レーザーオリジナル

スパイカ／サステイナ方式大出力XeClレーザー

— 繰り返し動作特性 —

佐藤行雄*・井上満夫*・春田健雄*・永井治彦*,**

(1991年10月21日 受理)

High Power XeCl Laser with a Spiker-Sustainer Circuit
— Characteristics of Repetitive Operation —

Yukio SATO*, Mitsuo INOUE*, Kenyu HARUTA* and Haruhiko NAGAI*,**

(Received October 21, 1991)

High repetitive operation is demonstrated of a high power XeCl laser with a surface corona discharge electrode for preionization and a spiker-sustainer circuit. A novel operating mode (reverse voltage mode) for the spiker-sustainer circuit is proposed, and it is confirmed that the reverse voltage mode is superior to the usual operating mode (the magnetic diode mode) in high repetitive operations, provided that the timing of the preionization is properly set before the application of the spiker voltage to establish a stable discharge with high repetition rate.

Repetitive operation over 500 Hz is achieved with a pulse duration of 340 ns. Maximum output power of 505 W is attained with an efficiency of 2.1 % at a repetition frequency of 540 Hz.

Key Words : XeCl Laser, Spiker-sustainer circuit, Surface Corona discharge preionization, High repetitive operation, Reverse voltage mode.

1. はじめに

エキシマレーザーは紫外の波長領域で高出力、高効率発振の可能なレーザーである。代表的な熱加工用レーザーであるCO₂レーザーに比べ光子当りのエネルギーが30倍から50倍大きいいため、熱的作用を受けずに直接化学結合を切断することができ、レーザーCVD、アブレーション、露光等の化学的微細加工用の光源として近年盛んにその装置開発、応用研究が進められている。

エキシマレーザーの工業ラインへの導入を考えると、生産効率の観点からある程度大きな領域を一括処理することが不可欠で、そのためにはkWクラスの出力で、かつ信頼性の高いレーザー装置が必要とされている。

エキシマレーザーの大出力化では、レーザーガスに直接電子ビームを打ち込み、高エネルギー、高尖頭出力を得ることが行われている。しかしながら装置が大がかりで、また、繰り返し動作が難しいことから、現状ではレーザー核融合用

* 三菱電機(株)中央研究所 (〒661 尼崎市塚口本町8-1-1)

** 現所属：超先端加工システム技術研究組合 (〒532 大阪市淀川区西中島5-5-15)

* Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corp. (8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo 661)

** Present address: Advanced Material-Processing and Machining Technology Research Association (5-5-15 Nishi-Nakajima, Yodogawa-ku, Osaka 532)

等、一部の研究用に限られている¹⁾。前記の工業的应用では、kHzまでの高繰り返し動作を行うことにより、比較的小型の装置で大きな平均出力が得られることから、放電励起によるものが一般的である。放電励起ではFahlen等がKrFレーザーで200Wの平均出力を実証した²⁾ことにより大出力化への見通しが得られた。現在までにXeClレーザーで最大750Wの出力が得られたことが報告されている³⁾。

繰り返し動作に使われている放電励起回路としては容量移行型^{4, 5)}、LC反転型⁶⁾、およびそれらの複合型^{2, 3)}が使われている。しかしながら、エキシマレーザーでは放電部のインピーダンスが十分の数 Ω と極端に低いいため、回路と放電部とのインピーダンス整合を取るのが難しく、放電部へのエネルギー注入効率が小さい。結果として発振効率が低く押さえられている。このことはパルス当りの注入エネルギーが大きくなるほど問題で、XeClレーザーでは2.2%の発振効率で140W（パルス当りの出力0.13J/pulse, 繰り返し周波数1.1kHz）の出力が得られたことが報告されている⁷⁾のに対し、先の750W（1.5J/pulse, 500Hz）の報告例では約1%の発振効率に留まっていると推定される^{3, 21)}。

一方、高い発振効率で大出力が得られる放電励起回路としてLong等によって提案されたスパイカ／サステイナ回路が知られており、4.2%の発振効率で4.2Jのパルス出力が得られたことが報告されている⁸⁾。同回路では、まず高電圧のスパイカ回路で放電を開始することにより、放電部のインピーダンスを放電時の値まで下げる。その後放電部のインピーダンスと整合の取れた低インピーダンスパルス整形ライン（Pulse Forming Line：PFL）から励起エネルギーを注入する。大きな励起エネルギーを効率良く注入できるため、発振効率が向上した。

スパイカ／サステイナ回路に対してはその後磁気スイッチの導入等により回路動作の安定化に対する改善がなされた^{9, 10)}。また、McKee等により1J/pulse, 220Hzの繰り返し発振が報告されている¹¹⁾が、ほとんどは単パルス動作、

もしくはバースト動作の域を出ていないのが現状である。

スパイカ／サステイナ回路では長パルスで大きな励起エネルギーを注入している。このため、従来の回路方式に比べ1桁程度長い期間に渡って均一な励起放電を維持する必要がある。均一放電実現のため、同回路ではその予備電離源としてX線^{8, 10)}、UVスパーク放電¹¹⁾、コロナ放電¹²⁾、エキシマレーザー⁹⁾が使われている。このうちX線源は高気圧、大容量の放電空間に対して均一な予備電離を実現できるという意味で理想的な予備電離源とされ¹³⁾、ヨーロッパではユーレカ計画のもと、同予備電離源と組合せた方式による大出力化の研究が進められている¹⁴⁾。

我々は装置構成が簡単で、また繰り返し動作が容易な沿面コロナ放電との組合せ方式により、高出力でかつ高い信頼性を有するエキシマレーザーの開発を目指した。スパイカ／サステイナ回路では予備電離、スパイカ放電、サステイナ放電の順で励起放電が形成される。従って予備電離が直接的に長パルスのサステイナ放電の均一性を決定しているのではなく、短パルスのスパイカ放電を介して作用する。通常の短パルス放電に対して沿面コロナ予備電離が有効であることは既に100Wクラスのエキシマレーザー開発により実証しており¹⁵⁾、スパイカ／サステイナ回路に対しても有効であるという判断に基づき同予備電離方式を採用した。このため、まず単パルスで動作する実験装置を試作し、最大出力1.09J、最大発振効率1.9%を得て、同組合せ方式に対する大出力発振への見通しを得た¹⁶⁾。同時に繰り返し発振に必要なガス循環系、回路素子（低損失磁気スイッチ、同軸型PFL）の開発を行い¹⁷⁾、それらの技術を結集して繰り返し動作可能なレーザー発振装置を開発した^{18, 19)}。

本論文では、沿面コロナ予備電離方式とスパイカ／サステイナ回路を組合せたXeClレーザーの繰り返し動作特性について報告する。スパイカ／サステイナ回路に対して新しい動作モード（反転電圧モード）を提案し、従来の動作モー

ド(ダイオードモード)¹⁰⁾に比べて繰り返し特性において優れていることを実証した。また、反転電圧モードを実現する上で必要条件となる沿面コロナ放電のタイミング依存性を明らかにした。結果として、スパイカ/サステイナ回路として初めて500Hzを越える繰り返し発振を実現し、また、その繰り返し発振をビームの高品質化に有効な長パルス(最大発振持続時間340 ns)で実現した。また、バーストモードでの繰り返しにおいて最大平均出力505W(繰り返し周波数540Hz)を発振効率2.1%で達成した。

2. レーザー装置

開発した装置の構造図をFig. 1に、また、ダイオードモード¹⁰⁾における回路図をFig. 2に示す。

本装置はガス循環系、放電励起部、および放電励起回路部から構成される。

ガス循環系はガスダクト、ブロワ、熱交換器からなり、放電励起部には28m/sのガス流速でレーザーガスが循環されている。

Fig. 1 Cross section of the high power XeCl laser.

Fig. 2 Schematic of the SCDP (Surface Corona Discharge Preionization) electrode with a spiker-sustainer circuit for the magnetic diode mode.

放電励起部の主放電電極はチャン型電極と平板開孔電極からなり、その有効放電長は54 cm、放電幅は約1.5 cm、放電ギャップ長は3.5 cmである。平板開孔電極の背面には、アルミナセラムクス製の誘電体を補助電極との間に挟み込む形で設置している。開孔電極と補助電極の間にパルス電圧を印加することにより開孔部の縁でコロナ放電を生成し、ここから発生する紫外光により主放電空間の予備電離を行う。誘電体は円周面の1部を平坦に削ったセラムクスパイプを使用した。この形状は、開孔電極と補助電極間での直接放電を防ぐためのもので、繰り返し動作時の安定予備電離を実現する上で不可欠な構造である。

スパイカ回路は容量移行型回路で、 C_{1SP} 、 C_{2SP} の値は各々6 nFである。また、 C_{1SP} の充電電圧は43kVとしている。

サステイナ回路は同軸型のPFLからなるサステイナコンデンサ C_{2SUS} 、 C_{2SUS} に対しパルス充電を行う充電回路、およびスパイカ回路とサステイナ回路を一時的に切り離すためのレーストラック状磁気スイッチより構成される。

C_{2SUS} の容量は160 nF、特性インピーダンスは約0.3 Ω である。また、充電回路の充電バンク C_{1SUS} の容量は160 nF、 C_{2SUS} に対する充電時間は約1 μ sである。

磁気スイッチはコバルト系アモルファス材料からなり、その特性は実際に動作させる高周波領域での測定結果から飽和磁束密度が0.6 T、 ΔB_{max} は1.1 Tである¹⁷⁾。磁路長1.4mのレーストラック状磁気コア3個を用い、その総飽和断面積は15 cm²とした。この際のパルス当りのエネルギー損失は0.8 Jと見積られる。磁気スイッチのリセットは、同スイッチに1回巻のケーブルを設置し、5 Aの直流電流を流すことによって行った。

レーザー共振器は外部鏡で構成し、全反射鏡、部分反射鏡はともにフラットのCaF₂基板に誘電体多層膜を施したものを使用した。部分反射鏡の反射率は60%である。取り出し窓はCaF₂基板に対し大気に接する片面のみ無反射コーティ

ングを施したもので、1枚当たり約5%の損失がある。

レーザーガスはNeをバッファガスとするXeとHClの混合ガスで、Xeは3 torr, HClは0.75 torr, 全圧力 P は3.9 atmである。

レーザー出力は繰り返し周波数50 Hzにおいて取得し、パルス当りの出力に換算している。出力測定はビームスプリッターおよびパワーメーター (Coherent 201型) からなる測定系により行い、較正をジュールメーター (Gentec ED-500型) およびパワープローブ (Optical Engineering 25-B型) により行った。

3. ダイオードモードにおける動作特性

3.1 ダイオードモードの回路動作

ここではまずスパイカコンデンサ C_{2SP} とサステイナコンデンサ C_{2SUS} を同方向の極性 (負極性) で充電した場合の結果 (ダイオードモード¹⁰⁾) について述べる。ダイオードモードにおける典型的な動作波形 (スパイカ電圧 V_{SP} , サステイナ電圧 V_{SUS} , サステイナ電流 I_n , およびレーザ出力波形) をFig. 3に示す。充電電圧 V_{SUS} は10 kVである。

Fig. 3 Typical oscillograms of spiker voltage V_{SP} , sustainer voltage V_{SUS} , sustainer current I_n and laser output power for the magnetic diode mode.

ダイオードモードでは C_{2SUS} を所定の充電電圧で充電した後、スパイカ回路動作をさせ、 C_{2SP} への電荷移行によりまずスパイカ放電を形成する。予備電離は C_{2SP} の一端を補助電極に接続しているため、この電荷移行過程の中で自動的に行われる。

C_{2SP} への電荷移行過程では、漏れ電流が C_{2SUS} の放電電流とは逆に、磁気スイッチをリセットする方向に流れる。このため、スパイカ放電が開始した後磁気スイッチ両端の電位差 ($V_{SUS} - V_{SP}$) により磁気スイッチが放電電流方向にセットされるまでサステイナ電流が止められる。この休止期間は磁気スイッチの飽和断面積、 C_{2SUS} の充電電圧に依存し、充電電圧 V_{SUS} が8.5から11 kVの範囲では300から430 nsであった。

レーザー発振はサステイナ電流 I_n が流れ始めた140 ns後に開始し、電流が流れ終わるまで約200 nsの間持続している。このことは休止期間を含めスパイカ放電開始後約700 nsに渡ってレーザー励起に必要な均一な放電が維持されたことを示している。しかしながら電子親和力が大きいハロゲンガス中では、休止期間の存在は、その放電安定性の観点から望ましくないと考えられる。

3.2 ダイオードモードの繰り返し発振特性

Fig. 4に繰り返し周波数 f に対する平均出力 P_{av} を、サステイナの充電電圧 V_{SUS} が8.5, 10, 11 kVの場合について示す。

平均出力はいずれの充電電圧においても、ある周波数 f_{max} までは直線的に増加するが、それ以上では飽和する特性を示す。充電電圧が8.5, 10, 11 kVにおける f_{max} は各々150, 225, 250 Hzであり、充電電圧の増加によって増加する傾向にある。250 HzにおけるCR値は7.5であり、レーザーガスの面からは十分なガスの置換が行われていると考えられる。また、通常の容量移行型回路による繰り返し発振特性では、放電入力密度が増加する程 f_{max} が減少するのが一般的であり⁷⁾、ここで得られた結果は逆の傾向となる。ここで、各充電電圧におけるスパイカ放電開始

Fig. 4 Average output power as a function of pulse repetition frequency for the magnetic diode mode.

からサステイナ電流が流れ出すまでの遅延時間 Δt に注目すると、各々 430, 340, 300 ns であり、 Δt と f_{max} との間には負の相関が見られる。ハロゲンガス中では Δt が増加する程サステイナ放電開始時におけるスパイカ放電の均一性が損なわれ、サステイナ放電の安定維持が困難になることが報告されている²⁰⁾。繰り返し放電時には、さらに前回の放電による不均一に分布した残留電荷、スパッター生成物等の影響が加わり、安定放電の維持がより困難となったと考えられる。

4. 反転電圧モードにおける動作特性

我々はダイオードモードにおける休止期間に注目し、それをなくすことによって繰り返し発振特性の改善を図ることを試みた。そのために新たに反転電圧モードを提案し、繰り返し動作においてその有効性を確認した。Fig. 5 に反転電圧モードにおける回路構成を示す。先のダイオードモードにおける回路との違いは、以下の点である。

- ① C_{2SUS} を C_{2SP} に対して逆極性（正極性）で充電した。そのため C_{2SUS} の充電回路に電圧極性を反転するトランスを挿入した。
- ② 磁気スイッチのリセットを行うため、 C_{2SUS} に対する充電回路接続点を変更した。
- ③ スパイカ放電に対する予備電離の開始点を制御するため、予備電離に対し独立した駆動回路を設けた。

Fig. 5 において予備電離エネルギーを蓄えるコンデンサ C_{1PI} の容量は 1 nF、充電電圧は 12 kV である。この時の充電エネルギーは 0.07 J で、スパイカ回路、サステイナ回路の充電エネルギーに比べて十分小さい。予備電離回路を動作するタイミングはスパイカ回路を動作する時間を基準として定義し t_i で表している。

動作条件の最適化の観点から C_{1SP} の容量を 9 nF とし、また、その充電電圧を 42 kV とした。同様に、Xe 濃度は 6 torr に増加した。

C_{2SUS} に対する充電時間は電圧極性反転トランスが有するインダクタンスにより増加し、約 2.5 μs である。

4. 1 反転電圧モードの回路動作

反転電圧モードにおける典型的な動作波形（プリパル電圧 V_{SP} 、サステイナ電圧 V_{SUS} 、サステイナ電流 I_n 、予備電離電流 I_p 、レーザ出力波形、放電発光波形）を Fig. 6 に示す。予備電離は通常同図に示すように $t_i = -300$ ns のタイミングで行っている。予備電離電流 I_p の最初のピークのパルス幅は約 100 ns、ピーク電流値は 300 A で

Fig. 5 Schematic of the SCDP electrode with a spiker-sustainer circuit for the reverse voltage mode.

Fig. 6 Typical oscillograms of spiker voltage V_{SP} , sustainer voltage V_{SUS} , sustainer current I_n , preionization current I_p , laser output power and discharge emission for the reverse voltage mode with a separated preionization circuit.

ある。予備電離に対する出力依存性については4.2節で示す。

反転電圧モードでは、 C_{2SP} への電荷移行の過程において、主電極間がその放電開始電圧に達する以前に磁気スイッチを先に飽和させ、そのインダクタンスを低下させる。この時、 C_{2SUS} に蓄えられた電荷が急速に C_{2SP} に移行され、主電極間に急峻な反転電圧が印加される。この反転電圧が放電開始電圧に達するとスパイカ放電が開始される。反転電圧が印加される過程で磁気スイッチはすでに飽和状態にあるため、スパイカ放電に続いて休止期間を置くことなくサステイナ電流が放電空間に流れ込む。

Fig. 6に示す例ではサステイナ電圧が+10 kVに充電された時点でスパイカ回路が動作し、スパイカ電圧 V_{SP} が負電圧の方向に引かれていく。 V_{SP} が-21 kVに達した時点で磁気スイッチが飽和し、直後に電圧が正の方向に反転し、その後約50 nsで放電開始電圧である+25 kVに達している。従って電圧反転後の平均的な電圧立ち上がり速度は920 kV/ μ sと計算される。この値は従来のスパイカ/サステイナ回路の動

作モードに対して2倍程度、また、通常の容量移行型回路に対して3倍以上速い値であり、均一なスパイカ放電形成の上で有効に作用すると考えられる。

ここで V_{SP} の電圧反転直後にサステイナ電流 I_n に現れているスパイク電流は C_{2SUS} から C_{2SP} への電荷移行電流であり、それに続く電流が放電空間に流れ込むレーザー励起電流を表している。スパイカ放電が電圧反転後の正極のピーク電圧で開始していることは、放電の発光波形から明らかである。

レーザー発振は放電が開始してから約100 ns後に立ち上がり、サステイナ電流が流れ終わるまで約200 nsの間持続している。

反転電圧モードでは主電極間に非常に立ち上がり速度が速い反転電圧が印加されること、サステイナ電流に対して休止期間が原理的に存在しないこと、およびFisher等の提案したスイッチングモード¹⁰⁾と異なり、スパイカ放電による放電電流の向きと、サステイナ電流の向きが放電空間において一致していることが特徴といえる。

スイッチングモードではスパイカ回路動作後、負極の放電開始電圧まで磁気飽和スイッチを非飽和の状態で維持し、放電開始後は直ちに飽和するように磁気スイッチの条件を設定する必要がある。このためより大きな飽和断面を必要とし、また、スパイカ回路の充電電圧設定により多少の休止期間が存在することが問題であると考えられる。

4.2 予備電離に対する動作依存性

反転電圧モードでは予備電離のタイミング制御が必要条件となることが判明している。ここではその根拠となった予備電離に対する動作依存性について示す。

Fig. 7に自動予備電離で動作させた場合の典型的な動作波形（スパイカ電圧 V_{SP} 、予備電離電流 I_p 、レーザー出力波形、放電発光波形）を示す。自動予備電離では、Fig. 2に示したように補助電極と C_{2SP} の一端を接続している。

同予備電離では、磁気スイッチが飽和後、急

Fig. 7 Typical oscillograms of spiker voltage V_{sp} , preionization current I_p , laser output power and discharge emission for the reverse voltage mode with a automatic preionization circuit.

峻な反転電圧が主電極間印加されるまでは同じプロセスを辿る。しかしながら、正極のピーク電圧に達しても放電が開始できず、その後振動電圧が印加され、第2、もしくは、第3のピーク電圧付近で放電を開始する。従って放電開始電圧はパルス毎にばらつき、放電は極めて不安定なものとなる。Fig. 7の例では第2のピーク電圧で放電を開始していることが放電発光波形からわかるが、放電開始電圧が約20 kVと低いいため、放電空間のインピーダンスが直ちに下がらず、そのためサステイナからのエネルギー供給が100 ns程度遅れて開始している。

50 Hzにおける平均出力は、パルス毎の出力ばらつきが大きいいため、別の予備電離回路で行った場合に比べ2/3程度しか得られなかった。また、100 Hzを越える繰り返し動作は放電の不安定性により困難であった。

自動予備電離における予備電離電流 I_p は、反転電圧印加前に300 A程度が流れていることがFig. 7からわかるが、立ち上がりが急峻過ぎるために、放電開始に至るまでの電子増倍が行えないことが推定される。

次に別の予備電離回路に対するレーザー出力

特性を示す。Fig. 8にサステイナコンデンサ充電電圧 V_{SUS} を変化させた場合の予備電離動作タイミング t_i に対する出力特性を示す。

充電電圧 V_{SUS} が8.5 kVと低い時には t_i が-150 nsから-350 nsの範囲においてその出力への依存性はほとんどない。10 kV、11 kVと増加するにしたがって t_i に対する出力依存性が顕著となり、各々-300 ns、-200 ns近傍が最適値となる。すなわち、 V_{SUS} が高い時程最適な予備電離タイミングはスパイカ回路の動作開始点に近付き、また、その許容時間幅が狭くなる。

実験に用いたスパイカ／サステイナ回路では、繰り返し動作を行うために磁気スイッチを使用しており、サステイナコンデンサ C_{2SUS} の充電時間約2.5 μ sに渡り、その充電電圧 V_{SUS} が直接主電極間に印加される。そのため V_{SUS} が11 kVの時には、自爆放電を起こすに近い電界が既に印加されており、また、12 kV以上では電極端部数点でのアーク放電を形成する。従って V_{SUS} が高い時には、その充電過程において、主電極間の電界の不均一性を反映した形で電子増倍が進んでいくと推定される。このような条件下で予

Fig. 8 Output energy per pulse as a function of initiation time of preionization for three different charging voltages of the sustainer capacitor at a repetition frequency of 50 Hz.

備電離を行うことは、不均一な電子増倍の成長を時間的に加速するだけであり、充電過程での予備電離電子増倍時間は極力短くしたほうが良いと考えられる。一方で、不均一に増倍した電子が予備電離電子の電子密度 (10^6 cm^{-3} から 10^8 cm^{-3}) を越えた時点で予備電離を行ったとしても予備電離電子によって放電を制御する作用がないと考えられ、この条件が最適な予備電離のタイミングを規定していると考えられる。

Fig. 9 に繰り返し周波数 f を変化した場合の、予備電離動作タイミング t_i に対するレーザー出力特性を示す。充電電圧 V_{SUS} は 10 kV で一定である。

同図から最適な予備電離タイミングである $\sim 300 \text{ ns}$ 付近では、繰り返し周波数に対する出力変化はわずかであるが、それより早いタイミングで予備電離を行った場合、繰り返し周波数の増加に応じてレーザー出力は顕著に減少することがわかる。すなわち、繰り返し周波数が増加する程予備電離タイミングに対する出力依存性が大きくなる。繰り返し動作時には、サステイ

Fig. 9 Output energy per pulse as a function of initiation time of preionization for three different repetition frequencies at a sustainer charging voltage of 10 kV.

ナコンデンサを充電開始する以前から前回の放電により生成した荷電粒子、スパッター生成物が存在しており、繰り返し周波数が増加する程その量は増加すると考えられる。従って、最適な予備電離タイミングより遅れると、それらの残留物に起因した電子増倍が支配的になり、均一な放電開始ができなくなったことが考えられる。

4.3 反転電圧モードの繰り返し発振特性

Fig. 10 に反転電圧モードにおける繰り返し発振特性を実線で示す。また、比較のためダイオードモードにおけるそれを破線で示す。充電電圧 V_{SUS} はともに 10 kV である。同図から明かなように、ダイオードモードでは 300 Hz において完全に出力が飽和しているのに対し、反転電圧モードではパルス当り 7 % の減少で 500 Hz までの繰り返しを達成している。500 Hz における CR 値は 3.7 である。また、レーザーの平均出力は 83 W で、 $C_{1\text{SP}}$ に蓄えられたエネルギー (7.9 J)、および $C_{2\text{SUS}}$ に蓄えられたエネルギー (8 J) から

Fig. 10 Average output power as a function of pulse repetition frequency for the two different modes of circuit operation.

求められる発振効率 η は1.0%である。この効率 η はサステイナからのエネルギー供給が少なく、しきい値近傍での発振となっているため低く押さえられている。

反転電圧モードではサステイナ電流に対する休止期間がないこと、および主電極間に印加される電圧の立ち上がりが速く、放電開始電圧が高くなることによって高い繰り返し動作においても安定な放電が維持されたと考えられる。

5. 大出力化

レーザーの大出力化実証のため、有効放電長を100 cmとし、サステイナコンデンサ C_{2SUS} の増大による入力エネルギーの増加を図った。スパイカ回路のコンデンサ容量 C_{1SP} 、 C_{2SP} は各々9 nF、8 nFである。また、部分反射鏡の反射率は最適値である30%とした。

Fig. 11に最大平均出力が得られた際の繰り返し発振特性を示す。 C_{2SUS} は540 nF、スパイカの充電電圧 V_{1SP} は50 kV、サステイナコンデンサの充電電圧 V_{SUS} は11 kV、ガス圧力は4.2 atmである。ただし、ここで示す特性は繰り返し発振開始後2秒間（約1000ショット）の出力平均から求めたバーストモードによる特性である。

Fig.11 Average output power as a function of pulse repetition frequency on the condition of the maximum average power.

繰り返し周波数が380 Hzまではパルス当たり0.97 Jの出力ではほぼ直線的に増加するが、それ以上では多少直線性からずれる傾向にある。繰り返し周波数540 Hzにおいて最大平均出力505 Wを得た。この時の発振効率は2.1%である。また、発振の半値全幅 (FWHM) は200 ns、発振の持続時間は340 nsである。このような長パルスの発振はビームの高品質化に有効である²²⁾と考えられる。

6. まとめ

本論文では沿面コロナ予備電離とスパイカ／サステイナ方式を組み合わせたXeClレーザーの繰り返し動作特性について検討し、以下の結果を得た。

- (1) スパイカ／サステイナ回路に対する新しい動作モード（反転電圧モード）の開発を行い、繰り返し発振特性において従来の動作モード（ダイオードモード）に比べ優れていることを実証した。また、予備電離のタイミング制御が反転電圧モードを実現するうえで必要条件であることを明らかにした。
- (2) 上記技術開発によりスパイカ／サステイナ回路として初めて500 Hzを越える繰り返し発振に成功した。また、この繰り返し発振を最大340 nsという長パルスで実現した。
- (4) バーストモードにおいて平均出力505 Wを繰り返し周波数540 Hzにおいて達成した。この時の発振効率は2.1%である。

今後は、上記繰り返し発振技術、大出力化技術をベースに工業的に有用なkW級レーザーの研究開発を進めていく。

謝 辞

本研究は、通商産業省工業技術院の大型プロジェクト制度による新エネルギー・産業技術総合開発機構の大型工業技術研究開発「超先端加工システムの研究開発」の一環としてなされたものである。

参 考 文 献

- 1) D. C. Cartwright, J. F. Figueira, D. B. Harris and T. E. McDonald : CLEO'90 Technical Digest, Anaheim, May, 1990, p.302.
- 2) T. S. Fahlen : IEEE J. Quantum Electron. **QE-16** (1980) 1260.
- 3) E. Müller-Horsche and P. Oesterlin : High- Power Gas Lasers, Los Angeles, 1990, SPIE **1225** (1990) p.142.
- 4) A. J. Kearsley, A. J. Andrews and C. E. Webb : Optics Communications **31** (1979) 181.
- 5) 宮崎健創, 狭間寿文, 山田家和勝, 佐藤卓蔵, 江浦隆, 深津透 : レーザー研究 **13** (1985) 814.
- 6) T. S. Fahlen : IEEE J. Quantum Electron. **QE-15** (1979) 311.
- 7) K. Hotta, S. Ito and M. Arai : CLEO'90 Technical Digest, Anaheim, May, 1990, p.346.
- 8) W. H. Long, Jr., M. J. Pummer and E. A. Stappaerts : Appl. Phys. Lett. **43** (1983) 735.
- 9) R. S. Taylor and K. E. Leopold : Appl. Phys. Lett. **46** (1985) 335.
- 10) C. H. Fisher, M. J. Kushner, T. E. DeHart, J. P. McDaniel, R. A. Petr and J. J. Ewing : Appl. Phys. Lett. **48** (1986) 1574.
- 11) T. J. McKee, G. Boyd and T. A. Znotins : IEEE Photo. Tech. Lett. **1** (1989) 59.
- 12) R. S. Taylor and K. E. Leopold : J. Appl. Phys. **65** (1989) 22.
- 13) K. Midorikawa, M. Obara and T. Fujioka : IEEE J. Quantum Electron. **QE-20** (1984) 198.
- 14) W. J. Witteman, F. A. van Goor, G. B. Ekkelmans and G. J. Ernst : High-Power Gas Lasers, Los Angeles, 1990, SPIE **1225** (1990) p.132.
- 15) H. Nagai and N. Tabata : Technical Digest of the 4th Sympo. on Gas-Flow Lasers and Chemical Lasers'87, Nagoya, November, 1987, p.62.
- 16) Y. Sato, A. Suzuki, M. Inoue, K. Haruta and H. Nagai : CLEO'90 Technical Digest, Anaheim, May, 1990, p.346.
- 17) 井上満夫, 佐藤行雄, 樗木博一, 若田仁志, 春田健雄, 永井治彦 : 第50回応用物理学会予稿集 (1989, 秋) p.842.
- 18) H. Nagai, K. Haruta, Y. Sato, M. Inoue and A. Suzuki : Eighth Inter. Sympo. on Gas Flow and Chemical Lasers, Madrid, 1990, SPIE **1937** (1990) p.31.
- 19) 永井治彦, 春田健雄, 佐藤行雄, 井上満夫 : レーザー学会研究会報告, RTM-91-26, (1991).
- 20) E. A. Perrukhin and A. S. Podsonnyi : Sov. J. Quantum Electron. **21** (1991) 269.
- 21) P. Oesterlin, W. Muckenheimer and D. Basting : Excimer Lasers and Applications, Hamburg, SPIE **1023** (1988) 51.
- 22) T. J. McKee : Appl. Opt. **30** (1991) 635.