

エネルギー変調によって圧縮した電子バンチによるコヒーレントアンジュレータ放射 COHERENT UNDULATOR RADIATION FROM AN ENERGY CHIRPED ELECTRON BUNCH

坂上和之^{#, A)}, 大垣英明^{B)}, 大塚誠也^{C)}, 小柴裕也^{C)}, 全炳俊^{B)}, 蓼沼優一^{C)}, 鷺尾方一^{C)}
Kazuyuki Sakaue^{#, A)}, Hideaki Ohgaki^{B)}, Seiya Otsuka^{C)}, Yuya Koshiba^{C)}, Heishun Zen^{B)}, Yuichi Tadenuma^{C)},
Masakazu Washio^{C)}

^{A)} Photon Science Center, The University of Tokyo

^{B)} Institute for Advanced Energy, Kyoto University

^{B)} Waseda Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

Abstract

We have succeeded in producing a sub-picosecond electron bunch with 10^9 electrons by using an rf electron gun with an energy chirping cell. Since an electron bunch with such a high peak current can be obtained with an electron gun, it is expected to be used as a light source using coherent radiation. We installed an undulator around the point which the electron bunch is most compressed and started to investigate on coherent undulator radiation. As a result, we succeeded in observing coherent undulator radiation (up to 0.4 THz), and confirmed that it has high peak intensity and extraction efficiency. We have also found that it can be improved by increasing the electron beam energy and the number of electrons in the bunch. In this conference, we will report the experimental results and future prospects of coherent undulator radiation by the energy chirping cell attached rf electron gun.

1. はじめに

短パルス電子ビームからのコヒーレント放射はそれぞれの電子からの放射の位相を合致させ、電子数の 2 乗に比例した強度を得ることができることから、高強度な光パルスを生成することが可能である。アンジュレータを用いた自由電子レーザーにおいては、アンジュレータ内において、光と電子バンチを相互作用させ、電子バンチをマイクロバンチング化させ、発振へと至る。ここで、比較的長波長の光の生成を選択し、その光の波長よりも十分に電子バンチ長を圧縮しておくことによって、シングルパスで動作するコヒーレントアンジュレータ放射を得ることが可能である。しかしながら、電子バンチ長を圧縮するためには、一般に電子バンチにエネルギー変調を与えるユニットとそのエネルギー差を用いて磁場等によって圧縮するユニットが必要となり、装置として大がかりな構成となる。我々は、電子ビーム源として電子銃単体を用い、そこから生成される圧縮電子バンチを用いたコヒーレントアンジュレータ放射によって小型高輝度光源の構築を目指し研究を開始した。ターゲットとする波長としては、比較的波長が長く、利用の開拓が見込めるテラヘルツ帯 (0.1~10 THz) を選定した。アンジュレータ放射の持つ、準単色かつ波長選択が可能で、高ピーク強度のテラヘルツパルスを用いることによって、物質の選択的な改変を実施することを当面の目標としている。

先行して実施した研究[1]においては、従来用いられている 1.6Cell 型の光陰極高周波電子銃を用い、電子バンチの圧縮されるような加速高周波位相を選ぶことによってコヒーレントアンジュレータ放射を確認・評価した。本研究においては、電子銃として我々が開発してきた、速度変調セルを付属した高周波電子銃 (ECC-RF-

Gun)[2]を用いて、より積極的に短バンチを生成できるセットアップとし、より高周波かつ高強度のテラヘルツパルス生成を試みた。本講演では、昨年度から開始したエネルギー変調セル付属高周波電子銃によるコヒーレントアンジュレータ放射の試験結果及び今後の展望に関して報告する。

2. 実験セットアップ

コヒーレントアンジュレータ放射発生試験は京都大学エネルギー理工学研究所の KU-FEL (京都大学自由電子レーザー) 施設内に設置されているテラヘルツアンジュレータラインを用いて実施した。実験のセットアップ図を Fig. 1 に、用いた電子銃及びアンジュレータのスペックをそれぞれ Table 1 と Table 2 に示した。電子銃には、ECC-RF-Gun を用いている。ECC-RF-Gun は速度変調セル (ECC: Energy Chirping Cell) を付属した高周波電子銃で、エネルギー拡がり小さく加速したのちに ECC にて線形のエネルギー変調をかける。これにより、バンチの前方と後方で電子に速度差が生じ、シケインの利用、もしくは数メートル程度のドリフト空間を進行することによって速度差によって圧縮される。詳しくは[2]を参照されたい。これまでの電子バンチ評価によって、シケインを利用せずドリフト空間による速度差のみを用いて、カソードから約 3m の位置において 323 fs (rms) のバンチ長まで圧縮できることを確認している。また、その際においてもバンチ電荷は 120 pC と比較的高く、kA 近いピーク電流を実現することが可能である[3]。Table 1 に示した電荷量は京都大学における試験時のものであり、カソードに入射するレーザー強度の都合上、本試験では 40 pC までの電荷量で試験した。また、電子ビームのエネルギーも高周波源の都合上、3.3 MeV が最大となっている。

[#] ksakaue@psc.t.u-tokyo.ac.jp

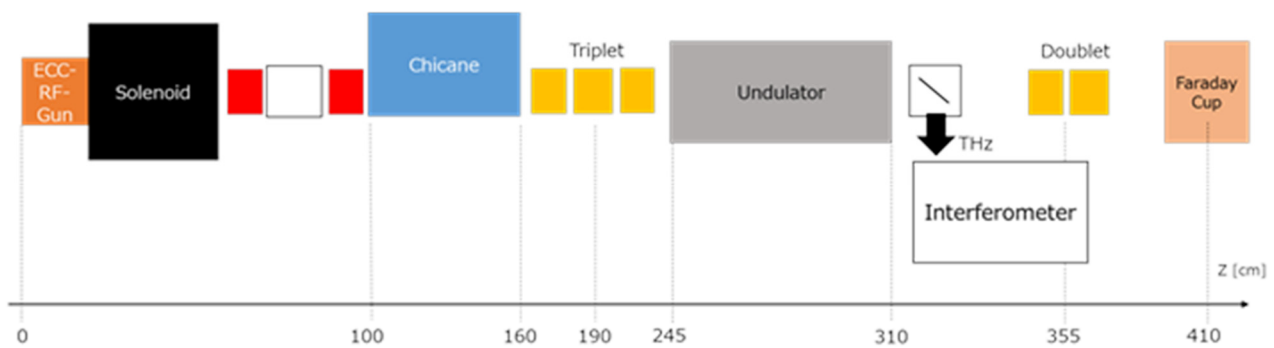


Figure 1: Experimental setup of coherent undulator radiation.

ECC-RF-Gun から生成された電子ビームはソレノイド電磁石によって補正された後に、シケインを通過する。これは[1]において積極的に圧縮するために用いていたものであるが、今回はアンジュレータの位置において最適な圧縮がなされるように、調整程度に励磁し用いた。その後、四重極電磁石によってビームサイズを調整された後にアンジュレータを通過し、アンジュレータ放射を生成する。アンジュレータのパラメータは Table 2 に示した通りであり、数 MeV の電子ビームによってテラヘルツ帯の放射が得られるように周期長が設定されているとともに、Gap を変化させることによって K 値を変化させ、放射波長を変化させることが可能である。

生成されたテラヘルツ帯のコヒーレントアンジュレータ放射はミラーを用いて待機中に取り出され、マイケルソン干渉計(スペクトル評価)及び焦電検出器(THzTen:強度評価)へ導入される。アンジュレータを通過した後の電子ビームは四重極電磁石によって再度集められ、ファラデーカップによって電荷量を測定され、同時にダンプされる。

Table 1: Specification of Electron Beam

Energy	3.3 MeV
Charge	40 pC
Transverse size	1mm
Duration	323 fs (rms) [3]
Repetition	10 Hz

Table 2: Undulator Parameters

Period	70 mm
K	2.8 (max)
N of period	10

3. コヒーレントアンジュレータ放射評価試験

以上のようなセットアップを用いてコヒーレントアンジュレータ放射生成試験を実施した。ECC-RF-Gun が短バンチの生成に特化した電子銃であるため、より高周波数か

つ高強度のアンジュレータ放射が得られることを見込んでいる。

3.1 放射スペクトルの評価

まず、マイケルソン干渉計を用いてテラヘルツスペクトルの評価を実施した。最初に強度を測定しつつ、シケインの励磁強度を調整し、概ね最適であった 1 A の電流値を用いた。その後、アンジュレータの Gap を変化させることで K 値を変化させ、放射の評価を行った。その結果を以下の Fig. 2 に示す。

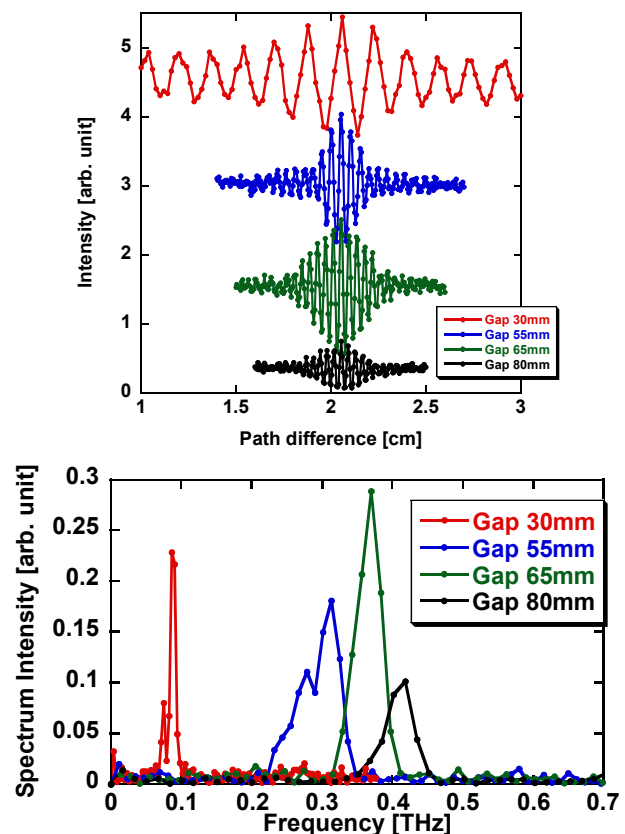


Figure 2: Interferometry (upper) and spectrum (bottom) of THz coherent undulator radiation.

Figure 2 から明らかなように、Gap を変化させることによってテラヘルツ放射の周波数は 0.1~0.4 THz にシフトしていることがわかる。それぞれの周波数において、単

色度は概ね 10%程度であり、概ねアンジュレータの周期数から想定される値と合致している。アンジュレータの仕様としての Gap と K 値の変化に対して、このように放射波長がシフトしていることから、電子ビームのエネルギーは大体 3.3 MeV 程度であろうと結論した。このエネルギーは ECC-RF-Gun の最適運転条件よりは低いエネルギーとなっており、より高強度の高周波を導入することによってより圧縮され、かつ高電荷量の電子バンチの生成が見込める。先行研究[1]との比較としては、電子ビームのエネルギーが 4.6 MeV であったことから直接的に実施することは難しいが、干渉縞の濃淡やスペクトル波形の純度を比較すると、同じ 0.4 THz において、明らかに ECC-RF-Gun を用いた方が有利であることが示された。また、今回の試験における 0.4 THz 生成時の Gap が 80 mm と非常に広く、K 値が小さいことを考慮すれば、より高周波のアンジュレータ放射を見込むことが可能であろうと考えている。

3.2 放射強度と効率の評価

次に、コヒーレントアンジュレータ放射の強度に関して測定を行った。まず、以下の Fig. 3 に ECC-RF-Gun の加速位相に対するテラヘルツ光 (0.3 THz)の強度を示した。

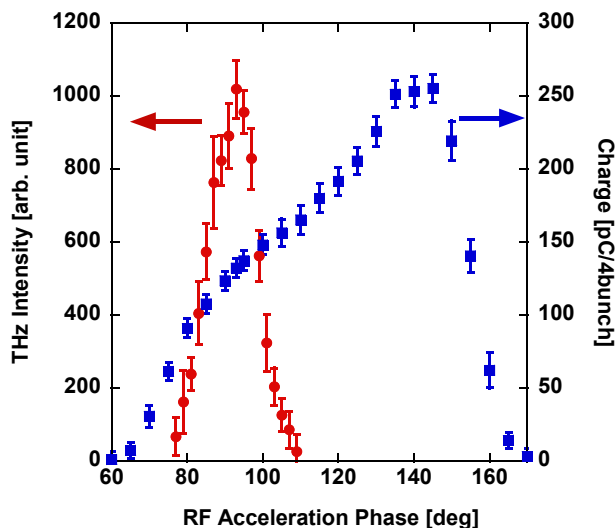


Figure 3: Radiation intensity as a function of an accelerating rf phase of ECC-RF-Gun.

ECC-RF-Gun は電荷が立ち上がったのち、20~30 度の加速位相において最もバンチが圧縮される、言い換えると最もよくエネルギー変調を与えることができる[2]。Fig. 3 の計測結果はその特徴を非常によく反映しており、立ち上がり後 30 度付近の 90~95 度において最もテラヘルツ強度が高くなっていることがわかる。これは ECC-RF-Gun によるバンチ圧縮が良く動作しており、コヒーレントアンジュレータ放射に寄与していることを示している。

次に、放射強度の絶対値を計測した。計測には校正済みのテラヘルツ帯の焦電素子を用い、その素子への入力効率も別途計測済みである。このようなセットアップで実施した絶対値の測定結果とその電子バンチの電荷量依存性を以下の Fig. 4 に示す。

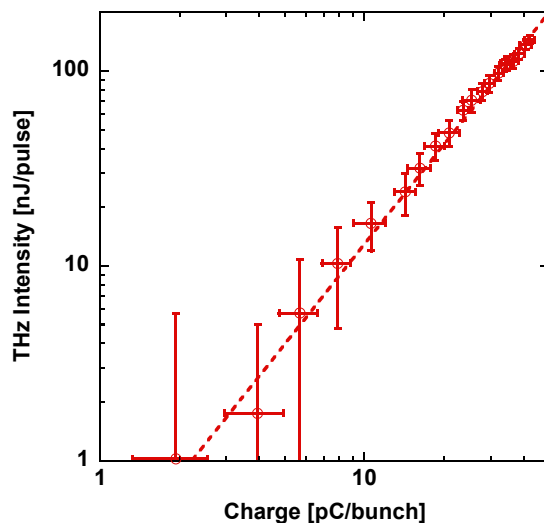


Figure 4: THz intensity as a function of a bunch charge.

Figure 4 の点線は電荷量の 2 乗に依存するフィットを示している。概ねコヒーレント放射を示す 2 乗のフィットに合致するテラヘルツ光強度が観測できていることがわかる。今回試験した最大の電荷量である、40 pC においては、145 nJ のテラヘルツパルス強度が得られており、電子から光へのエネルギーの変換効率としては、0.1 %程度であった。強度・効率ともに非常に良い値であるが、さらなる向上に努める。

4. まとめと今後の展望

速度変調により短バンチの電子ビームを生成できる ECC-RF-Gun とアンジュレータを組み合わせることにより、高強度準単色テラヘルツパルスの生成に成功した。波長可変性や準単色性、強度、変換効率を評価した。今後、今回の試験で明らかになった課題である、電子ビームエネルギーとビーム電荷量の増強を行うことによって高周波数領域のテラヘルツ光発生とさらなる高効率テラヘルツパルス生成を実証し、このテラヘルツパルスの特徴を利用した材料改質等へと展開していく予定である。

謝辞

本研究は京都大学エネルギー理工学研究所ゼロエミッション研究拠点“ZE Research Program, IAE ZE2020A-38.”の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Suphakul *et al.*, “Measurement of coherent undulator radiation of compact terahertz radiation source at Kyoto University”, *Int. J. Magnetics Electromagnetism*, 2017, 3:008.
- [2] K. Sakaue *et al.*, “Ultrashort electron bunch generation by an energy chirping cell attached rf gun”, *Phys. Rev. AB*, 17, 2014, 023401.
- [3] K. Koshiba *et al.*, under review.