

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24651102

研究課題名(和文) 新しい手法による大強度・高効率コヒーレント光源の開発

研究課題名(英文) Development of a High-Intensity and High-Efficiency Coherent Light Source by a New Method

研究代表者

磯山 悟朗 (Isoyama, Goro)

大阪大学・産業科学研究所・教授

研究者番号：80125989

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：自由電子レーザーは、電子ビームの持つ運動エネルギーを直接レーザー光に変換するが、その変換効率は高くない。加速器で発生する電子ビームが磁場で曲げられるとバンチと同程度の波長をもつ強いコヒーレント放射が発生するが、1ミリ以下のバンチ発生は難しい。本研究は、自由電子レーザーを短い電子バンチの発生機とし大強度単色コヒーレント光を発生する新しい手法の開発を目指した。実験に使用する自由電子レーザーで電子ビームのエネルギー分布を測定したところ、予想以上にエネルギー広がりが大きいことが分かった。自由電子レーザーで発生するバンチは一樣磁場中では消滅すると考えられるため、特殊な磁場を用いる必要がある。

研究成果の概要(英文)：Free-electron laser converts kinetic energy of a high energy electron beam to laser light though its conversion efficiency is not high. High intensity coherent radiation is generated in a wavelength region around the bunch length of an electron beam when it is bent in a magnetic field, but the bunch length is not shorter than 1 mm. This study aimed to develop a new method for generation of high-intensity monochromatic coherent light using free electron laser as a short electron bunch generator. The energy profile of the electron beam was measured for the free-electron laser in operation and it turned out the energy spread was larger than expected. Micro-bunches generated in the free-electron laser are considered to be smoothed out in a uniform magnetic field, so that it is necessary to adopt a special magnetic field to maintain the bunching.

研究分野：加速器、自由電子レーザー

キーワード：量子ビーム 光源技術 加速器 高性能レーザー

### 1. 研究開始当初の背景

自由電子レーザー (FEL) の 1 種類である SASE は、大強度コヒーレント X 線を発生する第 4 世代の放射光源として日米欧で利用研究や施設建設が行われている。SASE で波長 0.1nm の単色コヒーレント X 線を発生するにはエネルギー 10 GeV 程度の電子ライナックと長さ 100m 前後の長尺アンジュレーターが必要である。既存の放射光施設でタンパク質の構造解析に使われる、より高いエネルギーの X 線を発生するのは容易ではない。他方、長波長領域で動作する通常の FEL では、ウイグラー中の電子ビームが誘導放射により光共振器に蓄えたコヒーレント光を増幅するため、コヒーレント光の一部だけしか光共振器から取り出して利用することが出来ない。増幅率が電流に比例する誘導放射とは異なり、光の波長程度の長さを持つ電子ビームのバンチから放射されるコヒーレント放射は、バンチ内にある電子数の 2 乗に比例してその強度を増すので、大強度赤外・テラヘルツ波源として注目されている。しかし、加速器の電子バンチを極端に短くすることは容易ではなく、コヒーレント放射の発生と利用は遠赤外線領域に限られている。

### 2. 研究の目的

本提案の目標は、これら SASE や FEL の波長やパワーの限界を乗り越える新しい手法として、SASE や FEL 発振により光波長の周期でバンチした電子ビームを偏向磁石に導き、大強度単色コヒーレント光とその高調波を発生できることを実験的に検証する。

### 3. 研究の方法

大阪大学産業科学研究所の L バンド電子ライナックと自由電子レーザー装置を用いて遠赤外線領域で FEL や SASE を発振させ、使用済みの電子ビームが偏向磁石で放射するコヒーレント放射を測定する。コヒーレント放射の強度と波長スペクトル、時間構造などの特性を計測して、FEL や SASE をバンチング装置として使用するコヒーレント放射が従来型光源の限界を超える高強度で高輝度の単色光とその高次高調波の発生が可能であることを実験的に検証する。

FEL の場合、L バンド電子ライナックで加速したバンチ長約 20ps でピーク電流 50A、バンチ間隔 9.2ns、パルス長 6 $\mu$ s でエネルギー 15MeV の電子ビームをアンジュレーター (あるいはウイグラーと呼ばれる) に導く。このアンジュレーターは、周期長 6cm で周期数 32 を持ち、永久磁石によりビーム軸に沿いサイン型に変化する最大ピーク値 0.35T の磁場を発生する。アンジュレーターの上流と下流側に、2 枚 1 組の球面鏡を 5.55m 間隔で向かい合わせに置き、共中心型の光共振器を構成する。FEL に関しては、現時点で波長 25 から 150 $\mu$ m でパワー飽和に達する強い発振を実現している。

FEL の場合と異なり、SASE 実験では L バンド電子ライナックで加速する大強度単バンチ電子ビームを使用する。単バンチ電子ビームのエネルギーは 12MeV で、バンチ長は多バンチビームと同じ 20ps であるがピーク電流は 1kA を超える。FEL 用の光共振器は取外し、アンジュレーターに導く。SASE は 200 $\mu$ m 前後の波長領域で発振して強い光を発生するが、長さ 2m 足らずの FEL 用アンジュレーターを使用するために SASE パワーは飽和に達しない。しかし SASE の性能を表す FEL パラメータは  $2 \times 10^{-2}$  と短波長領域の SASE の値  $\sim 10^{-4}$  に比べて格段に大きく、即ち光パワーの増幅率が 2 桁大きい。この結果、光波長を周期とする電子ビームのバンチングが大きく進み、世界で初めて実験的に SASE の非線形高調波発生による 2 次と 3 次の高調波を観測した。FEL 用アンジュレーターを用いて行う SASE 実験では、200 $\mu$ m を超える波長領域で強い SASE を発生できる。

真空中を伝播する光は横波であるので併走する電子ビームと相互作用することが出来ない。しかしコヒーレント光と共にアンジュレーター内を進行する電子ビームは、アンジュレーターの磁場により蛇行運動をするので光の電場中で横方向の速度成分を持つ。その結果、電子ビームは光とエネルギーの交換をする。即ちコヒーレント光により電子が加速減速され、光波長の半周期毎に高いエネルギーを持つ電子と低いエネルギーを持つ電子が交互に生じる。電子の縦方向密度分布が一様であるとする、この時点では電子ビームの平均エネルギーと光のそれとに変化は無い。エネルギー変調を受けた電子がアンジュレーター中を進むと、蛇行の振幅は低エネルギー電子で大きく、高エネルギー電子では小さいので、縦方向の平均速度が速い高エネルギー電子群は低エネルギー電子群に追い付く。即ち、アンジュレーター中で電子のエネルギー変調が電子の密度変調に変換される。これをマイクロバンチングと呼ぶ。アンジュレーター出口付近で、電子密度が高い部分がコヒーレント光により減速されて光を増幅する。FEL の増幅は、コヒーレント光の増幅と電子ビームの光波長でのバンチングが協調的に起きる。FEL では、コヒーレント光が光共振器を往復する毎に新しい電子バンチにより増幅されるが、電子バンチ内の光波長でのマイクロバンチングはコヒーレント光の強度が高いほど大きいので、FEL がパワー飽和に達した時が最大である。光共振器を用いる FEL の場合、光のコヒーレント長は電子バンチの長さまで伸びることのできる。波長間隔の電子バンチは、多数が連なる。

SASE の場合、同一の電子バンチが、コヒーレント光を一度だけ増幅するが、増幅率が FEL に比べて格段に高いので電子ビームのマイクロバンチングと光の増幅はアンジュレーターを進む距離に対して指数関数的に増

大する。光波長でのマイクロバンチングが進むと密度分布が先鋭化して高次の高調波成分を持つようになる。

FELやSASEの発振に使用した電子ビームはアンジュレーター下流に置いた編恋磁石で45度曲げてビームダンプに捨てる。この電子ビームが偏向磁石で発生するコヒーレント放射を遠赤外検出器で計測して特性を調べる。

#### 4. 研究成果

FEL発振に使用した電子ビームは、偏向磁石で45度曲げてビームダンプに捨てる。この偏向磁石で発生するコヒーレント放射を測定するために、偏向磁石用真空チェンバーを更新して光取出し用窓を設け、これを既存の真空排気した光輸送路に接続する装置の設計を行った。その際の問題は、高真空のFELビームラインとロータリーポンプで排気する光ビームラインを分ける真空窓である。遠赤外光の取出しには、この領域で高い透過率を持つダイヤモンド窓が必要であるが、ロウ付けにより高真空で使用できる窓を製作するには高い技術が必要で、国内では市販品が無かった。そのため、ドイツからCVDで製作した直径20で厚さ0.3mmの多結晶ダイヤモンド板を購入し、ロウ付けのための技術開発を京セラに依頼した。その結果、有効径が18の高真空ダイヤモンド窓の製作に成功した。

もう一つの要素はコヒーレント放射用の高感度検出器である。検出感度が高いシリコンポロメータを使用する計画であるが、既存の検出器の性能を測定したところ検出素子の劣化により検出感度が低下していることが判明した。そこで、米国製の検出素子を交換して検出感度が回復したことを確認した。

偏向磁石で発生するコヒーレント放射を測定するために、偏向磁石用真空チェンバーを設計・製作した。直進するFEL光がこの真空チェンバーを通過するゼロ度方向の出入口と、FEL発振に使用した電子ビームを左に曲げてビームダンプに導く45度方向出口の中間にコヒーレント放射を取り出す。即ち、電子ビームが直進方向から数度曲がった時点で接線方向に出るコヒーレント放射を取り出して測定する。取り出したコヒーレント光を平行光束にして、取出し口の反対側にある測定室に導くためには、FELビームラインを跨ぐ複雑な光輸送路を設計、製作しなければならない。そこで、下流側から凹面鏡を適切な位置に挿入してコヒーレント光を上流側に反射し、ダイヤモンド窓を通して低真空の光輸送路に導く。凹面鏡の位置を変えると光輸送路のビームサイズを変えることができる。

コヒーレント放射の駆動源であるFELに関しては、ライナックの電子銃用に新たに開発した27MHzで動作するグリッドパルサーを用いて、電子ビームのピーク電流を4倍高め

ることで波長70-80ミクロンでマクロパルスエネルギーが25ミリジュールに達する高出力運転を実現した。これにより電子ビームに光の波長で強い密度変調が発生すると考えられ、強いコヒーレント放射の発生が期待できる。

平成25年度から26年度にかけて波長70~80 $\mu\text{m}$ 付近で最大となるFELの高強度運転を実現した。この電子ビームを用いたコヒーレント放射発生の準備として、電子のビームダンプ表面に蛍光板を取り付けてFEL発振中の電子ビームサイズを測定した。その結果、FEL発振時の電子ビームは、空気中に取り出すタンタルフォイル窓より大きくなることが分かった。これは、FEL発振による電子ビームの平均エネルギー低下だけではなく、エネルギー広がり予想より極端に大きいことを意味する。使用するウイグラーの周期数をNとすると、FELが飽和に達する高出力運転をする時の理論的な最大変換効率は $\sim 1/2N$ である。阪大産研FEL用ウイグラー周期は $N=32$ であり、電子ビームのエネルギー変化は2%程度となるため、エネルギー広がりもこの2倍程度と予想した。しかし測定した電子ビームのエネルギー広がりはいずれもこれより桁近く大きいことが分かった。大強度コヒーレント光を発生するためには、発生部を含む電子ビーム輸送路は、エネルギー分散が無く(アクロマティック)且つエネルギーにより軌道長が変わらない(アイソクロナス)という条件を満たさなければならない。一様磁場を持つ偏向磁石では、この条件を満たせないため本研究を一時中止した。

エネルギー広がり大きい電子ビームの時間と空間構造を保ったまま輸送して高輝度コヒーレント光を発生するには、通過時間が電子エネルギーに依らず(アイソクロナス)且つ出口での横方向位置がエネルギーに依存しない(アクロマティック)磁場輸送路と発光部を構築しなければならない。阪大産研FELでは、このようなシステムを構築する場所が無いため本研究を一時中断した。本研究の期間内では、FELをマイクロバンチ源とする高輝度単色コヒーレント放射の発生実験を行うことが出来なかったが、原理的には非常に有望な手法であると考えるので、今後も基礎的な研究を継続したい。

#### 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 1 件)

S. Suemine, K. Kawase, N. Sugimoto, S. Kashiwagi, K. Furukawa, R. Kato, A. Irizawa, M. Fujimoto, H. Ohsumi, M. Yaguchi, S. Funakoshi, R. Tsutsumi, K. Kubo, A. Tokuchi, G. Isoyama, Grid pulser for an electron gun with a thermionic cathode for the high-power

operation of a terahertz free-electron laser, Nucl. Instr. Meth. A773 (2015) 97-103, 査読有  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2014.10.071>

〔学会発表〕(計 3 件)

K. Kawase, M. Fujimoto, S. Funakoshi, K. Furukawa, A. Irizawa, G. Isoyama, R. Kato, K. Kubo, K. Miyazaki, S. Suemine, A. Tokuchi, R. Tsutsumi, M. Yaguchi, "High Power Operation of the THz FEL at ISIR, Osaka University", Proc. of 36-th International Free Electron Laser Conference (August 25 - 29, 2014, Basel, Switzerland), pp. 528-531、査読無

加藤龍好, 川瀬啓悟, 入澤明典, 藤本將輝, 矢口雅貴, 船越壮亮, 堤亮太, 宮崎数磨, 磯山悟朗, 柏木茂, 山本樹, 「高強度テラヘルツFELの時間形状と波長スペクトルの発展」, 第11回日本加速器学会年会報告書(2014年8月8日 - 12日、青森市) pp. 986-989、査読無

川瀬啓悟, 加藤龍好, 入澤明典, 藤本將輝, 矢口雅貴, 船越壮亮, 堤亮太, 磯山悟朗, 「産研 THz-FEL の現状」, 第21回 FEL と High-Power Radiation 研究会、2014年12月11日(木)~12日(金)、大阪大学産業科学研究所、大阪府茨木市

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

磯山 悟朗 (ISOYAMA, Goro)  
大阪大学・産業科学研究所・教授  
研究者番号：80125989

### (2) 研究分担者

加藤 龍好 (KATO, Ryukou)  
大阪大学・産業科学研究所・准教授  
研究者番号：20273708

### (3) 研究分担者

川瀬 啓悟 (KAWASE, Keigo)  
大阪大学・産業科学研究所・助授  
研究者番号：60455277

### (4) 研究分担者

入澤 明典 (IRIZAWA, Akinori)  
大阪大学・産業科学研究所・助授  
研究者番号：90362756