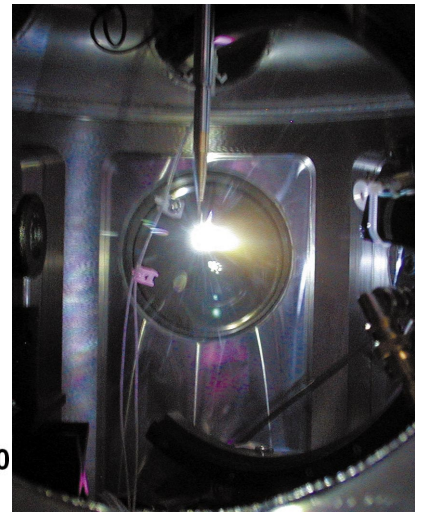
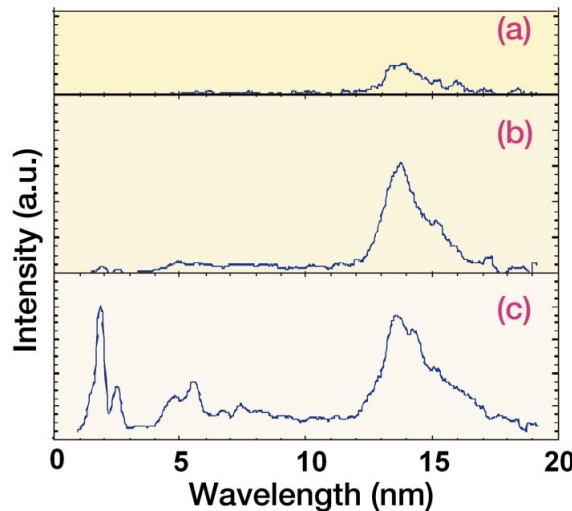


CONTENTS

- 極端紫外(EUV)光源研究の現状
～次世代リソグラフィーの光源として注目～
- 『光と蔭』『パイオニア』の想い
- 会議参加報告
International Workshop
on Lasers & Nuclei



【図1(左)]透過型回折格子分光計測装置で得られたEUV放射スペクトル
(a) 8.8×10^{10} , (b) 3.0×10^{11} , (c) $9.0 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$
【写真(右)]EUV発生条件でレーザー照射された錫ターゲットの発光

極端紫外(EUV)光源研究の現状 ～次世代リソグラフィーの光源として注目～

■ 激光XII号レーザーを用いた球状錫プラズマからのEUV光発生
レーザープラズマからの高強度放射光は幅広い応用が期待されている。その中で、極端紫外(EUV)の研究が次世代リソグラフィーの光源として注目されている。次世代リソグラフィーの光源として必要なEUVパワーは、100W以上(波長13.5nm、2%バンド幅)であり、これを満足させるためには高効率の光源が不可欠である。

EUV光源にはレーザープラズマ方式と放電プラズマ方式とがある。レーザープラズマ方式はプラズマ密度が高く、点光源のプラズマが生成できる利点を持つため、高効率のEUV光源として期待できる(レーザー・クロスNo.150)。レーザープラズマ方式は世界各国で研究が行われてきた。今までの実験は、1Jクラスのレーザーであったため、プラズマスケール長より小さなレーザースポットサイズで実験が行われた。そのため、実

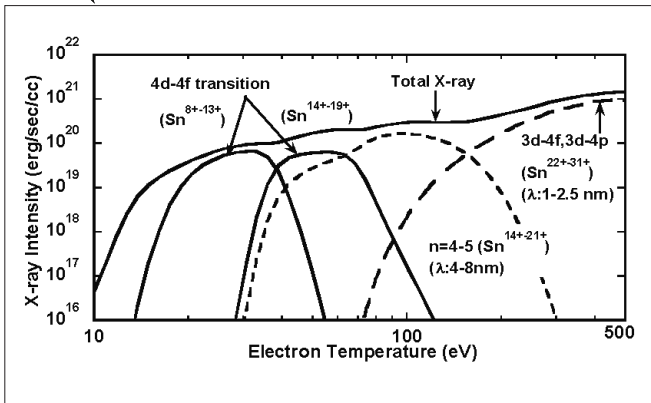
レーザービーム伝送チーム 島田義則

験結果には、プラズマ膨張損失、横方向に拡散する熱の損失、低イオン化の錫原子によるEUVの吸収等の影響が含まれ、レーザーからEUVへの変換効率を低下させる要因であったと考えられる。これらの影響を最小限に抑えるために激光XII号レーザーで、錫球を球対称に照射することにより擬似的に1次元プラズマを生成させ、レーザーからEUV光への変換効率の達成、EUV光のレーザー強度依存性の把握、1次元シミュレーションとの比較を目的として実験を行った。

■ 錫球プラズマからのEUVスペクトル計測

透過型回折格子分光計測装置を用いて錫球プラズマから放出されるEUVスペクトルを計測した。ターゲットは直径700 μm から750 μm のプラスチックに錫を1 μm コートした球状ターゲットを使用した。レーザーパルス幅は1.2nsで、レーザーエネルギーを変化させることにより、ターゲット表面でのレー

次ページへつづく▶



【図2】X線強度の電子温度依存性(東京工業大学河村徹氏より)

レーザー強度を $2 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ から $1 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ まで変化させた。

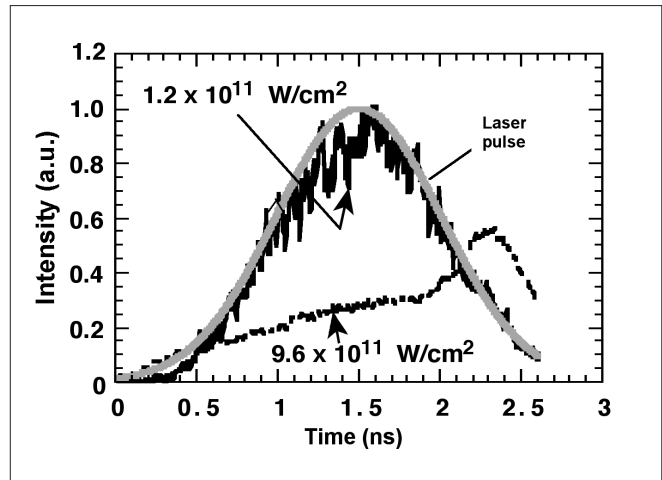
図1に波長分解スペクトルを示す。低レーザー強度(図1(a))では13.5nm付近のみの放射であるが、レーザー強度を増加させると13.5nm付近の放射量の増加とともに、1-2.5nm、4-8nmの放射が現れる(図1(b),(c))。

これらのピークがどの遷移から放出されているかを同定するために計算機シミュレーションの結果と比較を行った。図2に各遷移間のX線強度の電子温度依存性を示す。レーザー強度を変化させるとプラズマの電子温度が変化する。電子温度の違いにより錫のイオン価数が違うために放射される波長が異なる。100eVを超えると、波長1-2.5nmの放射が支配的で、電子温度が下がると錫イオン価数は変化し、放射される波長が長くなる。約40-200eVでは主量子数が5から4に遷移する際に放出される波長4-8nmの放射が支配的で、電子温度が20-40eVでは方位量子数のみが変わる4d-4f遷移が支配的となり、12-17nmを放射する結果を得た。

■レーザー強度変化に伴うEUV光の時間発展

上述の波長1-2.5nm、4-8nmおよび12-17nmの放射が、どのタイミングで放射されているかストリークカメラを用いて13.5nm付近のEUV光の時間発展を計測した。結果を図3に示す。低レーザー強度($1.2 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$)では、レーザーパルスに沿ってEUV光は放射される。しかし、高強度になるとEUV光のピーク位置は時間的に遅れる。この現象は上述のX線放射の電子温度依存性により説明できる。レーザー強度が高いときには錫イオン価数が大きくなり(22価以上)、1-2.5nm、4-8nmの放射が支配的である。その後、電子温度が低下し、再結合等によりイオン価数が8から13となると、12-17nmの放射が開始される。このため時間的に遅れる。

図4にレーザー強度を変化させた場合のレーザーからEUV光への変換効率を示す。レーザー強度を $0.5-1 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ にした場合もっとも効率がよく、世界最高値の3%を示した。(平



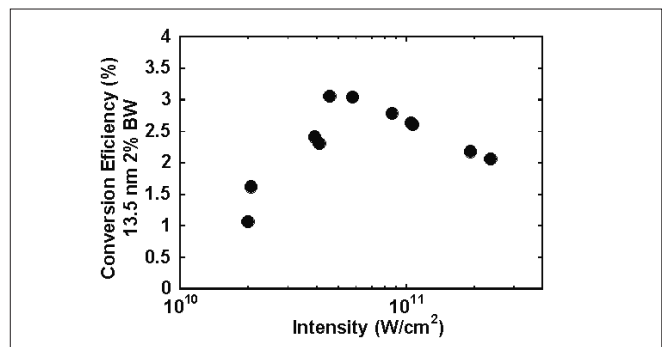
【図3】レーザー強度を変化させた場合の波長13.5nm付近のEUV光の時間発展

板を小さなスポット径で照射した場合の変換効率は1~2.5%程度)。照射したレーザー強度が最適レーザー強度よりも高い場合には錫のイオン化が進み、短波長の放射が支配的となり、結果的に12-17nmの放射が相対的に低下し、変換効率は低下する。他方、低レーザー強度ではレーザーの吸収効率の低下、それによりイオン化が十分に進まないために変換効率は低下する。

■今後の研究課題

球状錫ターゲットを照射することにより、1次元プラズマに近い条件を作りだし、変換効率を3%まで高めることに成功した。この成果はEUV光源開発に立ふさがる障壁を大きく低下させるものと期待している。

今後は、さらに変換効率を向上させるためにレーザーパラメーターの最適化(レーザー波長、パルス幅)を行う。また、プラズマ密度計測、温度計測、デブリ観測およびその対策の研究も重要であり、上述と平行して研究を進める。本研究は、文科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共同で実施した。



【図4】レーザー強度を変化させた場合の変換効率



会議参加報告

**International Workshop on Lasers & Nuclei:
Applications of Ultra-high Intensity Lasers in Nuclear Science
Gartensaal, Karlsruhe Schloß, Karlsruhe, 13th-15th Sept. 2004**

レーザーエネルギー研究チーム **今崎一夫**

■開催場所はドイツ・カールスルーエ

標記会議に参加した。開催日時は9月13～15日で、開催場所はドイツ・カールスルーエ(Karlsruhe)。参加者はヨーロッパ(ドイツ、フランス、イギリス、オランダ、スウェーデン、ルクセンブルク、ベルギー、スイス、チェコ)を中心にアメリカ、日本、南アフリカ、イスラエルから、参加人数は参加者リストによると51名である。

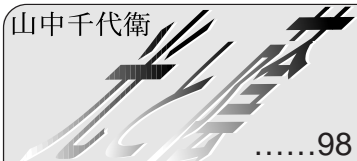
■主催はEC 7カ所にあるITU

主催はInstitute for Transuranium Elements (ITU)である。ECの研究機関としてKarlsruheにある。これはEC全体で7カ所あり、所在地もスペイン、ベルギー、イタリア等である。ITUは、40年前に設立されたTRUに特化した研究所である。ドイツからは独立でECの政策のもとに動いている。

■UやThの核分裂をレーザーで引き起こす

レーザーを使った核変換物理の研究をJeanやRALの装置を使

山中千代衛



「パイオニア」の想い

レーザー核融合のパイオニアと題する本を作ろうとマドリッド工科大学核融合研究所(DENIM)の所長Guillermo Velardeから相談を持ちかけられたのは2002年の秋

であった。そこで検討を加えクリスマス前にしかるべしと思う執筆者候補のリストを送った。長らく親交のあった仏のA. Dautray、米のJ. Nuckolls、J. Emmett、R. Kidder、W. McCrory、K. Boyer、S. Bodner、G. Yonas、N. Basovが亡くなったのでロシアのO. Krokhin、V. P. Smirnov、英のM. Key、独のG. Witkowski、R. Sigel、R. Bock、伊のA. Carsoなどを推薦した。すでに引退した人もあり、連絡するのに難しい面もあったが、Velardeはねばり強く働きかけてくれた。

さて、内容をどうしようかと言うのでいろいろと相談にのり、やりとりの末ガイドラインとして

- (1) なぜICF研究を始めたか?
- (2) 手始めステップと問題点のいろいろ
- (3) あなたの寄与と成果、とくに未公開のエピソード
- (4) 将来展望への意見

ときまった。ところで原稿のメ切を2004年の6月としたが原稿はまだ半分位しか集まっていない。10月末まで日延べをした次第である。

Velardeは出版社をいろいろ当たったらしいが、適当な所がなくどこから出版するのがよいかと問い合わせてきた。先日、H. HoraとG. MileyがEdward Teller賞の受賞記念講演を本にするのにWorld Scientific and Imperial College Pressを使い、私に推薦のための評論を求めてきたのでその関係で同社の編集者S. Chongを紹介した。幸いここが引き受けてくれることになり、原稿の集まりを待つばかりである。推薦文を伏見康治先生にお願いしている。

私の担当分の英文のブラッシュアップは溝口薫、原稿の整理に片岡紀子の助力が大であった。

「レーザー核融合のパイオニア物語」と題してOELキャンペーンのメールで逐次紹介したいと思っている。ご関心の方は下記までご連絡下さい。campaign@optolab.co.jp

【(財)レーザー技術総合研究所 研究所長】

い研究している。また、UやThの核分裂をレーザーで引き起こしている。

■レーザー核物理という新ジャンルの確立

発表件数は口頭22件、ポスター12件であった。レーザー核物理関連は14件、超高強度レーザー関連は5件でこれが大半を占める。レーザー核物理という新しいジャンルの確立を目指した研究会で、超高強度レーザーの開発、これによる高速粒子の発生とその物理的な特性、応用についてであった。

■Lasers and Nuclei

内容の主なものを数件あげる。Lasers and Nucleiという題名でC. Rhodes (Uni. Chicago)から発表があった。歴史的にはシカゴ大学のグループがレーザー励起核分裂を最初に研究・観測した。人類が火から始まって化学エネルギーを使い核エネルギーに至った。今後ともこの方向でいこうという主旨。そのレーザー励起核分裂研究の推進者は元LASLのボイヤーであるという。炭酸ガスレーザーで高速電子が出るのを逆手に使った発想である。

■Laser acceleration of particles

Laser acceleration of particlesに関連した発表は多い。LULI (Paris)、RAL(UK)、などから強力なレーザーでプラズマを作りこれで電子や陽子を加速する。特にガスジェットでプラズマチャンネルを作る報告が多くあった。超高強度レーザーでレーザー核物理の新しい分野を開くとの意気込みが感じられた。バーストや核の蒸発、NEET、核分裂などの研究に応用したいとのこと。この辺りは欧州連合の強いところだ。いろいろの分野の研究者が協力し合える。

■Acceleration of Forbidden Beta Decay

またAcceleration of Forbidden Beta Decayという発表では外部から強い電界をかけて長寿命核の崩壊を促進する。核変換が効率よくできる可能性があり、理論研究はなされてきたがまだうまくいっていない。

■Fast ignition of fusion targets

Fast ignition of fusion targetsという題でP. A. Norreys (RAL, UK)が発表した。大阪の研究の引用が多い。これだけ宣伝してくれたのは共同研究の成果である。

■Medical isotope production by laser

Medical isotope production by laserという題名でPET用の同位体核をレーザーで作る研究報告がW. Pilloy (Luxembourg)よりあった。作るプロセスよりむしろこの核生成のコストや供給体制。1時間程度以内で病院に提供することが必要でありそのためEC内での生成個所の配置。また遮蔽設備まで入れた加速器生成の場合とのコストの比較。かなり現実的である。これ以

外にも医用応用に関しては合計で4件程度があった。

■Transmutation of nuclear waste

核変換に関してはTransmutation of nuclear wasteという題名でBowman (ADNA, USA)から発表があった。かれは陽子ビームを用いた核変換を中心にして考える。問題は中性子の絶対量。要するに量が足りない。そのため核融合の利用をい出した。核融合は反応数を多くとれるので中性子の絶対量が多い。

続いてHigh brightness gamma sources for nuclear transmutationという題名で今崎が発表した。Bowmanとかなり突っ込んだ議論になる。原子炉でできる量と変換できる量のバランスが必要。スプレーションで発生量(中性子)が増えなくても絶対量は足りない。線光子数をどこまで増やせるかが課題である。

とくにECには145台の原子炉があり、そこから23,000トンの廃棄物が出てくる。本格的にこれを処理するのは核変換の新しい方式がある。主催したITUのMagillらはまじめにこれに向き合っているようにとにかく新しい方式を考案しないとイケないということは同感である。

■French Megajoule Project

またFrench Megajoule Projectの題名でD. Besnard (CEA, France)より発表があったが、軍事応用に限られているので詳しく発表できないようである。高密度物理が重点事項となっている。2011年に完成の予定。240ビーム。

Beyond PWということでOPCPAの可能性の議論を展開する発表が3件あった。EWにいつ到達できるか？ PWはCLOSEという機運があった。

■充実したWS

最終日にはITUの見学があった。部屋を移るたびに放射線検査があり手をついで検査。これでかなりの時間を消費する。MAを扱う大変さを実感させられた。規模は小さかったが大変充実したワークショップ(WS)であった。



【写真】会議場はカールスルーエの中心にあるお城、皇帝が時々使っていたが、今は博物館になっておりそのメイン会議室を使った。