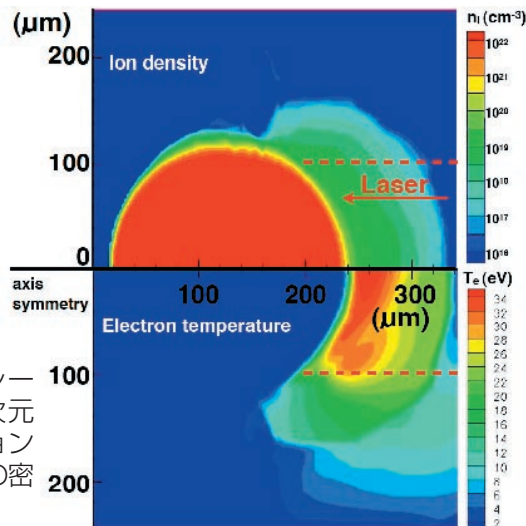




CONTENTS

- レーザー総研における極端紫外(EUV)光源開発研究
- CLEO-Europe `07国際会議報告
- 【光と蔭】第5回慣性核融合科学とその応用国際会議(IFSA 2007, Kobe)開催
- レーザー総研に望む



【図】錫ドロップレットにレーザーを照射した場合の2次元の放射輸送シミュレーションにより得られた、プラズマの密度・温度プロファイル

レーザー総研における極端紫外(EUV)光源開発研究

EUVプロジェクト 古河裕之、砂原 淳、山浦道照、島田義則

■文部科学省リーディング・プロジェクトの再委託先として、2003年度から研究を開始

2003年度から5年計画で、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」研究が開始された。(財)レーザー技術総合研究所は、大阪大学レーザーエネルギー学研究所から再委託を受け、2003年度から研究を開始した。再委託の際に頂いた研究課題は、「放射輸送コードの開発研究」であった。

■放射輸送コードの開発に着手

2003年度初頭から、放射輸送コードの開発を開始した。必要なEUV光の波長は13.5nm、スペクトル幅は2%であり、高Z原子である錫の4p-4d遷移と4d-4f遷移、及びキセノンの4d-5p遷移を用いる方法が挙げられていた。高Z原子の電子の遷移を詳細に評価することは非常に困難であり、多くの原子過程の専門の先生方と共同で研究を進めることとなった。

■世界で最初に変換効率3%を達成

2003年度に、阪大レーザー研のGEKKO XIIを用いた実験において、世界で初めてEUV光変換効率3%を達成した。その際、レーザー総研の研究者も大きく貢献しており、成果は論文化されている[1]。

■CO₂レーザーの有効性を世界で初めて提言

放射輸送コードの開発と並行して、レーザー総研が主担当となり、照射するレーザー波長の違いによるEUV光発生の特性的違いを、主に実験的に評価した[2]。技術研究組合 極端紫外線露光システム技術開発機構(EUVA)からの要望もあり、錫ターゲットにCO₂レーザーを照射した場合のEUV光発生に関して、砂原がシミュレーションにより評価を行った。その結果、それまでに用いられていたYAGレーザーよりも高いEUV光変換効率を得られる可能性があることが解った。砂原の結果等を受け、EUVAは程なくCO₂レーザーに方針を転換することとなった。現在、錫+CO₂レーザー方式が主流となっている。

■錫ターゲットを用いた場合の課題

EUV光源の実用化においては、大きく分けて以下の4つの課題が挙げられている。

- 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。

レーザー総研でも、まずは高いEUV光出力を達成するためのパラメーターの最適化を中心に研究を行って

次ページへつづく▶

いた。しかし錫ターゲットを用いた場合、多くの「中性」デブリが発生する危険性がある[3]。2004年春の応用物理学会で多くの波紋を呼んだが、その後、高速イオン及び中性デブリ粒子の低減が大きなテーマとして認識され、国内外で精力的に研究が進められることとなった。

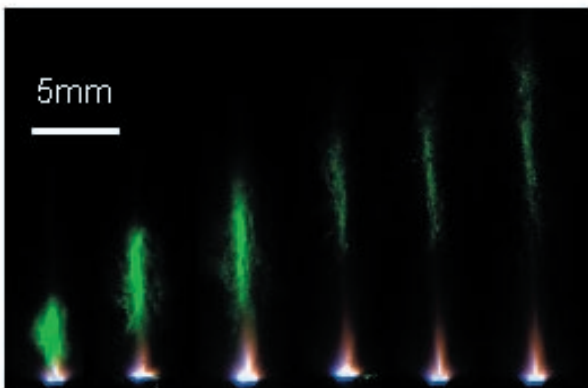
■ターゲットの高速供給技術の開発

EUV光源の実用化においては、ターゲットの高速(10kHz以上)供給技術を開発することが必要である。文部科学省リーディング・プロジェクトでは、錫ジェット、錫粉体または酸化錫粉体の水混合液等の開発(九州大学及び宮崎大学など)を経て、錫ドロップレットによる高速供給技術の開発が主流となった(主に兵庫県立大学及び阪大レーザー研が担当)。しかし、デブリ低減のためのドロップレットの小規模化(半径 $20\mu\text{m}$ 程度)、落下速度の高速化、安定化など、現在においてもまだ解決すべき問題が残されている。EUVAでも、錫ドロップレットによる高速供給技術の開発が行われている。

レーザー総研では、独自の技術として「パンチアウト方式による錫ターゲットの高速供給技術の開発」を提案し、開発を進めてきた[4]。パンチアウト法の中でも、主に、透明円盤の表面に錫をコートし、裏面からレーザーを照射し、基盤と錫の境界面でレーザーを吸収し、アブレーションの反作用により錫を飛翔させる方式が研究された。その結果、パンチアウト用レーザーのスポット径よりも小さな直径($500\mu\text{m}$ 程度)のドットターゲットを用いることにより、直進性の高い飛翔状態が得られることが解った。結果を図1に示す。図1の横軸の数字は、パンチアウト用のレーザーが照射されたからの時間を表している。

■2次元の放射輸送コードを開発

研究を進めるにつれ、特に長パルスのレーザーを照



【図1】ドットターゲットを用いた場合のパンチアウトされた錫の飛翔状態(横からの緑色短パルス照射によるコマドリ写真)

射した場合に、1次元シミュレーション結果と実験結果の不一致が大きいことが解ってきた。また上記に述べた、錫ドロップレット、及びパンチアウト方式により生成された錫ターゲットにレーザーを照射した場合のEUV光発光量の理論的評価を行うには、2次元の放射輸送コードの開発が必須となった。そこで、砂原が開発担当者となり、レーザー総研主導で、2次元の放射輸送コードの開発を行った。表紙図は、錫ドロップレットターゲットにレーザーを照射した場合の、2次元の放射輸送シミュレーションにより得られたプラズマの温度・密度プロファイルで、実験とも良く一致している。

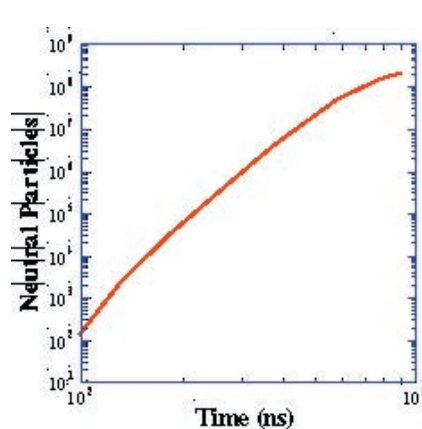
■中性デブリ粒子の評価

ターゲットにレーザーを照射して生成されるプラズマの電子温度は数十eV程度であり、レーザー照射が終了した後、放射冷却等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。これは、錫ターゲットを用いたEUV光源実用機開発に関して、非常に大きな問題である。そこで古河が担当となり、イオンの電離過程・再結合過程、励起過程・脱励起過程に関し、詳細な解析を行い、中性デブリ粒子の評価を行うため、時間依存の原子過程を含んだ放射流体シミュレーションコードの開発を行った。

図2は、ある条件下でレーザーを照射した場合の中性粒子数の時間発展である。レーザーの照射が終了した後、放射性再結合、3体再結合等により中性粒子数が時間と共に増加している。

■レーザー総研の貢献

上記に述べたように、EUV光源開発におけるレーザー総研の貢献度は非常に高い。今後EUV光源の実用化に向けて、さらなる研究推進が期待されているものと自負している。



参考文献

- [1]Y.Shimada, et. al.: Appl. Phys. Lett. 86 (2005) 051501.
- [2]M.Yamaura, S.Uchida, A. Sunahara et al Appl. Phys. Lett. 86 (2005) 181107.
- [3]H. Furukawa, T. Kawamura, A. Sunahara, et. al.: Proc. of SPIE 5448 (2004) 872-884.
- [4]内田他「X線発生方法、X線発生装置」特許出願2004-267078.

【図2】中性粒子数の時間発展



【写真】会場入り口にて

CLEO-Europe '07国際会議報告

主任研究員 藤田雅之

■CLEO-Europe'07 開催される

去る6月24～29日、ミュンヘンで、フォトニクス関連の国際会議であるCLEO-Europe'07が開催された。CLEO-Europeの大きな特徴は、同時に

複数会議と巨大な展示会を併設し“World of Photonics Congress 2007”という名称の大規模なイベントとして実施されることである。一つの会議に登録することで併設

の他の会議にも参加でき、物理寄りの会議と産業寄りの会議を同時期に調査することができる。2年毎の開催であるが、今年はユーロ高に悩まされた。パン1個とコーヒー1杯で25ユーロ、換算すると約420円であった。

■高出力ファイバーレーザーの競争がはじまる

これまでIPG社がほぼ独占していた高出力ファイバーレーザーであるが、今年は新たに欧州の4社から300W以上のファイバーレーザーが展示されていた。それぞれ、異なる光源技術をベースに発振器と加工機を組み合わせるシステム化している。出力としてはIPG社の20kWが最大であるが、300W以上の市場で5社が競

山中千代衛



第5回慣性核融合科学とその応用 国際会議 (IFSA 2007, Kobe) 開催

日、欧、米三極が交互に開催してきた慣性核融合科学とその応用に関する国際会議第5回IFSA2007(International Conference on Inertial Fusion Science and Applications)が9月9日～14日の間、神戸国際会議場において開催された。

この会議の源流をたどれば、1969年にTroyのRensselaer Polytechnic InstituteでE. SchwarzとH. Horaが開催したthe 1st International Workshop on Laser Interaction and Related Plasma Phenomenaになる。爾来30年に渉って隔年に開催され、1995年には第12回が千里ライフサイエンスセンターにおいて米国外で初めて開かれた。

1991年モンレーでの第10回会議は筆者、J. Nuckols, N. Basov, H. Horaが初回のエドワードテラー賞を受賞したので思い出の集会である。この会議の特徴は何と言ってもPlenum Pressから分厚いProceeding Laser Interactionを発行していることで、慣性核融合進歩の実情を克明に残している。

昨今慣性核融合の回顧録ばかりでG. Velardeの手になるInertial Confinement Nuclear Fusion: A Historical Approach by its Pioneers, Foxwell & Davies Scientific Publisher 2006とか筆者の慣性核融合研究開発史—レーザーパイオニア物語—、レーザー技術総合研究所2006などが世に出ている。先端科学を競うGordon Conferenceでは発表のプライオリティーを保証するため一切記録を残さないようにしていた時代、Workshopがこのようなレポートを記録にした功績は大である。

ところでこのWorkshopを引き継いだIFSAであるが、第1回は1999年仏ボルドー、第2回2001年は京都、第3回2003年はモンレー、第4回2005年は仏ビアリッツで開催になり、今回再び日本に順番が回って来た。参加者は遂に500人を越え歴代最大規模となった。これも時代の要請である。

テーマは慣性核融合の物理、レーザー、粒子ビーム技術、基礎科学及び産業への応用という内容で471の論文が発表された。石油価格の高騰とともに原子力ネッサンスの時代を迎え、核融合研究も再び脚光を浴びようとしている。

目下米、仏が国力を集中して大型レーザーの建設予算を積み上げ、積極的に大計画を進めている。阪大ILEは乏しい予算にめげず高速点火FIREX計画で対抗している。わが国は過去40年にわたり新技術の開発と斬新なアイデアで諸国をリードしてきた実績を忘れてはならない。資源に乏しいのだから国を上げて対策を進めることが切実に望まれる。石油危機に際し当時福田総理から山中先生恵存「資源有限 人智無限」という書を頂いたことが想起される。今回はB. R. Thomasと三間罔興がエドワードテラー賞を受けた。これでわがILEの受賞者は4人となった。

本会議の他IFEフォーラム主催のIFSA2007公開シンポジウム「高出力レーザーの応用に関する産学連携」とパネル討論が9月12日の午後公開され、文科省の大竹 暁基礎基盤研究課長も参加し盛会であった。かくて第5回IFSAは成功裡に幕を閉じた。

【(財)レーザー技術総合研究所 研究所長】

合する状態となった。表1に出展企業、使用光源技術、最大出力の比較をまとめる。このうち、2社では買収や合併によるファイバーレーザー加工機開発が進められていた。

■LDを制する者、ファイバーを制す

パネル討論会(Laser Marketplace 2007)でフィンランドのLIEKKI社(ファイバー関連の部品会社)からファイバーレーザー開発動向のレビューが報告されていた。それによると、ファイバーレーザーのコストの中でファイバーのコストはわずか10%、「励起用LD+LD光学系」が約60%を占めるとのことである。まさに、「LDを制する者、ファイバーを制す」と言えるのではないか。装置価格に関しては、100WクラスCWで約250€/W=約4万円/W(for sale)が現状の動向である。

■フェムト秒レーザー加工の動向は？

今回のCLEO-Europeではフェムト秒レーザー加工の

企業名	使用光源技術	最大出力
IPG	自社開発	20kW
Rofin-Sinar	Corelase(買収)+自社開発	1kW
SPI	Southampton大学	350W
Trumpf	Jenoptics(合併会社設立)	300W
GSI (旧Lumonics+JK)	自社開発	200W (500W@2007年末)

【表1】欧州のファイバーレーザー会社の比較

発表が皆無であった。その代わり、併設の産業寄りの会議であるLIM(Lasers in Manufacturing)で多くの発表がみられた。しかし、産業界からの発表であるがために、加工条件と加工結果の紹介といった講演が多く物理的な解釈や新規の応用は表面的なものにとどまっている。日本では大学・研究機関がフェムト秒レーザー加工を積極的に研究しているが、欧州では産業界の研究テーマとして位置付けられているようにも感じた。

■OPCPAの盛り上がり

前回(2005年)からOPCPAの研究が欧州で盛んになっている。近年はピーク出力ペタワット、エクサワットを目指した研究展開が目につく。現状の実験レベルはテラワットやサブmJレベルであるが、ペタワットクラス概念設計を元に基礎実験やアイデアの検証を積み重ねている。欧州全体の共同プロジェクトELI(Extreme Light Infrastructure)が提唱されており、超高強度レーザー開発・物理実験における日本の取り組みの遅れが懸念される場所である。

CLEO-Europeは欧州独自の特色が出ており、研究展開において新たな刺激を毎回感じる。“World of Photonics Congress”という意味では、学問的領域と産業利用を同時に俯瞰できる貴重なイベントでもある。2年おきの開催ではあるが、継続的に動向を注視したい。

TREATISE

レーザー総研に望む

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 所長 望月孝晏

今年度よりレーザー総研の評議員を初めて仰せつかりました。それで任命された以上、評議員としてやるべきことを述べよとの原稿依頼かと一瞬、緊張しましたが、一外野人としての願いを気楽に述べさせていただくことでお許しいただきます。レーザー総研設立準備に小生が若干お手伝いさせていただいて以来、はや20年も経過しました。現在、兵庫県立大学の研究所の所長として務めている立場で、他研究所に注文をつけるなど思いもありませんが敢えて述べさせていただきます。外野席にいますので総研の置かれている状況をしかと正しく理解している自信があるわけではありません。

財団としてのレーザー総研の最大の特徴はレーザー研究成果を自前で実験して生み出し世間に役立たせることではないでしょうか。教育研究一筋にいそしむ公的大学の先生にはこれは自らの特徴として自覚することはないでしょう。その意味で財団であるレーザー総研にあっては、本質的には自らの個別研究成果を世に提供する研究開発ビジネスの型を志向していると思

ます。したがって、それなりの研究資金(委託研究も含んで)が毎年必要です。しかし、小生達にとっては、総研がこのビジネスモデルの形態を追及していく中で、他の研究ビジネスユニットとの競争関係を生み出すことはあっても、コミュニティのお世話役はしていただかねばなりません。これは勿論、総研の理念の問題ですが競争するかぎり、組織は閉じたグループで活動することになりがちでしょう。むしろ、阪大レーザー研、並びにレーザー総研の輝く伝統と人脈をもっと活かし、異分野からの衆知を集め、チーム編成能力を高揚し、若者にも夢を持って参画してもらえよう魅力ある大きな研究プロジェクトを計画・企画する世話役としての役割を強化しては如何でしょう。自分で研究しているからこそ研究テーマの発掘も評価もできるのだという誇りもわかります。しかし是非、レーザー総研は世の中に革新をもたらす研究開発プロジェクト誕生の“るつぼ”として、開かれた真のセンターとなっ