炭酸ガスレーザー用高速プラズマ・シャッターの試作

佐々木 浩一*

(1996年1月22日受理)

Development of a Plasma Shutter for Fast Truncation of CO₂ Laser Beams

Koichi SASAKI*

(Received Jan. 22, 1996)

A plasma shutter having two ZnSe lenses has been developed with the intention of applying it to the generation of ultrashort pulses in the far-infrared and millimeter wavelength range. A fast truncation time of about 1.5 ns was obtained by the plasma shutter, which is approximately the same as the response time of the measurement system. It was found experimentally that truncation waveforms were dependent on both the detection location in the laser beam cross section and the N₂ gas pressure inside the shutter chamber. A physical explanation for the above experimental results is given briefly.

Key Words : Plasma shutter, Fast truncation, CO₂ laser, Optically-pumped far-infrared laser, Ultrashort pulse

1. まえがき

本論文では、光励起遠赤外レーザーと組み合わせることで、ミリ波・サブミリ波の波長域での極短パルス光の発生を行う、プラズマ・シャッターについて報告する。近年のレーザーの高性能化の進展は著しく、既に可視および紫外域においては、パルス幅が数 fs という極短パルスレーザー光が比較的小型の装置で得られようになっている¹⁾。これに対し、ミリ波・サブミリ波などの長波長領域における極短パル

ス発生の試みは極めて少ない。しかしながら、分子分光学やプラズマ理工学の分野ではミリ波・サブミリ波域の光源が重要な役割を果たしており、この波長域における極短パルスレーザー光が実現されれば、上記分野の研究に新しい展開が期待できる。

光励起遠赤外レーザーにより極短パルスレーザー光を得るには大別して二つの方法がある。一つは光励起に用いる CO₂ レーザーをモードロックにより短パルス化し、それにより遠赤外レーザーを励起する方法²⁾で、この方法により

*名古屋大学 工学部 電子工学科 (〒464-01 名古屋市 千種区 不老町)

* Electronics Department, Nagoya University (Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01)

Fig.1 Schematic of the plasma shutter.

得られるサブミリ波出力はパルス列となる。もう一つの方法は、単一モード化されたCO₂レーザー光をパルス途中で高速に遮断し、それにより遠赤外レーザーを光励起する方法³⁾で、この場合、CO₂レーザーパルスの立ち下りの時刻に呼応して、単発の短パルス・サブミリ波出力が得られる。このとき、CO₂レーザーパルスの遮断にプラズマ・シャッターが用いられる。後者の方法の場合、遮断パルスの立ち下りがシャープであるほど、遠赤外レーザー出力のパルス幅が短くなるものと考えられている⁴⁾。

本研究では、密閉容器と2枚のレンズとからなる簡単な構造のプラズマ・シャッターを試作し、プラズマ・シャッターにより遮断されたCO₂レーザーパルスが測定装置の時間応答限界に達する立ち下り時間(最高1.5ns未満)を持つことを確認した。また、遮断パルスの立ち下り部の波形が、ビーム断面での観測位置やシャッター内部の窒素ガス圧に依存することを見いだした。本研究で試作したのと同様のプラズマ・シャッターはKneubuehlらによってすでに開発され⁵⁾、短パルス発生実験に用いられているが^{3, 4)}、シャッター内のガス圧などの遮断特性への影響は本研究で得られた新しい知見である。

2. 試作プラズマ・シャッターの概要および実験方法

試作したプラズマ・シャッターの概要をFig.1

Fig.2 Picture of the plasma shutter.

に示す。プラズマ・シャッターは、主として、共焦点系をなす2枚のレンズからなり、レンズ系の焦点付近で発生する高密度プラズマによりレーザー光の高速遮断を行う装置である。本研究では、波長9.26 μ m(9R(22)発振線、周波数 3.2×10^{13} Hz)のCO₂レーザーを実験に用いたので、これを遮断するために必要なプラズマの電子密度は 1.3×10^{19} cm⁻³となる⁶⁾。プラズマが発生し始めてから電子密度が上の値に到達するまでの時間でシャッターの遮断速度が決まる。集光されたCO₂レーザー光の強度が十分大きければ、レーザー光自身の光電界によりプラズマが発生するが、密閉容器内を加圧するか、または、焦点付近に高圧のガスを吹き付けるなどして自発的放電を防ぎ、その上でトリガー電極に高電圧パルスを印加する事により放電を誘発して、他の機器とのタイミングをとったシャッター動作を引き起こすことも可能である。

Fig.1の装置では、角形ステンレス製の密閉容器の両側面に、容器の窓をかねたZnSe製の平凸レンズが2枚とりつけられている。また、レン

ズ系の焦点付近には、焦点での放電を誘発するためのトリガー電極対が挿入されている。容器内部は油回転ポンプにより一旦真空に荒引きされ、その後窒素ガスが封入される。2枚のレンズの直径および焦点距離はともに1.5インチで、容器内部の窒素ガスを10気圧程度まで加圧できるように、厚め(エッジ厚0.22インチ)のレンズを用いた。プラズマ・シャッターの出力側より平行ビームを取り出すためには、2枚のレンズの間隔の調整(精度0.1mm以内)およびそれぞれのレンズの角度の微調整を行うことが必要であるが、レンズで容器を封じる部分は、容器内部が真空または高気圧のいずれの場合であってもこれらの調整が可能のように工夫された構造となっている。また、プラズマ・シャッター全体はx-y-zおよび回転の4方向について可動なステージの上に設置されており、レーザービームに対する装置全体の位置決めが容易になっている。ステージ上に設置されたプラズマ・シャッターの外観をFig.2に示した。

本プラズマ・シャッターの遮断性能をテストするため、ハイブリッド型TEA CO₂レーザー⁷⁾を光源に用いた実験を行った。ハイブリッドCO₂レーザーのCW部は発振閾値未満の利得で運転され、このとき、TEA部からは単一縦モードまたは2本の縦モードが同時発振したパルス出力(横モードはTEM₀₀モードのみ)が得られる。レーザービームのスポット断面の形状はほぼ円形(約6mmφ)で、パルス出力のパワーは約600kWである。レンズの収差などを考慮すると、焦点でのビーム・スポットサイズは50μm程度と見積もられ、このときのビーム強度は約 $8 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ となる。この強度のCO₂レーザー光に対して、シャッター内の窒素ガス圧が0.4atm～4atmのとき、トリガー電極を使用しなくても焦点付近で自発的にプラズマが発生した。本論文では、上記自発的放電によるシャッター作用の結果について報告する。プラズマ・シャッターで得られる遮断パルスは、立ち下がり応答時間が1nsのフォトドラッグ検知器(浜松ホトニクスB749)により検出し、増幅器(遮断周波数500MHz)により増幅して、高速デジタルサイ(遮断周波数

500MHz, サンプル周波数1.35GHz)に記録した。

3. 実験結果および検討

Fig.3(a)にプラズマ・シャッターで得られた典型的な遮断パルス波形を示す。この例では、CO₂レーザーパルスのピーク付近でプラズマが発生し、その時刻で急峻な遮断が起こっている。Fig.3(b)はFig.3(a)の遮断部分の拡大図で、これは、周期742psでサンプリングされた離散データに対して標本化定理を用いた補間を施して得られた。遮断パルスの立ち下がり時間は約1.5nsである。一方、測定に用いた全装置の周波数応答およびサンプリング・補間に伴う波形の歪みを考慮すると、本実験で測定可能な最小の立ち下がり時間は約1.4nsであると見積もられる。したがって、Fig.3の波形は、測定限界に達する

Fig.3 Waveform of a CO₂ laser pulse truncated by the plasma shutter. Waveform (b) is the expanded view of waveform (a) around the truncation time.

立ち下がり時間を持つものと考えられる。Kneubuehlらは、Optical Free Induction Decayの実験結果から、本研究と同様なプラズマ・シャッターの遮断時間を10ps程度と評価している⁵⁾。彼らの装置ではスパーク・プラグによる外部トリガーが用いられているが、この場合、トリガー点とビーム焦点との位置関係を微調整することにより遮断時間が変化することが経験的に確かめられているので⁵⁾、本実験のプラズマ・シャッターについても、外部トリガー機構の最適化により、遮断時間を短縮できる可能性がある。ただし、現状のように遮断パルスを検知器(立ち下がり時間1ns)で直接観測する方法では、光パルスの立ち下がり時間が理想ステップであっても測定結果は立ち下がり時間1.4nsの波形に緩和するので、今後、本プラズマ・シャッターの細部を最適化するにあたっては、遮断パルスの検出方法の改善を含めた検討が必要である。

Fig.3の波形は、プラズマ・シャッターの出力レーザービームを集光し、その全体を検知器の受光面(直径1mm)に照射した場合に得られたものである。これに対し、出力ビームを集光しないで測定を行った場合、ビーム断面のどの位置に検知器の受光面が設定されているかによって、遮断部分の波形に違いがみられることに気付いた。そこで、受信位置により波形がどのように異なるかを明確にするために、コリメート側のレンズを取り外し、焦点を越えてビームが直径24mm程度に発散したところで、検知器をビーム断面の径方向に移動させて遮断パルスの観測を行った。Fig.4(a)はビーム中心で遮断パルスの観測を行った結果で、ある程度急峻なビーム強度の低下のあと、なだらかにテールを引く2重構造の立ち下がり波形となっている。したがって、この波形の立ち下がり時間は約70nsと非常に長い。また、一段目の立ち下がりも、Fig.3の例より緩やかである。検知器の受光面をビーム中心から遠ざげると、遮断部分の立ち下がりは一急激に急峻になった。検知器がビーム中心から2mm離れると立ち下がり時間は6nsとなり、6mm離れた場合には、Fig.4(b)に示すように、測定限界に達する立ち下がり時間が得られた。この

Fig.4 (a) Truncated waveform observed at the beam center. (b) Truncated waveform observed at a distance of 6 mm from the beam center.

現象は、焦点で発生するプラズマ中でレーザービームによるポンデロモティブ力が働き、プラズマをレーザービームの外側へ排除する効果と関係しているものと思われる。以前の研究によると、レーザービームのポンデロモティブ力による電子密度の変調度 $\delta n_e/n_e$ は、電子に働くポンデロモティブ力のポテンシャル・エネルギーを U_e 、プラズマの電子温度を T_e として

$$\frac{\delta n_e}{n_e} = K \frac{U_e}{T_e} \quad (1)$$

で評価される⁸⁾。比例定数 K の値は密度変調(波動)の種類(分散関係)によって異なるが、多くの場合1のオーダーの値を取ることが実験および理論・計算機シミュレーションにより確かめられている^{8, 9)}。本実験の条件で U_e の値を計算すると、プラズマの電子温度を1eVと仮定したとき、

Fig.5 Truncated waveforms with N_2 gas pressures of (a) 0.6atm and (b) 2.5 atm inside the shutter chamber. The fall time of the truncated waveform is shown in (c) as a function of the N_2 gas pressure.

$U_e/T_e=0.3$ となる。したがって、プラズマ・シャッターのビーム焦点では、レーザービームのポンデロモータティブ力により、ビーム中央部から外側に向かって相当量(数10%)のプラズマが掃き出され、ビーム中央での電子密度上昇は抑制され、周辺部では逆に中央部から掃き出されるプラズマにより密度上昇が急激になって、レー

ザービームの遮断も急峻に行われるものと考えられる。山田は、波長308nmのエキシマレーザー光を高気圧Arガス中に集光して絶縁破壊を発生させる実験において、焦点前方のプラズマ半径が焦点後方のプラズマ半径より小さいことを観測し、この結果を、ポンデロモータティブ力により密度変調(電子密度分布がホロー型となる)を受けたプラズマ中でのレーザー光の自己収縮のためであると解釈している¹⁰⁾。なお、ビーム中心での遮断波形の立ち下がりが比較的緩やかであるのにも関わらず、Fig.3のように、レーザー光を集光してビーム全体を受信した場合に測定限界に達する立ち下がり時間が得られたのは、前に述べたように、受信位置がビーム中心より僅かにずれると遮断波形が急速に急峻になることに加え、ビーム強度の半径方向分布がなだらかな(Fig.4(a)および(b)の強度比参照)であるため、ビーム全体に対する中心部の強度の寄与が比較的小さいためであると考えられる。

遮断特性は、シャッター内部の窒素ガス圧によっても変化した。Fig.5(a)は窒素ガス圧が0.6atmの場合、Fig.5(b)は2.5atmの場合の遮断パルスの立ち下がり部の様子を示している。これらの波形は、プラズマ・シャッターを通過したレーザー光を再集光し、ビーム全体を検知器に照射して測定した。ガス圧が0.6atmの場合には、立ち下がり時間約2nsでほぼ0レベルまで遮断されているのに対し、ガス圧が2.5atmの場合には、はじめに急峻なレーザー光レベルの低下(立ち下がり時間約2ns)が起こったあと、15ns程度の長さのテールが続いている。Fig.5(c)にシャッター内部の窒素ガス圧に対する遮断パルスの立ち下がり時間の変化を示した。ショットごとにややばらつきがあるものの、概ね、ガス圧が低いほど立ち下がり時間の短い遮断パルスが得られることがわかる。Fig.5(b)のような2段階で長時間を要する遮断波形は、極短パルス・サブミリ波の発生に対しては有害である。Martinらは、短パルス(1ns)の CO_2 レーザービームの照射により低気圧(0.2~4Torr)の窒素ガス中で発生するプラズマの密度変化を計算機シミュレーションによって調べており、電子密度が急激な増加(第1段階)

とそれより緩やかな増加(第2段階)の2段階の過程を経て定常値に達することを示している¹¹⁾。

Fig.5(b)のような2段階の遮断は、上に述べたような電子密度の時間変化によるものであると考えられるが、Martinらの条件と本研究の実験条件とはガス圧の領域やレーザー光のパルス幅が大幅に異なるので、それらの依存性を含めた詳細な定量的検討は今後の課題である。なお、Kneubuehlらも、大気圧未満のガス圧でプラズマ・シャッターを使用している⁵⁾。

4. 結 言

本論文では、ミリ波・サブミリ波域極短パルス発生実験に用いる炭酸ガスレーザー用のプラズマ・シャッターについて報告した。プラズマの発生には、集光されたレーザー光自身による自発的放電を用いたが、遮断パルスの立ち下がり時間は測定装置の時間応答限界に達した。また、遮断部分の波形がビーム断面の観測位置やシャッター内の窒素ガス圧によって異なることを示し、若干の検討を加えた。

最後に、本研究に協力してくれた卒業生の菊池秀幸君(現在ヤマハ発動機)に謝意を表す。本研究は、文部省科学研究費補助金・奨励研究(A)および(財)石田財団の援助により行われた。

参 考 文 献

- 1) 小林：物理学最前線 30 (大槻 編，共立出版)

- p.99 (1992).
- 2) W. Schatz, M. A. Heusinger, R. S. Nebosis, K. F. Renk, and P. T. Lang : *Infrared Phys.* 34(1993) 339.
- 3) D. P. Scherrer, A. W. Kaelin, R. Kesselring, and F. K. Kneubuehl : *Opt. Comm.* 87(1992) 249.
- 4) D. P. Scherrer and F. K. Kneubuehl : *Infrared Phys.* 34(1993) 227.
- 5) A. W. Kaelin, R. Kesselring, Cao Hongru, and F. K. Kneubuehl : *Infrared Phys.* 33 (1993) 73.
- 6) 例えば, F.F.Chen: "*Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*", Plenum Press, p.114 (1984).
- 7) K. Sasaki, H. Ohno, T. Fujii, and T. Tsukishima : *Jpn. J. Appl. Phys.* 29 (1990) L2226.
- 8) 佐々木, 高橋, 永津, 築島: プラズマ・核融合学会誌 69 (1993) 822.
- 9) K. Sasaki, T. Fujii, K. Takahashi, M. Nagatsu, and T. Tsukishima : *Phys. Fluids B: Plasma Phys* 5 (1993) 1154.
- 10) 山田: プラズマ・核融合学会 第11回年会予稿集 p.59 (1994).
- 11) F. Martin, P. Brodeur, J. P. Matte, H. Pepin, and N. Ebrahim : *IEEE Trans. Plasma Sci.* PS-15 (1987) 167.