

機関番号：63903

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360041

研究課題名（和文） 電子ビームのレーザー微細加工によるコヒーレント光発生

研究課題名（英文） Generation of Coherent Radiation by Laser Micro-fabrication of Electron Beam

研究代表者

加藤 政博（MASAHIRO KATOH）

分子科学研究所・極端紫外光研究施設・教授

研究者番号：30185871

研究成果の概要（和文）：レーザーを用いて高エネルギー電子ビーム上に微細な密度構造を持つ電子パルスを生じ、その微細構造と同程度の波長でコヒーレント放射させる独自の技術の開発を進めた。コヒーレント光の源である微細密度構造が電子の横方向運動と強く結び付き複雑な時間発展をする現象を発見した。また、入射レーザーパワーを高めるとコヒーレント光強度が飽和し、その後、振動する現象を新たに発見した。計算機シミュレーションとの比較により、これらの現象の機構を解明することに成功し、コヒーレント光発生の高効率化に関する重要な知見を得た。

研究成果の概要（英文）：We have developed a novel technique to produce coherent synchrotron radiation by creating micro-density structure on high energy electron beam using laser. We have found that the transverse motion of the electrons play an important role for the efficiency of the coherent radiation. In the vacuum ultra-violet range, we have observed a saturation and oscillation of the output power in the high laser power range. We could explain this phenomenon as the result of the micro-bunching process in the over-bunching regime. These results are important in optimizing the input laser power for highly efficient coherent radiation generation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2009年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：応用物理学一般

## 1. 研究開始当初の背景

シンクロトロン光はミリ波・テラヘルツ波領域から極紫外線・X線にいたる広大な波長領域で高強度且つ高品質な光として広く利用されているが、レーザー光とは異なり、コヒーレントではない。自由電子レーザーは高

エネルギー電子ビームの出すシンクロトロン光をもとにレーザー発振を引き起こすものであり、特に近年では、直線加速器を用いた単一通過型と呼ばれる自由電子レーザーの研究が活発で、硬X線領域でのレーザー発振の成功例も出てきている。しかし、このよ

うな装置は一台の大型加速器をひとつの実験で占有して使うことになるため、通常のシンクロtron光源に比べて経済的に難がある。

我々は電子蓄積リングとレーザーを用いてコヒーレント光を発生する技術の開発を進め、電子ビーム上に波長と同じ周期の密度構造を作り出すことでテラヘルツ波や真空紫外光の領域でコヒーレント光を発生する独自の技術の開発に成功した。自由電子レーザーほどの高い尖頭強度は望めないが、世界各地で多数稼働しているシンクロtron光源に装着することで、従来のシンクロtron光とは大きく異なる性質を有するコヒーレント光を比較的簡便に発生できる。加速器技術的には一種の先進的な挿入光源技術とみることができる。一方、電子ビームを光学媒質と考え、入射レーザー光に対して、波長変換や偏光制御を行う技術と捉えることもできるであろう。

## 2. 研究の目的

レーザーと電子蓄積リングを用いて、シンクロtron光の広帯域性とレーザーのコヒーレンスを併せ持った光源を開発することを目指した。通常のシンクロtron光源に装着可能な先進挿入光源技術として、実用化を意識しながら技術開発を進める。既に幅広い研究分野で必須のツールとして定着しているシンクロtron光源の利用を一層拡大することができる技術である。本研究では、実用化に向けた技術開発を進めることに重点を置いた。レーザーや電子ビームの幅広いパラメタ領域でコヒーレント光発生を試み、その効率や特性を系統的に調べ、これにより、高効率化・広帯域化、安定化、特性改善に向けた基本的な知識を集積することを目指した。

## 3. 研究の方法

分子科学研究所極端紫外光研究施設の電子蓄積リング UVSOR-II 及び既設のレーザー光源を利用して研究を遂行した。UVSOR-II の自由電子レーザー用光学路の一部を流用し、レーザー光導入路を構築した。発生した真空紫外コヒーレント光は既存自由電子レーザー用光学ベンチで、また、テラヘルツ光は既存赤外線ビームラインへ取り出して計測を行った。真空紫外分光器、E0 サンプリングによるテラヘルツ光計測装置などは新たに整備した。

レーザーパラメタ、電子ビームパラメタを系統的に変えて、コヒーレント光発生効率やスペクトルへの影響を調べた。また、E0 サンプリング法によりテラヘルツコヒーレント光の電場形状の直接観測も試みた。これらの観測を通じて、電子ビーム上の密度変調形成

の過程を詳細に調べ、コヒーレント光発生の高効率化や特性制御の可能性を探った。

## 4. 研究成果

テラヘルツコヒーレント光の発生効率向上に関する研究開発では、電子パルス上に形成した密度構造を長時間維持することでコヒーレント放射を持続させる実験を行った。低 $\alpha$ モードで電子蓄積リングを運転し、電子の縦方向運動を抑制することで、電子ビーム上の微細構造を持続し、コヒーレント放射を持続させることを試みた。通常運転モードでは1-2回の周回間にコヒーレント放射が観測されなくなるのに対し、低 $\alpha$ モードでは10周以上に渡って観測できた。その際にコヒーレント光強度が周回毎に複雑に変化する現象を観測した。これが電子の横方向運動と強い関係があることを実験的に見出した。計算機シミュレーションとの比較により、この現象が横方向運動（ベータatron運動）が縦方向運動（シンクロtron運動）と結合することで引き起こされていることを明らかにした。

入射レーザーパワーに対するテラヘルツコヒーレント光強度の変化を計測した結果、レーザーパワーの増大に応じてコヒーレント光強度も増大するが、ある限度を超えてレーザーパワーが大きくなるとコヒーレント光強度が飽和する現象を観測することに成功した。レーザーと相互作用した電子ビームが、発光点まで移動する間に電子ビーム上に微細構造が形成されるが、相互作用が強すぎると最適条件を超えてむしろ微細構造が破壊されてしまうことによるものであり、この結果は計算機シミュレーションともよく一致した。コヒーレント光発生効率の最適化に関する重要な知見を得た。

E0 サンプリング法によるコヒーレントテラヘルツ光の電場計測に関する実験を行い、大強度コヒーレント放射光の電場形状を直接観測することに成功した。入射レーザーパルス形状を変えることで電場形状が変化することを観測することに成功した。スペクトル測定と相補的となるコヒーレント光特性制御に関する研究を進める上での強力な観測手法を確立することができた。

コヒーレント高調波発生 of 広帯域化に関する研究開発では、コヒーレント高調波の高次成分を真空紫外領域で観測するための真空紫外用の分光器を新たに構築し、加速器装置に組み込んだ。これにより真空紫外域でのコヒーレント高調波の観測が可能となった。9次までの高調波の観測に成功した。また高調波の波長がアンジュレータのパラメタではなく、入射レーザー光のパラメタで決まっていることを実験的に確かめることに成功した。

コヒーレント高調波光強度の入射レーザーパワーに対する依存性に関する計測を幅広いパラメタ領域で行った結果、レーザーパワーが大きくなると高調波強度が飽和する現象を観測することに成功した。さらにレーザーパワーを増大すると、強度が振動を始める現象を発見した。計算機シミュレーションとの比較により、これがエネルギー変調が密度変調に変換される際に、オーバーバンチングにより高調波波長に一致する周期の密度変調が形成されることで引き起こされることを見出した。コヒーレント高調波光発生効率の最適化に関する重要な知見を得た。

#### 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 6 件)

- ① C. Evain, C. Szwaj, S. Bielawski, M. Hosaka, Y. Takashima, M. Shimada, S. Kimura, M. Katoh, A. Mochihashi, T. Takahashi, T. Hara, Laser-induced narrowband coherent synchrotron radiation: Efficiency versus frequency and laser power, Physical Review Special Topics - Accelerators and Beam, 査読有, 13, 2010, 090703-1~15
  - ② T. Tanikawa, M. Adachi, H. Zen, M. Hosaka, N. Yamamoto, Y. Taira, M. Katoh, Observation of saturation Effect on Vacuum Ultraviolet Coherent Harmonic Generation at UVSOR-II, Applied Physics Express, 査読有, 3, 2010, 122702-1~3
  - ③ M. Shimada, M. Katoh, M. Adachi, T. Tanikawa, S. Kimura, M. Hosaka, N. Yamamoto, Y. Takashima, T. Takahashi, Transverse-Longitudinal Coupling Effect in Laser Bunch Slicing, Physical Review Letters, 査読有, 103, 2009, 144802-1~4
  - ④ M. Labat, M. Hosaka, M. Shimada, N. Yamamoto, M. Katoh, M. E. Couprie, Observation of Synchrotron Sidebands in a Storage-Ring-Based Seeded Free-Electron Laser, Physical Review Letters, 査読有, 102, 2009, 014801-1~4
  - ⑤ M. Labat, G. Lambert, M. E. Couprie, M. Shimada, M. Katoh, M. Hosaka, Y. Takashima, T. Hara, A. Mochihashi, Coherent Harmonic Generation Experiments on UVSOR-II Storage Ring, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 査読有, 953, 2008, 1-5
  - ⑥ M. Labat, M. Hosaka, M. Shimada, M. Katoh, M. E. Couprie, Optimization of a Seeded Free-Electron Laser with Helical Undulators, Physical Review Letters, 査読有, 101, 2008, 164803-1~4
- [学会発表] (計 29 件)
- ① M. Katoh, Light Source Development in UVSOR (招待講演), The 15th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, 2011年3月4日, 広島大学学士会館(広島)
  - ② 谷川貴紀、阿達正浩、全炳俊、保坂将人、山本尚人、平義隆、山崎潤一郎、加藤政博, UVSOR-II における飽和領域でのコヒーレント高調波の観測, 第24回日本放射光学会年会, 2011年1月9日, つくば国際会議場(茨城)
  - ③ M. Katoh, Radiation from Laser-modulated and Laser-sliced Electron Bunches in UVSOR-II (招待講演), 32nd International Free Electron Laser Conference, 2010年8月24日, Hilton Malmoe City, Sweden
  - ④ H. Zen, M. Adachi, M. Katoh, M. Hosaka, Y. Taira, N. Yamamoto, T. Tanikawa, Numerical on Coherent Harmonic Generation Free Electron Laser seeded by Chirped External laser, 32nd International Free Electron Laser Conference, 2010年8月24日, Hilton Malmoe City, Sweden
  - ⑤ T. Tanikawa, M. Adachi, M. Katoh, J. Yamazaki, H. Zen, M. Hosaka, Y. Taira, N. Yamamoto, Saturation Phenomena of VUV Coherent Harmonic Generation at UVSOR-II, 32nd International Free Electron Laser Conference, 2010年8月24日, Hilton Malmoe City, Sweden
  - ⑥ 全炳俊、阿達正浩、加藤政博、谷川貴紀、平義隆、山本尚人、保坂将人, 数値計算によるCHG-FELの研究, 第7回日本加速器学会年会, 2010年8月5日, 姫路市文化センター(兵庫)
  - ⑦ M. Shimada, M. Katoh, M. Adachi, T. Tanikawa, S. Kimura, M. Hosaka, N. Yamamoto, Y. Takashima, T. Takahashi, Observation of Transverse-Longitudinal Coupling effect at UVSOR-II, 1st International Particle Accelerator Conference (iPAC'10), 2010年5月24日, 京都国際会議場(京都)
  - ⑧ N. Yamamoto, M. Shimada, M. Adachi, H.

- Zen, T. Tanikawa, Y. Taira, S. Kimura, M. Hosaka, Y. Takashima, T. Takahashi, M. Katoh, Study of the Coherent Terahertz Radiation by Laser Bunch Slicing at UVSOR-II Electron Storage Ring, 1st International Particle Accelerator Conference (iPAC'10), 2010年5月24日, 京都国際会議場(京都)
- ⑨ T. Tanikawa, M. Adachi, M. Katoh, J. Yamazaki, H. Zen, M. Hosaka, Y. Taira, N. Yamamoto, Spectral Measurement of VUV CHG at UVSOR-II, 1st International Particle Accelerator Conference (iPAC'10) 2010年5月24日 京都国際会議場(京都)
- ⑩ I. Katayama, H. Shimosato, M. Bito, K. Furusawa, M. Adachi, M. Shimada, H. Zen, S. Kimura, N. Yamamoto, M. Hosaka, M. Katoh, M. Ashida, THz Field Detection of the Coherent Synchrotron Radiation Produced by Laser Bunch Slicing, Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2010), 2010年5月16日, San Jose Convention Center, USA
- ⑪ 山本尚人、保坂将人、島田美帆、阿達正浩、全炳俊、谷川貴紀、平義隆、高嶋圭史、木村真一、高橋俊晴、加藤政博, 電子蓄積リングとレーザーバンチスライス法を用いたコヒーレントなテラヘルツ光源の開発, 第23回日本放射光学学会年会2010年1月8日, イーグレ姫路(姫路市)
- ⑫ M. Adachi, M. Katoh, H. Zen, T. Tanikawa, M. Hosaka, Y. Takashima, N. Yamamoto, Y. Taira, Status and Prospects of Coherent Light Source Developments at UVSOR-II, 第10回国際放射光技術会議, 2009年9月29日, メルボルン国際会議場(メルボルン、オーストラリア)
- ⑬ T. Tanikawa, M. Adachi, M. Katoh, J. Yamazaki, H. Zen, M. Hosaka, Y. Taira, N. Yamamoto, STATUS OF VUV CHG AT UVSOR-II, 第31回国際自由電子レーザー会議, 2009年8月25日, BT コンベンションセンター(リバプール、英国)
- ⑭ 島田美帆、加藤政博、阿達正浩、谷川貴紀、千葉寿、木村真一、保坂将人、山本尚人、高嶋圭史、高橋俊晴, UVSOR-IIにおける低 $\alpha$ 運転とバンチスライス, 第5回日本加速器学会年会, 2008年8月7日, 東広島市中央公民館
- ⑮ N. Yamamoto, M. Katoh, M. Adachi, M. Shimada, S. Kimura, A. Mochihashi, M. Hosaka, Y. Takashima, S. Bielawski, C. Szwaj, C. Evain, T. Hara, T. Takahashi,

Microfabrication of Relativistic Electron Beam By Laser and Its Application To THz Coherent Synchrotron Radiation, 11th European Particle Accelerator Conference, 2008年6月25日, ジェノア(イタリア)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

島田美帆 (Miho Shimada)  
高エネルギー加速器研究機構  
・加速器研究施設・助教  
研究者番号: 10442526  
木村真一 (Shin-ichi Kimura)  
分子科学研究所・極端紫外光研究施設  
・准教授  
研究者番号: 10252800  
阿達正浩 (Masahiro Adachi)  
分子科学研究所・極端紫外光研究施設  
・助教  
研究者番号: 30446455  
全炳俊 (Heishun Zen)  
分子科学研究所・極端紫外光研究施設  
・助教  
研究者番号: 80548371  
高橋俊晴 (Toshiharu Takahashi)  
京都大学・原子炉実験所・准教授  
研究者番号: 00273532  
高嶋圭史 (Yoshifumi Takashima)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 40303664  
保坂将人 (Masahito Hosaka)  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 60290897  
山本尚人 (Naoto Yamamoto)  
名古屋大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 50540986