

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 金 井 輝 人

レーザーの超短パルス化や短波長化の進展はめざましく、高次高調波発生によるアト秒パルス光や極端紫外光が光源として使用されるフェーズに入ってきている。本論文は、非線型結晶による波長変換を用いた超短パルスの発生と深紫外光の発生について述べたものであり、超短パルス化と短波長化の2部構成に成っている。超短パルス光はアト秒パルス発生用の光源として、また深紫外光は高分解能光電子分光用の光源としてそれぞれ実際に使用されている。

序章では、本研究における背景や目的、及び開発された光源を用いた成果を述べている。超短パルス光源は、アト秒発生実験に使用され、2004年に950 asの高次高調波パルスの自己相関波形を計測し、2006年には860 asの高次高調波パルスを周波数分解光ゲート法(FROG法)で計測された。深紫外光源は、光電子分光用光源のみならず、半導体リソグラフィのマスクパターンの検査光源、あるいはArFエキシマレーザーの種光としてのポテンシャルを有し、産業応用にも期待が大きいことが、それぞれ述べられている。

第1章では非線型結晶BBOを用いた広帯域波長変換を行い、周波数帯域をTi:sapphireレーザーの基本波の2倍に広げた。全波長域で位相整合条件を満たす角度でBBOに入射するように光学系を組み、基本波の約半分のパルス幅を2倍波で得た。この手法を用い8.5 fsの超短パルス青色レーザー光源が開発された。波長変換光学系のスループットは23%であり、パルスエネルギーは1.9 mJが得られ、高調波発生用光源として十分な出力を有していることが説明されている。

第2章ではこの光源の更なる高出力化がなされ、テラワット級の青色レーザーパルスを発生させた。高出力化のためには、光学素子の損傷を避けるため、ビーム径の拡大が不可欠であるが、その時に光学系の収差の問題が顕著になってくる。このパルスフロントの歪みを無くすために、単ミラー光学系から望遠鏡型光学系に改良された。実験的にも収差が補償されていることが確認され、10 fs、1.4 TWのパルス光が得られた。

第3章では深紫外光発生のための単一モード波長可変狭帯域Ti:sapphireレーザーシステムの概要と諸元が記述されている。この章以降は、中国科学院の陳教授によって開発された新非線型結晶KBBFを用いた波長変換による深紫外光発生について述べている。

第4章は、まずKBBF結晶の性質や他の非線型結晶に対する優位性、および欠点などが述べられている。KBBF結晶は200 nm以下を2次高調波で発生させる事が出来る現状では唯一の結晶である。欠点は、結晶軸方向にmm程度しか結晶成長させられず、板状の薄い結晶しか出来ないことである。そのために通常の非線型結晶のように位相整合角でカットすることができず、条件を満たした入射角度では全反射してしまうことになる。この問題を解決するために、深紫外光に透過性のあるCaF₂プリズムでKBBF結晶を挟み込みオプティルコンタクトさせたデバイスを開発した。このデバイスをKBBF-PCD(

Prism-Coupled Device)と呼ぶことにする。深紫外光の発生実験はすべてこのKBBF-PCDを用いて行われた。

この章ではTi:sapphireレーザーの2倍波をLBO結晶で発生させ、更にその2倍波をKBBF-PCDで得ることにより4次高調波を発生させている。非線型結晶を用いた2倍波としては最短の170 nmを発生させ、また深紫外域を初めて測定したことにより屈折率分散のSellmeier式を修正した。

第5章ではTi:sapphireレーザーの5次高調波を発生させ、KBBF結晶の吸収端155 nmに出来るだけ近い真空紫外光の発生に挑戦している。2次高調波をLBO結晶で、3次・4次高調波をBBO結晶によりそれぞれ発生させ、5次高調波をKBBF-PCDにより発生させている。Ti:sapphireレーザーの基本波780 nmの5次高調波として156 nmを発生させた。これは非線型結晶を用いた位相整合による最短波長である。

第6章ではNd:YVO₄準CWレーザーの6次高調波(177.3 nm)をKBBF-PCDを用いて発生させ、超高分解能光電子分光用の光源を開発した。光電子分光の時間分解の記録を塗り替え、物性研究の無二のツールとして使用され、多くの成果を挙げている。また、2002年以降現在に至るまで、温度や乾燥室素雰囲気などのKBBF-PCDの環境を変化させて発生効率の向上を図り、逐次改良を進めていき、より洗練された光源へ進化している事が述べられている。

第7章では深紫外光の最高出力の記録に挑戦した。同時に実用性のある光源とするため、産業用に需要の高い193.5 nmで平均出力ワット以上の光源開発を行った。Ti:sapphireレーザーの基本波774 nmの4次高調波として193.5 nmを発生させ、5 kHzで平均出力1.05 Wを得た。また波長可変な深紫外光源として200 nmから185 nmまでの深紫外を発生させた。200 nmで1.2 W、188 nmで0.72 W、185 nmで0.2 Wが得られた。非線型結晶を用いた波長変換で得られた200 nm以下の深紫外光としては最高出力である。

第8章は以上の研究に対するまとめである。非線型結晶BBOによる広帯域波長変換を用いた超短パルス光源を開発し、アト秒発生に貢献したこと、及びKBBF結晶のもてる可能性を最大限に引き出し、最短波長と最高出力の記録更新を達成したことが述べられている。

以上要するに、筆者は記録を伴う特徴的な光を発生させたのみならず、それが有用な光源として実際に研究に使用されている事は高く評価される。よって、この研究は物理工学に大きく寄与するものであり、博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。