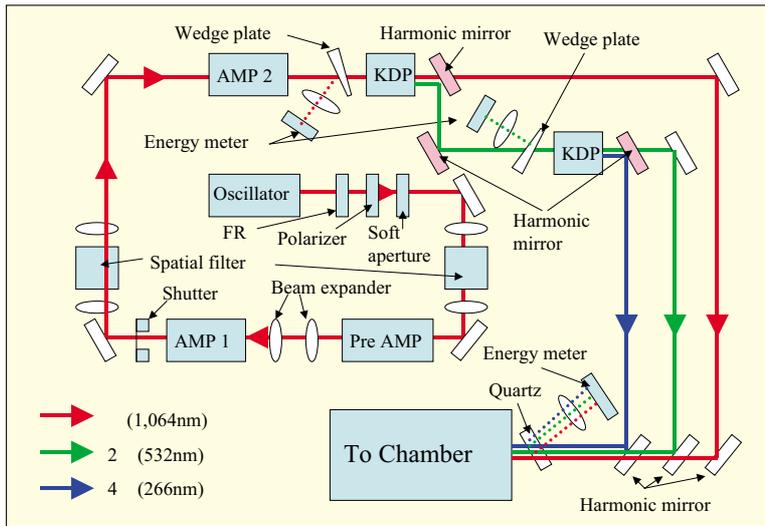
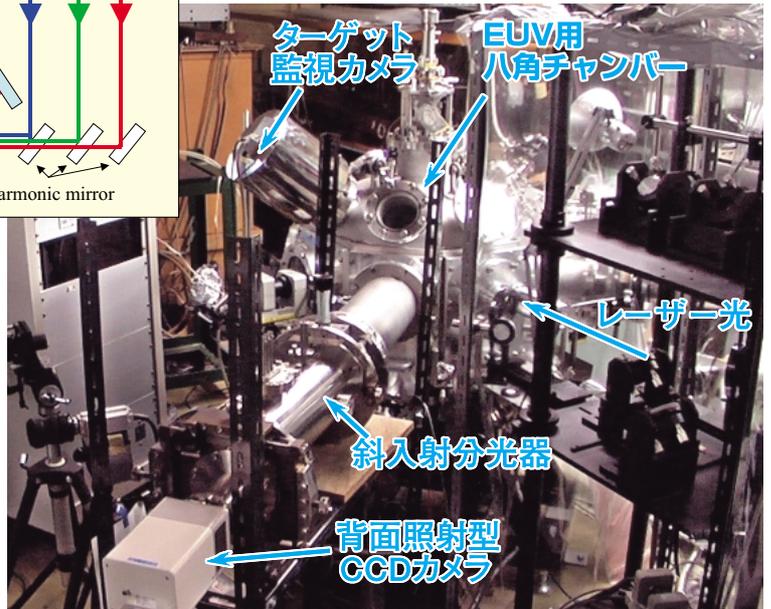


## CONTENTS

- EUV光源開発の研究に関する進捗
- 『光と蔭』大阪大学レーザーエネルギー学研究中心発足を祝う
- 第46回米国物理学会(APS DPP)報告



【図】レーザシステム構成図  
【写真】EUV用計測チャンバーおよび斜入射分光器



## EUV光源開発の研究に関する進捗

レーザービーム伝送研究チーム 山浦道照  
理論・シミュレーショングループ 砂原 淳

### ■レーザー波長選択の重要性

EUV光源開発では、高効率、低デブリの要求に加え、最近では、装置の低コスト化も国内外の会議において熱心に議論されている。レーザーを用いて、ターゲット(錫、キセノン、最近ではリチウム)からEUV光(13.5nm)を取り出すレーザープラズマ方式において、波長選択は、高効率、コストを考慮する上で非常に重要である。現在、Nd:YAGレーザーの基本波

( $\lambda = 1,064 \text{ nm}$ )、炭酸ガスレーザー( $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ )、エキシマレーザー(例、KrF  $\lambda = 248 \text{ nm}$ )などが候補として挙げられており、様々な研究機関でデータ収集、解析が精力的に行われている。

### ■レーザースポット径500 $\mu\text{m}$ での実験

大きなレーザースポット径を用いることで、プラズマの膨張損失を抑え、高い変換効率が得られることを激光XII号の実験

次ページへつづく▶

より明らかにした。(「レーザークロス」04年10月号参照)。また、1次元シミュレーション計算結果との比較を行う上でも、大きなレーザースポット径を用いた実験は理にかなっている。

ターゲットからEUV光を発生させるためには、 $10^{10} \sim 10^{11}$  W/cm<sup>2</sup>程度のレーザー照射強度が必要であり、スポット径が大きくなればなるほど高いレーザーエネルギーが要求される。

■4ω照射時の錫プラズマからのEUV放射特性

市販されているエキシマレーザーのほとんどは、エネルギーが最大、数百mJ、パルス幅15~30 ns程度であり、500 μmのレーザースポット径でEUV光を発生させるのは困難である。レーザー波長選択の指針を与えるためには、紫外領域のレーザーを用いたEUV光源に関するデータが必要不可欠である。

そこで、当研究所では最大レーザーエネルギー1J(ターゲット上)、パルス幅6.5 ns、Nd:YAGレーザーの4倍高調波光(4ω = 266 nm)を用いて、レーザースポット径500 μmでの錫プラズマからのデータ収集、解析を精力的に行った。錫プラズマからのEUV放射スペクトルを斜入射分光器(反射型回折格子1,200本/mm、スリット幅300 μm、分解能0.065 nm)と背面照射型CCDカメラを用いて、ターゲットノーマル方向から45度の位置で記録した。EUV放射角度分布特性は、EUVカロリメーターの仰角0~60度の範囲で計測した。このカロリメーターは、ジルコニウム(Zr)フィルター1枚とMo/Si多層膜ミラー1枚およびPINダイオードで構成され、13.5 nmの4%バンド幅内のEUV光強度が計測可能であり、弧状のアンクル(ターゲットノーマル方向から45度の位置に設置)に取り付けられている。比較のためにNd:YAGレーザーの基本波(λ = 1,064 nm)、2倍高調波(2ω = 532 nm)、レーザーエネルギーは、それぞれ最大40 J、10 J、パルス幅はそれぞれ10 ns、7 nsでの実験も行った。

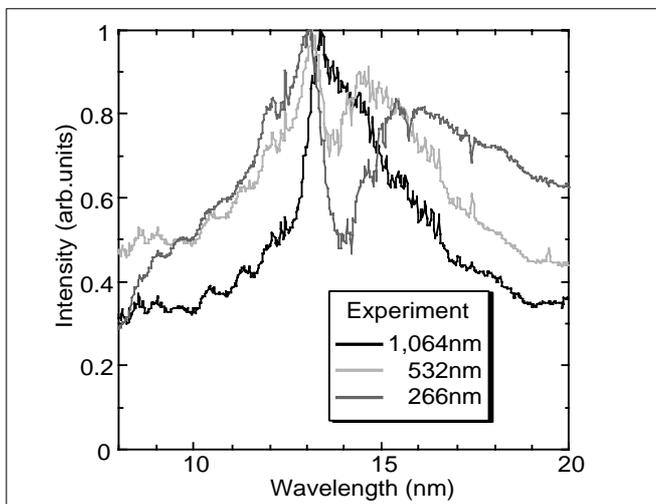
図1に、2、4照射時の錫プラズマの放射スペクトルを示す。レーザー照射強度は、それぞれ $4.9 \times 10^{10}$ 、 $4.4 \times 10^{10}$ 、 $2.5 \times 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup>である。その結果、2、4ともに13.5 nm近傍に吸収領域が観測され、特に4照射時は、この吸収領域が最も大きく観測された。一方、照射の場合13.5 nm近傍に吸収領域は観測されなかった。図2に、2、4照射時の錫プラズマからのEUV光放射角度分布特性を示す。レーザーの短波長化とともに、EUV放射分布は、 $\cos^{0.5}$ 、 $\cos^{0.8}$ 、 $\cos^{1.3}$  となり尖鋭化される結果となった。これらのEUV光放射スペクトル構造および放射角度分布特性から、特に4照射時のEUV発光領域の周辺には、高密度の吸収領域の存在が考えられる。

また、Mo/Siミラーの反射率は、13.5 nmの2%バンド幅内で最大値を示し、その値は約70%であるが、MoもしくはSi層の膜厚調整によって、反射率の最大値を13 nmに設計することも可能である。4照射時のEUV放射スペクトルは、約13 nmに尖鋭的な最大値があり、EUV光源の使用レーザーになりうると期待される。

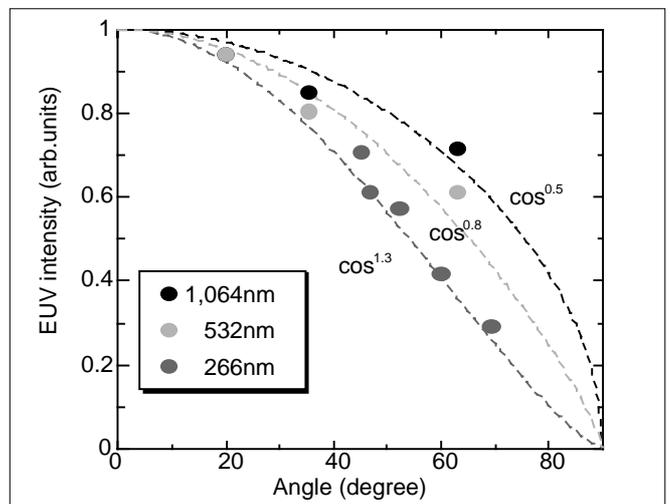
■シミュレーション結果からも吸収領域再現

開発した一次元ラグランジアン放射流体コード(Star-1D)を用いて計算を行った。本コードはイオンと電子の2温度一流体近似の一次元流体コードに、EUV放射過程をシミュレートするのに必要な物理過程を導入したもので、逆制動放射によるレーザー吸収、電子熱伝導、多群拡散近似による輻射輸送、状態方程式等を考慮する。また輻射輸送計算に使用するX線放射率、吸収率は詳細な電子配置を考慮するHullacコードを用いて計算された値を用いた。

図3は10 nsのガウシアンパルスで錫ターゲットにレーザー波長をそれぞれ1.06 μm、0.53 μm、0.26 μmと変化させて照射



【図1】レーザー波長の違いによる錫プラズマからの放射光スペクトル(実験結果)

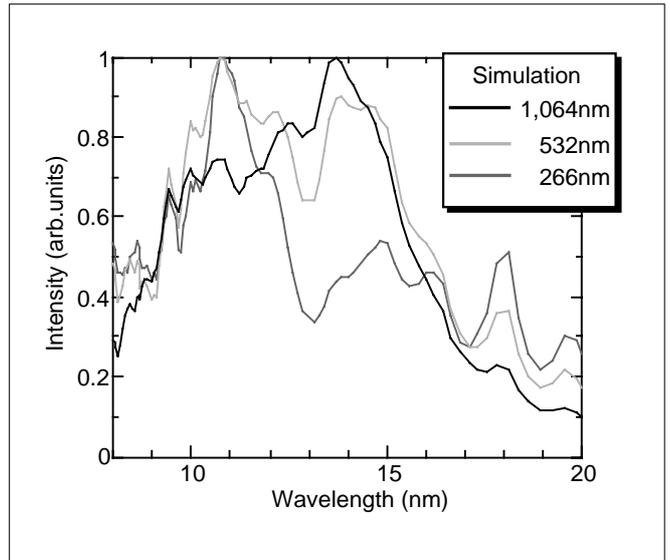


【図2】レーザー波長の違いによるEUV光放射角度分布特性

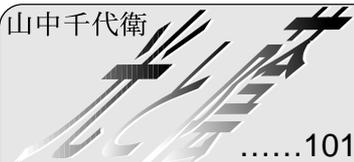
した場合のX線スペクトルである。0.53  $\mu\text{m}$ 、0.26  $\mu\text{m}$ の場合に13.5nm付近にdipが見えており、明らかに吸収スペクトルを示している。このことは13.5nm放射のプラズマ中における自己吸収が短波長レーザー照射時に顕著であることを示している。短波長レーザーになるほどレーザー光の臨界密度が高くなるため、高密度で比較的低温のプラズマが生成され、13.5nmのライン放射部分に関して光学的に厚い状態が形成される。このとき、X線強度はプランク分布でリミットされるため、より低温部分から放射される13.5nmだけが低い強度に抑えられることになる。シミュレーション結果と実験で得られたEUV光スペクトルを比較すると、実験で得られたスペクトルと定性的によく一致する。

#### ■次はデブリ対策

これまで報告例のない4 光のレーザーを用いて、錫プラズマからのEUV放射光を計測し、13.5 nm 近傍に大きな吸収領域を観測した。この吸収領域は、シミュレーション結果からも



【図3】レーザー波長の違いによる錫プラズマからの放射光スペクトル(シミュレーション計算結果)



## 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター発足を祝う

去る1月12日(水)汗里阪急ホテルにおいて祝賀行事が開催され250人を超す参加者が新センターの発足を祝った。式典では井澤靖和センター長の式辞に始まり、阪大 宮原秀夫総長に代わって鈴木 直副学長の挨拶を皮切りに、芦立 訓文科省学術機関課長、本島 修核融合科学研究所長、伊藤弘昌東北大電気通信研究所長が祝辞を述べついで記念講演会が開かれた。

立花 隆氏が阪大レーザー核融合研究センターが素晴らしい業績を上げ国際的評価が高く、ロビンハーマンの著述ではunparalleled reputationを受けたとしているのに、日本国内の某記者の訳本では分不相応の名声と訳されていて評価が不当だと強く批判した。今度のレーザー核融合研究センターと超伝導フォトンクス研究センターとの合併を結婚式にたとえ絶妙のバランスだと新センターは大変なおほめの祝辞を頂戴した。このあと電通大レーザー研の植田憲一センター長と阪大の三間園興副センター長からレーザー科学への展望が話された。

祝賀会ではレーザー学会 豊田浩一会長、金森順次阪大元総長、齊藤紀彦関西電力常務、アイシン精機 木村彰男社長の祝辞があり、筆者の乾杯で祝賀パーティーが始まった。

1976年発足のレーザー核融合研究センター(ILE)は今年30周年を迎えたが、この間諸々の障害を克服して世界でトップレベルの核融合研究を展開してきた。30年前を回想するとその夏ニューハンプシャーの山奥、ティルトン校でのGordon Conferenceに出張中、手塚 晃文省研究助成課長より突然電話があり「山中さん、貴方の提案のレーザーエネルギー研究所は大蔵省の注文で核融合を入れよとのこと、ぜひレーザー核融合を冠して欲しい。内容的には広く研究を展開してもらって結構です」という。ハイパワーのレーザーで出来ることは何でもと考えていたが核融合を中心にするのは元より異存なくOKした。「法をおこして全国共同利用センターも考えられるが、この際スタートすることを第一にしては」との教示もあり現在の形で動き出した。30年たって本来の姿に回帰したといえよう。考えればレーザー異常吸収の発見に始まり、キャノンボールターゲットではLLNLの秘蔵するホーラムターゲットのマル秘を明かし、ランダム位相ビームで均一照射を初めて実現し、1972年以来のエドワード テラー提案の目標値正規密度の1,000倍の燃料圧縮を達成した。テラーは山中教授が第3コーナーを回ったと表現した。現在ILEはLLNLのNIFという大艦巨砲に高速点火で対抗している。ぜひ核融合研究の優位な立場を大切にしつつ新しい科学に対応して頂きたいものだと乾杯のこたばを献上した次第である。

ただエネルギー学というのはロチェスター大学のLaboratory of Laser Energeticsのエナジェティクスをとったと思われる節が気になるがわれわれは真似をしたことはない。

何はともあれ新研究センター発足おめでとう。

【(財)レーザー技術総合研究所 研究所長】

忠実に再現された。これらの成果は、レーザー波長選択への一つの指針を示すことに寄与した。

今後は、ターゲットからのデブリ対策として必要質量制限ターゲット(Mass-Limited Target)の適用、さらに、このMass-Limited Targetをレーザー照射位置まで供給する手法の開発に取り組み、次々世代半導体製造装置実用化への基盤を築く所存である。

本研究は、文部科学省リーディングプロジェクト「極端紫外(EUV)光源開発等の先進半導体製造技術の実用化」のもと、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターとの共同研究である。また、輻射輸送計算で用いた原子過程データに関しては、原研関西研、岡山大、奈良女子大、核融合科学研、山梨大、北里大、都立大との共同研究として検討が続けられてきたものを使用した。

REPORT

## 第46回米国物理学会(APS DPP)報告

理論・シミュレーショングループ 砂原 淳

### ■米国ジョージア州のサバンナで開催

2004年11月15日から19日まで、第46回米国物理学会プラズマ物理部会(APS DPP)に出席しました。場所はジョージア州サバンナ。サバンナと言われてもピンと来なくて、「え？アフリカ？」と聞かれること数人。でもアメリカ独立時のジョージア州の州都(現在はアトランタ)であり、古くから港町として栄え、アメリカ人にとっての小京都といった感じの町。その町を流れるサバンナ川の中州にあるコンベンションセンター(写真)がAPSの会場でした。



シヨンの報告があり着実に定量的評価が少しずつ進歩しています。

### ■理論と実験が協力したシナジー効果

また、直接照射に関してはロチェスター大の元気のよさが際立っている印象でした。数値シミュレーション屋にとっては非常に重要なデータであるレーザー吸収率の高精度測定がDr. Sekaによって行われた他、Dr. Goncharovによるレーザー吸収領域の理論モデリング、そして、クライ

### ■パルスパワー研究の成果

初日の朝はSandia研のDr. MATZENによる招待講演「REVIEW OF PULSED-POWER-DRIVEN HIGH ENERGY DENSITY PHYSICS AND INERTIAL CONFINEMENT FUSION RESEARCH」で始まり、EOS実験や輝度温度150eVにもなるX線を用いたOpacity実験、爆縮実験、MHDコードの開発等、サンディアのパルスパワー研究が着実に成果を出してきていることを実感させられる講演でした。

### ■定量的評価が徐々に進歩

米国では現在、リバモアにNational Ignition Facility (NIF)を建設中であり、NIFの点火実証実験に向けた研究が進められていますが、NIFだけではなくサンディア研もZピンチによる点火を目指しており、米国の慣性核融合研究の層の厚さを実感せずにはいられません。NIFが既に数本のビームラインを立ち上げてレーザー照射実験を開始した今日、いよいよ点火プラズマ実現が目前に迫ってきています。NIFのメインの実験となる間接照射による点火達成に対してはホーラム(レーザーを爆縮用のX線に変換する部分)内外のレーザー・プラズマ相互作用が最大の懸念であり、リバモア研を中心に多数の理論シミュレ

ーオ爆縮実験の2次元爆縮コードによる解析等、NIFでの直接照射実験に向けて理論、実験が協力し、最大のシナジー効果を発揮しているという感じです。現在、ロチェスターで進められている高速点火用ベタワットビーム建設(OMEGA-Extended Performance: OMEGA-EP)が成果を出し始める次回以降のAPSではさらに元気になるのだろうか？と、ため息が漏れる思いでした。

### ■非局所電子熱輸送についての計算スキームを発表

私自身は非局所電子熱輸送についての新しい計算スキームについて発表し、議論を行ってきました。非局所電子熱輸送が絡むレーラー・テラー不安定の成長を直接シミュレーションするため、2次元フォッカー・プランクコードを開発し、流体コードに結合させようとしているところです。

### ■次回はコロラド州デンバー

余談ですが、サバンナからの帰り、航空会社のオーバーブッキングのため予定の飛行機に乗れず、2日遅れで帰ってきました。らちの明かない空港の担当者とのやりとりで疲れしました。何事も言うはやすしですがこれくらいのことを平気な顔をして乗り越えていくぐらいのタフさが、研究にも必要なのでしょう。次回のAPS DPPはコロラド州デンバーで開催されます。