技術資料

テーマ特集

最近の材料加工機器と現象

最近のエキシマレーザとその応用*

野 末 康 博**

Present Status of the Excimer Laser and its Applications*

by Yasuhiro Nozue**

キーワード：エキシマレーザ，レーザ加工機，リソグラフィ，エッチング，CVD，ドーピング，アブレーション，ケラトサージリー

1. はじめに

いうまでもないことであるがレーザは単なる光源にすぎないもので、これを搭載し利用する装置となって初めて産業上の便益を提供する事ができる。これを実用化というならば、レーザの種類は何千と存在するが、それに比べて実用化されたレーザは数少ない。エキシマレーザが実用化に至るのか、実用化されずに消え去るのかはいまだ確実ではないが、ここ数年の用途研究とそれに伴うレーザの改良・開発を見ると、実用化の期待を抱かせるに充分な勢いが感じられることは事実である。

従って、毎年のように様々な学協会誌にエキシマレーザに関するレビュー¹⁻³⁾が現れている。本誌はレーザの専門誌でもなく、半導体プロセスのような特定の有望応用分野の専門誌でもない。もとより筆者の非才もあり、本稿では特定の詳細に立入らず、極力広い範囲の動向と話題を集めて一般的な現状を紹介する事とする。個別の項目について掘り下げた情報が必要のむきには、本稿末記載の文献等からの詳細な調査をお願いしたい。

2. エキシマレーザとは

今日一般的な希ガスハライドエキシマレーザの最初の発振は1975年であり、最も歴史の浅い新しいレーザの一つである。商品化されているものの多くは、三軸直交型の放電容器をもち、希ガス(Kr, Xe, Ar等)とハロゲンガス(HCl, F₂等)及びバッファガス(He, Ne等)を使

表1 典型的なエキシマレーザの発振特性

エキシマ	ArF	KrF	XeCl	XeF
波長(nm)	193	248	308	351
パルスエネルギー(mJ)	200	300	150	100
効率(%)	1.5	2.0	1.0	0.8

用する。表1に示すようにガスの組合わせにより波長は異なるが、0.4 μ m以下の紫外域で数十nsecのパルスで発振する。一パルス当りのエネルギーは数十から数百mJ、一秒当りのパルス数は数百パルス程度が一般である。ガスの寿命はさほど長くなく、数百万パルス毎に交換が必要である。

発振原理の詳細は多くの一般的解説⁴⁾もあるのでそちらを参照願うとして、放電等により励起された状態でのみ存在する二原子分子(Excited Dimer=Excimer)の解離によって光を放出する。従来にない高効率、高出力、短波長のレーザであり、それだけに広範囲の応用が期待されているわけである。

3. エキシマレーザ本体の開発動向

よく知られているように、現在我が国の市場に出回っているエキシマレーザは海外メーカからの輸入品が主体である。国内メーカの製品は現状では数少ないが、1986年からスタートした通産省工業技術院の大型プロジェクト「超先端加工システム」⁵⁾に象徴されるように、官民をあげて研究開発が取組まれており、近い将来には優れた性能をもつ商用国産エキシマレーザの登場が期待される。

*原稿受付 平成元年12月28日

** (株)小松製作所研究本部 Komatsu Ltd.

エキシマレーザの開発には現状で二つの方向が明確になりつつある。一つはレーザの用途によらず共通の性能に関するもので、高出力化、信頼性・耐久性の向上、保守性の改善等である。今一つは特定の用途に必要な性能に関するもので、様々な開発・改良が試みられている。ここでは前者の、それも実用機あるいは商用機に採用されたあるいは採用されつつあるような開発項目を中心に解説する。

3.1 放電技術

一般のエキシマレーザは放電によって励起される。これが基本性能を決定する最も重要な技術であるので、多くの研究開発努力が払われている。基本的にはガス、電極等の寿命延伸の見地からグローモードのみの放電が望ましく、これと高効率の両立がポイントである。研究レベルではすでに限界に近いと思われる優れたデータの得られた例⁶⁾もある。

主放電領域を予備電離しておくことが必要なので、これも重要なパラメータである。方式としては、

① スパークにより発生した極く短波長の紫外光を照射して予備電離するもの、

② コロナ放電により発生された電子の拡散を利用するもの、

③ X線により照射領域を予備電離するもの、がある。現在の製品の多くでは①の方式が採用されているが、より制御された均一な励起を目指して、②、③の方式の実用化が研究されており、すでに一部⁷⁻⁹⁾に採用されている。

3.2 パルス回路技術

数十kVのパルス放電によってレーザ発振するため、効率と耐久性を両立したスイッチング回路が必要である。図1にいくつかの回路の例を示す。耐久性の見地から最も問題となるのはスイッチング素子で、通常は水素封入サイラトロン（放電管）が用いられるが、一般には図1(a)の最もシンプルな回路を基本として、回路定数を

最適化する事により効率と耐久性を確保する方法^{10,11)}が採用されている。さらに図1(b)のような、素子の保護を徹底した回路も一部のメーカーで採用¹²⁾されている。

さらに近年研究が進められているのは、放電管を廃止し、固体素子のみで回路を構成する試み¹³⁾である。高压に耐える固体素子の開発には困難が伴うことから、昇圧やパルス圧縮等の技術を併用する事が不可欠であろう。この技術はさきにふれた大型プロジェクトでも盛んに研究開発されており、実用化が期待されている。

3.3 ガス制御技術

ガス系の制御は大きく二つに分類できる。第一はメインのガス流れに関するものであって、パルス放電する電極間のガスを素早く入替える事を目的とした技術である。高出力化のために一秒当りのパルス数を増大しようとすれば、原則的には電極間のガス流速を上げる必要がある。放電、パルス回路を含む総合的な最適化により、17 m/秒程度の流速で500パルス/秒以上の繰返し数が得られるようになってきている⁶⁾。さらに高速を目指した研究も進んでいるが、実用上は当面このへんが標準的な目標となるであろう。

もうひとつのガス系の制御はガス寿命の伸延のための技術であって、

① 放電チャンパ内部の材質等の改善、

② 発生した有害な不純物の除去、

③ 運転を継続したままでのガス追加・入替え、など¹⁴⁾のアプローチがある。地道なガス劣化メカニズムの研究に基づく最近の改善は目覚ましいものがあり、出力が半減するまでのガス寿命が $10^6 \sim 10^7$ パルスまで可能となりつつある。エキシマレーザのカタログ上から「ガス寿命」の字が消える日も遠くないであろう。

3.4 その他の技術

最近のようにエキシマレーザの産業用途への展開が確実視されるに従い、従来の研究用レーザから脱皮する必要が高まり、ことに耐久性・保守性の観点から様々な改

図1 典型的なパルス回路の例

良が施されている。

例えば電極材料の工夫改善やウインドのくもり防止等が試みられている。同時に、消耗がまぬがれない部品の交換が容易なユニット構造の採用もいまや常識となりつつある。こうした様々な技術改良・開発がシステムティックに実施され、採用されて製品となるわけであるが、上記の産業用途への採用に当って、もうひとつの問題が生じている。それはレーザー性能の評価基準の問題である。例えば紫外レーザー光の強度測定標準（現在の市販パワーメータではメータ毎に測定値が異なる）から始まって、寿命のカタログ表示基準等の標準化が望まれる。JISでも安全基準¹⁵⁾が最近公布されたばかりであるが、さらにこの方面の充実が期待される。

4. 応用技術の開発動向

学術的に考えれば、エキシマレーザーの応用はそれなりの分類ができるのであろうが、ここでは実務的な立場から産業の分野別に分類して、それぞれの応用技術開発動向を概説する。あわせて、特定の応用にむけて開発されているレーザーおよびレーザー応用製品についても言及したい。

4.1 半導体製造プロセス

現在最もホットに技術開発が進められている分野である。従って、最近現れたレビュー^{1,2)}でもさらに詳細に各分野の専門技術者が解説を行っている。

4.1.1 露 光

LSI の高密度化、回路微細化のキー技術の一つは露光プロセスであり、水銀灯を光源としたステッパ装置がひろく使用されている。近年、微細化がさらに進行するにともない、分解能を向上するため、光源はより短波長になりつつある。なぜなら、縮小投影光学系の分解能は波長に比例するとともに、焦点深度の点でも有利になるからである¹⁶⁾。従来は水銀ランプの g 線 (436 nm) と i 線 (365 nm) が使用されてきたが、KrF(248 nm)、ArF(193 nm)エキシマレーザーを光源としようとしている。装置の構成を図2に示す。

光学系の構成方式として、通常のレーザーを用いてレンズ系を色消しとするものと、発振スペクトルを狭くして色消ししないレンズを用いるものがある。短波長域では使用できる硝材が少ないため後者が有望と見られ、これに適合したレーザーの開発⁷⁾が盛んである。

4.1.2 エッチング

反応性イオンエッチングが現在の主流であるが、低損傷の方式が求められており、図3のようにエッチングガス雰囲気中でエキシマ光を照射するレーザー法が研究され

ている。ArF レーザにより、Si、Al 等について可能性を示唆する良好なデータが得られている¹⁷⁾。この方法では単に低損傷というだけでなく、フォトマスクを用いることによりパターン転写エッチングも可能で、実用化されればプロセスへのインパクトは大きい。

4.1.3 CVD

原料ガスを熱エネルギー、放電又は光によって分解し、基板表面に堆積させて薄膜を形成しようとするプロセスで、装置の構成は図3とほぼ同様である。ここでも低温・低損傷(または高堆積速度)、パターン転写をめざして研究が進められている。エキシマレーザーは ArF が多く使用され、基板としては Al、Si のみならず、GaAs などの化合物半導体に応用した例が多く報告されている¹⁸⁾。

4.1.4 ドーピング他

半導体の製造では、母材結晶中に少量の不純物を注入することが必要である。均一で深さの制御されたより良いドーピングを行うために、従来の加熱拡散法、イオン注入法にかわるレーザー法が試みられている¹⁹⁾。基板としては Si、GaAs などが、レーザーとしては XeCl から ArF まで用途により様々な条件で実験されているが、一部では XeCl レーザをベースとした加工装置として市販され始めた例²⁰⁾もある。ドーピングとは逆に不純物を取除く

図2 エキシマレーザー露光装置

図3 レーザエッチング装置

ゲッタリング装置²¹⁾も実用化されており、今後の動向が注目される。

これらの他、ドーピング後の内部構造を安定化するためのアニーリング等も含めて、エキシマレーザのみでなく、Ar レーザや各種ランプによる光プロセスが幅広く研究²²⁾されていることを付言しておく。

4.2 半導体以外の微細加工

半導体プロセスの項からも理解されるように、エキシマレーザによる加工は、本質的に熱を利用していない。この点が炭酸ガスレーザや YAG レーザと異なる。ポリマのアブレーション²³⁾もその典型的な一例で、熔融や酸化を伴わず、分子の結合を紫外特有の高いフォトンエネルギーによって直接分解して、穴明けなどの加工が可能である。図4に例¹⁾を示すように、加工箇所周辺の熱影響部がほとんどなく、極めてシャープな形状が得られると同時に、短波長ならではの高分解能が特長である。

マーキングでは YAG レーザや TEA レーザでは困難であった高品位の加工が可能で、セラミック、ガラス等の材料にも適用されている。ことに最近増加している微小な SMD パーツ等には最適であろう。

この応用分野でも加工機として一部で市販が始まっており、生産技術の研究用もかねた汎用のもの¹⁾、マーカー専用機²⁴⁾等がある。

4.3 化学工業プロセス

これまでに紹介した応用例は広い意味ではすべて化学反応に関わるものであるが、物質の合成、分離などのいわゆる化学工業プロセスにもエキシマレーザの利用が研究されている²⁵⁾。

この分野でもすでに光プロセスとして水銀灯を利用した研究が行われているが、商業生産で実用化されたものはほとんどないようである。単純に比較すれば、エキシマレーザのコストは水銀灯よりはるかに高いわけで、指向性とか尖頭パルスエネルギーの強さなどの特徴を生かすと同時に、付加価値の高い生産品を対象とする必要があ

る。その意味でビタミンやフェロモンの合成などが有望とされるが、実用化にはまだ問題点が山積しているようである。

ウランの同位体分離は実用化の可能性も高く、精力的に研究開発が行われているが、レーザ法そのものに対して遠心分離法などの競合がある。さらにレーザ法の内でも原子法は赤外のラマンレーザを利用する。分子法なら色素レーザ励起光源として、銅蒸気レーザかエキシマレーザが使われる事になるという、商業化にはまだまだ曲折が予想される状況である²⁶⁾。

4.4 医療機器

医療の分野では炭酸ガスレーザメスや Ar レーザのコアギュレータ（網膜剥離の固定手術装置）など、レーザの利用が展開されているが、ここにきて急速に注目を集めたのがエキシマレーザである。骨切断には熱による炭化のないエキシマレーザが有効²⁷⁾といわれ、血管の狭窄、閉塞物の除去にも有望²⁸⁾とされる。いずれも KrF は発振波長の近傍に DNA の吸収があり、遺伝情報破壊の危険があるので XeCl または ArF が使用されているようである。

しかしなんといっても最近のハイライトはケラトサージリーである。これはポリマ加工と同様、紫外光によるアブレーションを角膜表面に発生させ、近視・遠視を永久的に治療しようというものである。すでに FDA の認可をえた米国の数社が専用の機器を試作し、手術の試行を開始しており、良好な成果を得ているとのことである²⁹⁾。国内での実用化についてはまだまだ時間が必要ともいわれるが、エキシマレーザの特徴を巧みに生かした応用であり、今後が期待される。

4.5 その他

従来から行われている、分光分析用光源としての利用は、着実に一定の市場を形成しているようである。最近の話題では大気観測を目的としたレーザレーダへの応用³⁰⁾がある。また色素レーザの励起には波長帯域を広く

(a) 炭酸ガスレーザ

(b) エキシマレーザ

図4 ポリイミドのレーザ穴（直径0.3mm）加工例¹⁾

とれる紫外レーザーが有利であり、今後とも活用されていくであろう。こうした分野でまず利用可能と思われる、安価でコンパクトな全く新しいタイプのエキシマレーザー^{31,32)}が出現しており、動向が注目される。

5. おわりに

最後に周辺技術の動向の一端を紹介して、しめくくりとしたい。始めにも述べたように、レーザーを単なる光源にとどめず、装置として実用化するには加工機としてシステム化する必要があり、それには周辺の技術の進展が不可欠である。たとえば光学素子の技術やセンサの技術がこれに当たる。この方面でも、光学薄膜の損傷の系統的研究³³⁾や紫外線センサの開発³⁴⁾が成果をあげており、たのもしいかぎりである。

今後とも、こうした着実な研究開発の努力が積重ねられ、さらにはシステム化のノウハウが蓄積されて、メーカー・ユーザー一体となった協同作業により、エキシマレーザーの産業用市場が確立される事を切望するものである。

執筆にあたり資料提供戴いた各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 前田他：レーザー研究, Vol. 16, No.4 (1983), 148-229
- 2) 豊田他：電気学会雑誌, Vol. 108, No. 11 (1983), 1077-1099
- 3) 渡部：固体物理, Vol. 23, No. 11 (1988), 861-867
- 4) 植田：精密工学会誌, Vol. 55, No. 5 (1989), 837-840
- 5) 清水, 牧田, 佐藤：応用物理, Vol. 57, No. 4 (1988), 522-527
- 6) 堀田：レーザー研究, Vol. 16, No. 4 (1983), 191-199
- 7) 江浦, 若田, 中谷, 永井, 坪井：三菱電気技報, Vol. 63, No. 4 (1989), 273-276
- 8) XMR エキシマレーザー応用装置 (製品カタログ), ㈱ MBK マイクロテック
- 9) EMG401 2J Excimer Laser (製品カタログ), Lambda Physik GmbH (丸文(株)扱い)
- 10) Variable Beta High Efficiency Excimer Lasers (技術説明資料), Questek Inc. (㈱理経扱い)
- 11) Index 200 Industrial Excimer Lasers (製品カタログ), Lumonics Inc. (ルモニクス・パシフィック(株)扱い)
- 12) Excimer Lasers with Magnetic Switch Control (製品カタログ), Lambda Physik GmbH (丸文(株)扱い)
- 13) T. Shimada, M. Obara and A. Noguchi: Rev. Sci. Instrum., Vol. 56 (1985), 2018
- 14) Questek Series 2000 excimer lasers (製品カタログ), Questek Inc. (㈱理経扱い)
- 15) 「レーザー製品の放射安全基準」, JIS C 6802-1988 日本規格協会
- 16) 塩竹：電気化学および工業物理化学, Vol. 57, No. 4 (1989), 272-276
- 17) 広瀬：電気学会雑誌, Vol. 108, No. 11 (1983), 1081-1085
- 18) 青柳：レーザー研究, Vol. 16, No. 4 (1983), 486-497
- 19) 後藤：電気学会雑誌, Vol. 108, No. 11 (1983), 1090-1094
- 20) 入江, 前田, 村岸：電子材料, 1986年12月号, 84-88
- 21) 梶川, 木原, 鈴木, 中村：NEC技報, Vol. 41, No. 15 (1988), 115-119
- 22) 広瀬：応用物理, Vol. 57, No. 12 (1988), 1895-1900
- 23) S. Lazare and V. Granier: Laser Chem., Vol. 10 (1989), 25-40
- 24) Lambda Mark, An Excimer Laser non-contact Marker (製品カタログ), Lambda Physik GmbH (丸文(株)扱い)
- 25) 矢部：ペトロテック, Vol. 11, No. 12 (1988), 1141-1146
- 26) 東：エネルギーレビュー, 1985年4月号, 10-16
- 27) 佐藤, 山本：O plus E, No. 109 (1988), 94-100
- 28) 荒井, 菊池：O plus E, No. 109 (1988), 75-81
- 29) 小沢：光技術コンタクト, Vol. 27, No. 4 (1989), 203-211
- 30) 杉本：センサ技術, Vol. 9, No. 2 (1989), 22-26
- 31) GX-100 紫外導波路型エキシマレーザー (製品カタログ), Potomac Photonics Inc. (丸文(株)扱い)
- 32) SEL 500 Switchless excimer laser (製品カタログ), Sopra (オーテックス(株)扱い)
- 33) 伊藤, 黒田, 小倉：東京大学生産技術研究所報告, Vol. 35, No. 1 (1988)
- 34) 池戸：センサ技術, Vol. 9, No. 6 (1989), 235-237