高効率固体化パルス電源を用いたTEA CO₂レーザ発振

正員	佐久川貴志	(明電舎)	非会員	家田 正彦	(明電舎)
正員	高田 昇	(明電舎)	正員	山田 真一	(明電舎)
正員	北寄崎 薫	(明電舎)	非会員	羽場 方紀	(北斗電工)

**TEA CO₂ laser oscillation using an all solid-state pulsed power generator
with a high energy transfer efficiency**

Takashi Sakugawa, Member, Masahiko Ieda, Non-member, Noboru Takada, Member
Shinich Yamada, member, Kaoru Kitakizaki, Member (Meidensha Corporation)
Masanori Haba, Non-member (Hokuto Denko Corporation)

We have studied and developed a high efficiency and a high repetition rate transversely excited atmospheric pressure CO₂ laser by an all solid-state pulsed power generator. The pulsed power generator consists of a high speed turn-on static induction thyristor and a single-stage magnetic pulse compression circuit using a saturable transformer. The static induction thyristor was improved in the switching speed and a switching loss. The saturable transformer with a Fe-based nano-crystalline magnetic core has two functions of voltage gain and pulse compression. The maximum switching voltage was 4.1 kV. The output voltage was 34.5 kV. On the other hand, the laser head is consisted of uniform field main discharge electrodes and corona preionized electrodes. Maximum laser energy of 3.2 J was obtained. The energy transfer efficiency of the pulsed power generator was 93% and the laser efficiency of 13.8% was obtained. An overall laser efficiency of 12.9% was obtained. The high speed static induction thyristor and the simple magnetic pulse compression circuit realized the high energy transfer efficiency and the high laser efficiency.

キーワード：TEA CO₂レーザ，固体化パルス電源，磁気パルス圧縮回路，SIサイリスタ，可飽和トランス

Keywords : TEA CO₂ laser, All solid-state pulsed power generator, Magnetic pulse compression circuit, SI thyristor, Saturable transformer.

1. まえがき

近年，携帯電話やパーソナルコンピュータ，ビデオカメラ等の携帯電子機器の小型軽量・高機能化の進展に伴って，プリント配線基板の高密度化が進んでいる。このプリント配線基板の穴あけ加工には熱影響が少なく微細加工が可能な短パルス高ピークパワーCO₂レーザが有効として使用されている^{(1)・(2)}。CO₂レーザの中で最も高ピークパワーが得易いのは大気圧横方向励起(TEA: Transversely Excited Atmospheric)CO₂レーザ⁽³⁾であるが，このレーザが産業用として用いられている例としては，レーザマーカに用いられたケースはあるものの意外に少ない。

TEA CO₂レーザの励起には立ち上がりの速い高電圧・大電流のパルス電源が必要である。このようなパルスパワーを発生させる電源回路にはギャップスイッチやサイラ

トロン等の放電スイッチを用いることが多く，長寿命・安定性に問題を抱えていた。類似のパルス電源を必要とするレーザとして銅蒸気レーザやエキシマレーザがある。銅蒸気レーザはレーザウラン濃縮用色素レーザの励起光源として，その高繰り返しによる大出力化，安定動作のために半導体スイッチを用いた固体化電源の研究^{(4)・(5)}が盛んに行われた時期がある。エキシマレーザは短波長半導体リソグラフィ用の光源としての期待から銅蒸気レーザと同様に励起回路には長寿命，信頼性のある固体化電源の研究開発が早くから行われ⁽⁶⁾，今や露光光源用エキシマレーザには必須の技術^{(7)・(8)}となっている。これらのレーザ用固体化パルス電源は繰り返し周波数は高いもののパルスエネルギーが数Jと比較的小さなものがほとんどであった。一方，固体化電源を搭載した大出力TEA CO₂レーザが理化学研究所などから報告されたが分子レーザ法ウラン濃

縮への利用⁽⁹⁾が中心であり、産業用途としての報告はほとんど無い。ポリイミド等の電子絶縁材料への100 μ m程度の微細穴開け用途として、高効率で高ピークパワーの特長を活かしたパルス当たり数10 Jクラスの固体化パルス電源を搭載し、レーザパルスエネルギーとしては数JのTEA CO₂レーザの存在は意義があると思われる。我々はJ級のレーザパルスエネルギーで数100 ppsの繰り返し動作が可能なTEA CO₂レーザ装置の研究開発を行っている。これまで高速パルス通電用のGTOサイリスタ(GTO)を固体化電源に適用してきたが、電源の出力パルスエネルギーは10 J以下のものであった。今回、大容量高速半導体スイッチである静電誘導サイリスタ(SIThy: Static Induction Thyristor)を固体化電源に用いて、簡素化した回路方式でTEA CO₂レーザを駆動した。SIThyの搭載により固体化電源の高出力パルスエネルギー化と高効率化を実現し、併せて高効率レーザ発振が確認できたのでこの内容を報告する。

2. 高速半導体スイッチ素子

今回用いたSIThyは、これまで開発を行ってきた4500V-1000A級の素子⁽¹⁰⁾を高速パルス通電に用いるために以下の設計変更を行ったものである。

① nバッファ濃度の低減

② 傾斜電子線照射によるライフタイム制御

図1に素子のペレット、図2にセグメント部の断面模式図を示す。ペレットの直径は70mmでセグメントは約3000本である。ペレットの端部には、幅2mm程度のフィールド・リミッティング・リングとフィールド・プレート进行している。セグメントは、複数の単位SIThyで構成されている。SIThyは表面ゲート構造を採用し、ノーマリーオフ特性を得るためにnエミッタ直下にp⁻ベース層を形成し、pゲートでゲート電極と接続している。

高速パルス通電用の素子特性として、接合温度125℃時の順阻止特性を図3に、オン電圧特性を図4に示す。図3より4500Vの耐圧が確認され、大口径のプレーナ接合における高耐圧化が実現されている。この時の漏れ電流は28mA程度と比較的低い値である。また図4よりアノード電流1000A時のアノード電圧も1.2V以下で低い値となっており、ターンオン重視の特性となっている。

従来、スイッチング素子の直列・並列数を減らした固体化電源にはGTOが用いられることが多い。高速パルス通電用のGTOとのスイッチング特性の比較を行うために図5に示すスイッチ素子の評価回路を用いて今回試作したSIThyのスイッチング特性を調べた。評価回路は実際のレーザ励起電源で用いる磁気アシストを考慮して可飽和インダクタ(SI)を設置している。またSIThyのゲート電流はGTOほど必要としないためゲート電流の条件はGTOがピーク値で130Aのゲート回路を用いているのに対し、SIThyはピーク値50Aのゲート回路を用いた。

その他の条件は同一にした。直流電源によりキャパシタ(C)を3800Vの電圧で充電し、GTOとSIThyの各素子をターンオンした時の電流電圧波形の測定結果を図6に示す。測定波形はゲート電流(I_g)、アノード電流(I_a)、アノード電圧(V_a)である。このときのI_aのピーク値は約7300A、パルス幅は3.4 μ s、電流上昇率(di/dt)は約6300(A/ μ s)であった。

V_aの波形を比較するとSIThyの方が電圧降下が早く、アシスト時間経過後にI_aが素子を通るときに現れる山状の電圧波形が小さい。V_aとI_aのパルス通電波形を比較するとGTOよりSIThyの方がより理想的なスイッチング波形に近い。I_aとV_aの電流電圧波形より瞬時電力を求め、これをI_gが流れ始めてからI_aが流れ終わるまでの間について時間積分し、スイッチング損失として求めた結果、以下ようになった。

GTO : 3.3(J/pulse)

SIThy : 1.3(J/pulse)

SIThyのスイッチング損失はGTOの約39%であり、非常に低損失で、パルス通電用スイッチング素子として有効であることが数値的に証明された。

レーザ電源の場合、エネルギー転送後の遮断電流はほとんど無いが繰り返し動作に必要なターンオフ能力はある程度必要である。今回試作したSIThyではオフゲート電流を流して後、50 μ sのオフ期間をおいてCが再充電されるのを確認している。

図1 SIThy素子の構造(ペレット)

Fig. 1. Structure of SIThy (Pellet)

図2 SIThyのセグメント部断面模式図

Fig. 2. Schematic cross-section of the segment

図3 S I T h y の順阻止特性

Fig. 3. Typical forward blocking V-I characteristics

図4 S I T h y のオン電圧特性

Fig. 4. On-state characteristics of SITHy

図5 スイッチング素子の試験回路

Fig. 5. Turn-on test circuit for switching device

(a) GTO

(b) SITHy

図6 各素子のスイッチング波形

Fig. 6. Switching waveforms of each device

3. レーザ励起電源

〈3・1〉回路構成 これまで、レーザパルスエネルギーがJ級の固体化電源の構成においては、多数の半導体スイッチング素子を用いているか、多段の磁気パルス圧縮回路を用いていた^{(9)・(11)・(12)}。また高速GTO素子1個と1段磁気パルス圧縮回路を用いてリソグラフィ用エキシマレーザの励起回路を構成した例⁽¹³⁾もあるが電源の出力パルスエネルギーは10J以下と小さなものである。J級のレーザ出力パルスエネルギーが得られ、かつ簡素な回路構成で高効率の電源とするためには、以下の要件を満たす必要がある。

- ①スイッチング素子が高耐圧・大容量であること
- ②高速スイッチングができること
- ③低損失であること

前章で述べたS I T h yは4500Vの順阻止電圧とパルス通電用GTOの39%の低損失が確認されており、①と③の要件を満たしている。これまでのパルス通電用GTOと比較すると、S I T h yの高速性は認められるものの、レーザを直接高速励起するには、②の条件に対してはS I T h yだけでは対応できず、磁気パルス圧縮回路(MPC)が必要となる。しかし、ある程度の di/dt 耐量があるためMPCは最少の1段で構成できる。回路方式としてはエキシマレーザで実績のある可飽和トランスによる1段磁気パルス圧縮回路⁽¹⁴⁾とした。図7にレーザ励起回路の概略を示す。

固体化電源の初段キャパシタ(C_0)の充電には高速充電が可能なコマンド充電器を使用している。今回、固体化電源に用いたS I T h yの素子数は最少の1個で構成した。初段回路にはS I T h yの責務を低減させるため磁気アシスト用可飽和インダクタ($S I_0$)を用いている。昇圧回路にはパルストランス($P T$)と可飽和トランス($S T$)を用い、 $S T$ は昇圧後、磁気スイッチ動作によりパルス圧縮を行う。 $S T$ の磁心材にはパルス特性に優れたF e 系超微結晶質軟磁性合金(F T-1 H)を用いた。 $S T$ 2次側にある可飽和インダクタ($S I_1$)はキャパシタ(C_1)充電用である。 $S I_1$ は C_1 充電時に予め飽和状態にしておき、低インダクタンスで効率の良いエネルギー転送を行い、放電時には逆に高インダクタンスとなりレーザ負荷側にエネルギーが供給されやすくなるようにリセットして用いる。今回、レーザ出力として2J/p以上を目指している。類似回路によるレーザ発振効率が約8%であること⁽¹⁵⁾をふまえて電源出力は25J/pを目標として設計を行った。また、圧縮前の電流パルス幅は3~3.5μs、パルス圧縮後の出力電圧の立ち上がりが300ns以下となるよう設計した。

図7 TEA CO₂レーザ励起用磁気パルス圧縮電源回路
Fig. 7. MPC for TEA CO₂ laser exciter

〈3・2〉固体化電源の特性 固体化パルス電源のエネルギー転送効率を左右する主な損失の発生源は半導体スイッチと磁気スイッチである。図7において半導体スイッチはSIThy、磁気スイッチはSI0とSTである。SIThyの損失見積りは、図5の試験回路を用いた半導体素子の評価試験によりレーザ励起回路でのスイッチングエネルギーや di/dt の状態などから予測する。磁気スイッチは電圧が印加されてから飽和するまでの時間から見積ることができる⁽¹³⁾。今回、磁気スイッチ用のコアは外径120mm、幅25.4mmのトロイダル形状のユニットコアをスタックして使用している。コアの材質はFT-1Hである。SI0とSTのコア体積と飽和までの時間、見積り損失は表1ようになる。このコアは数 μ sの飽和時間で使用した場合、表1から非常に低損失であることがわかる。

表1 磁気スイッチコアの損失見積り

Table 1. Estimation of Core loss

	Core volume (cm ³)	Saturation time (μ s)	Estimation of core loss (mJ/pulse)
SI0	533	2.0	160
ST	1280	3.1	260

今回試作した固体化電源でレーザを駆動したときのSIThyの各波形とCpの電圧波形を図8に、各キャパシタの電圧波形を図9に示す。ここで各キャパシタの静電容量はC0=3.4 μ F、C1=42nF、Cp=5.6nFである。PTとSTの昇圧比は各々1:3、両方で1:9としている。図8のSIThyの電流、電圧波形より瞬時電力を求め、これを時間積分してスイッチング損失を求めると約1.48Jであった。固体化電源の入出力電圧の関係とエネルギー転送効率を図10に示す。図10よりC0充電電圧3.8kVまでは線形的に出力電圧も増加しているが、それ以上の充電電圧ではグラフの勾配が下がっている。この原因はC0充電電圧3.8kVの時STの電圧時間(Vt)積が最適値となりエネルギー転送が最大となっていると考えられ、それ以上の充電電圧ではVt積が不足し、S

Tの飽和タイミングが早くなり、エネルギー転送が低下しているものと考えられる。エネルギー転送効率 η は

$$\eta = \frac{\frac{1}{2} C_1 V_1^2}{\frac{1}{2} C_0 V_0^2} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

とした。3~4kVのC0充電電圧範囲で90%以上のエネルギー転送効率を得られている。3.8kVの入力電圧で最大エネルギー転送効率93%が得られた。

図8 SIThyのスイッチング波形
Fig. 8. Switching waveforms of SIThy

図9 各キャパシタの電圧波形
Fig. 9. Voltage waveforms of each capacitor

図10 入出力電圧の関係とエネルギー転送効率
Fig. 10. Energy transfer efficiency and C₁ voltage V.S. C₀ charging voltage

4. TEA CO₂レーザの発振特性

TEA CO₂レーザは大気圧で動作するレーザで、レーザ励起のための均一グロー放電を得るには速い立ち上がりの電圧パルスの他に主放電に先立って予備電離を行う必要がある。この予備電離は、C_pの接地側に電氣的に接続され、誘電体に覆われた予備電離電極を高電圧側の主電極の両側に配置して予備電離電極と主電極の間で生じるコロナ放電を利用して行っている⁽¹⁶⁾ (図7参照)。主電極の有効電極長は600mm、電極間隔は20mm、放電幅は約20mmである。このレーザの加工対象物は9.3μmに高いスペクトル吸収を持ち電子絶縁材料に多く用いられるポリイミドである。共振器構成は内部鏡型で曲率半径4mのAuコーティングされた全反射Cuミラーと9.3μmを基準とした透過率20%のZnSe部分透過ミラーで構成されている。レーザガスはCO₂/N₂/CO/H₂/He=6/12/3/0.5/78.5%の組成とし、クロスフローファンにより循環している。

前述の固体化電源を用いてレーザ発振を行った。発振波長はスペクトルアナライザ(macken社製:Model16A)により、9.3μmの中心波長を確認した。図11に励起電圧波形とレーザ発振波形を示す。レーザ発振波形はフォトンドラッグ検出素子(浜松フotonクス製:B749)を用いて測定した。約200nsの立ち上がりの速い電圧で励起されブレイクダウン後、800nsの時間、主電極間に電圧が印加されている様子がわかる。レーザ発振はブレイクダウン後800ns経過後に起こり、はじめに強い発振があり、徐々に発振強度は減衰し3μs後には発振が終了している。発振時間の半値幅は80nsである。図12にC₀充電エネルギーに対するレーザエネルギーと発振効率の関係を示す。レーザエネルギーの測定はジュールメータ(Jentec社製:ED500LIR)を用いた。レーザエネルギーはC₀充電エネルギーにほぼ比例しており、25J/pのC₀充電エネルギーで、3.2J/pのレーザエネルギーが得られている。C₁の充電エネルギーに対してレーザ発振効率は最大13.8%が得られている。固体化電源の転送効率も含んだC₀の充電エネルギーに対する発振効率は最大12.9%が得られた。

図13にレーザ平均出力を示す。繰り返し200pps、C₀充電電圧3.3kV時にレーザ平均出力約350Wが得られた。

図11 励起電圧波形(C_p)とレーザ発振波形

Fig. 11. C_p voltage and laser oscillation waveforms

図12 レーザエネルギーと発振効率

Fig. 12. Laser energy and oscillation efficiency

図13 レーザ平均出力のパルス繰り返し数依存性

Fig. 13. Average laser power dependence of the pulse repetition rate

5. まとめ

S I T h y を搭載した固体化電源をTEA CO₂レーザに適用してエネルギー転送効率とレーザ発振特性を調べた。

固体化電源の高効率化には初段のパルス発生用半導体スイッチング素子の低損失化が不可欠である。今回、半導体スイッチには高速パルス通電用に試作されたS I T h yを用いた。このS I T h yとパルス圧縮用の磁気スイッチ(ST)を、損失の低い領域(飽和までの時間が3.3μs)で使用するにより最大93%の非常に高いエネルギー転送効率を得られた。この値はサイラトロン等の放電スイッチと比較しても全く遜色がない。

レーザ発振試験においてはレーザパルスエネルギーが最大3.2J/p、固体化電源を含めた発振効率は12.9%であった。9.3μmを中心波長としたTEA CO₂レーザの発振効率としても大変優れた値である。その理由は固体化電源の高効率化が達成された結果だと考えられる。

今回、S I T h y を搭載した固体化電源と、それを励起電源とするTEA CO₂レーザの基本特性について良好な結果が得られた。今後は実用化のための繰り返し安定性や

長期信頼性、各部寿命の向上とその検証が必要である。

固体化電源の研究開発は1990年代前半に盛んに行われていたが近年その報告が少なくなっている。同様にパルスパワーを必要とするTEA CO₂レーザやエキシマレーザ、銅蒸気レーザ等の報告例も少ない。固体化電源を中心とする高性能パルスパワー発生装置により、これらガスレーザをはじめとするパルスレーザの応用分野が広がり、次世代のパルスパワー発生装置の研究開発が活性化することを期待している。

(平成13年7月30日受付、平成13年10月26日再受付)

文 献

- (1) 唐崎:「プリント基板レーザ加工の現状と動向」, レーザ学会第21回年次大会講演予稿集, 30a, I 8, (2001)
- (2) 佐藤, 西前, 岩田, 竹野, 福島, 金岡:「ハイパワーCO₂レーザによる電子基板穴開け加工」レーザ研究28, 19, (2000)
- (3) A.J.Beaulieu: "Transversely Excited Atmospheric Pressure CO₂ Lasers", Appl. Phys. Lett., 16 (1970) 504
- (4) 出口, 竹田, 畠山, 木島, 藤原, 井澤, 村田, 山中:「固体化電源を用いた100W級銅蒸気レーザの開発」電学論C, 111, No8, 307, (1991)
- (5) 岩田, 伊藤, 植田:「パルスレーザ用半導体方式ダイオードドライバの開発」電学論C, 111, No2, 67, (1991)
- (6) T.Shimada, M.Obara, A.Noguchi: "An all solid-state magnetic switching excimer pumping excimer lasers", Rev.Sci.Instrum, vol.24 44 (1985)
- (7) W.Partlo, R.Sandstrom, I.Fomenkov: "A low Cost of Ownership KrF Excimer Laser Using a Novel Pulse Power and Chamber Configuration", Proc. SPIE, No.2440, 90 (1995)
- (8) H.Mizoguchi, O.Wakabayashi, T.Aruga, T.Sakugawa, T.Koganezawa: "High Power KrF Excimer Laser with a Solid State Switch for Microlithography", Proc.SPIE, No.2726, 831 (1996)
- (9) 緑川, 田代:「高出力TEACO₂レーザ」: レーザ研究, 21, 462 (1993)
- (10) 市川, 宮崎, 岸部, 山田, 森川, 川村:「4500V-1000A級SiCイスタの試作・試験」, 第12回SiCデバイスシンポジウム, SSID-99-7 (1999)
- (11) 畑中, 河原, 緑川, 小原, 田代:「高出力TEACO₂レーザ励起用固体素子化電源の開発」レーザ研究, 20, 322, (1991)
- (12) 畑中, 緑川, 高橋, 葉師, 石坂, 小原, 田代:「絶縁ゲートバイポーラトランジスタを用いたマルチW級TEA CO₂レーザ用固体素子電源の開発」レーザ研究, 21, 649, (1993)
- (13) 佐久川, 秋山:「高速GTOイスタと可飽和トランスを用いた固体化パルス電源」電学論A, 121, 351, (2001)
- (14) 柳瀬, 佐久川, 小金澤, 片岡, 若林, 溝口, 有賀:「エキシマレーザ用固体化パルス電源装置」電学半導体電力変換研資, SPC-95-58 (1995)
- (15) 佐久川, 家田, 五十嵐, 戸田, 高田, 北寄崎, 羽場:「磁気パルス圧縮回路を用いたTEA CO₂レーザ発振」1999年電学A部大, 69, (1999)
- (16) R.Marti, E.Penco, G.Salvetti: "A new type of corona-discharge photo-ionization source for gas lasers", J.Appl. Phys., Vol.56, 11 p3156 (1984)

佐久川 貴志

(正員) 1989年3月九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻修了。同年4月(株)明電舎入社。主として高繰り返しパルスパワー発生装置の研究開発, 高出力気体レーザの研究に従事。レーザー学会, 応用物理学会, 機械学会 会員。

家田 正彦

(非会員) 1995年3月名古屋大学大学院工学研究科修了。同年4月(株)明電舎入社。主としてオゾン発生装置に関する研究, 高出力気体レーザの研究に従事。

高田 昇

(正員) 1988年3月北海道大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年4月(株)明電舎入社。主として電力変換装置の開発, 高繰り返しパルスパワー発生装置の研究開発, 高出力気体レーザの研究に従事。

山田 真一

(正員) 1985年3月東海大学工学部応用物理学科卒業。同年4月(株)明電舎入社。主として電力用半導体素子の研究開発, その素子のパルスパワー用途への適用研究に従事。

北寄崎 薫

(正員) 1979年3月北海道大学大学院工学研究科応用物理学専攻修士課程修了。同年4月(株)明電舎入社。主として, 高出力気体レーザの研究, 新機能性材料の開発に従事。工学博士。応用物理学会, 表面技術協会, 日本MRS 会員。

羽場 方紀

(非会員) 1969年3月上智大学理工学部理工学研究科無機化学専攻修士課程修了。同年4月(株)明電舎入社。主としてソレスター素子の研究開発, 脱硝装置の研究開発, 高出力気体レーザの研究に従事。2001年6月より北斗電工(株)研究開発部長。触媒学会, 応用物理学会, 会員。