

平成 29 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25286084

研究課題名(和文)セルフシーディング逆コンプトン散乱による偏極X線発生

研究課題名(英文)Polarized x-ray generation based on self-seeding inverse Compton scattering

研究代表者

柏木 茂(KASHIWAGI, Shigeru)

東北大学・電子光理学研究センター・准教授

研究者番号：60329133

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：フェムト秒時間幅の極短電子ビームが自身の発生したコヒーレントアンジュレータ放射と逆コンプトン散乱することによって偏極X線を発生するセルフシーディング逆コンプトン散乱X線源の研究開発を行なった。我々は本研究における2つの重要課題(極短電子ビーム生成とTHz領域コヒーレントアンジュレータ発生)を、ビーム実験により実証した。また、偏極X線発生に必要な不可欠な偏光制御されたコヒーレントアンジュレータ放射の発生についても、交叉型アンジュレータを導入することによって実現できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We performed a study on polarized x-ray generation based on self-seeding inverse Compton scattering at Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University. In this study, we were able to demonstrate experimentally about two important issues that one is an extremely short electron bunch generation and another one is the generation of coherent undulator radiation. The pulse length of short electron bunch was measured using Michelson interferometer, and the deduced bunch length from frequency spectrum of the radiation was approximately 80 fs (rms). The coherent undulator radiation in terahertz region was successfully observed and its characteristics were measured. The results obtained from these experiments are valuable information for the research field related to beam physics and high intensity radiation generation.

研究分野：加速器科学

キーワード：コヒーレント放射 極短電子ビーム 逆コンプトン散乱 シンクロトロン放射 アンジュレータ

1. 研究開始当初の背景

多くの学術分野、産業界などで、自由に偏光が制御できる光源（特に円偏光光源）が求められている。物性関連では、紫外～真空紫外領域の直線偏光や円偏光した光は、一軸性単結晶などの方向性を持った物質の直線二色性や、生体分子のようなキラルな分子の円二色性など様々な光学的物性を調べるための極めて重要な測定手段である。産業界においても、近年、偏光を利用した真空紫外プロセスが実用化されつつあり、そのプロセスの高度化や詳細な研究を可能にするためには偏光光源の高度化が求められている。また、素粒子原子核物理学においても（光子のエネルギーが高い）高強度の偏極線は、光核物理の研究をはじめ多くの分野で有力な実験手段として期待されている。特に、素粒子物理学の分野で計画されている国際リニアコライダー（ILC）では、偏極線から対生成により偏極陽電子を生成することによって、新現象の発見能力を飛躍的に向上させる事を目指した開発研究が行われている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、フェムト秒時間幅の極短電子バンチによりテラヘルツ領域の円偏光コヒーレントアンジュレータ放射光を発生させ、このアンジュレータ放射光と極短電子バンチを高精度に制御し逆コンプトン散乱させることにより、高輝度で偏光とエネルギーが可変の超軟X線を発生させることである。テラヘルツ（THz）光の波長よりも短い電子バンチ（～100フェムト秒）と高速に円偏光方向をスイッチできるアンジュレータを使うことにより、高強度かつコヒーレントなTHzアンジュレータ放射光を発生させる。この放射光の波長はアンジュレータギャップまたは電子バンチエネルギーにより可変である。この円偏光したアンジュレータ放射光と電子バンチとを逆コンプトン散乱させ、その時発生するX線の超前方方向のみを切り出すことにより極めて高い偏極度をもつ超軟X線（エネルギー30eV程度、波長：約40nm）を得ることができる（図1）。

3. 研究の方法

最初に極短電子バンチによる円偏光THzアンジュレータ放射光の発生についての理論考察から、電子バンチおよびアンジュレータに求められる性能を明確する。そして、放射光施設などで広く使われている永久磁石で構成されるアンジュレータをベースに、高速に偏光が反転できるアンジュレータの設計・検討を行う。THzコヒーレントアンジュレータ放射光発生については、東北大学電子光物理学研究センターの試験加速器施設(t-ACTS)においてビーム実験を実施する。このビーム実験では、フェムト秒オーダーの極短電子ビーム生成と平面型アンジュレータを用いたコヒーレントアンジュレータ

放射発生との2つを重点課題として取り組む。コヒーレントアンジュレータ放射発生実験では、測定システムを構築し放射の特性をできる限り詳細に測定・評価する。その後、偏光X線発生実験を行なうためのシステム設計を行う。

4. 研究成果

極短電子ビームによるコヒーレント放射発生について、電子バンチ長が変化した場合のコヒーレント放射の電場分布および周波数スペクトルがどのように変化するか理論考察を行った。考察では、電子光物理学研究センターが所有する永久磁石アンジュレータ（周期長：100mm、周期数：25、最大磁場強度：0.41T）を放射光源として仮定した。図2にコヒーレント放射の電場分布およびスペクトルを示す。電場分布からも分かるように、放射の波長に対してバンチ長を調整することによって基本波長のみを強調して発生できることがわかった（図2下段）。この計算結果は、テラヘルツ波の波長に対し横方向ビームエミッタンスが小さい場合には、空間および時間コヒーレンスを持つ放射、いわゆる超放射を発生できることを意味している。この超放射はレーザー光のように電磁場の重ね合わせが容易にできるため、放射の偏光

<Inverse Compton scattering>

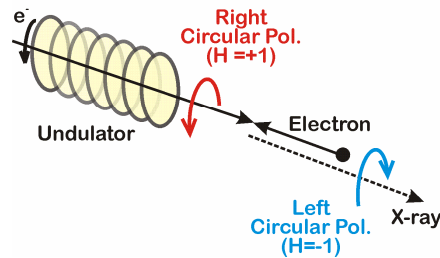


図1: 右偏光アンジュレータ光と電子の逆コンプトン散乱。偏光は散乱X線へと転送される。超前方を切り出す事で左偏光のみのX線を得る事ができる

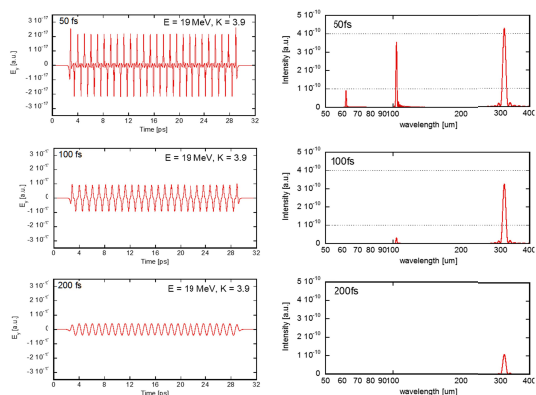


図2: フェムト秒電子バンチからのアンジュレータ放射（左列）放射電場分布（右列）放射スペクトル、（上段）50fs（中段）100fs（下段）200fs

を制御するには有効である。その他にも、ビーム実験の準備として、アンジュレータに入射する電子ビームの Twiss パラメータの最適化およびその加速器調整方法について詳細な検討を行ない、ビームの適合条件を明確にした。

ビーム実験では、本研究で最も重要かつ必要不可欠なフェムト秒時間幅の極短電子ビーム発生およびその評価に多くの時間を費やした。本研究では、進行波加速管中での速度変調法 (velocity bunching 法) によりバンチ圧縮する手法を採用した。進行波加速管に入射するビームの縦方向位相空間分布および入射位相を制御することにより、100 fs 以下の極短電子ビーム生成に成功した。実験開始当時、バンチ長計測はストリークカメラを使い電子ビームによって発生した可視光領域の遷移放射(OTR)を計測する手法を用いていたが、光輸送系における波長分散の影響や OTR の光量不足などにより、400fs 程度の時間分解能のしか得ることができなかった。しかし、その際にテラヘルツ領域のコヒーレント遷移放射(CTR)を観測することができた為、CTR の周波数スペクトルから電子バンチ長を導出する手法を試みた。実験では、マイケルソン干渉計を独自に構築し、測定された CTR の干渉パターンをフーリエ変換により周波数スペクトルを求めた。この周波数スペクトルは時間方向のバンチ形状因子を反映させたものになっているため、スペクトルをバンチ形状因子と回折損失を考慮した関数でフィッティングすることでバンチ長を求めることが可能である。実際の極短電子バンチ生成実験では、入射位相に対するバンチ長の変化について評価した (図 3)。Velocity bunching で最も時間幅が短くなる入射位相において約 80 fs (rms)の電子バンチの生成を確認した。この測定されたバンチ長はシミュレーションの結果とも良く一致した。これより、velocity bunching によるパルス圧縮が理論どおりに機能していることを実験的に証明することができた。

極短電子ビームを確認した後、アンジュレータを用いたコヒーレント放射発生実験を

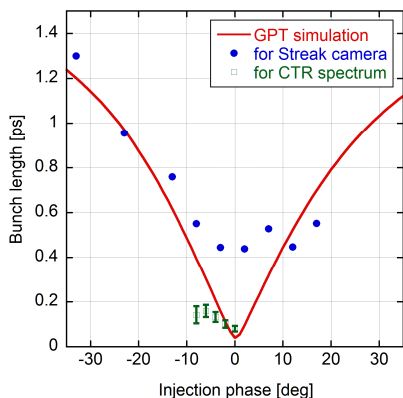


図 3 加速管へのビーム入射位相に対する、シミュレーション結果 (赤線) とストリークカメラによる想定結果 (青点) とスペクトル解析によるバンチ長導出結果 (緑点)

実施した。発生したコヒーレント放射は、本来ならば偏向電磁石により電子ビームと放射を分離したかたちで計測するべきであるが、偏向電磁石のギャップ (20mm) が狭く回折損失による測定への影響が大きいと判断し、本測定ではアンジュレータ下流に Al スクリーンを挿入し 90 度方向に放射を反射して測定した。ビーム実験では、マイケルソン干渉計によるスペクトル測定、ワイヤグリッドを用いた偏光特性測定などを行った。図 4 の上段にマイケルソン干渉計により測定された干渉パターン、下段にその干渉パターンのフーリエ変換により求めた周波数スペクトルを示す。干渉パターンはコヒーレント放射の波長周期で正弦波形になっており、そのサイクル数もアンジュレータ周期数の 2 倍の 50 サイクルであった。この干渉パターンは、アンジュレータ放射がコヒーレントな放射であることを明確に示している。我々は、バンチ長が約 80fs の極短電子バンチにより波長が約  $100\mu\text{m}$  ( $\sim 3\text{THz}$ ) のコヒーレントアンジュレータ放射を発生することに成功した。

その他、コヒーレントアンジュレータ放射

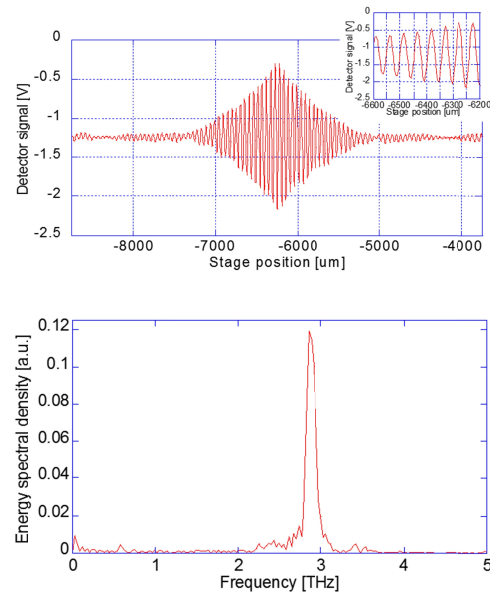


図 4 (上段)マイケルソン干渉計で測定された干渉パターン、(下段)周波数スペクトル

の水平・垂直方向偏光成分の空間分布を測定し、理論計算と比較することでその評価を行った。偏光測定において、本来であるならば電子の振動面に垂直な偏光成分は、電子の振動方向の主偏光成分に比べて十分弱く四極分布を示す。しかし、実験では四極成分の中央に測定されないはずの主偏光成分の 3~4 割の強度をもつ放射が測定された。この原因はまだ明らかにできていないが、電子ビームのエミッタンスの影響により、本来観測されない偏光成分が測定された可能性がある。

また、ビーム実験と平行して円偏光アンジュレータの検討を行った。本研究を開始し

た当初は、放射光施設で近年開発された 6 磁石列のアップル型アンジュレータを改良することを候補としていたが、機械構造上の問題により位相反転を高速に行なうことは困難であるという結論に至った。そこで、平面型アンジュレータによって円偏光コヒーレント放射を生成する 2 つのアイデアを発想した。1 つは、2 台の平面型アンジュレータを使い、それぞれのアンジュレータで水平・垂直の直線偏光放射を発生し、それらを重畳する方法（交叉型アンジュレータ方式）、もう 1 つは 1 台の平面型アンジュレータを使い直線偏光のコヒーレントアンジュレータ放射を発生させ、それを 2 光束に分割した後、一方の光束を THz 帯で使用可能な波長板を使い偏光を操作した後、再度、2 光束を合成することで円偏光を実現する方法である。両者とも、今後、詳細な考察が必要であるが、本研究において THz 帯のコヒーレントアンジュレータ放射が発生できたことによって、上記の 2 つの方法により高速偏光スイッチできる円偏光コヒーレント放射光源が実現可能となった。

極短電子ビームとコヒーレントアンジュレータ放射のセルフシーディング逆コンプトン散乱システムについて、試験加速器 t-ACTS のビームラインをベースに設計を行った。本研究において、電子ビームと THz 光の逆コンプトン散乱システムを考える上で、十分な配慮が必要な事柄は 2 つある。1 つは THz コヒーレントアンジュレータ放射を衝突点で波長程度（ $\sim 100\mu\text{m}$ ）まで小さく絞ること、もう 1 つは THz 帯の放射は空気での減衰が大きいため、光輸送系は真空中に構築し、かつできる限りミラーなどの光学素子の数を減らす必要がある。基本的には衝突システムについては理論的・技術的問題はなく、第一案の設計を完了することができた。

研究期間内に THz コヒーレントアンジュレータ放射と極短電子ビームを逆コンプトン散乱させることによって軟 X 線を発生させるまでには至らなかったが、本研究の 2 つの重要課題である、フェムト秒時間幅の極短電子ビーム生成とその電子ビームを用いたコヒーレントアンジュレータ放射発生については、ビーム実験により実証することができた。このことは、ビーム物理学や放射光科学など関連分野にとって貴重な情報をもたらすと同時に学術的な意義も大きいと思われる。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

“Proof-of-Principle Experiment of Velocity Bunching for Ultra-short Electron Pulse Production”, S. Kashiwagi, F. Hinode, T. Muto, H. Saito, K. Nanbu, I. Nagasawa, K. Takahashi, C. Tokoku, E. Kobayashi and H. Hama, Energy Procedia **89** (2016) 346-352.

査読有 doi: 10.1016/j.egypro.2016.05.045  
“Generation of coherent undulator radiation at ELPH, Tohoku University”, S. Kashiwagi, T. Abe, F. Hinode, T. Muto, K. Nanbu, K. Takahashi, I. Nagasawa, H. Saito, Y. Shibasaki, C. Tokoku and H. Hama, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, TUPOW009, (2016) 1760-1762. 査読無 ISBN 978-3-95450-147-2.

“Production of ultra-short electron pulse and observation of coherent transition radiation at t-ACTS, Tohoku University”, T. Abe, S. Kashiwagi, F. Hinode, T. Muto, K. Nanbu, K. Takahashi, I. Nagasawa, H. Saito, Y. Shibasaki, C. Tokoku and H. Hama, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, TUPOW010, (2016) 1763-1765. 査読無 ISBN 978-3-95450-147-2

“Generation of coherent undulator radiation at ELPH, Tohoku University”, S. Kashiwagi, T. Abe, F. Hinode, H. Hama, T. Muto, K. Nanbu, I. Nagasawa, H. Saito, Y. Saito, Y. Shibasaki, K. Takahashi, Proceedings of LINAC2016, MI, USA, MOP106022, (2016) 316-318. 査読無 DOI: 10.18429/JACoW-LINAC2016-MOP106022

〔学会発表〕(計 12 件)

「極短電子ビームからのコヒーレント THz アンジュレータ放射の観測」、柏木茂, 阿部太郎, 鹿又健, 齊藤寛峻, 齊藤悠樹, 高橋健, 長澤育郎, 南部健一, 西森信行, 日出富士雄, 三浦禎雄, 武藤俊哉, 濱広幸, 第 72 回日本物理学会年次大会、2017 年 3 月 17 日(大阪大学、大阪府)17aK42-3  
“Measurement of coherent transition radiation in the THz region from extremely short electron bunch”, Taro Abe, Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Toshiya Muto, Yoshinobu Shibasaki, Kenichi Nanbu, Ikuro Nagasawa, Ken Takahashi, Hirotoishi Saito, Hiroyuki Hama, 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 8, 2016, Chiba, Japan, MOOL01, 19-23.

「極短電子ビームを用いたコヒーレントアンジュレータ放射光発生に関する研究」、柏木茂, 日出富士雄, 武藤俊哉, 南部健一, 齊藤寛峻, 阿部太郎, 柴崎義信, 高橋健, 東谷千比呂, 長澤育郎, 濱広幸, 第 71 回日本物理学会年次大会、2016 年 3 月 22 日(東北学院大学、仙台市)22aAP-12  
“Extremely Short Electron Bunch Generation for Producing THz Superradiance at T-ACTS, Tohoku University”, S. Kashiwagi, F. Hinode, T. Muto, H. Saito, T. Abe, Y. Shibasaki, K. Nanbu, I. Nagasawa, K. Takahashi, C. Tokoku, E. Kobayashi and H. Hama, 8th

International Workshop on Infrared  
Microscopy and Spectroscopy using  
Accelerator Based Sources (WIRMS 2015),  
October 15, 2015, Riverhead, NY, USA.

「進行波加速構造中における速度集群法  
を用いた極短パルス電子ビーム生成」柏  
木茂，永沢聡，日出富士雄，齊藤寛峻，  
武藤俊哉，柴崎義信，南部健一，高橋健，  
長澤育郎，東谷千比呂，濱広幸、第 70 回  
日本物理学会年次大会，2015 年 3 月 22  
日（早稲田大学、東京都）22pDE-1

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

柏木 茂 (KASHIWAGI, Shigeru)  
東北大学・電子光理学研究センター・准教授  
研究者番号： 60329133

### (2) 研究分担者

日出 富士雄 (HINODE, Fujio)  
東北大学・電子光理学研究センター・准教授  
研究者番号： 60292207

加藤 龍好 (KATO, Ryukou)  
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究  
施設・教授  
研究者番号： 20273708

土屋 公央 (TSUCHIYA, Kimichika)  
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究  
施設・准教授  
研究者番号： 40236906

### (3) 連携研究者

福田 将史 (FUKUDA, Masahumi)  
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： 00555617

武藤 俊哉 (MUTO, Toshiya)  
東北大学・電子光理学研究センター・助教  
研究者番号： 10431496

南部 健一 (NANBU, Kenichi)  
東北大学・電子光理学研究センター・技術専門  
職員  
研究者番号： 00422072