

2015, Nov.

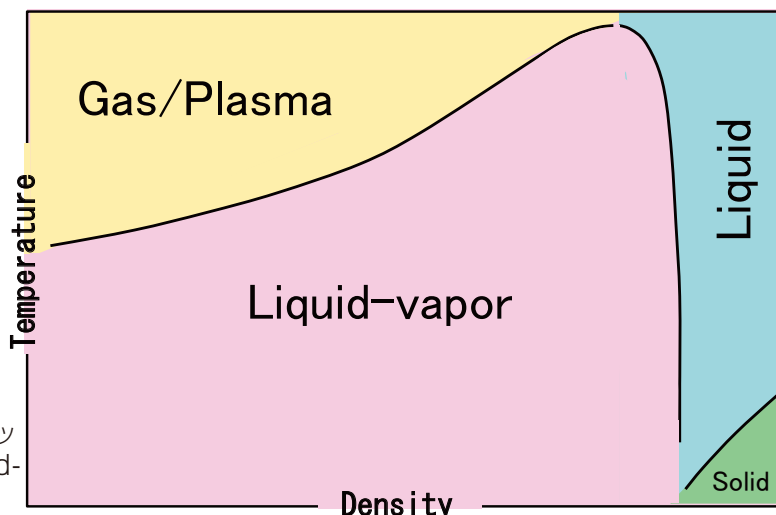
No. 332

レーザー・クロス CROSS

CONTENTS

- 極端紫外(EUV)光源開発研究の現状
- 40th International conference on infrared, millimeter and terahertz waves
- IRMMW-THz 2015参加報告
- 【光と藤】中国の台頭
- H26年度 レーザー技術研究所 最優秀研究員表彰
- 谷口誠治副主任研究員
- 主な学会等報告予定

【表紙図】スズの相図、スズドロップレットにプレプラズマを照射するとLiquid-vapor 相にほとんどのスズが入る



極端紫外(EUV)光源開発研究の現状

◆EUVリソグラフィーの機運が再び高まる

極端紫外光源(EUV)は半導体リソグラフィー用の光源として長年期待されてきたが、昨年あたりまでは目標である250WのEUV光源出力に対し、数10Wレベルの出力に留まり、半導体製造への導入実現が危ぶまれていた。しかし、ここに来て世界の2大光源メーカー、即ち ASML傘下の米国CYMER社と日本のギガフォトン社が相次いで60~80WのEUV平均出力を達成し、さらにごく短時間のバーストモードでは140W以上のEUV出力を実現するに至り、『EUV光源は実現しないのではないか?』との疑念を払拭し、再度EUV光源実現への期待が高まっている。現在のところ、世界で製造される半導体のうち、10nmプロセスまでは液浸及び多重露光技術で製造される見通しであるが、10nmより細い7nmの回路線幅からはEUV光源が導入される見通しである。IBMは7nmプロセスにおいてEUVリソグラフィーにより半導体の試験製造に成功しており、インテルもEUV導入テストを始めるだろうと見られている。

◆NEDO EUVプロジェクトの進捗

レーザー総研はギガフォトン社とともにNEDOからの資金援助で250W EUV光源に向けた研究開発を行っており、EUV発光のターゲットとして用いるスズドロップレットがレーザー照射を受けた時のダイナミクスや、高温スズプラズマからのEUV光発生モデル

理論・シミュレーションチーム 砂原 淳

グを行っている。目標のEUV250W出力に到達するにはあと4倍程度のEUV出力の増力が必要である。そのためにはレーザー光の増力をはじめ、EUV光を発生させるまでのあらゆる効率を改善する必要がある。レーザー総研は阪大と共同で、レーザーからEUV光への変換効率向上をめざして輻射流体シミュレーションコードの開発及びコードを用いたプラズマ条件最適化を図ってきたが、それらの成果はレーザーからEUV光への変換効率4~5%に結実している。我々はさらに6%以上を目指して最適化を進める計画である。

◆流体計算法の改良

我々はプラズマ条件最適化の手段として欠かせない数値シミュレーションの計算精度の向上にも力を入れている。コンピューター内部では2次元軸対称の計算格子上でプラズマの密度や温度、流速などの物理量が定義され、それらの時間発展が圧縮性流体の基礎式や熱伝導、輻射輸送方程式に基づいて解かれる。数多くの流体スキームが提案されているが、我々が目下取り組んでいるのは保存型スキームを用いた二次元輻射流体コードの開発である。スズドロップレットに最初にレーザー光を照射してからEUV光を発生させるまで、マイクロ秒以上に渡る計算が求められている。しかしレーザープラズマで従来用いられてきた非保存型スキームでは計算領域内の質量等の保存性が悪く、計算ステップが大きくなるにつれ、数値誤差の増大が無視

次ページへつづく▶

できないほど増加していた。この問題に対して、保存型スキームを用いることで、保存性を改善するというのが我々の考え方である。しかし一方で、保存型スキームではイオンや電子のプラズマの温度を独立変数として導入しにくく、物理量の保存性は改善できても内部エネルギーや温度が負の値を取りやすいなど、多くの困難がある。これらの問題は流体シミュレーションにおける古くからある大問題であり、一朝一夕には解決が難しい。我々は保存型スキームではあるが、非保存型のエネルギー式を補助方程式として解き、保存型と非保存型の数値解を適宜選択するというやり方を現在採用し、総合的な計算制度向上を試みている。

◆輻射輸送計算法の改良

また、EUV光源では輻射輸送計算が重要であるため、輻射輸送の計算精度向上を目指している。我々は従来の拡散モデルに代わる計算法として、M1モデルをテストしている。このM1モデルは非等方的な輻射圧力を用いる点、拡散モデルでは考慮されない輻射エネルギーの移流も考慮する点で従来の拡散モデルよりも高精度である。スズドロップレットに片側からレーザーを照射する場合など、ドロップレットのレーザー照射面とその裏面で輻射強度の空間分布は大きく異なり、非等方性が強い。また、真空中に近い非常に低密度の領域における輻射輸送を従来の拡散法で計算しようとすると、本来移流であるものを拡散で解くことになり、わずかな数値的ノイズを輻射密度の勾配であると見なしてしまい、計算が困難になる。M1法はこれらの問題を

解決できる。しかしながら欠点もあり、移流拡散方程式を解く際に数値的に不安定になることが多く、数値安定化手法など、手法の改良を試みている。

◆スズの物性データの高精度化

我々は計算に用いるスズの物性データ、即ち状態方程式及び輻射の放射係数、吸収係数の高精度化にも取り組んでいる。スズドロップレットは最初液体から出発し、プレパルスレーザーで照射されると、ほとんどが表紙図に示す液体と気体の混合相に入る。この液体と気体の混合相がその後のスズドロップレットのダイナミクスを決定する。スズの物性データを高精度化することで、スズドロップレットの長時間にわたる時間発展を精度良く計算する。

◆レーザープラズマの統合コードを目指して

2003年に極端紫外光源開発の研究を始めてから現在に至るまで10年以上の年月が経ち、これまでに輻射流体シミュレーションコード開発から計算によるプラズマ条件最適化まで多くの経験や知見を積み上げてきた。特に流体計算法、状態方程式(EOS)、輻射輸送、原子過程などはEUV光源研究を通じて相当多くの知見が得られたと考えている。これらを二次元輻射流体シミュレーションコードに集約し、EUV光源プラズマを高精度にモデリングするのが目下の目標であり、究極的にはより一般的な”レーザープラズマの二次元統合コード”として完成させ、EUV光源としての最適化だけでなく、デブリ発生のもデリング及び制御を視野に入れた研究展開を図っていく所存である。

REPORT

40th International conference on infrared, millimeter and terahertz waves IRMMW-THz 2015 参加報告

◆赤外線、ミリ波、テラヘルツ波に関する国際会議

去る2015年8月23～28日、香港中文大学にて第40回赤外線、ミリ波、テラヘルツ波に関する国際会議(IRMMW-THz 2015)が開催された。本会議は元来、サブミリ波研究とその応用に関して議論することを目的に1974年に設立されたが、年を経て赤外線～ミリ波領域を範疇に収め、さらにはTHz工学との統合により2008年から現在の形となった。期間中は30カ国以上から約600名の科学者、技術者が参加し、物理学、化学、電気工学や材料科学に関する基礎的な研究から、高周波回路、通信、光学、メタマテリアル、イメージングおよび分光法における課題に至るまで幅広い分野の研究発表が行われた。筆者は主にTHz波放射源とその応用に関するセッションに参加した。以下に本会議で発表され

レーザーエネルギー研究チーム 李 大治



【写真】会場の様子

た最新のトピックについて報告する。

◆高出力テラヘルツ放射源

カールスルーエ工科大学(独)はタレス社(Thales Electron Devices)と共同で、高出力CW THz放射源としての共振器型ジャイロトロンの開発を進めている。キャビティモードTE_{32,9}(TE: Transverse electronic mode)を共振モードとし、6.78 Tの外部磁場を印加して170GHzのTHz波を発生させる設計であり、最近の実験において、目標通りビームカレント40 Aでの駆動による安定出力1MWを達成した。また彼らは、高バイアス(～86kV)からより低いバイアス(～78kV)条件でのジャイロトロン挙動について検討し、両条件とも約30%の電力効率で1MW以上の出力が得られている。放射されたTHz波のパルス幅は最大10ms、周波数は170.1GHzと検出され、設計値と一致したことが分かった。さらに彼らは、装置の性能を明らかにするためビームカレントを63Aまで増加させて計測を行い、約30%

の効率で出力1.5 MWが得られたとのことである。

◆量子カスケードレーザー

量子カスケードレーザー(Quantum Cascade Lasers, QCLs)は、THz波発生の有望な手法であり、特に、QCLをTHz領域の発振モードに制御することは分光法に有用である。ルール大学(独)では、QCLの発光スペクトルの制御に用いられる二つの広帯域THzパルスの制御法が開発されている。時間遅延が可能な二つのTHzパルスはQCLのシードに使用され、これによりシングルTHzパルススペクトル内の周波数成分の変調は時間遅延に依存して誘起される。その周期は遅延時間の逆数である。つまり、適切な遅延時間を選択すればシードのスペクトルが変調でき、特定のモードを発振、あるいは抑制することが可能となる。このような機構では、QCLは利得帯域幅内のシードの周波数成分の増幅器として作動する。彼らはシードの振幅が一定値を超えると、QCL発光の大部分がTHzシードパル

山中千代衛



中国の台頭

鄧小平時代の中国はひたすら海外先進諸国のノウハウ、技術の習得につとめ、国力の培養、育成に力をそそぎ、外国との摩擦を一切避けてきた。レーザー核融合でも同様だ。しかし2013年に入ると共に、習近平の下、中国は自らの力を誇示するように変身した。陸・海・空軍の充実と共に第二次防衛線を主張し、南シナ海では西沙群島をはじめ各地を埋立て飛行場を建設している。わが国に対して尖閣列島は「自分のものだ」と言い出し、世界に発言する大国に成長してきた。まさに大唐の再来だ。

今回のインドネシア高速鉄道でも、わが国が一番の援助国としてODA6兆円の借款を付与し、最親日国であったのに、2014年10月にジョコ大統領が就任し、9月3日「高速鉄道は高すぎるので中高速にする」と発表したが、9月24日には高速鉄道は「中国製を採用する」と伝えてきた。

日本は2005年から実現調査を実施し、一貫してこの計画では先行してきたが、油断大敵、見事にくつがえされた。2009年のアラブ首長国連邦の原子力発電所計画も、韓国に奪われるなど技術的に優勢にあるのみでは成功しなかった。

中国では高速鉄道網を一気に推進して、今や総延長16,000kmに達している。日本の5倍にあたる。これだけ工事をすれば技術も上がってくる。中国の習近平の「一帯一路」計画は21世紀海上シルクロードの建設を狙いの一つとしている。そのなりふり構わぬ攻勢に日本は打ち負かされている。まさに慢心の結果、対手が望むことが理解できなかったのである。中国の実力を正しく認識して、わが国として最上の対応を考察しなければ、将来大きな禍根を残すことになる。

わが国は20世紀末の大躍進の夢が未だに残っていて、世界情勢について新しい認識の確立が遅れている。中国は巨大国に発展してきた。

それにしても日本の大学における学生のノンビリぶりは中国留学生と対比してあまりにひどすぎる。教育は小学校からしっかり対応しないと国家百年の計を誤ることになる。平和憲法の下、平和ぼけの日本人程気楽な人達は他にいない。

米国の占領下に全土が7年もさらされた。その結果が今や根強く日本の国民に浸透し、抜き難い心的バリヤーとなっている。

【名誉所長】

スにロックされることを明らかにした。

◆テラヘルツメタマテリアル

フライブルク大学(独)の研究グループから、ワイヤーアレイメタマテリアルファイバーを用いた像伝送法に関する報告がなされた。メタマテリアルファイバーは延伸法により作製された。ワイヤーアレイは六角形に配置された453本の直径 $10\mu\text{m}$ 、ピッチ $50\mu\text{m}$ のインジウムワイヤーから構成されている。彼らはメタマテリアルファイバーを介して相補型スプリットリング共振器(CSRR)の電界分布を伝送することが可能であることを実験的に示した。電場はハイパーレンズの線源面に直交偏光されており、これは回折効果なしに場の伝送を行うために必要である。CSRRはサイド長 $500\mu\text{m}$ 、ギャップサイズは $150\mu\text{m}$ 、スリット幅は $10\mu\text{m}$ である。彼らはワイヤー媒質伝送後の単一励起されたCSRRの縦電場成分をマッピングすることにより、いくつかの波長にわたる複雑な電場分布を伝送できることを証明した。この結果は、ワイヤーアレイファイバーを用いた回折のないエバネッセント場分布の伝送法を明示したものであり、この手法が“完全な”イメージング法の開発への道を切り開くものと考えられる。

◆高出力テラヘルツベッセルビーム

軌道角運動量を持つ高出力THz非回折ベッセルビームの生成に関する研究がノボシビルスク州立大学(露)で行われている。彼らはノボシビルスクBNIP(ブドカ研究所)のテラヘルツ自由電子レーザー施設において、螺旋状のフレネルゾーンパターンを有するシリコンバイナリー位相板を利用することにより、軌道角運動量を持つ非回折THzベッセルビームの生成に初めて成功した。生成されたベッセルビーム(波長 $141\mu\text{m}$)の振幅と位相特性は、スカラー回折理論に基づいた数値モデリングとよく一致することが示された。また、彼らは不均一な媒質を通過したビームが自己再構成されることを実証し、異なるアパーチャー上での光渦ビーム回折特性を研究してエンドファイア結合技術により表面プラズモンポラリトンを発生させ、光渦ビームのカップリングメカニズムに異常な特性がみられることを発見した。

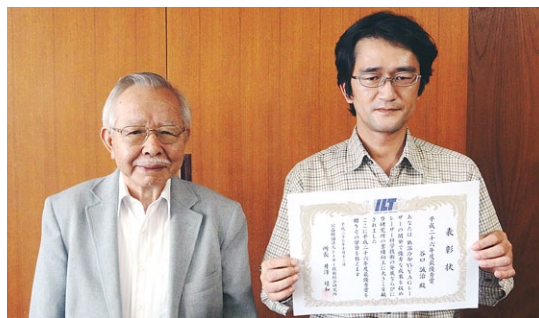
◆次回の開催予定

次回は来年、コペンハーゲン(デンマーク)での開催が予定されている。

TOPICS

H26年度 レーザー技術研究所 最優秀研究員表彰 谷口誠治副主任研究員

当研究所では、前年度に最も優秀な研究成果を収めた研究員を所内で選定し、表彰を行っています。平成26年度は、高出力レーザー開発に取り組んだレーザーバイオ化学研究チームの谷口誠治副主任研究員が最優秀研究員に選定され、去る10月13日に表彰式を行いました。谷口研究員は、産業応用に向けた高出力低温冷却Yb:YAGレーザー開発の中心メンバーとして取り組んだことが評価されました。今後も同研究員の益々の活躍に注目していただきたく思います。



【写真】表彰時の記念写真(右：谷口副主任研究員、左：井澤靖和所長)

主な学会等報告予定

- 12月1日(月)～2日(火) The 23rd CReS International Symposium (千葉大学)
柴川 智弘「Development of differential absorption lidar using a coherent white light continuum」
- 12月9日(火)～10日(水) 双方向型共同研究(レーザー分野)研究会形式シンポジウム「レーザー核融合炉心プラズマと炉工の総合的理解」(核融合科学研究所)
古河 裕之「レーザー核融合炉チェンバー内のブルーム同士の衝突に関する評価」
- 2016年
1月9日(土)～11日(月) レーザー学会学術講演会(名城大学)
柴川 智弘「水中レーザーリモートセンシングに向けたCO₂気泡と海水溶存CO₂のラマン分光」
島田 義則「レーザーを用いたトンネル等インフラの診断技術」
倉橋 慎理「レーザーを用いたコンクリート構造物における内部欠陥高速検出技術の開発」