

cERL における共振器型 CDR による THz 光源の設計

DESIGN OF THz SOURCE UTILIZING AN RESONANT CDR SYSTEM AT CERL

本田洋介^{*A)}、アリシェフアレクサンダー^{A)}、島田美帆^{A)}、高井良太^{A)}、加藤龍好^{A)}、宮島司^{A)}、
帯名崇^{A)}、山本尚人^{A)}

Yosuke Honda^{*A)}, Alexander Aryshev^{A)}, Miho Shimada^{A)}, Ryota Takai^{A)}, Ryukou Kato^{A)}, Tsukasa Miyajima^{A)},
Takashi Obina^{A)}, Naoto Yamamoto^{A)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

A test accelerator of energy recovery linac scheme, cERL, can realize a high repetition rate and a short bunched beam. It is a suitable place to test a light source based on resonant coherent radiation processes. We plan to test an resonant coherent diffraction radiation (CDR) system for a high power wide-band THz source. Considering the beam-cavity coupling, cavity loss due to beam hole on the mirrors, and required instruments for installation in the beam line, we have designed a compact cavity system. This system will be installed and tested in cERL beam operation in FY2017.

1. はじめに

KEK の ERL 試験加速器 (cERL) は、高繰り返しの短バンチビームが得られることを一つの特徴とする。これを生かしてコヒーレント放射による THz 発生の研究に利用できると期待されている。

CDR(コヒーレント回折放射)は、短バンチビームが導体近傍を通過する際に発生する放射である。非破壊的に放射を発生することができるため、ERL の特徴である高平均電流と良く整合する。また、偏向軌道で発生する CSR(コヒーレントシンクロトロン放射)による THz 発生と比較すると、CDR は穴あき導体標的を設置すれば直線部に装置を組み込む事ができることが特徴である。

バンチ繰り返しに一致した周期の共振器を構成し、その内部で CDR を発生させることを考える。前のバンチが発生した放射にコヒーレントに加算して後続のバンチの放射が発生し、効率的に放射パワーが取り出される、誘導放射と呼ばれる現象が起こると考えられる。特に、CDR は波長依存性が小さいため、広帯域の自由電子レーザーとでも言うような、特徴的な光源になると期待出来る [1]。

共振器型の CDR の実証実験としては、ミリ波の領域で、少ないバンチ数で行われた先行研究 [2] がある。それにたいして cERL では、安定した低エミッタンスビームによって精密なビーム調整が可能、バンチ圧縮運転によって THz 領域での実験が可能、十分なバンチ数のバンチ列で飽和までの評価が可能、大強度光源に向けた CW 運転が可能、であることから、より詳細な実証試験ができる。2017 年度の cERL のビーム運転において共振器型 CDR による THz 光源の実証実験を計画し、現在、装置の設計を行っている。

2. 原理

2.1 CDR と共振器高次モードの結合

共振器の電磁波モードがビームの通過によって励起されるには、軌道に沿った電場成分がなければならない。この条件を満たす最低時の共振器横モードは、TM₁₀ および TM₀₁ モードである。TM₁₀ モードの横 (x) 方向電場 E_{10}^x は、次のように表記される。(進行方向は z である。)

$$E_{10}^x = \frac{A}{w(z)} \frac{x}{w(z)} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}\right) \cdot \exp[i(\omega t - kz + \phi(z))] \quad (1)$$

ここで、

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_0^2}} \quad (2)$$

$$z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (3)$$

$$\phi(z) = 2 \tan^{-1}\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (4)$$

また、 ν は光周波数、 c は光速として、 $k = 2\pi/\lambda$ 、 $\omega = 2\pi\nu$ 、 $\omega/k = c$ 、 A は適当な規格化因子である。 w_0 はビームウエスト、 $w(z)$ は z の位置でのビーム径 (2σ サイズ) である。 $\phi(z)$ は Gouy 位相と呼ばれる。 z_0 はレイリー長である。

ヘルムホルツ方程式から得られる次の関係、

$$ikE^z = \frac{\partial E^x}{\partial x} \quad (5)$$

より、TM₁₀ モードには縦 (z) 方向電場 E_{10}^z 、

$$E_{10}^z = -\frac{i}{k} \frac{A}{w^2(z)} \left(1 - \frac{2x^2}{w^2(z)}\right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}\right) \cdot \exp[i(\omega t - kz + \phi(z))] \quad (6)$$

*yosuke@post.kek.jp

があることがわかる。光速のビームが軸上を通過するとき感じる縦電場は、 $x = y = 0, \omega t - kz = \text{const.}$ で、

$$E_{10}^z(x = y = 0) = -\frac{A}{kw^2(z)} \exp[i2\phi(z)] \quad (7)$$

となる。Gouy 位相の効果ですこしづつ位相シフトしながら、ビームと電磁波が進行することになる。

Figure 1 のような、対称な 2 枚の凹面鏡で構成された共振器を仮定する。鏡の中央には穴が空いており、電子ビームが通過する。共振器の形状を決める、鏡間隔 L と鏡の曲率半径 ρ を与えれば、モード形状が決まる。

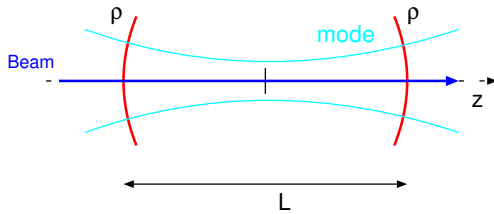


Figure 1: Schematic of the CDR cavity.

ビーム通過によるモードの励起エネルギーは、次の R/Q なる量に比例する。

$$(R/Q) = \frac{|\int E^z dz|^2}{\omega U} \quad (8)$$

つまり、モードの縦電場を積分した量の自乗、が結合の強さの指標となる。

共振器のパラメータに依存して、結合の強さがどのように変わるかを計算したものを、Fig. 2 に示す。横軸は、レイリー長で規格化した半共振器長を表している。具体的には、

$$\alpha = \sqrt{\frac{L}{2(\rho - L/2)}} \quad (9)$$

である。 $\alpha = 1$ 、つまり $\rho = L$ の場合に結合が最大になる。これは、いわゆる confocal cavity の条件である。

2.2 誘導放出によるパワー成長

無信号の共振器に 1 つのバンチが通過したときに、特定の共振器モードに発生する電圧を v_1 、パワーを $P_1 (\propto v_1^2)$ とする。共振器の 1 周期あたりのパワー損失を L とし、そのうち信号の取り出しに相当する部分を T とする。共振器の 1 周期毎に次々にバンチが通過し、それらの発生する電圧が足し合わされて行くとする。 n バンチ通過後の共振器内部の電圧は、

$$v_n = v_1 + v_1 \sqrt{1-L} + v_1 (\sqrt{1-L})^2 + \dots + v_1 (\sqrt{1-L})^{n-1} \quad (10)$$

となる。これを無限に続けて行くと、

$$v_\infty = \frac{v_1}{1 - \sqrt{1-L}} \sim \frac{2v_1}{L} \quad (11)$$

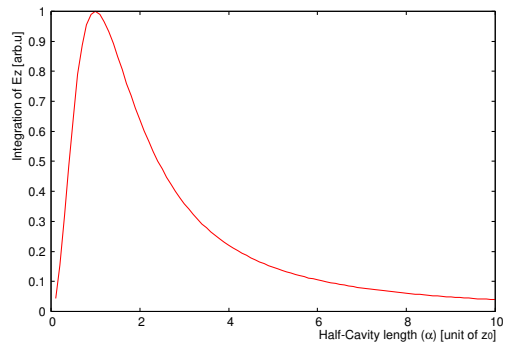


Figure 2: Strength of Beam-Cavity coupling as a function of cavity parameters.

パワーで表すと、

$$P_\infty = \frac{4}{L^2} P_1 \quad (12)$$

取り出されるパワーは、 TP_∞ となる。

誘導放出が無い場合、つまり、振幅の足し合わせではなくて、パワーの足し合わせとして計算すると、 $P_\infty = P_1/L$ となる。これと比較すると、誘導放出によって取り出される信号は $4/L$ 倍になる事が分かる。パワーの具体的な計算例を Fig. 3 に示す。 $L = 0.02$ とした場合で、1300 バンチのバンチ列が共振器を通過したときに取り出されるパワーの時間発展をプロットしたものである。共振器長がバンチ繰り返しと合って共鳴している場合 (Tuned)、および、共振器長をずらした場合 (Detuned) に相当する。最初の数 100 バンチで飽和に達し、バンチ列が終了した後は指数関数的に減衰する。誘導放出の効果で取り出しパワーが 200 倍 (上記 $4/L$ に対応) になることが分かる。

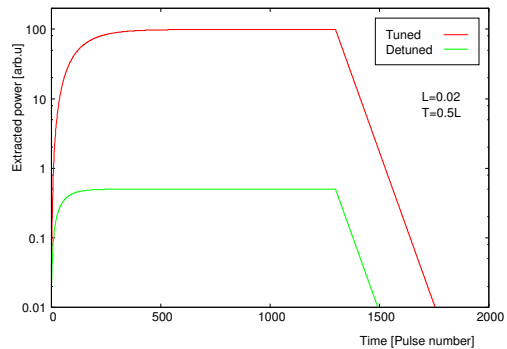


Figure 3: Power development with/without the stimulated radiation process.

Figure 4 は、同じく 1300 バンチのバンチ列が共振器を通過したときに取り出されるパワーの時間発展を共振器の損失 L が異なる場合についてプロットしたものである。はじめに指数関数的な成長をした後、成長曲線が変曲し、 L によって決まる飽和点に到達する。損失が大きいとバンチ列の最初の方で飽和に達してしまい、得られるパワーもあまり稼げない。cERL

の典型的なバースト運転モードは 1300 バンチであるが、この条件で指数関数的な成長から飽和に至る過程を観測するには、損失は $L < 0.01$ を目標として設計するのが良いと思われる。

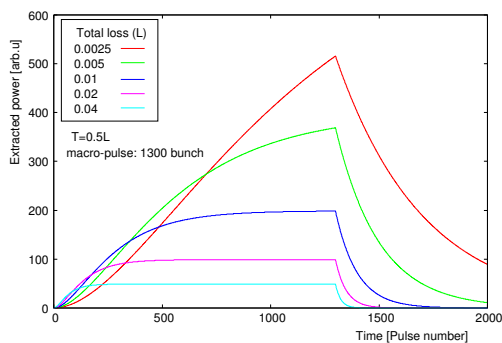


Figure 4: Power development with the stimulated radiation.

3. 装置の設計

3.1 共振器の設計

cERL の基本繰り返しは 1.3 GHz である。その (1/整数) 倍で共振器の周期を設計する必要がある。共振器を出来るだけコンパクトにして単一の真空チェンバに収めるように考え、共振器長を 115 mm (基本繰り返し 1.3 GHz) と決めた。

共振器からの放射の取り出しは、透過率 T の共振器鏡で行う。これは、石英基板に設計の反射率で反射コーティングして製作する方法と、穴あき鏡の穴を通して取り出す方法が考えられる。反射コーティングの方法だと、共振器内部のモード形状をそのまま取り出す事ができるので分かりやすい、一方、大電流運転を考えると、ビームが通過する鏡は、金属であることが望ましい。その場合は穴取り出しの方法になる。取り出しの方法をどうするかは、共振器の設計に合わせて考える必要がある。

加速器の直線部に設置する場合、ビームと垂直方向に放射を取り出すレイアウトが必要である。Figure 5 に示すような、2つの形式を検討している。1つ目は、単純な対称 2 枚ミラー共振器とし、別途 90 度方向に取り出すミラーを設置する案である (A)。この場合、共振器部は設計が単純になるが、穴取り出しにすることが必要であり、また、90 度取り出しミラーまでの輸送での開口にも気をつける必要がある。2つ目は、L 字型に折り曲げた 3 枚ミラー共振器の構成である (B)。よりコンパクトに収まることと、取り出しミラーがビーム軸上に無いので、穴無しでよく、石英に反射コーティングの方法が使用できると考えている。ただし、ミラーの数が増えることと、放物面 (あるいは楕円体面) 鏡を用いることから、共振器が複雑になる。

共振器の具体的な設計は、まずビームとの結合を最大化するように考え、そのうえで穴あき鏡上におけるモードサイズから穴による損失を評価した。Figure 6 は、 w で規格化したモードサイズにたいする穴損失を

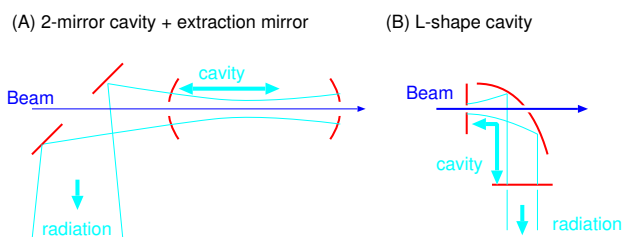


Figure 5: Possible schemes of the cavity and beam extraction.

計算したものである。高次モードは中央部に強度が無いので、基本モードと比較すると損失は小さい。しかし、損失 0.01 以下を目標とすると、穴直径は $0.5w$ 以下に抑える必要がある。想定する放射の周波数を 0.5 THz とすると、鏡中央のビーム通過穴の直径は 1.5mm 以下にしなければならないと見積もった。

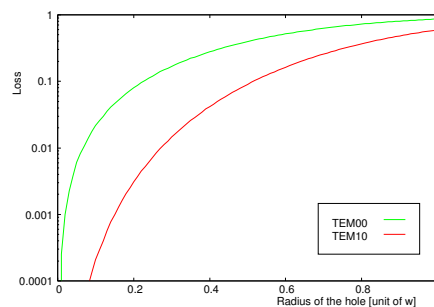


Figure 6: Calculation of the hole loss at the cavity mirrors.

3.2 共振器システムの機械設計

共振器は、真空チェンバに設置前の段階で一体としておき、ビーム実験中に遠隔調整するものは、共振器長のみと考えて機械設計を行った。共振器長は、放射の波長より十分良い精度で調整でき、また、Detuned の測定を行う為に大きく動かせるようにもしたい。ピエゾ駆動のステージを使用する予定である。

共振器の個々の鏡にミスアライメントがあると、モード軸がずれ、穴損失が増大するおそれがある。この影響を線型モデルによる固有モード計算の手法で評価した。モード軸のずれを 1.5 mm の穴径と比べて十分小さく抑えるには、ミスアライメントは平行移動で 0.1 mm、角度で 1 mrad 以内とする必要がある。これは、直径 50 mm の鏡について、外径を 0.1 mm 以内の位置精度で合わせることに対応するが、3次元測定器で機械的に測定しながらプリアラインすれば実現できる精度である。

上述した 2 つの共振器構成案について機械設計を行っている。Figure 7 は 2 枚鏡の場合、Figure 8 は L 字型の場合である。真空チェンバは、どちらもマウントできるように設計される。

また、共振器内にスクリーンモニタを挿入し、穴を通過した電子ビームサイズを確認できるようにすること、共振器内の放射をブロックし共鳴の変化を観測

出来るようにすること、共振器無しで単純な CTR(コヒーレント遷移放射)を発生する標的を挿入し、検出器の校正が出来るようにすること、などの機能が、この真空チェンバには備えられる。

cERL では、短バンチで大電流のビーム運転に備えて、特殊なビームダクトの遮蔽構造が採用されている [3]。共振器の実験を行わない時は、遮蔽ダクトが挿入された状態とし、実験を行うときのみ遮蔽ダクトが外れ、代わりに共振器がビーム軸上に設置される仕組みが必要である。この真空チェンバは、既存のスクリーンモニターで同様の機能を持たせた設計を踏襲した。

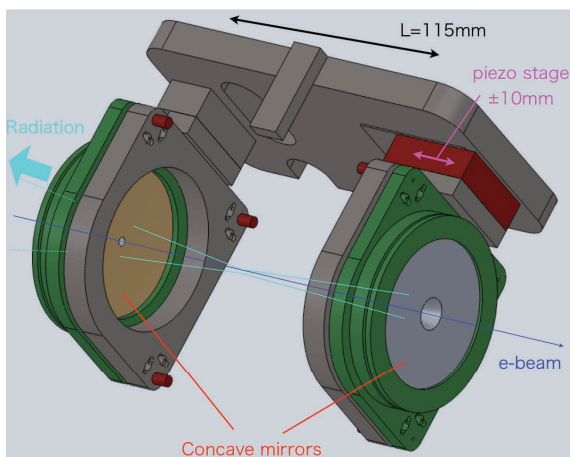


Figure 7: Design of the 2-mirror cavity assembly.

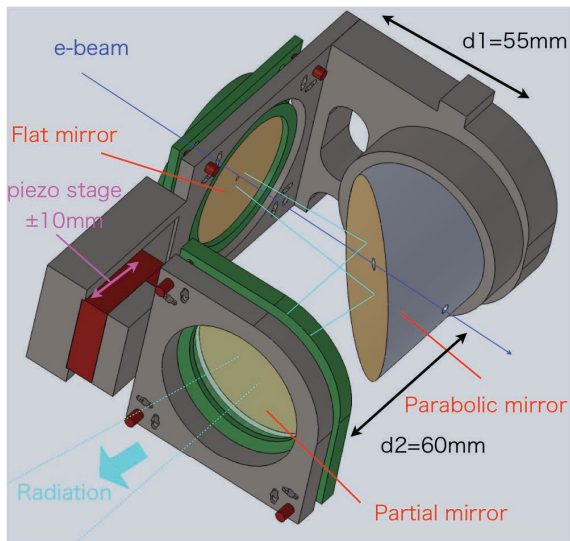


Figure 8: Design of the L-shape cavity assembly.

3.3 cERL でのレイアウト

共振器を専用の真空チェンバにマウントし、cERL の周回部に設置する予定である。Figure 9 に cERL のレイアウトを示す。バンチ圧縮モードでの運転では、

主加速空洞のオフレスト加速と、アーク部での分散の制御によって、周回部の直線部で短バンチビームが得られる。現在、CTR を用いたセットアップを用いて、バンチ圧縮の調整、および、バンチ長の計測が行われている [4]。CDR のセットアップの設置場所は、そのすぐ上流の領域を候補として検討している。

アーク部出口から 3 台の四極電磁石があり、これらを利用して、共振器の位置で水平垂直方向 $130 \mu\text{m}$ に絞ったビームとすることができると計算されており、小さな穴を通過する実験を行うのに適している。また、ビームオプティクス設計上も、cERL の下流の設計とうまく繋がり、ビーム運転上の大きな問題は無いであろう。実験で想定しているビームパラメータを Table 1 にまとめる。これまでの cERL のビームコミッションングで、個別のパラメータについてはそれぞれ達成されている値である。今後のビーム運転で、これらを同時に満たすよう調整を進める予定である。

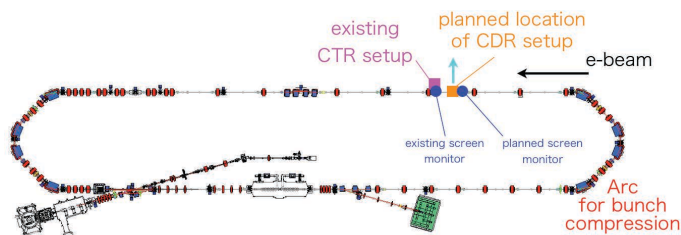


Figure 9: Installation in cERL.

Table 1: Expected Beam Parameters

Bunch repetition	1.3 GHz
Macro-pulse	1 μs
Bunch charge	1 pC
Bunch length (RMS)	150 fs
Norm. beam emittance	0.2 μm
Beam size (RMS) at CDR	130 μm

4. まとめ

cERL の高繰り返し短バンチビームを利用して、共振器型 CDR による THz 発生の実証実験を計画している。cERL のビーム繰り返しに合わせた、基本繰り返し 1.3 GHz のコンパクトな共振器を用いて誘導放出の現象を詳細に測定する。ビームと共振器高次モードの結合条件、ビーム通過の穴径、放射の取り出し方式、ビーム実験のために必要な機能、など、多面からの検討を進めて装置の概念設計を行った。

本研究は、JSPS 科研費 16H05991 の助成を受けたものである。本研究の一部は、光・量子融合連携研究開発プログラムによるものである。

参考文献

- [1] Y. Honda *et al.* "THz Source utilizing an Resonant CDR System at cERL", Proceedings of 12-th Particle Accelerator Society Meeting in Japan, Aug. 2015.

- [2] A. Aryshev *et al.* "Observation of the stimulated coherent diffraction radiation in an open resonator at LUCX facility", Nucl. Instr. Meth. A 763, pp 424-432 (2014).
- [3] R. Takai *et al.* "Development of Beam Position Monitors and Screen Monitors for Compact ERL", Proceedings of 10-th Particle Accelerator Society Meeting in Japan, Aug. 2013.
- [4] Y. Honda *et al.*, "Bunch Length and Radiation Spectrum Measurement at Return Loop of cERL", Proceedings of 13-th Particle Accelerator Society Meeting in Japan, Aug. 2016.