

## GENERATION OF SINGLE-BUNCH ELECTRON BEAM BY THE HIGH-SPEED AVALANCHE PULSER AND BEAM DIAGNOSTICS BY THZ COHERENT TRANSITION RADIATION

Toshiharu Takahashi<sup>1,A)</sup>, Naoya Abe<sup>A)</sup>, Kiyoshi Takami<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Research Reactor Institute, Kyoto University

2-1010 Asashiro-nishi, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0494

<sup>B)</sup> Nippon Advanced Technology Co., Ltd.

2-1010 Asashiro-nishi, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0494

### Abstract

A new injection system in KURRI-LINAC for single-bunch beam using a high-speed avalanche-type grid pulser has been developed in order to obtain the continuous spectrum of coherent radiation in THz wave region and to lift the restriction of delay in the time-resolved measurement. The fall and rise times were 110 ps, respectively. The pulse width and the amplitude were 250 ps and 750 V, respectively. In order to investigate the purity of single-bunch beam, the interferogram of coherent transition radiation was observed. The degree of impurity was estimated to be below 3%.

### 高速アバランシェパルサーによるシングルバンチ生成とテラヘルツ・コヒーレント遷移放射による計測

#### 1. 序論

最近のテラヘルツ領域におけるコヒーレント放射の研究[1]は、発生メカニズムの基礎研究ばかりでなく、高輝度テラヘルツ光源としての分光利用も行われるようになってきた。京大炉ライナックには専用のビームラインに分光装置が設置されており[2]、ライナックにも種々の安定化の改造を施すことにより、分光実験を安定に行うことができる。分光研究におけるコヒーレント放射の特長は、広帯域の連続なスペクトルを持つ高輝度のパルス光源である。

これまで、京大炉ライナックの電子ビームは33 ns~4  $\mu$ sのマルチバンチビームであった。そのため、第3章で説明するように、バンチ列からのコヒーレント放射スペクトルは加速周波数(1.3 GHz)の高調波から構成されており、連続スペクトルとしてみなせるのは低分解能の場合だけであった。また、パルスラジオリシスや時間分解分光を行う場合には、遅延時間が加速周波数の逆数(770 ps)に制限されてしまうという不都合があった。

これらの問題を解決するには、ライナックをシングルバンチ運転すればよい。通常、ライナックにおけるシングルバンチは、サブハーモニックプリバンチャー(SHPB)を用いて、低い周波数から徐々に電子を集群させる方法がとられる。しかし京大炉ライナックでは、設置するためのスペースや予算の確保が難しい。近年、京大炉ライナックでは電子銃のYU-156(EIMAC)への変更や、2~22 nsのショートパルサーの新設を含む駆動電源の全面更新など、インジェクターの高度化作業が行われていたことから、

高速パルサーによりシングルバンチを生成することとした。原理的には、バンチ間隔(770 ps)よりも短いパルス幅で電子銃からエミッションできれば、シングルバンチを生成することができるはずである。

先に述べた連続するバンチ列からのコヒーレント放射の性質は、各バンチから放射される波束間の干渉性の結果であり[2]、逆にその性質を利用することにより、シングルバンチの不純度などを調べることができる。本発表ではシングルバンチからのコヒーレント遷移放射(CTR)の計測結果を報告する。

#### 2. 高速アバランシェパルサー

著者の一人である高見が長年にわたり開発を行ってきたものであり、CR放電型多段伝送線式パルサーと呼んでいる[3]。コンデンサーの耐圧の問題のため、トランジスターを5個並べたものをひとつの出力回路とし、それを4つ直列に接続している。電圧固定の前半をドライバ段、電圧可変の後半を出力段と呼んでいる。図1に、4つのうち初段と最終段のみの概略を示す。このパルサーは4点の特長を持つ。ひとつは、アバランシェトランジスターとして販売されているものではなく、汎用のトランジスターFMMT439(Zetex)を使用しており、1個当たり数円~数十円と安価に製作できることである。このトランジスターは公称耐圧120Vであるが、実際に一次降伏電圧を測定し、数百個の中から最も分布数の多い291Vの個体を選別した。同じ性能の個体を多数選別しておけば、万一使用中のトランジスターが壊れた場合でもすぐに交換・復旧することができる。二

<sup>1</sup> E-mail: takahasi@rri.kyoto-u.ac.jp

つ目の特長は、トランジスタを多段接続してパルスの立ち上がりを高速にした点である。三つ目の特長は、1コンポーネントあたり長さ約50cmの50Ωストリップライン上に5ヶ所切れ込みを入れ、それぞれの場所にトランジスタを取り付け、出力とは逆側を50Ωで終端している点である。これにより反射波による影響を減少させ波形をきれいにすることができる。四つ目の特長は、出力部に接続した同軸ケーブルでクリッピングすることによりパルス幅を決めている点であり、同軸ケーブルの長さを変えることにより自由にパルス幅を設定できる。

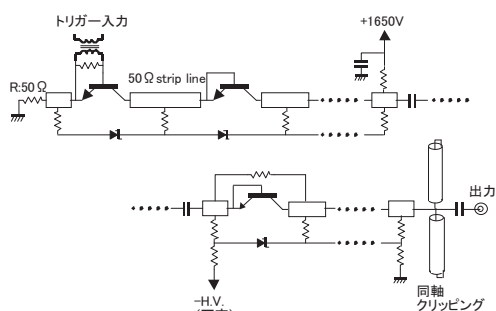


図1: 高速アバランシェパルサーの概略図。それぞれトランジスタ5段ずつからなる初段と最終段のみを示した。パルサー全体では20個のトランジスタ。

製作した高速パルサーからの高圧パルス波形を図2に示す。アッテネータを通し、高速サンプリングオシロスコープCSA803 (Tektronix)にサンプリングヘッドSD-26 (20 GHz)を取り付けて測定した。クリッピング用同軸ケーブルの長さは2.5 cm、パルス幅は約250 psである。パルスの立下り、立上がり時間は共に110 psであり、振幅は約750 Vである。シングルパルス生成するのに十分な高速パルスが得られていることがわかる。



図2: 高速パルサーからの高電圧パルス出力波形。パルス幅約250 ps、振幅約750 V。

バンチ内電荷を一定に保つなど、シングルバンチを安定に生成するためには、加速RFの位相と、高速アバランシェパルサーをオンするトリガー信号との間に同期を取る必要がある。製作した同期回路の概略図を図3に示す。高速化のためPECLの信号レベルで同期を行っている。同期後出力信号の立ち上がり時間は約750 psであり、このトリガー信号と、生成したシングルバンチビームとの間の時間ジッターは

約5 psであると思積もられた。

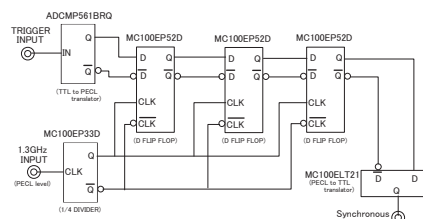


図3: RF・トリガー同期回路。ユニテック社製。

### 3. バンチ列からのコヒーレント放射の理論とインターフェログラム

バンチ列からのコヒーレント放射の強度は、各電子からの放射電場の重ね合わせとして次式のように書くことができる。簡単のため次元で考える。

$$P_A(\nu) = P_0(\nu) \left| \sum_{j=1}^N \sum_{n=1}^{N_B} \exp(i2\pi\nu z_{nj}) \right|^2 = K(\nu) P_{coh}(\nu) \quad (1)$$

ここで、 $\nu$ は波数、 $z_{nj}$ はn番目のバンチ内のj番目の電子の座標、Nはバンチ内電子数、 $N_B$ はバンチ列のバンチ数、 $P_0(\nu)$ は1個の電子からの放射強度、 $P_{coh}(\nu)$ は単一バンチからのコヒーレント放射強度を表す。また $K(\nu)$ はバンチの重ね合わせに関する干渉項であり、

$$K(\nu) = \left( \frac{\sin \pi N_B L_B \nu}{\sin \pi L_B \nu} \right)^2 \quad (2)$$

この項のために高分解能ではバンチ間隔 $L_B$ の逆数の線スペクトルが観測されることになる。

フーリエ変換干渉分光計で測定する際のインターフェログラムは(1)式のフーリエ変換で与えられるから、単一バンチの場合のインターフェログラムを $J(x)$ とすれば、

$$J_A(x) = \sum_{n=-(N_B-1)}^{N_B-1} (N_B - |n|) J(x + nL_B) \quad (3)$$

と書くことができ、自分自身の波束の自己相関図形に加え、他のバンチから放射される波束との相互相関図形からなることがわかる。

### 4. コヒーレント放射による計測

#### 4.1 測定方法

分光装置の概略は文献[2]に示されているものほぼ同等であり、Martin-Puplett型フーリエ干渉分光計を用いている。インターフェログラムの測定の際には、検出器としてSiボロメータ (Infrared Lab.)を使用した。また高速のCTR波形を観測する場合には、ミリ波検波器DXP-10 (Millitec)を使用し、オシロスコープDSA70404 (Tektronix, 4 GHz)で波形観測を行った。

#### 4.2 測定結果

図2に示した高速パルスで電子銃を駆動した場合の、ミリ波検波器で受けたCTR波形を図4に示す。横軸は400 ps/divであるので、バンチ間隔770 psに相当する場所には隣のバンチは見えていないことがわかる。



図4: ミリ波検波器で受けたシングルバンチからのCTR波形。

次に、干渉計により測定したCTRのインターフェログラムを図5に示す。干渉計の光路差0 mm付近には、ひとつのバンチから放射される波束自身の自己相関図形が現れている。一方バンチ間隔に相当する光路差240 ps付近に現れる隣のバンチとの間の相互相関図形は非常に小さいことがわかる。その振幅の比率から、シングルバンチのバンチ不純度は3%以下であると見積もられた。

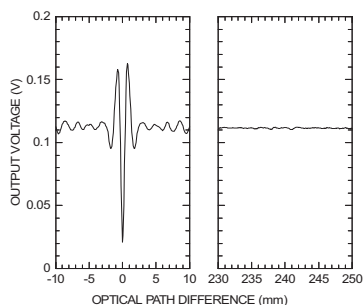


図5: シングルバンチから放射されるテラヘルツのCTRインターフェログラム。

#### 4.3 パルス幅1 ns (2バンチ) の場合

前節までのシングルバンチ計測の妥当性の確認と、電子銃パルサーのパルス幅を変えることによりバンチ数を自由に設定できることを確認するため、パルス幅を1 nsに変更して同様の測定を行った。クリッピング用同軸ケーブルの長さは10 cmである。図6左にパルス出力波形 (振幅約940 V)、図6右にミリ波検波器で受けたCTR波形を示す。パルス幅から予想される通り、2バンチになっていることがわかる。また、図7にCTRインターフェログラムを示すが、光路差0 mmに観測される自己相関図形の振幅の約半分を持つ相互相関図形が、バンチ間隔にほぼ相当する約235mm付近に観測されている。この結果は(3)式により説明することができ、CTRインターフェログラムを用いたシングルバンチ計測の妥当性を示している。また、電子銃パルサーのパルス幅によりバンチ数を自由に設定できることも確認できた。

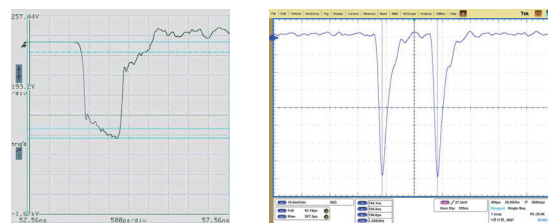


図6: 高速パルサーからの高電圧パルス出力波形 (左図)。パルス幅約1 ns、振幅約940 V。ミリ波検波器で受けたCTR波形 (右図)。

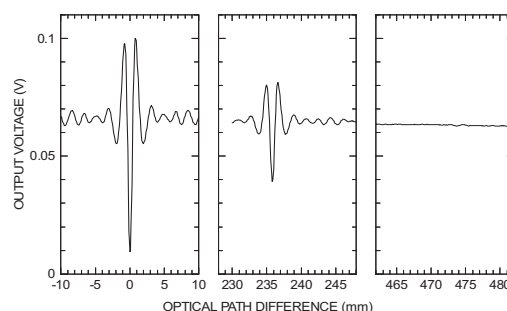


図7: ダブルバンチからのテラヘルツCTRインターフェログラム。

## 4. 結論と課題

立下り立上がり時間110 psの高速電子銃パルサーを製作し、パルス幅を250 psに設定することにより、京大炉Lバンド電子ライナックにおいてシングルバンチを生成することに成功した。また干渉計を用いてテラヘルツCTRのインターフェログラムを測定することにより、シングルバンチのバンチ不純度が3%以下であることがわかった。今後、コヒーレント放射をテラヘルツ領域の高輝度パルス光源とした時間分解分光やパルスラジオリシス実験に利用していく。また、原理的には1.3 kVの振幅を持つ高圧パルスが得られるはずであるが、現在250 psパルス幅では波形の立上がりの乱れにより半分程度の振幅に留まっている。原因を追究し対策を施すことにより、さらに大きな電荷量のシングルバンチを生成できるようにすることが今後の課題である。

## 謝辞

本研究の一部 (RF・トリガー同期回路の製作) は、平成18年度KEK加速器科学大学等連携支援事業により行われた。

## 参考文献

- [1] 例えば日本語の解説として、高橋俊晴, “コヒーレント放射光”, 加速器 2, 11-19 (2005).
- [2] T. Takahashi, *et al.*, “Utilization of coherent transition radiation from a linear accelerator as a source of millimeter-wave spectroscopy”, *Review of Scientific Instruments* 69, 3770 (1998).
- [3] 高見清, “アバランシェパルサーの高速化(III)”, 核融合研究技術研究会 1994.3, 105 (1994).