

阪大産研における SASE の GENESIS によるシミュレーション

古川真一¹⁾、加藤龍好、磯山悟朗

大阪大学産業科学研究所

〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

概要

阪大産研で行っている SASE 発生実験について、計算コード GENESIS を用いたシミュレーションによる解析を行った。SASE の一次元モデルで予想されるよりもゲインを減少させると考えられる電子ビームのエミッタンスやエネルギー拡がり等の効果を調べた。その結果、このような効果によるゲインの減少がみられた。とくに、エミッタンスの影響が大きい。エミッタンスやエネルギー拡がりを考慮した、補正式とは良い一致を示した。また、スペクトル幅を計算し、理論値からの大きなずれはみられなかった。ただし、電子ビームにエネルギー拡がりがある場合には幅が小さくなった。また、時間依存のシミュレーションによって、光が電子に対して進む効果は光の波長が長いときに大きく、出力が 30% 程度に減少すると予想される。

1. はじめに

我々は、阪大産研の L バンド電子ライナックを用いて遠赤外域での SASE の実験研究をおこなっている^[1]。SASE の増幅過程は理想的な条件が成立する場合には、1 次元モデルで理解できるが、その条件は必ずしも満たされるわけではないと考えられる。そこで、電子ビームの拡がり等の現実的な効果を取り入れることができる計算コード GENESIS を用いたシミュレーションを行い、このような効果を評価する。2 章で一次元モデルについて述べ、3 章でシミュレーションの結果と比較する。

2. SASE の一次元モデル

SASE は、単一通過型の FEL であり、自発放射光を種として、出力が指数関数的に増幅される。SASE の一次元モデルによって、次のように記述される^[2]。アンジュレータ中を距離 z だけ走ったときの SASE 光の出力パワーは、 $P(z) = P_{in} \exp(z/L_g)$ で与えられる。ここで P_{in} は初期のパワーで、 $L_g = \frac{\lambda_u}{4\sqrt{3}\pi\rho}$ は、

Gain length とよばれ、光のパワーが e 倍に増幅されるのに必要な長さである。ここで ρ は SASE の動作を特徴づけるパラメータでつぎのように定義される。

$$\rho = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\lambda_u K[JJ]}{8\pi\sigma_b} \right)^2 \frac{I_p}{I_A} \quad (1)$$

ここで I_p は電子ビームのピーク電流で、 $I_A = 1.7 \text{ kA}$ はアルヴェン電流である。また、 σ_b は電子ビームの半径、 $[JJ] = J_0(\xi) - J_1(\xi)$ ($\xi = K^2/(1+K^2)$) は蛇行する電子と光の結合係数である。電子ビームのエミッタンス、エネルギー拡がりを考慮すると、Gain length は

$$L_g' = \frac{\lambda_u}{4\sqrt{3}\pi\rho^2} (1 + \hat{\Lambda}_T^2) \quad (2)$$

と補正される。ここで $\hat{\Lambda}_T^2 = \frac{1}{\rho^2} \left[\left(\frac{\sigma_\gamma}{\gamma} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon \lambda_u}{4\lambda\beta} \right)^2 \right]$

である。また、アンジュレータの周期数を N_u として、スペクトル幅は、

$$\frac{\sigma_\lambda}{\lambda} = 0.91 \sqrt{\frac{\rho}{N_u}} \quad (3)$$

で与えられる。阪大 SASE 実験の電子ビームおよびアンジュレータのパラメータを表 1 に示す。波長は 90 から 190 μm 、(1) 式によって計算される ρ は 0.02 程度となる。

電子ビーム、アンジュレータのパラメータ

Electron beam	
electron energy	11.5 MeV
energy spread	2 ~ 4 % (FWHM)
	0.8 ~ 1.8% (rms)
charge per bunch	< 20 nC
bunch length	20 ~ 30 ps
peak current	< 1 kA
normalized emittance	150 ~ 200 mmmrad
undulator	
period length	0.06 m
No. of period	32
Total length	1.92 m
K-value	0.7 ~ 1.472

表 1. 阪大産研 SASE 実験のパラメータ

¹ E-mail: furu25@sanken.osaka-u.ac.jp

3. SASEのシミュレーション

3.1 計算コード GENESIS

シミュレーションコードGENESIS²はアンジュレータ中での電子の運動方程式を数値的に解くことで、三次元の効果を取り入れることができる。これによってFEL光の出力等の現実的な計算が可能になる。

また、電子のパンチを光の波長だけ離れたいくつかのスライスに分けることによって、時間に依存するシミュレーションも可能である。これによって光の速度が電子ビームより速いために、電子ビームの前方に進む効果(Slippage Effect)も取り入れることができる。

3.2 SASE光発生シミュレーション

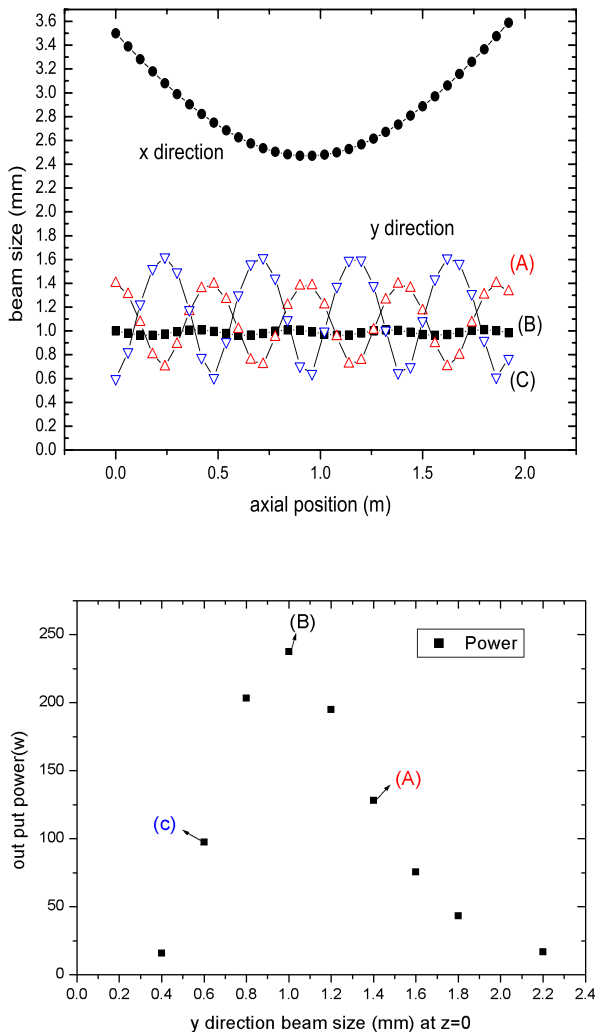


図1: アンジュレータ内での電子ビームサイズ(上)、ビームサイズによる光のパワーの変化(下)

シミュレーションによる、アンジュレータ中での電子ビームサイズの変化を図1に示す。鉛直方向に対しては収束作用があり、鉛直方向のビームサイズが振動する。光の出力パワーは(B)のようにビームサイズが一定に近いときに大きくなる。以下ではこの条件が成り立つようなパラメータを用いた。

エネルギーを一定としてK値を変え、共鳴波長(88~188 μm)での出力パワーをシミュレーションした結果を図2に示す。電子ビームのrmsエネルギー幅 σ_γ/γ が0%、0.5%、1.0%のときをそれぞれ、 \bullet 、 \blacksquare 、 \blacktriangledown で示している。ここでピーク電流1kA、規格化エミッタンス150mm mradとして計算した。また、シミュレーションに用いたパラメータから計算される理論値も示した。実線は一次元モデルによるもので、点線は一次元モデルにエミッタンスとエネルギー拡がりの補正を加えた(2)式から計算されるパワーである。シミュレーションの結果は、一次元モデルに補正を加えた(2)式を用いて計算される値によく一致している。ただし、K値が大きくなるにしたがい、ずれが大きくなる。エミッタンス、エネルギー拡がりの効果は(2)式で評価できることがわかる。

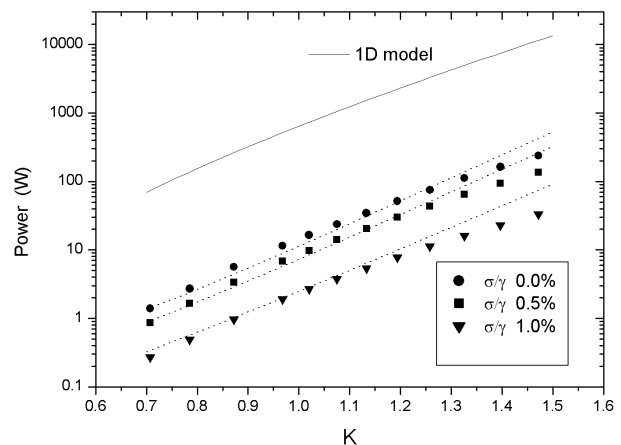


図2: SASE光の出力パワーのK値依存性

3.3 波長スペクトルの計算

スペクトル幅の理論値は(3)式で与えられている。これからわかるように、指数関数的増幅領域では、光が増幅されるにしたがってスペクトル幅は狭くなっていくとされる。共鳴波長(114、142、162、188 μm)から2 μm 間隔で波長を変えて、シミュレーションを行い、スペクトル幅を計算した。この結果および(3)式からの予測値を点線で図3に示す。エネルギー幅0%では、スペクトル幅は(3)式とよく一致している。エネルギー幅1%ではこれより0.002ほど小さくなっている。実験ではスペクトル幅の実験値は理論値より大きい傾向があり、シミュレーションの結果と合わない。実験結果が再現できるよう

² <http://www.desy.de/~reichsv/genesis/genesis.html>

なシミュレーションが可能か検討する必要がある、これからの課題である。

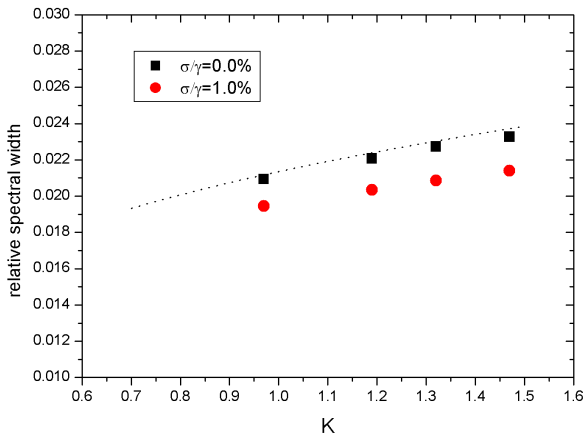


図3 . S A S E 光の相対スペクトル幅

3.4 Slippage の効果

2章の一次元モデルでは、電子ビームが無限に長く、ピーク電流は一定である (Steady-State) と仮定されている。しかし実験では、電子ビームは 20 ~ 30 ps のバンチである。光が電子ビームよりも速いため、光はアンジュレータを一周進む間に、電子ビームに対して一波長分だけ前方に進むことになる。アンジュレータの出口では $N_u \lambda$ だけ進むことになり、これがバンチ長 l_b よりも長いと電子バンチを追いこし、光の増幅が減少することになる (Slippage 効果)。パラメータ $S = N_u \lambda / l_b$ はこのような効果の大きさを表していて、光の波長が 110 ~ 190 μm で 0.5 ~ 1.0 程度であり、この効果は無視できないと考えられる。そこで、GENESIS の時間依存シミュレーションモードで、電子バンチ長が短いことによって光のゲインがどれだけ減少するか調べた。

電子バンチ長を変えてシミュレーションしたとき光のピークパワーの、電子ビームが無限に長いとしたときのピークパワーに対する比を図 4 に示した。それぞれ、光の波長 187 μm (K 値 1.47)、115 μm (K 値 0.97) のときを表している。バンチ長 20 ~ 30 ps では Slippage の効果により出力は 20 ~ 30% になることがわかる。また、この効果は光の波長が長くなるにしたがって大きくなる。

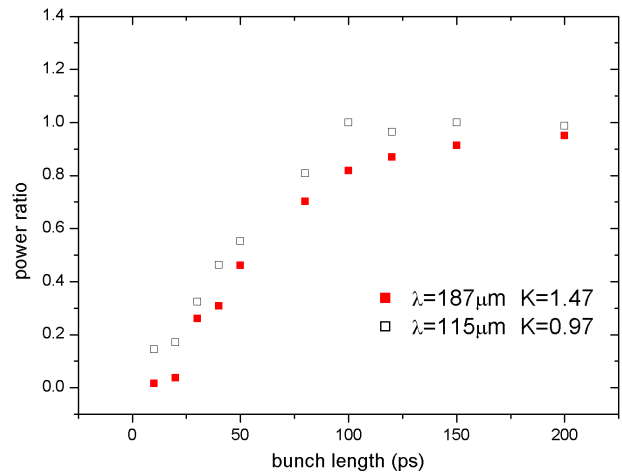


図4 : 電子バンチ長による S A S E 光の出力パワーの相対比

4 . まとめ

シミュレーションの結果では、エミッタンス及びエネルギー拡がりの効果は (2) 式により評価できる事がわかった。また Slippage の効果により S A S E 光の出力パワーは一次元モデルによる理論値よりも小さくなる。これまでの実験では、一次元モデルに補正を加えた (2) 式と比較してきて、特定のパラメータを用いた計算値と一致するとしてきた。本研究会ではシミュレーションと実験結果の比較をし、発表する。Slippage の効果により、出力パワーが小さくなった可能性があり、詳しく検討する。またシミュレーションで求めたスペクトル幅が小さくなることについても検討の必要がある。

参考文献

- [1] R.Kato, et al.,Nucl.Instr.and Meth. A475 (2001) 334; R.Kato, et al.,Nucl.Instr.and Meth. A445 (2000) 164
- [2] K.J.Kim, et al.,Nucl.Instr.and Meth. A250 (1986) 396