レーザーオリジナル

エキシマレーザーのビーム質計測システムの開発

松見 豊^{*†}・八木隆志^{*}・斉藤英明^{*}・藤岡知夫^{*}

(1988年8月29日 受理)

Development of a Beam Quality Measurement System for
Excimer LasersYutaka MATSUMI^{*}, Takashi YAGI^{*}, Hideki SAITO^{*} and Tomoo FUJIOKA^{*}

(Received August 29, 1988)

A beam quality measurement system for excimer lasers is developed. This system provides a 2-dimensional intensity distribution of an individual laser pulse delivered from an excimer laser operated at a repetition rate of 250 Hz. The system is equipped with a large storage capacity of a frame memory which makes it possible to analyze the variation in intensity profiles of many successive pulses. The system is also equipped with the optics for measurements of far and near field patterns and etalon fringe patterns. The beam qualities of a commercial excimer laser which has an injection locking type configuration and practically measured with this system. The far and near field patterns of a single laser pulse are presented. The pulse-to-pulse fluctuations of intensity patterns and of total pulse energy are observed at various gas ages. The center of gravity of successive laser pulse patterns are traced with this system and the fluctuation of beam pointing is shown to increase with the gas aging.

Key Words: Excimer laser, Beam diagnostics, Beam quality, Intensity pattern.

1. 諸言

紫外の波長領域で大出力の光を得ることのできるエキシマレーザーは、その性能の向上と相まって、産業への応用が近年盛んに研究されている。短波長かつコヒーレントな光という他の光源にない特長を有しているの、これまでになく新しい応用がひらけてきている。半導体

の微細加工、リングラファイア、化学合成、表面改質、薄膜形成など多くの分野で応用が試みられている。半導体のリングラファイアでは、既にエキシマレーザーを組み込んだ露光装置が製品として出されるようになってきている。

研究段階ではそれ程問題にはならないかもしれないが、実際にレーザーを産業に応用する段階では、レーザー光のビーム質が重要になって

^{*} (財)工業開発研究所 レーザー研究センター (〒277 柏市高田1201)

^{*} Laser Laboratory, Industrial Research Institute, (Takada 1201, Kashiwashi Chiba 277)

[†] 現所属 北海道大学応用電気研究所

[†] Present affiliation, Research Institute of Applied Electricity, Hokkaido University.

くる。現在機械加工に盛んに用いられている、CO₂レーザーについて、そのビーム質が加工精度に大きく影響を与えることが実際の利用のなかで明らかになり、レーザービーム質の計測とその改善の努力がなされている¹⁻³⁾。

エキシマレーザーは、その発振波長の短かさから、より微細な加工ができると期待されているが、ビームの方向性、パターン、集光性などの因子が時間とともに変化してしまうと、再現性のある高精度な加工は不可能である。エキシマレーザーはCO₂レーザー等とは違ってパルス状に発振し、発振時間幅が数十nsであり共振器を光が往復する回数が数度であるので、パルス毎のビーム質のばらつきが重要となる。

我々は、エキシマレーザーのビーム質を計測するためのシステムを開発し、現在市販されている高速繰り返し注入同期型エキシマレーザーに適用し、ビーム質について検討したので報告する。この計測システムは、毎秒250発以上の繰り返しでパルス発振を行っているレーザーのパルス一発一発の光強度の二次元分布を計測することができ、大容量のメモリを備え、連続するレーザーパルス光の変化を解析することができる。レーザー光の近視野像 (near field pattern)、遠視野像 (far field pattern)、エタロンフリッジ像を測定するための光学系を備えている。まずこの計測システムの装置概要について、画像計測装置、光学系の順に説明し、次に実際の測定結果とその検討について述べる。

2. 装置の概要

2.1 画像計測装置

エキシマレーザーのビーム質を計測するための二次元画像計測装置として、次の様な仕様が必要であると考えた。

- ① 光検出器はエキシマレーザー光 (193, 248, 308, 351 nm) で感度をもち、かつこれらの光で劣化しないものである。
- ② 二次元の画像分解能が最低限 128 × 128 程度あり、ピクセル間のにじみ出しがないこと。
- ③ 光検出のダイナミックレンジが大きく、か

つ感度のリニアティーがあること。また、ピクセルごとの感度のばらつきが少ないこと。

- ④ パルス発振を行うエキシマレーザーの一発毎の二次元強度分布が測定できるように、レーザーパルスに同期して画像の取り込みが行えること。
- ⑤ エキシマレーザーの毎秒繰り返し 250 Hz 程度まで追従して、連続するパルスの形状を測定できること。
- ⑥ 連続するパルスの形状の変化・バラツキを調べることができるよう、数十～数百発のパルスの形状をメモリに記憶できること。
- ⑦ 測定中の画像をリアルタイムで観測することができること。光学系のアライメントの調整に不可欠である。

レーザービームの計測装置は幾つか市販されていたが⁴⁾、上記の仕様を満足するものはなかった。従って、新たにエキシマレーザー用のビーム計測装置を開発した。最近になってエキシマレーザーに対応可能な高速撮像のビームモニター装置が市販されるようになった。しかしながら、フレームメモリの容量が小さい、100 Hz 程度までしか追いつかない等の問題点がある。

我々が作製したエキシマレーザー用ビーム計測装置のブロックダイアグラムを Fig. 1 に示す。以後、このブロックダイアグラムの個々のコンポーネントについて説明する。

2.1.1 光検出部

レーザービームの二次元的な強度分布を測定するための光検出方法としては次の3つの方式が考えられる。①ピンホールを通してフォトダイオード等の無次元検出器でレーザー光を受け、少しづつこの組合せを動かしてゆき測定する範囲を網羅する。②やはり無次元検出器を使用するが、検出器を固定しておいてレーザー光をサンプリングするアームを動かして測定する⁵⁾。③1次元のアレー状検出器を一方向に少しづつ動かしてゆく。④2次元のアレー状検出器を用いる。

赤外レーザーのビームモニターには、検出器のアレー状のものがあまりないため、①、②の

Fig. 1 Block diagram of the beam quality measurement system for excimer lasers.

方法がよくとられている。一次元のアレー型検出器には、高集積、高速読み出しの優れたものがあり、またサイズもレーザービームの大きさにそのまま対応できる数cm長のものがある。しかしながら、ここではエキシマレーザー光の一発一発の空間強度分布を測定する必要があるため、③の二次元アレー型の光検出器を用いた。

二次元アレー型検出器には、いわゆるビデオカメラ用検出器としてテレビ標準規格 (NTSC) に合致したものが大量生産され、かつ技術的にも進んでおり、コストも低い。エキシマレーザーの波長での感度や毎秒のコマ撮り数、レーザーとの同期の点で問題があり、今回の場合には適当ではなかった。我々は EG & G-Reticon 社の MOS 二次元アレーセンサ (カメラ) を用いた。このカメラの分光感度は、短波長側で 180 nm 程度までのびており、エキシマレーザーの波長を充分カバーする。256 × 256 の画像分解能を有しており、画面全体で約 6 万 5 千個のピクセルがある。1つのピクセルを読み出す速度は 8 MHz、すなわち 125 ns であり、画面全体ではロス時間を含めて 9 ms 程度で読み出しを完了する。従って毎秒あたりの最高撮像数は 109 フレーム / 秒である。画面の走査を全画面では

なく、一部に限定すればこの撮像速度はさらに増大する。例えば、画面の 1/3 しか走査読み出しを行わなければ、毎秒あたりの撮像数は 250 フレーム / 秒を超える。このように高速で読み出しが行えたとともに、画面の走査をレーザーパルスの外部のイベントに同期させて行うことができる。

1つのピクセルのサイズは、40 μm 四方であり、全体で約 10 mm 角である。この大きさは、エキシマレーザーのビームサイズ (約 5 × 25 mm) に較べてかなり小さいので、近視野像を測定するためには後述するような縮小光学系が必要である。カメラの飽和光強度は、0.4 μJ/cm² であり、エキシマレーザー光の近視野像の光パワー密度、数百 mJ/cm² に較べると、10⁶ オーダー小さい。従って、その減光のための光学系が必要である。

2.1.2 カメラコントローラ

Fig. 1 に示すように、カメラコントローラは走査制御部、A/D 変換部、フレームメモリ部に分けられる。レーザーパルスに同期して画像を取り込むためにエキシマレーザーの発振直後にカメラの走査読み出しを開始するようにしている。読み出しクロックは 8 MHz を与えている。

読み出しがそのまま消去に対応するので、レーザーパルス一発毎の強度分布が得られる。前回読み出した後から次に読み出すまでの各ピクセルへ入射する光の積分量が画像信号となる。レーザーパルスの繰り返しが速い場合には、レーザー光以外の外の光の積分量は無視できる。

カメラからの映像信号は、A/Dコンバータによりデジタル化され、フレームメモリ上に蓄積される。8ビットのA/Dコンバータを使用しているので、映像信号は256段階にデジタル化される。カメラ自体のS/N比が1000程度なので、この程度の分解能で充分である。16メガバイトの容量のフレームメモリを備えており、 256×256 全画面を使用した場合には、最高で256画面をメモリ上に蓄積しておくことができる。先に述べたように、毎秒の撮像数をふやすために、全画面を使用せず、読み出し走査を画面の一部だけに限定すれば、画像一枚あたりの情報量が減少するので蓄積できる画像数は増大する。例えば、走査範囲を1/3程度にすれば、750枚以上の画像がたくわえられ、250 Hzで発振しているレーザーの場合には3秒以上の連続するパルスの強度分布がフレームメモリ上に保存される。

カメラから送られてくる画像信号は、通常のテレビの標準規格(NTSC)とは異なる。信号処理部でこの信号をNTSC規格に変換して、モニターテレビ上でリアルタイムの画像が観測できるようになっている。またこの信号を利用してビデオテープレコーダにアナログ的に画像を保存することができ、極めて大量の画像を扱うことができる。ただし、NTSC備号は30枚/秒なので、これよりレーザー発振のくり返し速度を上げた場合には、全画像ではなく、とびとびの画像しか記録されない。

2.1.3 画像処理部

カメラ信号処理部でメモリ上に蓄えた画像を画像処理用コンピュータに送り、計算処理を行う。画像処理用にNEC-PC 9801 VX 21マイクロコンピュータを使用している。

測定結果のところで述べるように、バックグ

Fig. 2 Schematic diagram of the optics for measuring the beam qualities F. F., far field pattern; N. F., near field pattern; F. P. I., Fabry-Perot interferometer.

ラウンドの差し引き、重心計算、平均値、標準偏差、三次元立体表示、色別等高線図、断面図などの処理を行うことができる。一画面につき64 kバイトになるような多量のデータを取り扱うので、処理速度を向上させるため、計算の繰り返し部分をアセンブラを使用して作成している。画像データおよび計算処理結果は、カラーディスプレイ上、あるいはプロッタ上に描画され、また外部記憶装置に保存される。

2.2 光学系

Fig. 2に、エキシマレーザーの近視野像、遠視野像、エタロンフリンジパターンを計測する光学系を示す。先に述べたように、カメラの飽和光強度は $0.4 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ でありエキシマレーザー光の近視野像の光パワー密度は、数百 mJ/cm^2 である。従って 10^{-6} 程度の減光システムが必要である。減光システムにもとめられる性能は、① 10^{-6} までの減光ができる、②エキシマの波長範囲(193 ~ 351 nm)で使える、③強いエキシマ光で劣化しない④減光のムラや像のゆがみが

生じない、⑤減光率の微調整ができる、等である。⑤は、カメラのダイナミックレンジをフルに使う上で重要である。ここでは、 10^{-6} の減光を行うため、石英製ウェッジ基板（コーティングなし）の表面反射を4回くり返す光学系とその後の減光フィルター（透過10～90%）の組合せを用いた。減光フィルターを差替えることにより減光率の微調整を行った。

他の減光方法として、直接減光フィルターを用いる、あるいは、 NO_2 などの適当な吸光ガスをセルを用いる方法がある⁶。しかし、これらの方法は波長依存性や耐パワー性、均一性に問題がある。エキシマレーザは高パワーであり、またガスにより種々の波長で発振する等の特長があるので、これに対応できる方法として石英板の表面反射を用いることにした。この場合、多くの反射面を使用するので、平面の歪みによる像の変化が起こらないように配慮した。

エキシマレーザの近視野でのビームの大きさ（約 $30 \times 5 \text{ mm}$ ）に比べて二次元アレーの大きさ（ $10 \times 10 \text{ mm}$ ）が小さいので、近視野像（near field pattern）を測定するには、縮小光学系が必要であった。 $f = 300 \text{ mm}$ のレンズを用いて縮小投影を行っている。

遠視野像（far field pattern）を測定するのに必要な距離 l は以下ようになる。

$$l \gg \frac{d^2}{\lambda} \quad (1)$$

ここで、 d は近視野像のビーム径、 λ はレーザの波長である。エキシマレーザの場合波長が短いので数十km以上の距離になる。ここでは、凸レンズ焦点での像が遠視野像となるので、 $f = 10 \text{ m}$ のレンズの焦点面に二次元アレー検出器を置き測定した。エキシマレーザのひろがり角を 0.2 mrad 程度まで小さいとしても、 $f = 10 \text{ m}$ のレンズを使用すれば $f\theta = 2 \text{ mm}$ 程度の径の像が得られる。二次元アレー検出器の1ピクセルの大きさは $40 \mu\text{m}$ なので焦点面の像を測定することができる。

Fig. 3 Configuration of the excimer laser used for the beam quality measurement. G, grating; BE, beam expander; A, aperture.

Fig. 4 Three-dimensional plots of far and near field patterns of a single pulse delivered from the excimer laser operated at a repetition rate of 250 Hz. The height corresponds to light intensity. The far field and near field patterns are taken simultaneously in the same frame using the optics shown in Fig. 2.

3. 実測例

上記の計測システムを用いて市販の注入同期型エキシマレーザのビーム質を測定した。

使用したレーザは、ラムダフィジク社 EMG 160 MSC 型である。Fig. 3 に示すような共振器構成をとっており、回折格子とビームエキスパンダーによる狭帯域化を行っている発振器の出力を不安定共振器型の増幅器に通して増幅している。通常の横放電励起自動予備電離型の放電部を二つに並べた構成で、スイッチング素子（サイラトロン）を共通の一つにすることによ

Fig. 5 Intensity profiles scanned across the beam of successive pulses of the excimer laser operated at a repetition rate of 250 Hz. The rectangle at the right-hand side corresponds to the whole beam pattern with a smaller scale. All the curves are taken along the arrow drawn across the rectangle.

り放電のタイミングの同期の問題を解決している。パルス繰り返しは最高で 250 Hz あり、KrF (248 nm) で約 60 W の出力が得られる。以後示す測定データはすべて KrF の発振を用いている。放電ガスは、F₂/Kr/He を使用した。ここでは特にガス寿命とビーム質の関係を明らかにするため、ガス充填後の放電回数をカウンターで計測した。

Fig. 4 に示したのは、このレーザーの近視野像と遠視野像を三次元表示したものである。縦横が二次元空間方向であり、高さが光強度である。

この像は 250 Hz で発振している最中のある一発をとり上げて表示したものである。不安定

共振器型の増幅器を使用しているので、近視野像には出力部分ミラーの陰となる穴があいている。長方形の長手方向が放電方向である。カメラの分解能は 256×256 であるが、この三次元表示では図形の煩雑さを避けるため 64 ラインしか表示していない。近視野像はレンズにより約 $1/3$ の大きさに縮小されてカメラの撮像面に結像されている。

Fig. 4 に示したのはある 1 パルスについての情報であるが、連続したパルスを次々に見てゆくと、レーザーパルス毎にその二次元強度分布がかなり変化していることがわかった。Fig. 5 は、近視野像の長方形の短軸方向の 1 つの直線上の強度分布を見たものである。この方向は放電方向に垂直であり、ガス流出方向と平行である。上の 4 つの強度分布はガス交換直後に連続する 4 つのレーザーパルスのパターンを見たものである。これからレーザー一発毎でパターンが変化していることがわかる。Fig. 5 の下の 2 つは、ガス充填後 10^6 発放電を行った後の同位置の強度分布である。 10^6 発後は、交換直後に較べてレーザーパルス強度が $1/2$ 程度に落ちているが、パターンの比較のため断面積が同じになるよう規格化してある。ガス交換直後と比較して全体的に強度分布が変化していることがわかる。ガスチャンバー内のガス循環装置のガス流出方向は、Fig. 5 の左から右方向であり、ガス劣化とともに上流側が強くなっている。

次に、レーザーパルスの全強度のばらつきを見たのが Fig. 6 である。すなわち二次元画像のすべてのピクセルを積分した値の変化を見たものである。レーザーは同じく 250 Hz で発振している。上の三つのグラフは連続する 131 個のパルスの強度変化を示したものであり、上からガス交換直後、 2×10^5 発後、 6×10^5 発後の時点での測定である。縦軸は平均値からのずれをパーセントで示している。ガス交換直後は、標準偏差 σ が 1.8 % であるが、ガスが劣化して 6×10^5 発後では σ が 2.2 % となり、一発ごとの強度のばらつきが大きくなることを示している。

Fig. 6 の下は、ばらつきを解析するため、上

Fig. 6 Upper three curves show the fluctuation of the total pulse energy of successive 131 pulses at various gas ages. The vertical scale indicates a deviation from the averaged value in percentage. Lower curves show fourier transformed power spectra of the upper curves.

の変化をフーリエ変換したものである。電源周波数などの特徴的なピークは見られなかった。

Fig. 7 に示したのは、レーザーパルスの空間的強度分布の重心を求め、連続する 131 発についてその重心の位置をトレースしたものである。

すなわち、レーザー一発一発について以下の計算を行った。

$$x = \frac{\int x \cdot I(x, y) dx \cdot dy}{\int I(x, y) dx \cdot dy}$$

$$y = \frac{\int y \cdot I(x, y) dx \cdot dy}{\int I(x, y) dx \cdot dy} \quad (2)$$

Fig. 7 Traces of the center of gravity for the successive 131 pulses at various gas ages. The square at the right hand side indicates the size of a unit pixel of a camera.

ここで、 x, y は座クセルの座標、 $I(x, y)$ はその点での強度、 x, y は重心座標である。

Fig. 7 の横方向が電極方向であり、左右に電極が位置している。このトレースを見てわかるように、重心の位置は上下に激しい動いている。これは、電極の間で放電の位置が絶えず変化していることに対応している。Fig. 7 の右に単位ピクセルを示した。このユニットピクセルの一边は、約 0.2 mrad に相当する。4 つのトレースはガス交換後の放電回数が異なっている。明らかにガス劣化とともにビームの方向性のゆらぎが大きくなっていることがわかる。

5. おわりに

エキシマレーザの実際の応用にあたって、そのビーム質が重要な要素となると考え、ビーム質を定量的にとらえるためのビーム計測装置を開発した。実際に市販のエキシマレーザビーム光を計測し、装置の性能を示すとともに、

エキシマレーザーのビーム質のもつ問題点の一端を明らかにした。今後、ビーム計測を系統的に行うことにより、エキシマレーザーのビーム質を的確にあらわすことのできるビーム因子を抽出し、定義してゆくことをめざしている。さらに、ビーム質計測を通じて、エキシマレーザーの改善すべき点を把握し、発振器の改良に貢献してゆきたいと考えている。

エキシマレーザーは種々の分野・用途への応用が考えられており、今後それぞれの用途に適したレーザービーム質が求められると思われるので、ビーム測定システムにより用途に適當かどうかを示すビーム評価因子を確立することが重要であり、それが個々の用途に専用化したエキシマレーザーを開発する一つの手段となっていくと考えている。

この装置の開発およびビーム計測は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技術の研究開発」の一環として行われた。

参考文献

- 1) 若田仁志, 小川周治, 久場一樹, 田中平明: レーザー研究 **13** (1985) 780.
- 2) G. Sepold, W. P. O. Juptner, J. Telepsky: in *High Power Lasers and Their Industrial Applications* (Proc. SPIE Vol. 650, SPIE, 1986) p. 167
- 3) R. Krammer, E. Beyer, G. Herziger and P. Loosen: in *Gas Flow and Chemical Lasers*, ed. S. Rosenwaks (Proc. Physics Vol. 15, Springer-Verlag, Berlin, 1986) p. 330.
- 4) J. G. Edwards: *Laser Focus/E-O Technol.* **23** (1987) No. 5, 76.
- 5) J. M. Fleischer and C. B. Hitz: *Lasers & Optronics* **6** (1987) No. 5, 61.
- 6) R. G. Caro and M. C. Gower: *Optics Letters* **6** (1981) 557.