

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23600008

研究課題名(和文)電子蓄積リングからのコヒーレントテラヘルツ光発生の研究

研究課題名(英文)Study on coherent THz radiation from electron storage ring

研究代表者

庄司 善彦(Shoji, Yoshihiko)

兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・准教授

研究者番号：90196585

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：本課題はクロマティシティー変調を用いて波状のビームを作り、準単色の垂直偏光コヒーレント放射を得るものである。その技術的課題は、(1)クロマティシティー変調ラティスの実現と波形バンチ形成、(2)ベータトロン振動のコヒーレンス維持、であった。(1)は、分散部へのオフ・エネルギー入射や、パルス変調方式開発を行い、変調効果の蓄積と波形バンチ形成を確認できた。(2)は、放射励起に関する理論的研究と、ウェイク場効果の実証という基礎的研究成果をあげた。しかしベータトロン振動のコヒーレンス維持は、最終結果に必要なレベルに達しなかった。

研究成果の概要(英文)：Our final goal was to observe vertically polarized quasi-monochromatic coherent THz radiation from a synchrotron radiation storage ring. We solved technical problems and published some of the results. They are (1) off-energy injection into non-achromatic lattice, (2) wavy bunch production by chromaticity modulation, (3) betatron oscillation de-coherence by wake-field, and (4) betatron oscillation de-coherence by radiation excitation. However, we did not reach to our goal because we could not keep the coherence for long enough time to get coherent THz radiation.

研究分野：ビーム物理学

キーワード：コヒーレント放射 電子蓄積リング THz光源

1. 研究開始当初の背景

電子蓄積リング(Storage Ring:SR)からの放射光利用は EUV から X 線が主であり、当初は長波長利用は疑問視されていた。しかし現在では、世界の主要放射光施設のほとんどに赤外・遠赤外のビームラインが設置され、利用波長領域はテラヘルツ(THz)にまで拡大されようとしている[1]。長波長光源としての SR の利点は、高い放射輝度、干渉性、更に安定性で、これらの性質を利用して赤外分光等に多く用いられる。特に THz 領域では、圧倒的な放射強度を持つコヒーレント放射 (Coherent Synchrotron Radiation : CSR) 発生が期待できる為、光源加速器研究の重要な課題の一つとなっている。

現在限られた施設に於いてではあるが SR からの CSR は実用化され、主として擬等時性運転 CSR は THz 分光に、不安定性によるバースト CSR はイメージングに用いられている。しかしこれらは従来の放射光利用と両立が困難なため、新たな発生方法が望まれている。その一つは電子ビームと振幅変調レーザーを相互作用させてパルスの準単色 CSR を発生させる方法である[2]。これに対して本件の提案は、電磁石を用いて同様の CSR を発生させる方法である[3]。

これまで申請代表者は、放射光用電子蓄積リングからの CSR 発生の研究を行っており、擬等時性運転の安定性の研究や、バースト CSR の安定化に関する研究、更には短パルス電子周回による CSR 発生などの成果

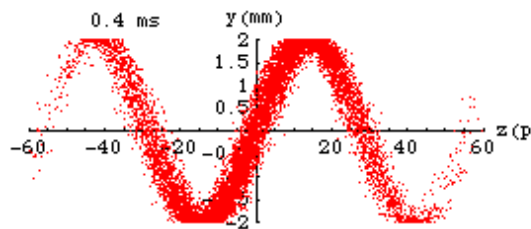


図1 電子蓄積リングニュースバルのパラメーターを使って計算した、シンクロトロン振動2周期後のバンチ形状。

を上げて来た。一方で連携研究者(中村)らと共に、交流6極電磁石を用いたクロマティシティー変調の研究も行い、ビーム不安定性抑制効果を実証した[4]。この変調は新しい手法であり、実証研究過程で様々なビーム力学的解析を行った。この際に副産物として、キッカー電磁石が励起するベータトロン振動がバンチ内に一時的に波状空間構造を作り出す事を見出した。図1は波状構造生成のシミュレーション計算例である。更に2010年には、この構造が準単色 CSR 発生光源となる事を理論的に明らかにした[3]。これが本件の提案である。

<引用文献>

[1] Proc. of 5th International Workshop on

Infrared Microscopy and Spectroscopy with Accelerator Based Sources, AIP Conference Proceedings 1214 (2010).

[2] S.Bielawski, et al., "Tunable narrowband terahertz emission from mastered laser-electron beam interaction", Nature Physics 4,390 (2008).

[3] Y.Shoji, "Generating coherent THz radiation in electron storage rings using an AC sextupole magnet and a vertical kicker magnet", Phys. Rev. ST-AB 13, 060702 (2010).

[4] T.Nakamura, et al., "Suppression of transverse instabilities by chromaticity modulation", Proc. of IPAC 2010.

2. 研究の目的

本課題では、電子蓄積リングからの波長可変テラヘルツ領域放射光の、新しい発生方法の研究である。この方法では垂直キッカー電磁石とクロマティシティー変調を用いて波状のビーム(バンチの先頭から尾部にかけて、重心位置が上下する)を作り、準単色の垂直偏光コヒーレント放射を得る。その内訳は以下である。

(1) 波状のバンチ形状が生成される事の実証。(2) 垂直方向の空間構造による、垂直偏光コヒーレント放射の観測。(3) 両者を組み合わせ、強いコヒーレント光が理論予測に従った性質を持つ事の実証。

3. 研究の方法

(1) 真空改造

キッカー電磁石用としてセラミックダクトを蓄積リングに導入する。

(2) 垂直キッカー電磁石設置

空芯1ターンの電磁石、及び電源を新たに設計、製作する。

(3) 蓄積リング調整

具体的には、高次と低次のH/Vカップリング補正、ベータトロン及びシンクロトロン振動数の振幅依存シフトの調整、等である。

(4) タイミングシステム構築

キッカータイミングを交流6極の変調位相と同期させて発するシステムを構築する。

(5) 調整とCSR観測

垂直キッカーを稼働させて、蓄積リングパラメーターの調整を行う。ストリークカメラによって波形バンチ形成を確認し、ショットキーダイオード検出器によって垂直方向THz波発生を確認する。

(6) THz分光

マイケルソン干渉計を含む分光システムは高橋が京大から移設し。光源性能を確認する為の分光を行う。

4. 研究成果

(1) 運動量差を利用したトップアップ入射直線部に有限なディスパージョンを持つ非アクロマティックラティスではアパーチ

ヤーが十分でなく、新しくビームを入射しようとする、既に蓄積していたビームが廃棄されてしまう問題があった。これを解決する為提案したのが入射点のディスパージョンと運動量差を利用した入射である。

図2は閉じた入射バンプを使い、100 mA トップアップを試みた際の蓄積電流変化である。このとき $dP/P = 0.7\%$ 、バンプの高さは15mm、入射効率は約40%であった。

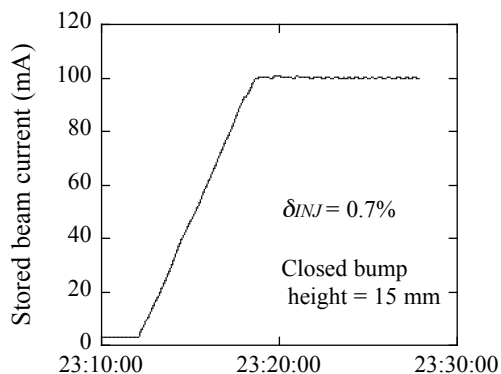


図2 Stored beam current during the test of 100 mA top-up operation using the closed injection bump.

(2) 放射励起による振動減衰

エネルギー放射励起により垂直方向のコヒーレントベータトロン振動が減衰することを理論的に示した。減衰時間 τ_{TN} は下式で与えられる。

$$\frac{1}{\tau_{TN}} = \left(\frac{\xi \sigma_{\epsilon}}{v_s} \right)^2 \frac{2}{\tau_T} \quad (1)$$

ここで、 τ_T 、 v_s 、 ξ 、 σ_{ϵ} はそれぞれ垂直方向放射減衰時間、シンクロトロンチューン、クロマティシティー、自然エネルギー幅である。

この研究論文は学術雑誌の the most downloaded article にランクインした。

(3) ウェイク場による減衰

バンチあたり蓄積電流 0.1mA では理論通り

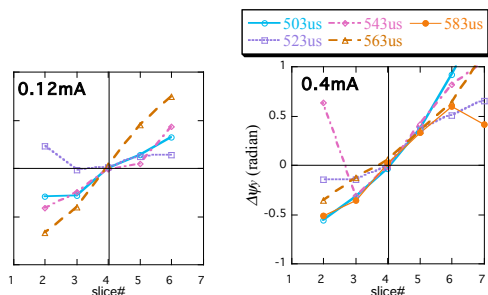


図3: The phase tilt near $t=3$ TS with high and low bunch charge. The labelled current times TREV gives the single target bunch charge. One slice number corresponds to a time difference of 18 ps in a bunch.

の位相ティルトが観測できるが、それ以上ではウェイク場によってベータトロン振動位相が乱れ、振動位相幅によりコヒーレンスが減衰する (図3)。

(4) 波形バンチ形成

クロマティシティー変調により、バンチ先頭と尻尾部の位相差が蓄積し、波形のバンチ形状が形成されることを実証した。図4では3回の変調により、位相差がほぼ 2π に達していることが観測されている。

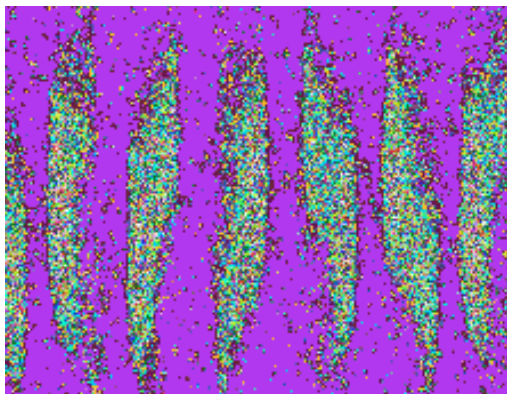


図4 Streak camera images of bunch shape at from the 840th to the 845th revolutions, from the left to the right. The vertical axis is the longitudinal displacement and the vertical axis is the vertical displacement.

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)

- ① Y. Shoji, " Landau Damping of Collective Betatron Oscillation in a Quasi-Isochronous Electron Storage Ring", Nuclear Instruments and Methods for Physics Research, 査読有, Vol. A729 (2013) pp.1-2.
DOI: 10.1016/j.nima.2013.06.110

[学会発表] (計 6件)

- ① Y. Shoji, " De-Coherence Study of Betatron Oscillation for the Beam Shape Manipulation", 5th International Particle Accelerator Conference, June 15-20, 2014, Dresden, Germany.
② 庄司 善彦, 満田 史織, 中西 辰郎, 皆川 康幸, 竹村 育浩, 「ニュースバルへの垂直キッカーシステム導入」, 第10回日本加速器学会年会, 8/2-7 (2013), 愛知県、名古屋市、名古屋大学豊田講堂
③ Y. Shoji, Y. Minagawa, and Y. Takemura, "Off-Energy Injection into NewSUBARU", 4th International Particle Accelerator Conference,

May12-17, 2013, Shanghai, China.

④ 庄司 善彦, 皆川 康幸, 竹村 育浩, 「ニューズバルにおけるエネルギー差を使った入射」第9回日本加速器学会年会, 8/8-11 (2012), 大阪府、茨木市、大阪大学

⑤ Yoshihiko Shoji, Takeshi Nakamura, Chikaori Mitsuda, Taro Moriwaki, Yuka Ikemoto, Toshiharu Takahashi, "Electron Storage Ring as Frequency Sweeping THz Source", Joint Conference of TeraNano and GDR-1 THz, Nov. 24-29, 2011, Osaka, Japan.

⑥ 庄司 善彦, 「蓄積リングのH/Lカップリングを使った新しいコヒーレントTHz放射発生法の提案」、第8回日本加速器学会年会, 8/1-3 (2011), 茨城県、つくば市、つくば国際会議場

〔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:

出願年月日:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

①研究テーマのホームページ

http://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/beam_physics/BeamPhysics/shoji.files/kakenhill.html

②研究データのオープン化として、全ての実験報告書を以下のサイトで公開している。

http://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/beam_physics/StudyReport/NSSR-list.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

庄司 善彦 (SHOJI Yoshihiko)

兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・
准教授

研究者番号: 90196585

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

高橋 俊晴 (TAKAHASHI Toshiharu)

京都大学・原子炉実験所・准教授

研究者番号: 00273532

中村 剛 (NAKAMURA Takeshi)

高輝度光科学研究センター・加速器部門・

主幹研究員

研究者番号: 90360841

満田 史織 (MITSUDA Chikaori)

高輝度光科学研究センター・加速器部門・

研究員

研究者番号: 60425600

森脇 太郎 (MORIWAKI Tarou)

高輝度光科学研究センター・利用研究促進

部門・副主幹研究員

研究者番号: 90372143

池本 夕佳 (IKEMOTO Yuka)

高輝度光科学研究センター・利用研究促進

部門・副主幹研究員

研究者番号: 70344398