

小型線形加速器 LEENA におけるテラヘルツ光源開発

DEVELOPMENT OF TERAHERTZ LIGHT SOURCES AT LINEAR ACCELERATOR LEENA

橋本智^{#,A)}, 陳彩華^{A)}, 川田健二^{A)}, 李大治^{B)}, 天野壮^{A)}, 宮本修治^{A)}

Satoshi Hashimoto^{#,A)}, Sayaka Chin^{A)}, Kenji Kawata, Dazhi Li^{B)}, Sho Amano^{A)}, Shuji Miyamoto^{A)}

^{A)} LASTI, University of Hyogo

^{B)} Laser Institute of Technology

Abstract

Terahertz radiation by the Smith-Purcell effect using 15 MeV electron beams of the linear accelerator LEENA was successfully observed. The radiation properties such as the angular dependence of radiated power were measured. Wavelength spectrum was clearly measured by the Martin-Puplett interferometer and the peak wavelength well corresponds to the calculated one. Angular distribution of the coherent Smith-Purcell radiation is calculated for the electron bunch length measurement.

1. はじめに

兵庫県立大学ニュースバル放射光施設内にある小型電子線形加速器 LEENA^[1]は 15MeV 相対論的電子ビームを用いた広帯域 (0.1-10THz)、波長可変、高ピークパワーのテラヘルツ光源の開発およびその産業利用を目指して現在、加速器の改修を行なっている。これまでに旧式化した制御系の更新、各種ビームモニターの設定、真空系の改善、ビーム電流の増強等を実施してきた^[2-4]。

テラヘルツ光源として偏向電磁石からのシンクロトロン放射光の他に、Smith-Purcell 放射光 (SP 光) の観測に成功した^[4]。金属グレーティング近傍を相対論的電子ビームが通過する際に金属表面から放射される SP 光は波長が放射角度に依存する特徴がある。また電子ビームバンチ長が電磁波の波長程度になると放射されるコヒーレント SP 光の放射角度分布は電子ビームのバンチ長に依存する事から、SP 光は波長可変な光源としてだけでなく、バンチ長を計測するビームモニターとしての活用が期待出来る。

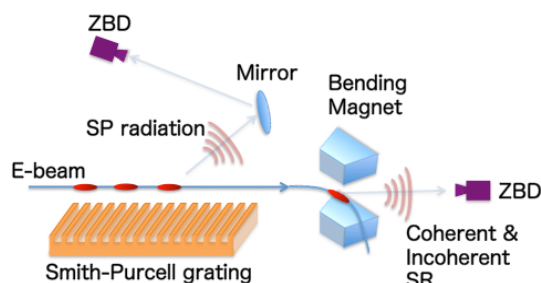


Figure 1: Generation of Terahertz Radiation at LEENA.

本発表では最近の LEENA 加速器改造の状況と今後の予定、SP 光パワーの放射角度依存性の計測、

[#] hashi@lasti.u-hyogo.ac.jp

Martin-Puplett 干渉計を用いて計測した SP 光の波長スペクトル等について報告する。またいくつかの機器の不具合により短バンチ化実験は今回の報告には間に合わなかったが、今後予定している短バンチ化によるコヒーレント SP 光の数値計算結果について述べる。

Table 1: Main Parameters of LEENA Accelerator

Beam Energy	6-15 MeV
Macropulse Current	100 mA
RF frequency	2856 MHz
Energy Spread	0.5% @ 15MeV
Cathode	Thermal LaB6
Repetition Frequency	1-10 Hz
Macropulse width	5 μ s
Bunch length	30ps >

2. 加速器の現状と改造予定

LEENA 加速器の主要なパラメータを表 1 に示す。熱陰極 RF 電子銃で生成した電子ビームをアルファ電磁石で短バンチ化し、定在波加速管で最大 15MeV まで加速出来る。電子ビームは二台の偏向電磁石で軌道を 90° 曲げられた後、光源用直線部および偏向電磁石を通過してビームダンプで廃棄される。

0.11-0.17THz 帯の検出器で計測した SP 光の強度は数 μ ワット程度の微弱なものであったが、これは電子ビームバンチ長 (30ps 以上) がテラヘルツ光の波長よりも長く、インコヒーレント光であるためである。電子銃下流に設置されたアルファ電磁石による電子ビーム短バンチ化により数桁強度の高いコヒーレント光の発生が可能になるが、いくつかの不具合 (電子ビームの発散、電子銃熱陰極の据付時の

歪み)があったために、短バンチ化が不十分であった。

これらの問題の改善を図るため、3月に電子銃カソード交換作業を実施し、カソードの取り付け歪みを修正した。また他所から流用した収束用ソレノイドが能力不足であったため、新たに再設計し現在製作中である。平成25年度は電子銃下流への新ソレノイドコイル設置によるビーム輸送の改善、OTRモニターの設置によるビームプロファイル計測、短バンチ化によるコヒーレント光の発生およびテラヘルツ光ビームラインの建設を予定している。

3. Smith-Purcell 光の観測

3.1 放射角度依存性

SP光の波長 λ は次式で表される。

$$\lambda = \frac{d}{n\beta}(1 - \beta \cos\theta) \quad (1)$$

ここで、 d はグレーティング周期、 n は次数、 β は規格化した電子速度、 θ は放射角度である。LEENA SP光源の主なパラメータを表2に示す。真空チャンバー内に昇降可能な周期10mm、深さ3mmの無酸素銅製のグレーティングが設置されており、真空チャンバー内の3枚の回転式ミラーを用いて、ある特定の放射角度のSP光だけを水晶ビューポートを通して大気中へ取り出す事ができる。

Table 2: Main Parameters of SP Radiation

Period	10mm
Depth of Grating	3mm
Number of Periods	48
Total Length	480mm
Grating Material	Cu

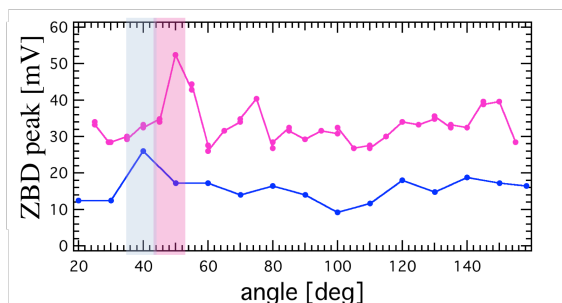


Figure 2: Angular Dependence of SP Radiation Power. Upper line: 0.11-0.17THz ZBD, Lower line: 0.075-0.11THz ZBD.

測定範囲が0.075-0.11 THzおよび0.11-0.17 THzの二種類のZero Bias Detector (ZBD, Virginia Diodes社製)を用いて放射角度を変えながらSP光パワーを計

測した結果、ほぼ(1)式で計算される角度(43~53° @0.075~0.11 THz, 35~43° @0.11~0.17 THz)でピークが検出された(図2)。ピークが余り明確でないのはチャンバー内のミラー(Φ50)の見込み角度が大きく、またグレーティング全長が長いために選択した放射角度に設定してもグレーティングの中央以外(上下流)で発生した放射角度の異なる波長成分が若干含まれるためである。チャンバー内にスリットを設けることで選択した角度付近のSP光だけを取り出すことが出来ると思われる。

3.2 Martin-Puplett 干渉計による波長スペクトル測定

SP光の波長スペクトルを計測するためにMartin-Puplett干渉計を構築した。ワイヤグリッドは偏光面がワイヤに平行な成分のテラヘルツ光を反射し、垂直成分を透過する。ワイヤの向きは図3に示すように配置した。SP光は水平および垂直偏光成分に分離され、二波の光路差で干渉を生じる。

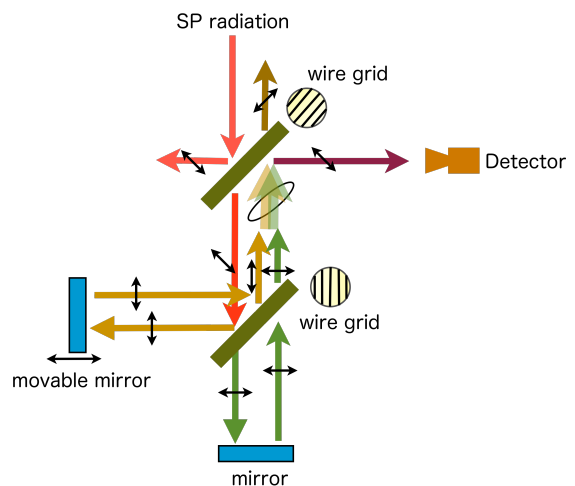


Figure 3: Martin-Puplett Interferometer.

ワイヤグリッドによる平行、垂直成分の反射率はそれぞれ次式で表される。

$$|R_{\parallel}| = \left[1 + \left(\frac{2s}{\lambda} \right)^2 \ln \left(\frac{2}{\pi d} \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad |R_{\perp}| = \left[1 + \left(\frac{2\lambda s}{\pi^4 d^4} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

使用したワイヤグリッド(径10 μ m、間隔25 μ m)は今回計測した0.1THz帯では $|R_{\parallel}|=0.99$ 、 $|R_{\perp}|=0.006$ であり、理想的な偏光子である。干渉計は遮蔽室内に設置するため、可動ミラー遠隔制御とZBD信号取得が出来る自動計測システムをLabVIEWで開発した。図4に0.1mm毎にミラー位置を変えて計測した干渉パターンを、図5に干渉パターンをFFT解析で求めた波長スペクトルを示す。SP光のピーク波長は3.4mmであり、(1)式から求められる理論値と良く一致しており、ピーク波長のFWHMは約8.8%であった。

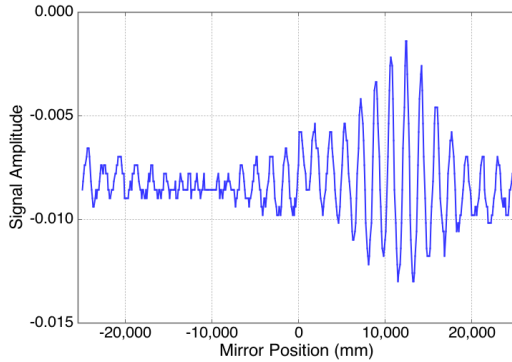


Figure 4: Raw data of Martin-Puplett Interferometer.

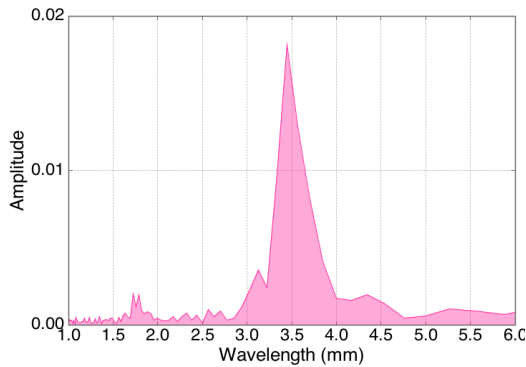


Figure 5: Wavelength Spectrum Obtained by Martin-Puplett Interferometer.

4. 短バンチ化によるコヒーレント SP 光

電子ビームのバンチ長が放射される電磁波の波長と同程度になると大強度コヒーレント SP 光が放射される。インコヒーレントおよびコヒーレント SP 光の立体角あたりの放射パワーは次式で表される^[5]。

$$\frac{dP}{d\Omega} = KN(1+f(k)N) \frac{\sin^2 \theta}{(1-\beta \cos \theta)^3} e^{-\frac{4\pi h}{\gamma \lambda}} \quad (2)$$

ここで K は定数、 N はバンチあたりの電子数、 $f(k)$ はバンチ形状因子、 h はグレーティング表面からビームまでの距離、 γ はローレンツ因子である。バンチ形状をガウス分布と仮定した場合の計算例を図 6 に示す。バンチ長が十分に長いとインコヒーレント光しか観測されないが、バンチ長が短くなるにつれて放射角度の大きな後方からコヒーレント SP 光が現れ始め、徐々に前方へ移動し、強度も大きくなる。またバンチ長が 1ps で形状が矩形、指数関数、ガウス分布の各場合のコヒーレント SP 光の角度分布を図 7 に示す。非ガウス分布では同程度のバンチ長でもより短い波長領域（前方）に強度の高いコヒーレント光が放射されることが期待できる。

コヒーレント SP 光は電子ビームのバンチ長やバンチ形状によって放射角度分布が異なる為、放射パワーの角度分布を計測することにより、電子ビームの進行方向分布を非破壊的に評価することが出来る。

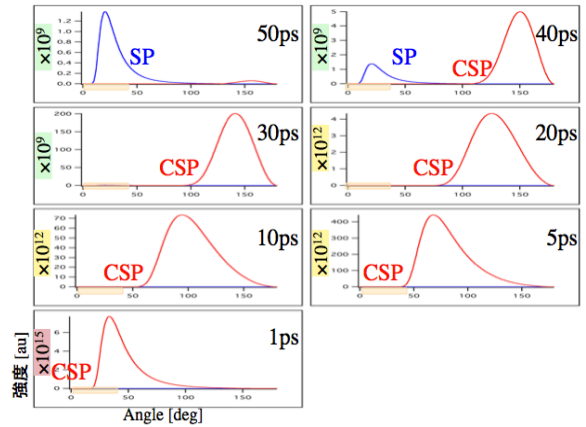


Figure 6: Bunch Length Dependence of Coherent SP Light (Calculation).

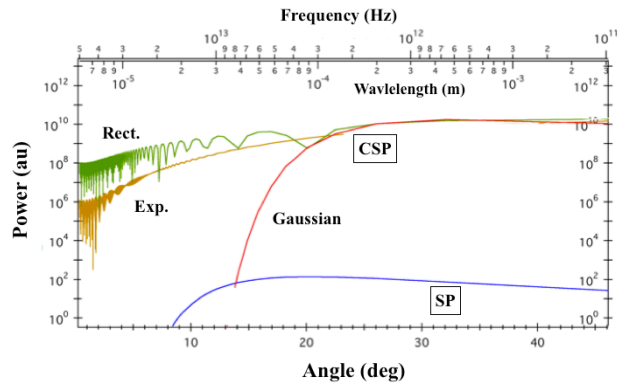


Figure 7: Bunch Shape Dependence of Coherent SP Light (Calculation). Bunch length 1ps is assumed.

5. 謝辞

LEENA 加速器の改造作業に御協力頂きました JASRI 加速器部門の皆川康幸様、竹村育浩様に深く感謝いたします。また加速器の管理業務についてご尽力頂きました JASRI 安全管理室の皆様と大熊春夫 JASRI 加速器部門長には厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] <http://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/NS/facility/leena/>
- [2] S.Hashimoto, et al., “小型電子線形加速器 LEENA のアップグレード計画”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society in Japan, Tsukuba, 2011
- [3] S.Hashimoto, et al., “兵庫県立大学電子線計加速器 LEENA の現状と性能向上”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society in Japan, Osaka, 2012
- [4] S.Chin, et al., “小型線形加速器 LEENA を用いたテラヘルツ光源開発”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society in Japan, Osaka, 2012
- [5] D.C.Nguyen, et al., “Electron Bunch Length Diagnostic with Coherent Smith-Purcell Radiation”, MS H851, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545