

# 共鳴遷移放射による EUV 光源の検討

## STUDY OF TRANSITION RADIATION EUV SOURCE

天野壮#, 竹内雅耶, 宮本修治

Sho Amano #, Masyaya Takeuchi, Shuji Miyamoto

LASTI, University of Hyogo

### Abstract

We are studying a EUV source by resonant transition radiation that emits radiation at  $13.5 \text{ nm} \pm 1\%$ . In the optimal design with a Be foil number of 6, its thickness of  $0.25 \mu\text{m}$  and foils separation of  $10.6 \mu\text{m}$ , the calculation indicated that the maximum output power of 17 mW was obtained when the electron beam was injected to the foils with an energy of 15 MeV and a current of 100 mA. The angle of the output beam divergence was found to be within  $\pm 200 \text{ mrad}$ . A higher current accelerator is required to obtain higher EUV power by the resonant transition radiation.

### 1. はじめに

次世代半導体製造技術である EUVL(Extreme Ultraviolet Lithography) 用露光光源として  $13.5 \text{ nm}$  ( $92 \text{ eV}$ )光を放射する大出力( $\sim 250 \text{ W}$ )レーザープラズマ光源の開発が進められている。一方最近では、その開発の遅れから、加速器ベースの FEL による EUVL 光源の可能性も検討されている。ここで、我々は同じ加速器ベース光源であるが、第3の方法として、遷移放射による EUV 光源を考えた。遷移放射はシンクロトロン放射に比べて $\sim 2$ 桁強度が強いと言われ、構成も簡単であるため検討に値するであろう。過去、共鳴遷移放射に関する実験は数多く行われたが、それらは数 keV の X 線領域での研究[1, 2]であり、EUV 領域での研究は Umiasowski らの計算[3]ぐらいしか見当たらない。しかしながら彼らの計算では、媒質による光吸収を無視しており、実際とはかけ離れている。そこで我々は、光吸収まで考慮した最適設計を行い、その時の基本性能を明らかにして、共鳴遷移放射による EUVL 光源としての可能性を探る事を目的の第一とした。次に、EUVL 用大出力でなくても、低出力でもコヒーレントであればマスク欠陥検査用光源として有用であるから、これへの応用を次善の目的とした。

本研究は先ず計算による検討を行い、実証実験を兵庫県立大学が所有する小型電子線形加速器 LEENA (電子エネルギー最大  $15 \text{ MeV}$ 、マクロパルスピーク電流  $100 \text{ mA}$ ) で行う事とした。従って、モデル計算での電子ビームパラメータは LEENA の値を使った。本論文ではそのうち、多層膜ターゲットを構成する薄膜材料を選定し、それを用いた光吸収を考慮した最適設計(薄膜の厚さ、薄膜間距離、枚数)とその基本特性(出力、放射角分布、スペクトル分布)について計算した結果について報告する。

### 2. 共鳴遷移放射

遷移放射とは、異なる誘電率を持つ媒質の境界面を荷電粒子が通過する時に光子を放出する現象である。金属薄膜に電子を入射すると、入射電子と鏡像電荷で

電気双極子を形成し双極子放射を生じる。ターゲットとして複数の金属薄膜を一定間隔で並べた多層膜を使うと、一枚の薄膜の両面から、さらにそれぞれの金属薄膜からの生じた光が干渉・共鳴して、高強度でコヒーレントな光となる。これを共鳴遷移放射と呼ぶ(図 1)。

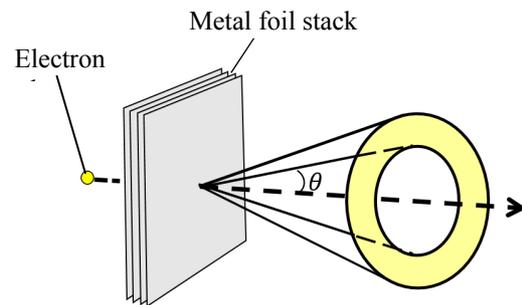


Figure 1: Resonant transition radiation.

一つの相対論的電子が共鳴遷移放射を起こす事によって生じる単位エネルギー当たり、単位立体角あたりの光子数  $dN/dEd\Omega$  は、次式で表される。

$$\frac{dN}{dEd\Omega} = F_1 F_2 F_3 \quad (1)$$

ここで、 $F_1$ は一つの境界面から放出された光子数、 $F_2$ は一枚の金属薄膜の両面からの光の干渉項、 $F_3$ は複数の金属薄膜からの干渉項である。 $F_1$ は次式で表される。

$$F_1 = \alpha \cdot E \cdot \left( \frac{\sin \theta}{2ch} \right)^2 (Z_1 - Z_2)^2 \quad (2)$$

ここで、 $\alpha$ は微細構造定数、 $c$ は光速、 $h$ はプランク定数、 $E$ は光子エネルギー、 $\theta$ は入射電子の進行方向に対する光子の放射角である。また、 $Z_{1,2}$ はそれぞれの媒質に関する関数(本論文では媒質 1 を真空、媒質 2 を金属薄膜とする)で、Formation length と呼ばれ次式で表さ

# sho@lasti.u-hyogo.ac.jp

れる。

$$Z_i = \frac{2\beta c}{\omega(1 - \beta\sqrt{\epsilon_i - \sin^2\theta})} \quad (i=1,2) \quad (3)$$

$\beta$  は光速で規格化した電子速度、 $\omega$  は光子の角周波数、 $\epsilon_i$  はそれぞれの比誘電率で

$$\epsilon_i = 1 - (\omega_i/\omega)^2 \quad (i=1,2) \quad (4)$$

$$\omega_i = \sqrt{\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (i=1,2) \quad (5)$$

である。 $\omega_i$  はプラズマ周波数と呼ばれ、 $N$  は電子密度、 $e$  は素電荷量、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率、 $m_e$  は電子の質量である。ただし真空の比誘電率 $\epsilon_1$ は1である。また、媒質1,2に Formation length 以上の厚さがない場合、遷移放射光は極端に減衰するため、各媒質はそれ以上の厚さがないなければならない。次に $F_2$ を式(6)に示す。

$$F_2 = 1 + e^{-\mu_2 l_2} - 2e^{-\frac{\mu_2 l_2}{2}} \cdot \cos(2l_2/Z_2) \quad (6)$$

ここで $l_2$ 、 $\mu_2$ は金属薄膜の厚さ、線吸収係数である。また、 $F_3$ は次式で表される。

$$F_3 = \frac{1 + e^{-M\sigma} - 2e^{-\frac{M\sigma}{2}} \cdot \cos(2M(l_1/Z_1 + l_2/Z_2))}{1 + e^{-\sigma} - 2e^{-\frac{\sigma}{2}} \cdot \cos(2(l_1/Z_1 + l_2/Z_2))} \quad (7)$$

と表せる。ここで、 $M$  は薄膜の枚数、 $l_1$ 、 $\mu_1$  は薄膜間距離、薄膜間距離の線吸収係数(本実験では真空より $\mu_1 = 0$ )、 $\sigma = \mu_1 l_1 + \mu_2 l_2$  である。また、ビーム入射時の出力 P(W) は

$$P = \int \int E \cdot \frac{dN}{dE d\Omega} dE d\Omega \quad (8)$$

となる。ここで、光子エネルギー $E$ 、放射角 $\theta$ の積分範囲は $13.5 \text{ nm} \pm 1\%$ 、 $0 \sim 90^\circ$  とした。

### 3. 計算結果

#### 3.1 薄膜材料の選定

真空中から金属多層膜ターゲットに電子ビームを打ち込むため、最適な金属薄膜材料を選定した。条件としては①プラズマ周波数がより大きいこと、②光の波長 13.5 nm(92 eV)での媒質の線吸収係数がより小さいことである。①は式(2)~(5)が示す通り、発生光子数を多くするため、②は式(6)(7)が示す通り光の減衰を少なくして放出光子数を多くするため必要である。各種の金属材料に対して、プラズマ周波数と吸収係数とを比べたのが表1である。これから、Be が最も他の金属に比べてプラズマ周波数が最も大きく、線吸収係数が非常に小さい

最適材料である事が判った。

Table 1: Properties of Metal Thin Film

金属	プラズマ周波数(eV)	吸収係数( $\mu\text{m}^{-1}$ )
Be	18.45	1.9
Ni	15.86	71
Al	15.78	27
Fe	15.29	47
Cu	10.79	62

#### 3.2 多層膜の最適設計

ターゲットとしてBe金属膜を選び、次にその最適な薄膜の厚さ $l_2$ 、薄膜間距離 $l_1$ 、枚数 $M$ を決定した。真空、Be中の formation length は放射角 $\theta = 0 \text{ rad}$ の時、 $Z_2 = 0.205 \mu\text{m}$ で最大となる。つまり、真空、Be薄膜の厚さはこれ以上の厚さでなければならない。この条件を元に、式(8)より、Be薄膜の枚数と遷移放射出力の関係を図2に示す。Be薄膜の枚数が6枚以降、出力がほぼ変化していない。薄膜が増えると放出される光子数は増加するが薄膜による光吸収も大きくなるため、ある枚数以降では出力は飽和する。図2より最適薄膜枚数は6枚とした。また、その時のBe薄膜の厚さ $l_2$ は $0.25 \mu\text{m}$ 、薄膜間距離 $l_1$ は $10.6 \mu\text{m}$ であり出力は約 $17 \text{ mW}@100 \text{ mA}$ となった。

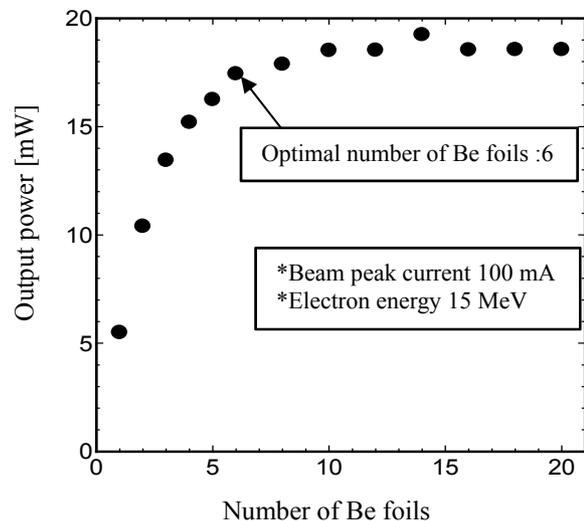


Figure 2: Dependence of output power on number of foils.

図3にBe薄膜の厚さ $l_2$ を一定にして薄膜間距離 $l_1$ を変化させた時と、 $l_1$ 一定で $l_2$ を変化させた時の出力変化を示す。これより、薄膜間距離 $l_1$ が変化した場合 $1 \mu\text{m}$ 単位の変化に対して、出力があまり変化しないのに対し、薄膜の厚さ $l_2$ が変化した場合 $0.1 \mu\text{m}$ の変化に対しても出力が敏感で大きく変化することが分かる。この結果より、多層膜ターゲットの製作精度が明らかになった。

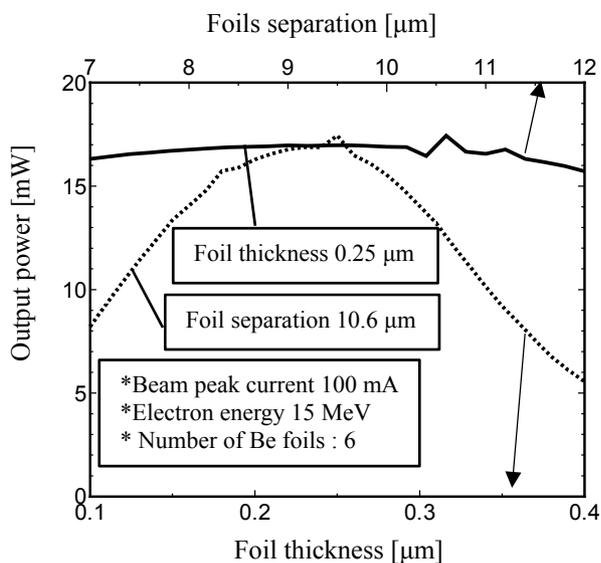


Figure 3: Dependence of output power on foil thickness and separation.

### 3.3 EUV 放射特性

上で求めた最適値( $l_1 = 10.6 \mu\text{m}$ ,  $l_2 = 0.25 \mu\text{m}$ ,  $M = 6$ ) を使って共鳴遷移放射の放射角分布を計算した。その結果を図 3 に示す。上図より、複数の角度でピークが見られ、第一ピークの角度は約 21 mrad であった。全体的には $\pm 200 \text{ mrad}$  のコーンに集中した放射と言える。

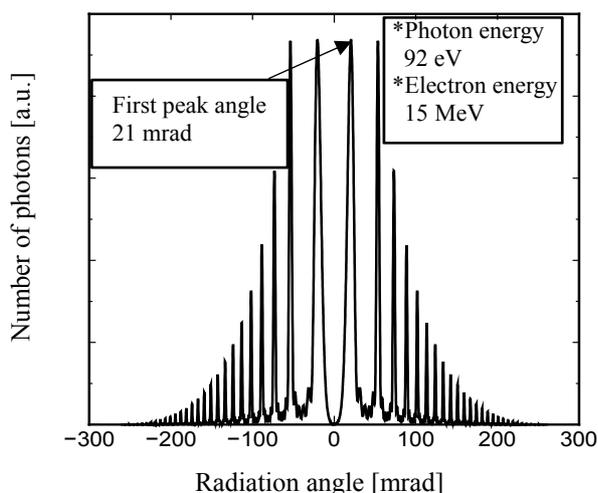


Figure 4: Angular distribution of resonant transient radiation.

## 4. まとめ

13.5 nm $\pm$ 1%の EUV 光源として、共鳴遷移放射を検

討した。15 MeV 電子ビームを6枚の Be 多層膜(最適薄膜厚さ 0.25  $\mu\text{m}$ 、最適膜間距離 10.6  $\mu\text{m}$ )に入射した時、ビーム電流 100 mA に対して全空間積分出力は 17 mW 得られる事が計算により判った。その時の放出分布は前方 $\pm 200 \text{ mrad}$ に集中する。

電流から 13.5 nm $\pm$ 1%の EUV 光への変換効率は 17% (W/A) と高効率であるが、この出力スケールアップ則を用いて EUVL 露光用光源に要求されている 250 W を得ようとする、平均電流 1.5 kA の加速器が必要となる。また、高出力化に伴う熱などによる膜へのダメージなど、その耐久性についても今後の課題である。

当面は 15 MeV 小型線形加速器 LEENA による原理実証実験を行い、これが検査用低出力 EUV 光源として応用展開できないか検討していく。

## 参考文献

- [1] P. J. Ebert *et al.*, "Transition X-rays from medium-energy electrons", Phys. Rev. Lett., 54, 1985, pp. 893-896.
- [2] M. A. Piestrup *et al.*, "Measurement of transition radiation from medium-energy electrons", Phys. Rev. A, 32, 1985, pp. 917-927.
- [3] K. Umiastowski, and A. Nguyen, "Transition radiation very soft X-ray source", Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res. B, 1994, pp.416-419.