

アンジュレータ超放射のコヒーレンスを用いた電子ビーム特性測定の検討

STUDY OF ELECTRON BEAM DIAGNOSTICS USING THZ SUPERRADIANT UNDULATOR RADIATION

寺田 健人[#], 柏木 茂, 石附 勇人, 鹿又 健, 柴田 晃太郎, 高橋 健, 長澤 育郎, 南部 健一, 日出 富士雄,
三浦 禎雄, 武藤 俊哉, 山田 悠樹, 山本 大喜, 濱 広幸

Kento Terada [#], Shigeru Kashiwagi, Hirotooshi Saito, Yuto Ishizuki, Ken Kanomata, Koutaro Shibata, Ken Takahashi,
Ikuro Nagasawa, Ken-ichi Nanbu, Fujio Hinode, Sadao Miura, Toshiya Muto, Hiroki Yamada, Daiki Yamamoto,
Hiroyuki Hama

Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University

Abstract

Development of a high- brightness coherent terahertz source with low emittance and femtosecond electron beam is being progressed at Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University. The coherent undulator radiation has temporal and spatial coherence at THz region. Focusing on the spatial coherence of this radiation, the electron beam size can be measured nondestructively from measuring the transverse coherence using a double slit. In this paper, the details of the transverse coherence measurement system using double-slit that is currently under consideration are described.

1. はじめに

東北大学電子光物理学研究センターでは、試験加速器 t-ACTS を用いたコヒーレントテラヘルツ光源の研究開発が進められている。t-ACTS は熱陰極高周波電子銃を電子源とし、進行波型加速構造中での velocity bunching 法を用いたバンチ圧縮により 100 fs 以下の極単電子ビームの生成が可能である。これまでにテラヘルツ領域のコヒーレント遷移放射、コヒーレントアンジュレータ放射の生成を確認している。遷移放射では上限 4THz まで、アンジュレータ放射では 2.6~3.6THz の周波数帯でコヒーレント放射が観測されている[1]。

本研究ではこのコヒーレントアンジュレータ放射を使い、アンジュレータ内の電子ビームサイズ測定手法の検討を行った。コヒーレントアンジュレータ放射はテラヘルツ帯において空間・時間コヒーレンスを持つ。この放射の空間コヒーレンスに着目し、ダブルスリットを用いて横方向コヒーレンス度を測定することで、非破壊で電子ビームサイズを測定することが期待できる。放射光の横方向コヒーレンス度からビームサイズを測定する手法はこれまでに KEK の ATF ダンピングリング等の幾つかのストレージリングで採用されている[2]。その多くは可視光域の波長を利用しており、テラヘルツ帯での測定は行われていない。

本学会では t-ACTS の低エミッタンスかつ極短電子ビームからのアンジュレータ放射の空間コヒーレンス度からアンジュレータ内でのビームサイズを測定する手法の検討と試験実験結果について報告する。

2. 放射光源サイズの測定原理

有限の大きさをもつ光源からの光が二重スリットを通過した後、その進行方向にスリットから十分離れた位置 ($a^2/\lambda \gg L$) に垂直に置かれたスクリーンにつくられる像

について考える (Fig. 1)。各スリットからの光の強度が等しいとすると、このとき二重スリットを用いて観測される干渉縞の強度分布は以下のように表される[3]。

$$I(x) = I_0 \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\pi a}{\lambda L} x\right) \left[1 + |\mu_{12}| \cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda L} x + \phi\right)\right] \quad (1)$$

ここで I_0 は干渉縞中心部の光の強度であり、 μ_{12} は複素コヒーレンス度、 ϕ は干渉縞の相対位相、 a はスリットの太さ、 λ は光の波長、 L は二重スリットからスクリーンまでの距離、 d は二重スリットにおけるスリット間の間隔である。

有限の大きさをもつ準単色一次光源を考えると、van Cittert-Zernike の理論より、複素コヒーレンス度 μ_{12} は光源の強度分布をフーリエ変換し、それを正規化したものの絶対値に等しい[4]。これを利用すると二重スリットを用いて光の複素コヒーレンス度を測定することで、間接的にビームサイズを求めることが可能である。

このとき Visibility (V) は

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = |\mu_{12}| \quad (2)$$

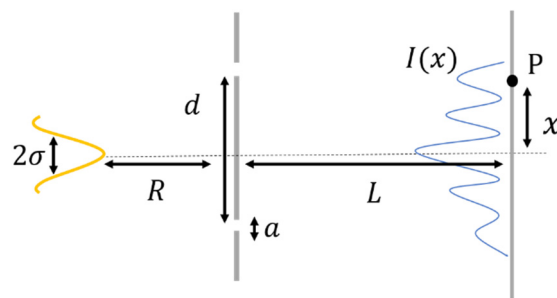


Figure 1: Beam size measurement using double slit.

[#] terada@lms.tohoku.ac.jp

となる。光源がガウス分布 σ_{ex} であると仮定すると、式(2)は次の様に書ける。

$$V = |\mu_{12}| = \exp \left[-2 \left(\frac{\pi \sigma_x d}{\lambda L} \right)^2 \right] \quad (3)$$

よって、電子ビームサイズは

$$\sigma_{ex} = \frac{\lambda L}{\pi d} \sqrt{\frac{1}{2} \ln \frac{1}{V}} \quad (4)$$

と表される。

3. t-ACTS におけるアンジュレータ内のビームサイズ測定

3.1 アンジュレータ放射

ここで電子ビームサイズを測定するのに用いるアンジュレータ放射について述べる。アンジュレータの放射の波長は次式で表される。

$$\lambda_R(\theta) = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right) \quad (2)$$

ここで λ_u はアンジュレータ磁場の周期長、 γ は電子のローレンツ因子、 θ は観測角である。また、アンジュレータ放射の角度拡がり σ_{θ} とサイズは以下のように書き表すことができる。

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\lambda_R}{2N\lambda_u} + \sigma'_B{}^2 \quad (6)$$

$$\sigma_T^2 = \frac{\lambda_R \cdot N \lambda_u}{8\pi^2} + \sigma_B^2 \quad (7)$$

ここで σ'_B と σ_B は電子ビームの角度拡がり σ_{θ} と横方向サイズ、 N はアンジュレータの周期数である。Table 1 に今回実験で使用したアンジュレータのパラメータを示す。電子ビームエネルギーが 22 MeV、規格化エミッタンスを 10×10^{-6} [m]、アンジュレータ内の平均のベータ関数を 1.0 [m] とした場合、式(6)と(7)から $\theta = 12$ mrad、 $\sigma_T = 1.1 \times 10^{-3}$ m となる。

Table 1: Undulator Parameter

Magnet array	Halbach type
Period length (λ_u)	80 mm
Number of periods	7
Gap	33 mm
Peak magnetic field (K value)	0.471 T (3.52)

3.2 実験セットアップ

試験実験は東北大学電子光理学研究センターの試験加速器 t-ACTS においてエネルギーが約 22 MeV、バンチ長 (σ_z) が約 80 [fs] の短バンチ電子ビームを用いて行った。本実験では、波長が約 160 μm (1.9THz) のコヒーレントアンジュレータ放射が、ダブルスリットを通過する際に作る干渉パターンを焦電検出器 (THz-10, Sensor und Lasertechnik, 検出有効径: ϕ 10 mm) を用いて測定した。

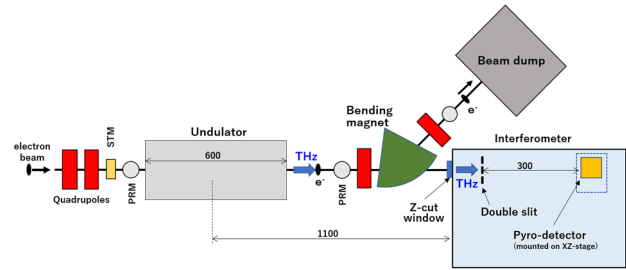


Figure 2: Experimental setup.

t-ACTS ビームライン下流部の実験セットアップ図を Fig. 2 に示す。アンジュレータ放射と電子ビームは偏光電磁石で分離され、電子ビームはビームダンプへ、アンジュレータ放射はZカット結晶水晶窓よりビームライン真空中から取り出され、ダブルスリット干渉計へと導かれる。焦電検出器は、水平/垂直方向に移動可能なステッピングモータステージに搭載され、水平と垂直方向に検出器を移動させ、1次元の干渉パターンを測定した。また、検出器ヘッドには、幅: $w = 1$ mm の金属スリットを取り付けた。

Figure 3 に式(1)より求めた干渉パターンの一例を示す。式(1)からも分かるように、干渉パターンの包絡線形状は、スリット幅 (a)、放射の波長 (λ)、ダブルスリットと測定器の距離 (L) で決まり、また干渉縞の間隔はスリット間隔 (d) に依存する。つまり、スリット間隔 d が大きくなると、干渉縞の間隔は狭くなる。

今回の測定では $d = 5, 10, 15$ mm、 $a = 2$ mm のダブルスリットを用意し、 $R = 1.2$ m、 $L = 375$ mm の条件で干渉縞の測定を行い、その結果に対して式(1)でのフィッティングを行うことで Visibility を求めた。 $d = 10$ mm のスリットを用いて測定された水平方向の干渉パターンが Fig. 4、垂直方向に関するものが Fig. 5 である。グラフにおいて青色でプロットしたものが測定された信号電圧値、赤色のラインがフィッティング関数である。水平方向の干渉パターンでは 2 つのスリットに入る光の位相が同位相であるので、中央で強め合いピークとなる (Fig. 4)。一方、垂直方向の干渉パターン測定では、電子ビー

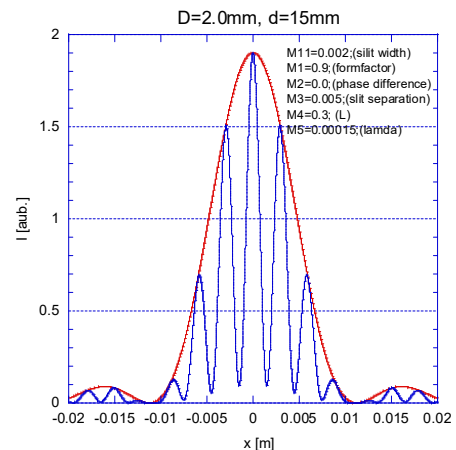


Figure 3: Calculated interferogram with double-slit (Blue line). Red line shows the sinc function. ($a = 2.0$ mm, $d = 15$ mm, visibility = 0.9)

ム軌道面の上下ではアンジュレータ放射の楕円偏光の逆相となるので、上下のスリットを通過する放射の位相が1/2周期(π)異なるため、干渉パターン中央では打消し合う(Fig. 5)。

水平方向に関する測定結果に対するフィッティングより、各スリット間隔において観測された干渉パターンの Visibility は、5 mm、10 mm、15mm 間隔のとき、それぞれ0.92、0.79、0.76であった。この結果をプロットし、式(3)でフィッティングすることで電子ビームサイズを求めた。その結果を Fig. 6 に示す。これより求められた光源サイズは1.8mmであった。式(7)より、アンジュレータ中のビームサイズは1.5mmと求められた。

アンジュレータ直前に設置したプロファイルモニターを使用して Quadrupole スキャンを行い、測定されたエミッタンスと Twiss パラメータからアンジュレータ内の平均のビームサイズを求めた。測定された規格化エミッタンスは $\gamma\epsilon_x = 4.8 \times 10^{-6}$ m、アンジュレータ内の平均のベータトロン関数 $\beta_x = 6.9$ m であり、これらから求まるビームサイズは0.89 mmであった。スリットスキャンで求められた値とは大きな差があるが、この原因としてアンジュレータ内

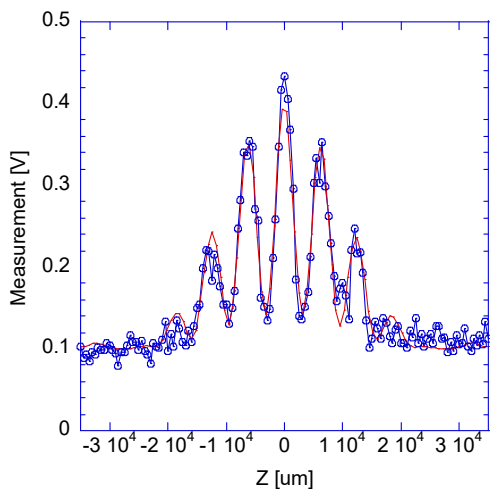


Figure 4: Horizontal Interferogram with double slit. ($a = 2.0$ mm, $d = 10$ mm)

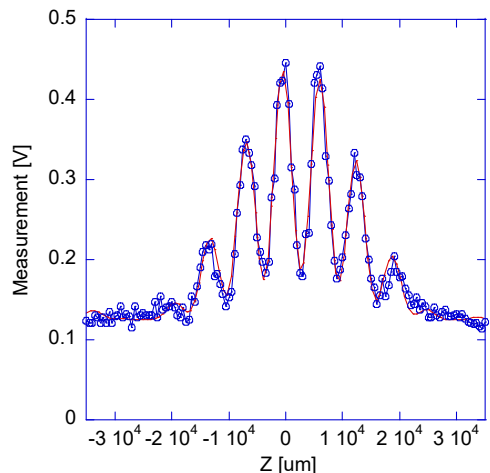


Figure 5: Vertical Interferogram with double slit.

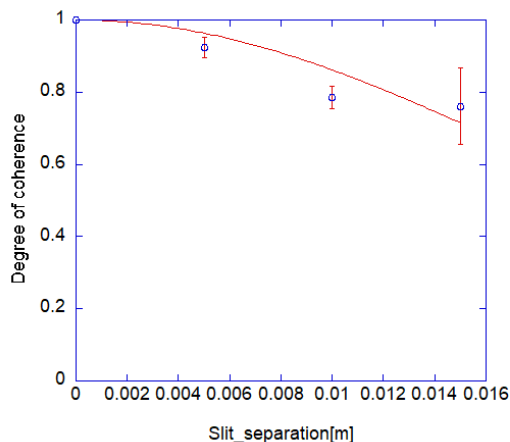


Figure 6: Measured degree of coherence as a function of slit separation.

の電子ビームの軌道変位が約 ± 1 mmあるためそれが大きな要因であると考えられる。特に、THz 発生で使用しているアンジュレータの場合、軌道振幅が最大と最小になる付近で発生した放射がビーム軸場付近では観測される。単純に軌道変位の標準偏差をとることから求められる値は約0.6 mm であるが、実際の軌道変位の測定される水平方向ビームサイズへの寄与はこれよりも大きいと思われる。垂直方向のビームサイズが測定できれば、軌道変位の問題などについて明らかにできると考える。今回、垂直方向の干渉パターンの測定では、スリットの設置がうまくいかず、異なるスリット間隔での干渉パターン測定を行うことができなかった。

4. まとめと今後の課題

t-ACTS において、極短電子ビームからのテラヘルツ領域のコヒーレントアンジュレータ放射を使い、ダブルスリット干渉計を用いてその空間コヒーレンス度の測定からビームサイズを算出することを試みた。ダブルスリットで測定された電子ビームサイズは Quadrupole スキャンで測定されたエミッタンスと Twiss パラメータから算出されたものよりも大きな値となった。アンジュレータ内の軌道変位が大きく影響していると考えられるが、今後、垂直方向のコヒーレンス度の測定およびビームサイズ測定を実施したいと考えている。

参考文献

- [1] S. Kashiwagi *et al.*, Infrared Physics & Technology 93, (2018) 335-339.
- [2] T. Naito *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 9, 122802 (2006).
- [3] U. Iriso *et al.*, Proceedings of IBIC 2013, Oxford, UK.
- [4] M. Born *et al.*, 草川徹・横田英嗣(訳), “光学の原理Ⅲ” 1975.