

交叉型アンジュレータを用いた THz 域偏光可変超放射発生の研究

STUDY OF GENERATION OF VARIABLY POLARIZED SUPERRADIANCE IN THz REGION EMPLOYING A CROSSED-UNDULATOR CONFIGURATION

齊藤寛峻^{#, A)}, 武藤俊哉^{B)}, 柏木茂^{B)}, 日出富士雄^{B)}, 濱広幸^{B)}

Hirotooshi Saito^{#, A)}, Toshiya Muto^{B)}, Shigeru Kashiwagi^{B)}, Fujio Hinode^{B)}, Hiroyuki Hama^{B)}

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

^{B)} Research Centre for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University

Abstract

Polarization manipulation is still partially limited in the THz region because of the lack of optical components such as quarter-wave plates. In this paper, a variably polarized THz source based on a novel crossed-undulator configuration for superradiant emission scheme is presented. We show that a phase shifter consisting of a radiation transport line with variable path length and an electron beam line with fixed path length and variable R_{56} is suitable for this scheme. We also examined its polarization property and found that, although the polarization is in general significantly dependent on observation angle, a high degree of polarization can be obtained under an angular limitation. A radiation simulation and theoretical analyses indicate that it is possible to achieve an average output power of the order of 100 mW in this scheme even under an angular limitation to obtain a degree of circular polarization of 0.9.

1. はじめに

THz 放射はその透過性、非侵襲性や特徴的な指紋スペクトルなどの特性のために様々な分野から注目を集めている。従来型の光源では十分な放射強度が達成困難であったことからこの周波数領域は THz ギャップと呼ばれてきたが、近年は光源開発が進み、実用的な強度を持つ光源が数多く登場してきている。平均で数百 mW 以上と他の主要な THz 光源を凌ぐ出力を達成している加速器ベースの放射光源もその一つである。光源技術の進歩に伴い THz 放射の応用範囲も拡大しているが、その中には偏光を利用したものも存在する。例えば左右の円偏光の吸光度の差を測定する円二色性分光はキラルな生体分子の構造解析に有効とされており、リゾチームの円二色性測定の例がある[1]。しかし THz 領域では波長板の製作が困難であることからこのような偏光の利用は他の周波数帯に比べまだ制限されている。

光源側で偏光を操作できる加速器ベースの手法としては、磁石駆動式のアンジュレータが挙げられる。中国の放射光施設 SINAP にはそのうちの一つである APPLE-II 型のアンジュレータを用いた偏光可変 THz 光源が建設されている[2]。この光源は放射波長より十分短い電子バンチをアンジュレータに通過させることにより得られる超放射(コヒーレントアンジュレータ放射)スキームに基づくものであるため、可変偏光であることに加え、平均 1.2 W と高い放射強度を持つ。他の偏光操作法としては、複数のアンジュレータからの直交する偏光を重ね合わせることで偏光を操作する交叉型アンジュレータが挙げられる。まだ THz 領域での検討、実験は報告されていないが、可視光から紫外線にわたる短波長領域での実験例がある。交叉型アンジュレータでは各偏光成分の位相差調整により偏光が変えられるため、前述の磁石列駆動式のアンジュレータ(約 0.1 Hz 以下)に比べ、原理

的には数桁高速な偏光切替が実現可能である。より高い偏光切替速度を持つ光源が利用できれば、短波長域で実験例もある円二色性分光でのロックインアンプを用いたノイズ低減など、より幅広い応用実験の実現が期待できる。

そこで我々は交叉型アンジュレータによる偏光操作を超放射に適用した偏光可変 THz 光源を新たに検討することにした。従来の交叉型アンジュレータ[3]と比べると、本スキームには放射周波数の違いに加え、波長より十分短い 100 fs 程度の非常に短いバンチ長維持の必要性という超放射に固有の要件も存在する。そこで本スキームに適した光源システムを明らかにすることを研究目的の一つとして、位相調整法や移相器の構成について検討、設計を行った。また本光源の放射特性、特に実現可能な偏光度、強度を明らかにすることを目的として、理論的な考察や放射シミュレーションによる調査を行ってきた。本稿ではこれらの本光源スキームの特徴について総括する。

2. 光源システム

2.1 位相調整法

本研究では水平、垂直偏向の 2 台の平面アンジュレータからの直交する直線偏光を重ね合わせる交叉型アンジュレータを仮定する。このタイプの交叉型アンジュレータでは 2 つの放射の位相差を調整することで $\pm 45^\circ$ 直線偏光から右回り、左回りの楕円偏光、円偏光と連続的に偏光を操作することができる。

位相調整においては、アンジュレータのスリッページ効果により電子と放射に時間的なずれが生じること、すなわちそのままでは 2 つの放射が時間的に重ならず、偏光操作が行われないことに注意が必要である。一般には位相調整は電子ビームの軌道長をわずかに変化させることで行われ、この 2 つの放射の時間的な重畳はモノクロメーターを用いた光パルスの伸長により実現される[3]。

[#]hirotooshi.saito@kek.jp

しかし移相器で電子ビームと放射を一旦分離し、1 台目のアンジュレータ放射の光路長を調整する手法を用いれば、モノクロメーターなしに位相調整と 2 つの放射の時間的な重畳を実現できるだろう。超放射を用いる場合には、後述するように 2 つの放射の強度を揃えるために移相器の電子ビームラインでバンチ長調整を行う必要がある。そのような電子ビームラインでは偏向磁石が不可欠であることから、位相調整法に関わらず電子ビームと放射は移相器で一旦分離されることになる。また電子ビームの軌道長が固定でよければその分ビームラインは簡易化される。したがって本光源スキームにおいては、移相器における電子ビームの経路長は固定とし、放射の光路長を可変とする位相調整法の方が適していると考えられる。

2.2 アンジュレータでのバンチ伸長

超放射では放射源である電子が放射波長に比べ十分小さい領域に分布する場合に各粒子からの放射の位相が揃って積算されることで、粒子数の 2 乗に比例する高い放射強度が得られる。バンチ長が放射波長に対して無視できない領域では、放射強度は両者の比に指数関数的に依存することになる。したがって交叉型アンジュレータによる理想的な偏光操作を実現するには、2 台のアンジュレータでのバンチ長のずれを十分小さく抑える必要がある。

電子ビームが有限のエネルギー偏差を持つ場合、速度と磁場中の軌道長に差が生じるために電子ビームラインを通過する間にバンチ伸長が生じる。アンジュレータでのスリッページ、すなわち電子と放射の縦方向のずれは次式で表される。

$$N\lambda(\gamma) = N \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (1)$$

ここで、 N は周期数、 λ は共鳴波長、 λ_u は周期長、 K は偏向定数、 γ は電子のエネルギー (ローレンツ因子) である。よって相対エネルギー偏差 $\delta \equiv \Delta\gamma/\gamma_0$ によるアンジュレータ中での電子同士の縦方向のずれ Δz は次式のように表される。

$$\Delta z = -N[\lambda(\gamma_0 + \Delta\gamma) - \lambda(\gamma_0)] \approx 2N\delta\lambda(\gamma_0) \quad (2)$$

このことから、波長に対して $2N\delta$ 倍の無視できないバンチ伸長が生じることがわかる。

2.3 移相器

前項での議論から、2 つの超放射の強度を揃えるための移相器の電子ビームラインの要件として、1 台目のアンジュレータでのバンチ伸長を補正することが挙げられる。より具体的には、1 台目のアンジュレータの $R_{56} = 2N\lambda$ を補正すること、また高次の効果も含めこのビームライン自体で生じるバンチ伸長を十分小さく抑えることが必要となる。また幾何学的な要請として、位相調整のための光輸送ラインを挿入するスペースを確保するのに十分な角度でビームを偏向することが必要となる。

このような要件を満たす移相器について具体的に検討するため、本研究では東北大学電子光物理学研究セン

ターの試験加速器 t-ACTS (電子エネルギー 22 MeV、rms エネルギー広がり 1 %、rms バンチ長 80 fs) での実験を想定した光源システムの設計を行った。放射の基本周波数 1.93 THz、周期数 7 のアンジュレータの $R_{56} = 2.27$ mm (全長 700 mm を仮定) を補正可能な移相器として、偏向角 7° の 3 台の機能複合型電磁石と 10 台の四極電磁石からなるトリプルベンド型ビームラインを設計した。各偏向磁石間に R_{56} 調整用の四極磁石を設けることで、 R_{56} は可変となっているため、実験時のバンチ長補正量の調整や、放射周波数を変化させた場合のバンチ長補正にも対応可能となっている。また Twiss パラメータと分散関数の調整により縦方向だけでなく横方向においても各アンジュレータで対称なビーム輸送が実現できるようにしている。より詳細な内容は第 16 回年会の報告を参照されたい [4]。このような一方向に曲げるマルチベンド型のビームラインは軌道長差に起因する R_{56} が負となるため、一般に正となるアンジュレータの R_{56} 補正には有利である。したがってこの t-ACTS での例に限らず、マルチベンド型のビームラインは一般に本光源スキームを実現する有力な解の一つになると考えられる。

3. 放射特性

3.1 偏光特性

一般に交叉型アンジュレータの偏光度を下げる要因としては、ビームエミッタンスに起因する電子ビームの角度広がりが増えらる [3]。しかしこの議論で仮定しているのは 1-10 nm オーダーの波長域である。これに比べ THz 領域の波長 (30-3000 μm) は遥かに大きいことから、一般にビームエミッタンスは光の回折限界エミッタンスよりもかなり小さくなり、放射の横方向コヒーレンスは高くなる。したがってこのビームの角度広がりの影響は無視できると考えられる。理論的な解析および前述の設計光源の放射シミュレーションから、本スキームで偏光度を決める要因は 2 つの放射の光源点が異なることに起因する波面のずれであることがわかった (詳細は第 18 回年会の報告 [5] を参照)。

距離 L だけ離れた 2 つの光源点からの光の重ね合わせを考えると、この 2 点を含む直線上 (軸上) に比べ、有限の観測角度 θ では以下のような光路長のずれが幾何学的に生じる。

$$L_s(\theta) = L(1 - \cos \theta) \quad (3)$$

アンジュレータ放射の共鳴波長の角度依存性も考慮すると、位相差の観測角度依存性は次式のように表される [5]。

$$\Delta\psi(\theta) = -2\pi \frac{L\gamma^2\theta^2}{\lambda_u \left(1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2\theta^2 \right)} \quad (4)$$

アンジュレータ放射の角度広がり

$$\sigma_\theta = \sqrt{\frac{\lambda}{2N\lambda_u}} \quad (5)$$

は放射波長や周期数に依存して変化するため、これで規格化した角度 $\theta_n \equiv \theta/\sigma_\theta$ を用いて実効的な位相差の角度依存性を評価することを考える。Equation (4)を θ_n で書き直すと、以下の表式が得られる。

$$\Delta\psi(\theta_n) = -2\pi \frac{\left(1 + \frac{L_p}{L_u}\right)\theta_n^2}{4 + \frac{\theta_n^2}{N}} \quad (6)$$

ここで、 L_p は移相器長、 L_u はアンジュレータ長である。

規格化した角度 θ_n で見ると Eq. (3) の光路長のずれが放射波長に比例する形となることから、実効的な位相差のずれは結局 Eq. (6) が示すように放射波長(磁場強度、電子ビームエネルギー)にはよらない形となる。また光源間距離を短縮する、あるいは周期数を増やす(放射の角度広がりを狭める)ことで実効的な角度依存性は緩和できることがわかるが、前者は有限のアンジュレータ長、後者は光源間距離の増大や角度広がりの変化の鈍化によって大きな改善は見込めないことがわかる。実際、 $\theta_n = 1$ 、すなわち 1σ の角度広がりに相当する観測角度における位相差のずれの大きさは必ず $2\pi/5$ より大きくなることが Eq. (6) から確認できる。したがって光源パラメータによらず有意な位相差のずれを避けることはできないと言える。

しかし観測角度を十分狭い範囲に制限すればほぼ単一の偏光を得ることは可能である。したがってこの波面のずれに起因する位相差の角度依存性は偏光操作の有効性や高い偏光度の実現可能性を損なうものではないと言える。

3.2 角度制限下の有効強度

角度制限を設けた場合には当然利用可能な放射強度も制限されることになる。以下では円偏光度 0.9 を得るための角度制限を設けた場合に利用可能な強度を有効強度と定義し、達成可能な有効強度の大きさおよびその実用性について考える。ここでは前述の 1 台目の放射の収束は考えず、単に角度制限のみによって得られる有効強度について扱う。

前述の t-ACTS での実験を想定し設計した光源の場合、放射シミュレーションから電荷量 20 pC のバンチあたりの有効放射エネルギーは 4.4 nJ/bunch であった[5]。t-ACTS は 2856 MHz でこのバンチが繰り返される長さ 2 μ s のマクロパルスがさらに 10 Hz で繰り返されるようなビームの時間構造を持つ。よって平均有効放射パワーは 0.25 mW である。これは第 1 章で挙げた中国の THz 超放射光源 SINAP の放射強度 1.2 W と比べるとかなり小さい値である。また文献[1]の円二色性分光で用いられた光源の平均パワーの数 mW よりも小さい。しかしこの設計光源はあくまで原理実証を想定したものであり、強度に特化した設計にはなっていない。以下では各種パラメータを改善した場合に達成可能な有効強度について考える。

放射強度に関わるパラメータの一つはビーム電流である。放射強度は一般にマクロパルス長とその繰り返し周波数に比例する。また超放射の場合には放射強度はバンチの電荷量の 2 乗に比例する。したがってビーム電流

によって放射強度は大きく変化し得る。厳密にビーム電流の上限を決めるには、空間電荷効果のバンチ長への影響の調査や加速器システムの検討が必要になるが、ここでは簡単のため、t-ACTS のバンチ長を保ったまま SINAP と同じビーム電流(電荷量 68 pC、マクロパルス長 3.6 μ s、マクロパルス繰り返し 50 Hz)が実現できたと仮定すると、放射強度は 104 倍増加することになる。

放射強度に関わるもう一つのパラメータはアンジュレータ周期数である。周期数を増やすことで単純に放射の全強度が増えることに加え、Eq. (6) の位相差の角度依存性が緩和されるために利用可能な放射強度の割合も増加する。Equation (6) の位相差の角度依存性と Eq. (5) で表される角度広がりを持つガウシアン型の放射強度分布を仮定すると、全強度に対する有効強度の割合 W_r の周期数依存性は Fig. 1 の破線(値は左側の縦軸)のように見積られる。現実的な周期数では W_r は十数%程度が上限になることがわかる。最終的な有効強度を考える上では、周期数が増えるにつれバンチ伸長により超放射の強度増加が抑制されることにも注意が必要である。周期数に比例したバンチ伸長とガウシアン型の電荷分布による縦方向バンチ形状因子を仮定すると、 W_r の増加と全強度の増加を合わせた有効強度の周期数依存性は Fig. 1 の実線(値は右側の縦軸)のように見積られる。この結果が示すように得られる強度はビームのエネルギー広がりにも依存するが、1 に規格化している設計光源(周期数 7、rms エネルギー広がり 1%)に比べ 10 倍程度の有効強度は達成できるであろう。

以上の見積もりを踏まえて強度に特化した光源パラメータの例として、電子ビームの rms エネルギー広がりを t-ACTS のシミュレーション値である 0.23%、周期数 30、および SINAP のビーム電流(電荷量 68 pC、マクロパルス長 3.6 μ s、マクロパルス繰り返し 50 Hz)を仮定して設計光源の有効強度をスケールすると、平均有効パワーは 370 mW と見積られる。これは前述の条件下で t-

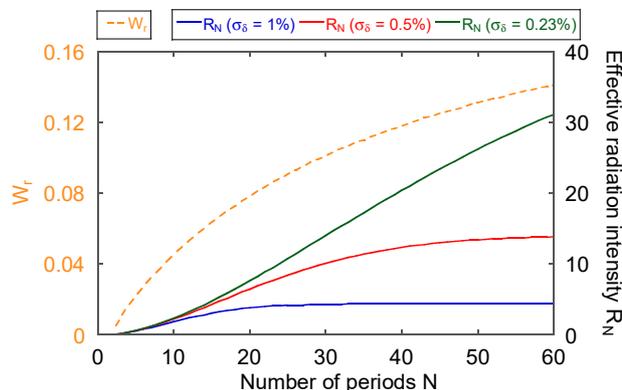


Figure 1: Number of periods dependence of the effective radiation intensity. The left vertical axis and the dashed line show the ratio of the effective intensity to the total intensity, W_r . The right vertical axis and the solid lines show the effective intensity, R_N for rms relative energy spreads of electrons of $\sigma_\delta = 1\%$, 0.5% and 0.23% . The value of the intensity is normalized by that of the designed source ($N = 7$ and $\sigma_\delta = 1\%$).

ACTS と同様に 80 fs のバンチ長が実現できたと仮定した場合の見積もりではあるものの、100 mW オーダーの有効強度は非現実的なものではないと考えてよいだろう。これは前述の円二色性分光実験の強度や加速器以外の多くの THz 光源の強度に比べ十分大きい値であることから、有効強度としても実用上十分に高い強度が実現可能であることになる。

4. まとめ

新たな偏光可変 THz 光源として、交叉型アンジュレータに基づく超放射光源スキームを提案し、これに適した光源システムおよび放射特性について調べた。位相調整法としては 1 台目の放射の光路長を調整する方法が適していると考えられる。移相器としては 1 台目のアンジュレータでのバンチ伸長を補正可能な電子ビームラインが必要であり、トリプルベンドはそのような要件を満たすビームライン形状の一例である。本光源の偏光は一般に 2 つの放射の光源点が異なることに起因する波面のずれによる強い観測角度依存性を持つが、角度制限を設けることで高い偏光度を得ることは可能である。円偏光度 0.9 が得られるような角度制限を設けた場合でも全強度に対し数%から 10 %程度の有効強度が得られることから、強度に特化した設計では平均パワー 100 mW オーダーの出力も見込まれる。したがって本光源スキームは高い強度、偏光度や高速偏光切替といったメリットを持つ偏光可変 THz 光源を実現しうる手法であると言える。

参考文献

- [1] J. Xu *et al.*, Proc. of SPIE 5268, pp. 19-26 (2004).
- [2] J. Zhang *et al.*, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip. 693, pp. 23-25 (2012).
- [3] K.-J. Kim, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. 219, pp. 425-429 (1984).
- [4] N. Morita *et al.*, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, pp. 157-160 (2019).
- [5] H. Saito *et al.*, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, pp. 190-194 (2021).