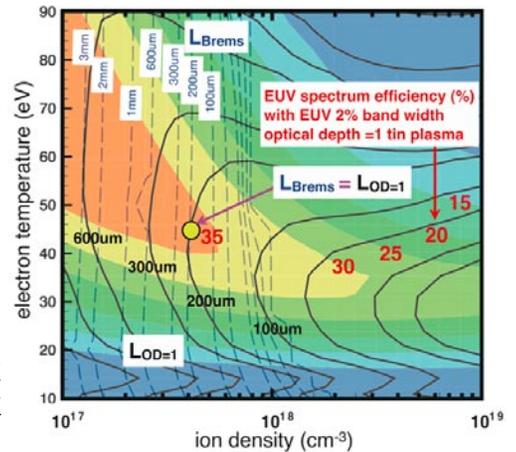


**CONTENTS**

- 極端紫外(EUV)光源開発のまとめ —理論・シミュレーション—
- 【光と蔭】レーザー技術総合研究所(ILT)の現状について
- 平成19年度研究成果報告会(ILT2008)開催
- 主な学会報告予定



【表紙図】スズプラズマに対する極端紫外線発生条件の最適化チャート

極端紫外(EUV)光源開発のまとめ —理論・シミュレーション—

理論・シミュレーションチーム 砂原 淳

■EUV光の発生と炭酸ガスレーザー

先月に引き続き、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」に参加し、5年間、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心、及び12の研究機関と連携した研究の成果について理論・シミュレーション研究の立場から述べたい。表紙図はスズプラズマに対する極端紫外線発生条件の最適化チャートを表しており、多くの原子過程の研究者との共同研究の主要な成果の一つである。横軸はイオン密度、縦軸は電子温度であり、赤字の数字及び色で示された等高線はスズからの波長積分された全X線放射中、何%がEUV光であることを示したものである。この図はできるだけ無駄なくスズプラズマからEUV放射をさせるには低密度が適していることを端的に示している。このことから低密度化の方向、言い換えるとレーザー波長の長波長化が促されている。5年前は炭酸ガスレーザーなど、臨界密度が低過ぎて使えないと予想されていたが、事実はまったく逆で、低密度プラズマが最適で、炭酸ガスレーザーがEUV光を発生させるには適しているのである。

■レーザー波長依存性

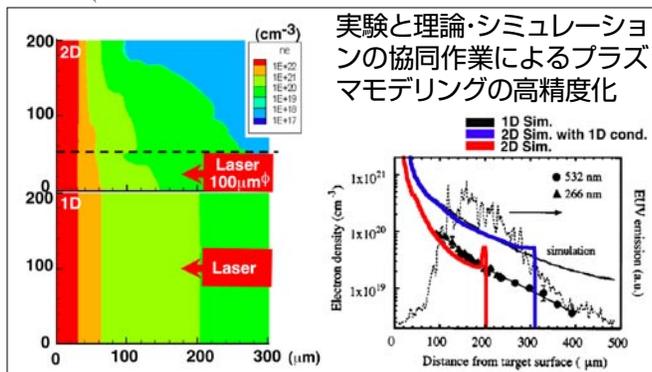
本プロジェクト開始当初からレーザー波長の最適化は重要なテーマであった。国内多くの原子過程の研究者

の努力によりスズのオパシティに関する我々の理解は進み、研究開始後半年で同時並行で開発が進められた放射流体コード(Star-1D)へスズのオパシティデータを組み込んで計算ができるようになった。短波長レーザーを用いた場合には吸収スペクトルが現れ、折角プラズマ内部で発生したEUV光が外まで出て来れないことが、実験と計算で明らかになった。これにより高密度化の方向には最適解がないという予測に至り、Nd:YAGレーザーの2倍高調波、3倍高調波の選択肢は消えた。

■炭酸ガスレーザー選択をめぐって

これで直ぐに炭酸ガスレーザーの流れになった訳ではない。九州大の岡田先生の炭酸ガスレーザーを用い、Nd:YAGの1.06 μm 波長をスズ照射した場合と同等のEUV変換効率を得た事がEUV光源開発技術委員会で議論となり、我々は早速スズに炭酸ガスレーザーを照射した場合のシミュレーションを行った。その結果はNd:YAGの1.06 μm 波長を用いた場合よりもさらに1%程度高いEUV変換効率が出せるというものであった。プロジェクトが2年目に入っすぐの事である。この時点で理論的には炭酸ガスレーザーを用いるのが最適であると判明し、一年に一回開かれる国際EUVLシンポジウムで発表すると共に、米国SEMATECHのVakshi博士編集の本にLPP Source Modelingのタイ

次ページへつづく▶



【図1：左】2次元軸対象計算と一次元計算のアブレーション密度分布。2次元計算ではレーザースポットサイズ(破線)よりも3倍程度まで横方向にプラズマが広がっている。

【図2：右】アブレーションしたスズプラズマの電子密度計測と実験結果の比較。二次元(軸対象)的なプラズマ膨張により、レーザー入射軸付近の密度が一次元予測より低下していることが定量的に示された。

トルで最新結果をまとめることができた。この時点で我々は世界に先駆けて「炭酸ガスレーザーが最適である」事を発信することができた。これにより3年目以降、世界の流れは大きく炭酸ガスへと転換した。

■ダイナミクスにおいて多次元性が重要

炭酸ガスレーザーの有用性を主張しつつも、“シミュレーションでしょ?”という声、即ち、シミュレーションなど信じられるか? という声は多く、我々は原子過程計算の高精度化、一次元、二次元の流体コードの開発を進めながら地道に実験解析に取り組み、実験チームと二人三脚でプラズマの物理モデリングを進めた。図1と図2はその成果の一例であり、2次元シミュレーションにより実際のアブレーションで噴き出したプラズマの密度を定量的に再現し、多次元性がダイナミクスにおいて重要であることを明らかにした。

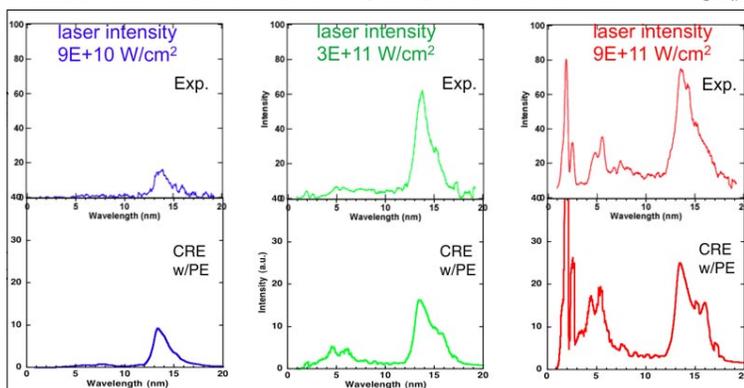
■EUV放射プラズマデータベースを世界に発信

原子過程についてもスズオパシティーについて非常に精度の高い計算ができるようになり、これらのデー

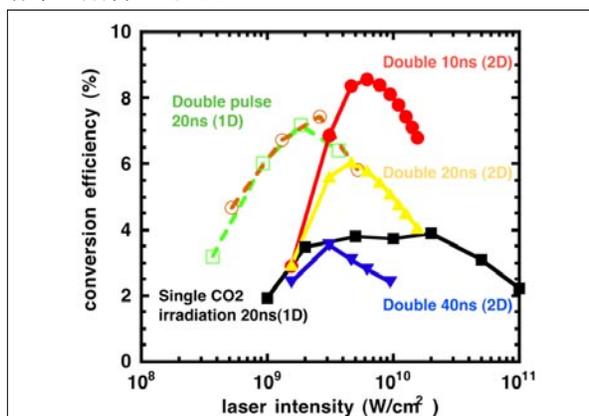
タを放射流体コードに組み込んで実験と計算のスペクトルを比較したものが図3である。非常に良い一致を見る事ができる。このような実験との比較はあらゆる条件で進められ、詳細な実験結果とともにEUV放射プラズマデータベースを世界に発信できたことは我々の誇りとするとところとなった。

■変換効率8%へ

我々理論・シミュレーションチームのミッションは二つあり、一つは実験に先駆けて最適化の方針を示すこと。もう一つは実験解析を通じてプラズマモデリングの精度を高め、さらなる最適化に結びつけるとともに、物理を体系化することである。後者はレーザー総研、阪大レーザー研を中心としたグループが得意とするところで、様々な比較検討を行い、EUVプラズマの物理モデリングを進める事ができた。実験に先駆けた成果としては炭酸ガスレーザーの例を書いたが、もう一つ、我々の大きな成果は“ダブルパルス照射による変換効率の向上”である。もう一度表紙図に戻ると、この図には低密度化の他に、レーザー吸収に必要な最小プラズマサイズ、EUV光のプラズマ中における自己吸収を抑制可能な最大プラズマサイズを示してあり、全ての要求を満足する結果として図の黄色の○で示された点がEUV発光に最適であることを示している。この最適条件は普通のシングルパルスで炭酸ガスレーザーを照射しただけではダメで、ダブルパルス照射が必要であることも放射シミュレーションで明らかにした。放射流体シミュレーションから計算された結果は驚くべきもので、従来の変換効率3-4%のさらに上を狙える可能性が示された。そして、ついに実験チームによって、シミュレーションが示したダブルパルスの有用性が示され、現時点で世界最高のEUV変換効率4%が達成された。この実験は40nsパルスを用いており、EUV変換効率が4%台にとどまるのも理解できる。図4に示す様に短パルスレーザーを用いることにより8%の変換効率が期待できる。



【図3】大阪大学激光XII号レーザーを用いた世界最高3%の変換効率(当時)を出した条件でスペクトルを実験と計算で比較した。非常に良い一致を示した。



【図4】ダブルパルス(炭酸ガス)レーザー照射によるEUV変換効率の向上。

■謝辞

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、

西原功修教授(現、名誉教授)をリーダーとする理論・シミュレーション研究グループによって行われました。この場を借りて、協力していただいた全ての皆様
に感謝致します。

山中千代衛



……140

レーザー技術総合研究所(ILT)の現状について

レーザー総研(ILT)の平成19年度研究成果報告会が恒例により、大阪と東京で、それぞれ60名内外の参加者を迎えて盛大に開催された。

昨年レーザー総研は創立20周年を祝って記念行事を催したが研究所もようやく年輪を重ね、自前の研究スタッフが育成され充実した陣容に成長してきた。設立当初は大阪大学レーザー核融合研究センターの教授が研究部長を兼務し、大学と一体運営の状態であったが今では大学と連携を取りつつ研究開発されたレーザー研究の成果を産業応用に向けて自ら展開する体勢が完成した。今回の成果報告会でも産業界に貢献できる内容に富んだ興味ある報告が並んだ。

大阪会場では冒頭特別講演として理化学研究所の播磨研究所放射光科学総合研究センターの石川哲也センター長より「X線自由電子レーザー計画」と題したSPring-8サイトで展開中の国家基幹技術FELプロジェクトが紹介された。

1990年代地元姫路工業大学の学長としてSPring-8建設に立会い、JASRIの理事として高輝度光科学研究所の上坪宏道氏や高良和武先生、当時播磨駐在の科技厅坂田東一課長らとも親交があった播磨の地に今度強力なX線FELが2006年から2010年に向け実現することは誠に喜ばしい慶事である。

FELと言えば1992年に神戸で国際会議を主催し、また通産省基盤促進センター事業により津田に1991年自由電子レーザー研究所を誘致した。これは現在大阪大学工学部所属施設となっている。自由電子レーザーはILTとしても誠に親近感のあるテーマである。

因みにもう一つの国家基幹技術「次世代10ペタフロップススーパーコンピュータ」が理研の渡辺 貞氏を中心に神戸ポートピアで進められている。渡辺氏ゆかりのNECの第1号スパコンSR-4が大阪大学レーザー核融合研究センターに1985年初めて納入された経緯からしても、わがことのように思われ欣快に堪えない。年来の夢である科学研究の先端インフラが着々として関西の地に進行中である。

さて成果報告会ではレーザー総研の5研究チームから詳しい報告があった。レーザーエネルギー研究チームの今崎一夫主席研究員からは関電委託のレーザーによる γ 線を用いた核廃棄物の短寿命化について兵庫県立大学のニュースバルによる実験が報告された。佐伯 拓研究員はJAXAによる太陽光励起レーザーの産業応用への展開を述べ、李大治研究員はテラヘルツ光源としてスミスパーセル方式自由電子レーザーの提案を行った。

レーザー加工・計測チームの藤田雅之主任研究員はNEDOによるMEMSウェハのレーザーダイシングに関し新しい手法を報告した。島田義則副主任研究員はオレグコチャエフ研究員とJR西日本・鉄道総研と共同のレーザーリモートセンシングによるトンネル内部欠陥の検出の成果を述べた。ついでレーザーバイオ研究チームの谷口誠治研究員が蛋白質内の光反応を調べるフェムト秒レーザー蛍光顕微鏡の開発状態をレポートした。

また理論シミュレーション研究チームの古河裕之副主任研究員はレーザーピーニングに関するアブレーションの計算機シミュレーションを報告し、砂原 淳研究員は文科省リーディングプロジェクトの阪大からの再委託による極端紫外光(EUV)の効率向上への進歩を述べ年来の成果を明らかにした。

技術開発室の本越伸二副主任研究員はレーザー損傷耐力評価法の標準化を提案した。大阪会場ではポスター発表もあり、ハイクコスロピアン、古瀬裕章、染川智弘研究員がそれぞれ、C1蛋白質の蛍光消失、冷却Ybレーザーと白色光ライダーを報告した。

レーザー総研の所長として意義ある内容を提供出来喜びに耐えない。参会された関係者に厚く感謝したい。まさに21世紀は光の時代である。

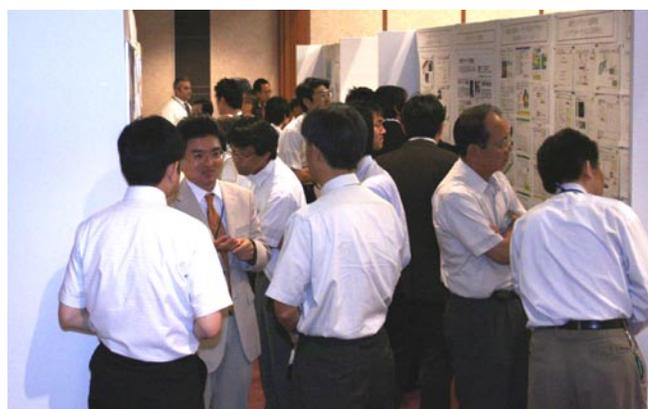
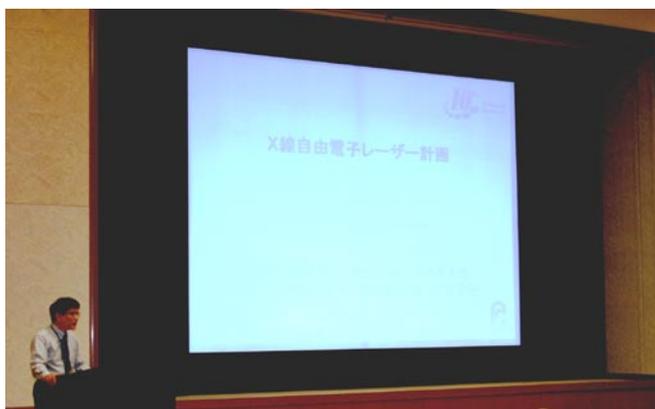
【(財)レーザー技術総合研究所 研究所長】

平成19年度研究成果報告会 (ILT2008) 開催

■東京、大阪にてレーザー技術の最新成果を報告

当研究所では、産業界への広報、並びに新規プロジェクトへの提言等を目的に、毎年7月に前年度の研究成果報告会を開催しています。今年は7月16日に大阪府豊中市千里ライフサイエンスセンター、7月23日に東京都港区虎ノ門パストラルにて開催致しました。報告会では、当研究所の様々なレーザー応用研究について講演発表を行いました。両会場とも約60名の参加があ

り、色々なご意見、ご質問を頂きました。また、報告会ではポスター発表(大阪会場)や技術相談の時間を設け、当日も多くの議論が交わされました。尚、当研究所では、レーザー技術に関する相談窓口を通じて企業のご要望、ご質問等にも迅速に対応できる体制を整えています。今後も当研究所の活動に益々ご注目頂ければと思います。



【写真】成果報告会の模様(左)、大阪会場でのポスター発表の状況(右)

主な学会報告予定

- 9月2日(火)～5日(金) 応用物理学会 第69回秋季学術講演会(中部大学)
 李 大治 「高輝度ガンマ線による陽電子発生」
 藤田 雅之「波長可変フェムト秒レーザーを用いたSiの構造相転移」
 染川 智弘「コヒーレント白色光を用いた3波長同時偏光解消ライダー」
 砂原 淳 「2波長ダブルパルス照射によるレーザー生成スズプラズマからの極端紫外光放射の2次元放射流体シミュレーション」
 古瀬 裕章「低温冷却Ybファイバーレーザーの開発」
 島田 義則「パンチアウトターゲット供給によるCO₂レーザー照射のEUV放射特性」
 「ピコ秒パルスレーザーを利用したレーザー駆動地中探査レーザーの開発」
 本越 伸二「大口径マルチモードファイバを用いた高出力パルスレーザー伝送(3)」
 三上 勝大「低温条件下における光学材料の損傷閾値(3)」
- 9月8日(月)～12日(金) International Congress on Plasma Physics 2008 (ICPP2008)(福岡国際会議場)
 古河 裕之「Dynamics of ablation plumes produced by fusion products in laser fusion liquid wall chamber」
 砂原 淳 「Radiation hydrodynamic simulation of extreme ultra-violet emission from laser-produced tin plasma」
- 9月10日(水)～12日(金) 土木学会平成20年度全国大会・第63回年次学術講演(東北大学)
 島田 義則 オレグ・コチャエフ「レーザー超音波リモートセンシング装置を用いたコンクリート内部欠陥探傷」
- 9月11日(木)～13日(土) 2008年光化学討論会(大阪府立大学)
 ハイク・コスロービアン「フラビン蛋白質の電子移動における距離依存性の解析」
 谷口 誠治「顕微フェムト秒蛍光計測手法の開発と生体関連物質への応用」
- 9月22日(月)～24日(水) 日本物理学会 2008年秋季大会(岩手大学)
 砂原 淳 「高速点火コーンターゲット内のプレプラズマ生成」
- 9月22日(月)～24日(水) 第40回Boulder Damage Symposium(Colorado,USA)
 本越 伸二「Dependence of Damage Thresholds on Low Temperature for Silica Glasses」