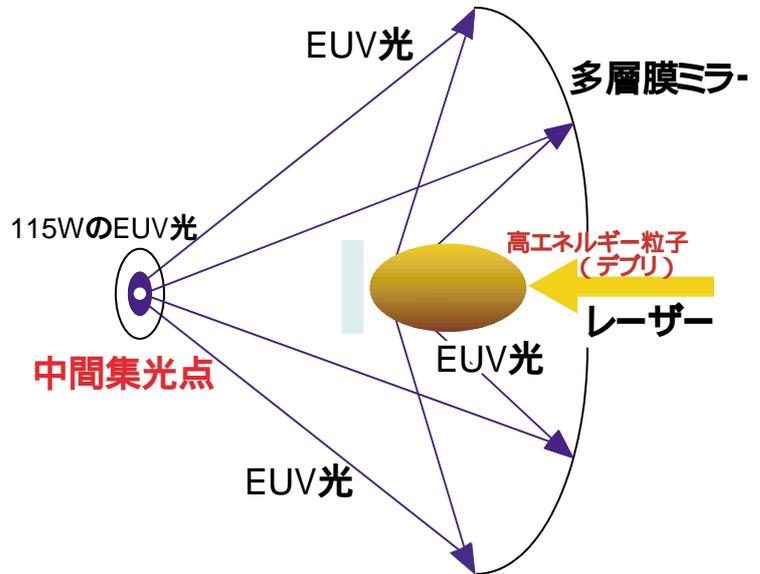


## CONTENTS

- 極端紫外(EUV)光源実用化における
- 高エネルギー粒子(デブリ)に関する研究
- 固体レーザー関連の国際会議、ウィーンで熱い議論
- ASSP'05国際会議報告
- 『光と蔭』教師の冥利
- 新産業創出に向けた
- LD励起大出力パルス固体レーザーの開発



【表紙図】極端紫外(EUV)光源実用機概念図

## 極端紫外(EUV)光源実用化における 高エネルギー粒子(デブリ)に関する研究

理論・シミュレーショングループ 古河裕之

### ■国内外におけるEUV光源開発の現状

EUV光源の実用化においては、大きく分けて4つの課題がある。

- 1) 高いEUV光出力を達成する。
- 2) 長寿命(半年程度以上)の光源を開発する。
- 3) ターゲットの高速供給技術を開発する。
- 4) 低コスト化をはかる。

2005年4月現在においては、国内外とも2)の観点から、多層膜ミラーの長寿命化(デブリからの保護)に重きを置いた研究開発が進められている。

ターゲット材料としては、キセノン、および錫が候補として挙げられてきた。2004年のEUVLシンポジウムにおいて、リチウムを用いた研究報告があり、大きな反響があったが、リチウムを用いた研究開発はキセノン、錫に比べまだまだ進んでいない。本報告では、キセノン、および錫に焦点を絞る。また、放電生成プラズマ方式のEUV光源開発も行われているが、本報告ではレーザー生成プラズマ方式に限定する。

### ■キセノンと錫の比較

多層膜ミラーの長寿命化(デブリからの保護)の観点から、キセノンおよび錫を用いた場合の比較を行う。

EUV光を高効率で発生させるために最適化したパラメータのレーザーをキセノンおよび錫に照射すると、10keV程度以上の高エネルギー粒子(デブリ)が発生する。レーザー技術総合研究所、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心、EUVA(極端紫外線露光システム技術開発機構)等の精力的な研究により、高エネルギー粒子発生メカニズムは、ほぼ明らかになってきた。これは、日本が世界に先駆けて行った研究であり、日本としての大きな成果である。その明らかになったメカニズムによると、高エネルギー粒子発生等に関しては、キセノンと錫ではほとんど差異はない。

### ■中性粒子の振る舞いに大きな差異が生じる

中性粒子が生成された場合、その多層膜ミラーへの影響はキセノンと錫で大きく異なる。上記と同程度のパラメータのレーザーをキセノンおよび錫に照射した場合、生成されるプラズマの電子温度は数十eV程度である。このようなプラズマで

次ページへつづく▶

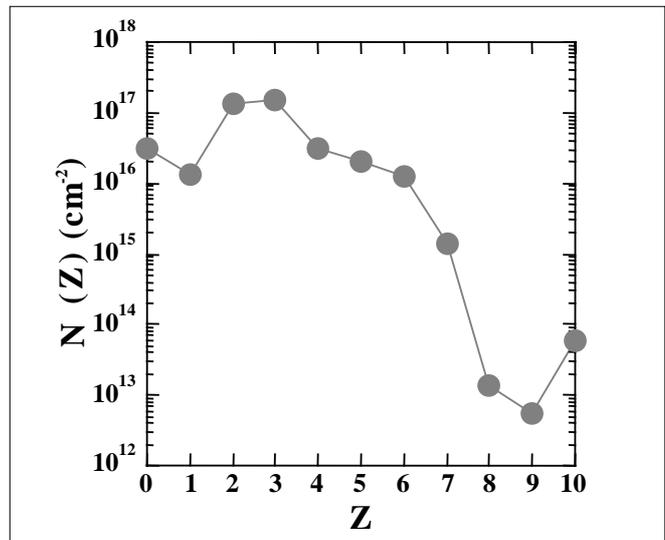
は、レーザー照射が終了した後、放射冷却により温度が下がり、放射性再結合等により価数の低いイオンや中性粒子が生成されることが予想される。キセノンを用いたEUVAの実験もそれを示唆する結果を示している。高エネルギーの中性粒子がミラーを損傷することに関しては、キセノンと錫で大きな差異はないが、低エネルギーの中性粒子の振る舞いに関しては、キセノンと錫で大きな差異が生じる。

中性の錫は金属であり、ミラーに付着しミラーの反射率を著しく低下させる。これはEUV光源実用機開発に関して非常に大きな問題であり、現在のところ本質的な解決策は見つかっていない。当研究所等で研究が進んでいる「質量制限ターゲット」が実用化されれば、錫に関して生成される中性粒子の数は大幅に低減されることが予想されるが、それを0にすることはできない。錫をEUV光源実用機のターゲットとして選択するのであれば、低エネルギーの中性粒子に対する根本的な対応が必須である。

■キセノンは電荷交換効果を低減させること等が課題である

キセノンは不活性気体であり、低エネルギーのキセノンがミラーに付着しミラーの反射率を著しく低下させる可能性はほとんどない。しかし、キセノンは錫と違い融点と沸点の温度差が4度ほどしかなく、液体キセノンターゲットの表面近傍は1気圧に近い蒸気圧環境下におかれ、多くの中性キセノン雰囲気ガスに囲まれていることが予想される。よって、Xeプラズマからの高エネルギー粒子は、多くの中性キセノン雰囲気ガスと電荷交換をしながら、再結合、放射冷却を伴い膨張すると考えられる。

そこで、本研究において開発した統合シミュレーションコード(LAFRAC)を用いて、ピーク強度 $10^{11} \text{W/cm}^2$ 、パルス幅8ns、



【図】統合シミュレーションにより求めた、電荷ごとの高エネルギー(500 eV以上)の粒子数分布

波長1064nmのレーザーを液体キセノンターゲットに照射し、レーザー終了後50ns時の電荷ごとの高エネルギー(500eV以上)の粒子数分布を評価した。電荷交換効果、電離過程、再結合過程、放射冷却、流体としての膨張等を考慮している。図はその結果である。3価のイオンがEUVAの実験結果より多めに生成されているが、その他はよく一致している。中性粒子の割合は、おおよそ全体の1割程度、という結果になった。

中性粒子はイオンと違い、電場磁場で制御することができないため、その影響を低減することはイオンの場合に比べ非常に困難である。今後当研究所をはじめ、EUV光源開発に携わっている研究機関全てが、全力をあげて取り組むべき課題であると言える。

## 固体レーザー関連の国際会議、ウィーンで熱い議論 ASSP'05 国際会議報告

主任研究員 藤田雅之

◆ASSP'05開催される

去る2月6~9日、ウィーンのインターコンチネンタルホテルで、固体レーザー関連の国際会議であるASSP'05 (Advanced Solid-State Photonics 05)が開催された。例年、小規模な展示会やセミナーが併設されている。今年の参加者は約320名(うち、レギュラー登録183名、学生登録34名、出展者37名、EUのスポンサー66名)であった。口頭発表は51件で他は3セッションに分かれたポスター発表という構成である。連日、零下の日が続く真冬のウィーンで熱い議論が交わされた。

◆ハイパワー固体レーザーの動向

平均出力1.4kWのNd:YAGスラブレザーが独・フラウンホーファー研究所から報告された。2つの並行する増幅器段の出力を重ね合わせ、パルス幅16ns、繰り返し10kHzで平均出力1.4kWを達成している。ビーム品質も $M^2 < 1.2$ と良好である。EUV光源ドライバーとして有望なレーザーである。

欧米でもセラミックスレーザーの開発が進んできている。US Armyから8%高ドープNd:YAGセラミックスレーザーの報告があった。単結晶Nd:YAG(1%ドープ)と性能を比較してお

り、12mJの励起に対して5mJの出力を得ている。また、レーザーセンター・ハノーバーでは周囲をundoped YAGで取り囲んだセラミックNd:YAGレーザー(0.3%ドープ)の開発を行っている。300Wのファイバー出力半導体レーザーで励起し、スロープ効率78%、光-光変換効率64%を達成していた。

#### ◆フェムト秒レーザー開発の方向性

これまで主に米国で開催されてきたASSP国際会議がヨーロッパで開催されるということでフェムト秒レーザーの講演が多数行われた。流れとしては、10fs前後の超短パルス発生と数百fsのYb系固体レーザーの開発に分かれてきたように見受けられる。10fs前後のパルス発生では、フォトニッククリスタルファイバー(PCF)や希ガス中の中空ファイバー内での自己位相変調によるバンド幅拡張が主に用いられている。PCFは低エネルギーで中空ファイバーは高エネルギーで用いられている。

#### ◆10フェムト秒の超短パルス発生

ウィーン工科大学では、Ti:Sapレーザーシステムからの10fs, 4mJのパルスをAr充填中空ファイバーを用いてバンド幅を広げ再びパルス圧縮をすることにより6fs, 1mJ出力を達成している。スイス工科大学では、Yb:YAGレーザー発振器からの760fsの光をファイバーに通しバンド幅を広げプリズム対で圧縮することで24fsパルスを得ている。Yb:YAG自体はバンド幅がさほど広がらないための工夫であろう。ブダペスト大学では、Ti:Sap発振器からのパルスをチャープミラーでプリ圧縮し、PCFでバンド幅を広げた後にプリズム対で再圧縮し5.7fsを実現

している。また、ウィーン工科大学は同様の手法に液晶位相変調器を導入し位相補償を行い、5.5fsパルスを実現している。これらの超短パルス発生は半値幅での競争であり、パルスの形自身はプリパルスが重なり合ったものである。

#### ◆数百フェムト秒では

一方、数百フェムト秒レベルのYb系固体レーザーの開発も盛んである。JENOPTIKからは280fsのYb:KYW再生増幅器の報告があった。繰り返しは200kHzで平均パワーは1Wである。ストレッチャーを用いずにシステム分散でパルス幅が広がることを利用している。仏・オルセーのCNRSはYb:CaF<sub>2</sub>レーザー発振器の開発を進めている。1,000nm~1,072nmの範囲で波長可変であり、パルス幅150fs、平均パワー0.9Wあるいは、パルス幅230fs、平均パワー1.7Wを達成している。また、同じ研究所でYb:SYS結晶にヒートシンクとしてundoped YAGを接合したレーザー結晶で135fsのパルス発生を実現している。出力1Wの発振器である。

#### ◆フォトニックファイバーの普及

フォトニッククリスタルファイバー(PCF)が安価で入手出来るようになり、超短パルス発生分野で積極的に用いられている。超短パルスの発生にはバンド幅が広い光源が必要であるが、システムの途中あるいは最終段でPCFの非線形性を利用して自己位相変調によりバンド幅を広げる手法が定着しつつある。しかし、現状ではスペクトル内で位相が複雑な変調を受けているためクリーンなパルス発生は実現していない。今後は、いか

山中千代衛



.....103

## 教師の冥利

世間では法師、医師、教師と3つの師がつく職業がある。かつては聖職と尊敬された役目であった。最近言葉が乱れているからだろうが、看護婦も男性が混じるため看護師が使えないと称して看護師という。むかし機関手とか消防手、運転手など技能を如実に表していた職種名も土に置き換わった。いずれジェンダーフリーの世の中だから土はまずいし、証人とか見物人とか人はとても使い勝手が悪いのでまた師を使うことになるかも知れない。

教師仲間では互いに先生と呼び合っている。政治家も同じだ。中国語ではミスター位の意味しかないそうであるがちょっと面映ゆい呼び名だ。

閑話休題。世の中をよくするのもわるくするのも人次第である。教育が如何に大事かは多言を要しない。教師たるものの責任はきわめて重大である。50年先の社会のリーダーは間違いなくすべて現在の小児の中から生まれる。この子供達を如何に教育するかが国の将来を決定的に支配するのは火を見るより明らかだ。今の日本のおかれた状況は1950年代昭和25年を中心の20年にいかなる教育を幼児に施したかの結果に完璧に支配されている。「三つ子の魂百まで」と言う通り、この人格的な支配力は如何ともなし得ないのである。

これが昭和敗戦の現実的成果そのものと認識すべきであろう。

長年教師を務めると人の成長の過程が身にしみてよく分かる。こういう気質でしかじかの能力の人はどのように成長し、30年の年月の後いかにあるかがすべて検証出来るのである。予測以上に伸びる人もあれば、ある年月の後バッタリ成長の止まる人もある。この理由を色々反省するのも教師の務めである。やっぱり志が第一かと思う。「天の時、地の利、人の和」を十分に勘考することも大切である。その上、向上には若さが何よりも必要な条件である。物事を成就するには日時が不可欠なことはまさに天道の示す通りである。これが「若人よ大志を抱け」の格言に結集するのだ。新学期に当たり若人に贈るOld Boyの言葉である。

【(財)レーザー技術総合研究所 研究所長】

に位相補償を行い、プリパルスのない超短パルスを実現するかが技術開発の課題であると考えられる。

今回は、2006年1月29日から米国のLake Tahoeで開催される。

【写真】真冬のベルヴェデーレ宮殿



NEWS

## 新産業創出に向けた LD励起大出力パルス固体レーザーの開発

浜松ホトニクス(株)中央研究所 川嶋利幸

**高**い光子密度により、大面積を高スループットで加工・処理できる産業用大出力レーザーの実現を目指して、大パルスエネルギー(20 J)、高ピーク出力(2 GW)、高繰り返し率(10 Hz)で動作する半導体レーザー(以下LD)励起固体レーザーの開発研究を行っている。

**大**出力の固体レーザーにおいては、固体レーザー媒体中に発生する熱の影響による熱レンズ効果や熱複屈折が不可避な問題であり、これらをどのように制御するかということが最大の課題となる。われわれは、スラブ(平板)状の固体レーザー媒体中を内部全反射によりジグザグにレーザー光が伝搬し、熱効果が自動的に解消される特長を持つジグザグスラブ方式のレーザー増幅器を採用した。まず、実際のスラブレーザーの熱効果を解析するために、(財)レーザー技術総合研究所にて開発されたジグザグスラブレーザー熱解析コードを基にシミュレーションを行った。熱レンズ効果等が最小となるようなLD励起分布、スラブ周囲の断熱等の条件を見いだすことにより、スラブ増幅器の設計を確立した。

**平**成15年度に1次試作として、パルスエネルギー5 JレベルのLD励起固体レーザーを開発した(写真参照)。このレーザーは、浜松ホトニクス(株)が開発した世界最大級のピーク出力290 kWを光強度2.5 kW/cm<sup>2</sup>で発生する固体レーザー励起用LDモジュールを搭載したNd(ネオジウム)をドープしたリン酸ガラスをレーザー媒体とした水冷ジグザグスラブレーザー増幅器を主増幅部とした多重パス型MOPA (Master Oscillator and Power Amplifier) システムである。

**昨**年度中にパルスエネルギー5.1 J(パルス幅20 ns)、繰り返し率10 Hz、回折限界の5倍のビーム品質の発生を確認し、所期の目標を設計通りに達成した。その後、さらなる励起光分布の制御によるレ

ザースラブ内部の熱分布の均一化を進めた結果、事実上熱レンズ効果を無視できるまでレーザー光の波面歪みを低減し、現在は平均出力84 W (8.4 J x 10 Hz) を回折限界の2倍のビーム品質で得られるまでになっている。熱的に制御されたジグザグスラブレーザー増幅器は、システム中に可変ミラー等の複雑な波面補正デバイスを必要としないため、信頼性や安定性が求められる産業用大出力レーザーの基盤技術となることが期待できる。

**現**在、開発研究は2次試作の段階に入っており、すでにLD励起パワーとともにレーザースラブの口径を3倍まで拡大したスラブ増幅器とレーザーシステムの設計が完了している。今後システム全体を構築し、パルスエネルギー20 J(ピークパワー2 GW)レベルを繰り返し率10 Hzで、すなわち平均出力200 Wを平成17年度中に達成する予定である。

**最**後に、このようなLD励起大出力パルス固体レーザーの技術は、将来のレーザー核融合発電炉のための超大出力レーザードライバーの開発へ発展することが期待できる。炉用ドライバーの実現には、レーザー出力のスケール拡大則を実証しながら効率的に開発を進めることが重要で、本開発研究の成果がその第一歩となることを期待している。

**本**研究の一部は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、基盤技術研究促進事業(民間基盤技術研究支援制度)の委託研究プロジェクト(平成13年度から平成17年度)として、浜松ホトニクス(株)が受託し、(財)レーザー技術総合研究所と大阪大学レーザーエネルギー学研究中心に研究の一部を再委託して行われている。

【写真】開発された5 J、10 Hz出力のLD励起ジグザグスラブレーザーシステム。今後、熱制御された大口径スラブにより20 J、10 Hz出力までスケールアップされる計画である。

