

WAKE FIELD GENERATED BY A HIGH-CURRENT SINGLE BUNCH

Seishi TAKEDA, Norio KIMURA, Kunihiko TSUMORI & Masaharu KAWANISHI

Radiation Laboratory,
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, Osaka 567, Japan

Abstract

When a high-current single bunch passes through a cavity, a wake field is generated by a bunch-cavity interaction. The wake field increases in proportional to the bunch charge and the shape of its potential depends on the bunch shape. The wake potential has been calculated by the Maxwell equations, boundary conditions being considered. Measuring the phase dependence of the energy distribution of the single bunch, the wake potential can be observed. Besides, the time distribution of electrons with maximum energy shows the wake potential on the crest.

はじめに

最近単一バンチ電子ライナックの利用分野において、より高い電荷量を持つ単一バンチの要求がたかまり、そのための電荷増大計画が随所において遂行されてきた。阪大産研においても単一バンチ電荷量増大計画が進められており、単一バンチ・チョッパーを用いて30.6nCまで増大した。単一バンチの電荷量をより増大させるためには、電子銃、サブハーモニック・アグリバンチヤを含めたインジェクターの開発が必要で、トリプルSHPB(2th SHPB × 2 + 6th SHPB)システムを現在設計中である。大電流の単一バンチを発生する場合、最大の問題点はビーム内電子間に生じるクーロン反発力がいかに充分うちかちビームをバンチングするかである。また一オ、大電流の単一バンチをライナックで加速する場合、ウェーク場による単一バンチの影響が大きくなり、単一バンチの大電流化は発生と加速の両面で解決しなければならない。

単一バンチと加速空洞との相互作用により励起されるウェーク場

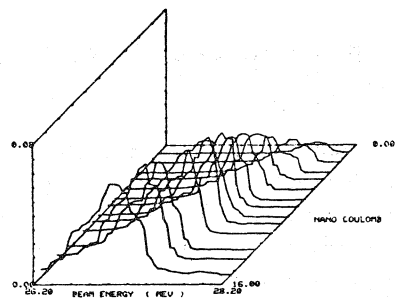
電荷量30nC以上で、バンチ巾が30ps以下の単一バンチではピーク電流は1kA以上となる。阪大産研における単一バンチのパルス巾は16psであるので、50~60nCの単一バンチでは約3kA以上になる。このような大電流を持つ単一バンチをライナックで加速するとき、単一バンチが加速空洞と相互作用した結果励起されるウェーク場によって、単一バンチ自身に影響があたえられ、ウェーク場の縦成分はバンチのエネルギー損失、エネルギー分布の変化やバンチ長変化、そして横成分はエミッタンスの増大を生じさせる。これらの影響は従来の単一粒子モデルでは求めることができない Collective Effect (集団効果)で、単一バンチの電荷量に比例して大きくなるため、高電荷の単一バンチを空洞で加速する場合に充分考慮しなければならない問題となる。

SLCにおいて8nCの高電荷単一バンチを60msはなして2個加速する計画があり、セクター1を用いたビームテストでは単一バンチの電荷量が最大2.5nCに制限される原因が、横成分ウェーク場の励起によるものと判明されている。阪大ライナックは Helmholtz コイルで作される磁場内を単一バンチは Brillouin flow されるため、横成分にかわりθ方向成分のウェーク場が励起され、結果的にビームエミッタンスを増加させると予想されるが、今後の課題と考えている。

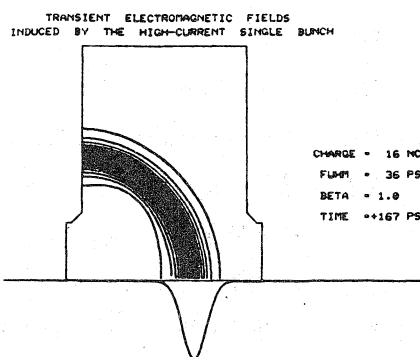
縦成分ウェーク場による単一バンチのエネルギー損失は、阪大ライナックにおいて39セル内で約0.8 MeV/16nCと評価されており、また一方エネルギー分布中も電荷量増大とともに広がることはすでに報告している(第1図)

単一バンチと加速空洞との相互作用によるウェーク場の時間ドメイン解析

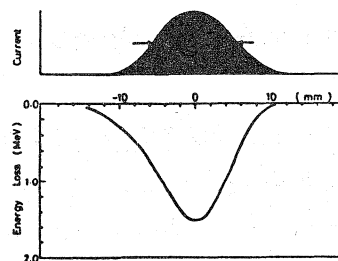
単一バンチの電流波形を考慮し、加速空洞内に励起されるウェーク場を、空洞壁での境界条件を満足させ Maxwell の電磁方程式を用い、時間ドメインで計算することが出来る。39個の空洞から構成される阪大ライナックの加速管での単一バンチのエネルギー損失を求めるために、平均的サイズの加速空洞1個を考へる。そのサイズは空洞長75mm、空洞内半径90mm、ディスク・アパーチャ半径21mm、ディスク巾12mmである。銅による有限导体からなるモデル空洞内に入射されていく FWHM 36ps、電荷量16nCの Gaussian 分布をした単一バンチが空洞内に励起するウェーク場の電気力線を第2図に示す。単一バンチが加速空洞内に入り出ていくまでの間に発生するウェーク場の場エネルギーを時間積分することで、バンチ内電子の位置に対して異なる値をもつエネルギー損失が求められる。加速管が39個の同一モデル空洞によって構成されていると仮定すれば、単一バンチが加速管を通過する間の全エネルギー損失が求まり、ウェーク・ポテンシャルとして表現される(第3図)。図から明白なように、単一バンチ内電子のうちで、フロントに存在するもののエネルギー損失は最小で、バンチ中央附近の電子のエネルギー損失は最大となる。バンチ・テールではわずかのエネルギー損失がみられる。



第1図 単一バンチのエネルギースペクトルの電荷量依存性(実験データ)



第2図 単一バンチがモデル空洞内に励起したウェーク場(コンピュータ・シミュレーション)



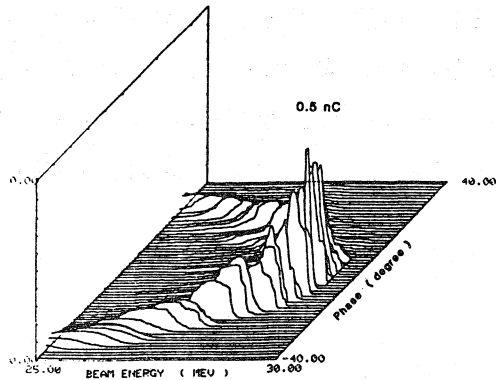
第3図 ウェークポテンシャル(計算)

ウェーク・ポテンシャル 実験

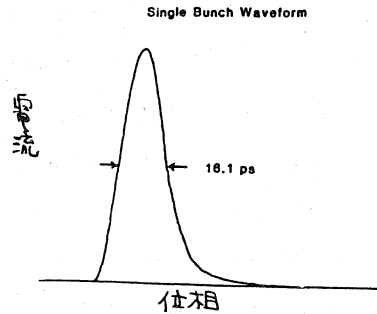
阪大ライナックは昭和56年度に、プリバンチャーとバンチャーを加速管と独立してドライブするため、5MWクライストロンとモジュレーターが増設された。加速管は従来の20MWクライストロンによってドライブされ、加速管のパワーと位相はバンチャー・セクションに対して独立に制御可能となった。

単一バンチが加速される様、ライナックを調整し、加速管内の位相だけを変化させる。バンチャーから出てくる単一バンチはこの間、エネルギー、電荷量、バンチ形状に変化しないと考えられる。加速管の位相変化に対して単一バンチは加速電場のクレストを前後した位置に入射され、エネルギー・スペクトルに変化が生じる。0.5nCの低電荷量をもつ単一バンチのエネルギー・スペクトルの位相依存性を第4図に示す。単一バンチ内電子の最大エネルギーは、バンチがクレストに近づくにつれ増大し、バンチがクレストに存在する間一定となる。そしてさらに位相を増加させると、バンチ・テールに存

在る電子が最大エネルギーを持ったため減少していく。最大エネルギーが一定の部分からバッチの
パルス電流波形が実験的に求められFWHM16 psである(オ5図)。



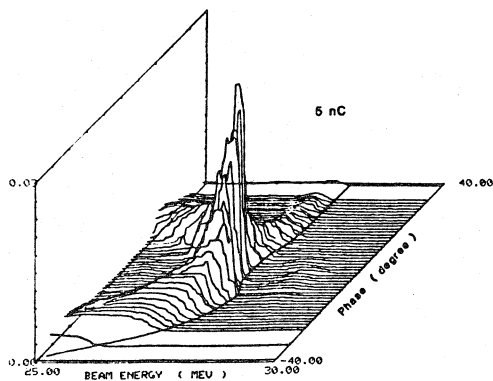
第4図 0.5nCの単-バッチのエネルギー・スペクトルを
表わす。クレストに対するバッチの位相を変化させ
た場合の変化を3次元で表わした(実験データ)。



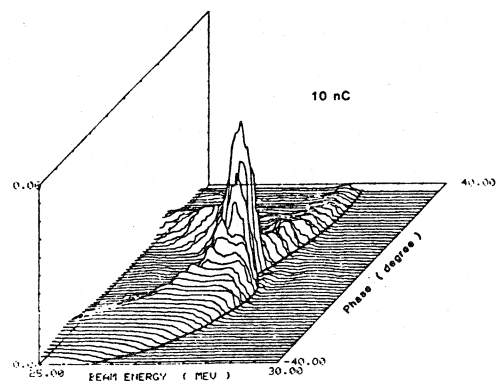
第5図 0.5nCの単-バッチのバッチ波形。最大エネルギー
 $E_{MAX} - \Delta E$ = エネルギー・アナライザを固定し、7アパチカ7°の
電流波形を位相を横軸に測定された(実験データ)。

ウェーク・ポテンシャルが存在しないならば、単-バッチの電荷量を増大してもスペクトル変化の傾
向は同様になると考えられる。又、バッチ内電子の位置に依存しない平均的に電子がエネルギー
損失する場合には、スペクトル全体が低エネルギーにシフトすると予想される。ウェーク・ポテンシャル
が存在するとバッチは窪みのある \cos 波であたかも加速されるのと同様になり、その窪みはバン
チ付近に存在する。従って、単-バッチをクレスト後方から前方へ移動させるとき、バッチ・フロントが
クレストに達するまで最大エネルギーは増大し、バッチ・フロントがクレスト前方に進むと、ウェーク・ポテン
シャルの存在のため、最大エネルギーは減少する。すなわち、バッチがクレストに跨って存在する
ときウェーク・ポテンシャルの存在のためにバッチ中心付近の両側2点の場所に存在する電子が最大
エネルギーをもつことが予想される。バッチがよりクレスト前方へ移動すれば、クレストにはバッチ・
テールが存在し、ウェーク・ポテンシャルも小さく、この時バッチの最大エネルギーは位相と共に増大
し、一定となる。テールがクレスト前方へ移動すると共に最大エネルギーは減少するのである。

第6, 7図は、5nC, 10nCの単-バッチのエネルギー・スペクトルの位相依存を示す。位相上での
最大エネルギーの窪みの深さは電荷量に比例して大きくなる。位相を0°に固定し、スペクトルの低
エネルギー側へのシフトは電荷量に比例する(オ1図参照)。



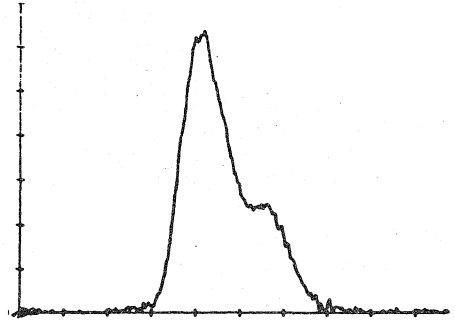
第6図 5nCの単-バッチエネルギー・スペクトルの位相依存。
(実験データ)



第7図 10nCの単-バッチエネルギー・スペクトルの位相依存
(実験データ)

以上の様にウェークポテンシャルは 0.5mC の単一バンチの場合、加速電場に対して無視できるほど小さいが、単一バンチの電荷量に比例して大きくなり、 5mC 以上の場合には加速電場に対して無視できないほど大きくなる。一連の位相依存性の実験中、加速管から出される単一バンチの波形の位相依存性はみられなかった。しかしながら電荷量を増大あると単一バンチの FWHM 中に変化はみられないが、バンチテール長が延びることが、ストリークカメラにおいて測定され、また第6, 7図においてもテールが尾を引くことが示される。このテールの存在は Prebuncher や buncher の問題であると考えている。

一バンチがクレスト附近に存在するとき最大エネルギーがバンチ中心両側2点に存在する位相が存在する。エネルギーアナライザをこの最大エネルギーに固定し、スリットを通過した電流波形はピークが2つ時間的にセパレートしたものになると予想される。予備実験として 270° 偏向マグネットのビームラインにスリット (ALアローウ) をおき、エネルギーアナライザとして代用し、スリットを通過した最大エネルギー附近のバンチ内電子が 0.2mm 厚のスラットを通過するとき放射するチレン光をストリークカメラで測定すると、2つのピークを帯びた波形が測定された。エネルギーアナライザを用いれば分解能も高く、この傾向はより顕著に測定できると考えている。以上の様にエネルギースペクトルの位相依存、時間分解エネルギーアナライズ法、そしてエネルギースペクトルの電荷依存の3方法の実験においてウェークポテンシャルの存在が確かめられた。



第8図 時間分解エネルギーアナライズ法による最大エネルギーをもつバンチ内電子の電流波形。(実験データ)

結論

- 1) 単一バンチは加速空洞と相互作用してエネルギー損失がある。エネルギー損失は電荷量に比例する。
- 2) ウェークポテンシャルの存在のため、エネルギー損失はバンチ内電子の位置に依存する。
- 3) ウェークポテンシャルが存在するため、バンチ内でバンチ長を小さく集群しても、高電荷の単一バンチのエネルギースペクトルは良くならない。逆に、高電荷の単一バンチ長をエネルギースペクトル中から推測できない。
- 4) ウェークポテンシャルの最大はバンチ中央附近に存在するため、従来の磁場を利用した ECS は高電荷の単一バンチの場合には効果が小さくなる。
- 5) 高電荷の単一バンチのエネルギーをそろえることは困難である。加速管内トラウエリク・ウェークの位相速度とバンチ速度を故意的にずらし、単一バンチ内電子の得るエネルギーを平均化することによって高電荷単一バンチのエネルギースペクトルをせばめる方法が考えられる。阪大ライナックにおいて単一バンチのエネルギー巾をできるだけ小さく調整しようとするとき、位相が一致する RF 周波数 ($108.385\text{MHz} \times 12$) から $\pm 60\text{kHz}$ ほどずらさなければならぬ。