

LASER SLICING SIMULATIONS ON PF-AR 3GEV ELECTRON BEAM

Toshiyuki OZAKI
Accelerator Laboratory, KEK
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801, Japan

Abstract

In order to generate a few hundred femto second X-ray pulses in PF-AR ring, the beam slicing method by table-top laser is studied. The simulation shows the sliced beam profile that the peak intensity of the sliced beam against the rest main bunch is about 9 %.

PF-AR 3GeV 電子ビームのレーザースライシング

(1) 序

高エネルギー電子ビームのレーザースライス法は、パークレイグループによって1996年に提案された⁽¹⁾。この提案は、1.5GeVの ALSリングで実証された⁽²⁾。フェムト秒X線は2001年からユーザー利用されている。

また、BESSY2でもコミショニングがはじめられている⁽³⁾。また、SLS(2.4GeV) やSOLEIL(2.75GeV) においても、ビームスライスを計画している。本論文では、PF-AR 3GeVビームのレーザースライシングの可能性を考察する。

	ALS	BESSY2	PF-AR
完成年	1993年	1998年	1983年
ラティス	TBA	DBA	FODO
エネルギー	1.5GeV	1.7GeV	3GeV入射
β_x (max/min)	ave 6.7m	17.2/.384	28/2
Emittance(x)	4.2nmrad	6.1nmrad	62.9nmrad
Energy Spread	8.00E-04	7.00E-04	5.28E-04
Momen. Compact.	1.59E-03	7.30E-04	1.28E-02

表 1

(2) レーザースライシングの原理

電子は、ウイグラー内で外部からのフェムト秒レーザ光とFEL相互作用により、エネルギー変調を受ける。このエネルギーキックされた電子は偏向電磁石で分散される。その電子はシンクロトロン放射光を発生する。主バンチからの放射光を遮り、スライスされたバンチからの放射光を通すスリットを通してユーザーに供される。

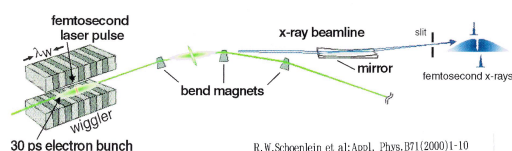


図 1 beam slice原理(文献 2 から引用)

(3) PF-ARリング

TRISTAN入射器として建設され、1983 年秋より運転が開始され、2002年1月より放射光専用リングとして運営されている。リングには、3GeVの電子ビームがリニアックから入射され、加速され、6.5GeV でストレージされてX線領域の放射光を発生している。

ビームスライシングを成功させたリングおよび計画しているリングは、第3世代の放射光施設である。ところが、PF-ARは、第2世代のリングである。この性能の相違は、レーザースライシングを実施するのにハンデとなる。ARは通常6.5GeVでユーザー利用になるが、ここでは実現可能性の高い3GeVビームで考察する。

ARリングで、5m程度のウイグラーを設置できる場所として、曲線部の短直線部が数力所ある。ただし、分散関数が残る所であるから、ビームはエネルギーブレッドによりサイズが広がる。さらに、空洞の高次モードに起因するビーム不安定性があり、これによるエネルギーブレッドが存在する。この量は、リング設計値のブレッドの数倍と言われている。これは、フェムト秒の放射光発生運転に対して不確実な要素になる。

ARリングの特徴は、衝突実験ができるリングとして建設された事である。北および南実験室の両側に強力な収束力をもつ4極電磁石群が設置されている。しかしながら、放射光運転では曲線部の4極電磁石よりやや強い程度の強さで励磁されているにすぎない。この特徴を活用する可能性を検討したい。つまり、ビームサイズ $\sigma_x = \sqrt{\epsilon_x \beta_x}$ において、第3世代のリングと比較して、エミッタンス ϵ_x が劣るが、局所的にはベータ関数を小さくできると言うARの特徴を利用したい。また、QC1~QC8電磁石を最適に励磁して、ビームとレーザの重なり具合を最大にするようなオペテックスを得られるようにしたい。

まず、現在の配置を、AR建設直後の配置に戻すとする。両QC1電磁石の間に、5.5mの空間ができる。ここにウイグラー(modulator)を設置し、短直線部にアンジュレーター(radiator)を設置する。メインビームとスライスビームは、下流にあるアンジュレーターに入るが、メインビームとスライスビームを偏向角の差で分離する方法⁽⁴⁾でアンジュレーター放射を利用する。

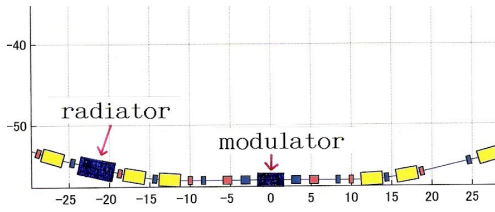


図2 南直線部における機器配置

AR建設当時、つまり2回対称のオブティクス(ベータ関数)を再現して、図3に示す。計算は、MATLAB Accelerator Toolbox⁽⁵⁾を用いた。南直線部の位置で $\beta_x = 3 \sim 4m$ である。

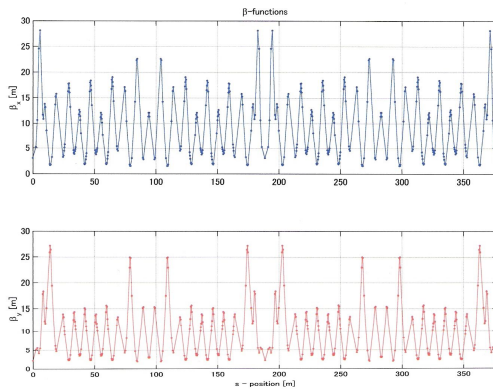


図3 AR 2回対称オブティクス

(4) 機器の設計

レーザーで、入手できるtable-top laser は、波長 $1 \mu m$ 、パルス幅 130fs、パルスパワー (E_J) 7mJ である。再生増幅器を液体窒素冷却して、繰り返し1kHzが可能である。電界は以下の式⁽⁸⁾からもとまり、4.92 GV/m である。

$$E_J = \left[\frac{(2\pi)^{3/2}}{2} \right] c \epsilon_0 E_{sp}^2 \sigma_{s0}^2 \sigma_{st}$$

レーザーは、z軸方向に伝播するにつれて、以下の式のように直径wが広がって行く。

$$w(z) = w_0 \left(1 + z^2 / L_R^2 \right)^{1/2}$$

ここで $L_R = \pi w_0^2 / \lambda$ である。

レーザーの半径を0.5mmとするとRaileigh length L_R は3.14mである。つまり、ウイグラーの終端で2.3倍に広がる。

ウイグラーは、共鳴条件を満たすパラメーターに任意性がある。製作できそうな電磁石ウイグラーとしてSPEARのウイグラー⁽⁶⁾⁽⁷⁾をモデルとし、1周期32cm、周期数15、磁場強度 7000gaussを設計した。これを図4に示す。

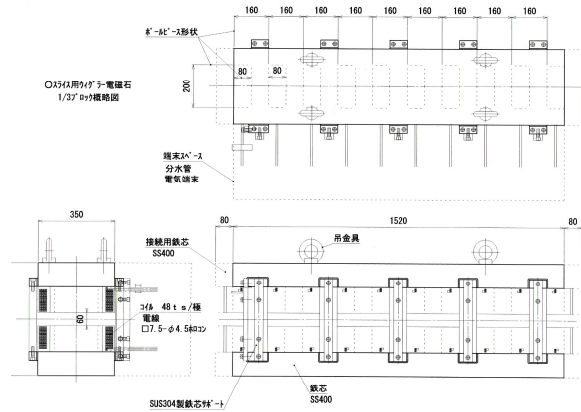


図4 電磁石ウイグラー

(5) シミュレーション

文献(8) で詳細に検討されているので、これを使う。各電子の運動方程式は

$$\dot{\eta} = - \frac{\alpha E_{s0} (\Delta Z) K [JJ]}{2 \gamma^2} \times \frac{\exp \left[-X^2 / w^2(Z) \right]}{w(Z) / w_0} \sin(\phi + \phi_1)$$

および

$$\dot{\phi} = 2k_w c \eta$$

である。ここで

$$\eta = (\gamma - \gamma_r) / \gamma_r$$

と

$$[JJ] = [J_0(\xi) - J_1(\xi)] \quad \xi = \frac{K^2}{4(1 + K^2/2)}$$

である。

上記 1 次元の FEL 式を用いるので、ビームの形状は、トランスバースのみのガウシアンとし、ビーム径は、直線部のベータ関数の平均値 3.5m を採用し、 $\sigma_x = 0.47mm$ とする。つまり、電子分布は

$$n_e = \frac{N_e}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right)$$

である。AR リングの平均ベータatron 波長は 36.7m であるから 4.8 m のウイグラー内部の電子軌道を平行と近似しても良いであろう。また、リングで XY カップリングは小さいので、シートビームで近似する。つまり、 $x'=0, y=0, y'=0$ とした。エネルギー広がり、表 1 にある $\sigma_e = 0.000528$ とした。

ウイグラーの下流は、QC1, QC2, QC3, QC4, Bend, QC5, Bend, QC6 と続く。この間の Transfer Matrix を求め、QC6 出口でのビームの位置分散を計算した。シミュレーション粒子数は 20000 個とした。

計算の結果を図 5(a) に示す。ビームの定常部のトランスバースの形状は図の断面でありガウシアンである。レーザー照射された部分は中央の電子数が減り横にキックされているが図から判る。図 5(b) に 4 % ステップのビーム密度等高線を示す。サイドに電子分布があることを示す。主ビームのピーク値の 5 % ~ 9 % のピーク値を持つ電子群が数個存在する。この電子群からの放射光（アンジュレーター放射）がユーザー利用される。

この電子群は、リングのモメンタムコンパクト化ファクターが 0.0128 であるから、1/4 周 (377m/4) で サブピコ秒に広がる。その後は、シンクロトロン振動をし、約 20mS のダンピングタイムで減衰する。

レーザーを 1kHz、つまり 1mS 間隔で運転すると、ホットな電子が残っている影響がある。今後、この効果を考察せねばならない。

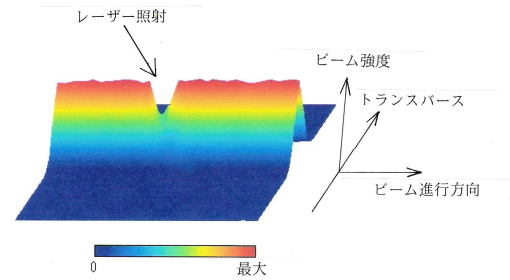


図 5(a) ビーム強度変化

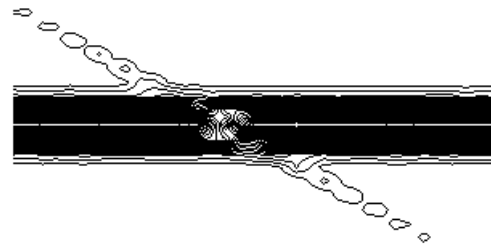


図 5(b) ビーム強度の等高線図 (4 % step)

(6) 結論

3GeV 電子ビームのレーザースライシングの可能性を検討した。その計算結果としてスライスされたバンチ形状を示した。今後、ビームオプティクス最適化、1kHz 運転の可否などを検討したい。

文献

- [1] A. Zholents and M. S. Zolotarev, Phys. Rev. Lett 76(1996)912-915
- [2] R. W. Schoenlein et al., Appl. Phys. B71(2000)1-10
- [3] K. Holldack et al., Phys. Rev. (Accelerators and Beams) 8(2005)040704
- [4] S. Khan et al., EPAC(2002)700-702
- [5] A. Terebilo, PAC(2001)3203-3205, URL: <http://www.ssrsl.slac.Stanford.edu/at/>
- [6] M. Berndt et al., IEEE NS-26 (1979)3812-3815
- [7] H. Winick, J.E. Spencer, Nucl. Instrum. & Methods Vol.72(1980)45-53
- [8] Y. Miyahara, Nucl. Instrum. & Methods A Vol.506 (2003)316-328