

放電励起クリプトンエキシマーレーザー

佐々木 亘*・窪寺 昌一**

Discharge Pumped Kr Excimer Lasers

Wataru SASAKI* and Shoichi KUBODERA**

Discharge pumped Kr excimer lasers were reviewed. First demonstration of vacuum-ultraviolet Kr excimer laser oscillation with a stable self-sustained discharge of high pressure Kr by use of a compact discharge tube was reported last year. Detail characteristics of the discharge pumped Kr excimer lasers such as excimer formation, output power, threshold input energy and laser gain were summarized.

Key words: Kr excimer laser, laser oscillation, discharge pumping, vacuum ultraviolet, laser gain

希ガスエキシマーレーザーは Ar, Kr および Xe でそれぞれ波長 126 nm¹⁾, 147 nm²⁾ および 172 nm³⁾ の発振が報告され, 非常に高出力を得ているが, いずれも電子ビーム励起であった. しかし, 電子ビーム励起により希ガスエキシマーが真空紫外域のレーザー媒質としてすぐれていることが実証されて以来⁴⁾ 注目され, 世界各所で, 希ガスエキシマーレーザーを放電励起で発振させようとする研究が盛んに行われたが, なかなか成功しなかった.

今回筆者らの研究室でこのうちの Kr エキシマーレーザーの 147 nm で小型放電励起装置による発振に成功したので⁵⁾ その概略を解説する.

1. Kr エキシマーレーザー

図1に Kr エキシマー生成の基本的なキネティクスを示す. 電子衝突で種々の励起状態に遷移した Kr 原子は, Kr₂⁺, Kr₂^{**} などのエキシマー状態を経て原子の第一励起状態 Kr* を多数形成する. この Kr* と基底状態の 2 個の Kr 原子との 3 体衝突でレーザーの上準位 Kr₂^{*} が生成される. キネティクスの②, ④, ⑥で示されるように 3 体衝突による生成過程が多く含まれるので, 高い気圧下での励起が有利である. 励起長 40 cm, 励起パワー 50 MW/cm³ の電子ビーム励起 Kr エキシマーレーザーの場合は, スレッシュホールドのガス圧が 15 気圧であった. 今回の放電励起で, 電極長 110 cm, 励起入力 25 MW/cm³ として比例則を適用すると, スレッシュホールドのガス圧は 12 気圧と予測

される. 電子ビーム (700 keV) と放電とでは 1 個の電子のもつエネルギーが数桁異なるので, 以上の推測は非常に大雑把なものである. Kr エキシマー生成に必要な電子エネルギーの平均値はローレンツらによると約 20 eV と報告されているので⁶⁾, 放電のほうが効率はよいと推測される.

- ① Kr + e → Kr^{*}
→ Kr^{**}
→ Kr⁺
- ② Kr^{*} + 2Kr → Kr₂^{*} + Kr
- ③ Kr₂⁺ + e → Kr^{**} + Kr
- ④ Kr^{**} + 2Kr → Kr₂^{**} + Kr
- ⑤ Kr₂^{**} → Kr^{*} + Kr
Kr₂^{**} + Kr → Kr^{*} + 2Kr
- ⑥ Kr⁺ + 2Kr → Kr₂^{*}(¹Σ) + Kr
→ Kr₂^{*}(³Σ) + Kr
- ⑦ Kr₂^{*} → hν + Kr + Kr
- ⑧ Kr^{**} + e → Kr^{*} + e
- ⑨ Kr₂^{**} + e → Kr₂⁺ + e

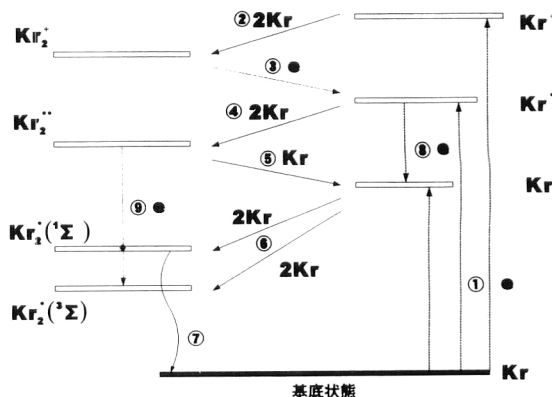


図1 Kr エキシマー生成キネティクス.

* 宮崎大学工学部電気電子工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1) E-mail: sasakiw@opt.miyazaki-u.ac.jp
** 宮崎大学地域共同研究センター (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

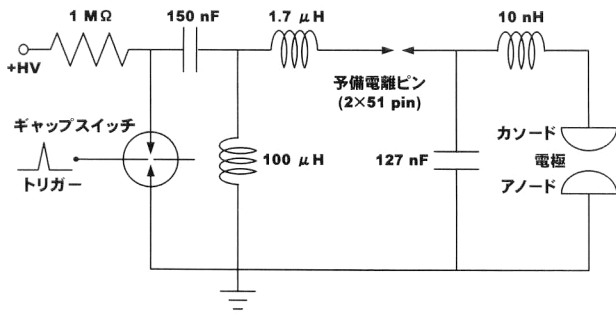


図2 放電回路.

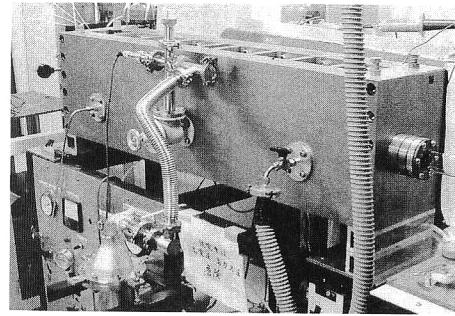


図3 Kr エキシマーレーザー放電管概観.

一方、これまでの放電励起の経験から 12 気圧の Kr 中で均一な放電を行うのは非常に困難であると予測されるので、目標を 10 気圧とした。

電子ビーム励起の場合の計算機シミュレーションによると、レーザー利得が立ち上がりはじめてピークに達するまでには少なくとも 100 ns かかることがわかっている⁷⁾。したがって、放電の持続時間は 200 ns は必要と推測される。ところが、高気圧放電を均一につける場合は、これまで経験的に 10 ns 程度の非常に早い立ち上がりをもち数十 ns 以下の短パルス放電で、放電がアークに移行するまでにレーザー発振を達成する条件で励起する方法が、一般的に行われてきた。

希ガスエキシマーレーザーの放電励起の場合には、高い気圧で放電しなければならないうえに、利得の立ち上がりまでにはより長い放電持続時間を必要とする。この相容れない 2 つの条件を満足しなければならないため非常な困難が伴った。

筆者らは、10 気圧の Kr ガス、放電パルスの半値幅 200 ns を目標に実験を行いその結果を踏まえながら装置の改良を行った。

2. 放電励起 Kr エキシマーレーザー装置

図 2 に放電回路、図 3 に放電管の概観写真を示す。希ガスハライドエキシマーレーザーでよく用いられる自動予備電離容量移行型放電管に、以下の改良を行った。

1. 予備電離の均一性をよくするため予備電離ピンをできるだけ多く 2 cm 間隔で配置した
2. 電極間隔を均一にするために電極表面の平面精度を 0.05 mm 以下、設置したときの間隔を 0.1 mm にした
3. 放電回路を調節し放電持続時間を 200 ns になるようにした

さらに、利得を稼ぐため電極長を 110 cm とし、励起密度を上げるため電極間隔を 5 mm として放電体積を小さくしたうえ、25 MW/cm³ の入力パワーを達成するようにピーキングキャパシタの容量と充電電圧を選定した。

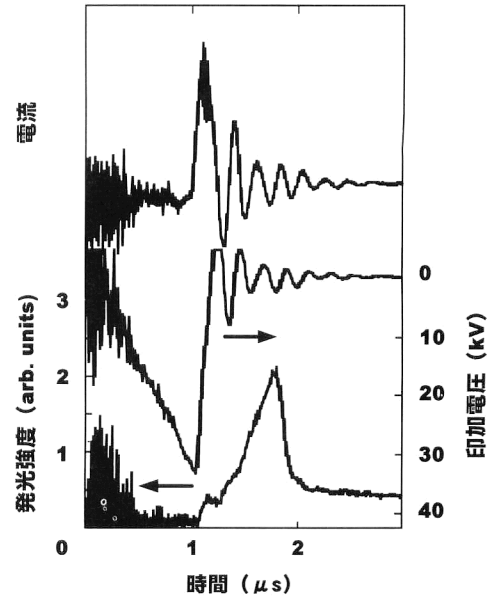


図4 放電電圧、放電電流およびレーザー出力波形.

Kr エキシマーレーザーの波長 147 nm に対して透過窓の吸収損失を無視することができないので、内部共振器型を採用した。

共振器構成は反射率 85% の反射鏡と反射率 85%・透過率 5% の出力鏡でそれぞれ $f=200$ cm の凹面鏡で構成した。

3. 放電励起 Kr エキシマーレーザーの特性

3.1 電圧、電流、発振波形

図 4 に放電電圧波形、電流波形および発振波形を示す。電流波形は放電管の構造上直接測定することができなかったため、電圧波形の微分値を参考のために記した。放電の持続時間は約 200 ns で、レーザーパルスの時間幅は約 400 ns で立ち上がりも遅く、放電終了後も持続している。このことは、電子ビーム励起と少し様子が異なり、アフターグロー発振の傾向を示していると思われる。詳細は現在研究中である。

3.2 スペクトル

図 5 に放電励起 Kr エキシマーレーザーの発振スペクトルを示す。放電電圧 31 kV で十分発振スレッショールドを超えると、スペクトルの半値幅が 0.4 nm と顕著な狭帯域

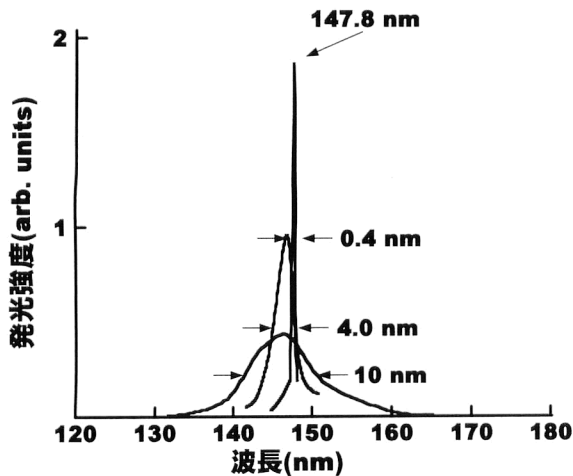


図5 Krエキシマーのスペクトル.

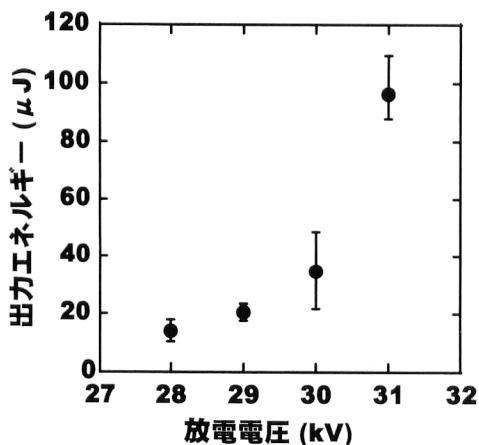


図6 出力エネルギー-放電電圧特性.

化が起こることを示している。Krエキシマーの自然放出発光スペクトルの半値幅は13 nm程度である。スレッショールドに達する少し前の27 kVのときは、半値幅が4 nmであった。入力エネルギーが増加するに従いスレッショールドを超え、レーザー発振に移行する様子がよくわかる。

3.3 スレッショールド特性

図6に放電電圧とレーザー出力の関係を示す。29 kVで明らかな閾値特性を示している。しかし、やっと発振閾値を超えたところで、出力エネルギーは100 μJと小さいが、この条件でもレーザー利得が3.5% cm⁻¹ある。今後放電管を改良して、より高エネルギーの励起と出力結合の最適化などを行うことによって高出力高繰り返し発振が可能である。

3.4 利得

スレッショールドを超えた31 kVのときのレーザー利得は3.5% cm⁻¹であった。本実験で用いた共振器の反射損失のみを考慮した発振スレッショールド利得は1%

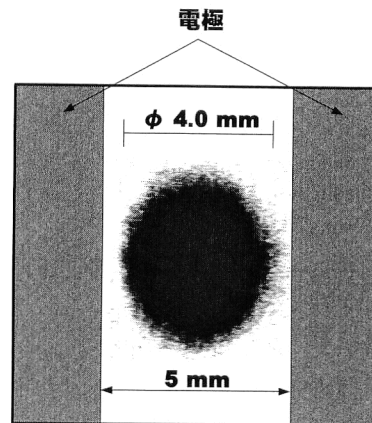


図7 シンチレーターにより可視化したレーザービームの形状.

cm⁻¹である。

3.5 ビーム広がり

図7にニアフィールドのビームパターンを示す。直径5 mmの円形ビームである。プラスチックシンチレーターにより可視光に変換し、CCDカメラで撮影したもので、共振器の構成から推測して多モード発振のモードパターンが重なり円形のビームが観測されたものと思われる。

真空紫外域で高出力が得られるガス媒体として注目されていた希ガスエキシマーレーザーの放電励起による発振について解説した。最近、希ガスエキシマーランプがこの波長域のインコヒーレントな光源として実用化され、さらには次世代のリソグラフィ光源として真空紫外レーザーへの要請が高まっているなか大きなインパクトを与えるものである。

電子ビーム励起では高繰り返し、高効率動作のめどがたなかったが、放電励起が実現したので、シミュレーションコードを開発し励起機構の詳細を明らかにすることによって、放電管の改良の指針が明確になる。高速スイッチを用いた高繰り返し電源の開発、シードパルス注入によるスペクトルの狭帯域化などの技術を開発することにより、高性能の真空紫外レーザーを得ることができよう。

文 献

- 1) J. Shannon *et al.*: Appl. Phys. Lett., **24** (1974) 488-490.
- 2) W. H. Hughes *et al.*: Appl. Phys. Lett., **23** (1973) 245-247.
- 3) H. A. Koehler *et al.*: Appl. Phys. Lett., **21** (1972) 198-200.
- 4) K. Kurosawa *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **34** (1988) 1908-1914.
- 5) W. Sasaki *et al.*: Opt. Lett., **26** (2001) 503-505.
- 6) D. C. Lorentz: Physica, **82C** (1976) 19-26.
- 7) 上原洋一ほか: レーザー研究, **13** (1985) 793-804.

(2001年8月16日受理)