

共振器型 CDR による広帯域 THz 光源

BROADBAND THz SOURCE BY MEANS OF RESONANT CDR SYSTEM

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 longitudinal mode dependence of the beam-cavity coupling, parameters of the cavity were optimized to realize a wide-band excitation. We have designed the cavity setup and the installation layout. 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 [1]) は、低エミッタンスの短バンチビームが高繰り返しで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。Figure 1 に示すように、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 [2]。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、誘導放出と呼ばれる現象が起こる。アンジュレータを必要としない小型の自由電子レーザーと言える。また、波長依存性が無いため、広帯域のモードを位相を合わせて発振できると、モードロックレーザーのような特徴的な光源になると期待出来る。

共振器型の CTR または CSR を利用した先行研究には [3][4] が、ミリ波の領域での CDR の実証実験としては [5] がある。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 共振器高次横モードの結合

共振器の電磁波モードは、ビーム軌道に沿った電場成分を介して励起される。Figure 1 のレイアウトにおいて、ビームによって励起される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

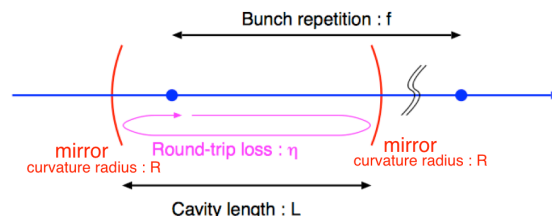


Figure 1: Scheme of the experiment.

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。)

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

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

$$\phi(z) = 2 \tan^{-1}\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3)$$

ここで、 λ は放射の波長、 $k = 2\pi/\lambda$ 、 $\omega/k = c$ 、 A は適当な規格化因子である。 w_0 はウエストサイズである。 $\phi(z)$ は Gouy 位相と呼ばれ、放射の収束において付加される位相因子である。 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、

$$ikE^z = \frac{\partial E^x}{\partial x} \quad (4)$$

より、横電場が決まれば縦電場が決まる。中心軸上 ($x = y = 0$) を光速 c で通過するビームが感じる縦 (z) 方向電場 E_{10}^z は、

$$E_{10}^z(x, y = 0) = -\frac{A}{kw^2(z)} \exp[i\phi(z)] \quad (5)$$

となるのがわかる。Gouy 位相の効果ですこしづつ位相シフトしながら、ビームと放射が進行することにな

*yosuke@post.kek.jp

る。これをビーム軌道に沿って積分し、放射の励起エネルギーが計算できる。TM₁₀ と TM₀₁ が同時に励起され、CDR/CTR の特徴として知られる、ドーナツ型のラジアル偏光が得られる。

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振幅を 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 η 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、それらの発生する振幅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、

$$v_n = v_1 + v_1 \sqrt{1-\eta} + v_1 (\sqrt{1-\eta})^2 + \dots + v_1 (\sqrt{1-\eta})^{n-1} \quad (6)$$

となる。これを無限に続けて行くと、

$$v_\infty = \frac{v_1}{1 - \sqrt{1-\eta}} \sim \frac{2v_1}{\eta} \quad (7)$$

パワーは振幅の自乗なので、

$$P_\infty = \frac{4}{\eta^2} P_1 \quad (8)$$

となる。取り出されるパワーは、 TP_∞ となる。損失の大部分が取り出し $\eta \sim T$ となる条件で、 η が小さいほど、大きなパワーを取り出す事ができる。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だと、 $P_\infty = P_1/\eta$ 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 $4/\eta$ 倍になる事が分かる。

2.3 広帯域の縦モードの励起

共振器の共鳴条件(縦モード)は、周波数領域で等間隔に並ぶ、周波数コムと呼ばれる構造を持つ。TM₁₀/TM₀₁ の横モードにたいして n 番目の縦モードの周波数 $\nu^{(n)}$ は、

$$\nu^{(n)} = \frac{c}{2L} \left(n - \frac{4}{\pi} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{L}{2R-L}} \right) \right) \quad (9)$$

となる。 L は共振器長(2枚の鏡の間隔)、 R は共振器鏡の曲率半径である。モード間隔は $c/2L$ である。最低次のモードの周波数 $\nu^{(1)}$ は CEO (Carrier Envelope Offset) と呼ばれる。ここからわかるように、CEO は R/L に依存し、とくに $R=L$ の条件で CEO=0 になる。

n 番目の縦モードに注目し、バンチ列によって励起されるパワーは、

$$p^{(n)} = \frac{1}{2 - \eta - 2\sqrt{1-\eta} \cos \theta^{(n)}} \quad (10)$$

となる。ここで、 η は共振器1周あたりの損失である。 $\theta^{(n)}$ は共振器1周あたりのバンチ繰り返しと共振器周波数の位相のずれで、

$$\theta^{(n)} = 2\pi \frac{\nu^{(n)}}{f} \quad (11)$$

の関係になる。 f はバンチの繰り返し周波数である。 $\theta^{(n)}$ が 2π の整数倍に一致したときに、多バンチの放射が位相を合わせて足し合わされ、上記の誘導放出が実現する。

式9から分かるように、一般には共鳴条件が n に依存する。つまり、バンチ繰り返し f を決めると、それぞれの縦モードは異なる共振器長 L で共鳴することになる。 L と n の平面で励起の強さをプロットしたものを Fig.2 に示す。一般には (B) のように共鳴線が歪むが、特別に CEO=0 の場合は (A) のようになる。 f がモード間隔に一致する完全同期条件で、全ての縦モードを同時に励起することができる。

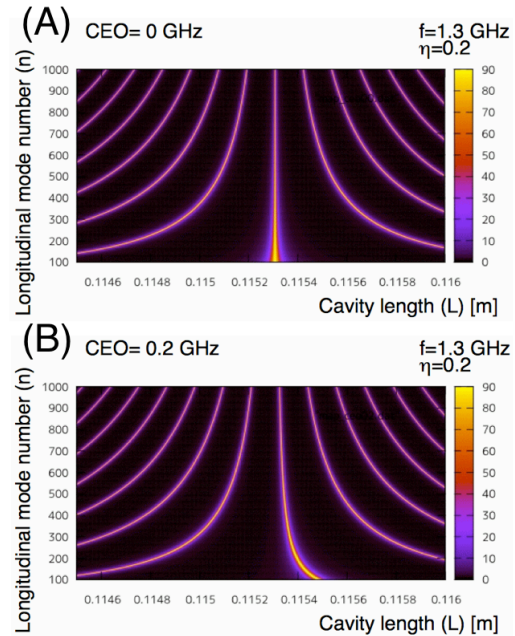


Figure 2: Resonance map.

広帯域の検出器で放射パワーを測定 ($\sum_n p^{(n)}$) しなから共振器長をスキャンすると、Fig. 3 のプロットになる。CEO=0 の場合に完全同期条件で鋭く高いピークが期待できる。

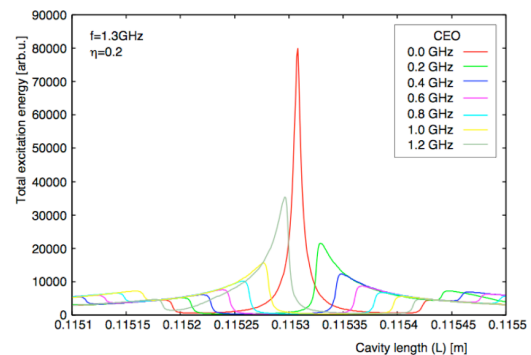


Figure 3: Power in cavity length scan.

3. 装置の設計

3.1 共振器の設計

本実験で想定するビームと共振器の設計パラメータを Table 1 に示す。cERL のバンチ繰り返しである 1.3 GHz に対応し、 $L = R = 115$ mm の共振器を設計した。Figure 4 に製作した共振器の写真を示す。共振器鏡には、穴あき金コート銅ミラーを用いる。穴直径は 3mm とし、0.5 THz にたいして損失 5% と評価している。ミラーホルダー部はあおり調整機構を設け、組み込み前に共振器の軸を調整する。片方のミラーはピエゾステージで動かし、共振器長を制御できる。

Table 1: Beam and Cavity Parameters

Parameter	value
Bunch repetition	f 1.3 GHz
Beam energy	E 20 MeV
Bunch charge	q 1 pC
Normalized emittance	ϵ_n 1 μm
Bunch length	σ_t 150 fs
Cavity length	L 115 mm
Mirror curvature radius	R 115 mm
Mirror hole diameter	d 3 mm
Mirror diameter	D 50 mm
Cavity loss	η 0.05
Extraction efficiency	T 0.025
Target frequency	ν 0.5 THz

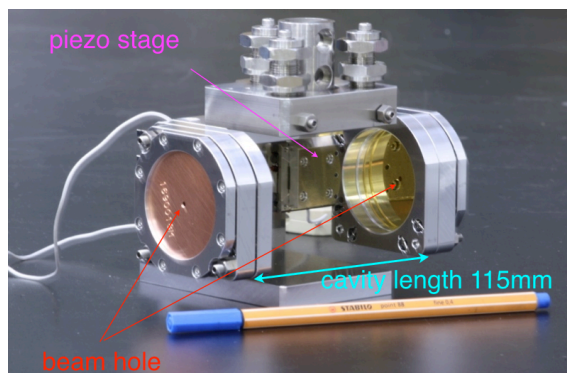


Figure 4: Cavity assembly.

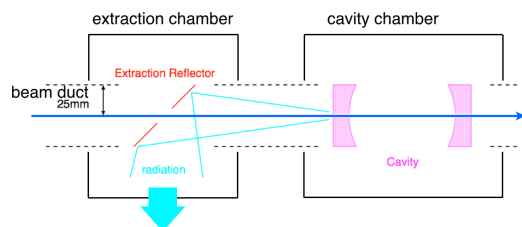


Figure 5: Chamber layout.

共振器からの放射の取り出しは、片方の共振器鏡の穴からの透過で行う。Figure 5 のように、共振器の外側

に取り出し用の鏡を設置し、ビームと直交する方向に放射を反射する。

3.2 cERL でのレイアウト

Figure 6 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、主加速空洞のオフクレスト加速と、アーク部での分散の制御によって行われ、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 [6]。本実験のセットアップは、そのすぐ上流の領域に設置される。

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 μm 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。

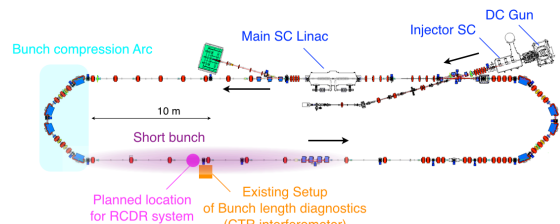


Figure 6: Installation in the cERL.

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 による誘導放出 THz 発生の実証実験を計画している。CEO を最適化する共振器の設計により、広帯域の発振が可能であることが特徴である。共振器システムの製作が完了し、2017 年の運転停止期間を利用して cERL の周回部に設置し、2018 年の運転でビーム試験を行う予定である。

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] T. Obina *et al.*, "Recent development and operational status of the compact ERL at KEK" Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, TUPOW036.
- [2] Y. Honda *et al.*, "Design of THz Source utilizing an Resonant CDR System at cERL", Proceedings of 13-th Particle Accelerator Society Meeting in Japan, Aug. 2016.
- [3] H. Lihn *et al.*, "Observation of Stimulated Transition Radiation" Phys. Rev. Lett. 76 (1996) 4163.
- [4] Y. Shibata *et al.*, "Broadband Free Electron Laser by the Use of Prebunched Electron Beam" Phys. Rev. Lett. 78 (1997) 2740.
- [5] 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).
- [6] 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.