

第1章序論

近年、Warm Dense Matter (固体プラズマ遷移状態) が大きな関心を集めている。 Warm Dense Matter は固体物理学、プラズマ物理学の扱う領域の間の領域であり、そのどちらでも説明が困難な未知の物体領域である。 物理モデルがないのと同時に実験データも十分とは言えず、先進各国の研究機関で実験・研究が進行中である。 その中で超短パルスレーザーポンププローブ計測を用いた実験はアメリカ国立ローレンスリバモア研究所のチームと電気通信大学のチームが精力的に行っている。 電気通信大学ではすでに超短パルスレーザーポンププローブ計測のシステムを完成させ、物性データを収集しているが、従来の装置の限界も呈し始めている。 水銀の Warm Dense Matter 物性はこの数年大きな関心事になっているが、従来の装置では水銀の Warm Dense Matter 物性の複素誘電率を計測できない。 そこで、水銀の複素誘電率を計測可能な垂直型の超短パルスレーザーポンププローブ計測システムの開発を行う必要がある。

第2章 Warm Dense Matter

2.1 Warm Dense Matter とは

Warm Dense Matter とは固体とプラズマの中間の領域であり、その密度は固体と同程度から十分の一程度、温度は数千から数万K程度である。 固体の物性については固体物理学 (Solid State Physics) が、プラズマの物性についてはプラズマ物理学 (Plasma Physics) が高い完成度で存在し、積み上げられた研究成果から物性計算を行うことができる。 しかし、Warm Dense Matter はどちらの物理モデルを用いても完全に説明することはできない。 また、Warm Dense Matter の実験データはまだ十分に出揃っていないとは言えず、今後の実験に期待するしかない状況である。 Warm Dense Matter の代表例として木星のような大型天体の内部が挙げられる。 木星はその質量のために、内部は重力によって Mbar を超える圧力がかかり、高温高密度の Warm Dense Matter 状態になっていると考えられている。 また、超短パル

スレーザー技術の確立に伴い生まれた超短パルスレーザー加工も一例である。 超短パルスレーザー加工は熱変化を生じない理想的な材料加工の方法として関心を集めているが、超短パルスレーザーによって材料を切断・切削するとき、照射部は短時間に集中されたエネルギーによって、短時間の高温高密度状態にあり、これも Warm Dense Matter となっている。 超短パルスレーザー加工の技術を定量的に考える際にも Warm Dense Matter 状態の物体の性質を知ることが重要になっている。 また、レーザー核融合に代表される、慣性核融合は Warm Dense Matter の非常に重要な応用となる。 慣性核融合では燃料を高温高密度状態で閉じ込める必要があるため、そのような状態の燃料の物理モデルを得ることが必要不可欠である。 このように、天体物理学、工学、エネルギーと Warm Dense Matter は広い分野に横たわる物理である。 物理学として Warm Dense Matter を見たときの一つの興味としては Warm Dense Matter の状態方程式 (Equation Of State :EOS) がある。 状態方程式と言えば理想気体の状態方程式 $PV=nRT$ が有名であるがこれは粒子同士の電気的な相互作用を無視したもので、Warm Dense Matter では高密度のためにイオン、電子の相互作用が大きく、これがマクロ的にどのような様相を見せるのかは大きな関心がある。

2.2 超短パルスレーザーポンププローブ計測

本研究では、Warm Dense Matter 生成と計測の手法として超短パルスレーザーポンププローブ計測を用いる。

超短パルスレーザーはその時間の短さから電子回路で信号を取り扱うことはできない。

そこで、ゲート回路を用いて時間波形を切り出すという手法を取る。 フェムト秒のパルスレーザーをポッケルス素子でスライスして、一部だけ利用し、反射光をフォトダイオードで検出して後、電気信号をゲートに入力して時間積分する。 時間積分した波形は元のフェムト秒パルスが観測した数値と比例関係にあるので、これを電子回路で扱えば、フェムト秒での観測を電子回路のスピー

ドにあわせたことになる。あとはデジタルアナログコンバータで読み取れば数値として実験データを記録することが可能である。

2.3 複素誘電率

単に「物性を計測する」と言っても、温度・密度・圧力など計測すべきパラメータは種々ある。本研究では Warm Dense Matter 物体の光学物性、物体の複素誘電率をターゲットにする。複素誘電率は振動する電場に対する物体の応答を表すパラメータである。電場の振幅に対する物体の分極の位相遅れを複素数で表している。位相遅れがある場合、物体中では電場の吸収があることになり、虚数成分の大きさは物体の導電性を表している。複素誘電率は振動する電場に対する物体の応答であるので、周波数分散を持つ。測定の際には一つの周波数ではなく、ブロードバンドな計測を行って周波数依存性を調べる必要がある。

2.4 エリプソメトリック計測システム

複素誘電率は屈折率に対応しているから実際には屈折率を測定する。屈折率を計測する手法としてエリプソメトリー（偏光解析）の手法を用いる。市販のエリプソメトリーではCWレーザーを試料に照射し、連続的に入射の角度を変えながら消光のポイントを探すが、本研究では、入射する光は超短パルスレーザーのシングルショットであり、実時間で多数のデータを収集する必要がある。

本研究ではすべての偏光の偏角、位相角を揃えた状態で、準備しておきショットが始まったらすべての観測作業を自動で行えなければならない。

第3章 垂直型計測システム

3.1 水平型計測システムの問題点

水平型の場合、試料のディスクは地面に対して立てる形で設置しなければならない。したがって、水銀は重力で下に垂れてしまい、計測することができない。また、試料の設置自体が難しいため、異なる種類の金属を計測する場合はいったん真空を解き、試料を大気に暴露したまま設置しなければならないため、酸化膜をはじめとする大気の試料に対する影響を取り除くことができない。また直角を基本にした構造のためプローブ光の入射角度を変更するのも困難である。

3.2 垂直型

先に述べた水平型の超短パルスレーザーポンププローブ計測システムの問題点を補完するのが

垂直型の計測システムである。水銀の計測を代表とする利点もあるが、垂直型の大きな利点として、蒸着室を隣接して設置することによって蒸着した試料を真空のまま計測システムに設置し、大気に暴露することなく計測できる。大気の悪影響を除いた計測は例がなく新しい実験結果を得られることが期待される。

3.3 実現する上での問題点

垂直型の超短パルスポンププローブ計測システムを開発する際に障害となる最大の問題はプローブ系から、エリプソメトリック計測システムの最終検出部に至るまでの途中でプローブビームの偏光成分が回転し、計測そのものが不可能になってしまうことである。水平型の場合、すべての反射ミラーをビームの軌跡が直角になるように組み、さらにミラーによる位相角の変化を相殺するように、系を組むことによって、最終検出部に至るまで偏光が回転しないようにすることが出来るが、垂直型の場合、ポンププローブ計測の光学系とエリプソメトリック計測システムの光学系が「ねじれ」の構造にあるために、先に述べたような方法は不可能である。

第4章 実際の実験装置

4.1 装置の概要

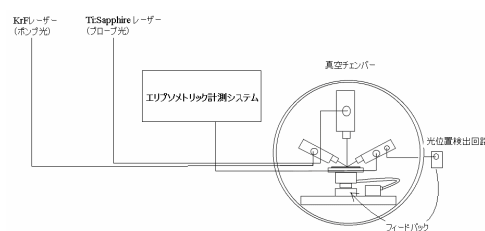


Fig.4.1 実験装置の概要

Warm Dense Matter として計測する試料は計測用の真空チェンバー内に設置し、外側からプローブ光とポンプ光を導入してポンププローブ計測を行う。試料はディスク型のガラス円盤の上に蒸着し、ターンテーブル上でレコードのように回転しながらポンププローブ計測を行う。プローブ光は試料にポンプ光と同時に照射され、反射光は再びチェンバー外側に出、エリプソメトリック計測システムで偏光成分を解析する。

4.2 使用するレーザー

プローブレーザーとしてフェムト秒パルスのTi:Sapphireレーザー(745nm)を用いる。また、ポンプレーザーとして同じくフェムト秒のKrFレーザー(248nm)を用いる。前述のKrFレーザーはプローブレーザーに用いるTi:Sapphireレーザーを波長変換し、3倍波にしたものを種光として、KrF発振器を増幅器として用いて、得たビームである。プローブレーザーとポンプレーザーは系に由来する定まった時間間隔でパルスのタイミングを出しており、試料表面に照射されるまでの光学系のディレイを調節することで、試料表面で同時にパルスが照射されるようにすることが出来る。

4.3 試料照射部



Fig4.3 試料照射部

試料照射部は3台のカメラから成り立っている。3台のカメラはそれぞれプローブ入射、ポンプ入射、プローブ反射のためのカメラであり、2本のビームを試料表面の μm オーダーのスポットに集光する。カメラは稼動するオプティクス、OPTMIKEアクチュエータによって動き、アライメントして2本ビームを同じ位置にアライメントできるようになっている。

4.4 エリプソメトリック計測システム

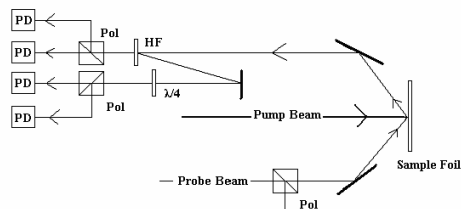


Fig 4.4 エリプソメトリック計測システム

エリプソメトリック計測システムはグラントレープリズムと四分の一波長板を用いて、プローブビームを分割して計測する。4つの偏光成分は垂直偏光、水平偏光、右回り円偏光、左回り円偏光である。開発の際に重要になるのは反射

の途中で偏光が変化していないことである。試料から反射した偏光を偏角が変化しないまま計測の系に持っていかかが考慮するべき点である。

4.5 その他の装置

全節までで述べた装置のほかに、ターンテーブルを回すモータの設置、表面イメージを撮影するためのCCD、照明のための白色高輝度LED、アライメントビーム、カメラ台を調節するためのOPTMIKE、真空ポンプとピラニゲージ等の周辺機器がある。電気系統は真空チェンバーの上部に接着した電極ボードから接続してある。

第5章研究活動

5.1 エリプソメトリック計測システムの開発

まず、ミラーを反射した際の影響を調べるためにミラーの入射角と偏角位相角の関係をポーラリメーターを用いて調べた。

ブロードバンドミラーでは偏角と位相角が著しく変化するので単色の誘電体多層膜ミラーによって光学系を組んだ。

また、始めに立体的に光学系を組んだが、そのままと偏光の回転を受けるため、なるべくビームの軌跡が一つの平面に収まるように光学系を組みなおした。

出力偏光はエリプソメトリック計測システムの常盤上で、試料表面と同じ偏角が保たれ、位相角の変化も少なくすることができた。

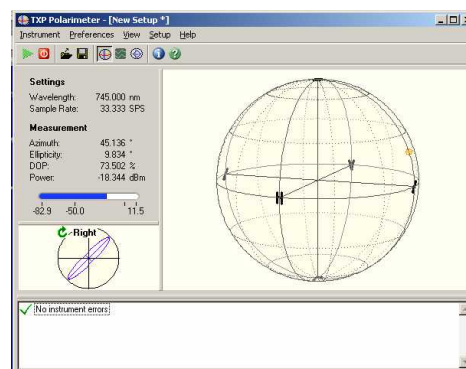


Fig 5.1 出力偏光

導き出したプローブ光をプリズムで分割しフォトダイオードで検出した。

5.2 オートアライメントシステムの開発

マイクロオーダーのスポットは振動、ターンテーブルの回転によって本来の位置からずれてしまい、ポンププローブ計測が出来なくなってしまう。したがって、計測のためには位置のずれを検出し、フィードバックによって位置のずれを修正するオートアライメントシステムを開発する必要がある。

アライメントシステムの概要を述べる。まず、アライメントビームを試料スポットに照射した後、反射ビームをレンズで集光して、2分割フォトダイオードに入射する。スポットが本来の位置からずれるとフォトダイオードが電圧の変化としてそれを出力するオペアンプで増幅した信号をターンテーブルの高さを決めている picometer に入力し、フィードバックを掛ける。

実際に装置を組んだ時に、アライメントシステムの性能を評価した。



Fig 5.2.1 +2.5V

Fig 5.2.2 -2.5V

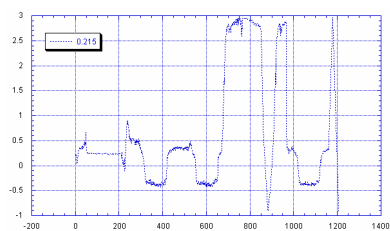


Fig 5.2.3 電圧波形

電圧波形からキャリブレーションを行った結果、アライメントシステムはスポットの位置を $4.4 \mu\text{m}$ の範囲に収めている。

また、アライメントシステムを切断したところ、スポットの位置の大きなずれが確認された。

5.3 その他の装置

ターンテーブルを自動的に回転し、試料をロード上に移動するためにモータを取り付けた、そ

の際に振動がスポットに悪影響を及ぼすのを防ぐために、ゴムによる除振装置を取り付けた。実際に動作させて、振動が極端に大きくないことを確認した。白色高輝度 LED を取り付けた際に、後方への光が CCD を飽和させるために、遮光を行い詳細な表面イメージが観測できるようにした。

第6章 結論

プローブレザー系、エリプソメトリック計測システムが完成した。

得られた偏光は偏向角も位相角もほぼ保たれていた。

また、オートアライメントシステムを組み上げ、必要な動作が確認された。スポットの動く範囲は $4.4 \mu\text{m}$ であった。また、アライメントシステムを切断すると、大きくスポットはずれており、アライメントシステムの必要性が確認された。

第7章 今後の課題

今後の課題のなかでも、最優先されるのはポンプレザー系の組み立て、プローブビームスポット・アライメントビームスポット、ポンプビームスポット3者を同じ点に集光させるアライメント、プローブレザーとポンプレザーのオシロスコープを用いたタイミング合わせである。その作業が完結すれば、ポンププローブ計測が可能であり、金のポンププローブ計測データを得ることができる。計測データから改善することにより、装置の問題点を洗い出すことが出来る。水銀の物性は本研究の重要な部分の一つであり、優先的にデータを収集することが望まれる。そして、赤色のデータだけでは不十分であるのでブロードバンドなプローブビームによる多波長イメージングに計測の方法を転換する必要がある。また、蒸着室の設置、蒸着室から計測用チェンバーへの直接試料搬入も本研究のねらいであり、実現する必要がある。

参考文献

「Warm Dense Matter 物性」米田仁紀 プラズマ・核融合学会、Vol.81. suppl. (2005)