

( 続紙 1 )

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	QIN, Yu
論文題目	Versatility of nonlinear optical phenomena induced by infrared pulses: application to pulse characterization, element analysis, and filamentation ( 赤外パルスによって誘起された非線形光学現象の多様性 : パルス計測、元素分析、フィラメンテーションへの応用)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、赤外レーザーパルスによって誘起された、多様な非線形光学現象について行った研究をまとめたもので、6章からなっている。</p> <p>第1章は序論で、非線形光学の歴史を簡潔に述べた後、ここで報告する大きく分けて4つの研究、すなわち、(1) 中赤外自由電子レーザーパルスの空間および(2) 時間特性測定、(3) 近赤外ナノ秒パルスを用いた液中アブレーション、および(4) 近赤外フェムト秒パルスを用いた液中フィラメンテーションに関する研究背景とそれらの新奇性について俯瞰的に述べている。</p> <p>第2章では、(1) の中赤外自由電子レーザーパルスの空間特性測定について述べている。測定には古くから知られているナイフエッジ法を用いてはいるものの、通常この種の測定ではガウスビームであることを仮定して解析を進めているのに対し、ここでは、測定対象が非ガウスビームであることを測定結果から示し、この観点で測定データを詳細に解析したという点で新しい。得られたビームクオリティファクター(<math>M^2</math> 値)は1.1であり、集光特性は非常に良いことが実験的に示された。</p> <p>第3章では、(2) の中赤外自由電子レーザーパルスの自己相関測定について述べている。レーザーとは単色性および時間・空間コヒーレンスが高い光源を指すが、通常のレーザーとは発振原理が全く異なる自由電子レーザーにおいては、加速電子のわずかなエネルギー揺らぎが発振波長ゆらぎに直結する。自由電子レーザーを共鳴励起光源として用いる場合には、わずかな波長揺らぎでも実験結果に大きく影響するため、どの程度の波長揺らぎがあるのかを事前に知ることは非常に重要である。にもかかわらず、自由電子レーザーの波長揺らぎを実測したという報告はこれまでなされていない。この第3章では、自己相関法という、本来はパルス時間幅測定に使われている方法を、パルス時間幅のみならず波長揺らぎをも評価する方法にまで大きく発展させ、数値実験によってその可能性を示した後、それを実験実証した。実験の結果得られたパルス時間幅は約0.6psであり、波長揺らぎは約1.3%であった。これが本論文の最大の業績である。</p> <p>第4章では、近赤外ナノ秒パルスによって誘起された液中レーザーアブレーションについて述べている。液中レーザーアブレーションは、たとえば液中の微量元素分析などに使えることが既に知られているが、どうすれば高感度かつ信頼性の高い測定ができるかについてはまだまだ未知の部分が多い。たとえば、レーザーを集光する焦点位置や、用いる溶媒とその温度によって、発光スペクトルにどのような変化が見られるかについてはほぼ全く調べられていないといて良い。この第4章では、水中に置いた銅板をターゲットに用いて、まずは、レーザー</p>			

の集光位置とターゲット銅板の位置関係により、発光スペクトルがどう変わるかを調べた。その結果、大体、集光位置から±0.5mmの範囲にターゲットがある場合には、十分に線幅の細かい発光が観測できることを確認した。さらに、水以外にエチレングリコールとポリエチレングリコールを溶媒に用い、22℃と60℃の溶媒温度でアブレーション実験を行ったところ、水の場合にはいずれの温度でも発光強度に大きな差が見られなかったのに対し、エチレングリコールとポリエチレングリコールの場合には、高温溶媒の方が発光が強く、炭素の二量体からの発光も観測された。これは、溶媒を構成する高分子がアブレーションプラズマ中で解離し、さらにその中で炭素の二量体が新たに合成されたことを示唆している。この現象は、溶媒構成物の解離によるバブル内の圧力上昇を意味しており、従って銅に起因する発光線の純度は低下する。この描像は、エチレングリコールとポリエチレングリコールを溶媒に用いた場合には、水を溶媒とした場合よりもアブレーションバブルの寿命が数10マイクロ秒程度長く、また、高温溶媒の方が常温溶媒よりもバブル寿命が長い、という観測結果とも整合する。これら一連の結果から、結局、パルスエネルギー2-3mJの約100ナノ秒パルスを経中の元素分析に応用するには、レーザー焦点位置はターゲットの位置と±0.5mm程度の精度で一致させ、さらに、溶媒温度はなるべく低く保てば線幅の細かい発光線が得られ、従って元素分析には適しているということが結論付けられている。

第5章では、ガウス型およびベッセル型の近赤外フェムト秒パルスを液中伝搬させた時に発生するフィラメントのダイナミクスについて論じている。液体を非線形媒質としたフィラメンテーションの研究は、気体を非線形媒質としたそれよりも研究例が格段に少なく、その中でも非回折ビームとして知られているベッセルビームを用いた研究はさらに数少ない。気体媒質の代わりに液体媒質でフィラメントを効率良く発生できれば、よりコンパクトなシステムで広帯域パルスを発生できることになり、広帯域パルス光源としての利用の可能性が広がる。本研究の特色は、伝搬長を変えながらパルススペクトルや空間的パルス強度分布が調べられるよう、実験配置を工夫したことである。ガウスビームの場合には、わずか数 $\mu\text{J}$ のパルスエネルギーで自己位相変調によるスペクトル広がり伝搬開始後数cmで観測できたが、ベッセルビームの場合には顕著なスペクトル広がり観測できず、従って非線形パルス伝搬はほとんど起こっていないという当初予想とは異なる結果となった。

以上のように、本研究にて初めて自己相関法により、パルス時間幅のみならず波長揺らぎをも評価できる方法にまで大きく発展させ、数値実験によってその可能性を示し、それを実験実証した第3章の実験および解析手法は、たとえば近年、顕著に開発が進んできたX線自由電子レーザーにも適用することができる。つまり、自由電子レーザーの性能を評価する新手法として貢献が期待される。また、(3)については、液中アブレーションを微量元素分析の手段として応用するにあたり、低温溶媒中で測定することが検出感度や精度向上のためには望ましいことを明らかにした。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、赤外レーザーパルスによって誘起された、多様な非線形光学現象を実験的に調べた結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

- (1) ナイフエッジ法を用いて京都大学自由電子レーザーの空間モードを実験的に調べ、それが非ガウス型であることと、ビームクオリティファクターは1.1程度であることを突き止めた。
- (2) 自己相関法によって京都大学自由電子レーザーの時間特性を実験的に調べ、マイクロパルス時間幅が約0.6psであることと、波長揺らぎが約1.3%であることを突き止めた。
- (3) 異なる溶媒および溶媒温度において液中アブレーションダイナミクスを詳細に調べ、アブレーション発光の継時変化やバブル寿命が溶媒の種類や温度に依存する事を発見した。

このうち、(1)の解析手法や、本研究にて初めて自己相関法により、パルス時間幅のみならず波長揺らぎをも評価できる方法にまで大きく発展させ、数値実験によってその可能性を示した後、それを実験実証した(2)の実験および解析手法は、たとえば近年、顕著に開発が進んできたX線自由電子レーザーにも適用することができる。つまり、自由電子レーザーの性能を評価する新手法として貢献が期待される。また、(3)については、液中アブレーションを微量元素分析の手段として応用するにあたり、低温溶媒中で測定することが検出感度や精度向上のためには望ましいことを明らかにした。

これらの新知見は、いずれも、エネルギー材料の分光分析や水質モニタリングなどに活用可能である。よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成27年4月23日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日：2016年 4月 1日以降