レーザーと分光学

第3講 気体レーザー

藤岡 知夫・小原 實

慶應義塾大学工学部電気工学科 横浜市港北区日吉 3-14-1 (〒223)

(1980年4月17日受理)

Lasers and Spectroscopy

III. Gas Lasers

Tomoo FUJIOKA and Minoru OBARA

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Keio University,
3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223

(Received April 17, 1980)

1. ま え が き

気体レーザーとして発振する媒質は非常に多く、気体のスペクトル幅は非常に狭いので、固体や液体のように限られた物質や限られた条件でのみ狭いスペクトルが得られるのとは異なる。気体レーザーでは、真空紫外域における H_2 レーザーの $109.8 \text{ nm}^{1)*1}$ から、ミリ波域における CD_3Cl の $1990.75 \mu\text{m}^2$ に至るまでの幅広い波長帯に5000本以上の発振線³⁾が現在まで得られていて、固体、液体および半導体などの他のレーザーに比較すると発振線の数は圧倒的に多い。気体レーザーの発振線の詳細な波長表は Beck, Englisch と Gürs³⁾ によってまとめられているので、リモートセンシングによるガス分析、ラマン分光、光励起、レーザー誘起化学、レーザーによる同位体分離などの応用にはその表を参照されたい。

気体レーザーの発振光の性質は、単色性、コヒーレンスが良いことで、各種のレーザーの中で最も優れてい

る。しかし、発振波長が固定していて可同調性のないことが欠点であったが、最近では高圧力パルス CO_2 レーザーなど発振波長がある範囲で連続的に変化できる気体レーザーも報告され⁴⁾、市販されているものもある⁵⁾。

気体レーザーに最も広く用いられている励起方式は放電である。何種類かの混合気体を放電させることにより原子、分子を生成しその物質からレーザー発振を得ることもある。原子は解離レーザー、分子は化学レーザー、エキシマーレーザーなどである。多くの気体レーザーは放電励起できるが、他には化学励起、光励起、熱励起方式などがあり、複数の励起方式で発振できるレーザーもある。

気体レーザーの特徴はほとんど気体の性質から生じている。すなわち、分子・原子およびイオン・電子のそれぞれの間の衝突による励起、化学反応、失活、気体の濃度が容易に変変であること、気体を何種類か混合したり、その混合の割合を変えたりすることが容易であること、および大体積化の制限が少なくともレーザー媒質にはないことなどである。

気体レーザーに関する解説、総説などは数多く報告さ

*1 $XeCl$ エキシマーレーザーの Ar ガスを用いた三次高調波発生では 102.6 nm が Reintjes により 1979 年に報告されている。

れてきた。現在の気体レーザー工学の進展はめざましく、従来不可能であるとされていた気体レーザーが実現された場合もある。また、時の経過につれて、注目される気体レーザーが変わるので気体レーザーに関する総説を執筆するのは難しい。

本稿では、現在研究の対象および使用されている気体レーザーに関して、レーザー工学的な観点から解説してみようとするものである。気体レーザーのレーザー物理的およびレーザー分光学的分野については既に本誌に書かれたことがある。上記の研究は既に相当進んでいて、どちらかと言うと気体レーザーの工学的研究はまだ発展段階にある。ある分野の解説が報告されるにつれて、その分野の研究は終りに近づくと言われるが、本稿では発展段階にある気体レーザー工学に関する“役に立つ”解説を試みようと思う。

ここでは、一般的気体レーザーとして CO_2 レーザー、希ガスハライドレーザーを取上げる。 CO_2 レーザー励起技術の他の気体レーザーへの波及効果は大きい。 CO_2 レーザーを例に取り、各放電励起方式による励起機構を気体エレクトロニクスの観点から論じ⁶⁻⁸⁾、それを基に希ガスハライドレーザーを論じる。

2. CO_2 レーザー

2.1 発振機構

2.1.1 振動エネルギー準位

CO_2 と N_2 分子との振動エネルギー準位図の一部を Fig. 1 に示す。 N_2 は同種二原子分子で永久電気双極子モーメントを持たず、光学的振動回転遷移は禁制されているので振動準位は長寿命である。 CO_2 は直線状対称な三原子分子であり、その振動モードは対称伸縮モード ν_1 、変角モード ν_2 、非対称伸縮モード ν_3 の3つであり、一般に振動モードを (ν_1, ν_2, ν_3) と表示する。 CO_2 の (001) 準位のエネルギーは 2349.3 cm^{-1} で N_2 の $v=1$ 準位の 2330.7 cm^{-1} との差が 18.6 cm^{-1} しかないため、寿命の長い N_2 の $v=1$ 準位から CO_2 の (001) 準位へ振動・振動 (V-V) エネルギー移乗が共鳴的に速く行われる^{*2}。(100) と (020) はフェルミ共鳴をおこし、その結果できた $(100, 020)_I$ と $(100, 020)_{II}$ 準位は 1388.3 cm^{-1} と 1285.5 cm^{-1} に位置する。通常のレーザー発振は、(001)→(100, 020)_I の $10.4 \mu\text{m}$ 帯と、(001)

Fig. 1. CO_2 - N_2 の振動エネルギー準位図 (部分).

→(100, 020)_{II} の $9.4 \mu\text{m}$ 帯の P, R 両ブランチで観測される。また、特定の条件下では、シーケンス発振が観測される。

2.1.2 励起機構

ここでは最も一般的な放電励起の場合を考察する。 CO_2 分子へのエネルギー移乗には電子との非弾性衝突によるものと、振動励起 N_2 分子からの共鳴振動エネルギー移乗による2つの衝突過程がある。電子との非弾性衝突によるエネルギーの移乗を考えるには、 N_2 , He, CO_2 の励起断面積、電子エネルギー分布 $f(u)$ 、電子密度 n_e 、電子の平均エネルギー $\bar{u}$ を知る必要がある。しかし、これらを全て実験で測定するのは難しいので理論計算によって予測するのが一般的である。電子励起、イオン化、 N_2 , CO_2 の振動励起に分配されるエネルギーは E/N の関数として記述できる。ここで、 E と N はそれぞれ電界強度 (V/cm)、気体分子密度 (cm^{-3}) である。Nighan の理論計算⁹⁾ では空間的均一性を仮定し、弾性衝突や回転励起は無視されている。パルス CO_2 レーザーでは放電の各パラメータは時間の関数であるが、その放電時間は電子と中性分子との非弾性衝突に比べて非常に遅いので、Nighan の定常状態における計算は高圧力パルス放電の場合にも適用できる。

N_2 の電子衝突による振動励起の衝突断面積は、Schulz¹⁰⁻¹²⁾, Engelhardt, Phelps と Risk¹³⁾ により報告されている。それらの結果によると、電子エネルギーが 1.5 eV の時、 N_2 の $v=1$ への励起断面積は $1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ であるが、 $4 \sim 5 \text{ eV}$ になると非常に小さくなる。一方、 CO_2 の励起断面積は Hake と Phelps¹⁴⁾,

*2 V-V エネルギー移乗過程においては、エネルギーの差 ΔE が熱エネルギー kT と比較して $\Delta E \leq kT$ ならば、エネルギー移乗は共鳴的に起こり、その速度定数は非常に大きいことが知られている。

Boness と Schulz¹⁶⁾, Andrick ら¹⁶⁾などによって報告され、CO₂ の (010) への直接励起は 0.1 eV で 3×10^{-16} cm², (001) へは 1.5×10^{-16} cm² である。

各種混合気体に関して、分子の振動およびイオン化などに分配される電子エネルギーの割合を E/N をパラメータに Nighan⁹⁾ が理論計算した結果を Figs. 2, 3 および 4 に示す。Fig. 3 から、N₂ 中で $E/N \approx 1 \times 10^{-16}$ V cm² 付近で振動励起と電子励起に半分ずつ分配されることがわかる。大気圧放電励起 CO₂ レーザーの典型的な E/N の値は $2 \sim 8 \times 10^{-16}$ V cm² (E/p : 4.9~19.6 kV/cm.atm)¹⁷⁾ で、電子密度 n_e は $2 \times 10^{12} \sim 2 \times 10^{13}$ cm⁻³ であり、平均電子エネルギー $\bar{u}$ は 2~4 eV であ

る。一方低圧力 CO₂ レーザーの典型的な平均電子エネルギー $\bar{u}$ は 1~2 eV である^{20, 21)}。Figs. 2~4 から、低 E/p の方が励起効率がより高いことがわかり、後述する種々の励起方式でいかに電子エネルギーを制御して効率良く CO₂ の (001) 準位への励起効率を増大するかが問題となる。

最近の高気圧の CO₂ レーザーの結果から、レーザーの基本的な励起過程は低圧力の場合と変わらないことが明らかになっている¹⁸⁾。

2.1.3 緩和過程

CO₂ 分子のアインシュタインの A 係数は (001)→(000) の 4.3 μm 帯で ~ 10 sec⁻¹, (001)→(100, 020)_I の 10.4 μm 帯の P(20) で 0.238 sec⁻¹ である¹⁹⁻²¹⁾。他の遷移の A 係数の値もこの桁であるので、分子衝突による振動緩和が通常の CO₂ レーザーのエネルギーの緩和を支配する^{21, 22)}。例として、1 気圧の CO₂-N₂-He 混合ガス中の衝突による緩和速度を Fig. 5 に示す。

2.2 連続動作 CO₂ レーザー

連続動作 (CW) CO₂ レーザーは現在大出力レーザー、小形レーザーおよび周波数安定化レーザーに分類される²³⁾。

大出力 CW CO₂ レーザーとしては、高速循環方式²⁴⁾、ガスダイナミック方式^{25, 26)}などがある。大出力化の原理

Fig. 2. CO₂-N₂-He での E/N と電子の平均エネルギー $\bar{u}$ ⁹⁾。

Fig. 3. N₂ の電子励起、振動励起、イオン化に分配される電力の割合⁹⁾。

Fig. 4. CO₂ の各エネルギー・モードに分配される電力の割合⁹⁾。

Fig. 5. $\text{CO}_2\text{-N}_2$ の衝突緩和時間, $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/1/4$ (1 atm)¹⁰⁾.

は、ガスを高速で流すことにより、単位時間にレーザー共振器内に存在する上位レーザー準位の CO_2 分子数を増大し、同時に下位準位の CO_2 を共振器から除去することである²⁷⁾。

小形 CW CO_2 レーザーとしては導波路形レーザーがある。これはレーザー管を BeO 、石英などの細管で構成することにより、レーザー管中の光が導波路モードで伝搬するもので、細管のためガス温度を低下できる結果として下位レーザー準位の CO_2 分子が減少しレーザー利得が増大する²⁸⁾。管径 2 mmφ、長さ 10 cm のレーザーで数 W の出力が得られている²⁹⁾。

周波数安定化レーザーは、種々の周波数安定化機構によりレーザー発振周波数の安定化を図っているもので、光領域の周波数一波长標準、光速の精密測定、高分解能分光¹⁰¹⁾などの光源などに利用される³⁰⁾。

2.3 パルス CO_2 レーザー

2.3.1 歴史的背景

10 μm 帯の CO_2 レーザーは Patel³¹⁻³³⁾ によって最初に発振が報告されて以来、そのスペクトルの単色性(純度)と空間的コヒーレンスが良く、10 μm 帯の波長の利用価値、高効率高出力特性などの特長から多くの理論的実験的研究が現在までなされてきた。 CO_2 ガスに N_2 および He ガスを添加すると動作効率、レーザー出力が著しく改善できることが発見され、 CO_2 レーザーは大きく進歩した³⁴⁻³⁷⁾。パルス CO_2 レーザーの励起に速い立ち上がりの高電圧パルスを印加するとレーザー出力はさらに増大した³⁸⁾。それから、短い放電時間の高

電圧パルスを印加する方向すなわち高電力注入の方向に研究は進んだ。

ところで、 CO_2 パルスレーザーエネルギーは励起 CO_2 分子数に大体比例し、かつそのパルス幅は大部分励起分子の緩和時間に依るためガス圧力に逆比例する傾向を示すので、レーザーパワーはおおよそ圧力の 2 乗に比例する。それ故、ハイパワーを得るためには高圧力下でのレーザー励起が不可欠である。そこで、従来 N_2 レーザー励起に用いられていた横方向放電励起が CO_2 シーザーにも応用され、1970 年には Beaulieu³⁹⁾ により横方向放電励起大気圧 CO_2 レーザー (Transversely Excited Atmospheric Laser: TEA Laser) の発振が実現された。高圧力 CO_2 レーザーは従来の低圧力 CO_2 レーザーとは出力の点で格段の進展を見せた。1970 年以後、パルス CO_2 レーザーの分野は横方向放電励起レーザーに絞られ、盛んに研究が行われている。 CO_2 パルス放電励起技術の波及効果は大きくパルス化学レーザー、希ガスハライドエキシマレーザーなどの励起(点火)技術の源泉は CO_2 レーザーにあると言っても過言ではない。

2.3.2 励起方式

高出力を得るためには高圧力大体積におけるレーザー動作が必要であることは前述した。ところが、高圧力気体中での空間的均一なグロー(アバランシェ)放電はアーク放電に移行しやすいために最近まで効率の良い高圧力パルスレーザーは実現できなかった。アークは局部的に電流が集中し励起分子数の減少を引き起すとともに、レーザー媒質中に屈折率の不均一性を生ずるため、レーザービームの品質および総合的効率を低下させる。以上の点を考慮して高圧力 CO_2 パルス放電の必要条件をまとめると次のようになる。

- [1] アーク放電への移行がなく、温度および屈折率が大体積にわたって均一であること。
- [2] 電子の運動エネルギーを効率良く CO_2 分子の上位レーザー準位のエネルギーに変換させること。
- [3] 短時間で振動エネルギーを高密度にするために、高電流密度を維持すること。

以上のような条件を満たす励起方式には、

- [1] 予備電離放電(二重放電)励起
- [2] 電子ビーム制御放電励起

があるが、高出力用として次のような励起方式もある。

- [3] 光励起
- [4] 化学エネルギー移乗励起

次に各励起方式の特徴を説明する。

a) 予備電離放電(二重放電)励起 高レーザー出力を得るには、高圧力大体積中で空間的に一様でかつ安

定なグロー放電が不可欠であるので、レーザー気体の励起主放電に先立って予め気体を電離しておく、いわゆる予備電離放電（二重放電）方式および平等電界を達成する電極形状などが必要である。予備電離方式としては紫外光（UV, VUV 光）⁴⁰⁻⁴⁷、電子ビーム⁴⁸、X線⁴⁹⁻⁵²などが用いられ成功している。均一な電界を与える電極の形状としては Chang 型⁵³、Rogowski 型⁵⁴、Bruce 型⁵⁵ 電極などがある。Chang 型は $y=\pi/2+k \cosh x$ 、Rogowski 型は $y=a/2+\exp\{(\pi/a)x\}$ の曲線の、Bruce 型はスパークギャップの電極の経験的形状（半球状）である。ここで、 k 、 a は定数、 x は放電幅の軸、 y は放電間隔方向の軸である。

さらに、効率良く励起するために低インダクタンスの放電回路を用いて、放電時間をアーク形成時間よりも短かくし、放電電力入力を励起に効率良く変換することが大切である。

二重放電方式は Dumanchin⁴⁰、Laflamme⁵⁶ らによってはじめに報告されたもので、主放電の前に陰極付近および主放電電極間にイオン・電子対を生成する方式である。UV 光による予備電離の効果は Hertz⁴² によってスパークギャップの UV 光の効果で破壊電圧を下げることで発見されていたが、Pearson と Lamberton⁴⁸ によって始めてワイヤーを付加した TEA レーザーが報告され、その後主放電の前に UV 光による予備電離を用いた種々の方式が開発されている。何らかの方法で発生した UV 光で放電媒質を照射し光電離し、さらに電極をも照射して光電子放出させる。この方式により、Alcock ら⁵⁷ はレーザービーム断面積 $\sim 60 \text{ cm}^2$ 、レーザー出力 300 J/pulse (3 GW) まで得ている。最近、予備電離電子数密度と CO_2 レーザーエネルギーの関係が実験的に明らかにされ、レーザーエネルギーは主放電入力一定のもとで予備電離電子数密度の増加に対し対数関数的に増加することが報告されている⁵⁸。

最近、UV 光の代りに電子ビーム⁴⁸や X 線⁴⁹⁻⁵²で予備電離するレーザーが報告されている。電子ビーム予備電離方式には電子ビーム窓材の機械的強度および加熱の問題がある。また質量減衰係数が大きいため高電圧で電子を加速しなければならない。これら電子ビームの問題点を改善できる方式として考案されたのが、X線予備電離である。X線は質量減衰係数が小さいため⁵⁹、大体積を均一に予備電離でき、窓材の問題も少ないので、電子ビームよりも優れている。この方式に対しては、X線の遮蔽の問題が付加的に生ずる。

b) 電子ビーム制御放電励起 電子ビームを用いたレーザーは、①電子ビーム予備電離、②電子ビーム制御

放電、③電子ビーム直接励起の三種類がある。①に関しては既に述べた。③の電子ビーム直接励起（点火）は、特に短波長領域のレーザー上単位のエネルギーが高く、寿命の短い気体レーザーに用いられてきた。電子ビーム励起は Ar-N_2 、 Xe_2 、 KrF などには有効であることが実証されているが、 CO_2 分子のようにレーザー上単位が低い場合には不適であると考えられる。著者の知る限りでは、 CO_2 レーザーに用いられた例はない。

電子ビーム制御放電 (Electron-beam controlled discharge) は大体積 CO_2 レーザー励起で最適な特性を有する放電を生成するのに有効な方法である。この放電では電子ビームが主放電中のイオン・電子密度を制御し、電子のドリフト速度の設定および電力注入は主放電電源による。この放電では、通常 $100\sim 200 \text{ keV}$ の電子ビームを外部から供給しガスの電離を持続し、平均電子エネルギーは CO_2 分子のレーザー上単位の励起断面積が最大になるように主放電電源電圧を設定する。Persson⁶⁰ によると、低圧プラズマ中の電子・イオンの生成機構が外部イオン化源の印加電界に依存しなければ、安定なプラズマが生成できる。以上のようにイオン化とレーザー励起過程が分離された放電の印加電界は自己持続放電 (Self-sustained discharge) の場合に比較して非常に低くすることが可能である。その結果、ガス圧力の変化に対しても電子速度分布を調整でき、 CO_2 分子の励起効率も大幅に改善できる。さらに、自己持続放電の場合のようなアーク移行以前の電力注入の制限条件はないので、長いパルス幅の放電すなわち長いパルス幅のレーザー発振が得られる。

Festermacher ら^{61,62}の実験では、熱陰極電子銃によって電子電流密度 0.2 A/cm^2 、電子エネルギー 130 keV を 800 cm^2 の $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$ に注入し、 $E/N=1.7\times 10^{-16} \text{ V}\cdot\text{cm}^2$ とすると、 $10.4 \mu\text{m}$ 帯の $\text{P}(20)$ の小信号利得は $4.6\% \text{ cm}^{-1}$ であった。Daugherty^{63,64} らは 130 keV の電子ビームを 10^{12} cm^{-3} の電子密度で供給し、主放電の E/P は $5\sim 6 \text{ kV/cm}\cdot\text{atm}$ で出力 2 kJ/pulse (50 J/l) を得た。

この方式の長所と短所をまとめると次のようになる。

- 長所 [1] 励起電界を CO_2 レーザーの上位振動単位の励起に最適な値に設定できる。
 [2] 望むレーザー特性の最適値にガス混合比および圧力を選択できる。
 [3] 大体積、長い電極間隔にわたって、均一な放電励起が実現できる。

短所 [1] レーザーと電子ビームダイオードチャンパーとを隔てるアノードホイルが加熱のため

損傷を受ける。フォイルは電子ビームエネルギー損失を低下させるため充分薄くなければならない、高圧力に耐える構造が必要である。

この励起方式は現在レーザー核融合用 CO_2 レーザーの最終段増幅器に用いられている^{65,66)}。

c) 光励起 リモート・センシング^{67,68)}、レーザー誘起化学^{69,70)}、レーザー同位体分離⁷¹⁻⁷⁷⁾には、分子の振動回転スペクトルに合った新しい赤外域のレーザー光源が必要である。現在、光励起^{*3}により多くの赤外レーザーが発振している^{78,77,79)}。

CO_2 レーザーの場合、HBr ケミカルレーザーの 4.3 μm の光で励起され、33 気圧まで CO_2 レーザーの発振が実現されている⁷⁸⁾。この方式では、励起光源自体も赤外レーザーであるため、前掲の励起方式を採用するので、効率は直接励起方式に比較してさらに光励起効率が入るので総合効率は低下する⁷⁸⁾。

この方式の利点は、ある特定の準位に選択的に励起できるので光子変換効率が大きいこと⁷⁸⁾、放電励起が困難な超高圧力動作⁷⁸⁾が可能となることである。

低圧力の $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$ では離散的な多数の振動回転スペクトルがドップラー幅で決定される狭い利得幅を示すが、高圧力になると利得幅は圧力拡がり⁸⁰⁾によって決定される均一拡がりの利得幅 $\Delta\nu_p$ は次のように近似できる^{81,82)}。

$$\Delta\nu_p = 7.58(\phi_{\text{CO}_2} + 0.73\phi_{\text{N}_2} + 0.6\phi_{\text{He}})P\left(\frac{300}{T}\right)^{1/2}$$

ここで

$\Delta\nu_p$: 半値全幅 (MHz),

ϕ : ガス混合割合, $\phi_{\text{CO}_2} + \phi_{\text{N}_2} + \phi_{\text{He}} = 1$,

P : 全ガス圧力 (Torr)

T : 絶対ガス温度 (K)。

極度にガス圧力を上昇すると、各振動回転線が圧力拡がりにより重なり合い^{82,83)}、レーザー利得は連続的なバンドを構成し連続的に同調可能な発振スペクトルが得られ^{78,82)}、さらにモード同期による超短パルス列出力が発生できる^{48,52)}。

d) 化学エネルギー移乗励起 この方式は CO_2 レーザーより単位体積当りのレーザー出力ははるかに大きい寿命の短い DF (HF, HBr) から寿命の長い CO_2 分子へ V-V エネルギー移乗して、有効に CO_2 レーザー光として出力を取り出すことがねらいである。また、レーザーの発振波長を CO_2 に変換する方式とも考えられる。

この方式には、DF (HF)- CO_2 、HBr- CO_2 系などがある。代表的なパルス DF- CO_2 系の TCL (Transfer Chemical Laser) は Wilson ら⁸⁴⁾、Poehler⁸⁵⁻⁸⁷⁾、Suchard ら⁸⁸⁾によって研究されてきた。 $\text{D}_2\text{-F}_2\text{-CO}_2\text{-He}$ 混合ガス中での反応点火は、UV フラッシュランプおよびパルス電気放電による。DF- CO_2 TCL のフラッシュランプによる反応点火で、19 J/l·atm の CO_2 レーザー出力が報告されている⁸⁵⁻⁸⁷⁾。この化学効率は 3.2% である。同様に Suchard ら⁸⁸⁾によれば、20 J/l·atm 化学効率 5.1% の DF- CO_2 TCL が報告されている、HBr- CO_2 の TCL で、HBr レーザー出力よりもエネルギー効率は約 4 倍の改善が報告されている⁸⁹⁾。

2.3.3 レーザー共振器

パルス CO_2 レーザー出力の応用とレーザー光の品質とは密接に結びついている。パルス CO_2 レーザーは一般に大体積、高利得のレーザーである。この活性媒質から有効にレーザー出力を取り出すには、活性体積とレーザー共振器モード体積とを一致させる必要がある。安定共振器を用いると、多モード発振にしない限り活性媒質の全断面積から効率良く出力は取り出せない。低次横モードの出力を得ることと、取り出し効率の増大とは相反する。多モード出力では、ビームの伝搬、集光度が非常に劣化するが、熱処理応用などには用いられる。

一方、近年、大口径高利得のレーザーには不安定共振器が広く用いられている。不安定共振器では容易に大断面積の活性媒質と共振器モード体積を一致させることができるし、同時に低次横モードの出力が発生できるので、レーザーの高効率化と高品質レーザー光の取り出し

Fig. 6. 共焦点型不安定共振器, (a) ポジティブ・ブランチ, (b) ネガティブ・ブランチ。

*3 赤外ラマンレーザー^{78,79)}も含めている。

Table I. 希ガスハライドエキシマーレーザーの組合せ

	F		Cl		Br		I	
	λ [nm]	τ [ns]	λ [nm]	τ [ns]	λ [nm]	τ [ns]	λ [nm]	τ [ns]
Xe B-X	<u>351</u>	(12-19)	<u>308</u>	(11)	<u>282</u>	(12)	253	(12)
C-A	<u>490</u>	(93, 113)	350	(120)	302	(120)	263	(110)
Kr B-X	<u>249</u>	(6.5-9)	<u>222</u>		206			
C-A	275	(63)						
Ar B-X	<u>193</u>	(4.2)	<u>175</u>					
C-A	203	(48)	199					
Ne B-X	108	(2.6)						
C-A	117	(38)						

λ : 波長 (nm), τ : 自然放出寿命, 波長を で含んであるものはレーザー発振の報告されているもの。

が同時に達成できる。不安定共振器を大口径 TEA CO₂ レーザーに用いると、容易に平面波の回折限界に近いレーザー出力が発生できる。さらに不安定共振器の特徴は、大強度光に対する耐破壊強度の高い反射型の光学系のみで共振器が構成できることである。Fig. 6 に示すように、共焦点系不安定共振器には、positive branch と negative branch の 2 つの構成がある。negative branch の場合には、共振器内部に光学系の焦点が存在するので、共振器内部でレーザー光による気中破壊の生ずる危険がある。

不安定共振器に関する研究は Siegman らにより行われている⁹⁰⁻⁹⁴⁾。

2.3.4 応用

現在までの応用例はレーザー核融合からレンジ・ファインダーまで多方面にわたっており、将来新しい応用例も登場するであろう。応用に関しては文献 23), 95), 96) に譲る。

最近では、高速繰返し動作の TEA CO₂ レーザー⁹⁷⁻¹⁰⁰⁾が開発され、高尖頭出力と高平均出力の両方が必要な応用に用いられている。

3. 希ガスハライドエキシマーレーザー

3.1 はしがき

現在では、エキシマーとは希ガスダイマー、希ガスハライド、希ガス+(II, III, IV, V, VI) 族原子, II 族+族原子, II 族+アルカリ, 多原子エキシマーなどすべてを含むように広義に解釈されている¹⁰²⁾。

希ガスハライドはエキシマーの 1 つで励起状態の希ガスと基底状態のハロゲン原子とで構成された分子を意味

する¹⁰²⁾。希ガスハライドレーザー (Rare-Gas Halide Laser, 以下 RGH レーザーと略記) は RGH エキシマーの bound-free または bound-bound 遷移を利用するもので、このエキシマーの生成およびエキシマーのポテンシャルの決定は反応動力学、分光学の分野で興味深いテーマであるし、そのレーザー自体高出力高効率レーザーとして注目され、各分野の研究者により精力的に研究されている。さらに、その発振スペクトルは従来の簡単に発振する紫外域の N₂ レーザー ($\lambda=337.1$ nm; C³ $\pi_u \rightarrow B^3\pi_g$) よりも短いので、より短波長の色素レーザーの励起、光化学反応、光イオン化などの応用研究の光源として用いられている。

1975 年の最初の発振の報告¹⁰³⁾ から 5 年しか経過していない。現在ではエキシマーレーザーの中で最も研究の進んでいるのは RGH レーザーである。

RGH のハロゲンと希ガスの組合せを Table I に示す。レーザー発振が報告されている最短波長は ArCl の 175 nm¹⁰⁴⁾ から最長波長の XeF(C-A) の 490 nm¹⁰⁵⁾*4 までほぼ等間隔に多数存在する。

このレーザーの励起方式としては、①電気放電励起、②電子ビーム直接励起、③電子ビーム制御放電励起、などが主に用いられている。

大型大出力 RGH レーザーでは②の方式が優れ、単一発振器としては、KrF で 350 J/pulse (0.6 μ s) が報告されている¹⁰⁶⁾。Sandia Labs. の Hoffman ら¹⁰⁷⁾ は②の軸方向励起で、ArF で 92 J/pulse (1.6 GW),

*4 XeF は通常 B-X 遷移の 351 nm が発振するが、最近 Fisher¹⁷⁸⁾ と Burnham¹⁷⁹⁾ によって C-A 遷移の 490 nm の発振が報告された。

KrF で 108 J/pulse (1.9 GW) の出力を報告している。
 ③ の励起方式は Avco Everett Research Lab. の Daugherty のグループにより精力的に研究されている。
 ① の励起方式は装置が簡単である特徴を有し, KrF で 1.8 J/pulse¹⁰⁸⁾, XeCl で 1.3 J/pulse¹⁰⁹⁾ が報告されている。

エキシマーレーザーに関する解説論文および成書は, 筆者の知る限りでも欧文で 7 編^{102, 110-115)}, 和文で 3 編¹¹⁶⁻¹¹⁸⁾ すでに出版されている*5 ので, 今さら再び述べる必要もないが, 励起方式に重点を置いた解説論文はほとんどないと思われるので, ここでは RGH の励起機構, 励起方式に関して述べる。

3.2 KrF レーザーの励起機構

RGH レーザーの中で希ガスフッ素 (rare-gas mono-fluoride) エキシマーが現在では最も高効率な紫外レーザーである。希ガスフッ素系のエキシマーには ArF¹⁰⁷⁾, KrF^{107, 120)}, XeF^{121, 105)} があり, そのいずれもがレーザー発振している。これらの中で特に KrF レーザーは高効率性から盛んに研究が進められている。ここでは KrF を例にしてその励起機構に関して述べる。

KrF レーザーは放電¹²⁰⁾, 電子ビーム直接励起¹⁰⁷⁾, 電子ビーム制御放電¹²²⁾ のいずれの励起方式でも発振する。電気放電では, 主として放電の安定性のために He ガスを希釈ガスに, 電子ビーム励起では電子ビームの阻止能から Ar ガスを希釈ガスにして, Kr と種々のフッ素ドナー (SF₆, N₂F₄, NF₃, F₂ など) との混合ガスからレ

ーザー発振が得られている。励起方式が異なっても, Kr とフッ素ドナーの大体の濃度は同じである。

電子ビーム励起 KrF レーザーでは通常 Ar/Kr/F₂ 混合ガスが用いられる。その場合の主要なエキシマー生成反応を Table II に示す。それらの反応をイオン反応と中性ガス反応に区分してフローチャートとして Figs. 7 および 8 に示す。

典型的な混合比は 90% Ar, 5~10% Kr, 0.2~0.5% F₂ で, 全圧力は 1~3 気圧であるので, 大部分の電子ビームエネルギーは反応 (1), (2) で Ar* と Ar⁺ の生成に費やされる。高速の一次電子による Ar のイオン化で生成した二次電子は F₂ に解離付着して, F と F⁻ を生成する¹²³⁾。その後, 比較的低圧域では Ar⁺ は F⁻ と反応して ArF* を生成する¹²⁴⁾ が, 高圧の場合には Ar⁺ + Ar + Ar → Ar₂⁺ + Ar の反応¹²⁵⁻¹²⁹⁾ が支配的になり, 分子イオン Ar₂⁺ を生成する。Ar₂⁺ は F⁻ と反応して ArF* を生成する¹³⁰⁾。同時に, Ar₂⁺ と Kr との電荷交換反応¹³¹⁾ が進行して Kr⁺ を生成する。最後に, KrF* は ArF* と Kr の原子交換反応¹³²⁾ か, Kr⁺ と F⁻ の再結合¹²⁴⁾ によって生成される。Kr の濃度が比較的大きいと, 反応 (10) から分子イオン Kr₂⁺ が生成し¹²²⁾, その Kr₂⁺ と F⁻ との再結合反応¹³⁰⁾ でも KrF* は生成される。

電子ビーム励起の場合にはほとんどのビームエネルギーは Ar⁺ の生成に使われ, 15~20% しか Ar* の生成に費やされないが, 放電励起の場合にはほとんどの入力

Table II. Ar/Kr/F₂ 系 KrF レーザーの主要反応

	Reaction	Rate Coefficient	Reference
(1)	$\text{Ar} + e_p^- \rightarrow \text{Ar} + e_s^- + e_p^-$		
(2)	$\text{Ar} + e_p^- \rightarrow \text{Ar}^* + e_p^-$		
(3)	$\text{F}_2 + e_s^- \rightarrow \text{F} + \text{F}^-$	$\sim 2.3 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	123)
(4)	$\text{Ar}^+ + \text{F}^- + (\text{Ar}) \rightarrow \text{ArF}^* + (\text{Ar})$	$\sim 2-3 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	124)
(5)	$\text{Ar}^+ + \text{Ar} + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}_2^+ + \text{Ar}$	$1.9-3 \times 10^{-31} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$	125)~129)
(6)	$\text{Ar}_2^+ + \text{F}^- (+\text{Ar}) \rightarrow \text{ArF}^* + \text{Ar} (+\text{Ar})$	$\sim 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	130)
(7)	$\text{Ar}_2^+ + \text{Kr} \rightarrow \text{Kr}^* + 2\text{Ar}$	$7.5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	131)
(8)	$\text{ArF}^* + \text{Kr} \rightarrow \text{KrF}^* + \text{Ar}$	$1.6 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	132)
(9)	$\text{Kr}^* + \text{F}^- (+\text{Ar}) \rightarrow \text{KrF}^* (+\text{Ar})$	$1-2 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	124)
(10)	$\text{Kr}^+ + \text{Kr} + \text{Ar} \rightarrow \text{Kr}_2^+ + \text{Ar}$	$2.4 \times 10^{-31} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$	133)
(11)	$\text{Kr}_2^+ + \text{F}^- (+\text{Ar}) \rightarrow \text{KrF}^* (+\text{Ar})$	$\sim 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	130)
(12)	$\text{Ar}^* + \text{F}_2 \rightarrow \text{ArF}^* + \text{F}$	$7.8 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	134)
(13)	$\text{Kr}^* + \text{F}_2 \rightarrow \text{KrF}^* + \text{F}$	$7.2 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	135)

e_p : 一次電子, e_s : 二次電子。

*5 エキシマーレーザーの Topical Meeting が 1979 年に開催された¹¹⁾。

Fig. 7. Ar/Kr/F₂ 系 KrF レーザーの主要イオン反応のフロー・チャート。

エネルギーは準安定状態の Ar^{*} の生成に使われるので、(12) (13) の反応で KrF⁺ を生成する¹³⁴⁻¹³⁷。

反応気体による KrF^{*} の quenching は重要な過程である。

Kr, Ar による KrF^{*} の quenching¹³⁸ および三体衝突による三原子エキシマー Kr₂F^{*} の生成^{138-140, 143, 144} などにより、KrF^{*} の濃度は減少する。さらに損失過程としては F₂^{122, 133}, F^{-141, 145}, Ar₂¹⁴², Kr₂¹⁴² などによる KrF レーザー光の吸収および自己吸収がある。

以上の諸過程が最適混合比を決定する因子であり、いかに電気入力を KrF^{*} の生成に分配するかが、励起方式の得失を決定する重要なパラメータである。

3.3 励起方式

RGH の励起に現在用いられている方式は全てパルス CO₂ レーザーの励起に用いられている方式に少々変更を加えたものである。RGH レーザーで発振に十分な利得を得るには CO₂ レーザーよりも“パワー・ローディング”を大きくすること¹¹³、RGH の混合ガス中での放電は本質的に不安定を招きやすいので放電プラズマの制御が必要であること、RGH を有効に生成する平均電子エネルギーに放電パラメータを調整することなどである。

3.3.1 放電励起

KrF を含む RGH レーザーの大きな特長の 1 つは、電気放電励起が可能なことである。アバランシェ放電 (self-sustained discharge) は本質的に不安定であるが、現在では ~2 J/pulse, 10~50 ns のパルス幅の RGH レーザーの発振^{108, 109, 150} が横方向放電励起方式で実現されている。最初の RGH の放電励起はプリント基板を

Fig. 8. Ar/Kr/F₂ 系 KrF レーザーの主要中性反応のフロー・チャート。

用いた低インピーダンス・ブルームライン回路で XeF で実現された^{146, 157}が、予備電離を用いなかったので放電のアークングのために 300 Torr の動作圧力に限られた。高圧力のガスに高電界を印加すると、電子増倍作用は急速に起こり、プラズマインピーダンスは短絡状態になり、放電の空間的不均一性が成長しアークに移行しやすい。この移行時間は数気圧で 10 ns 以下である¹⁴⁷。その後、Burnham と Djeu^{148, 155} は予備電離技術を用い 2 気圧まで一様なアバランシェ放電を達成し、レーザー発振を得た。高圧力放電励起 RGH レーザーには主放電開始前に空間的に均一なプラズマを生成する予備電離技術¹⁴⁹は不可欠なものとなっている。予備電離源としては、UV 光、コロナ^{150, 158}、X線^{59-52, 108}などが用いられる。各予備電離源は、装置の簡便さ、生成プラズマ密度、レーザー気体中の透過度などの点において得失を有する。CO₂ レーザーと違って、KrF レーザーはフッ素ドナーとして電気陰性度の大きい F₂ ガスを含有するので、電離された初期電子が F₂ ガスに急速に解離付着¹²³し負イオン F⁻ を形成しやすいが、高電界（主放電の）が印加すると負イオンは電子を放出するので、予備電離電子として作用すると考えたのは Hsia である¹⁵¹。一方、電離された直後の電子のみが予備電離作用を示すとする考えもある。放電領域を一樣に予備電離することは非常に重要である。不均一な予備電離を行うと、主放電は電離度の大きい領域に集中し、レーザービームの質を劣化するばかりでなくアーク移行を促進する。不均一な予備電離の場合には、主放電開始の遅れ時間を大きく設定すると、プラズマの拡散により不均一性が消滅し均一アバ

Fig. 9. X線予備電離方式 KrF レーザーの実験概略図.

ランシエ放電を得やすいが、高圧力気体中では電子・イオン再結合速度が大きいため電子数密度が急速に減少するし、拡散定数は小さいので均一化は望めない。

RGH 放電は電子付着に支配されるため本質的に不安定で、アーク移行も CO_2 レーザーよりも速い。さらに、レーザー発振に十分な利得を形成するにはエネルギー注入よりもむしろパワー注入 ($\sim \text{MW}/\text{cm}^3 \cdot \text{atm}$) が必要であるので、短パルス低インピーダンス (低インダクタンス) の主放電回路が用いられる。そのような回路として、ストリップライン型ブルームライン回路^{146, 148, 152-154, 157}、同軸ケーブル型ブルームライン回路^{150, 156, 158, 162}、LC 反転型回路^{155, 159-161}、集中定数で構成したパルス成形回路 (PFN)、水の PFL (water line) などが用いられている。以上の回路はそれぞれ特徴があり、低放電負荷にパワーを注入するのに好適であるが、技術的に言って大切なことは、回路とレーザー放電負荷の接続部の構造的なインダクタンス L を低減することである。断面積 S [cm^2]、幅 W [cm] の空心ループのインダクタンス L は

$$L = 12.6 \frac{S}{W} [\text{nH}]$$

と書けるので、例えば半径 10 cm の幅 10 cm のループのインダクタンスは $L = 394 \text{ nH}$ と非常に大きいものとなる。

予備電離源に X 線およびワイヤーコロナを、放電回路としてブルームライン回路を用いた KrF レーザーを例として Fig. 9 に示す。レーザー放電体積は 180 cm^3 ($2 \text{ cm}^H \times 1 \text{ cm}^W \times 90 \text{ cm}^L$) である。このレーザーの出力特性を Fig. 10 に示すが、X 線予備電離の方がワイヤーコロナ予備電離方式より大出力高効率であった。X 線予備電離の場合、気体混合比 $F_2/\text{Kr}/\text{He} = 0.15/3/97$ (%) のとき、出力 140 mJ/pulse 、電気効率 0.95% であった。ワイヤー予備電離方式のデータは、X 線照射を止めて

Fig. 10. X線予備電離方式とワイヤー・コロナ方式の KrF レーザー出力特性.

電極の両側に新たにワイヤーを付けて得たもので、他の条件は一定である。X 線予備電離の方が Kr 濃度が高いのは、Fig. 11 に示した X 線の希ガスによる吸収がほとんど Kr によって行われ、Kr 濃度増大により予備電離電子数が増大することで理解できる。最大出力を与える Kr 濃度の時の予備電離電子数密度は $\sim 10^8/\text{cm}^3$ であった。この時の全圧力は 2.5 atm ($\text{He}/\text{Kr}/\text{F}_2$)、X 線照射量は 6 mR/pulse であった。放電励起 KrF レーザーの大型装置の概略図を Fig. 12 に示す。1.8 J/pulse、 $\sim 50 \text{ ns}$ FWHM の KrF レーザー出力が得られている。励起方式としては、water line をパルス充電 ($\sim 200 \text{ kV}$) し、サーフェス・ギャップを通して主電極間にパワーを注入している。

3.3.2 電子ビーム直接励起

大強度相対論的電子ビームの発生技術¹⁶³) は非常に進

Fig. 11. 希ガス中のX線の吸収係数, ガス圧力: 1 気圧.

Fig. 12. 高出力 KrF レーザーの概略図 (X 線子備電離方式).

んでいる。これをレーザーの励起に用いる場合には、電子ビームエネルギーとレーザー気体のレンジの関係、電子ビームエネルギーの蓄積度、電子ビームガイド技術などの諸項目を検討する必要がある。電子ビーム直接励起の特長は、スケラビリティと、放電では達し得ないハイパワー励起 ($\sim 10 \text{ MW/cm}^3$)^{107, 164-166)} が可能なことである*6。現在報告されている電子ビーム励起 RGH レーザーの、電子ビーム蓄積エネルギーに対するレーザー出力の比で定義される正味の効率は比較的高いが、総合効率は低くなる^{107, 164-166)}。理由は、レーザー気体への電

*6 大強度電界放出型電子ビーム・ダイオードではカソード・プラズマの拡散のために、ダイオード・クロージャが生じやすく、パルス幅 $\tau < 1 \mu\text{s}$ に制限される。

Fig. 13. 電子ビーム直接励起 RGH レーザーにおける電子ビーム打込み方式.

子ビーム蓄積度が低いためである¹⁶⁶⁾。Fig. 13 に電子ビームのレーザー気体への注入方式とそのビームエネルギーの蓄積度を合わせて示す。レーザー共振器は紙面に垂直方向に構成する。この他に軸方向注入方式がある¹⁰⁷⁾。

3.3.3 電子ビーム制御放電励起

電子ビーム制御放電に関しては CO_2 レーザーの項ですでに述べたが、この励起方式がハロゲンを含む RGH レーザー気体にも有効であることが AVOC Everett のグループにより実証された^{111, 114, 167-169)}。RGH の生成には希ガスイオンより準安定状態の希ガスの方がより有効である。電子ビーム直接励起では希ガスイオンの生成が優勢であるが、この方式では準安定状態が効率良く生成されるので高効率 RGH レーザーシステムには現在では最も適していると考えられる^{111, 114)}。しかし、ハイパワー RGH レーザーシステムとしては電子ビーム直接励起方式の方が優れている^{107, 164-166)}。

3.5 応用

RGH レーザーの応用は分光学的応用とパワー応用とに区分される。

RGH レーザーは限定されたバンド幅では可調性があること¹⁷¹⁾、 H_2 、 D_2 、 CH_4 の高圧セルを用いた誘導ラマン散乱による波長変換¹⁷⁰⁾、および RGH レーザー励起色素レーザー¹⁷³⁾ などにより紫外から近紫外域に豊富なスペクトルが存在するので、これを用いた光誘起化学反応¹⁷³⁻¹⁷⁵⁾、光イオン化、分光などの応用がある。

慣性とじ込め方式レーザー核融合において、 $1 \mu\text{m}$ 以下の波長域におけるプラズマ加熱の波長スケール則か

Table III. 市販されている気体レーザーの性能

種 類	励 起 形 式	発振波長	出 力			
			出 力	パルス幅	繰 返 し	安 定 度
エキシマー レーザー	ArF	193 nm	50~350 mJ	0.1~0.2 μ s	<100 pps	} 5% 前後
	KrF	249	100~355	"	<150	
	XeCl	308	15~200	0.1~0.4	<100	
	XeF (ガスフロー)	351	50~150	0.01~0.04	<100	
KrF XeF	E beam 励起	249	10 J	0.3~1.8 μ s	<1 ppm	
		351	5 J	"	"	
N ₂	パルス 横型励起 (ガスフロー)	337	0.01~10 mJ	3~10 ns	<200 pps	~ $\pm$ 3%
He-Cd ⁺	C. W.	325 442	1~8 mW 10~40	—	—	0.5~5%
Ar ⁺ , Ar ²⁺	C. W. 水冷	331~528	数W~40W	—	—	< $\pm$ 5%
	C. W. 空冷	488, 515	10mW~0.1W	—	—	< $\pm$ 5%
Kr ⁺ , Kr ³⁺	C. W.	331~799	数W			< $\pm$ 5%
Ar ⁺ , Kr ⁺ (Mixed)	C. W.	.33~.708 μ m (1.09)	数百mW ~数W			< $\pm$ 5%
銅(Cu) レーザー	パルス	551 nm 578	2 mJ	20 ns	2~5 KHz	
He-Ne	C. W.	633 nm	0.5~50 mW			< $\pm$ 5%
HF DF	パルス 化学レーザー (ガスフロー)	2.7~3.0 μ m 3.6~4.1 μ m	0.5~1 J	0.1~0.3 μ s	1~3 pps	
CO ₂	C. W. 導波型(封止)	9~11 μ m	1~5 W	(パルス <4 kW)	0.05~100 μ s <数百 Hz	短時間 ~0.3%
	封 止 型		<10 W			
	低速ガスフロー		50 W~1k W			
	高速ガスフロー		1 kW~15 kW			
	パルス TEA (放電)		0.5~100 J			
	E beam 励起		~10 kJ	数 μ s	~1 ppm	
CH ₃ OH	C. W., CO ₂ レーザー光励起	118.8 μ m	~100 mW			
HCN	C. W. パルス	337 μ m "	~100 mW 1 mV	30 μ s	1~100 pps	

保証期間 (寿命)	代表的メーカー	特 徴	応 用	展 望
1 年	Lumonics, Inrad- Lamdaphysik, Tachisto など	紫 外 大出力 良 質	光化学反応 レーザー核融合	未だ実用例は少ない が、依然として将来 性大 (1985年位に見 通し)
	Maxwell	励起低繰返し大出力 大型		
1 年	Molelectron Lamdaphysik など	ASE 発振	色素レーザー励起	
(~5,000H)	Liconix	C.W. 最短波長 小型, 低入力	感光材への記録 (プリンター等へ)	
1 年 モード劣化 (1,000 ~2,000H)	Spectra Physics, Coherents, Lexel, NEC.	大出力 C.W. レーザー 可視, 紫外	医療, レーザーディ スプレー, C.W. 色 素レーザーなど	医療に伸び
(数万H)	" American Laser	小型 O. E. M. ベース		
1 年	S. P., C. R. L., Lexel など	赤色大出力, 多色 C. W. レーザー	レーザーディスプレ ーなど	
1 年	"	紫外→近赤外 多色発振	"	
	G. E.	可視高速繰返し パルス	ウラン同位体分離 色素レーザー励起	
(>10,000H)	NEC, Hughes, Siemens など	小型, 高信頼, 長寿命, 完成度大 (OEM, 低廉価)	Video disk 光源 Printer, POS, FAX, 工事基準線など	半導体レーザーとの 競合量産安価へ
1 年	Lumonics など	高出力	レーザーレーダ	
(~500H)	Hughes, Laakman	小型高効率	赤外分光, リモート センサー	工業用 CO ₂ レーザー 伸び大
1 年	Edinburgh, Spectra Physics N. E. C., Coherent, Photon Source B. O. C., Spectra Physics	高安定, 発振線選択 装置半永久使用	赤外分光 布地切断, 遠赤外レーザー励 起, ポートカッター, セラミ ックスクライバ 金属加工	
1 年	Gen Tec., Lumonics Maxwell, Sys. Sci. & Software	大出力エネルギー	レーザーレーダ, 遠 赤外レーザー励起, レーザー核融合	遠赤外レーザー励起 同位体分離などの有用 性大
	Appolo Laser	遠赤外光励起	プラズマ診断	
	Advanced Kinetics	" "	" "

(a)

(b)

Fig. 14. He-Ne レーザーの周波数安定化方式の例.

Table IV. 製品化された周波数安定化 He-Ne レーザー

メーカー	型名	安定化原理	安定度	出力	備考
Spetra Physics	Model 119	Lamb dip 固定法	$\sim 10^{-8}$ (± 1 MHz/day)	$> 100 \mu W$	保守品種
NEC	GLG 6012	"	長時間安定度 10^{-8}	$> 100 \mu W$	廃品種 Fig. 14 (a)
Siemens		Zeeman Cell 使用	約 10^{-10} ?	?	(詳細不明) Fig. 14 (b)
H. P.	Model 5501A	Zeeman Laser	$\sim 10^{-8}$	?	干渉測定器として (1.8 MHz 離れた 2 波長) 同時発振
Tropel	Model 100	不明	$< \pm 10$ MHz/day $< \pm 1$ MHz/sec	$700 \mu W$	

ら短波長レーザーが注目され、KrF レーザーの高出力高効率化の研究が行われている。KrF レーザーは比較的長いパルス発振をさせないと効率が低下するので、パルス幅圧縮の方法として、Backward Raman 法¹⁷⁶⁾や、Pulse-stacking 法¹⁷⁷⁾が考案されている。

4. 市販されている気体レーザー

5000 本以上の発振線が気体レーザーで得られているが、実用に耐えうる出力、安定性および寿命を有するレーザーは数少ない。Table III に現在市販されている気体レーザーの性能を示す。周波数安定化 He-Ne レーザーの市販されているものを Table IV に示す。周波数安定化の方式の例を Fig. 14 に示す。

5. むすび

レーザー工学的な立場からの気体レーザーの解説であるので、物理的、分光学的特性に関する記述が欠けているが、その部分は他の文献を参照して頂きたい。

おわりに、気体レーザーに関する貴重な資料を提供していただいた、日本電気(株)の堀田和明氏に深謝致します。

文 献

- 1) R. W. Dreyfus and R. T. Hodson: Phys. Rev. **A9**, 2356 (1974).
- 2) S. F. Dyubko, L. D. Fesenko, O. I. Bakakow, and V. A. Svich: Zh. Prikl. Spectrosc. **23**, 317 (1975).
- 3) R. Beck, W. Englisch, and K. Gürs: *Table of Laser Lines in Gases and Vapors* (Springer-Verlag, Berlin, 1978).
- 4) T. Y. Chang, and O. R. Wood, II: IEEE J. Quantum Electron. **QE-13**, 907 (1977).
- 5) Lumonics Research LTD. (Canada).
- 6) C. S. Willett: *Introduction to Gas Lasers: Popu-*

lation Inversion Mechanisms (Pergamon Press, 1974).

- 7) 土手敏彦: 電気学会誌 **90**, 27 (1979).
- 8) G. Bekefi: *Principle of Laser Plasmas* (John Wiley and Sons, 1976).
- 9) L. Nighan: Phys. Rev. **A2**, 1989 (1979).
- 10) G. J. Schulz: Phys. Rev. **116**, 1141 (1959).
- 11) G. J. Schulz: Phys. Rev. **125**, 229 (1962).
- 12) G. J. Schulz: Phys. Rev. **135**, 988 (1964).
- 13) A. G. Engelhardt, A. V. Phelps, and L. G. Risk: Phys. Rev. **135**, 1566 (1964).
- 14) R. D. Hake, Jr., and A. V. Phelps: Phys. Rev. **158**, 70 (1967).
- 15) M. J. B. Boness and G. J. Schulz: Phys. Rev. Lett. **21**, 1031 (1968).
- 16) A. Andrick, D. Danner, and H. Ehrharolt: Phys. Lett. **29 A**, 346 (1969).
- 17) J. P. Rink: J. Appl. Phys. **43**, 2441 (1972).
- 18) N. G. Basov, V. A. Danilychev, O. M. Kerimov, and A. S. Podsonny: JETP Lett. **17**, 102 (1973).
- 19) H. Statz, C. L. Tang, and G. F. Koster: J. Appl. Phys. **37**, 4278 (1966).
- 20) D. C. Tyte: *Advances in Quantum Electronics* (Academic Press, New York, 1970).
- 21) P. K. Cheo: *Lasers*, ed. A. K. Levine and A. J. DeMaria, (Deckker, New York, 1971).
- 22) R. L. Taylor and S. Bitterman: Rev. Mod. Phys. **41**, 26 (1969).
- 23) 藤岡知夫, 堀田和明: 電気学会誌 **98**, 537 (1978).
- 24) W. B. Tiffany et al.: Appl. Phys. Lett. **15**, 3 (1969).
- 25) J. D. Anderson: *Gasdynamic Lasers* (Academic Press, 1976).
- 26) E. T. Gerry: IEEE Spectrum. **7**, 51 (1970).
- 27) D. J. Monson: AIAA J. **14**, 614 (1972).
- 28) T. J. Bridges, et al.: Appl. Phys. Lett. **20**, 403 (1972).
- 29) H. Shirahata and T. Fujioka: Opt. Comm. **20**, 220 (1977).
- 30) 田幸敏治: 応用物理学会量子エレクトロニクス研

- 究会 (レーザー光とレーザー特性の計測) (1978.8. 9~10; 東工大) p.49.
- 31) C.K.N. Patel, W. L. Paust, and R. A. McFarlane: Bull. Amer. Phys. Soc. **9**, 500 (1964).
 - 32) C.K.N. Patel: Phys. Rev. Lett. **12**, 588 (1964).
 - 33) C.K.N. Patel: Phys. Rev. **136**, PA 1187 (1964).
 - 34) F. Legay and N. Legay-Sommaire: C.R. Acad. **259**, 99 (1964).
 - 35) C.K.N. Patel: Phys. Rev. Lett. **13**, 617 (1964).
 - 36) G. Moeller and J.D. Rigden: Appl. Phys. Lett. **7**, 274 (1965).
 - 37) C.K.N. Patel, P.K. Tien, and J.H. Mcfee: Appl. Phys. Lett. **7**, 290 (1965).
 - 38) A.E. Hill: Appl. Phys. Lett. **12**, 324 (1968).
 - 39) A.J. Beaulieu: Appl. Phys. Lett. **16**, 12 (1970).
 - 40) R. Dumancin et al.: IEEE J. Quantum Electron. **QE-8**, 163 (1972).
 - 41) L.E. Kline, L.J. Denes, M.J. Pechersky: Appl. Phys. Lett. **29**, 1 (1976).
 - 42) H. Hertz: Wied Ann. **31**, 983 (1887).
 - 43) P.R. Pearson and H.M. Lamberton: IEEE J. Quantum Electron. **QE-8**, 145 (1972), Electron. Lett. **7**, 141 (1971).
 - 44) M.C. Richardson, A.J. Alcock, L. Leopold and P. Burtyn: IEEE J. Quantum Electron. **QE-9**, 236 (1973).
 - 45) H. Seguin and T. Tulip: Appl. Phys. Lett. **21**, 414 (1972).
 - 46) K. Watanabe, M. Zelkoff, and E.C. Inn: Geophys. Res. Pap. **21**, 19 (1952).
 - 47) D.C. McKen, H.J. Seguin, and J. Tulip: IEEE J. Quantum Electron. **QE-12**, 470 (1976).
 - 48) R.K. Garnsworty, et al.: Appl. Phys. Lett. **19**, 506 (1971).
 - 49) 戸嶋成忠, 藤本良三: 電気学会論文誌 C 分冊 **23** (1978.4).
 - 50) S.C. Lin and J.I. Levatter: Appl. Phys. Lett. **34**, 505 (1979).
 - 51) S. Sumida, M. Obara, and T. Fujioka: Appl. Phys. Lett. **33**, 913 (1978).
 - 52) 住田 真, 鍋木雅裕, 小原 實, 藤岡知夫: レーザー研究 **7**, 297 (1979).
 - 53) T.Y. Chang: Rev. Sci. Instrum. **44**, 405 (1973).
 - 54) J.D. Cobine: *Gaseous Conductors, Theory and Engineering Applications* (Dover, New York 1941), p.177.
 - 55) F.M. Bruce: J. Inst. Elec. Eng. **94**, 138 (1969).
 - 56) A.K. Laflamme: Rev. Sci. Instr. **41**, 1578 (1970).
 - 57) M.C. Richardson, K. Leopold, and A.J. Alcock: IEEE J. Quantum Electron. **QE-9**, 934 (1973).
 - 58) S. Suzuki, Y. Ishibashi, M. Obara, and T. Fujioka: Appl. Phys. Lett. **36**, 26 (1980).
 - 59) E.F. Kaelble: *Handbook of X-rays* (McGraw-Hill, New York, 1967).
 - 60) K.B. Persson: J. Appl. Phys. **36**, 3086 (1965).
 - 61) C.A. Fenstermacher, M.J. Nutter, W.T. Le-land, and K. Boyer: Appl. Phys. Lett. **20**, 56 (1972).
 - 62) T.F. Stratton, G.F. Erickson, C.A. Fenstermacher, and E.O. Swickard: IEEE J. Quantum Electron, **QE-9**, 157 (1973).
 - 63) J.D. Daugherty, E.R. Pugh, D. Ahouse, and D. Douglas-Hamilton: Phys. Today **25**, 18 (1972).
 - 64) J.D. Daugherty, E.R. Pugh, and D.H. Douglas-Hamilton: Bull. Amer. Phys. Soc. **17**, 399 (1972).
 - 65) Annual Progress Report on Laser Fusion Program, ILE-APR-78 (Dec. 1978).
 - 66) R.L. Carlson, et al.: *1979 IEEE/OSA Conference on Laser Engineering and Applications* (Washington, D.C., 1979).
 - 67) R.L. Byer: Optics and Quant. Electron. **7**, 144 (1975).
 - 68) E.P. Hinkley: Optics and Quant. Electron. **8**, 155 (1976).
 - 69) J.T. Kundtson and E.M. Eyring: Annual Rev. Phys. Chem. **25**, 255 (1974).
 - 70) F. Klein, F.M. Lussier, and J.I. Steinfeld: Spect. Lett. **8**, 247 (1975).
 - 71) R.V. Ambertsumian, Yu. A. Gorkhov, V.S. Cetokhov, and G.N. Makarov: JETP Lett. **21**, 171 (1975).
 - 72) J.C. Cyman: Laser Focus **12**, 51 (1976).
 - 73) A.Z. Grasiuk: Appl. Phys. **21**, 173 (1980).
 - 74) T.Y. Chang: *Nonlinear Infrared Generation*, Ed. by Y.R. Shen, Optical Pumping in Gases (1977) p.215.
 - 75) S.M. Fry: Opt. Commun. **19**, 320 (1976).
 - 76) J.J. Tiee, T.A. Fischer and C. Witting: Rev. Sci. Instrum. **50**, 958 (1979).
 - 77) P. Rabinowitz, A. Stein, R. Brickman, and A. Kaldor: Appl. Phys. Lett. **35**, 739 (1979).
 - 78) T.Y. Chang and O.R. Wood: IEEE J. Quantum Electron. **QE-13**, 907 (1977). 文献はその中を参照.
 - 79) C.R. Jones: Laser Focus **14**, 68 (1978).
 - 80) R.L. Abrams: Appl. Phys. Lett. **25**, 609 (1974).
 - 81) O. Judd: *Hughes Research Laboratories Internal Research Report*, No. 452 (1971).
 - 82) J.J. Degnan: J. Appl. Phys. **45**, 257 (1974).
 - 83) B.S. Patel and P. Swarup: J. Phys. D, Appl. Phys. **6**, 1670 (1973).
 - 84) J. Wilson and J.C. Stepheson: Appl. Phys. Lett. **20**, 64 (1972).
 - 85) T.O. Poehler: IEEE J. Quantum Electron, **QE-9**, 83 (1973).
 - 86) T.O. Poehler: Appl. Phys. Lett. **20**, 497 (1972).
 - 87) T.O. Poehler: Appl. Phys. Lett. **22**, 282 (1973).
 - 88) S.N. Suchard, A. Ching, and J.S. Wittier: Appl. Phys. Lett. **21**, 274 (1972).
 - 89) 大館 均: 博士論文 (慶應義塾大学) (昭和51年度)
 - 90) A.E. Siegman: Proc. IEEE **53**, 277 (1965).
 - 91) A.E. Siegman: Laser Focus **7**, 42 (1971).

- 92) A. E. Siegman and R. Arrathoon: IEEE J. Quantum Electron. **QE-3**, 156 (1967).
- 93) A. E. Siegman and H. Y. Miller: Anol. Opt. **9**, 2729 (1979).
- 94) A. E. Siegman: Appl. Optics **13**, 353 (1974).
- 95) W. W. Duley: *CO₂ lasers, Effects and Applications* (Academy Press, New York, 1976).
- 96) J. F. Ready: *Effects of High-Power Laser Radiation* (Academic press, New York, 1971).
- 97) P. W. Pace and M. Lacombe: IEEE J. Quantum Electron. **QE-14**, 263 (1978).
- 98) P. W. Pace and M. Lacombe: J. Phys. E **10**, 208 (1978).
- 99) R. T. Brown: IEEE J. Quantum Electron. **QE-9**, 1120 (1973).
- 100) D. C. Hamilton, D. J. James and S. A. Ramsdeu: J. Phys. E **8**, 849 (1975).
- 101) A. V. Lerberghe, S. Avrillir, and C. J. Borde: IEEE J. Quantum Electron, **QE-14**, 481 (1978).
- 102) C. K. Rhodes: *Excimer Lasers* (Springer-Verlag, Berlin, 1979).
- 103) S. K. Searles and G. A. Hart: Appl. Phys. Lett. **27**, 243 (1965).
- 104) R. W. Waynant: Appl. Phys. Lett. **30**, 234 (1977).
- 105) C. A. Brau and J. J. Ewing: Appl. Phys. Lett. **30**, 234 (1977).
- 106) J. H. Tillotson: "Electron-beam pumped rare-gas halide lasers", *CLEOS '78* (Feb. 7-9, 1978; San Diego, Ca.).
- 107) J. M. Hoffman, A. K. Hays, and G. C. Tisone: Appl. Phys. Lett. **28**, 538 (1976).
- 108) S. Sumida, et al.: X-ray preionized high-pressure rare-gas monofluoride laser (WB 5-1), *Topical Meeting on Excimer Lasers* (Sep. 11-13, 1979; Charleston, S. C.).
- 109) 前田三男: "放電励起エキシマーレーザーの高出力化", 電気学会光量子デバイス研究会 (OQD-80-3) p. 7.
- 110) J. J. Ewing and C. A. Brau: High Efficient UV Lasers, in *Tunable Lasers and Applications*, ed. A. Moradian, et al. (Springer-Verlag, Berlin, 1976), p. 21.
- 111) W. L. Nighan: IEEE J. Quantum Electron. **QE-14**, 714 (1978).
- 112) M. J. Shaw: Prog. Quant. Electr. **6**, 3 (1979).
- 113) G. Eden, R. Burnham, et al.: IEEE Spectrum, **50** (April, 1979).
- 114) M. Rokni, J. A. Mangano, et al.: IEEE J. Quantum Electron. **QE-14**, 464 (1978).
- 115) M. H. R. Hutchinson: Appl. Phys. Lett. **21**, 95 (1980).
- 116) 渡部俊太郎, 柏木 寛: 電子技術総合研究所調査報告, 第187号 (昭和51年6月).
- 117) 同上: 応用物理 **46**, 978 (1977).
- 118) 同上: レーザー研究 **6**, 13 (1978).
- 119) A digest of technical papers presented at the Topical Meeting on Excimer Lasers (Sep. 11-13, 1979; Charleston, S. C.) (OSA/IEEE).
- 120) R. Burnham and N. Djeu: Appl. Phys. Lett. **29**, 707 (1976).
- 121) E. R. Ault, R. S. Bradford, Jr, and M. L. Bhau-mik: Appl. Phys. Lett. **27**, 413 (1975).
- 122) W. B. Lachina and D. B. Cohn: Appl. Phys. Lett. **32**, 106 (1978).
- 123) H. L. Chen, R. E. Center, D. W. Trainer, and W. I. Fyfe: Appl. Phys. Lett. **30**, 99 (1977).
- 124) M. R. Flannery and T. P. Yang: Appl. Phys. Lett. **32**, 327 (1978).
- 125) A. K. Bhattacharya: Appl. Phys. Lett. **17**, 251 (1970).
- 126) W.-C. F. Liu and D. C. Conway: J. Chem. Phys. **60**, 784 (1974).
- 127) W.-C. F. Liu and D. C. Conway: J. Chem. Phys. **62**, 3070 (1975).
- 128) D. Smith and P. R. Cromey: J. Phys. B **1**, 638 (1969).
- 129) J. C. Cronin and M. C. Sexton: J. Phys D **1**, 863 (1969).
- 130) M. R. Flannery and T. P. Yang: Appl. Phys. Lett. **32**, 356 (1978).
- 131) D. K. Bohme, N. G. Adams, M. Moselman, D. B. Dunkin, and E. E. Ferguson: J. Chem. Phys. **52**, 5094 (1970).
- 132) M. Rokni, J. H. Jacob, J. A. Mangano, and R. Brochu: Appl. Phys. Lett. **31**, 79 (1977).
- 133) R. K. Steunerberg and R. C. Vogel: J. Am. Chem. Soc. **78**, 901 (1956).
- 134) L. G. Piper, J. E. Velazes, and D. W. Setser: J. Chem. Phys. **59**, 3323 (1973).
- 135) J. E. Velazes, J. H. Kolts, and D. W. Setser: J. Chem. Phys. **65**, 3468 (1976).
- 136) C.-H. Chen and M. G. Payne: IEEE J. Quantum Electron, **QE-15**, 149 (1969).
- 137) C.-C. Chen, J. P. Judish, and M. G. Payne: J. Phys. B **11**, 2189 (1978).
- 138) J. G. Eden, R. W. Waynant, S. K. Searles, and R. Burnham: Appl. Phys. Lett. **32**, 733 (1978).
- 139) J. H. Jacob, M. Rokni, J. A. Mangano, and R. Brouchu: Appl. Phys. Lett. **32**, 109 (1978).
- 140) G. P. Quigley and W. H. Hughes: Appl. Phys. Lett. **32**, 627 (1978).
- 141) A. M. Hawryluk, J. A. Mangano, and J. H. Jacob: Appl Phys. Lett. **31**, 164 (1977).
- 142) W. R. Wadt, D. C. Cartwright, and J. S. Cohen: Appl. Phys. Lett. **31**, 672 (1977).
- 143) M. Ronki, J. H. Jacob, and J. A. Mangano: Phys. Rev. A **16**, 2216 (1977).
- 144) V. H. Shui: Appl. Phys. Lett. **31**, 50 (1977).
- 145) A. Mandl: Phys. Rev. A **3**, 251 (1971).
- 146) R. Buarham, N. W. Harris, and N. Djeu: Appl. Phys. Lett. **28**, 86 (1976).

- 147) G. A. Mesyats, Y. I. Bychkov, and V. V. Kremnev: Soviet Phys. Usp. **15**, 282 (1972).
- 148) R. Burnham, E. X. Powell, and N. Djeu: Appl. Phys. Lett. **29**, 30 (1976).
- 149) J. Koppitz: J. Phys D **6**, 1494 (1973).
- 150) C. R. Tollman: *Topical Meeting on Excimer Lasers* (Sept. 1979; Charleston, S. C.).
- 151) J. Hsia: Appl. Phys. Lett. **30**, 101 (1977).
- 152) J. D. Shipman, Jr.: Appl. Phys. Lett. **10**, 3 (1967).
- 153) D. G. Sutton, S. N. Suchard, O. L. Gibb, and C. P. Wang: Appl. Phys. Lett. **28**, 522 (1976).
- 154) C. P. Wang: Appl. Phys. Lett. **29**, 103 (1976).
- 155) R. Burnham and N. Djeu: Appl. Phys. Lett. **29**, 707 (1976).
- 156) T. S. Fahlen: "High Average Power KrF Laser" (GTE Sylvania Inc., Calif. USA), (unpublished).
- 157) C. P. Wang, M. Mirels, D. G. Sutton, and S. N. Suchard: Appl. Phys. Lett. **82**, 326 (1976).
- 158) T. S. Fahlen: IEEE J. Quantum Electron. **QE-15**, 311 (1979).
- 159) S. Watanabe, T. Sato, and H. Kashiwagi: Opt. Commun. **20**, 143 (1977).
- 160) S. Watanabe, S. Shiratori, T. Sato, and H. Kashiwagi: Appl. Phys. Lett. **33**, 141 (1973).
- 161) S. Watanabe, T. Sato, and H. Kashiwagi: IEEE J. Quantum Electron. **QE-15**, 322 (1979).
- 162) S. Karasawa, and M. Shimauchi: J. Spectros. Soc. Japan **28**, 308 (1979).
- 163) L. S. Levine, et al.: IEEE Trans. Nuclear Sci. **NS-20**, 456 (1973).
- 164) G. C. Tisone, E. L. Patterson, and J. K. Rice: Appl. Phys. Lett. **35**, 437 (1979).
- 165) E. L. Patterson, J. K. Rice, and G. C. Tisone: Appl. Phys. Lett. **36**, 188 (1980).
- 166) M. L. Baumik, R. S. Bradford, Jr., and E. A. Ault: Appl. Phys. Lett. **28**, 23 (1976).
- 167) J. D. Daugherty, J. A. Mangano, and J. H. Jacob: Appl. Phys. Lett. **28**, 581 (1976).
- 168) J. A. Mangano and J. H. Jacob: Appl. Phys. Lett. **27**, 495 (1975).
- 169) J. A. Mangano, J. H. Jacob, and J. B. Dodge: Appl. Phys. Lett. **29**, 426 (1976).
- 170) T. R. Loree, R. C. Sze, and K. Baker: Appl. Phys. Lett. **31**, 37 (1977).
- 171) T. R. Loree, K. B. Butterfield, and L. Baker: Appl. Phys. Lett. **32**, 171 (1978).
- 172) B. Godard and O. Dewitte: Opt. Commun. **19**, 325 (1976).
- 173) R. K. Sander, T. R. Loes, S. D. Rockwood, and S. M. Freund: Appl. Phys. Lett. **30**, 100 (1977).
- 174) Laser Focus, 19 (April, 1978).
- 175) J. H. Clark and R. G. Anderson: Appl. Phys. Lett. **32**, 46 (1978).
- 176) J. R. murry, J. Goldhar, D. Eimerl, and A. Szöke: IEEE J. Quantum Electron, **QE-15**, 342 (1979).
- 177) J. J. Ewing, R. A. Haas, J. C. Swingle, E. V. George, and W. F. Krupke: IEEE J. Quantum Electron. **QE-15**, 368 (1979).
- 178) C. H. Fisher, G. J. Mullaney, and J. P. McDaniel: Appl. Phys. Lett. **35**, 26 (1979).
- 179) R. Burnham: Appl. Phys. Lett. **35**, 48 (1979).