

低ガス圧軸方向放電励起気体レーザーの研究

2008年8月

宇野 和行

低ガス圧軸方向放電励起気体レーザーの研究

2008年8月

大阪大学大学院工学研究科
電子情報エネルギー工学専攻
實野研究室

う の かずゆき
宇野 和行

内容梗概

本論文は筆者が大阪大学大学院工学研究科電子情報エネルギー工学専攻博士課程在学中に大阪大学レーザーエネルギー学研究センターにて行った、「低ガス圧軸方向放電励起気体レーザーの研究」についての研究成果をまとめたものである。

近年、材料工学や物質工学、光化学、分光、微細加工、超微細加工といった多岐にわたる応用分野において、紫外・真空紫外域の短波長光源の重要性が非常に高まっている。最近では、深紫外域で発振する固体レーザーも開発されているが、真空紫外域で発振する媒質が多いことや効率の高さなどから、気体媒質の重要性は依然非常に高いままである。気体媒質の短波長レーザーでは、これまでの多くの研究開発により、産業応用に供せられる動作性能をもつレーザーが既に市販されているが、フォトンコストが非常に高く、付加価値の高い応用にしか使用できない状況である。加えて、気体媒質では数多くの発振線が真空紫外域に存在するにもかかわらず、真空紫外レーザーとしてはF₂レーザーしか市販されているレーザーがない。このような状況を打開するためには、根本的な励起方式の見直しが必要であると考えられる。

そこで、筆者は、従来とは異なる励起方式である軸方向放電励起方式と、それによる従来とは異なる低ガス圧放電に着目し、新しい知見に基づく低ガス圧軸方向放電励起方式を提案する。これまで気体レーザーの研究の主流は高出力が得られる横方向放電励起方式であり、これまで軸方向放電励起方式の深い研究はなされておらず、軸方向放電励起方式の特性や基礎技術は確立されていなかった。本研究の目的として、軸方向放電励起方式の特性の把握と基礎技術の確立、真空紫外レーザーの開発を掲げた。研究は、3つの研究分野、高性能化の研究、スイッチレス化の研究、ランプ化の研究から進め、軸方向放電励起方式の特性を明らかにし、その特性を活かした多数の新しい励起回路を開発し、真空紫外レーザーの開発に挑んだ。

本論文は全8章から構成される。

第1章は序論であり、短波長光源と気体媒質の重要性、短波長レーザーの現状、問題点を示し、本研究の意義を明らかにした。

第2章では、新しい知見に基づく軸方向放電励起方式の特性と本研究で用いた気体媒質の励起機構を原理的に説明した。

第3章では、軸方向放電励起気体レーザーの基礎研究とその励起回路への改善を目指し、従来の容量移行型回路と新しく開発したダイレクト・ドライブ回路の特性を軸方向放電励起N₂レーザーにより比較して記述した。ダイレクト・ドライブ回路の優位性及び軸方向放電励起方式の特性について説明した。

第4章では、スイッチレス方式の研究として、世界初の高速度大電流のスイッチを用いない軸方向放電励起N₂レーザーについて報告した。

第5章では、誘電体バリア放電を利用した励起方式の研究として、エキシマランプと同じ回路方式による2種類の軸方向放電励起N₂レーザーの発振について記述した。ランプと同じ放電方式でレーザー発振できることを世界で初めて実証した。

第6章では、第5章で開発したウォールカップル回路によるランプレーザー方式で、F₂媒質を用いた実験の研究成

果について記した。放電開始と同時に高速で立ち上がる Red-F*レーザーと VUV-F₂の発光を観測し、従来から理解されてきたものとは異なる励起メカニズムにより励起が進んでいる可能性を示した。

第 7 章では、第 6 章と同様に、ウォールカップル回路によるランプレーザー方式で、希ガス媒質を用いた実験の研究成果について記した。低ガス圧で、レーザー発振に寄与し、利得の存在を示す希ガスエキシマの一重項の発光を放電管の内壁付近で強く観測し、希ガスエキシマのレーザー発振の可能性とともに、従来とは異なる励起メカニズムにより励起が進んでいる可能性を示した。

第 8 章はまとめであり、本研究で得られた成果をまとめて、本論文を総括する。

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 紫外・真空紫外レーザー.....	3
1.3 軸方向放電励起気体レーザー.....	5
1.4 本論文の構成.....	6
参考文献（第1章）	7
第2章 放電励起方式と気体媒質の励起準位	9
2.1 はじめに.....	9
2.2 放電励起方式.....	9
2.3 N ₂ 媒質.....	15
2.4 F ₂ 媒質.....	16
2.5 希ガス媒質.....	20
参考文献（第2章）	26
第3章 容量移行型回路とダイレクト・ドライブ回路	29
3.1 はじめに.....	29
3.2 容量移行型回路とダイレクト・ドライブ回路.....	29
3.3 容量移行型回路.....	30
3.4 ダイレクト・ドライブ回路.....	34
3.5 ウォールカップル・ダイレクト・ドライブ回路.....	42
3.6 まとめ.....	43
参考文献（第3章）	45
第4章 スイッチレス放電回路方式	46
4.1 はじめに.....	46
4.2 単管型スイッチレス回路.....	47
4.3 タンデム型スイッチレス回路.....	51
4.4 まとめ.....	54
参考文献（第4章）	56

第 5 章 誘電体バリア放電を利用した励起方式	57
5.1 はじめに.....	57
5.2 誘電体バリア放電.....	58
5.3 キャパシタカップル回路.....	60
5.4 ウォールカップル回路.....	63
5.5 まとめ.....	67
参考文献 (第 5 章)	69
第 6 章 管壁を利用した F₂ 媒質の励起機構	70
6.1 はじめに.....	70
6.2 従来のレーザー発振.....	70
6.2.1 Red-F*レーザー	70
6.2.2 高ガス圧 VUV-F ₂ レーザー	71
6.2.2 低ガス圧 VUV-F ₂ レーザー	71
6.3 装置構成.....	72
6.4 結果と考察.....	73
6.4.1 Red-F*レーザー	73
6.4.2 VUV-F ₂ の発光.....	75
6.5 まとめ.....	77
参考文献 (第 6 章)	79
第 7 章 管壁を利用した希ガス媒質の励起機構	80
7.1 はじめに.....	80
7.2 従来の希ガスエキシマの生成.....	80
7.3 装置構成.....	81
7.4 結果と考察.....	83
7.5 まとめ.....	92
参考文献 (第 7 章)	93
第 8 章 結論	94
付録 1 新励起回路による N₂ レーザー	99
A1.1 はじめに.....	99
A1.2 CO ₂ レーザー型スイッチレス回路.....	99

A1.3 スイッチを用いたキャパシタカップル回路	102
A1.4 まとめ	106
参考文献（付録1）	108
付録2 新励起回路によるCO₂レーザー	109
A2.1 はじめに	109
A2.2 CO ₂ レーザーの励起メカニズム	109
A2.3 スイッチレス回路	112
A2.4 ダイレクト・ドライブ回路	114
A2.5 まとめ	116
参考文献（付録2）	117
付録3 低ガス圧VUV-F₂レーザーの狭帯域発振の検討	118
A3.1 はじめに	118
A3.2 半導体ロードマップ	118
A3.3 レーザリソグラフィ	120
A3.4 波長スペクトル線の広がり	124
A3.4.1 自然広がり	126
A3.4.2 衝突広がり	127
A3.4.3 ドップラ広がり	129
A3.5 VUV-F ₂ レーザーの圧力に依存するスペクトル幅	130
A3.6 まとめ	131
参考文献（付録3）	133
謝辞	134
業績目録	136

第1章

序論

1.1 はじめに

光の性質に関しては、古くから多くの研究がなされてきた。ニュートンは「光は小さな粒子である」と考え、ホイヘンスは「光は波である」と考えた。今日では両方の考えが正しいことがわかっている。つまり、光は波であり、なおかつ粒子である。

波としての光、光波の特性を表すものに波長がある。波長は真空中で測定したものを基準としている。人間の目に見える光である可視光の波長範囲は、400 – 700 nm である。これより長い波長の光を赤外光、短い波長の光を紫外 (ultraviolet: UV) 光という。また、波長 200 nm 以下の領域の光は、空気 (特に酸素の Schumann-Runge 帯) によって強く吸収される。この光を観測するには、光路をすべて真空にしなければならない。このことから、この領域の光を真空紫外 (vacuum ultraviolet: VUV) 光という。こうした名称を定義する波長範囲は全く便宜的、歴史的なもので、明確に定められたものではない。

粒子としての光、光子 (photon) は、物理的には電界エネルギーと磁界エネルギーを一緒に持った波束である。光の粒子性は、光電効果やレーザー遷移のように、光が物質に吸収されるときと物質から放射されるときに強く示される。このとき、光子と電子の全体についてエネルギーの保存の法則、運動量保存の法則が成り立つようにお互いが作用しあう。

近年、材料科学、物質工学から光化学や分光、半導体リソグラフィといった多岐にわたる応用分野において、UV・VUV 域の短波長光源の重要性は非常に高い。短波長光は、光子エネルギーが高いため物質と相互作用しやすく、種々の分子間結合を容易に切ることができる (Fig. 1-1 参照) [1]。可視光領域で透明なプラスチックやガラス、石英などの透明誘電体の吸収係数が UV・VUV 領域で非常に大きいため、透明誘電体に短波長レーザーを照射することで、透明誘電体の表面の極薄い層で吸収が生じ、アブレーション面で表面粗さが小さく、均一なきれいな加工が行える[2,3]。超短パルスレーザー (0.1 – 10 ps) による透明誘電体の加工も多くの研究がなされているが、短波長レーザーによる透明誘電体の加工の方が優位であることが報告されている[4,5]。また、有機・無機を問わず適当な混合試料に短波長光を照射することで全く新しい材料の開発が

可能である。最近では加工精度数 nm のナノテクノロジーとして VUV 光照射による乾式（溶剤なし）での有機・無機材料の表面加工（研磨、切削、洗浄、改質）の研究が盛んである[6,7]。さらに、短波長レーザーは、医学にも応用されている。レーザーを用いた近視矯正手術（laser-assisted in situ keratomileusis: LASIK）には、ArF レーザー（193 nm）が用いられている[6,8]。波長 193 nm の光が、角膜の最上層で吸収され、角膜のみを加工することができるからである。

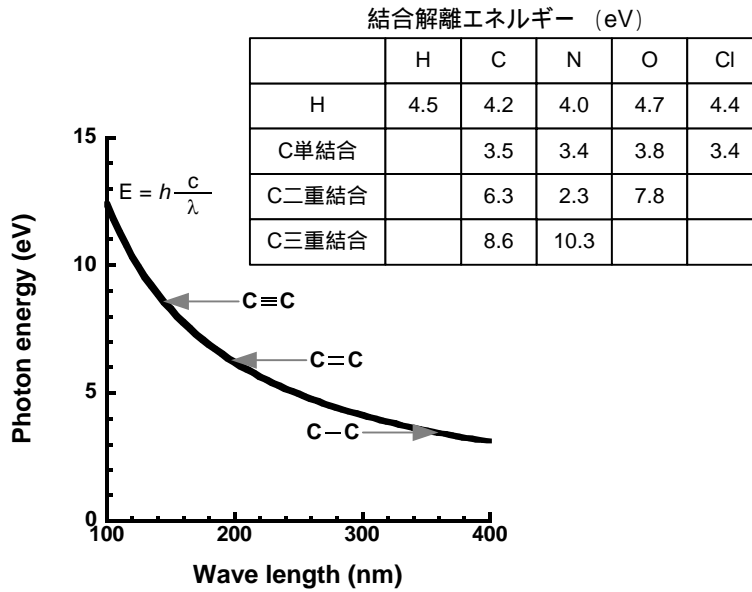


Fig. 1-1. 波長と光子エネルギー、結合エネルギーの関係[1]

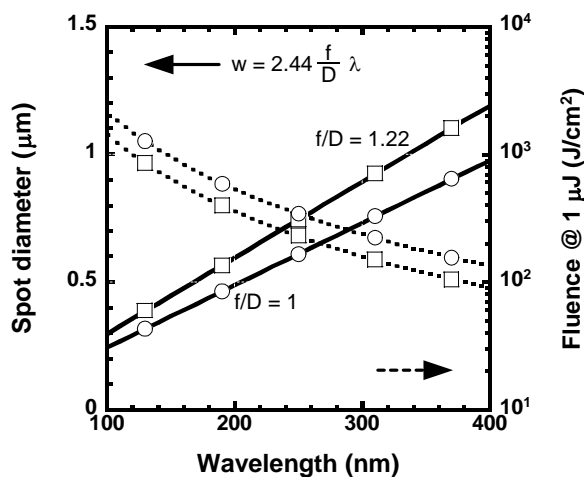


Fig. 1-2. 波長と集光径、照射強度の関係

実線と破線は、それぞれ集光径と照射強度を示す。矢印は、それぞれの縦軸を示す。

短波長光は、その短波長性から、半導体リソグラフィのような超微細加工用光源として用いられている。これまで、KrF レーザー (248 nm)、ArF レーザー、F₂ レーザー (157 nm) を用いるレーザーリソグラフィが精力的に研究されてきた[9,10]。最近では、半導体デザインルール 45 nm (ハーフピッチ) 以下を可能とする波長 13.5 nm の極端紫外光 (extreme ultraviolet: EUV、透過光学素子の存在しない軟 X 線及び硬 X 線を含む波長 104 nm 以下の波長の短い光) を用いる EUV リソグラフィの開発研究が最も盛んである。2002 年度より「EUV 露光システム開発プロジェクト」が NEDO 技術開発機構で進められ、EUV リソグラフィの研究が現在最も重要視され、全国で研究されている[10-12]。しかしながら、レーザーリソグラフィにおける液浸露光技術と二重露光技術の研究が進み、EUV でしか到達できないと考えられていたデザインルール 32 nm まで ArF レーザーと F₂ レーザーで可能であることが実証され、また、22 nm まで ArF レーザーが用いられる可能性がある[13,14]。この分野での VUV レーザー (ArF レーザーと F₂ レーザー) の重要性は依然高いままである。また、短波長レーザーはその短波長性から、レーザービームの回折限界が小さく、単一横モード発振のレーザーであれば、従来のレーザー光の集光径よりも一桁小さい 1 μm 以下に絞ることができる (Fig. 1-2 参照)。1 μm の小さな集光径では、1 μJ の小さなレーザー出力エネルギーであっても、127 J/cm² の高い照射強度をもつ。加えて、光子エネルギーも高いので、微細加工において加工部分に分解生成物が付着しないきれいな加工、従来とは異なる新しい微細加工が可能である。

1.2 紫外・真空紫外レーザー

最近では、UV 域で発振する固体レーザーとして、BBO (barium borate) 結晶を用いる波長 295 nm の固体レーザーや CLBO (cesium lithium borate) 結晶を用いる波長 196 nm の固体レーザーが開発されている[15,16]。これらのレーザーは出力安定性とビーム品質が良く、最近では高い平均出力のレーザーも開発されている[16]。しかし、装置構成として、シード光となる Nd:YAG レーザーや Nd:YLF レーザーなどの赤外固体レーザーの他に複数の波長変換素子を必要とするため、複雑で高価な装置となる場合が多い。加えて、波長変換に用いる結晶の寿命が短く、効率も低くなるために、大型のレーザー装置が必要となる。また、波長が UV 域よりも短いスペクトル域になると、光学材料の制限により、レーザー媒質としては固体材料の使用をあきらめざるを得ない。短波長域で発振するレーザー媒質として、気体媒質の重要性が再認識される。

気体レーザーでは、UV・VUV 域で多数の発振が観測されている (Table 1-1 参照) [17,18]。UV・VUV レーザーの代表であるエキシマレーザー及び F₂ レーザーは、分光光源としてはもちろん、光 CVD (chemical vapor deposition、化学蒸着) 用光源としてや、微細加工やレーザーリソグラフィのような超微細加工用光源としての研究が盛んであったことや、また、一部のレーザー (KrF レーザー) ではレーザー核融合ドライバとして着目されるほどの高出力を得ることが可能であったことから多くの研究がなされ、高い性能をもつ装置が開発されている[9,19-21]。これらのレーザーは、それぞれの産業応用に供せられる程度の動作性能をもつレーザー (横方向放電励起方式) が既に市販されているが、大型で高価な装置となっている。つまり、様々な応用分野があるにもかかわらず、フォトンコストが非常に高いため、付加価値の高い応用にしか使用できない状況となっている。また、気体媒質には VUV 域で発振するものが多数あるにもかかわらず、市販されている

波長 200 nm 以下の VUV レーザーは ArF レーザーと F₂ レーザーのみである。多くの波長(媒質)の実用的な VUV レーザーの開発を行うことで、その応用分野の研究と実際の産業応用が盛んになると考えられる。

現状において、UV、特に VUV レーザーで、小型で安価、扱いやすい、実用的な装置がなく、そのようなレーザーを開発するためには、根本的な励起方式の見直しが必要である。

Table 1-1. 紫外・真空紫外レーザー媒質と波長[17,18]

一部、UV・VUV 以外の波長を含む。() は自然光を示す。[] は発振線の本数を示す。

(a) 希ガスエキシマ(ダイマ)分子 (b) 希ガスハライド(エキシマ)分子

Xe ₂ [*]	172
Kr ₂ [*]	147
Ar ₂ [*]	126

	F	Cl	Br	I
Xe	351.1 353.1 486	308	281.8	(254)
Kr	248.5	221.1	(203)	(185)
Ar	193.2	175.0	(161)	
Ne	(107)			

(c) ハロゲン分子

	F	Cl	Br	I
I	490.8	(431.3)	(358.7)	342.4
Br	354.5	(314.2)	292.0	
Cl	284.4	257.7		
F	157.6			

(d) イオン

He-Cd ⁺	UV Blue Green Red	325.0, 353.6 nm 441.6 nm 533.7, 537.8 nm 635.5, 636.0 nm
Ar ⁺	UV Visible IR	275.4 - 390.8 nm [16] 408.9 - 528.7 nm [13] 1090 nm
Kr ⁺	UV Visible IR	337.5 - 356.4 nm [3] 406.7 - 676.4 nm [11] 752.5 - 858.8 nm [5]

(e) その他の分子

H ₂ para-H ₂	Lyman帯	124.6 - 164.6 nm [138]
D ₂ HD	Werner帯	109.8 - 126.8 nm [59]
CO	4th positive帯	181.0 - 197.0 nm [5]
N ₂	2nd positive帯	315.9 - 380.5 nm [6]

1.3 軸方向放電励起気体レーザー

小型で単純、安価な装置で高い実用性をもつ UV・VUV レーザーを開発するため、従来の市販されているエキシマレーザーや F₂ レーザー（横方向放電励起方式）とは異なる放電励起方式、軸方向放電励起方式に着目した[22-25]。軸方向放電励起方式はレーザー開発の初期に用いられた方式であるが、横方向放電励起方式のレーザー出力が大きく、高出力レーザーの開発が時流であったために、軸方向放電励起方式の研究はあまりなされていなかった。この方式では、これまでに F₂ や ArF、KrF、XeCl (308 nm)、N₂ (337 nm)、XeF (351 nm、353 nm、486 nm)、He-Ne (633 nm)、F (630 – 780 nm)、Xe (1.73 μm、2.03 μm、2.63 μm、2.65 μm)、CO₂ (9.4 μm 帯、10.4 μm 帯) などのレーザー発振が報告されている[22-32]。しかし、これまでの研究の多くは基本的にレーザー発振の報告のみであり、横方向放電励起方式や電子ビーム励起方式のように、高出力化や高効率化などの高性能化や励起方式の特性の調査のような軸方向放電励起方式そのものの基礎技術及び基礎研究が確立されていない。しかし、軸方向放電励起方式は、その電極構造、放電管構造により、低ガス圧動作、高繰り返し動作が可能で、レーザービームのモードがよく（円形ビームで小さなビーム拡がり角）、放電管内に余分な装置（予備電離装置、ガスフロー・ファン、熱交換器）を配置する必要がなく、小型で単純、安価な装置を実現する。また、近年、これまで数 atm の高ガス圧が必要と考えられてきた F₂ レーザーが、軸方向放電励起方式により数十 Torr の低ガス圧でレーザー発振することがわかり、新しい軸方向放電励起方式として注目されている[24]。

そこで、本研究では、小型で単純、安価な装置で高い実用性をもつ UV・VUV レーザーの開発を可能とする新しい軸方向放電励起方式の基礎技術確立のための基礎研究を、3 つの研究分野、高性能化の研究、スイッチレス化の研究、ランプ化の研究から進めた（Fig. 1-3 参照）。

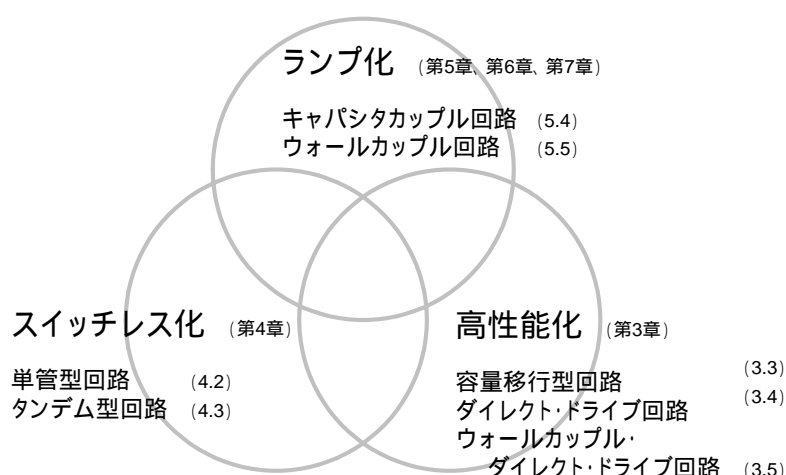


Fig. 1-3. 本研究の研究分野

1.4 本論文の構成

本論文は全 8 章からなり、筆者が大阪大学大学院工学研究科電子情報エネルギー工学専攻博士課程で取り組んだ研究成果についてまとめたものである。

第 2 章は、放電励起方式と本研究で用いた気体媒質について記す。本研究で用いた軸方向放電励起方式が、原理的に小型で単純、安価な装置で高い実用性をもつ気体レーザーの開発を可能とすることを、従来の横方向放電励起方式と比較して示す。後述する本研究結果により考察される気体媒質の励起過程がこれまで考えられてきた励起過程と異なることを示すために、これまで考えられてきた励起過程を記す。

第 3 章は、軸方向放電励起気体レーザーの基礎研究とその励起回路への応用として、横方向放電励起方式でよく用いられている容量移行型回路と新しく開発したダイレクト・ドライブ回路の特性を N_2 レーザーの発振特性を用いて比較し記述する。ダイレクト・ドライブ回路が、容量移行型回路より、単純で低容量の回路にもかかわらず、大きな放電空間の励起に適していることや容易に高出力を得ることができることを明らかとしている。また、ダイレクト・ドライブ回路では、単純な装置構成による高繰り返し動作と単一横モード発振の可能性を示している。

第 4 章は、軸方向放電励起気体レーザーの基礎研究の 1 つであるスイッチレス方式の研究として、高速大電流のスイッチを用いない 2 種類の軸方向放電励起 N_2 レーザーの発振について記述する。従来の横方向放電励起 UV・VUV レーザーでは、立ち上がりの速い電圧と放電が必要と考えられてきた。その理由である横方向放電励起方式と軸方向放電励起方式の放電の特性の違いを示し、世界で初めてスイッチを用いない UV レーザーの発振を実証している。

第 5 章は、軸方向放電励起気体レーザーの基礎研究の 1 つであるランプ方式の研究として、誘電体バリア放電励起方式を用いるエキシマランプと等価回路による 2 種類の軸方向放電励起 N_2 レーザーの発振について記述する。これまでエキシマランプとエキシマレーザーでは励起メカニズムが異なり、ランプの放電ではレーザー発振できないと考えられてきた。しかし、本方式により、ランプの放電でレーザー発振できることを世界で初めて実証し、ランプのような高い性能をもつレーザーが開発できる可能性を開いている。

第 6 章は、第 5 章で開発したウォールカップル回路によるランプレーザー方式で、 F_2 媒質を用いた実験の研究成果を記す。放電開始と同時に高速で立ち上がる Red-F* レーザーと VUV- F_2 の発光を観測し、従来の高ガス圧横方向放電励起方式とも低ガス圧軸方向放電励起方式とも異なる励起メカニズムにより励起が進んでいる可能性を示す。

第 7 章は、第 5 章で開発したウォールカップル回路によるランプレーザー方式で、希ガス媒質を用いた実験の研究成果を記す。低ガス圧で放電開始と同時に高速で立ち上がる一重項の発光と高ガス圧でゆっくりと立ち上がる三重項の発光を観測し、低ガス圧の一重項の形成には放電管の内壁が影響する励起メカニズムが支配的であることを示している。また、希ガスエキシマのレーザー上準位が一重項で下準位が解離準位であるため、本研究で観測された一重項の発光は利得の存在を示唆し、低ガス圧希ガスエキシマレーザーが開発できる可能性を開いている。

第 8 章はまとめであり、本研究で得られた成果をまとめて、本論文を総括する。

参考文献 (第1章)

- [1] 最新レーザー加工技術総覧編集委員会 編, “最新レーザー加工技術総覧”, 産業技術サービスセンター, (1994).
- [2] R. Srinivasan, B. Braren, R. W. Dreyfus, L. Hadel, and D. E. Seeger, *J. Opt. Soc. Am. B* **3** (1986) 785-791.
- [3] T. Jitsuno, K. Tokumura, N. Nakashima, and M. Nakatsuka, *Appl. Optics*, **38** (1999) 3338-3342.
- [4] P. R. Herman, R. S. Marjoribanks, A. Oettl, K. Chen, I. Konovalov, and S. Ness, *Appl. Surf. Sci.* **154-155** (2000) 577-586.
- [5] D. Schafer, J. Ihlemann, G. Marowsky, P. R. Hermann, *Appl. Phys. A* **72** (2001) 377-379.
- [6] H. Nagai, *レーザー研究*, **23** (1995) 1038-1050.
- [7] K. Kurosawa, W. Sasaki, and Y. Takigawa, *レーザー研究*, **20** (1991) 11-19.
- [8] Q. Ren, R. H. Keates, R. A. Hill, and M. W. Berns, *Opt. Eng.* **34** (1995) 642-660.
- [9] H. Mizoguchi, *レーザー研究*, **29** (2001) 633-637.
- [10] T. Ito and S. Okazaki, *Nature*, **406** (2000) 1027-1031.
- [11] H. Mizoguchi, *J. Plasma Fusion Res.* **79** (2003) 219-220.
- [12] K. Murakami and S. Okazaki, *J. Plasma Fusion Res.* **79** (2003) 221-225.
- [13] T. M. Bloomstein, T. H. Fedynyshyn, I. Pottebaum, M. F. Marchant, S. J. Deneault, and M. Rothschild, *J. Vac. Sci. Technol. B* **24** (2006) 2789-2797.
- [14] A. K. Raub, D. Li, A. Frauenglass, and S. R. J. Brueck, *J. Vac. Sci. Technol. B* **25** (2007) 2224-2227.
- [15] S. J. Rehse and S. A. Lee, *Opt. Commun.* **213** (2002) 347-350.
- [16] M. Yoshimura, Y. Mori, and T. Sasaki, *J. Plasma Fusion Res.* **83** (2007) 706-709.
- [17] 前田三男 編, “日本分光学会 測定法シリーズ 27 エキシマレーザー”, 学会出版センター, (1993).
- [18] レーザー学会 編, “レーザー技術の新展開”, 学会センター関西, (1994).
- [19] T. Sato, *レーザー研究*, **13** (1985) 927-938.
- [20] I. Okuda, *レーザー研究*, **32** (2004) 271-276.
- [21] K. Kakizaki, Y. Sasaki, T. Inoue, and Y. Sakai, *Rev. Sci. Instrum.* **77** (2006) 035109-1-035109-6.
- [22] M. A. El-Osealy, T. Ido, K. Nakamura, T. Jitsuno, and S. Horiguchi, *Opt. Commun.* **194** (2001) 191-199.
- [23] M. A. M. El-Osealy, T. Jitsuno, K. Nakamura, and S. Horiguchi, *Opt. Commun.* **205** (2002) 377-384.
- [24] M. A. M. El-Osealy, T. Jitsuno, K. Nakamura, Y. Uchida, and T. Goto, *Opt. Commun.* **207** (2002) 255-259.
- [25] M. A. M. El-Osealy, 大阪大学博士学位論文 (2002).
- [26] H. J. Eichler, J. Hamisch, B. Nagel, and W. Schmid, *Appl. Phys. Lett.* **46** (1985) 911-913.
- [27] Z. Zhou, Y. Zeng, and M. Qiu, *Appl. Phys.* **43** (1983) 347-349.
- [28] D. Cleschinsky, D. Dammasch, H. J. Eichler, and J. Hamisch, *Opt. Commun.* **39** (1981) 79-82.
- [29] A. Javan, W. R. Bennett, Jr., and D. R. Herriott, *Phys. Rev. Lett.* **6** (1961) 106-110.
- [30] L. O. Hocker and T. B. Phi, *Appl. Phys. Lett.* **29** (1976) 493-494.

- [31] K. Komatsu, E. Matsui, F. Kannari, and M. Obara, Rev. Laser Eng. **19** (1991) 490-495.
- [32] W. B. Tiffany, R. Targ, and J. D. Foster, Appl. Phys. Lett. **15** (1969) 91-93.