

cERLにおけるCDRテラヘルツビームラインの計画 PLAN OF TERAHERTZ BEAM LINE UTILIZING COHERENT DIFFRACTION RADIATION AT CERN

本田洋介^{*A)}、高井良太^{A)}、島田美帆^{A)}、宮島司^{A)}、帯名崇^{A)}、
山本尚人^{A)}、加藤龍好^{A)}、アリシェフアレキサンダー^{A)}、布袋貴大^{B)}
Yosuke Honda^{*A)}, Ryota Takai^{A)}, Miho Shimada^{A)}, Tsukasa Miyajima^{A)}, Takashi Obina^{A)},
Naoto Yamamoto^{A)}, Ryukou Kato^{A)}, Alexander Aryshev^{A)}, Takahiro Hotei^{A)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization

^{B)}SOKENDAI

Abstract

Utilizing the high repetition rate short bunch beam, the compact ERL can be a high power terahertz radiation source. Coherent diffraction radiation, which is emitted when a short-bunch electron beam passes through a metal target with a small hole, is considered as a scheme that can be used with a high power beam. Its special characteristics of vector beam is also attractive for applications. We have a plan to construct a terahertz beam line that transports the radiation emitted at the straight section of the electron beam to an experimental room to be located at outside of the accelerator shield. The conceptual design of the transport line is shown.

1. はじめに

KEKのERL試験加速器(cERL [1])は、連続運転の超電導空洞加速器の技術開発及びその利用を推進する、多目的試験加速器である。光陰極DC電子銃による低エミッタンスビームが得られること、エネルギー回収するCW超電導加速空洞による高繰り返しで大平均電流ビームが可能であること、アーク部を活用したバンチ圧縮運転でテラヘルツ帯域のコヒーレント放射が発生できる [2] こと、などの特長がある。

短バンチビームが高繰り返しでCWで実現できることから、偏向電磁石部で発生するコヒーレントシンクロトロン放射(CSR)による、大平均強度広帯域テラヘルツ光源としての利用が考えられる [3]。偏向電磁石部の真空チェンバを改造し、マジックミラーと呼ばれる取り込み角の大きな光学系を導入する提案 [4] がなされていたが、これまでのところ計画が具体化されていない。そこで、試験加速器としての位置付けで、より技術的には難しいが特徴的な手法で、しかも比較的簡単に装置が設置できる案として、コヒーレント回折放射(CDR)による大平均強度広帯域テラヘルツ光源の試験設備を提案した。

cERL周回部の直線部に、穴あき金属標的を挿入する。短バンチ電子ビームを穴に通過させることで、金属面境界からテラヘルツ帯域の回折放射が発生する。発光点の選択の自由度が大きく、CSRの場合と比べて検討がし易いこと、また、真空チェンバの改造は直線部の単管の置き換えだけで済むこと、などが作業上の利点である。一方で、標的の小さな穴にビームを損失無く通過させる、ことが困難な点で、ビームの低エミッタンス化、軌道の安定性、ビームハローの制御、などの課題が重要になる。CDR標的がCW大電流運転と両立できれば、多ステーション化も可能である点は、CSRと比較した利点である。また、CDRはラジアル偏光の特性で発生する。空間的に強度や偏光の分布が非均一な、いわゆるベクトル

ビームの一種である。広帯域テラヘルツベクトルビームとしての特徴的な応用も期待できる。

ここでは、CDRによるテラヘルツ光のスペクトルを示し、今年度にcERLに設置を予定しているテラヘルツ輸送ラインの概念設計を示す。ベクトルビームとしての展開の一つとして、ラジアル偏光から光渦ビームへの変換についても紹介する。

2. 回折放射によるコヒーレントテラヘルツ発生

回折放射(DR)は、穴のサイズが無限小の場合に、遷移放射(TR)と一致する。TRの角分布、つまり単位角周波数 ω あたり、単位立体角 Ω あたりの、放射エネルギーは、次のGinzburg-Frankの式で表される。

$$\frac{d^2 W_{TR}}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{4\pi^3 \epsilon_0 c} \frac{\beta^2 \sin^2 \theta}{(1 - \beta^2 \cos^2 \theta)^2} \quad (1)$$

DRの角分布は、穴のカットオフの効果を考慮し、以下のようなになる [5]。

$$\frac{d^2 W_{DR}}{d\omega d\Omega} = \frac{d^2 W_{TR}}{d\omega d\Omega} \times [J_0\left(\frac{\omega r}{c} \sin \theta\right) \cdot \left(\frac{\omega r}{c\beta\gamma}\right) \cdot K_1\left(\frac{\omega r}{c\beta\gamma}\right)]^2 \quad (2)$$

r は穴の半径である。 ωr の関数になっているため、周波数依存性がある。穴径に依存して高周波数側が減衰する。期待されるように $r \rightarrow 0$ でTRに一致する。

Figure 1に、ビームエネルギーが20 MeVで、穴の半径が1 mmの場合のDRの角分布の計算を示す。基本的には、TRと同じく $1/\gamma$ の発散角をもつドーナツ状の分布になる。

Figure 2に、穴径に依存したDRのスペクトルを示す。TRが一様な周波数特性を持つのにたいして、DRは高周波数のカットオフがあり、穴径が大きくなるほど、カットオフ周波数が下がることが分かる。

RMSバンチ長100 fs、繰り返し1 kHzの条件で、様々なタイプのコヒーレント放射についてフラックスを比較

* yosuke@post.kek.jp

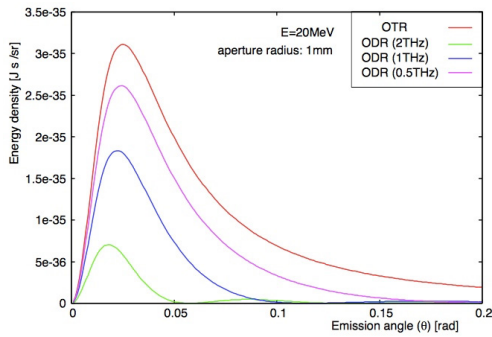


Figure 1: Angular distribution of diffraction radiation.

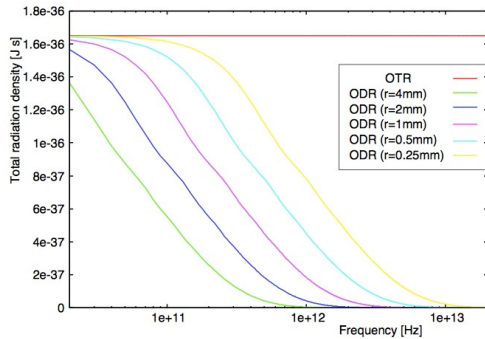


Figure 2: Spectrum of diffraction radiation.

した結果を Fig. 3 に示す。CTR が最も帯域が広く、フラックスが大きい、標的に衝突しビームを損失する過程であるため、繰り返しを上げることは出来ない。CDR は穴によるカットオフのため、CTR と比較して高周波側が低下するが、1 THz 付近では CSR とフラックスは同等である。また、CSR や CDR はビームを損失しない為、最大 1.3 GHz の繰り返しの CW 運転で両立する可能性がある。

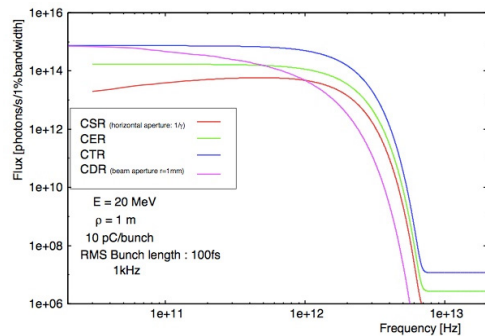


Figure 3: Flux of various coherent radiation.

3. テラヘルツ輸送ラインの概念設計

cERL では、主加速空洞のオフクレスト加速によってバンチにエネルギーチャープをつけ、第 1 アーク部の縦方向分散を利用してバンチ圧縮を行う [6]。第 1,2 アークの間の直線部で短バンチビームが実現される。バンチ長測定を行なっている CTR の診断装置の下流に、CDR 光源となる標的を設置する予定である。Figure 4, 5 に示す

経路で、シールド壁の外に予定される実験室までのテラヘルツ光の輸送路を整備する。

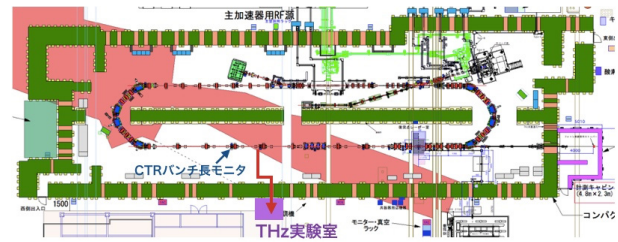


Figure 4: Layout of THz transport line.

テラヘルツ光は空気中の水蒸気により吸収されるので、輸送路は真空あるいは乾燥窒素等にする必要がある。ダクトと箱型チェンバによる真空輸送路を設置する。輸送中の発散を抑えるために、収束光学系を構成する必要がある。Figure 6 に示すように、箱型チェンバは凹面鏡を用いた反射光学系を備え、光路を曲げると共に収束の役割も担う。凹面鏡を有限角度で使用すると収差が発生してしまうので、なるべく小さな入射角と十分な開口を確保できるように考え、曲率半径 5000mm の凹面鏡を 22.5 度の入射角で用いる設計とした。

輸送路全体の光学設計は、幾何光学的には Fig. 7 のような設計とした。発光点から $1/\gamma$ の発散角で放射されるテラヘルツ光を、一旦平行光に変換し、調整したうえで輸送ラインに送り込む。焦点距離 2500mm の収束を 2 箇所利用して、入口と出口の真空窓の間で結像光学系を構成している。開口が制限される真空窓の位置で収束される設計である。

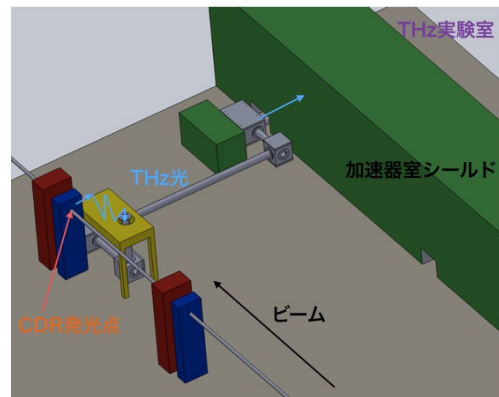


Figure 5: THz transport line.

4. ラジアル偏光から光渦への変換

系の円筒対称性より、CDR はラジアル偏光で放射される特性を持つ。プロファイルの中央は特異点であることから、ドーナツ型の強度分布になる。このような、強度や偏光が空間分布を持つ光は、ベクトルビームと呼ばれ、単純な一様平面波に無い特徴が注目されている。とくに、光渦と呼ばれる、軌道角運動量を持つ光が良く知られている。

ラジアル偏光から光渦へモード変換が可能であることを紹介し、CDR 光源の特徴的展開の可能性を示す。Figure 8 で説明する。ドーナツ型分布のラジアル偏光の

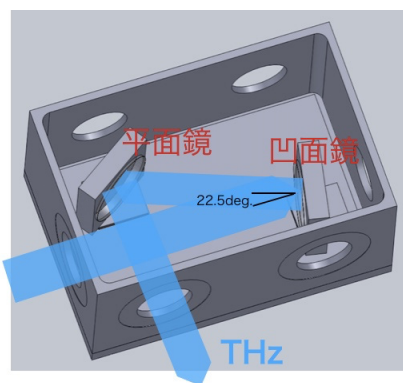


Figure 6: Focusing system in the box chamber.

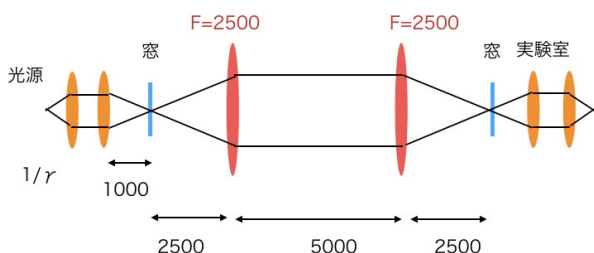


Figure 7: Optics design of the transport line.

光は、直交する直線偏光の成分に分けると、固有軸が直交する2つのエルミートガウス (HG) 分布の重ね合わせである。偏光板を用いて、そのうち1つを取り出したものについて、45度回転した固有軸で基底を取り直すと、位相が同じで直交する2つのHGモード (HG10 および HG01) の重ね合わせとして理解することができる。そのうちの片方について、なんらかの方法で位相を90度ずらすと、光渦として良く知られたラゲールガウス (LG) モードに一致する [7]。

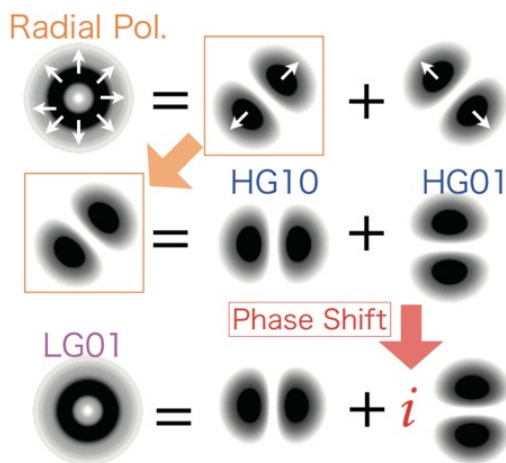


Figure 8: Principle of mode converter from radial polarization to vortex.

片方向のモードについて位相を90度ずらす手法は、例えば Fig. 9 に示すような、取差光学系が良く知られている。シリンドリカルレンズの組を用いて、片方の平面

のみについて、焦点を一度結ぶ光学系を構成すると、焦点付近における位相の進みの効果で、光学系出口でのプロファイルと発散は保存しながら、2平面の位相差だけをずらす設計が可能である。この手法は、波長依存性が無く設計することが可能で、広帯域のテラヘルツ光を変換するのに適している。

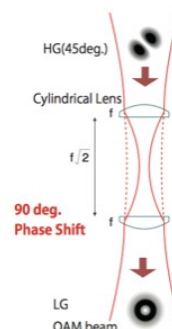


Figure 9: Phase manipulation using an astigmatic optics.

5. まとめ

cERL において、穴あき導体標的にビームを通過させて発生する CDR によるテラヘルツ光源の開発を計画している。本年度に加速器シールドの外までテラヘルツを輸送するラインを設置する予定で、概念設計を行なっている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 16H05991 および 18H03473 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] T. Obina *et al.*, "Recent Development and Operational Status of the Compact ERL at KEK", Proceedings of IPAC'16, TUPOW036.
- [2] M. Shimada *et al.*, "コンパクト ERL におけるバンチ圧縮とバンチ長測定", 第 15 回日本加速器学会プロシーディング (2018), WEP027.
- [3] G.L. Carr *et al.*, "High-power terahertz radiation from relativistic electrons", Nature 420, p153.
- [4] R. Hajima *et al.*, "コンパクト ERL の設計研究", KEK Report 2007-7.
- [5] S. Casalbuoni *et al.*, "Far-Infrared Transition and Diffraction Radiation", TESLA Report 2005-15.
- [6] Y. Honda *et al.*, "Beam tuning and bunch length measurement in the bunch compression operation at the cERL", Nucl. Instr. Meth. A, 875 (2017) p156-164.
- [7] L. Allen *et al.*, "Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes", Phys. Rev. A, 45, (1992) p185.