続けられている。

4.2 紫外域および赤外域レーザー

1 アンペア以下の放電々流を利用する He-Cd⁺白色光レーザーに対して、数10アンペアの大電

Fig. 13 Calculated V-I characteristics of laser tube (solid line) and comparison with measured V-I characteristics (broken line). (ref. (54)).

流ホローカソード放電を利用するレーザー^{55)~73)}では、Table 2 に示すように、紫外域から赤外域に至る広帯域のレーザー発振線が得られる。とくに、紫外域レーザー光の連続発振を実現することは、従来、困難なことであったが、大電流ホローカソード放電により、 Cu^+ 、 Ag^+ 、 Au^+ 等から放射される多数の発振線が得られるに至った。また、長波長領域においては Ag^+ により、 2.1μ までの広がりを見せしており、その意義は大きい。とくに、 He-Cu^+ 780.8nm線は1Wの連続発振⁶²⁾が得られており、大出力の利点を活用して、将来への応用が期待される。

白色光レーザーにおける研究目標がそうであったように、この大電流ホローカソードレーザーにおいても長寿命化⁶⁴⁾⁷³⁾、高出力化⁶²⁾⁷²⁾に関する研究が開始され、Fig. 14³¹⁾に示すような種々の構造をもつレーザー管が表案されて、ハードウェア部門の研究にも力点が注がれている。

Fig. 15に、 Cu^+ イオンのエネルギー準位図⁵⁵⁾を示し、Fig. 16に Cu^+ による赤外⁷⁰⁾および紫外

Fig. 14 Transversely excited hollow-cathode laser configurations (ref. 31): (a) Schuebel type, (b) rectangular slotted hollow-cathode, (c) circular slot, (d) wave guide structure, and (e) hollow anode or obstructed glow.

Fig. 15 Partial term diagram of CuII displaying selected laser transitions (solid line) and the energies available from ground-state helium and neon ions. Wavelengths are indicated in nanometer (ref. (31)).

レーザー⁷³⁾発振特性の一例を示す。赤外域発振の場合は放電電流のしきい値が低い、紫外域発振の場合は、これより一桁高いことがわかる。紫外域連続発振を得ることの難かしさをうかがい知ることができる。

Fig. 16 Oscillation characteristics of Cu^+ laser:
(a) inflated region, $\lambda = 780.5 \text{ nm}$ and 780.8 nm (ref. (70)), (b) ultraviolet region, $\lambda = 270.3 \text{ nm}$ (ref. (73)).

しかし、ちなみに Ar III 351.1 nm および 363.8 nm の紫外線レーザーを得る陽光柱型レーザー⁷⁴⁾においては、レーザー発振を得るための放電電流のしきい値が 300 アンペアに達している。これに比べればホローカソード型紫外線レーザーのしきい値は一桁低く、種々の利点を有することが推測できる。

5. むすび

本解説では、レーザー媒質として稀ガスと金属蒸気から成る混合気体を用い、励起源として負グロープラズマを用いる、いわゆる負グロー型金属蒸気レーザーを中心に、その原理、開発の歴史、従来の国内外における研究成果等をまとめ、最近の動向について紹介を試みた。負グロー型レーザーの興味の中心は、負グロープラ

ズマの性質を熟知し、これをレーザーに適するように、いかに制御し、操作するかという点にあるように思われる。負グロー利用法の一つとして、ホローカソード放電が用いられるのも、このような理由による。そして、ホローカソード放電は、基本となる原理が至って単純明解であることから、種々の新型ホローカソード放電を考案することが可能となり、これがまた新たな興味を喚起してホローカソードレーザーの研究を一属盛りたてているように見受けられる。

筆者らの、白色光レーザーに関する研究が、大学における研究としては一般に難しいと解釈されているハードウェア主体の研究でありながら、新鮮味を持続しつつ一応の成果を得ることができたのは、このような事情を反映したことによる。大電流ホローカソード放電によって、連続発振紫外線レーザーが米国の大学で開発された過程も同様に解釈できる。

種々の特徴をもつ負グロープラズマを上手に活用することによって今後も多様な成果が得られるものと期待される。

参考文献

- 1) 後藤：レーザー研究, **8** (1980) 345.
- 2) J. Smith: J. Appl. Phys., **35** (1964) 3 723.
- 3) V. P. Chebotayev: Radio Eng. and Electron Phys., **10** (1965) 314, 316.
- 4) 小林, 老門：昭和39年度電子通信学会全国大会予稿 (1964) No.333.
- 5) I. Agárbiceanu and A. Agafitei: Rev. Roum. Phys., **11** (1966) 649.
- 6) C. S. Willet: IEEE J. Quantum Electron., **QE-6** (1970) 568.
- 7) M. Jánosy, L. Csillag, K. Rózsa, and T. Salamon: Phys. Lett. **46-A** (1974) 379, 411.
- 8) R. L. Byer, W. E. Bell, E. Hodges, and A. L. Bloom: J. Opt. Soc. America **55** (1965) 1598.
- 9) W. K. Schuebel: IEEE J. Quantum Electron., **QE-7** (1971) 39.
- 10) 浅見, 菅原, 常盤, 飯島：昭和44年度電子通信学会全国大会予稿 (1969) 600.
- 11) Y. Sugawara and Y. Tokiwa: Japan J. Appl. Phys. **9** (1970) 588.
- 12) Y. Sugawara, Y. Tokiwa and T. Iijima: Japan. J. Appl. Phys. **9** (1970) 1537.
- 13) W. K. Schuebel: Appl. Phys. Lett., **16** (1970) 470, IEEE J. Quantum Electron **QE-6** (1970) 574.

- 14) E. K. Karabut, V. S. Mikhalevskii, V. F. Papakin, and M. F. Sém: *Soviet Phys.-Tech. Phys.*, **14** (1970) 1447.
- 15) G. R. Fowles and B. D. Hopkins: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-3** (1967) 419.
- 16) K. Fujii, T. Takahashi and Y. Asami: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-11** (1975) 111.
- 17) S. C. Wang and A. E. Siegman: *Appl. Phys.*, **2** (1973) 143.
- 18) M. Otaka, T. Oshima, M. Takeuchi, T. Oikawa and K. Fujii: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17** (1981) March to be published.
- 19) K. Fujii, T. Oshima, Y. Nagashima, S. Miyazawa and T. Oikawa: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-16** (1980) 590.
- 20) K. Fujii, T. Oshima, and M. Otaka: *Proceedings of International Conference on Lasers '79* (1979) 454. Orlando, Florida, U. S. A.
- 21) J. R. Grace and A. I. McIntosh: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **12** (1979) 2043.
- 22) P. Gill and C. E. Webb: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **10** (1977) 299, **11** (1978) 245.
- 23) A. I. McIntosh: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **11** (1978) 301.
- 24) I. K. Belal and M. H. Dunn: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **11** (1978) 303.
- 25) T. Iijima and Y. Sugawara: *J. Appl. Phys.*, **45** (1974) 5091.
- 26) J. A. Piper and M. Brandt: *J. Appl. Phys.*, **48** (1977) 4486.
- 27) I. Smilanski, A. Kerman, L. A. Levin and G. Erez: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-13** (1977) 24.
- 28) J. A. Pipgr and D. F. Neely: *Appl. Phys. Lett.*, **33** (1978) 621.
- 29) 飯島, 菅原: *応用物理***45** (1976) 1134
- 30) 飯島, 高橋, 菅原, 浅見: *応用物理***48** (1979) 48.
- 31) D. C. Gerstenberger, R. Solanki and G. J. Collins: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-16** (1980) 820.
- 32) T. F. Trost and W. B. Jhonson: *NASA Graduate Trainingship Tech. Report A-46* (1968)
- 33) L. Csillag, M. Jánossy, K. Róza and T. Salamon: *Phys. Lett.*, **50A** (1974) 13.
- 34) J. R. McNeil and G. J. Collins: *Appl. Phys. Lett.*, **27** (1975) 595, **28** (1976) 207, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-12** (1976) 371.
- 35) K. Róza, M. Jánossy, J. Bergow and L. Csillag: *Optics Comm.*, **23** (1977) 15.
- 36) M. Jánossy, K. Róza, L. Csillag and J. Bergou: *Phys. Letter*, **68A** (1978) 317.
- 37) K. Róza, M. Jánossy, L. Scillag, and J. Bergou: *Optics Comm.*, **23** (1977) 162.
- 38) K. Róza, M. Jánossy, L. Scillag and J. Bergou: *Phys. Lett.*, **63A** (1977) 231.
- 39) 川瀬: 電気学会プラズマ研究会資料EP-78-11 (1978)
- 40) 宮沢, 永島, 藤井, 筑川: 昭和54年度電気学会全国大会予稿集 (1979) No.170.
- 41) K. Fujii, S. Miyazawa, T. Takahashi and Y. Asami: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-15** (1979) 35.
- 42) K. Róza: *Z. Naturforsch.*, **35a** (1980) 649.
- 43) M. Jánossy and P. Tuovinen: *Rev. Hungarian Acad. Sci.*, **46(3)** (1979) 167.
- 44) 野畑金弘: 電気学会雑誌 **81** (1961) 155.
- 45) D. H. Pringle and W. E. J. Favis: *Phys. Rev.*, **96** (1954) 536.
- 46) K. Fujii: *Japan, J. Appl. Phys.*, **16** (1977) 1081.
- 47) 例えば本多: 気体放電現象 (1964) 112~129. 東京電機大学出版局
- 48) P. F. Little and A. Von Engel: *Proc. Roy. Soc. London*, **A-224** (1954) 209.
- 49) 藤井: 電気学会論文誌**51-A** (1976) 39, 427.
- 50) T. Musha: *J. Phys. Soc. Japan*, **17** (1962) 1440.
- 51) 浅見, 藤井: 電気学会東京支部大会予稿集 (1968) No. 6.
- 52) K. Fujii: *Japan, J. Appl. Phys.*, **14** (1975) 1339.
- 53) H. P. Popp and E. Schmit: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-15** (1979) 840.
- 54) K. Fujii and T. Takahashi: *Jpan. J. Appl. Phys.*, **19** (1980) 1689.
- 55) J. R. McNeil and G. J. Collins: *Appl. Phys. Lett.*, **27** (1975) 595, **28** (1976) 207, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-12** (1976) 371.
- 56) W. L. Johnson, J. R. McNeil and G. J. Collins: *Appl. Phys. Lett.*, **29** (1976) 101, 172.
- 57) R. D. Reid, W. L. Johnson, J. R. McNeil and G. J. Collins: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-12** (1976) 778.
- 58) R. D. Reid, J. R. McNeil and G. J. Collins: *Appl. Phys. Lett.*, **29** (1976) 666.
- 59) D. C. Gerstenberger, R. D. Reid and G. J. Collins: *Appl. Phys. Lett.*, **30** (1977) 466.
- 60) F. J. de Hoog, J. R. McNeil and G. J. Collins: *J. Appl. Phys.*, **48** (1977) 3701.
- 61) R. Solanki, E. L. Latash, W. M. Fairbank, Jr., and G. J. Collins: *Appl. Phys. Lett.*, **34** (1979) 568.
- 62) B. E. Warner, D. C. Gerstenberger, R. P. Reid, J. R. McNeil, R. Solanki, K. B. Persson and G. J. Collins: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-14** (1978) 568.
- 63) R. Solanki, G. J. Collins, and W. M. Fairbank, Jr.: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-15** (1979) 525.
- 64) R. D. Reid, G. J. Collins and K. B. Persson: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-16**, (1980) 3.
- 65) W. K. Schuebel: *Appl. Phys. Lett.*, **30** (1977) 516.
- 66) K. G. Hernqvist: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-13** (1977) 929.
- 67) K. Jain: *Appl. Phys. Lett.*, **36** (1980) 10.

- 68) K. Jain: IEEE J. Quantum Electron., **QE-16** (1980) 387.
- 69) K. Jain: Appl. Phys. Lett., **37** (1980) 362.
- 70) H. J. Eichler, H. J. Koch, J. Salk and G. Schäfer: IEEE J. Quantum Electron., **QE-15** (1979) 908.
- 71) H. J. Eichler, H. Koch, J. Paffenholz, J. Salk and G. Skrobol: J. de Physique, **40** (1979) C 7-379.
- 72) H. J. Eichler, and W. Wittwer: J. Appl. Phys., **51** (1980) 80.
- 73) B. Aushwitz, H. J. Eichler and W. Wittwer: Appl. Phys. Lett., **36** (1980) 804.
- 74) H. R. Lüthi, W. Seelig, J. Steinger and W. L. Lobsiger: IEEE J. Quantum Electron., **QE-13** (1977) 404.