高平均出力 Ti:Sapphire 再生増幅器

High-average power Ti:Sapphire regenerative amplifier

○松嶋 功、屋代英彦、富江敏尚 (産総研)

Isao Matsushima, Hidehiko Yashiro and Toshihisa Tomie (AIST)

1. はじめに

我々はレーザープラズマEUV・X線光源とその応用機器の開発を行なっている。特に極端紫外光電子分光装置(EUPS)¹は我々の独自開発によるもので、光源にレーザープラズマを用いることにより、従来のX線光電子分光装置では不可能であった高いエネルギー分解能と空間分解能での表面分析が可能で、繰り返し周波数100Hzのレーザープラズマ光源を用いたEUPS試作機で半導体の表面状態の解析を行なっている。

レーザープラズマ光源利用装置においてはスループットを高くすることが実用面で重要であり、レーザープラズマ光源の高繰り返し化が望まれる。レーザープラズマから十分な光量のX線を効率よく発生させるためには数mJのパルスエネルギーが必要である。レーザーはパルス幅が短く、優れた集光特性を持たなければならない。このため我々は10kHzの繰り返しで、サブ ns～サブpsのパルス幅で数mJのパルスエネルギーが数 μ mに集光可能なTi:Sapphire レーザー増幅器を開発した。

チタンサファイアレーザーを高繰り返し動作させるには、熱レンズ効果が問題となる。YangとWalkerら²はレーザーロッドを極低温冷却するとともに、共振器を対称配置のリング構成とすることにより、熱レンズ効果を克服した再生増幅器を提案している。我々はこの構成を参考にして、単一ロッド単一ステージで熱レンズ効果の影響を受けにくい、高繰り返し高平均出力の再生増幅器を開発した。

まず、リング共振器中に配置したTi:Sapphire レーザーロッドを液体窒素で冷却し、1kHz 20Wのレーザーで励起を行ない、圧縮前出力7.4Wを得た³。このときの変換効率37%はYangとWalkerらが達成した31%をしのぐものである。次に同じ共振器構成で繰り返し周波数を10kHzとし、180Wで励起することにより、圧縮前出力40Wを得た⁴。さらに熱レンズ効果を考慮して共振器を改良した結果、同じ励起パワーで圧縮前出力を54Wに増加することができた。これまでに文献資料上で報告されている高繰り返しTi:Sapphire レーザーの平均出力は、多段増幅器構成を用いたものでも37.7Wが最高である⁵。多段増幅器構成はレーザープラズマ光源の励起用レーザーとしては複雑すぎる。このためシングルステージ単一ロッド構成にこだわった開発を行なっているが、多段増幅器をも越えた世界最高の平均出力を得ることができた。

2. 増幅器の構成

第1図に10kHz再生増幅器の構成図を示す。Ti:Sapphire レーザーロッドは6mm×6mm×25mmの大きさで、端面はブリュスター角に研磨されている。ドーブ濃度は0.1wt.%で、励起光の97%が吸収される。レーザーロッドは銅のマウントに固定され、このマウントを液体窒素で冷却する。液体窒素は、増幅器に付属した小型の液体窒素発生器から、配管により直接供給している。良好な熱伝導を得るためにレーザーロッドと銅のマウントの間にはインジウム箔が挟まれている。結露を防止するためにロッドをブリュスター窓のつ

いた真空容器中に入れ、 10^{-4} Paに排気した。銅のマウントには白金抵抗温度計を取り付け、温度を測定した。180Wの熱負荷時における温度は約100Kであった。

リング共振器内のレーザーロッドと対称な位置に焦点距離1mの凸レンズを配置した。熱レンズ効果が無視できる条件下では共振器モードビームのビームウエストはレーザーロッドの位置となり、高密度励起による高効率動作が可能となる。また熱レンズ効果があった場合にもその影響を最小限に抑えることができる。共振器長は3.6mと3.8mの2種類について実験を行なった。

光スイッチにより、入出力の切り替えを行なう。光スイッチはポッケルスセルと薄膜蒸着偏光板、半波長板で構成される。リング共振器では入出力が別々の方向となるため、入出力分離のための方向性結合器を必要としない。しかし自己発振、あるいは寄生発振が起こった場合には、逆方向に進行するレーザー光が発生して、入射側の小口径の光学素子や発振器を破損する可能性があり、これを防止するために2台のファラデーアイソレーターを挿入した。

レーザーロッドの励起には2台のNd:YAGレーザー第2高調波(Powerlase, AO2/G)を使用した。2台合計の励起パワーは最大180Wであった。再生増幅器の高効率動作には単パスあたりの利得を高くする必要があり、励起レーザーのビーム品質は重要である。このためPowerlase社には、 M^2 値20前後になるよう特注での開発をさせた。納入されたレーザーの M^2 値を測定したところ、23.5であった。スペースの関係で各励起レーザーからロッドまでの距離を等しくすることができないため、励起レーザーの集光レンズの焦点距離をそれぞれの距離に応じて350mm と500mmとし、どちらもロッド位置での最小集光スポット直径が 600μ mとなるようにした。

シード光にはパルス幅22fsのTi:Sapphireモードロックレーザー発振器(Spectra Physics, Tsunami)を使用し、これを1200本/mmの回折格子を用いたダブルパスパルス伸長器でパルス幅200psとした。共振器に注入したシードパルスのエネルギーは0.8nJである。

第1図 A schematic of a ring regenerative amplifier. A cryogenically cooled Ti:sapphire rod is kept in vacuum and placed at the beam waist for a $f=1$ m intra-cavity lens. M1~ M6 are cavity mirrors, $\lambda/2$ is a half-wave plate, PC is a Pockels cell, TFP is a thin film polarizer, FI are Faraday isolators, and AO2/G are pump lasers.

3. 実験結果と考察

はじめに、共振器長3.6mで実験を行なった。熱レンズ効果がなければ、この配置でのTEM₀₀共振器モードビームのビームウエスト直径は780 μ mであり、励起レーザーの集光レンズ位置を増幅出力が最大になるように調整した。1kHz 20W励起の実験ではこの配置で37%の変換効率を得ている。増幅光の出力はサーモパイル型レーザーパワーメーター (Ophir Optronics, F300A)により、直接測定した。

10kHz動作での測定結果を第2図に白丸で示した。励起パワー90Wまでは1台の励起レーザーによる片側励起で、それ以上が2台のレーザーによる両側励起である。180W励起で最大出力40W、すなわちパルスエネルギー4mJが10kHzの繰り返しで得られている。このときの変換効率22%は他の文献等で報告されている10kHz増幅器よりも十分に高い⁶。我々が1kHzシステムで達成した37%と比較すると改善の余地がある。

そこで効率最大化条件の考察を行なった。焦点距離 f のレンズをロッドと対称位置に配置し、熱レンズの焦点距離を f_T とし、共振一周の長さを L としたとき、ロッド位置での共振器モードビームの半径 ω_{2r} は次の式で求められる。

$$\omega_{2r}^4 = \left(\frac{2\lambda f_T}{\pi} \right)^2 \frac{2f - L/2}{2f_T - L/2} \left(\frac{L/2}{2f + 2f_T - L/2} \right) \quad (1)$$

共振器長が $L = 3.6\text{m}$ でレンズの焦点距離が $f = 1\text{m}$ のとき、熱レンズ効果がなければ $f_T = \infty$ であり、共振器モードビームの直径 $2\omega_{2r}$ は780 μm となる。しかし180W励起時に熱レンズの焦点距離を測定したところ、2.2mであった。 $f_T = 2.2\text{m}$ の場合には $2\omega_{2r}$ は880 μm となる。励起ビームの直径をこれに合わせて大きくすると、励起フリーエンスが低下し、効率が下がる。そこで $f_T = 2.2\text{m}$ の場合に $2\omega_{2r} = 780\mu\text{m}$ となる条件を計算した。その結果、 $L = 3.8\text{m}$ とすれば良いことがわかった。

共振器長を3.8mに変更して行なった実験結果を第2図に黒い四角で示す。高励起パワー領域で改善され、最高出力は54Wに達した。

出力ビームの集光特性をCCDカメラで観測した結果を第3図に示す。集光限界の2倍の領域に80%以上のエネルギーが含まれている。

第2図 Output power of the regenerative amplifier at 10 kHz as a function of pump power.

第3図 Far-field image of the output pulse and intensity traces for the vertical (solid line) and horizontal (dashed line) direction with the output power of 56W.

出力ビームのパワーの4%をビームスプリッターで取り出し、1500本/mmの回折格子で圧縮した。出力35W時には58fsまで圧縮することができ、53W時でも82fsまで圧縮することができた。高温多価電離イオンからの輻射を利用するレーザープラズマX線光源の場合、電離過程に時間がかかるため、必要なレーザーのパルス幅は最短でも100fs程度であり、十分な性能と言える。

使用したパルス圧縮器は有効径が12mm、エネルギー効率67%で、回折格子は金メッキである。この大きさのパルス圧縮器では入力パワーが1.5Wを越えたあたりから、回折格子の熱歪みによる出力ビーム品質の低下が顕著となり、必要な集光特性が得られなくなる。外挿すると54Wの出力を圧縮するためには、パルス圧縮器の口径を72mmにしなければならない。このサイズの圧縮器も製作は可能であるが、高価になる。我々は圧縮器内の回折格子を層流で強制空冷する方法を考案し、口径12mmの圧縮器で30Wのレーザー出力を圧縮し、圧縮後のM²値1.8を得た。強制空冷技術を用いれば、口径20mm程度の圧縮器で54Wパワーの増幅器出力を圧縮することができる。

本研究の一部は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省原子力試験研究費により実施されたものである。

参考文献

1. H. Kondo, T. Tomie, and H. Shimizu, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 2668 (1998).
2. J. Z. H. Yang and B. C. Walker, *Opt. Lett.* **26**, 453 (2001).
3. I. Matsushima, H. Yashiro, and T. Tomie, *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, L823 (2005).
4. I. Matsushima, H. Yashiro, and T. Tomie, *Opt. Lett.* **31**, 2066 (2006).
5. Y. Nabekawa, T. Togashi, T. Sekikawa et al., *Appl. Phys. B* **70**, S171 (2000).
6. D. Gaudiosi, A. Lytle, P. Kohl, M. Murnane, H. Kapteyn, and S. Backus, *Opt. Lett.* **29**, 2665 (2004).