

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

GENERATION OF COHERENT THZ RADIATION WITH WIDE/NARROW BANDWIDTH BY AN EXTREMELY SHORT ELECTRON BEAM AT T-ACTS, TOHOKU UNIVERSITY

柏木茂^{#, A)}, 鹿又健^{A)}, 齊藤寛峻^{A)}, 齊藤悠樹^{A)}, 高橋健^{A)}, 長澤育郎^{A)}, 南部健一^{A)}, 西森信行^{B)},
日出富士雄^{A)}, 三浦禎雄^{A)}, 武藤俊哉^{A)}, 濱広幸^{A)}
S. Kashiwagi^{#, A)}, K. Kanomata^{A)}, H. Saito^{A)}, Y. Saito^{A)}, K. Takahashi^{A)}, I. Nagasawa^{A)}, N. Nishimori^{B)},
F. Hinode^{A)}, S. Miura^{A)}, T. Muto^{A)} and H. Hama^{A)}

^{A)} Research Center of Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University

^{B)} Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials (IMRAM), Tohoku University

Abstract

A test accelerator as a coherent terahertz source (t-ACTS) has been under development at Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University. Generation of coherent transition radiation and coherent undulator radiation in THz region from femtosecond electron pulses has been demonstrated at t-ACTS. Velocity bunching scheme in a traveling accelerating structure is employed to generate femtosecond electron pulses, and the generation of femtosecond electron pulses was confirmed by spectrum analysis of coherent transition radiation. A long-period undulator, which has 25 periods with a period length of 10 cm and a peak magnetic field of 0.41 T, has been developed and installed to t-ACTS. Characteristics of the coherent transition radiation and the coherent undulator radiation such as frequency spectrum, spatial distribution and polarization were measured and compared with theoretical calculations. In the measurements, Michelson interferometer with pyroelectric detector was used to obtain the interferogram of the radiation and the frequency spectrum was deduced by Fourier transform of the interferogram. We have succeeded to generate the coherent transition radiation up to 3.5 THz and the coherent undulator radiation from 2.6 to 3.4 THz. The results of the beam experiment are presented in this paper.

1. はじめに

電波と光の中間の周波数の電磁波であるテラヘルツ波は、電波と光の両者の良い性質を持っている事などから非破壊検査やセキュリティーチェックなど様々な利用がなされており、その光源開発が世界で盛んに行なわれている。テラヘルツ波はこれまで物質を「見る・調べる」ことに広く利用されてきたが、近年の THz 光源の高出力化によって物質を「変える」(分子構造を操作する)ことが可能であるといった報告がなされ[1]、高強度の THz 波源が注目を集めている。

現在、我々は東北大学電子光理学研究センターの試験加速器 t-ACTS(test Accelerator as Coherent Terahertz Source)において、フェムト秒時間幅の極短電子ビーム生成とその電子ビームによる高輝度コヒーレントテラヘルツ光源の開発を進めている[2]。t-ACTS では進行波加速管中での速度集群法(Velocity bunching 法)により、100fs 以下まで電子ビームをバンチ圧縮することが可能であり[3,4]、これまでにバンチ圧縮された極短電子ビームを使いテラヘルツ領域のコヒーレント遷移放射発生実験とコヒーレントアンジュレータ放射発生実験を行なった。2種類のコヒーレント放射のスペクトル計測はマイケルソン干渉計により行い、放射の偏光特性についてはワイヤグリッド偏光子を用いて測定した。本稿では、t-ACTS に

おけるコヒーレント放射発生実験の結果について報告する。

2. コヒーレント遷移放射

電子バンチの進行方向の長さが放射する光の波長よりも十分短い場合にはバンチ内の各電子からの放射の干渉により、放射強度がバンチ内電子数の 2 乗に比例するコヒーレント放射となる。加速器中の電子ビームからのコヒーレント放射は、1988 年に東北大学原子核理学研究施設(現:電子光理学研究センター)において世界で初めて観測に成功している。その時の実験では、数ピコ秒の電子バンチからのミリ波領域のコヒーレント放射が観測されている[5]。

電子バンチからの放射パワーは次式のように表すことができ、

$$P(\omega) = [N\{1 - f(\omega)\} + N^2 f(\omega)] \cdot P_0(\omega) \quad (1)$$

ここで、 $P_0(\omega)$ は1個の電子からの放射パワー、 N はバンチ内の電子数、 $f(\omega)$ はバンチ形状因子である。Figure 1 に電子バンチの縦方向電荷分布がガウス分布の場合のバンチ形状因子を示す。バンチ形状因子はバンチ内電子分布のフーリエ変換の絶対値の 2 乗の形になっており、バンチ長が短くなるにつれて高周波側へと延びていく。つまり、Fig. 1 から分かるようにフェムト秒オーダーの極めて短い電子バンチを用いることによって、テラヘルツ

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

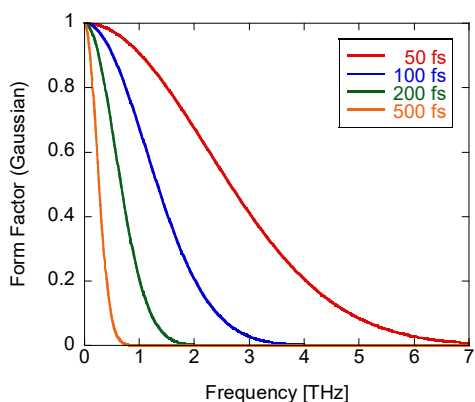


Figure 1: Bunch form factor (Gaussian shape bunch).

領域のコヒーレント放射を発生することができる。

相対論的エネルギーの電子ビームが誘電率の異なる物質間を通過する際に発生する遷移放射では、電子バンチの時間幅が 100fs の場合は 3THz におよぶ広帯域のコヒーレント放射を発生することができる。こうした広帯域のテラヘルツ放射は、広い周波数範囲で吸収スペクトルの周波数を調べる場合などに適している。

一方、アンジュレータとフェムト秒時間幅の極短電子ビームを用いることにより、狭帯域の高輝度のコヒーレントテラヘルツ放射を発生することができる。狭帯域のアンジュレータ放射は、特定の波長域で詳細にスペクトル計測を行なう場合などに威力を発揮すると考えられる。また、電子ビームのミッタンスが光の固有エミッタンス ($\lambda/4\pi$) よりも小さい場合には、空間コヒーレンスをもつ放射となる。アンジュレータの共鳴周波数が 1THz ($\lambda = 300\mu\text{m}$) の場合、光の固有エミッタンスは $300\mu\text{m}/4\pi \sim 24\mu\text{m}$ であり、電子ビームのエミッタンスがこの値が小さければ極短電子ビームからのアンジュレータ放射は時間コヒーレンスと空間コヒーレンスをもつ超放射となる。

3. コヒーレントテラヘルツ放射発生

試験加速器 t-ACTS において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実験を実施した。t-ACTS は、独自に開発した熱陰極高周波電子銃を電子源とし、エネルギーフィルターとして使用している α 電磁石、3m 長 S バンド進行波加速管、THz 発生用のアンジュレータで構成されている (Fig. 2)。電子バ

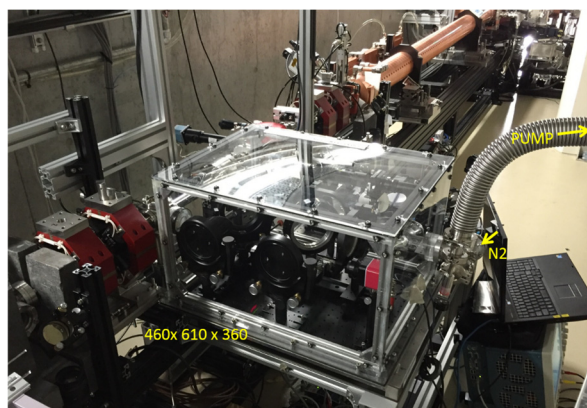


Figure 3: Michelson interferometer for spectrum measurement.

ンチは進行波加速管中での Velocity bunching により時間圧縮され、シミュレーションでは約 50fs(rms)まで圧縮できることが示されている。t-ACTS では、圧縮後のバンチ長は熱陰極高周波電子銃出口の縦方向位相空間分布および加速管への電子ビーム入射位相を調整することによって制御することが可能である。以下に述べるコヒーレント遷移放射発生実験およびコヒーレントアンジュレータ放射発生実験における主だった電子ビームパラメータは、エネルギー: 約 30~32[MeV]、マイクロバンチ電荷: 3~4[pC]、マクロパルス幅: 約 2[μs] (マイクロバンチ数: 約 5700)、規格化エミッタンス: $\gamma\epsilon_x/\gamma\epsilon_y \sim 3/6[\mu\text{m}]$ であった。

3.1 コヒーレント遷移放射発生

遷移放射は、加速管下流のビームライン真空中にアルミ蒸着ミラーをビーム軸に対して 45° の角度で挿入し発生する。発生した遷移放射は厚さ $300\mu\text{m}$ のダイヤモンド窓を通して真空中から取り出し、ビームライン脇に構築したマイケルソン干渉計を使いスペクトル測定を行なった。THz 帯には多数の水蒸気吸収スペクトルが存在するため、マイケルソン干渉計の全体をアクリルケースで囲い、そのケース内を乾燥窒素に置換した。(Fig. 3)。検出器は冷却を必要としない焦電検出器 (THZII-BL-BNC [Gentec-EO]) を使用し、そのヘッドには可視域の光をカットするためのブラックポリエチレンを取り付けた。

Fig.4(a)は測定された遷移放射の干渉パターンの一例である。干渉パターンをフーリエ変換することにより得られた周波数スペクトルが Fig.4(b)である。Fig.4(b)に示さ

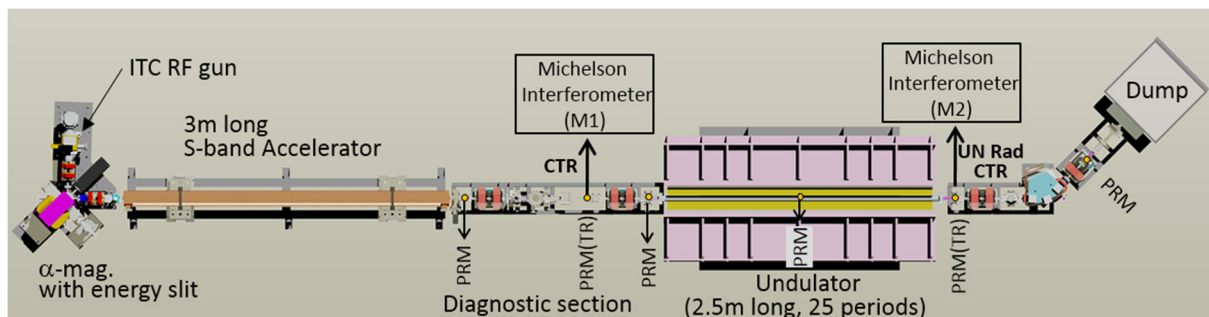


Figure 2: t-ACTS beam line layout.

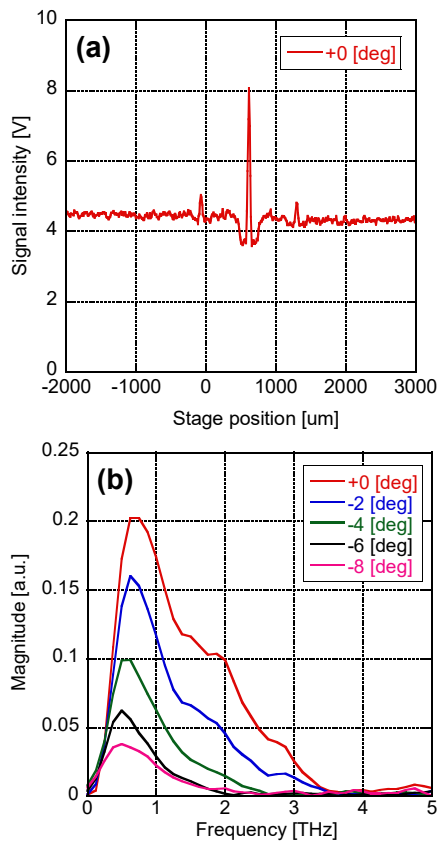


Figure 4: (a) Measured interferogram using Michelson interferometer. (b) Deduced frequency spectra by Fourier Transform of the interferogram for the different injection phase ($0^{\circ}\sim 8^{\circ}$).

れている 5 つの周波数スペクトルは、加速管へのビーム入射位相を $0^{\circ}\sim 8^{\circ}$ の範囲で変えバンチ長を変化させて測定したものである。入射位相が 0° の時に放射スペクトルは最も高い周波数まで達しており、電子バンチの時間幅が最も短くなっていることを示している。また、スペクトルの低周波数側の欠落は検出器感度や測定系での回折損失が原因である。測定されたコヒーレント遷移放射のスペクトルから、縦方向電荷分布が正規分布であると仮定しバンチ長を推定すると約 80fs (rms) という結果が得られた。その他、ワイヤグリッドを用いてコヒーレント遷移放射の偏光空間分布測定を行い、遷移放射がラジアル偏光であることを確認することができた[6]。

3.2 アンジュレータ放射発生

ビーム実験に使用した THz 発生用に開発したアンジュレータの基本パラメータを Table 1 に示す。周期長と周期数はそれぞれ 100 mm と 25 周期、磁石サイズは $110\times 65\times 25\text{ mm}^3$ である。アンジュレータの端部に横磁化磁石を配置することにより電子ビームの入射軸とアンジュレータ内での蛇行運動の軸が同じになるように設計した。ギャップ可動範囲は 44~110 mm であるが、発生する THz 光の放射角度が大きいことや自由空間モードでの THz FEL 開発も行なう予定であることからビームダクトの直径(外径)を 53mm とし、ビーム実験時の最小ギャップは 54mm とした。アンジュレータ磁場はホール素子と長尺ステージを用いて実測しており、最小ギャップ 54mm

Table 1: THz Undulator Parameters

Undulator type	Halbach planer type
Size of magnets	$110\times 65\times 25\text{ mm}^3$
Material and coating	Nd-Fe-B · TiN
Period length and number	100mm · 25 periods
Undulator length	2.532 m
Peak magnetic strength	0.41 T (g = 54mm)
K value	3.82 (max)

の時のピーク磁場強度は約 0.41 T であった。本アンジュレータでは、電子ビームエネルギーが 19MeV のとき、波長 $300\sim 136\mu\text{m}$ (1.0~2.2 THz) のテラヘルツ放射発生が可能である。

今回は、t-ACTS の RF 分配システムの関係でビームエネルギーを 19MeV まで下げることができず、約 31MeV でビーム実験を行なった。アンジュレータ放射の測定は、遷移放射の実験と同様にアンジュレータ下流にアルミラーをビームライン上に挿入し、ビーム軸に対して 90° 方向に放射光を取り出し、マイケルソン干渉計によりスペクトルを測定した。スペクトル測定の際、アンジュレータ放射はダイヤモンド窓を通して真空中から取り出された後、2 枚のレンズを使って平行光にされ干渉計へと導入された。電子バンチがアルミラーに入射した際にその表面で遷移放射も発生するが、アンジュレータ放射と遷移放射は光源点と発散角が異なるため平行光に変換する光学系で両者は分離される。

Figure 5 に測定されたアンジュレータ放射の干渉パ

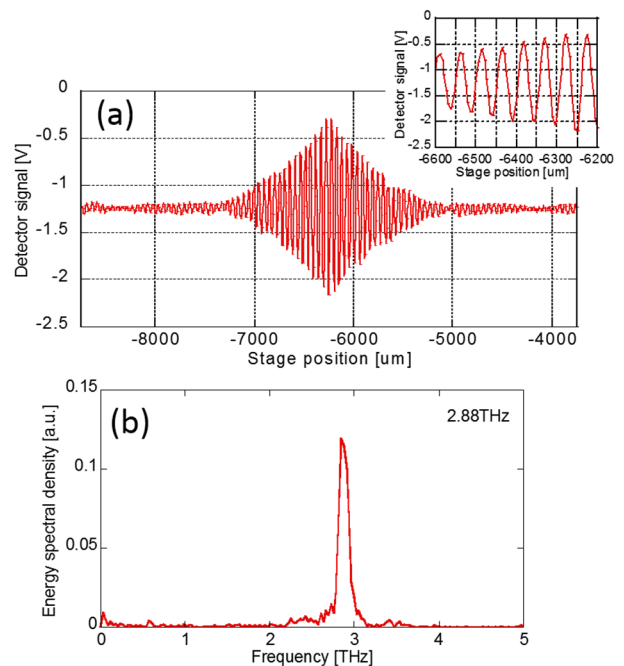


Figure 5: (a) Measured interferogram of undulator radiation. (b) Frequency spectrum of undulator radiation with $K=3.6$.

ターンと周波数スペクトルを示す。アンジュレータ K 値: 3.65 (ギャップ: 55mm) の時に測定されたアンジュレータ放射の周波数は 2.88THz、スペクトル幅は半値全幅で約 0.13THz (~4.5%) であった。Figure 5(a) の干渉パターンにおいて共鳴波長の周期で干渉を繰り返していることから、基本波の周波数域においてコヒーレントなアンジュレータ放射が発生していると判断できる。高調波の発生については、バンチ長が遷移放射の周波数解析から求められた 80fs(rms) とした場合に基本波のバンチ形状因子は約 0.1、3 次高調波 (約 8.6THz) では 10^{-8} オーダーとなり、今回の実験でマイクロバンチ内の電子数 (N) が約 10^7 個であることから、3 次高調波のコヒーレント放射の成分は自発放射よりも弱かったことになる。

アンジュレータのギャップを変え共鳴波長を変化させてスペクトル測定を行なった。Figure 6 には、各ギャップで測定されたアンジュレータ放射パワーと比較のために遷移放射のスペクトルを示す。このグラフでは、遷移放射とアンジュレータ放射の 2 つのデータについて 2.6 THz の位置で重なるようにスケールした。アンジュレータ放射のスペクトルが高周波側にいくに従い減衰していく様子は遷移放射スペクトルと同様の傾向をしており、この結果からもアンジュレータ放射がコヒーレント放射であるといえる。

遷移放射と同様にアンジュレータ放射についてもワイヤーグリッド (GS57207, wire diameter: 10 μm , period: 25 μm , SPECAC) を用いて、垂直・水平偏光成分の空間プロファイル測定を行なった。Figure 7 に測定されたアンジュレータ放射の空間分布を示す。実験に使用したアンジュレータはビームが垂直方向に振動するプラナー型のため、主偏光方向は垂直方向である。単一電子が放出するアンジュレータ放射の空間分布と測定結果を比較すると、垂直偏光成分については計算結果とプロファイル形状が一致するが、水平偏光成分については軸上に放射が測定されており計算結果と異なる。この原因として、電子ビームエミッタンスやアンジュレータ内でのビームエンベロープ (ビームサイズの変化) の影響などが考えられるが、今後、測定方法の確認も含め調査を行なっていく予定である。

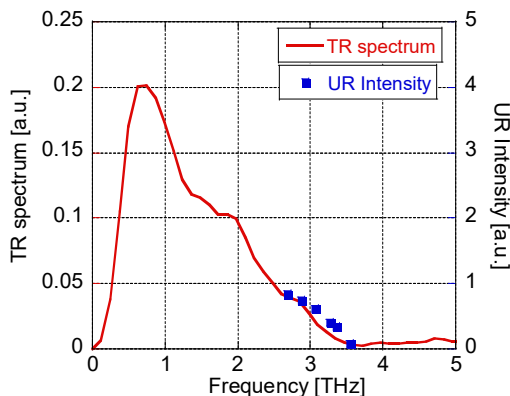


Figure 6: Radiation power of undulator radiation with different undulator gap and spectrum of transition radiation.

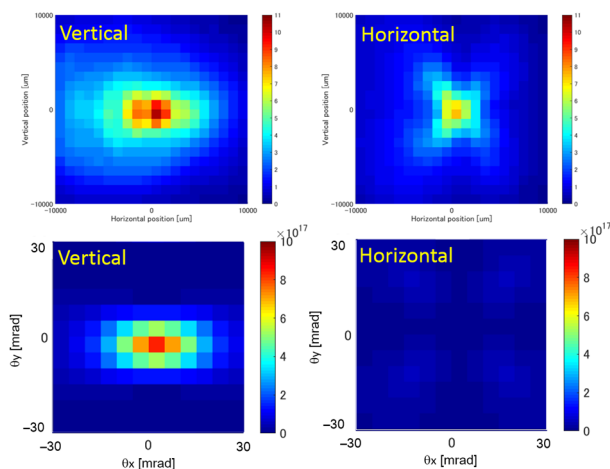


Figure 7: (Upper) Measured spatial profile of undulator radiation using wire grid. Image size is 20mm \times 20mm. Left and right side of profiles are vertical and horizontal polarized component of the radiation, respectively. (Lower) Calculated spatial profiles of undulator radiation from single electron.

4. まとめと今後の課題

t-ACTS において Velocity Bunching 法により生成された極短電子ビームを使い、放射スペクトルが 3.5THz におよぶ広帯域のコヒーレント遷移放射と 2.6~3.4THz の周波数域で狭帯域のコヒーレントアンジュレータ放射の発生と測定を行なうことができた。今後は、放射強度の絶対値測定や偏光特性の詳細な測定を行い、THz 光源としての性能評価を進めていきたいと考えている。その他にも、遷移放射については偏光板を用いたラジアル偏光からアジマス偏光への偏光制御を行い、テラヘルツ領域での分子配向の三次元測定などに繋げていきたいと考えている。また、コヒーレントアンジュレータ放射の応用として、交叉型アンジュレータを用いた任意の偏光状態の超放射を発生することができる光源の検討・開発を行なっていく予定である[7]。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 基盤研究(B) 25286084、挑戦的萌芽研究 15K13401 の助成を受け行なわれた。

参考文献

- [1] H. Hoshina *et al.*, Scientific Reports 6, 27180 (2016).
- [2] H. Hama *et al.*, Energy Procedia 9, 391-397 (2011).
- [3] L. Serafini, and M. Ferrario, AIP Conf. Proc. 581, 87-106 (2001).
- [4] S. Kashiwagi *et al.*, Energy Procedia 89, 346-352 (2016).
- [5] T. Nakazato, *et al.*, Phys. Rev. Lett., **63**. 12. pp. 1245-1248, 1989.
- [6] H. Hama *et al.*, Int J Opt Photonic Eng, 2:004, (2017).
- [7] H. Saito *et al.*, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 1-3, 2017, Sapporo, Japan (WEP013).