

[08-A06]

GENERATION OF SASE IN THE FAR INFRA-RED REGION

T. Okita, T. Igo, T. Konishi, R. Kato, R. Kumar, S. Suemine, S. Okuda and G. Isoyama

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

ABSTRACT

We are conducting experiments of self-amplified spontaneous emission (SASE) using the high-intensity single-bunch electron-beam from the L-band linac at ISIR, Osaka University. When a single bunch beam of an energy between 12 and 15 MeV passed through a 32 period undulator with the period length 6 cm, emission of the high intensity radiation was observed around $150 \mu\text{m}$, which is considered to be SASE. The properties of SASE were measured as a function of the undulator parameter (K-Value) and of the electron charge per bunch. The results of these experiments are presented in this paper.

赤外領域における SASE の発生実験

1. 序論

X 線レーザ実現の有力な候補に、単一通過型 FEL(Self-Amplified Spontaneous Emission, SASE) が考えられている。阪大産研では赤外自由電子レーザの研究を行っているが¹⁾、1991年に同じ装置を用いて波長 $20 \mu\text{m}$ と $40 \mu\text{m}$ において SASE の発生とその測定に成功している²⁾。

これらの実績を元に、我々は近年本格的により広い波長域($10 \sim 150 \mu\text{m}$)で SASE の原理検証及び発生メカニズムの解明を目的とした実験研究を開始した。

エネルギー $12 \sim 15\text{MeV}$ の単バンチ電子ビームが、周期長 6cm 、周期数 32 のアンデューレータを通過する時に発生する波長 $150 \mu\text{m}$ 付近の強

い光を、アンデューレータの K 値や単バンチビームの電荷量の関数として測定した。これらの実験結果を報告する。

2. 実験配置及び実験条件

2.1 実験配置

実験配置を図 1 に示す。阪大産研の L-band linac には 3 台の Sub Harmonic Buncher(SHB)があり、単バンチ当たり最大 73nC の電荷量をもつ単バンチビームを加速することが出来る。使用した電子銃は EIMAC 社製 YU-156(cathode area 3cm^2)である。

2.2 実験条件

ビーム特性測定を行い、アンデューレータ通過直後の電荷量は 30nC 以上、典型的なバンチ長は約 20ps であることを確認した。これから尖頭ピーク電流は 1.5kA 以上となる。L-band linac からの電子ビーム及びアンデューレータの主要なパラメータを表 1 に示す。典型的なエネルギースペクトルを図 2 に示す。SASE 光の Temporal Profile の測定には、波長 $50 \sim 150 \mu\text{m}$ に検出感度をもつ Ge-Ga 半導体検出器を使用した。

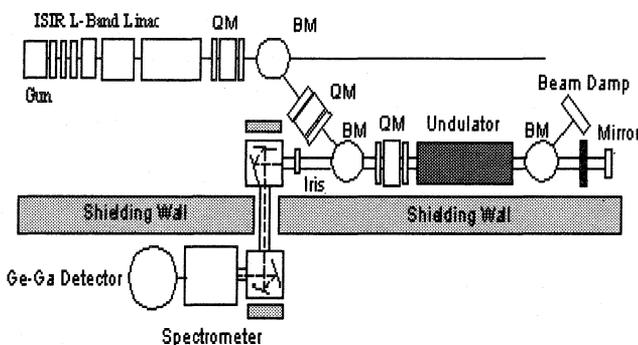


Fig. 1. Schematic configuration for SASE experiments. QM and BM denote Quadrupole Magnet and Bending Magnet, respectively.

Table. 1. Main parameters of the single-bunch electron-beam and the undulator.

<u>Electron-beam</u>	
Mode	Single
Electron peak energy	12~15 MeV
Energy spread (HWHM)	1.1~3 %
Charge per bunch	22~38 nC
Bunch length	20 ps
Norm.emittance	150-250 π mm mrad
Injection peak current	1.5 kA
Repetition rate	30 pps
<u>Undulator</u>	
Total length	1920 mm
Period length	60 mm
Number of period	32
Undulator gap	30-120 mm
K-Value	0.013-1.472

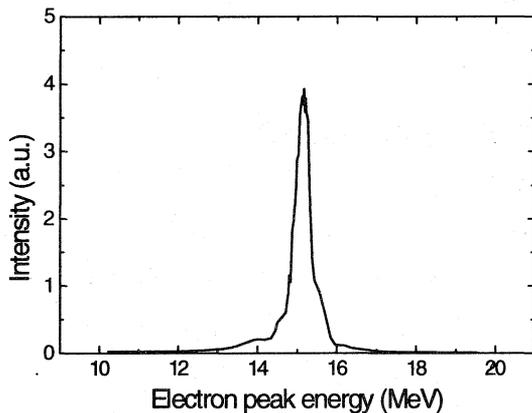


Fig. 2. Typical energy spectrum of the single-bunch electron-beam from the L-band linac.

3. 実験結果及び解析結果

3-1 Temporal Profile

図 3 に波長 $150\mu\text{m}$ 付近で観測した SASE 及びコヒーレント放射と思われる Temporal Profile を示す。波長は、電子ビームの Lorentz factor γ 及び Undulator parameter (K 値)により(1)式を用いて計算することが出来る³⁾。

$$\lambda = \lambda_u / 2\gamma^2(1+K^2) \quad (1)$$

Temporal profile による SASE 及びコヒーレント放射の区別は以下の通りに行った。

- (1)SASE の強度は、コヒーレント放射のそれに比べて遥かに大きい。(3~10 倍程度)
- (2)SASE は強度の変動が激しく、消失してしま

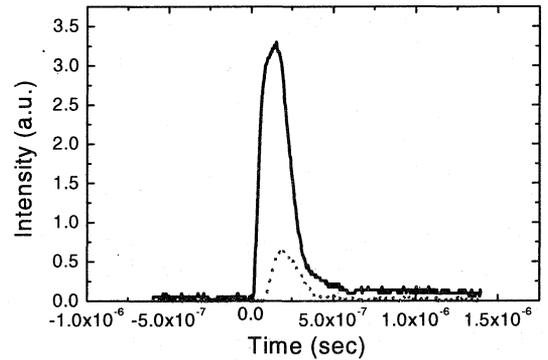


Fig. 3. Temporal profile for the wavelength $150\mu\text{m}$. The solid line and the dotted line are probably attributed to SASE and coherent radiation, respectively.

うことがあるのに対し、コヒーレント放射は安定で強度がゼロになることは殆どなく、常に観測される。

3-2 K 値に対する光強度の測定結果

Undulator parameter (K 値) の変化に対する光強度の測定結果を図 4 に示す。■及び○データはそれぞれ SASE 及びコヒーレント放射の依存性であると考えられる。理論的には SASE の強度は以下の式で与えられる⁴⁾。

$$I \propto \exp(a(K(J_0(\xi) - J_1(\xi))^{2/3})) \quad (2)$$

ここで、 a は定数、 $\xi = K^2/2(1+K^2)$ 、 J_0, J_1 は第一種、第二種ベッセル関数である。しかし実験結果によると、K 値が 1.08 を超えてからは(2)式で表されるような著しい強度の増大は見られない。

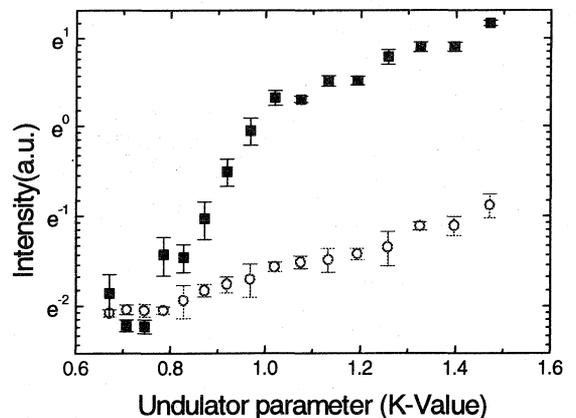


Fig. 4. Dependence of the intensity on the undulator parameter (K-Value). The symbols ■ and ○ represent SASE and coherent radiation, respectively.

この原因として、ミラーでの回折損失による影響や光の飽和、検出器の素子の感度のよる影響等が考えられるが、詳しい原因については現在検討中である。一方、コヒーレント放射では、SASEのような著しい強度の増大は見られない。

3-3. 電荷量に対する光強度の測定結果

次に、単バンチ電子ビームの電荷量の関数として光強度の測定を行った。測定結果を図5に示す。■及び○データはそれぞれ SASE 及びコヒーレント放射の測定を示す。理論的には、SASE の強度は電荷量に対し指数関数的に増大すると考えられている⁴⁾。しかし実験結果によると、電荷量が 4~5nC を境に強度はほぼ一定していた。この理論との不一致の原因については現在検討中である。

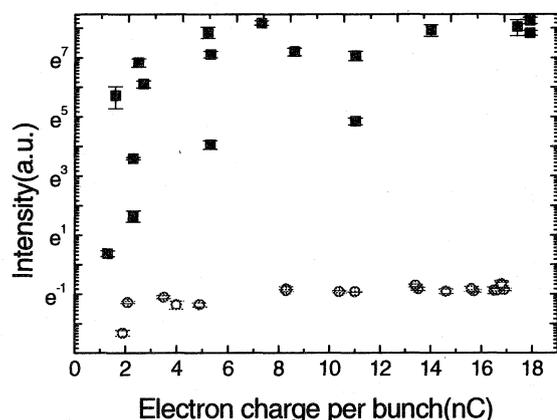


Fig. 5. Dependence of the intensity on the electron charge per bunch. The symbols ■ and ○ represent SASE and coherent radiation, respectively.

4. 1次元モデルの成立条件

上記の議論は、電子ビームの横方向の広がりやエネルギー幅等実際のビームの性質を無視している。しかし、以下の条件が成立する時には電子ビームを1次元モデルによって単純化できる⁵⁾。

(a) $\epsilon < \lambda / 4\pi$ (電子ビームのエミッタンスが光の回折限界でのエミッタンスより小さい。) エミッタンスは $2 \sim 5 \times 10^{-6} \pi \text{ m rad}$ であり、光の波長

は $150 \mu\text{m}$ 程度であるからこの条件は十分満たされる。

(b) $L_G < L_R = 4\pi \epsilon \beta / \lambda$ (ゲイン長がレイリー長より短い。) ゲイン長はエネルギー 12-15MeV の範囲で 0.1 程度である。また $\beta \approx 1$ を仮定すると、レイリー長は 1 のオーダーになるのでこの条件も満たされる。

(c) $\Delta \gamma / \gamma < \Delta \lambda / \lambda$ (電子ビームのエネルギー幅が飽和時の光のバンド幅より小さい。) エネルギーが 12-17MeV 程度のとき、エネルギー幅 (HWHM) は 0.02-0.03 である。飽和時の光のバンド幅は FEL-parameter ρ に等しく、0.03-0.05 程度である。したがって、この条件も容易に満たされる。

これらの結果から、赤外領域の広い範囲で SASE を発生し得ることは十分に可能であると考えられる。

5. まとめ

我々は、ビームエネルギー 12~15MeV の単バンチ電子ビームがアンデューレータを通過する時に発生する、波長 $150 \mu\text{m}$ 付近の強い光を K 値や電荷量の関数として測定した。この強い光は SASE である可能性が高い。今後は、より広い波長域での光強度の測定、飽和時の光の相対的バンド幅の測定、実験結果と SASE 理論との比較・検討等を行っていく予定である。

6. 参考文献

- 1) S.Okuda: Nucl.Instr.and Meth.A358(1995)244-247
- 2) S.Okuda: Nucl.Instr. and Meth.A331(1993)76-78
- 3) J.B.Murphy and C.Pellegrini: Introduction to the physics of the free electron laser, in Laser Handbook, 6 (1990) North-Holland Pub. Co
- 4) R.Bonifacio, C.Pellegrini and L.M.Narducci: Opt Comm.,50,373(1984);
- 5) K.-J. Kim: Nucl. Instr. and Meth.A358(1995)32