

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20740137

研究課題名（和文） 電子ビームとレーザーアンジュレータ場の相互作用を用いたコヒーレント光源の開発

研究課題名（英文） Development of coherent radiation source based on interaction between electron beam and laser undulator field

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

研究成果の概要（和文）： 数値計算により電子ビームとレーザー光により作り出されるレーザーアンジュレータ場との相互作用によりコヒーレント光を発生させるための実験条件を求めた。そして、本コヒーレント光源開発の中でも最も重要な電子ビームのマイクロバンチ化について複数の方法について考察や基礎実験を行い、最終的に金属スリット方式について電磁場計算により実験セットアップの最適化を行った。

研究成果の概要（英文）： One of the results of this research was to clarify the experimental conditions for a generating of coherent light based on interaction between the electron beam and laser undulator field by the numerical calculations. The micro-bunching of electron beam is the key item in this research. The experimental setup for the micro-bunching was proposed based on the metallic plates with small slit and optimized by calculating the electromagnetic fields.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 20 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
平成 21 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
平成 22 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：加速器

1. 研究開始当初の背景

幅広い科学研究分野において、短波長でコヒーレントな光源の開発が研究の発展には必要不可欠である。また、産業分野においても大強度の短波長光源が半導体の微細加工などのために求められている。

本研究が開始された 2008 年当時、物質の極微構造を観測する事ができる究極のコヒーレント光源である加速器をベースとした X 線自由電子レーザー（X 線 FEL）の建設が開始されていた。現在、日本と米国において X 線 FEL マシンは稼働を開始し、多くの研究成果

をあげている。一方で、こうした加速器ベースの X 線 FEL はその全長が 1 km 以上にもなる大規模実験施設になるため、産業界におけるマスプロダクトなどへの利用は困難であり、よりコンパクトに短波長のコヒーレントかつ高輝度な光源が必要とされている。

研究代表者は、これまで行ってきた「電子ビームとレーザーパルスの逆コンプトン散乱による短パルス X 線発生に関する研究」や「集束型ウイグラーを用いた遠赤外領域での SASE に関する基礎研究」の経験から、マイクロバンチ化した電子ビームとレーザー

アンジュレタ場の相互作用を用いたコヒーレント光源の開発を発想し実施することとした。

2. 研究の目的

本研究で開発を目指すコヒーレント光源の概略図を図1に示す。発生する光の波長もしくはその整数倍の間隔にマイクロバンチ化した電子ビームとレーザーアンジュレタ場を相互作用（逆コンプトン散乱）させることにより、コヒーレント光を発生する。放射光を発生する電子バンチの時間方向の長さが発生する光の波長程度まで短くなると、電子からの放射がコヒーレントになり放射パワーはバンチ内の電子数の2乗に比例するようになる。このことを利用しコヒーレントで高輝度の光を発生させる。

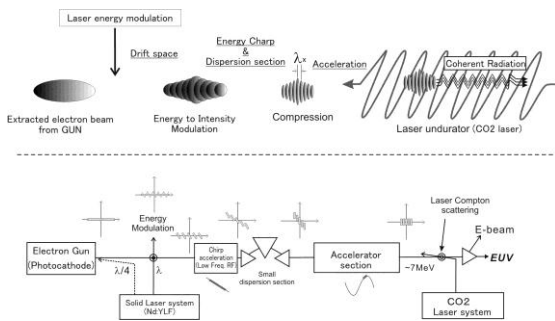


図1: 小型コヒーレント光源の概略図とマイクロバンチ電子ビーム生成過程とコヒーレント光発生

3. 研究の方法

(1) 電子ビームとレーザー場の相互作用によりコヒーレントな光を発生させるために必要なレーザーアンジュレタ長などを数値計算により導く。発生するコヒーレント光の波長は、次世代の半導体リソグラフィへの応用が期待されている極端紫外光 (EUV) の 13.5nm とし、相互作用させる電子ビームエネルギーとアンジュレタ場を生成するためのレーザー波長は、それぞれ 8.82MeV、10.6 μ m とした。また、電子ビームとレーザー場を相互作用させる角度（衝突角度）は正面衝突の 180 $^{\circ}$ として計算を行った。

(2) 電子バンチを発生させる光の波長程度もしくは波長の整数倍の間隔にマイクロバンチ化することが本研究課題において最も重要かつ難易度の高い課題である。このマイクロバンチ生成方法について考察を行った。解析的に変調エネルギーを求める数式を求め、その式から有効な変調方法について考察を行い、マイクロバンチ生成のための実験セットアップの最適化を行った。

4. 研究成果

(1) レーザーアンジュレタ場を用いた SASE-FEL プロセスについて、1次元モデルを使い考察を行った。レーザーアンジュレタ場を生成するレーザーはピークパワー 500GW の CO₂ レーザーとし、規格化ベクトルポテンシャルは(a₀)は 0.72 とした。FEL パラメータ (ρ) は約 10⁻⁴ となり、SASE プロセスにおいて光が飽和に達するためには約 53mm (~5 \times 10³ 周期相当) のアンジュレタ長が必要であることが分かった。レーザーのレーリー長の 3mm と比較すると極めて長いアンジュレタ長が必要になるため、SASE プロセスのみを利用した高輝度光発生は困難であり、これより高輝度コヒーレント光の発生にはマイクロバンチ電子ビームが必要不可欠であることが明らかになった。

(2) 最初にマイクロバンチ発生方法として、電子源である陰極から直接生成する方法と電子ビームにエネルギー変調を与えたのちに密度変調へと変換する方法の2つの方法について検討を行った。マイクロバンチを生成する際、熱拡散や電子ビームのエネルギー拡がりによる電子の移動距離がレーザー波長よりも長い場合はレーザー変調の効果がスミアーされてしまうためバンチングすることができない。

陰極より直接マイクロバンチを生成する方法は、光陰極にレーザーパルス照射し光電効果により発生した電子にレーザー電場でエネルギー変調および密度変調を加える。初期条件はカソード温度 300K、この時の電子の熱エネルギーは 13meV である。電子の引出電場勾配が 10MV/m と 100MV/m の場合に熱拡散長はそれぞれ 11.5 μ m、1.2 μ m となり、電子発生に用いる UV レーザーの波長よりも長くなってしまいうため、直接カソードに照射するレーザーで電子ビームに密度変調を与え発生させることができないことが分かった。(ここでカソードに銅を仮定し、UV レーザーは Nd:YLF レーザーの 4 倍高調波 262nm とした。)

また、エネルギーが γ と $\gamma + \Delta\gamma$ である 2 つの電子がドリフト距離 L を進む間に生じる縦方向変位は以下の式で表すことができる。

$$\Delta z = L \cdot \Delta\gamma / \gamma^3 \sqrt{1 - 1/\gamma^2} \quad (1)$$

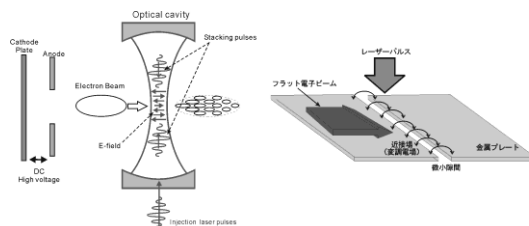


図2: エネルギー変調方式 (左) 光共振器方式、(右) 金属スリット方式

L, γ , $\Delta\gamma$ が 1m, 100keV と 13meV としたとき縦方向変位 (Δz) は 27nm となる。これより、初期の熱エネルギー分散 (13meV) 以上の変調を加えることで効果的にバンチングをすることができる事が分かる。

エネルギー変調方式は光共振器を用いた方式と金属スリット板を用いた方法について研究を行った (図 2)。いずれの方式もレーザーの電場を用いた方法である。エネルギー変調するレーザーのウェストサイズ (幅) を σ_w としたとき、変調エネルギーは以下の式から求まる。

$$E_{Mod} = \sqrt{2\pi}\sigma_w E_z(z,0) \cdot e^{-k^2\sigma_w^2/2\beta^2} \quad (2)$$

ここで、 k は波数、 β は電子の速度である。この式からも明らかのように σ_w はレーザーの波長以下にする必要があり、 β が小さい非相対論的電子ビームに対してバンチングは有効に行われることがわかる。前述の 2 つの変調方式について、レーザーの基礎実験を行った結果、光共振器を用いる方法では σ_w を波長以下にすることは困難と判断し、金属スリットを用いた方式をマイクロバンチ生成に用いる事とした。金属スリットを用いた方法では、CO₂ レーザーを波長の 1/4 スリット隙間に照射しその隙間間に変調電場を生成する。この方法の利点としては、金属スリットを用いることでレーザーの安定性などに依存せず安定した変調電場生成が可能であり、波長 10.6 μ m の CO₂ レーザーを使うためスリットの加工も容易である。

本研究では、CO₂ レーザー (10.6 μ m) を X バンド RF (11.4GHz) に仮想し、金属微小隙間 ($\lambda/4$) に変調電場が生成されているか電磁場コードを使い解析した (図 3)。金属スリット隙間に対して垂直な電場方向で RF を入射することにより、効率良く金属スリット隙間に変調電場を生成できることが分かった。計算と同様のセットアップを使いループで電磁場分布を測定し、電磁場解析コードを用いた計算とほぼ同様の結果が得られた。しかし、入射導波管と金属スリット間に測定用の

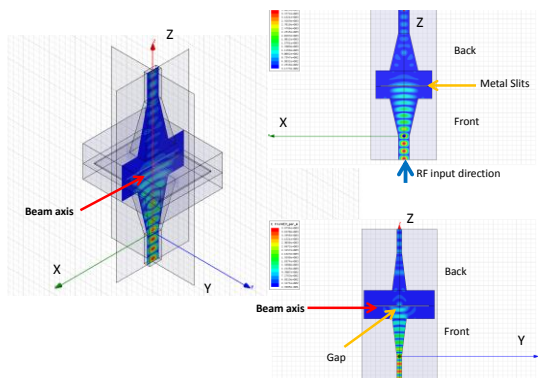


図3: 金属スリット隙間に励起される電磁場(レーザー場を11.4GHzRFとして計算。スリット幅= $\lambda/4$)

プローブを挿入することでインピーダンスマッチングが変化し精度の良い測定ではなかったと言える。その他、金属スリットからの距離に対して指数関数的に変調電場強度が減少するため、電子ビームは金属面に対して平坦に整形する必要がある。空間電荷効果を含めない1次元の粒子軌道計算により、金属スリット方式 (スリット幅= $\lambda/4$) で 100keV の単一エネルギーの電子ビームを CO₂ レーザーの波長の周期にマイクロバンチ化できることを明らかにすることができた。本研究の結果として、コヒーレント光発生に必要な不可欠なマイクロバンチ生成の 1 つの方法として金属スリット法を提案し、1次元粒子計算によりマイクロバンチ生成が可能であることを確認することができた。

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 2 件)

1. S. Kashiwagi, R. Kato, G. Isoyama, K. Sakaue, A. Masuda, T. Nomoto, T. Gowa, M. Washio, R. Kuroda, J. Urakawa, "Development of compact coherent EUV source based on laser Compton scattering", Radiation Physics and Chemistry, Volume 78, Issue 12(2009) pp.1112-1115 (査読有)
2. S. Kashiwagi et al, Compact EUV Source Based on Laser Compton Scattering between Micro-bunched Electron Beam and CO₂ Laser Pulse, Proceedings of the 11th European Particle Accelerator Conference (EPAC'08), pp.1869-1871 (査読無)

[学会発表] (計 3 件)

1. S. Kashiwagi et al., "Compact EUV Source Based on Laser Compton Scattering between Micro-bunched Electron Beam and CO₂ Laser Pulse", The 11th European Particle Accelerator Conference (EPAC'08), June 24, 2008, Genoa, Italy
2. S. Kashiwagi et al., "Development of Compact Coherent EUV Source Based on Laser Compton Scattering", the 2nd Asia Pacific Symposium on Radiation Chemistry, Aug. 31, 2008, Waseda Univ., Tokyo, Japan
3. 杉本尚哉, 柏木茂, 加藤龍好, 寺沢賢和, 沈傑, 平田祥, 藤本将輝, 徳地明, 末峰昌二, 磯山悟朗, 「高繰り返しグリッドパルサーを用いた熱電子銃の開発」、第 7 回日本加速器学会年会、2010年8月4~6日、

姫路市

〔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

柏木 茂 (KASHIWAGI SHIGERU)

東北大学・電子光物理学研究センター・准教授

研究者番号：60329133

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：