

電子バンチ長評価を目指した放射光における 2 光子干渉計測システムの構築

CONSTRUCTION OF A TWO-PHOTON INTERFEROMETRY MEASUREMENT SYSTEM FOR THE EVALUATION OF THE BUNCH LENGTH IN THE ELECTRON STORAGE RING

野津庄平^{#, A)}, 松葉俊哉^{A)}, 川瀬啓悟^{B)}

Shohei Notsu^{#, A)}, Shunya Matsuba^{A)}, Keigo Kawase^{B)}

^{A)} Hiroshima University

^{B)} National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

Abstract

In this research, we have constructed a two-photon interference measurement system to evaluate the bunch length in the storage ring of HiSOR. We will try the two-photon interference experiment of the synchrotron radiation by making the Michelson's type interferometer with prisms and mirrors. To use photomultiplier tubes for photon counting, a new high voltage power supply unit is fabricated and calibrated. For the sake of comparison, we also consider the electron bunch length measurement by the streak camera. At present, an interferometer is constructed and the alignment with a -Ne laser is performed. As the result of the alignment, we confirm the interference fringes. In the future research, it is necessary to make the two beams into parallel waves that the interference fringes are not observed. Also, since the photomultiplier tubes have to work at the photon counting mode for the synchrotron radiation, it is necessary to construct a reliable shading system of stray light. After the light shielding system is constructed and the alignment of the two beams are completed, we will perform the two-photon interferometry with the synchrotron radiation.

1. はじめに

相対論的速度を持つ荷電粒子が、進行方向に垂直な磁場を受け運動するとき、荷電粒子はローレンツ力により速度と磁場の向きの双方に垂直な方向に力を受けて円運動し、軌道接線方向前方に電磁波を放射する。この電磁波は、電子シンクロトロンにおいて初めて観測されたため、このような電磁波の放射をシンクロトロン放射あるいは、“放射光”と呼ぶ。

現在の加速器では、高エネルギーの電子が蓄積リング中を周回しているとき、周回電子は偏向電磁石によって偏向され、放射光を放出している。この時に放射光の放出により失われたエネルギーは高周波加速空洞で加速されることにより補われる。

蓄積リング中の電子は、偏向電磁石によって偏向される際に放射光を発生させる。放射光を発生させるとエネルギーを放出するので、放射光強度が強いほど、より電子自身の運動エネルギーを失う。そのままだと失速し、最後には壁の内周にぶつかり消滅してしまう。電子が回り続けるためには放射光発生によって失ったエネルギーを補う必要がある。そのために、蓄積リング中に高周波(RF)加速空洞が設けられている。この RF 加速空洞を特定の位相(安定位相)で通過する電子は加速エネルギーと放出エネルギーの間で良いバランスをとるとき、蓄積リング内を安定して回り続けることができる。この安定位相の周りに形成される電子の集団のことを“電子バンチ”と呼ぶ[1]。

電子バンチ長を測る装置としてはストリークカメラが一般的であるが、広島大学放射光科学研究センターにあ

る光源加速器(HiSOR)のビーム診断法の拡充を目的として放射光の 2 光子干渉計による、バンチ長測定装置の開発を開始した。

2光子干渉による光パルスの時間幅計測は、東京大学物性研究所では短パルスレーザー、KEK-PF では放射光について、どちらも同時係数率を算出する方法で報告がされている[2, 3]。本発表では HiSOR で開始した2光子干渉計を用いた電子バンチ長評価の検証研究の現状を報告する。

2. 実験原理

入射光場を偏光パルス列であるとし、複素数場で表現できると仮定すると

$$E(t) = C(t)A(t) \exp(-i\omega_0 t) \quad (2)$$

と表現できる。ここで ω_0 は入射光の周波数、 $C(t)$ は τ_p のパルス幅(バンチ長)を持つパルスエンベロープ関数、 $A(t)$ は τ_c のコヒーレント長を持つ定常ランダム変数(平たく言うと波束)である。また、アンサンブル平均は

$$\langle A^*(t)A(t+\tau) \rangle_A = f(\tau) \quad (3)$$

で表される。

2つの干渉光をそれぞれ検出する検出器 D_1 、 D_2 における出力信号は

$$E_1(t) = i\sqrt{RT}\{E(t+\delta\tau) + E(t)\} \quad (4)$$

$$E_2(t) = TE(t+\delta\tau) - RE(t) \quad (5)$$

と表される。 T, R はそれぞれスプリッターキューブの透過率と反射率で、 $\frac{c\delta\tau}{2}$ は平行移動コーナーキューブ C_2 による可変光路差である。 D_1 、 D_2 の同時計数は E_1 、 E_2 を用いて

[#] m185122@hiroshima-u.ac.jp

$$Count_{12}(\delta\tau) = K \int_{-\frac{T_m}{2}}^{\frac{T_m}{2}} dt \int_{-T_R}^{T_R} d\tau \langle E_1^*(t) E_2^*(t + \tau) \times E_2(t + \tau) E_1(t) \rangle_A \quad (6)$$

で与えられる。 K は規格化定数、 T_R は検出器応答時間、 T_m は計測時間である。ここで、簡単のために $C(t), A(t)$ の両方がガウス関数であると仮定すると、

$$C(t) = C \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau_p^2}\right) \quad (7)$$

$$A(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau_c^2}\right) \quad (8)$$

と表され、これにより検出器 D_1, D_2 の同時計数を変換すると次のようになる。

$$Count_{12}(\delta\tau) = a \left\{ 1 - b \exp\left[-\frac{(\delta\tau)^2}{\tau_*^2}\right] + \frac{\tau_*}{\tau_p} \left(1 - b \exp\left[-\frac{(\delta\tau)^2}{\tau_p^2}\right] \right) \right\} \quad (9)$$

ここで a, b は定数で、

$$\frac{1}{\tau_*^2} = \frac{1}{\tau_p^2} + \frac{1}{\tau_c^2} \quad (10)$$

により、パルスフィールドコヒーレンス時間 τ_* を定義する。

この同時計数を縦軸とし、横軸にコーナーキューブの変位をとりグラフを作成する。Equation (9) によって求められる理論値と、実験を行って得られる観測値を用いたグラフに χ^2 検定を行い、フィッティングすると、パラメーター τ_p, τ_* を求めることができる。 τ_p が求められることから、パンチ長が計測できる。また τ_p, τ_* が求められることから、Eq. (10)を用いて、 τ_c も求めることができる。

3. 実験方法

3.1 干渉計の構築

本研究で構築する干渉計の光路図を Fig. 1 に示す。2枚の凸レンズのよって拡張されたビームは鏡によって反射され、スプリッターキューブへと入射する。スプリッターキューブに入射したビームは反射光と透過光の2つにわかれ、それぞれ別のコーナーキューブへと入射して反射され、再び最初のスプリッターキューブへと戻り、もう一度反射光と透過光に分かれて、二つの検出器へと入射する。干渉縞を観測しやすくするために、レーザーを凸レンズ2枚用いて約 20 倍に拡張し、干渉計をスプリッターキューブとコーナーキューブで作成した。レーザーによるアライメントを行った後に、放射光による干渉実験を試みる。干渉計のステージに関しては LabVIEW のプログラミングにより移動させる。

放射光の計測には光電子増倍管を使用する。節約のため高圧電源モジュール 2 個 (松定プレジジョン HFR5-1.5N) と直流ユニット電源 1 個を使い、新たに高圧電源を構築した。Figure 2 に高圧電源の写真を示す。高圧電源は動作確認を行っており、Fig. 3 のようになり、光電子増倍管の運転に支障はない。

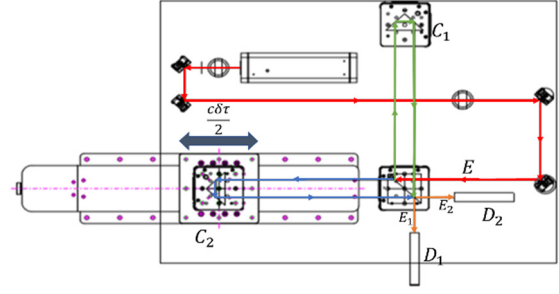


Figure 1: Schematic drawing of the constructed interferometer.

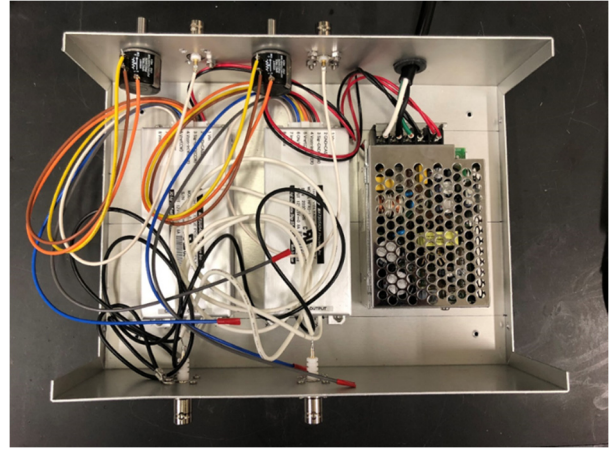


Figure 2: High voltage power supply actually constructed.

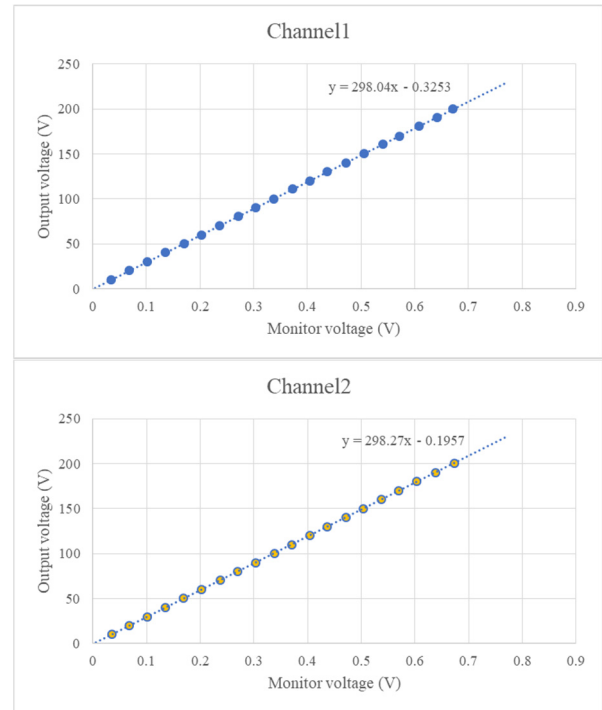


Figure 3: Relationships between monitor voltage and output voltage.

4. 試験状況

4.1 レーザーによるアライメント

放射光で実験を実施する準備として、レーザーによるアライメントを行った。そこで観測された干渉縞について考える。Figure 1 の図のうち、ステージに乗せたコーナークューブ C_2 を動かすことができる。

2 つのビームが平行な時は干渉縞を観測することは出来ない。2 つのビームの交差角度が大きくなるほど、干渉縞の間隔は小さくなる。Figure 4 はレーザーでのアライメントによる干渉縞であるが、干渉縞が観測されている。これは 2 つのビームが完全に平行でないことを示している。干渉縞が鉛直方向から傾いて見えるのも、ビーム同士に交差角度があることが原因だと思われる。

今後、より詳細にアライメントと干渉縞を調べ、干渉縞を消すことにより、干渉計の平行性を高めることが今後の課題である。

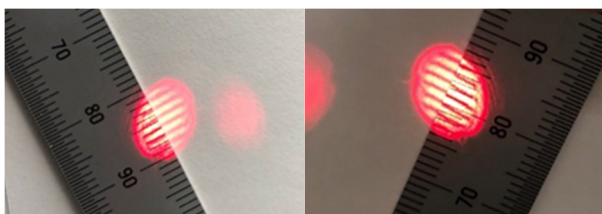


Figure 4: The interference fringes observed at the detector part.

4.2 放射光による光電子増倍管の試験

光電子増倍管を放射光で試験した(Fig.5)。Figure 6 に得られた結果を示す。open は放射光を当てた状態であり、close は放射光を当てなかった状態である。FFT をかけると右のようになり、RF の周波数と等しい約 200 MHz の信号が見えているようである。しかし、遮光した状態でも観測されているように見えるので、放射光による信号か断定し難い。遮光も完璧なものではないので、迷光の確実な遮光システムの構築が必要である。こちらも今後検討を進める。

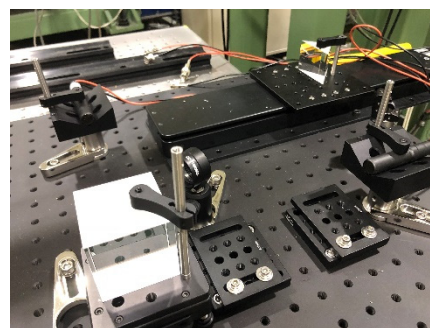


Figure 5: Photo of photomultiplier tube test.

5. ここまでの結論と展望

2光子干渉計を用いたバンチ長評価をするための準備として、光電子増倍管を使用するための高圧電源モジュールや干渉計を構築した。高圧電源モジュールはモニター電圧と出力電圧の関係が良い比例関係にあることが確認できたため、光電子増倍管を検出器として使用する準備が整った。光電子増倍管で試験的に放射光の同時計測を行った。しかしながら、光電子増倍管が放射光以外の光も検出してしまうので、放射光計測では迷光の確実な遮光システムを構築する必要がある。現段階の構想としては、干渉計全体を覆い、放射光以外の光の遮光をする計画を立てている。

干渉計に関しては、試験的に放射光を観測する際に崩してしまったため、もう一度レーザーによるアライメントをする必要がある。

参考文献

- [1] 日本放射光学会, “放射光ビームライン光学技術入門”.
- [2] Y.Miyamoto, T.Kuga, M.Baba, and M.Matsuoka, “Measurement of ultrafast optical pulses with two-photon interference”, Optics Letter, Vol.18, Issue 11 (1993) pp.900-902.
- [3] 三橋利行 著, “ERL におけるビーム計測 ～概要と光による計測技術のトピックス～”, OHO 高エネルギー加速器セミナー(2008), 高エネルギー加速器研究機構.

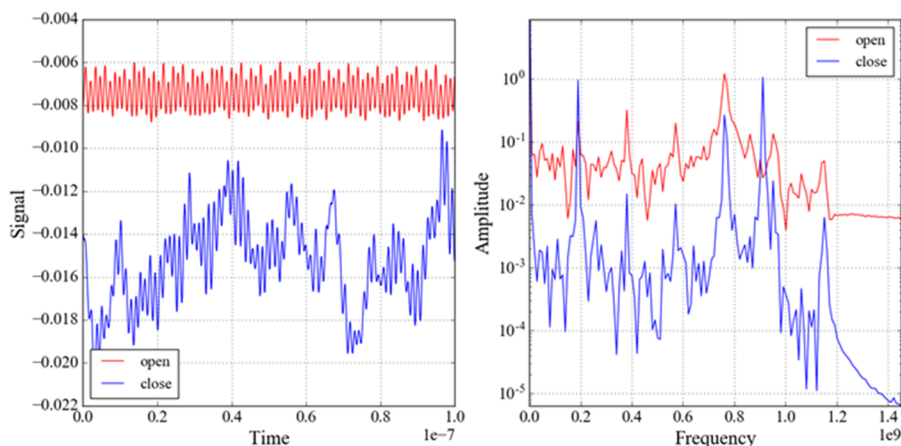


Figure 6: Output signal of synchrotron radiation by photomultiplier tube.