

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月17日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K13401

研究課題名(和文)超高速偏光スイッチングを可能にするマイクロ波アンジュレータの開発

研究課題名(英文)Development of microwave undulator for fast polarization switching

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：放射の偏光状態を高速に制御できるマイクロ波アンジュレータの研究開発を行った。電子ビームを水平方向と垂直方向に蛇行させるための2つのモードの電磁場を1つの共振器の中に励振できる高周波空洞を設計し、その試作機を製作した。試作機の電磁場分布をビーズ摂動法により測定し、その電磁場分布より電子ビーム軌道などを評価した。それにより、空洞端部の電磁場がビームに与える影響について明らかにすることができた。また、極短電子ビームにより発生したコヒーレントアンジュレータ放射の可干渉性を利用した、新たな偏光操作方法を考案した。加速器電子ビームを用いた試行実験により本偏光操作方法の原理を実証することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電磁波の重要な特性の一つである偏光を操作することによって、様々な機能材料の研究開発がなされてきた。現在、THz波領域においては、広帯域で使用可能な光学素子の開発が遅れており、偏光を自由に操作できる光源の開発が待たれている。本研究で開発した高速偏光スイッチ可能なマイクロ波アンジュレータやコヒーレントアンジュレータ放射の偏光操作技術をテラヘルツ波発生に応用することによって、高速通信に用いられる光デバイス開発を飛躍的に進展させることができる。また、生体科学分野においても偏光制御可能なTHz光源は、タンパク質の立体構造を調べるのに極めて有用である。

研究成果の概要(英文)：We developed a microwave undulator that can manipulate the polarization state of radiation at high speed. We designed the microwave undulator cavity that can excite two mode of electromagnetic fields for making the oscillation motion of electron beam in both the horizontal and vertical directions. The cold model of the undulator was manufactured and the electromagnetic field distribution was measured by the bead perturbation method. The electron beam trajectory was evaluated from the measured electromagnetic field distribution in the undulator cavity. We have developed a novel polarization control method that makes use of the coherence of an undulator radiation emitted from a very short electron beam. The principle of this polarization control method in THz region was demonstrated using 5 MeV electron beam and 10-periods undulator.

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：偏光 マイクロ波 加速器 テラヘルツ波 アンジュレータ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

これまでに、電磁波の波の振動方向（偏光）やその強度を制御することで、様々な機能をもつ光デバイスが開発されてきた。現在、我々が利用している電磁波の高周波化が進んでおり、数百ギガヘルツの無線通信が実現される時期も遠くないと考えられている。しかし、次世代のデバイスの動作目標とされるテラヘルツ帯においては、簡便に電磁波（光）の偏光や強度を制御することができず、そのことが実用化に向けた光デバイス開発の妨げになっている。つまり、自由に偏光が制御できるテラヘルツ光源ができれば、高速通信のための光デバイス開発を飛躍的に発展させる可能性を秘めている。テラヘルツ帯の光に限らず放射光を利用した研究においても、近年、実験手法の高度化が急速に進み、磁気円二色性分光(MDC: Magnetic Circular Dichroism)の測定では、偏光度が重要なパラメータになっている。こうしたことから、幅広い光の波長帯において自由に偏光が制御できるようになれば、多方面の研究に大きな波及効果をもたらすと考えられている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、偏光は自由に操作できる放射光源の実現を目指し、高周波の位相と振幅の単純操作により超高速偏光スイッチングを可能にするマイクロ波アンジュレータを開発することである。高周波共振器のビーム軌道上に平面（直交）電磁場分布やスパイラル（ヘリカル）電磁場分布を作り出し、放射光の偏光操作（直線偏光、楕円偏光、円偏光）を実現する。また、近年ビーム物理学研究の進展により、時間幅が数十 μm （数十フェムト秒）の極短電子ビームの生成が可能になってきており、この先端ビーム開発技術と永久磁石で構成される従来型のアンジュレータとを融合させた、偏光を自由に操作できる光源について検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 永久磁石で構成されたアンジュレータでは、ビーム軸上に平面偏向磁場分布やヘリカル磁場分布を作り出すことはできるが、それを高速に変化させることは困難である。円二色性分光などでは、左右円偏光の高速切り替えが要求されている。通常のアンジュレータでは、その磁石間隙の磁場を変化させるには、物理的に磁石の位置を変えるしか方法がない。一般に平面型アンジュレータの場合、ビーム軸上の磁場強度を変化させる場合には磁石間隙を変える必要がある。世界的にも広く使用されているアップル型アンジュレータの場合も磁石列をビーム進行方向にスライドさせるなどして、ヘリカル磁場を生成する。そこで本研究では、放射光の偏光を高速に制御するために、①高周波の位相や振幅は電氣的に高速制御が可能であること、②電場・磁場には重ね合わせの原理が成り立つことに着目し、マイクロ波アンジュレータを導入することにより放射光の偏光を制御する。

図1にマイクロ波アンジュレータの概念図を示す。電子は磁場と電場の両方からローレンツ力を受け蛇行運動し、光を放射する。アンジュレータからの放射光の波長は、電子ビームのエネルギーの2乗に反比例し、アンジュレータの周期長に比例する。つまり、マイクロ波の波長（周波数）と高周波空洞内に励起するモードによって放射波長が決まる。これまでに、図1に示したような電子を水平方向または垂直方向にのみに偏向するマイクロ波アンジュレータの開発は世界でも幾つかなされてきたが、本研究では、この2つのモードを1つの高周波空洞の中に同時に励振させ、2つの電磁場の相対位相および振幅を制御し電磁場を重ね合わせることによって、平面電磁場分布やヘリカル電磁場分布を作り出す。本研究では、電磁場解析コードを用いて1つの高周波空洞内に2つの電磁場モードを励振できるマイクロ波アンジュレータを設計し、試作機を製作することによってその評価を行う。また、これと平行してマイクロ波アンジュレータに供給する2つの高周波の位相および振幅を制御するシステム設計を行う。

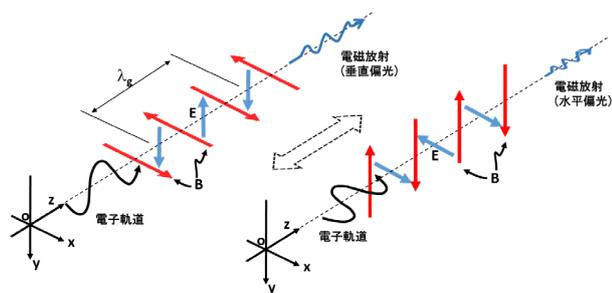


図1: マイクロ波アンジュレータの概念図

(2) 従来型の永久磁石で構成されるアンジュレータと極短電子ビームからのコヒーレント放射光を使い、任意の偏光状態を作り出す方法について研究を行う。本方式の場合、電子ビームから円偏光や楕円偏光、直線偏光の放射を生成するのではなく、電子ビームから直線偏光した時間コヒーレンスをもつアンジュレータ放射光を発生し、その可干渉性を利用し、任意の偏光状態を作り出す。まず、極短電子ビームからのアンジュレータ放射特性について数値計算により評価を行い、そのコヒーレントアンジュレータ放射から任意の偏光状態を作り出すことができる偏光制御光学システムを構築し、実際のビームを使った試験実験を実施することでその原理検証を行う。

4. 研究成果

(1) マイクロ波アンジュレータ空洞の設計は、空洞内に単一モードを励振するものから検討を開始した。電磁場の対称性から円形導波管形状を最初に検討したが、モードの軸回転方向の摂動が弱く安定しないため、矩形導波管構造を採用し、またリッジ構造を取り入れることでビーム軸上の電磁場強度を上げることにした。次に、2つの直交する定在波モードを空洞内に励振するため、空洞中央部の水平・垂直方向に対称なマイクロ波結合部を取り付ける構造を検討したが、他方の結合口の影響でフィールド分布が様にならなかったため、高周波空洞の上流側にビーム進行方向に結合口の位置をずらしマイクロ波をフィードする構造を採用した(図2)。高周波空洞の共振周波数を11.4GHzのXバンドとし、アルミ製試作機を製作した(図3)。こうした空洞内の2つの電磁場モードを励振するマイクロアンジュレータの例は世界的にも殆ど例がない。また、このとき空洞内に励振する電場のモードは $TE_{1,0,14}$ と $TE_{1,0,15}$ とした。試作機の空洞内の電場分布をビーズ摂動法により測定を行い、電磁場計算とよく一致を確認することができた。また、測定された電磁場より電子ビームの軌道を計算により求めたが、空洞の端部における余分なビーム偏向成分によって、ビーム軌道を真っ直ぐにするには、ビームをアンジュレータに対して角度をつけて入射する必要があることが分かった(アンジュレータ出口においてもステアリングが必要)。マイクロ波アンジュレータの場合、端部処理をどうするかが1つの問題であることが改めて明確になった。次に、本研究期間中にできる限り汎用のマイクロ波コンポーネントを使いアンジュレータ内の電磁場分布を高速に制御できないかシステム設計を行った。本システムでは、高周波源の出力に高速制御可能なローレベル移相器(I-Q modulaor)を設置する。この移相器を用いて位相反転などを高速に行うことが可能となる。ローレベル試験において、10ns以下で180度の位相反転が可能であることを確認した。実際のハイパワー運転の場合には、クライストロンのバンド幅とアンジュレータ空洞のQ値が位相反転速度を制限するので、測定されたローレベルの位相反転速度としては十分である。次に、高周波増幅後に高周波電力を4分割し、固定の移相器で電気長を調整した後、再度、方向性系結合器を用いて電力合成を行う。その後、そのうちの2系統のマイクロ波をアンジュレータへと供給する。ローレベルの高速移相器を制御するだけで、アンジュレータに供給される2つの高周波の相対位相を高速に反転でき、また2つの高周波の振幅もハイパワー側の移相器を制御することで調整可能である。

(2) 極短電子ビームと通常アンジュレータを用いたコヒーレント放射発生について、放射電場の数値計算を行った。図4はパルス長の異なる電子ビームから発生するアンジュレータ放射の電場分布である。この計算では、共鳴波長が $300\mu\text{m}$ になる周期数25のアンジュレータを仮定した。電子ビームの時間幅が放射波長の $1/5$ のときに正弦波的なコヒーレントアンジュレータ放射となることが確認できた(図4、中段)。コヒーレントアンジュレータ放射を得るには、放射波長と同程度では不十分であり、放射波長よりも十分短い電子ビ-

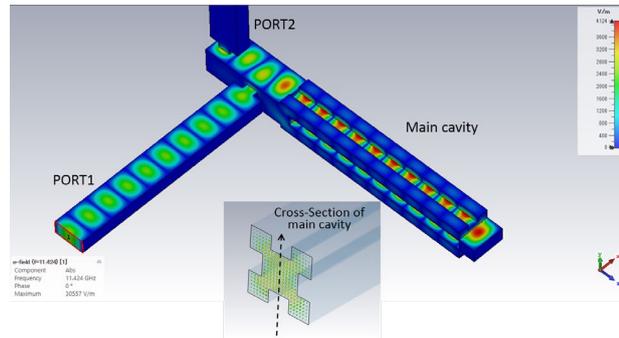


図2: マイクロアンジュレータ試作機



図3: マイクロアンジュレータコールドモデル

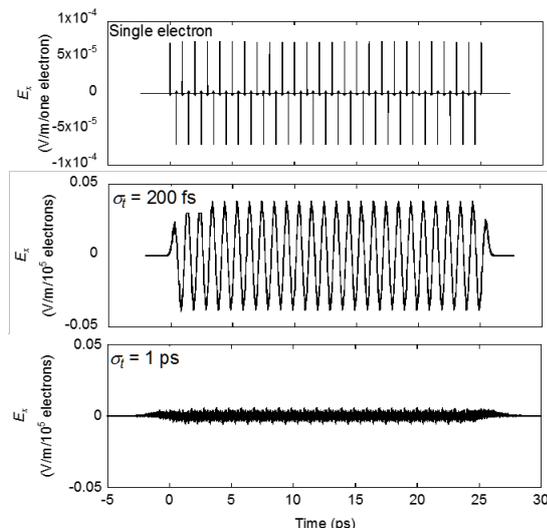


図4: アンジュレータ放射の電場分布 (アンジュレータ周期数: 25、共鳴波長: $300\mu\text{m}$)、上段: 単一電子、中段: $\sigma_t=200\text{fs}$ (共鳴波長の $1/5$)、下段: $\sigma_t=1\text{ps}$ (共鳴波長と同じ)、共鳴波長より十分短い電子ビームからの放射(中段)は、電場分布が25サイクルのほぼ完全な正弦波形状のコヒーレント放射となる。

ムが必要であることが分かる。

直線偏光したコヒーレントアンジュレータから任意の偏光状態を生成する方法を新たに考案した。平面型アンジュレータからの直線偏光した放射をワイヤグリッド偏光子により、偏光方向が90度異なる直線偏光の二光束に分割する。その一方の光路長を変えることにより相対位相を調整し、再び重ね合わせることによって、円偏光・楕円偏光・直線偏光状態を作り出すことができる。光の1/4波長(テラヘルツの場合は数十マイクロメートル)を高速に制御できれば、電子ビームのパルス毎(kHzオーダー)の偏光操作が可能である。そして、本偏光操作の試行実験を京都大学エネルギー理工学研究所の所有するRF電子銃リニアックを用いて行った。10周期の平面型アンジュレータから約0.16THzのコヒーレントアンジュレータ放射を発生させ、その偏光を上記の方法で操作した。図5に偏光測定結果を示す。(水平)直線偏光のアンジュレータ放射から、円偏光と(垂直)直線偏光の放射へと変換することに成功した。このようなコヒーレントアンジュレータを用いた偏光操作は世界的にも例がない。本結果より、アンジュレータ放射の可干渉性を活かした画期的な偏光操作方法が確立できた。

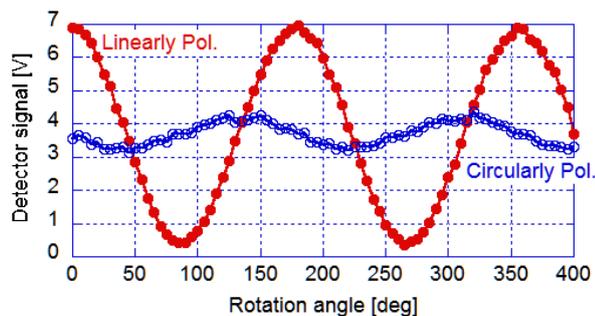


図5：偏光子の回転角とアンジュレータ放射強度

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Shigeru Kashiwagi, Taro Abe, Hiroto Saito, Fujio Hinode, Ken Kanomata, Sadao Miura, Toshiya Muto, Ikuro Nagasawa, Ken-ichi Nanbu, Shingo Ninomiya, Nobuyuki Nishimori, Yuki Saito, Ken Takahashi and Hiroyuki Hama, “Observation of coherent undulator radiation in THz region”, *Infrared Physics & Technology* **93**, 335-339, (2018). 査読有
<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.08.011>
- ② H. Saito, H. Hama, F. Hinode, K. Kanomata, S. Kashiwagi, S. Miura, T. Muto, I. Nagasawa, K. Nanbu, S. Ninomiya, K. Takahashi “Study on Generation of Variable Polarized Coherent THz Radiation Using a Crossed Undulator”, *Proceedings of 29th Linear Accelerator Conf. LINAC2018*, Beijing, China, 157-159 (2018). 査読無
<https://doi.org/10.18429/JACoW-LINAC2018-MOPO076>
- ③ S. Kashiwagi, T. Abe, F. H. Hama, Hinode, T. Muto, K. Nanbu, I. Nagasawa, H. Saito, Y. Saito, Y. Shibasaki, K. Takahashi, “Generation of coherent undulator radiation at ELPH, Tohoku University”, *Proceedings of LINAC2016*, East Lansing, MI, USA, 330-302. 査読無
- ④ Hiroto Saito, Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Sadao Miura, Nobuyuki Nishimori, Toshiya Muto, Kenichi Nanbu, Yoshinobu Shibasaki, Ken Takahashi, Ikuro Nagasawa, Ken Kanomata, Yuki Saito, Hiroyuki Hama, “A study of generation of variable polarized THz superradiance using a crossed undulator”, *Proc. of 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, August 1-3, 2017, Hokkaido, Japan, WEP013, 817-820. 査読無

[学会発表] (計 2 件)

- ① 柏木茂, 齊藤寛峻, 全炳俊, 入澤明典, 鹿又健, 森田希望, 高橋健, 長澤育郎, 南部健一, 二宮慎吾, 日出富士雄, 三浦禎雄, 武藤俊哉, 山田悠樹, 濱広幸, 「テラヘルツコヒーレントアンジュレータ放射の偏光制御に関する研究」、日本物理学会第74回年次大会、発表日：2018年3月17日、九州大学伊都キャンパス(口頭発表) 17aG107-2
- ② 柏木茂, 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「東北大学 t-ACTS における極短電子ビームを用いた広帯域・狭帯域コヒーレントテラヘルツ放射発生」、第14回日本加速器学会年会、発表日：2017年8月2日、北海道大学(口頭発表)、WEOM03

6. 研究組織