

審査の結果の要旨

論文提出者名 富樫 格

近年、超短パルス高出力レーザーの発展に伴い、高次高調波が極端紫外、軟X線領域まで達し、それ自身が光源として応用できるようになった。この領域の光源は、内殻励起による原子の構造解明や、光電子分光による固体フェルミ面近傍の電子状態の研究などに必要不可欠なものである。この論文は、高調波をこのような物性研究のための光源として用いることを目的としており、その際行ったレーザーの高出力化、及び、高調波発生について述べたものである。

第1章では、序論として本研究における背景や目的を述べている。高次高調波は、フェムト秒のパルス幅を持つため、時間分解分光用光源として非常に有効であり、そのために、レーザーの超短パルス高出力化が必要とされる事、また、高調波は高分解能光電子分光のような狭帯域を必要とする分光用光源としても有効で、光電子分光用光源として、高調波を用いれば、スペクトル分解能及び空間分解能を向上させる事が強調されている。

第2章では、Ti:sapphireと同様に広帯域な利得スペクトルを持つCr:forsteriteを用いて超短パルス増幅を行ったことについて説明している。Cr:forsteriteの特徴として、発振波長が1.1~1.3 μm であり、この波長は、生体分子の分光や、通信の分野への応用が期待されている点、吸収のピークを1 μm 付近に持つため、Nd:YAGレーザーの基本波で励起することができ、Nd:YAGレーザーの2倍波で励起しなければならないTi:sapphireに比べ、高出力化が期待できる点などが上げられている。チャープパルス増幅(CPA)をもとに、モード同期発振、ストレッチャー、再生増幅器、コンプレッサーについて述べており、再生増幅器では、結晶の利得測定と解析、増幅器のシュミレーションなどの解析がなされている。この解析により、Cr:forsteriteの持つ、レーザー励起準位における再吸収(Excited State Absorption: ESA)や、発振波長での吸収の影響が明らかにされた。また、再生増幅器中で光スイッチとして用いるポッケルスセルをドライブするための回路を独自に製作している。結果として、77fs、5.2GWのピークパワーが得られている。

第3章から第5章は、高分解能光電子分光用光源として全固体波長可変レーザーシステムによる極端真空紫外光発生を行ったことについてまとめている。

第3章は、5kHz、狭帯域波長可変Ti:sapphireレーザーシステムについて述べている。発振器としてSpectra Phisycs社の“Tunami”を用い、この共振器中にエタロンを挿入することで狭帯域化を行っている。パルス幅がサブナノ秒であるため、チャープパルス増幅と違い、ストレッチャー、コンプレッサーを必要としない。よって、これらで使われている回折格子などの光学素子による損失を受けずに増幅できる利点がある。これを種光として、再生増幅器及びマルチパス増幅器で増幅を行うことで、800nmで32Wの平均出力を得ている。この出力は、Ti:sapphireレーザーシステムにおいて最高の出力である。

第4章では、第3章で得られたレーザー光からの非線形結晶による紫外光発生について述べている。非線形結晶としてLBO、BBO、CLBOについて2倍波発生、3倍波発生における、位相整合角、非線形定数 d_{eff} 、Walk offの計算を行い、この結果から、2倍波発生用結晶としてLBO及びBBO、3倍波発生用結晶としてBBO及びCLBOを選択し、実験により比較検討している。この実験から、ソフトフォーカスビームにおける3倍波発生では、BBOはWalk offが大きいため、変換効率の悪いことが明らかにされた。2倍波発生にLBO、3倍波発生にCLBOを用いたとき、波長266nmにおいて6.3Wの3倍波出力を得ることができた。これは波長可変紫外レーザーでは最高の出力である。

第5章では、Xeの2光子共鳴4光波混合によるXUV、VUV光の発生について述べて

いる。XUV 光は第 4 章で述べた 3 倍波の 3 次高調波として得られる。また、VUV 光は 3 倍波と基本波の差周波をとることで得られる。Xe の $6p[5/2]_2$ を共鳴準位としており、XUV 光、VUV 光の波長はそれぞれ 85.3nm、153.6nm である。XUV 光の発生は、3 倍波を Xe ガスチューブに集光することで行っている。発生した XUV 光を斜入射のビームスプリッターで分離し、真空分光器と電子増倍管で測定することで、 $1\mu\text{W}$ の平均出力を得ている。VUV 光は LiF や CaF_2 の透過媒質を使うことができるので、VUV 光の発生は、XUV 光の発生と異なり、LiF ウィンドウを用いたガスセルで行っている。発生した VUV 光は CaF_2 プリズムで分離し、 $f=400\text{mm}$ の CaF_2 レンズでパワーメーター上に集光することで直接平均出力の測定を行っている。この測定から 1mW の平均出力を得られた。この出力は狭帯域 VUV 光では最高の出力であり、パワーメーターで直接出力を測定できている点が優れている。また、パワーメーター上でのビームパターンが蛍光ガラスを用いることで撮影されている。さらに、XUV 光及び VUV 光の発生の評価として、G. C. Bjorkland の計算をもとに発生光出力を見積もっており、XUV 光及び VUV 光の平均出力は共に、計算から見積もられる値よりよりも 1 桁ほど小さい値であった。この原因としては、XUV 光発生においては、Xe の吸収の影響、VUV 光発生においては、3 倍波ビームと基本波ビームの空間的なミスマッチなどが上げられている。

第 6 章は以上の結果に対するまとめである。第 2 章で行った、Cr:forsterite レーザーの高出力化では世界記録を出している。また、第 3～5 章で行った、高分解能光電子分光のための狭帯域極端紫外光の開発では、レーザーの基本波、3 倍波出力で世界記録を出したのみならず狭帯域極端紫外光源としても、現在使われている He 放電ランプに比べて、XUV 光で同程度、VUV 光で 2 桁ほど強い出力が得られている。また、バンド幅は約 2GHz で、He 放電ランプよりも 3 桁ほど小さい。これは、高分解能光電子分光光源として飛躍的に優れた光源である。以上の内容から、この研究は物理工学に大きく寄与するものであり、よって、工学博士論文として合格である。