レーザトリガスパークギャップ (LTSG) と ポッケルセルによるレーザパルスの整形について

吉田 国雄* (阪大工学部)
山中 竜彦*,** (阪大工学部, 名大プラズマ研)
佐々木 孝友* (阪大工学部)
島村 和典* (阪大工学部)
山中 千代衛*,** (阪大工学部, 名大プラズマ研)

(昭和47年1月17日受理)

Abstract

The properties of laser triggered spark gap (LTSG) and the new technique of laser pulse forming by two LTSG were investigated. The risetime and jitter of LTSG were less than 1 ns and 1.5 ns, respectively. The threshold laser power of the operation was 5 kW (35 ns).

Variable laser pulsewidth from 1 to 30 ns were obtained by controlling the gas pressure of LTSG and/or the electrode spacing. The risetime of laser pulse obtained by this method was 1.5 ns.

1 ま え が き

レーザ技術の進歩によりレーザはプラズマ研究の分野においても盛んに用いられるようになってきた。特に、ガラスレーザは瞬時に大量のエネルギーを放出する能力を持っているので、核融

Investigation of Laser Pulse Forming by LTSG and Pockels Cell

Kunio YOSHIDA,* Tatshuhiko YAMANAKA,*,** Takatomo SASAKI.*
Kazunori SHIMAMURA* and Chiyoe YAMANAKA*,**

*Department of Electrical Engineering, Osaka University, Suita,
Osaka

**Institute of Plasma Physics, Nagoya University, Nagoya

合プラズマ研究^{(1)～(4)}の分野において新生面を開きつゝある。生成プラズマの熱拡散を上まわる急速なエネルギー注入⁽⁵⁾により核融合プラズマを発生させるには、立上り時間1 ns前後の高輝度大出力レーザが要求される。したがって、発振部においては急峻な立上りで、パルス幅可変なレーザ光を必要とする。このように整形されたパルスを増幅段に送付し、大出力を得る。

本論文では、電気光学シャッタを制御するLTSG (Laser Triggered Spark Gap) の動作特性を調べたので、主にパルス電圧の立上り時間を問題とした実験結果について報告する。さらにボツケルセルおよびクランプリズムの組合せから成るPTM (Pulse Transmission Mode) 法^{(6)～(10)}によるパルス幅可変なレーザ光の発生法に関し、開発した知見を明らかにする。

2 Laser Triggered Spark Gap (LTSG)

レーザトリカによるスパークギャップは

- (1) トリガ部と高いギャップ電圧との間に電気的なカップリングがないので安全であり、動作も安定している、
 - (2) 放電時間遅れが短かく、ジッタも小さい、
 - (3) 構造が簡単である、
 - (4) レーザ放射に正確に同期した高電圧パルスを発生できる、
- などの特長があり、種々の方面への応用が考えられる。

LTSGには大電力スイッチ用、^{(11)～(13)}および電気光学シャッタや高速度カメラ⁽¹⁴⁾のスイッチに使用される小容量のもの^{(15)～(17)}にわけられる。前者については、その動作特性と放電機構に関して色々な報告がある。小容量のLTSGでは、放電時間遅れを広範囲に調整でき、しかも1 ns前後の非常に急峻な立上りの高電圧パルスが要求されるが、立上り時間を問題とした報告は殆んどない。

ここでは、主に立上り時間を問題とした小容量LTSGの動作特性についての実験結果を報告する。

2・1 LTSGの構造

LTSGには第1図に示すような真空ギャップと誘電体カスを封入した加圧ギャップがある。前者は後者と比較して小形化できるという利点はあるが、高電圧化、寿命の点で不利であり、さらに電極間隙を変えることが困難である、等の欠点を有する。

LTSG とボツケルセルによるレーザパルスの整形について

第1図 真空レーザ トリガ ギャップ

第2図 加圧レーザ トリガ ギャップの構造

第2図に、本実験で使用した N_2 ガス封入の加圧LTSGを示す。LTSGは同軸構造で、焦点距離3 cmのレンズは負の電極上に集光するように可動であり、電極間距離も調節できる。また、のぞき窓2ヶ所と誘電体ガスの出入口がある。両方の電極はステンレス・スチールで、電極面をかなり良く磨いて使用した。レーザビームをアース電位電極内の直径2 mmの穴を通して負

電極上に集光し，LTSGをトリガした。使用したQスイッチ・ガラスレーザの特性は最大出力20MW，パルス幅35ns，ビーム発散角 $\approx 1.5\text{ mrad}$ であった。

2・2 実験方法

第3図(a)にLTSGの放電時間遅れを測定するための，実験装置を示す。放電時間遅れは，照射レーザ光とスイッチされた電圧を同一のブラウン管上で加え合せて測定する方法がよく用いられている。筆者等は電気光学シャッタを動作させ，次に述べるPTM法を適用することによって簡単に測定できた。

(a)

(b)

第3図 (a) ギャップの放電時間遅れ t_d の測定装置図

LTSG: レーザ トリガ ギャップ; GP₁, GP₂: グラン偏光子;
L₁, L₂, L₃: 同軸ケーブル; PC: ポッケルセル; ND₁, ND₂:
フィルタ; BS: ビームスプリッタ; BP: バイブラナホトダイオード
(b) ビームスプリッタ BSからの信号

L T S G とポツケルセルによるレーザパルスの整形について

同軸ケーブル L_1 は高電圧電源によってコロナを防止するために絶縁油に浸した $200\text{ M}\Omega$ の高抵抗を通して、 $2V_{\lambda/2}$ に充電されている。ここに、 $V_{\lambda/2}$ はレーザ光を $\lambda/2$ 回転するに必要な電圧である。回転プリズム Q スイッチによって得られたジャイアントパルス光は、交叉して配置されたグラプリズム GP_1 、 GP_2 を通して、焦点距離 3 cm のレンズにより負電極上に集光される。L T S Gは適当な放電時間遅れ t_d のち絶縁破壊し、通過する。通電状態になると、時間 l_2/v 経過して時間 $2l_3/v$ (同軸ケーブル L_3 は終端短絡である。)だけ $V_{\lambda/2}$ 電圧がポツケルセルに印加されるので、第3図(b)のような波形が得られる。ただし、同軸ケーブル L_1 、 L_2 、 L_3 はR G—8/U(特性インピーダンス 52Ω)で、それぞれの長さは l_1 、 l_2 、 l_3 であり、 v はケーブルを電圧が伝搬する速度である。放電時間遅れは、第3図(b)から $t_d' = t_d' - l_2/v$ として計算した。ここに t_d' は、レーザ光の立上りの10%から、L T S Gのスイッチによりポツケルセルに $V_{\lambda/2}$ 電圧が印加されるまでの時間である。

レーザパワの値は、ビームスプリッタBSからの光の振幅をバイプラナーホトダイオードHTV R—317(立上り時間 $<1\text{ ns}$)とTektronix 519 オシロスコープ(立上り時間 280 ps)で観測し、カロリメータで較正して得た。L T S Gへの照射レーザパワは、減衰度が $1.06\mu\text{m}$ の光に対して既知のフィルタND₁で調整した。

L T S Gのスイッチ電圧の立上り時間は、L T S Gを 52Ω の抵抗で整合し、その電圧を減衰器を通してTektronix 519 オシロスコープで観測した。

2・3 実験結果および考察

第4図に誘電体ガスとして、 A_r および N_2 ガスを封入したL T S Gの自爆電圧 V_s と封入ガス圧力 p との関係を示す。ここに、電極間距離 d は 0.6 mm である。図から明らかなように、 A_r カスは N_2 ガスに比べて自爆電圧が非常に低く、高電圧用としては不適當である。しかし、 A_r と N_2 との混合ガスを封入したL T S Gでは高電圧に対しても良好な動作特性を示す。本実験では、市販の N_2 カスを使用した。

第5図に、放電時間遅れ t_d とL T S G電圧の自爆電圧に対する割合 V/V_s の関係を示す。ここに、L T S Gの圧力 10.9 kg/cm^2 、電極間距離 0.6 mm 、レーザパワ 1.2 MW である。この図から、 t_d は V/V_s が減少すると指数関数的に増加することが分る。

第4図 N_2 および Ar ガスでの自爆電圧とギャップ圧力との関係

第5図 放電時間遅れ t_d と自爆電圧比 V/V_s との関係

LTSG とポツケルセルによるレーザパルスの整形について

第6図 異なったレーザパワーに対する放電時間遅れと電極間隙との関係

次に、レーザパワー P_L をパラメータとして t_d と電極間距離 d の関係を第6図に示す。LTSG トリガ用レーザパワーが小さい ($P_L = 1.2 \text{ MW}$) と、 t_d は d を大きくするにつれ $\sim 170 \text{ ns/mm}$ の割合で増加し、レーザパワーが大きい ($P_L = 6.5 \text{ MW}$) と $\sim 30 \text{ ns/mm}$ の割合でゆっくりと増している。このことから、 d を変えて t_d を一定としたい場合は P_L を制御すれば良いということが分る。

第7図 レーザ パワ変化に対する放電時間遅れと立上り時間との関係

第7図は、 P_L に対する t_d および LTS G 電圧の立上り時間 t_r の関係を示す。図から、 P_L と t_d は $P_L = P_{LO} 10^{-at_d}$ という関係式で示される。ここに、 P_{LO} は $t_d = 0$ における P_L の値であり、 a は定数である。本実験では、 $P_{LO} = 1.7 \text{ MW}$ 、 $a = 0.068 \text{ ns}^{-1}$ となった。また、放電時間遅れのジッタは 1.5 ns 以下と非常に小さい値であった。 t_r は P_L が減少すると少しずつ増したが、LTS G トリガ用レーザーパワの閾値 P_{LC} 付近でも 1 ns 以下であり、 P_{LC} は 5 kW 以下であった。 $P_L = 6.5 \text{ MW}$ とした場合の d と t_r の関係を第8図に示す。

第8図 立上り時間と電極間隙との関係

$d < 3 \text{ mm}$ では $t_r < 1 \text{ ns}$ であるが、 $d > 3 \text{ mm}$ では t_r は急に増加している。これは LTS G のスイッチングインダクタンス L_s の増加によるもので、 $t_r = L_s / Z_0$ から、 $t_r = 0.5 \text{ ns}$ で $L_s = 26 \text{ nH}$ という値になる。ただし、 $Z_0 = 52 \Omega$ である。

第9図 LTS G のスイッチによるパルス電圧波形

- (a) $\ell_1 = 40 \text{ cm}$, 水平軸 2 ns/div
- (b) $\ell_1 = 1 \text{ m}$, 水平軸 5 ns/div

L T S G とポツケルセルによるレーザパルスの整形について

第9図(a), (b)に $l_1 = 40\text{ cm}$ と 1 m の長さに対するL T S Gスイッチ電圧波形の一例を示す。図から明らかなように、リップル、リングングともに非常に小さく、立上り時間 0.5 ns の極めて良好な波形が得られた。

第10図 レーザ集光および自爆による電極損傷

レーザ照射によるL T S G電極の損傷の写真を第10図に示す。左図の電極はアース電位の電極，右図は負電位の集光電極である。大きな損傷の跡は約300回のレーザ集光の結果生じたもので，自爆により電極全体がかなり汚くなった。このような状態では，L T S Gをトリガするに要するレーザパワの閾値は約1桁増したが，スイッチ電圧の立上り時間には影響がなかった。また，電極面をきれいに磨くことによって，最初の動作状態に戻すことができた。

電極材料としてアルミニウムを使用した場合は，ステンレススチールに比べ加工が容易であるという利点がある。しかし，レーザ集光による損傷が大きく，約200回のレーザ照射により，トリガに要するレーザパワの閾値は，最初の状態より二桁程上昇した。

3. パルス幅可変なレーザ光の発生

立上りが速く，パルス幅可変なレーザ光は核融合プラズマの研究，高速現象の診断^{(18),(19)}および非線形光学等の分野で非常に重要である。このようなパルスが発生する方法として第11図に示すように，変調素子をレーザ共振器内に設置する方式^{(20),(21)}と外部に設置する方式(第3図(a)参照)がある。外部式の動作についてはすでに述べたので，内部式について説明する。

第11図 内部変調式によるレーザパルスの整形

回転プリズムQスイッチによりレーザが発振すると、紙面に平行な偏光を持つレーザパルスが成長する。適当な強度になった時点でLTSGが点火し、ボツケルセルに $\lambda/4$ のステップ電圧がかかる。この結果共振器内に存在するレーザ光は、ボツケルセルを往復することにより、その偏光面が $\lambda/2$ だけ回転させられ、グラプリズムを通じて出ていく。この方法は外部変調方式と比較してLTSGにかかる電圧が低いので便利であるが、實際上偏光子等に破壊を生じやすく、一様な発振パターンを得難い欠点がある。またモードロックパルスを対象にすると、パルス幅制御ができず、増幅段を付加した場合にはグラプリズムの分散により、光軸調整が困難であるなどの問題がある。

第12図 KDPボツケルセルの概略図

LTSG とポツケルセルによるレーザパルスの整形について

第13図 電圧印加によるポツケルセルの透過率の場所的变化

第12図に筆者らの使用したポツケルセルの概略図を示す。KDPは $15 \times 15 \times 10 \text{ mm}^3$ で、温度による複屈折変化と共に電気光学効果を2倍にするために、3枚の平行平板電極の間に2枚のKDPを継続接続し、中央電極に高電圧を印加した。結晶のz軸は電極面に垂直であり、レーザ光は直径10mmの穴を通過してz軸方向に伝搬する。また図から明らかなように、光の通過する穴の中央と端では電界強度が異なる。ポツケルセルを通過するレーザ光束 I_t は変調電圧比 $V/V_{\lambda/2}$ の関数として、 $I_t = I_i \sin^2(\pi V / 2 V_{\lambda/2})$ で示される。ここで、 I_i は入射レーザ光束である。第13図に、ポツケルセルに印加される電圧をパラメータとして、ポツケルセルの中央からの距離(第12図参照)xと I_t / I_i の関係を示す。この結果から、端の方では $V_{\lambda/2} \simeq 14.5 \text{ kV}$ であることが分る。また計算によると、穴の中央と端での電界強度の比は約80%となった。

外部変調方式では、ポツケルセルに $V_{\lambda/2}$ 電圧を印加するには、 $2 V_{\lambda/2}$ のLTSG電圧が必要である。ポツケルセルにパルス幅可変な電圧を印加する方法としては、次のような二つの方法が考えられる。

- (1) 短絡した遅延線で終端する。
- (2) 整合抵抗で終端する。

(1)では $2 l_3 / v$ 、(2)では $2 l_1 / v$ (第3図(a)参照)の時間に等しいパルス幅のレーザ光が得られる。(1)に比べ(2)の方法は同軸ケーブルを取り換えるのに難点があり、(1)が実用的である。

(1), (2)の方法は前述のように, ポツケルセルを通過するレーザ光の偏光面を $\lambda/2$ 回転させるには, LTS G充電用ケーブル L_1 の電圧は約30 kVになった。このような高電圧は取り扱いが難しい。筆者らの考案によるLTS Gを2個使用した第14図の方式⁽²²⁾では, この電圧は半分の15 kVですむ。第14図の動作は次のようになる。

第14図 2個のLTS Gを使ったレーザ パルス整形の構成図

- (a) LTS G前のQスイッチレーザ
パルス, 水平軸 20 ns/div
- (b) 整形レーザパルス, パルス幅 2 ns,
水平軸 5 ns/div
- (c) 整形レーザ パルス, パルス幅 10 ns,
水平軸 5 ns/div

第15図 レーザ 波形

L T S G とポツケルセルによるレーザパルスの整形について

L T S G₁ 充電用ケーブルL₁は $V_{\lambda/2}$ に充電されている。レーザ光のL T S G₁ 負電極への集光によりL T S G₁ が導通すると、 $V_{\lambda/2}$ 電圧がケーブルL₂ , L₃ を伝搬する。L₃ 終端にはポツケルセルへの印加電圧時間を制御するL T S G₂ (アース電位電極には、BSからのレーザ光がL T S G₁ と同時に集光されている) を接続している。したがって、L T S G₂ が導通するまで $V_{\lambda/2}$ 電圧がポツケルセルに印加される。整形されたパルス幅は、L T S G₁ に対するL T S G₂ の時間遅れの差によって決まる。この方式で得られた整形パルスの立上り時間はL₃ の長さl₃ に依存するので、l₃ をできるだけ短くする必要がある。

第15図に外部変調PTM法によって得られた立上りの速いレーザ光の一例を示す。第15図(a)はL T S G前のQスイッチレーザ光、第15図(b), (c) はそれぞれパルス幅2 ns , 10 ns のレーザパルスである。

第16図 各部波形，水平軸 2 ns/div

第16図(a)はL T S Gでスイッチされた電圧，第16図(b), (c) はポツケルセルに印加されたパルス電圧および整形レーザパルスを示す。図から(a), (b), (c) の立上りは0.5 ns , 1 ns ($Z_0 = 52 \Omega$, KDPの容量=20 pF) , および1.7 ns となった。整形レーザパルスの立上りは、ポツケルセルにかかる電界の場所的不均一性により大きく影響を受けることが分かった。

第17図 絶縁オイル入りボッケルセルの断面図

本実験に使用したボツケルセルは、KDPを2ヶ継続に接続した。このKDPはQスイッチレーザー光による表面破壊や空気中での潮解性の問題がある。これらを防止するために、筆者らは第17図に示すようなオイル入りのボツケルセルを開発した。オイルとしては、KDPの屈折率に近い値をもつこと、波長 $1.06\mu\text{m}$ での吸収がないものとして粘性の低いシリコンオイルを使用した。電界の場所的不均一性を少なくするように、レーザー光の通過する穴を $5\text{mm}\phi$ とした。外部変調にこのボツケルセルを適用した結果、セルを通過する光を $\lambda/2$ 回転させるに要する電圧 $V_{\lambda/2}$ は $10\text{mm}\phi$ と比べ約70%に減少した。

水素を重水素で置換した $\text{KD}^*\text{P}^{(23)}$ を使ったボツケルセルをKDPのものと比較すると、 $V_{\lambda/2}$ は約半分になる、波長 $1.06\mu\text{m}$ での吸収が少なく、レーザー光による破壊の閾値が高い等の特徴がある。 KD^*P を使ったボツケルセル(光の通過する穴の直径 5mm)では、 $V_{\lambda/2}=4.5\text{kV}$ とかなり低い値となった。しかし、 KD^*P はKDPに比べ、容量が約2倍であるから、印加されるパルス電圧の立上りも2倍になる。この対策としてはケーブルの特性インピーダンスを減らすことにより立上りの速いパルス電圧を得ることができた。

4 む す び

筆者らは nsec のレーザーパルスが発生するのにLTS Gとボツケルセルを用い、レーザー発振パルスを整形するための技術を確認した。この結果、立上り 1.5ns 、パルス幅 $1\sim 30\text{ns}$ のレー

LTSG とポツゲルセルによるレーザパルスの整形について

ザパルスが容易かつ確実に発生できるようになった。

大出力ガラスレーザ増幅器に関しては別に報告するが、これらの研究により出力20GW、パルス幅2nsのガラスレーザが完成した。

参 考 文 献

- (1) N. G. Basov, S. D. Zakharov, P. G. Kriukov, Yu. V. Senatskii and S. V. Chekalin: IEEE J. Quantum Electron. QE-4, 864 (1968)
- (2) G. W. Gobeli, J. C. Bushnell, P. S. Peercy and E. D. Jones: Phys. Rev. 188, 300 (1969)
- (3) F. Flóux, D. Cognard, L-G. Denoeud, G. Piar, D. Parisot, J. L. Bobin, F. Delobbeau and C. Fauquignon: Phys. Rev. A 1, 821 (1970)
- (4) C. Yamanaka, T. Yamanaka, T. Sasaki, H. Kang, K. Yoshida and M. Waki: 2nd Workshop on Laser Interaction and Related Plasma Phenomena (1971-8) Hartford, USA
- 電学誌投稿中
- (5) 山中: 応物誌 39, 986 (昭45-10), 電子科学(昭45-9)
- (6) A. W. Penney, Jr. and H. A. Heynau: Appl. Phys. Letters 2 257 (1966)
- (7) N. G. Basov, P. G. Kriukov, V. S. Letokhov and Yu. V. Senatskii: IEEE J. Quantum Electron. QE-4, 606 (1968)
- (8) G. I. Kachen and J. O. Kysilka: IEEE J. Quantum Electron. QE-6, 84 (1970)
- (9) A. J. Alcock and M. C. Richardson: Opt. Commun. 2, 65 (1970)
- (10) D. von der Linde, O. Bernecker and A. Laubereau: Opt. Commun. 2, 215 (1970)
- (11) A. H. Guenther and J. R. Bettis: IEEE J. Quantum Electron. QE-3, 581 (1967)
- (12) F. Deutsch: Brit. J. Appl. Phys. 1, 1711 (1968)
- (13) J. R. Bettis and A. H. Guenther: IEEE J. Quantum Electron. QE-6, 483 (1970)

- (14) I. D. Chalmers and H. Duffy: J. Phys. D: Appl. Phys. 4, 1302 (1971)
- (15) L. L. Steinmetz: Rev. Sci. Instrum. 39, 904 (1968)
- (16) D. J. Bradley, J. F. Higgins, M. H. Key and S. Majumdar: Opto-Electronics 1, 62 (1969)
- (17) A. J. Alcock, M. C. Richardson and K. Eeopold: Rev. Sci. Instrum. 41, 1028 (1970)
- (18) A. J. Alcock, C. DeMichelis and K. Hamal: Appl. Phys. Letters 12, 148 (1968)
- (19) M. H. Key, D. A. Preston and T. P. Donaldson: Intern. Conf. on Quantum Electron. 2-7, 20 (1970) Kyoto
- (20) J. Ernest, M. Michon and J. Debrrie: Phys. Letters 22, 147 (1966)
- (21) C. Yamanaka, T. Sasaki, T. Yamanaka, K. Yoshida, K. Ueda and Y. Nakamura: Intern. Conf. on Quantum Electron. 20-3, 404 (1970) Kyoto
- (22) K. Yoshida, T. Sadaki, M. Waki, T. Yamanaka, H. Kang and C. Yamanaka: Japan. J. Appl. Phys. 10 1643 (1971)
- (23) W. R. Hook and R. P. Hilberg: Appl. Optics 10, 1179 (1971)