

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：63903

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360043

研究課題名(和文)超狭帯域真空紫外コヒーレント放射光源の開発

研究課題名(英文)Development of ultra-narrow band VUV coherent SR Source

研究代表者

加藤 政博(KATOH, Masahiro)

分子科学研究所・極端紫外光研究施設・教授

研究者番号：30185871

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,300,000円、(間接経費) 3,390,000円

研究成果の概要(和文)：コヒーレント高調波発生(CHG)の手法により真空紫外域で波長可変極帯域光を発生する技術の確立を目指し研究を進めた。アンジュレータ中でのレーザーと電子ビームの空間的・時間的アライメントを実現する手法を確立した。CHG光はフーリエ限界の狭帯域のスペクトルを有していることを実験的に確認した。スペクトルの空間分布計測により複数のアンジュレータ中での電子ビーム軌道を計測する手法を開発した。誘導ブリルアン散乱を用いて1ナノ秒程度の高エネルギーレーザーパルスを発生する手法の検討を進めた。これら超狭帯域コヒーレント光パルスを発生するために不可欠な要素技術を開発し、超狭帯域コヒーレント光発生への道筋をつけた。

研究成果の概要(英文)：We have been developing technologies to produce coherent light in the vacuum ultra violet wavelength range, from 200 - 30 nm, by means of coherent harmonic generation (CHG). We have established techniques for the spatial and temporal alignment between electron beam and laser in the undulators. We have developed a method to identify the optical axis of two undulators by means of spectral mapping. We experimentally confirmed that the CHG has a narrowband spectrum which is consistent with the Fourier limit. We have investigated the possibility to use stimulated Brillouin scattering for generating high-energy laser pulse of 1 nanosecond. We have successfully developed several element technologies for generating wavelength variable ultra-narrowband VUV radiation by using the CHG scheme.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用物理学一般

キーワード：シンクロトロン光 加速器 レーザー 電子ビーム

1. 研究開始当初の背景

シンクロトロン光は、直接のレーザー発振が容易でない真空紫外線から X 線に至る波長領域で、活発に利用されている。指向性に優れ、分光器を用いることで波長を自在に選択できるが、インコヒーレントな光であり、また、スペクトル幅は光源性能や分光器の性能で制約され、実用的には高々 10^{-4} 程度である。

通常レーザーの発振が不可能な波長領域でのレーザー光を得るために直線型加速器を用いた大型自由電子レーザー装置も世界各地で建設され、X 線領域での発振に成功している例もある。極めて大きなパルス強度が得られる一方、そのスペクトル幅は 10^{-3} 程度であり、また、不規則な内部構造を持つと言われている。

加速器を用いない光源としては、ガス中に極短パルスレーザーを打ち込みその高次高調波を発生させる手法により、真空紫外から軟 X 線の領域でコヒーレント光の生成が行われている。波長域は数 nm 程度にまで到達し、フェムト秒台の極短パルスであることから超高速現象の観測などへの応用が期待されている。しかし、パルス長が短いことからフーリエ限界により必然的にスペクトル幅は広くなり、高々 10^{-4} 程度である。また、複数のレーザーを用いた周波数混合の手法により、真空紫外域でのコヒーレント光を発生する手法もある。この場合のスペクトル幅は入射レーザー光のスペクトル幅で決まるが、 10^{-8} 以上の狭帯域化も可能とされている。ただし入射レーザー光の波長域により発生できるコヒーレント光の波長域は制限され、現在のところ、実用的には波長 70nm 程度が短波長側の限界とされている。

そこで本研究では、シンクロトロン光や自由電子レーザー、レーザー利用実験室光源などでは実現困難な、70nm 以下の短波長域でスペクトル幅 10^{-6} 程度の狭帯域・波長可変・偏光可変コヒーレント光の発生を目指す。

2. 研究の目的

高エネルギー電子ビームを用いたコヒーレント高調波発生技術を基礎に、従来の技術では困難であった真空紫外・軟 X 線領域での狭帯域・波長可変・偏光可変コヒーレント光発生技術を開発することを目指す。

低周波高周波加速と高調波空洞の利用によりパルス長 1 ナノ秒程度の電子パルスを蓄積リング上に形成し、これを狭帯域外部レーザーと相互作用させることで、狭帯域コヒーレント高調波光を生成する。波長 30 ~ 200 ナノメートルの領域でスペクトル幅約 10^{-6} の実現を目指す。

また、レーザーと電子パルスを有限角度で交差させる独自のアイデアにより、波長可変性の実現を目指す。この技術を可変偏光アンジュレータと組み合わせることで偏光の自在な制御を可能とすることを目指す。

このような新奇な光発生に求められる要素技術の開発に取り組む。また、研究の遂行を通じて、学生や若手研究者の育成を行う。

3. 研究の方法

本研究で提案する光発生技術の基礎となるのは、高エネルギー電子線とレーザーを用いたコヒーレント高調波発生 (Coherent Harmonic Generation; CHG) である。周期磁界中での電子ビームとレーザーの相互作用により、電子ビーム上にレーザー波長とその高調波を含む密度変調を形成し、コヒーレント放射させる。

CHG 光は空間的・時間的に完全なコヒーレント光であるが、特にその時間的特性は入射レーザーにより制御が可能である。入射レーザーのパルス長や入射角度を制御する技術を確立し、CHG 光の帯域や波長を制御する手法の開発に結び付ける。また、実用化に向けた CHG 光の安定な発生の実現に向けて、基礎技術の習得にも努める。

研究は分子科学研究所のシンクロトロン光源 UVSOR を用いて遂行する。UVSOR の電子エネルギーは低く、また、ビーム輝度は世界的にも最高水準にあることから、可視領域のレーザーと電子ビームを効率よく相互作用させることができる。UVSOR にはコヒーレント高調波発生に最適化された可変偏光アンジュレータ 2 台と専用の光取り出しポートが既に設けられている。また、加速器を周回する電子ビームに同期したレーザー装置及びレーザー輸送路も備えている。

本課題では、これら既存の装置群を最大限活用しながら、本研究に必要となる真空紫外光診断装置の整備など、必要となる装置の整備を進めながら研究を遂行する。UVSOR は全国共同利用のシンクロトロン光源であるが、週 1 日は光源開発用のマシンタイムが確保されている。本研究における光発生実験は、これを利用して遂行する。

4. 研究成果

分子科学研究所のシンクロトロン光源 UVSOR-III を用いて、200nm - 30nm の波長域でスペクトル幅 10^{-6} を上回る波長可変極帯域コヒーレント光を発生する技術の確立を目指し研究を進めた。

アンジュレータ中でのレーザーと電子ビームの空間的・時間的アライメントを実現する手法の確立に取り組んだ。時間的アライメントはフォトダイオードとストリークカメラを併用したシステムを構築し、ピコ秒オーダーのレーザーパルスと電子パルスの時間的同期方法を確立した。空間アライメントに関しては、CCDカメラを用いて、アンジュレータ各部でのレーザー光軸及びシンクロトロン光の発光点を結像することで検出し、空間的な重畳を実現する手法を確立した。電子ビーム中にレーザー波長及びその高調波での微細な密度構造を形成するためのバンチ

ャー部の磁場性能評価を2台のアンジュレータからの放射スペクトルの干渉を行って行い、最適なバンチングを得るための条件を確立したこれらの基礎技術の確立の結果、当該アンジュレータシステムでは初めてとなるCHG光の発生に成功した。

紫外・真空紫外域での放射スペクトルの計測システムの構築を進めた。真空紫外分光器を新たに設置し、外部光源を用いてその分光性能評価を行った。この分光器を用いてCHG光のスペクトル計測を行い、これが入射レーザーパルス長から予想されるフーリエ限界から予想される狭帯域のスペクトルを有していることを実験的に確認することに成功した。

高効率のCHG発生に必須となるレーザーと電子ビームの空間的アライメントについて、ファイバー入光分光器を用いたスペクトルの空間分布計測により、2台のアンジュレータの光軸のずれを効果的に検出する手法を開発した。これによりレーザーと電子ビームの有限角度交差を実現する基礎技術の確立に成功した。

1ナノ秒程度の高エネルギーレーザーパルス発生のために誘導ブリルアン散乱を用いる手法の検討を進めた。

CHG発生実験を通じて、その強度に大きな揺らぎが発生することを見出した。その原因としては、レーザー輸送路における光学部品固定部の機械的強度が十分でないこと、加速器室内の空調による風や温度変化などが考えられる。これらについて、他の加速器施設でのレーザー輸送の現状について調査し、加速器スケールでの光学輸送路における機械的固定方法に関して改善の方向性を見出した。また、レーザー位置検出器と光学ミラー制御装置を組み合わせたフィードバックシステムの構築が、安定なCHG光発生に必須であるとの認識を深め、その基本設計を進めた。

本研究で観測されたCHG光は通常放射光に比べて桁違いに強力なものであったが、理論的に予想される理想的な値と比較して、2ケタ程度低い結果を得た。これは、扁平な電子ビームと円形のレーザーの空間的重畳が困難であるためと推測された。この結果に対する考察により、シリンドリカルレンズなどを用いた入射レーザー光の形状制御により改善される可能性を見出した。

以上、本研究の期間内に、超狭帯域コヒーレント光パルスを発生するための要素技術開発を進め、超狭帯域コヒーレント光発生への道筋をつけた。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0件)

〔学会発表〕(計 3件)

Masahiro Katoh, Generation of Coherent

Synchrotron Radiation by using Laser and Synchrotron, 1st Conference on Laser and Synchrotron Radiation Combination Experiments (invited), 2014年4月23-24日、パシフィコ横浜(神奈川県)

関田創、保坂将人、山本尚人、高嶋圭史、山崎潤一郎、林憲志、許斐太郎、加藤政博、CHGのためのシード光源開発と観測系の立ち上げ、第27回日本放射光学学会年会、2014年1月11-13日、広島国際会議場(広島県)

関田創、保坂将人、山本尚人、高嶋圭史、山崎潤一郎、林憲志、許斐太郎、加藤政博、UVSORにおけるコヒーレント高調波観測系の立ち上げ、第10回日本加速器学会年会、2013年8月3-5日、名古屋大学(愛知県)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 政博 (KATOH, Masahiro)
分子科学研究所・極端紫外光研究施設・教授
研究者番号：30185871

(2) 連携研究者

保坂 将人 (HOSAKA, Masahito)
名古屋大学・工学系研究科・准教授
研究者番号：60290897

高嶋 圭史 (TAKASHIMA, Yoshifumi)
名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：40303664

山本 尚人 (YAMAMOTO, Naoto)
名古屋大学・工学研究科・助教
研究者番号：60377918

阿達 正浩 (ADACHI, Masahiro)
分子科学研究所・極端紫外光研究施設
・助教
研究者番号：30446455

繁政 英治 (SHIGEMASA, Eiji)
分子科学研究所・極端紫外光研究施設
・准教授
研究者番号：90226118

全 炳俊 (ZEN, Heishun)
分子科学研究所・極端紫外光研究施設
・助教
研究者番号：80548371
(平成 23 年度 連携研究者として参画)