

高エネルギー密度新物質材料と プラズマフォトニックデバイスの可能性

兒玉 了祐

大阪大学大学院工学研究科
電気電子情報工学専攻

1. 概要

高出力レーザー技術の進展に伴い、非常に高いエネルギー密度状態に関する研究が、盛んに行われようとしている。これに関連して、高エネルギープラズマフォトニクスという新しい概念が筆者らにより提案された。高エネルギー密度プラズマの性質を利用して高強度光や高エネルギー密度荷電粒子を直接制御するもので、新たな光量子ビーム源となる極限デバイスを目指している。一方、高出力レーザーによって固体金属炭素を始めとした超高压新物質創生が現実味をおびてきている。高エネルギー密度科学における我が国独自の展開として、この2つの異なる学術を融合させた新しい可能性を探求している。

2. 高エネルギープラズマフォトニクス

光や荷電粒子のエネルギーフラックスを上げていくと制御デバイスは固体からプラズマ状態に変わる。いわゆるデバイスのダメージであり破壊である。このため、固体デバイスの機能を維持するため、ビームの空間的、時間的自由度にその解決手法をゆだねることが常識的手法となっている。ところが、固体デバイスより高いエネルギー密度を有した高密度プラズマをデバイスとして利用することで、高いエネルギーフラックスの光や荷電粒子ビームを直接制御し新しい機能や装置の小型化が期待できる。これが高エネルギープラズマフォトニクスの基本概念である。レーザー光学、粒子ビーム光学およびプラズマ物理学を融合した独自の概念である。このような概念のもとで高エネルギープラズマデバイス[1]の開発をオリジナルに進めている。

2-1 プラズマミラーによる高効率集光

高エネルギープラズマフォトニックデバイスの最も典型的なものにプラズマミラーがあり、高いエネルギー密度状態にあり、通常金属ミラーに比べ1桁-2桁以上高い損傷しき値をもつことができる。プラズマミラーの1つの特徴として使い捨てのデバイスという点がある。このため通常の光学素子のワーキングディスタンスでは考えられない幾何学配置を可能にできる[2]。高出力レーザー応用においては、従来、デブリーの問題等で小さなF値の集光系は非現実的であった。ところが新しくFが0.6程度の

高開口集光光学系をプラズマミラーで初めて実現することができた[3]。これにより、従来の集光強度の10倍以上が達成でき、より高いエネルギーのプロトンビームを生成することができた。

2-2 相対論振動プラズマミラー

波長 $1\mu\text{m}$ の短パルスレーザーの強度が相対論領域になるとレーザーのポンドラモーティブ力が支配的となる。この領域ではプラズマ面は流体の時間スケール(数10psec以上)ではなくレーザーのパルス幅に追従し光速に近い動きをする。この為、単純な反射ではなく光速で変調を受けた反射光ができる。結果として、反射光はコヒーレントな高次高調波として観測できる。ペタワットレーザーを利用して、keV以上のコヒーレント光を生成することができた[4]。数keVにまで及ぶコヒーレント高調波はパルス幅としては、アト秒をしのぐzept秒に相当すると考えられる。

反射面の光速振動でスペクトル変調を受けた反射光は、時間変調を受ける。変調を受けたパルスを長スケールのプラズマ中を伝搬させるとそのポンドラモーティブ力によりレーザーの群速度に等しい位相速度を持った航跡場を形成し電子を加速することができる。反射面の前面に予備プラズマを生成すると、高密度領域のレーザーの群速度は光速より小さく光速近くまで加速した電子ビームが先行する。結果としてプラズマ中の実効的屈折率を変化させてチャンネルングを形成することができ、反射

レーザーはコリメートし伝搬する。これを示唆する超長尺ジェット[5] (アスペクト比が1000以上)、や反射ジェットの長さ依存して電子温度が増加することを実験的に初めて示した[6]。

3. 分散制御プラズマデバイス

プラズマの複素屈折率を能動的に制御する新しいタイプのプラズマフォトニックデバイスを我々は提案した。通常、プラズマ周波数 ω_p より低い周波数 ω_s の電磁波はプラズマ中を透過できない。しかし、周波数が $\omega_a (= \omega_p + \omega_s)$ である高強度電磁波を同時に照射することで、周波数 ω_s の電磁波に対する複素屈折率が大きく変化し透過できるようになる。プラズマ中では緩和過程が強いために量子情報処理分野への応用は難しいが、通常は高密度のプラズマ中に閉じ込められる長波長の超高強度電磁波 (例えばテラヘルツ波) の放出が期待できることが解った。

4. 吸収エッジを利用したX線デバイス

4-1 チェレンコフX線発生デバイス

X線領域の吸収端は、X線領域でありながら複素屈折率が1以上を示す。後述するレーザー誘起電子ビームとこの吸収端近辺の複素屈折率を利用したチェレンコフX線の特性を数値解析により明らかにし世界に先駆けて実験を開始した。単色X線ビーム源となる可能性を明らかにした。チェレンコフX線は数MeV以上の電子により発生しそのスペクトルは吸収端の複素屈折率で決定される。そのため電子ビームに単色性はそれほど必要なくかつ発生機構が過渡的な原子過程を利用しないため、あまり発生効率に影響をあたえず材質を変えることでX線の波長を変えることができる。

4-2 X線非線透過

高強度X線を物質に照射し物質中の束縛電子を励起あるいは電離させることによりX線領域における非線形現象を起こすことが可能である。これらの現象はX線領域のパルス・スライサーやオートコリレータさらには自由束縛遷移の超高帯域増幅[7] などへの応用が期待されている。世界に先駆けて、SPring-8のEUV-FELを用いて集光実験を実施し、固体のスズに対するEUV-FELの非線形透過現象を初めて観測した[8]。

5. 高エネルギー密度電子制御デバイス

超高強度レーザーと物質との相互作用で発生する荷電粒子ビームのエネルギー密度は従来のビームに比べ桁違いに高い密度の電流に相当する荷電粒子であり、そのエネルギー密度の高さから通常の固体素子では制御できない。例え1Jを下回るテーブルトップの超短パルスレーザーでも生成される電子ビームは μm サイズの空間でMAの電流に相当する。通常の高出力電子ビームでこの電流密度を考えると直径1mほどになる。このような電子ビームを制御するマイクロプラズマ生成のためのマイクロパルスパワーデバイスの開発を行った。10TWレーザーシステムと同期をとり集光チャンバー内でオペレーションできるシステムを構築した。

また超高強度レーザー生成高エネルギー密度電子をグレーティング構造に伝搬させることで高輝度スミスパーセル放射が可能であることは既の実証した。フェムト秒レーザーで生成される波長以下の短バンチ電子ビームによるスミスパーセルテラヘルツ波発生評価をおこなった。コヒーレント変換が期待でき数値評価で可視域に比べ5ケタ近く高輝度のコヒーレントテラヘルツが期待できることが解った[9]。

6. 高エネルギー密度固体

高出力レーザーを固体に集光すると、アブレーションが起こりテラパスカル以上の圧力が発生する。これを利用して、これまでにない高エネルギー新物質の創成を目指している。

6-1 金属化物理

超高圧化においては、さまざまな物質が金属化する。金属水素や金属炭素は、従来の金像とは異なる新しい金属となる可能性がある。高圧化の金属化物理に関して、もっとも単純な構造である水素の金属化を解析的に評価した[10]。単原子水素の場合、0.2-0.3g/ccでモット転移により金属化することを初めて解析的に示した。

固体金属水素より、より現実的な超高圧金属相にダイヤモンドの金属化がある。金属炭素も量子力学的に興味ある物質である。さらにこの超高圧相が準安定相として存在すると仮定すると、超軽量や超良導性、超硬度などの特性を持つ新しいデバイス材料の可能性をもつ。これに先立ち、ダイヤモンドと同じ結晶構造を持ちかつバンドギャップ

の小さな半導体材料 (Si, Ge, GaN) の金属化を先行させ進めている。最近、レーザーによる動的圧縮によりSiの金属化と準安定相に関する興味深い成果が得られつつある。

6-2 低エントロピー圧縮技術

我々はさらに温度が低い固相のままの超高压相転移を目指している。この為には低エントロピー動的圧縮を実現する技術とこれを診断する手法を開発する必要がある。

従来のレーザーだけの圧縮に比べ低温・高压を可能にするために静圧縮であるダイヤモンドアンビル (DAC) 圧縮とレーザー動圧縮静圧縮と動圧縮をカップリングしたハイブリッド法を我が国で初めて確立した。さらにこのダイヤモンドセルに対するガasket材の最適化を行った。その結果、りん青銅ガasketにより2-3倍高い圧力を発生できた。りん青銅を用いたハイブリッド法によって予備圧縮した水に、高強度レーザー照射による衝撃波を駆動して、圧力・温度計測を行った。

衝撃波反響を用いると、物質の温度上昇を抑えて圧力を上げることができる。金属の炭素が予測されている領域までダイヤモンドを反響圧縮するためには、ダイヤモンドより硬く (高衝撃インピーダンス) 透明な物質 (誘電体) が必要となる。GGG($Gd_3Ga_5O_{12}$) は、その可能性のある材料の1つと言われていた。実験によって、TPa圧力の圧縮曲線がダイヤモンドの衝撃インピーダンスを大きく上回ることを証明した。また、ダイヤモンドに対する反響圧縮の予備実験を行い、1回の衝撃波反射によってダイヤモンドの圧力がおそ1.5倍に増加したことが示唆された。今後、ポストダイヤモンド状態 (1 TPa以上 8000 K以下) を実現するための条件の最適化を行う。

等エントロピー的に物質を極超高压まで加圧できれば、比較的低い温度領域において、状態方程式、動的弾性・塑性、相転移など、これまで実現不可能であった新しい物質状態を調べることができる。緩やかな密度・速度の勾配を持った“プラズマローダー”を試料に衝突させる等エントロピー的圧縮法によって、プラチナと金の等エントロピー圧縮に成功した。今後ターゲットの形状やレーザー条件の最適化によって100 GPaの準等エントロピー的圧縮の実現を目指す。

6-3 低温高压診断技術

ナノ秒からピコ秒の短時間に相転移する新しい状態をin-situで調べるために、時間分解の計測手法の開発は重要である。相転移を見るもっとも基本的な計測手法として可視域での受動的診断法がある。速度干渉計 (VISAR) や輝度温度計 (SOP) を平成19年度で確立し (国内で唯一機能している) これらを用いた超高压物質パラメータ計測を精力的に行った。またサブナノ秒のダイナミクスを観測するための硬X線モノクロラディオグラフ [11] やX線回折、X線トムソン散乱計測法など新しい計測技術の開発・立ち上げを行った。これらにより相転移前後の構造変化、自由電子の分布関数の詳細を調べることができるようになった。

7. まとめ— creation and probe

このような高エネルギー密度新物質創生には、従来のプラズマをベースとしたレーザー生成高压状態の温度定義や診断法とは全く異なる温度定義、計測手法や回収技術が必要不可欠である。このためテラヘルツからX線に至る高輝度マルチ光源システムが必要である。プラズマフォトニックデバイスを利用すればこれが可能となる。また高压生成用のレーザーとの完全な同期も可能である。つまり高出力レーザーで新物質を創生し、高エネルギープラズマフォトンクスによる光源でその場観測をし、回収する”creation and probe”という新しいシステム (図) を提案した。

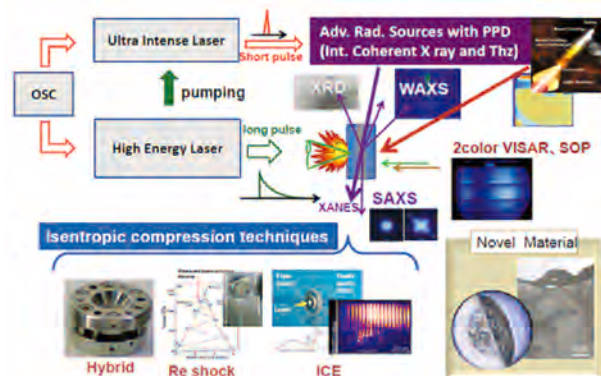


図 高エネルギー密度新物質創生と診断

参考文献

- [1] R. Kodama et al, Nature **432**, 1005 (2004)
- [2] R. Kodama et al, Nature **412**, 798 (2001)
- [3] M. Nakatsutsumi et al., submitted to Nature Photonics (2009)
- [4] B. Dromey et al., Nature Physics **2**, 456 (2006)
- [5] R. Kodama et al Phys. Rev. Lett. **84**, 674 (2000)
- [6] H. Nakamura et al Phys. Rev. Lett. **102**, 045009 (2009)
- [7] R. Kodama Phys. Rev. Lett. **69**, 77 (1992)
- [8] Y. Yoneda, Y. Inubushi et al., submitted to Nature Photonics (2009)
- [9] Z. Jin et al., submitted to Nature Photonics (2009)
- [10] K. Shibata and R. Kodama, J. Phys .Cond. Matt. **20**, 075231 (2008)
- [11] E. Branbink et al. Phy. Plasma **16**, 33101 (2009); A. Ravasio et al. Phy. Plasma **15**, 060701 (2008)