

平成14年度採択分

平成20年 3月31日現在

研究課題名(和文) 新型高性能軟X線レーザーの物理と開発実用化の研究

研究課題名(英文) Physics and development of a novel highly qualified and advanced soft x-ray laser

研究代表者

黒田 寛人(KURODA HIROTO)

東京大学・物性研究所・准教授



研究の概要: 縦型過渡励起軟X線レーザーの研究を進展させ高密度固体プラズマによるコヒーレント軟X線高次高調波発生、プレプラズマの制御によるビーム伝播の制御、多価イオンの高励起状態間の遷移との共鳴による原子過程物理を取り入れた異常強力共鳴効果の発見、それによるコヒーレント高効率単一周波数高次高調波の実証さらに短波長化を可能にする多価イオンの選択的利用と制御の研究を進め、高効率高出力コヒーレント軟X線実用光源が達成された。研究分野/科研費の分科・細目/キーワード: 軟X線レーザー/複合領域・プラズマ理工学・物理学一般/軟X線レーザー・高次高調波・レーザープラズマ

1. 研究開始当初の背景

マイクロ波メーザーから光のレーザーが開発された事により、エレクトロニクスから光と電子をも融合させたオプトエレクトロニクス・光通信・光メモリー等、レーザーの導入が進み飛躍的な発展をみた。レーザー光のさらなる短波長化は急務であり新たな学問創成を促すことが予想される。なかでも分子生物学や生命科学、半導体工学等より実用的短波長軟X線レーザーが大きく期待されている。

2. 研究の目的

我々が世界に先駆けて実証した縦型過渡励起TCE軟X線レーザーや高密度レーザープラズマを用いた制御高調波軟X線レーザーの研究を推進する事により、今まで実用化が難しいとされてきた軟X線レーザーの実証と制御、特にレーザー性能の高度化(小型化、高速化、高効率化、高出力化、コヒーレント性の追求等)を実現する事により未踏分野への応用の一步を拓く事を目的とする。

3. 研究の方法

コヒーレント軟X線レーザー生成のために固体高密度レーザープラズマを非線形媒質に用いる方法で小型・高効率・高出力・短波長化を実証する。金属物質ほぼ全て使用することができ、高変換効率の軟X線レーザーの生成および、物理の解明をシミュレーションとともに進める。より短波長化のために多価イオンプラズマからの遷移の利用を探る。

4. 研究の主な成果

(1) 世界に先駆けて提案した縦型過渡励起Ni様Mo軟X線レーザー18.9nmの発振に成功し実用的小型軟X線レーザーを達成した。超小型化(必要な励起150mJで従来の数10分の1)予想をはるかに越える指向性、空間コヒーレンス(横0.3mrad、縦<1mrad)、電子密度と電子温度の変化による出力依存特性等のデータが得られ、シミュレーションと比較した。世界中のX線レーザーの研究者に衝撃を与え、現在では本方式を利用した軟X線レーザー開発が世界の主流となった。

(2) 固体ターゲットプラズマよりの高次高調波において高調波が自己位相変調、スペクトル変調等の変調を受けずにn次のブルーシフトする現象を観測した。シフト量がレーザー強度に依存すること等、高強度フェムト秒光電場によるマクロスコピックな量子効果による事を見出し、物理的には電子の無衝突加速時のレーザー光位相が蓄積されると理論的に解明した。レーザープラズマ表面における異常電子密度生成とレーザー光電場の関係についてこれらの新しい知見を得た。

(3) 軟X線レーザーの新たな展開として過渡的縦励起軟X線レーザー生成のための固体ターゲットからの高密度レーザープラズマを非線形媒質に用いる制御高調波軟X線レーザーを初めて提案し、各種固体ターゲットを用いて実証した。短波長化のためにAgやSn等の多価イオンを用いる手法を編み出し本研究にて初めて観測した。より短波長を得るために第三イオン化エネルギーの高いマンガンを用いて7.9nm(101次)の制御高調波軟X

線レーザーを得たが、この波長はレーザープラズマからのイオンを用いた高次高調波で得られた世界最高次の最短波長である。

(4)レーザー誘起共鳴増幅による特定次数のコヒーレント単一制御高調波軟X線が得られることの可能性を世界に先駆けて指摘すると同時に実証し高出力・高効率化を達成した。その機構として特定次数の高調波と縮重の強い遷移がACシュタルク効果によりレーザー誘起共鳴増幅が起こることをつきとめた。Inの13次高調波を始めSn(17次),Sb(21次),Te(27次)と次々と単一周波数共鳴増幅を観測した。変換効率は $\sim 10^{-4}$ と桁違いの異例の大きさであり、Snでは1パルス当たり1 μ J以上という高エネルギーを得た。このような特定次数の高調波のみの増幅は過去に知られていない極めて特異なものであり、再び世界に衝撃を与え、現在最も進んだ先端技術と物理として評価されている。

(5)制御高次高調波軟X線レーザーは類まれな資質を持った新スキーム光源であり、励起レーザー波長やチャープ量、強度を精密にコントロールすることによってレーザー誘起共鳴増幅による特定次数のコヒーレント単一制御高調波軟X線の波長制御や変換効率をさらに上げられることがわかり強力な光源として今後の大きな期待が持てる。金属ナノ粒子クラスターを用いるとナノ粒子に特有な量子閉じ込め効果でバルクターゲットに較べて高次での高調波強度が6倍もの増強になることを確認し、より高効率な高次高調波の生成を達成した。

(6)応用面としてコヒーレントレーザー光源や周辺分光技術の進展による新たな物質探索を開拓的に進めた。レーザーアブレーション法によるナノ構造生成は従来、その照射レーザーの波長より小さい物は作成することができなかったが、コヒーレント光源により微細構造の超解像観測が可能となり、半導体を含む種々の試料上に生成されるナノ構造が波長の数分の一以下になりうることや励起波長によってもナノ構造が劇的に変わることを発見するなど多くの知見を得た。東大医学部やイリノイ大学医学部等と連携して、蛍光共鳴エネルギー転移現象によるタンパク間のリガンド活性による構造変化をピコ秒スケールで時間発展観測できるようになりシグナル伝達の極微量計測システムを作製した。この技術は、今までは細胞を使わずを得なかったシグナル伝達を完全に無細胞再構成系で行おうとする画期的なものでタンパク質相互作用解析ナノバイオチップの計測プローブとして大きな役割を果たすことが期待される。このようにコヒーレント軟X線光源を有効利用・測定する手法等を開発し今後の道筋をつけた。これらも軟X線レーザーの研究と共に国際的評価も高い。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

本研究は国内外に類似の研究のない独創的なものであり、固体ターゲットによる高密度レーザープラズマをコヒーレント軟X線高次高調波発生に用いる新しい発想により高効率、高指向性という常識を破るデータを得た。また特定次数の高調波が強く共鳴増幅することの可能性を世界に先駆けて指摘すると同時に実証した。変換効率は $\sim 10^{-4}$ と通常の変換効率より桁違いに高く1パルス当たり1 μ J以上というエネルギーを得、101次(波長7.9nm)にいたる実用性に優れた固体高調波として世界最高次の短波長も得ることができた。これらの結果はフランス、アメリカなど世界中の研究者の間で当研究グループが開発したNi様Mo高度化軟X線レーザーとともに再び大きな衝撃を与え現在、最も進んだ先端技術と物理として評価されている。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者には下線)

1. Enhancement of two-color high harmonic by using two compound strong ionic transitions in double-target scheme
M.Suzuki, R.A.Ganeev, T.Ozaki, M.Baba, and **H.Kuroda**
Appl.Phys.Lett. 90(2007) 261104
2. Intense exact resonance enhancement of single-high-harmonic from an antimony ion by using Ti:Sapphire laser at 37nm,
M.Suzuki,M.Baba, **H.Kuroda**, R.A.Ganeev, and T.Ozaki:Opt.Express15(2007)1161-1166
3. Development of a compact efficient 10Hz 20TW Ti:Sapphire laser system with a 1kHz regenerative amplifier,
JunZhang, Masayuki Suzuki, Motoyoshi Baba, Zhiyi Wei, Zhaohua Wang, Peng Wang, Jie Zhang, Jiaan Zheng, and **Hiroto Kuroda**:Appl.Optics 46(2007) 2498-2502
4. Anomalous enhancement of a single high-order harmonic by using a laser-ablation tin plume at 47nm,
Masayuki Suzuki, Motoyoshi Baba, Rashid Ganeev, and **Hiroto Kuroda**:
Opt.Lett.31(2006)3306-3308
5. Strong Resonance Enhancement of Single Harmonic Generated in Extreme Ultraviolet Range, Rashid Ganeev, Masayuki Suzuki, Motoyoshi Baba, **Hiroto Kuroda**, and Tsuneyuki Ozaki:
:Opt.Lett. 31(2006) 1699-1701

他66編

ホームページ等

<http://kuroda.issp.u-tokyo.ac.jp/index.html>