

DEVELOPMENT OF TERAHERTZ RADIATION SOURCES BY COMPACT ELECTRON LINEAR ACCELERATOR LEENA

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

^{A)}NewSUBARU / Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo

1-1-2 Kouto, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo, 678-1205

^{B)} Institute for Laser Technology

1-8-4 Utsubo-honmachi, Nishi-ku, Osaka, Japan 550-0004

Abstract

We have been developing terahertz radiation sources using the 15 MeV compact electron linear accelerator LEENA at University of Hyogo and have succeeded in measuring both the synchrotron radiation from a bending magnet and the Smith-Purcell radiation in the terahertz region. For the spectral analysis and the bunch length measurement, the Martin-Puplett interferometer is under construction.

小型線形加速器 LEENA を用いたテラヘルツ光源開発

1. はじめに

ニュースバル放射光施設では 1.5GeV 電子蓄積リングから発生する軟 X 線領域のシンクロトロン放射光を用いた産業利用を行っている。本施設には巨大な電子蓄積リングとは独立して小型の電子線形加速器 LEENA があり、ビームエネルギー15MeV の相対論的電子ビームを生成できる。平成 23 年度から旧式化した加速器の改善[1-3]を行っており、コンパクト加速器によるテラヘルツ光源の開発を目指している。

本研究では LEENA を用いたシンクロトロン放射およびスミス・パーセル放射によるテラヘルツ光源開発の進捗状況について報告する。

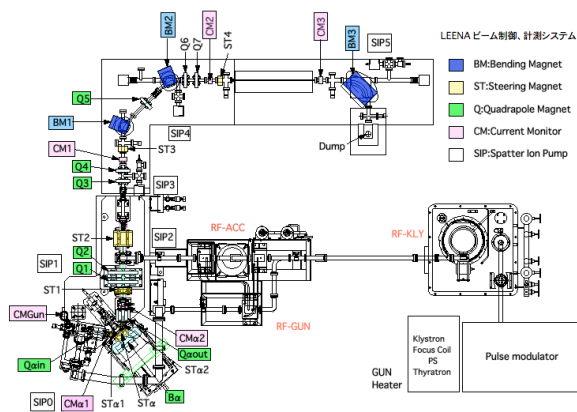


図 1 : LEENA 全体図

2. シンクロトロン放射によるテラヘルツ光の発生

2011 年 11 月 30 日に LEENA テラヘルツ光の第一歩として LEENA の偏向電磁石 BM3 からの放射光を観測した。ビームエネルギー15MeV、マクロパルス

幅 $5 \mu s$ 、繰り返し周波数 10Hz、RF 周波数 2856MHz でビーム運転を行った。テラヘルツ光パワーの計測には VDI 製 WR6.5 Zero Bias Diode(110-170GHz、2000V/W) を使用した。BM3 におけるビーム電流は 35mA 程度で、ZBD 出力 55mV(27.5 μW)のテラヘルツ光が観測された。

テラヘルツ波は水晶窓（藤アイデック製、厚さ 3mm）を通して真空から大気中に取り出される。BM3 からの放射光を用いて水晶窓のテラヘルツ波透過率を計測した。ZBD の前に同じ規格の水晶窓をもう一枚挿入し、その前後の ZBD 信号強度（55mV および 53mV）から 0.11-0.17THz 帯での水晶窓の透過率は約 96%であることがわかった。またこの帯域のテラヘルツ光の大気による減衰の影響は、今回の計測条件（数 10cm の伝搬距離）では無視できる[4-5]

今回使用した ZBD で観測されたテラヘルツ光の波長(1.8~2.7mm)は予想されるバンチ長 10~30ps(波長 3~9mm)よりも短い事および数値計算プログラム SRW[6]を用いて計算した 100-170GHz 帯の放射光のパワーは 105 μW であり計測値と数倍以内で一致している事から今回観測されたテラヘルツ光はインコヒーレント光であると考えられる（図 2）。

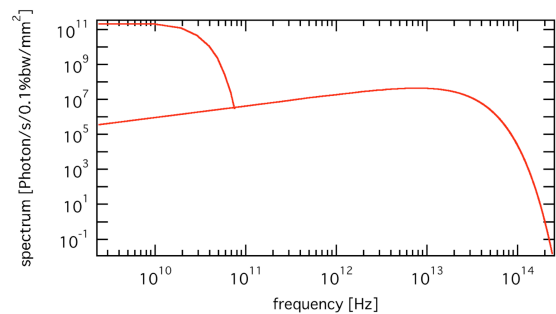


図 2 : BM3 からのシンクロトロン放射（計算値）

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

3. スミス・パーセル放射によるテラヘルツ光の発生

3.1 スミス・パーセル放射の特性（計算）

スミス・パーセル光とは金属製グレーティングの近傍を電子ビームが通過する時に金属表面に誘起される電流から電磁波が放射された放射光である。回折の次数を n 、グレーティング周期を d 、放射角度を θ (0° : 電子ビーム進行方向、 90° : 鉛直方向)、 $\beta=v/c$ とすると、スミス・パーセル放射の分散関係は式(1)で表される。ビームエネルギー15MeV、グレーティング周期 10mm であるので、ピーク波長の θ 依存性は図3の様になる。また Induced Surface Current model [7]を用いて計算した立体角あたりの放射パワーの θ 依存性を図4に示す。

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

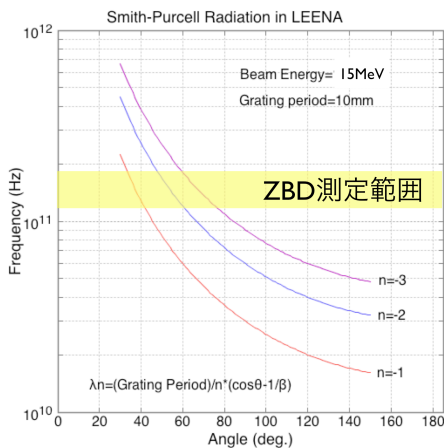


図3：ピーク波長（周波数） vs. 放射角度

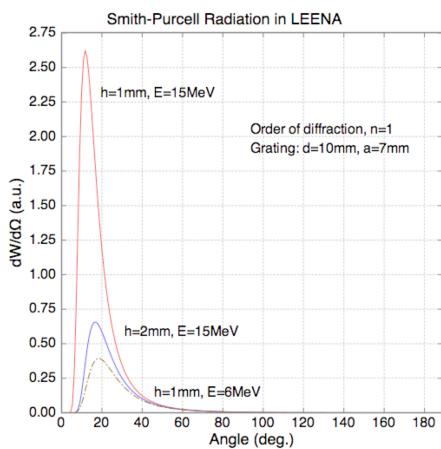


図4：Induced Surface Current modelで計算したスミス・パーセル光放射パワーの放射角度依存性

3.2 スミス・パーセル放射の観測

2012年6月4日にスミス・パーセル放射を初めて

観測した。銅製グレーティング（周期 10mm）から放射される電磁波を真空チェンバー内の放物面ミラー($f=250$)および平面ミラー2枚で集光し、テラヘルツ光の透過できる水晶窓を通して ZBD で計測した（図5）。放物面ミラーはモーター駆動によりスミス・パーセル光の発生角度に合わせて可動できるようになっているが、電子ビームとの干渉を避けるため、ミラー駆動範囲は約 $20\sim 160^\circ$ である。スミス・パーセルチェンバーのすぐ下流では、マクロ平均電流 40mA、バンチ当りの電荷量 17.5pC であり、ZBD ピーク出力 18.5mV(9.25 μ W)が観測された（図6）。ZBD のアンテナ開口部面積 78.5mm²を考慮すると、パルスあたり単位面積あたりの強度は 0.4 pJ/mm²/pulse となった。

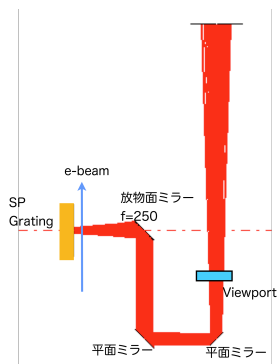


図5：スミス・パーセル光計測のセットアップ

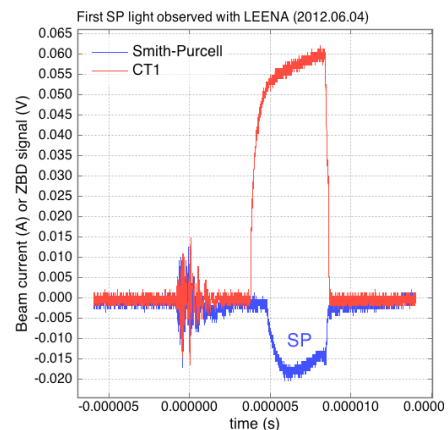


図6：LEENAで観測したスミス・パーセル光

4. 干渉計の構築

現在、スペクトル計測や電子ビームバンチ長の評価のために Martin-Puplett 干渉計の構築準備を行っており今秋から計測を開始する予定である。Martin-Puplett 干渉計とは光路差による干渉を利用した Michelson 干渉計に偏光特性によるビーム分岐を利用した干渉計であり（図7）、ビームスプリッターとして wire grid を使用する。

水平偏光であるシンクロトロン放射光を用いて

wire grid(ワイヤ径 $10\ \mu\text{m}$ 、ワイヤ間隔 $25\ \mu\text{m}$)の透過率・反射率の偏光依存性を評価した。ワイヤ太さを d 、ワイヤ中心間隔を s 、波長を λ とすると、wire grid に水平および垂直方向に入射する電磁波の反射率はそれぞれ(2)、(3)式で計算できる[8]。図8に示すように 0.1THz 帯では理想的な偏光子であることがわかる。

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

$$|R_{\perp}| = \left[1 + \frac{(2\lambda s)^2}{\pi^4 d^4} \right]^{-1/2} \quad (3)$$

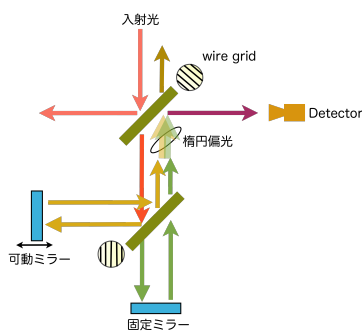


図7：Martin-Puplett 干渉計

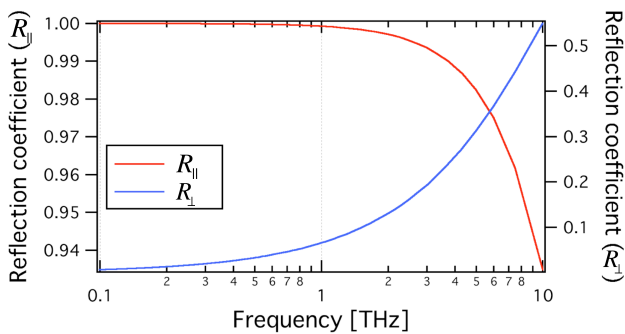


図8：wire grid の平行成分の反射率 R_{\parallel} と、垂直成分の透過率 R_{\perp}

また BM3 からの放射光を用いて wire grid の角度を変えながら反射・透過パワーを計測した結果、wire grid に平行成分の反射率、垂直成分の透過率は共に 90%以上あることが確認できた(図9)。

干渉計構築のためには、十分な光強度が必要であるが、ZBD のビューポートからの距離を変えながらスミス・パーセル光強度を計測した結果、ビューポート通過後に急激に減衰していることがわかった。図5に光学追跡ソフトで計算した光の広がり具合を示しているが、ビーム径の広がりによる減衰の影響であると考えられる。このため干渉計構築の際にはビューポート直後に凹面ミラー($r=1850$)を設置して光の干渉位置にて集光できるよう光学系を変更する予定である。

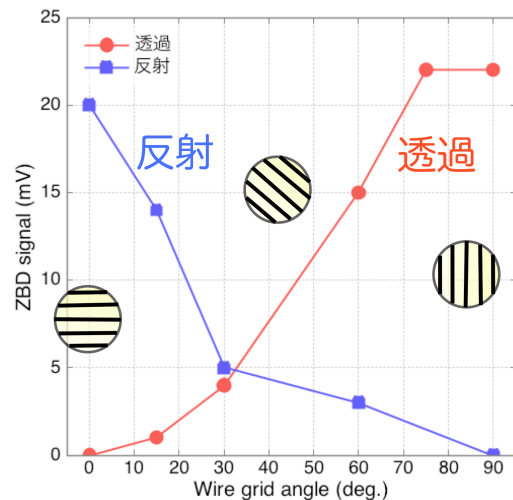


図9：wire grid の透過と反射(実測)。入射光の強度は $20\sim 23\text{mV}$ 。

5. 結論

今回、LEENA を用いたテラヘルツ光源開発では、 $110\text{-}170\text{GHz}$ 帯で、シンクロトロン放射により $27.5\ \mu\text{W}$ 、スミス・パーセル放射により $9.25\ \mu\text{W}$ のテラヘルツ光が観測された。今後の計画として、スミス・パーセル放射の最適グレーティングの設計・製作、アルファ電磁石を用いた電子ビームの短パンチ化によるコヒーレント光の発生、スミス・パーセル光のスペクトル計測およびパンチ長の評価を予定している。また長期的には、LEENA を用いたテラヘルツ光の産業利用を目指して光源開発を進める。

謝辞

LEENA 加速器の改修作業において多大なる御協力を頂きました JASRI の皆川康幸さん、竹村育浩さんに感謝致します。

参考文献

- [1] 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
- [2] 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
- [3] <http://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/NS/facility/leena/>
- [4] Y. Kasai, T.Seta, Journal of the national Institute of Information and Communications Technology vol.55 No.1, 2008
- [5] 川瀬、水津、ICT による安全・安心を実現するためのテラヘルツ波 技術の研究開発
- [6] <http://www.esrf.eu/Accelerators/Groups/InsertionDevices/Software/SRW>
- [7] Brownell, et al., "Spontaneous Smith-Purcell radiation described through induced surface currents", Phys.rev.E.57,1075-1080(1998)
- [8] J.C.G.Lesurf, Millimeter-wave optics, devices and systems, Adam Hilger, Jan. 1990