

# 自由電子レーザーとクラシカルレーザーを融合した小型ハード X 線レーザー の開発

## HYBRID LASER COMBINING FLEE-ELECTRON AND CLASSICAL LASERS

山田 廣成

Hironari Yamada

Photon Production Laboratory, Ltd. & Ritsumeikan University

4-2-1 Takakaichominami, Omihachiman, 523-0898, Japan

### Abstract

Proposed X-ray laser scheme uses energetic electron beam (e-bam) like a free-electron laser (FEL), but the gaining process is different. Undulator is not used. Instead photon beam is wiggled by mirror. Multiple targets placed periodically along the e-beam form optical cavities. Two gaining processes are involved. In one process e-beam hit the targets and generates coherent X-rays. While e-bam and photon beam merge at the target coincidentally, forced emissions appear which are ruled by the Einstein's A and B coefficients low. In one another process micro bunching are generated which is similar to the FEL gaining process. It is a kind of seeded FEL. If the transition radiation is the mechanism, the seed is coherent from the beginning of the lasing process. If Cherenkov or fluorescent radiation is selected the seed is monochromatic from the beginning. As a whole we expect high gain for hard X-ray laser.

### 1. はじめに

コヒーレントなハード X 線ソースは、SASE 型の自由電子レーザー (FEL) で開発が進み、幾つかの大型放射光施設で実現され、素晴らしい利用成果が報告されている “Ishikawa et al (2012)” “Amann et al (2012)”。相対論的な電子ビーム (e-beam) を用いるが、現在のところ、電子エネルギー 1 GeV 以上、アンジュレーター長 100 m、電子ビームのエミッタンス  $10\text{nm} \cdot \text{mrad}$  以下を必要とするため、その製造は容易では無く、この技術を展開して多くのユーザーに提供するのには困難である。製造コストが 100 MUS\$ というのも展開を妨げる大きな理由である。従って、低価格、低エネルギー、小型のハード X 線レーザーを開発するのが我々のミッションである。我々の開発ターゲットは、電子エネルギー及び X 線オプティカルキャビティ長を 1 桁下げることにある。電子エネルギー 100MeV 以下、キャビティ長 10m を達成するレーザーは、FEL でも古典的レーザーでもない、FEL と古典レーザーを融合するハイブリッドレーザーであり、その提唱が本論文の目的である。

### 2. ハイブリッドレーザーの構成

ハイブリッドレーザー (HL) の構成を Fig. 1 に示す。周期構造を持った X 線ターゲット列とシリンドリカルな反射ミラーで構成される。長さは約 10m である。採用する電子エネルギーは、100MeV とし、加速高周波に S-バンドを使用するならば、長さ 1cm ほどのマクロバンチが 10cm おきに 100 ほど周期的に並んでいることを想定する (計算を簡単にするた

めに大よその値としている)。全長は約 10 m である。ターゲットは厚さが 100 nm の薄膜状で、間隔  $l=10 \mu\text{m}$  の間隔で、一つのグループに 1000 個ほどが並んでいる。この様なグループが 100 ほどあり、全長が 10 m になる。X-バンドの加速器を用いるならば、もっと短くすることができる。

本装置は、自由電子レーザー (FEL) として働くがアンジュレーターは用いない。電子ビームをウイグルする代わりに光ビームをウイグルする。シリンドリカルミラーで反射された光は規則正しく電子ビームと交差する。光の電場は電子の進行方向の成分を持つから、電子ビームを加速または減速する。電子ビームと光ビームの位相をそろえるならば常に減速モードを選択できる。Fig. 1 は第 1 のマクロバンチ中の第 1 のマイクロバンチから発生した光が、第 2 のマクロバンチの、第 1 のマイクロバンチと接触して電子と相互作用すると共に、同じ場所に有るターゲットと衝突して光を放射する様子を示している。第 2 のマイクロバンチでは、自発放射と誘導放射が起こる。

電子ビームと光ビームの位相をそろえるには、 $2L=n' c/f_0$  とすれば良い。ここで、 $2L$  は発生した光が次に電子ビームと交差するまでに進んだ距離である。 $c$  は光速、 $f_0$  は電子加速器の RF 周波数であるから、 $c/f_0$  はマクロバンチ間の距離である。 $L$  はシリンドリカルミラーの半径を変えることにより、変えられる。 $n'$  は整数であり、選択可能である。X 線領域のレーザーを作るには、全反射ミラーにするために、放射角度を 1 度以下にすべきであるからミラーの径は 1cm 以下にすべきだろう。10 keV X 線の場合には、反射角を 20 mrad とすると、ミラー半径は 5 mm で  $L=25\text{cm}$  となり、 $n'=5$  を採用することになる。発振波長  $\lambda$  は、Fig. 1

#hironari@photon-production.co.jp

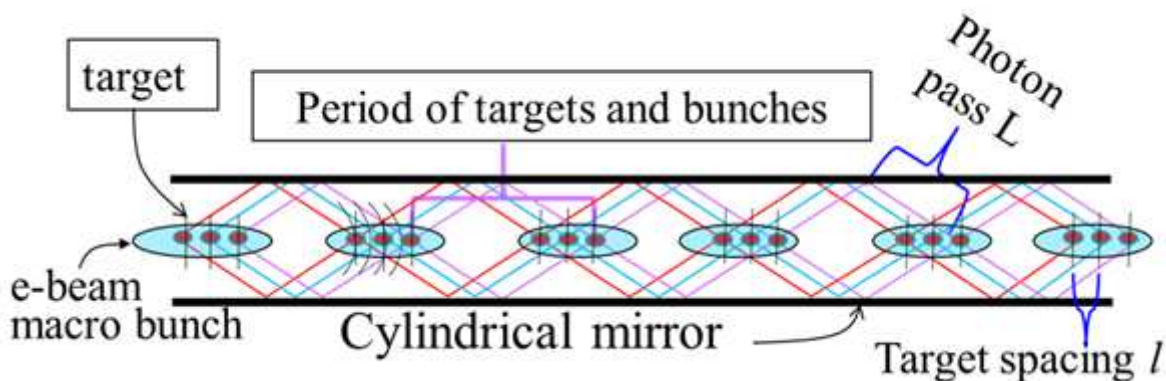


Figure 1: Schematic drawing of the hybrid laser system. It is composed of 10mm diameter cylindrical X-ray mirrors, about 100 sets of target assembly, each set is made of 1000 of 100 nm thick diamond like carbon films placed periodically in 10µm interval. Photon beam is wiggled so to cross the e-bam generate strong electric field toward the electron velocity.

の  $l$  を用いて、関係式  $m\lambda = l/\gamma^2$  で決まる。  $m$  は整数である。ここで  $\gamma$  は規格化された電子エネルギーである。なお、  $l$  はマイクロバッチの間隔でもある。 10keV レベルの X 線を発生するには、  $\gamma$  が 200 のときに  $l = 10\mu\text{m}$  とすれば、モードの数  $m$  は 25 となる。対となる 100 nm 厚の金属フィルムはオプティカルキャビティ (OC) を構成する。即ち、HL は、数 1000 の OC で構成される。金属フィルムには、X 線を反射する機能は無いから、OC に定在波が発生するわけでは無いが金属フィルムは、X 線を発生させる媒体であり、位相をゼロに固定する働きがある。発生するレーザーモードは、  $\text{TM}_{r0z} = (1, 1, m)$  となる

### 3. レーザー発振原理

HL レーザーには 2 つのゲインプロセスが関与する。クラシカルレーザー (CL) と自由電子レーザー (FEL) プロセスである。CL プロセスとは、所謂誘導放射のことである。高エネルギー電子がターゲットに衝突すると制動放射、遷移放射、シンクロトロン=チェレンコフ放射 “Yamada (2010)” を発生するが、連続状態へ遷移が起こる場合にも誘導放射が起こることを山田等は量子力学的に証明している “Ejike & Yamada (2011)”。即ち、遷移放射やシンクロトロン放射に対してもアインシュタインの A B 係数法則を適用出来る。従って、高エネルギー電子がターゲットをポンプして反転分布をつくれれば、レーザー発振が起きることになる。しかしながら、制動放射や遷移放射で作られる反転分布の寿命は非常に短い。そこで提案は、電子ビームとレーザービームが同時にターゲットに侵入するよう同期をとれば良い。一方、FEL プロセスは通常はアンジュレーターを

用いて電子ビームを蛇行させるが、ここでは、電子ビームは直進させ、レーザービームを蛇行させる。レーザービームを蛇行させるのにシリンドリカルミラーを用いるが、図 1 に示すように、レーザービームは周期的に電子ビームをクロスする。従って、レーザービームは電子の進行方向に電場成分を持ち、これが電子を加速・減速させて電子ビームにマイクロバッチングを発生させる。この機構は、実は、山田が発明した、光蓄積リング型レーザー “Yamada (1991)” と同じであり、遠赤領域でそのレーザー発振が実証されている “Yamada (2005)”

さらに本 FEL は、シード型の FEL である。前述のように、ターゲットから発生した X 線がシードである。周期的に並んだターゲットにより、モードが決定している。キャビティには既に、縦方向モード  $m$  というマイクロバッチが生成していると考えるのが良いだろう。従って、レーザー発振は極めて早く飽和に到達するであろう。結果として、マイクロバッチ内に  $\delta$  という電子数が有れば、X 線強度は  $\delta^2$  になる。

次に、レーザーゲインを求めてみよう。先ず誘導放射強度を Fig. 2 に示したターミノロジーを用いて計算する。図は、  $i$  番目のターゲットに電子ビームが衝突した様子である。その時の電子ビームのチャージ量が  $Q_i$ 、ターゲットで透過したチャージ量が  $\eta Q_i$ 、  $\mu$  は減衰係数、  $S_i$  は自発放射であり、放射断面積  $\sigma$  を用いて、  $\sigma Q_i$  とかける。X 線強度を  $I_i$ 、誘導放射量を  $I_i F_i$  ターゲットで減衰した光子量は  $\mu I_i$  であり、  $\mu$  は減衰係数である。

誘導放射率  $F_i$  は、アインシュタインの AB 係数法則に従うので、次の式が成り立つ、

$$F_i \equiv B_{10} = \pi^2 / \omega^3 A_{10} \equiv \pi^2 / \omega^3 S_i \quad (1)$$

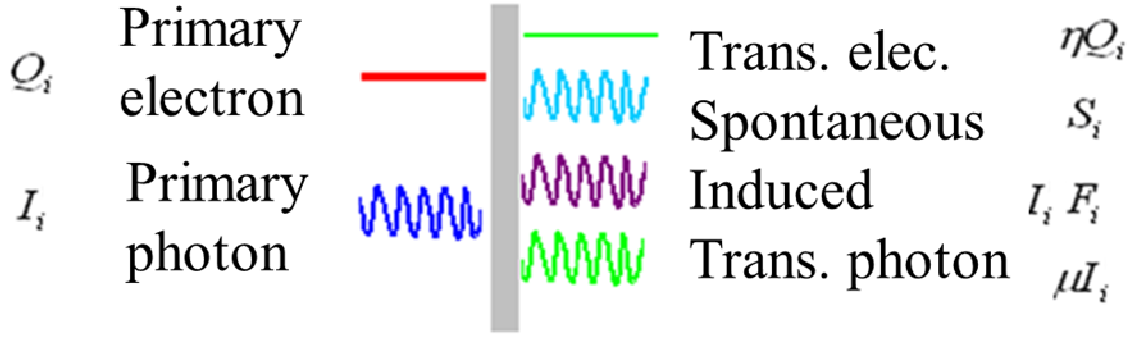


Figure 2: Notations used to describe the lasing process. Primary electron and photon beams are hitting target  $i$  and generate transmitted electron beam, spontaneous radiation, induced radiation, and transmitted radiation.

ここで、 $B$  は誘導放射率であり、 $A$  は自発放射率である。従って、1 つのバンチで発生する X 線パワー  $I$  は各ターゲットで発生し、ターゲットで減衰した自発放射と誘導放射の和になる、

$$I = \sum_{i=1}^n \mu^{n-i} I_i$$

ここで、 $n$  はマクロバンチが一度に遭遇するターゲットの数である。そして、これをイニシャルの電子ビー強度と放射断面積で書き換えるならば、

$$\begin{aligned} I_{i+1} &= S_i + I_i(\mu + F_i) = S_i(1 + \mu + kS_i) \\ &= \sigma\eta Q_i(1 + \mu + k\sigma\eta Q_i) \end{aligned} \quad (2)$$

$$I = \sum_{i=1}^n \mu^{n-i} I_i \quad (3)$$

$$= \sum_{i=1}^n \mu^{n-i} \sigma\eta Q_i(1 + \mu + k\sigma\eta Q_i) \quad (4)$$

$$\cong \sum_{i=1}^n \mu^{n-i} (\sigma\eta^{i-1} Q_0(1 + k\sigma\eta^{i-1} Q_0)) \quad (5)$$

$$= \sigma Q_0 \mu^{n-1} \frac{1 - (\eta/\mu)^{n-1}}{1 - (\eta/\mu)} (1 + k\sigma Q_0), \quad (6)$$

となる。ここで、 $k$  は  $\pi^2/\omega^3$ 、 $Q_0$  は初期のビームカレントである。

次に、光ビームのモードやフェーズは、初期より、ターゲットにより決定されているので、コヒーレントな放射が発生していると考えれば、

$$I \geq \sum_{i=1}^n \mu^{n-i} S_i I_{i-1} = \sum_{i=1}^n \mu^{n-i} (\sigma\eta^{i-1} Q_0)^2$$

$$= \mu^{n-1} \sigma^2 Q_0^2 \left( \frac{1 - (\eta/\mu)^{n-1}}{1 - (\eta/\mu)} \right)$$

(7)

が得られる。実は、簡単のために誘導放射の項  $F_i I_i$  をここではかなり小さいものとして無視している。そして、さらには、FEL プロセスにより、マイクロバンチングが発生していると考えれば、一つのマイクロバンチからの放射は、マイクロバンチの電荷量  $\delta$  を用いて、

$$I = \mu^{n-1} \sigma^2 (1000\delta^2)^2 \left( \frac{1 - (\eta/\mu)^{n-1}}{1 - (\eta/\mu)} \right) \quad (8)$$

とかける、1バンチ中の電荷量を  $\delta = \frac{Q_0}{1000}$  としている。 $Q_0$  を  $10^7$  電子とするならば、 $\delta$  は  $10^4 \delta^2 = 10^8$  となる。

#### 4. 数値シミュレーション

放射メカニズムとしては、チェレンコフ放射や遷移放 “Yamada (2011)” “Toyosugi (2017)” を考える。強度としては、電子一個あたり、単位放射角あたり、 $10^{-3}$  光子/0.1%bw/mrad<sup>2</sup>/electron である。そこで、10 keV X 線領域の HL を考える。電子ビームが、1000×100 の 100nm 厚カーボンナノチューブ (CNT) シートもしくはダイヤモンドライクカーボン (DLC) を透過するとする。トータルのはきは、10mm である。DLC の密度は、0.02 to 0.15 [g/cm<sup>3</sup>] である。100 MeV 電子の放射距離は (radiation length) は DLC に対して 42.4 [g/cm<sup>2</sup>] = 282 cm “Breuer (1971)” である。従って、とたる 10mm 厚 DLC による電子の減衰はほとんどないことがわかる。X 線の吸収係数は 10keVX 線に対して  $5.89 \times 10^{-3}$  [cm<sup>2</sup>/g] “Henke (1982)” であるから透過率は 0.999996 である。結果として、7 式は、

$$\mu^{n-1} \left( \frac{1 - (\eta/\mu)^{n-1}}{1 - (\eta/\mu)} \right) \approx 100$$

であり、 $I=100 \times 10^{-6} \times 10^{22} = 10^{18}$  photons/100 bunches が得られる。電子一個の衝突による X 線の発生効率を  $10^{-3}$  光子/0.1% bw/mrad<sup>2</sup>/electron であり、レーザー発振したときの X 線パワーとしては 1.6 kJ/100 バンチが得られる。レーザー発振していないときでさえ光子数は  $I=10^{11}$  光子/パルス (160  $\mu$ J/100 バンチ) であり、マイクロバンチングが 10% 起こるだけで、 $I=10^{14}$  光子が得られる。

一方、強制誘導放射の効果は、かなり小さいとわかる。係数  $k$  は  $\pi^2/\omega^3$  に比例するので、振動数  $\omega$  と共に減衰する。10 keV X 線では、光子数が  $2.5 \cdot 10^{17}/s$  であっても、 $\pi^2/\omega^3 = 5.8 \cdot 10^{-53}$  であるから無視できるほど小さい。

## 5. まとめ

ハイブリッドレーザーは古典的レーザーと FEL を融合したものであるが、1000 に上る OC によりレーザーモードがロックされる点で古典的である。OC 内に X 線定常波が発生するわけでは無いが、ターゲット位置で位相がゼロになる位相のそろった進行波が発生する。FEL で発生するアンジュレーター光の場合に比べて、位相が当初より完全にそろっているのが特徴である。従って、位相の揃った進行波が

電子ビームと相互作用することにより電子ビームのマイクロバンチングを発生させる増幅機構は、相互作用の初期の段階から機能することになり、旧来の FEL よりも、極めて早くにサチュレーションが起これると想定してよい。第 2 マクロバンチとの相互作用で、ほぼ完ぺきなマイクロバンチングが発生する可能性がある。そして、このマイクロバンチが、ターゲットを通過するときには、極めてコヒーレンスの高いコヒーレント長 100mm 程度の X 線レーザーが発生する。

## 参考文献

- Ishikawa T., Nature Photonics 6, 540- 544 (2012).  
Amann J., Nature Photonics 6 693 (2012).  
Ejike O., IEEE J. Quantum Electron. (2010)  
DOI: 10.1109/JQE.2010.2051322.  
Reiche S., Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China.  
Yamada H., J. Synchrotron Rad. (2011). 18.  
Toyosugi N., J. Synchrotron Rad. (2007). 14, 212- 218.  
Breuer H., Nuclear Data Table 9, 169-233 (1971).  
Henke B.L., Nuclear Data Table 27, 1 (1982).