

[14B-05]

Multi-mirror System II

- Application of Inverse Compton Scattering for Lithography X-ray Sources -

Yasuo Suzuki

IDX Corporation, 21-10, Higashigotanda 1 Chome, Shinagawa-ku, Tokyo, Japan

Abstract

A brilliant X ray source is proposed for lithography instruments with use of a multi-mirror system. The inverse Compton scattering between the stored electron beam in the storage ring and the stored photon beam in the multi-mirror system, is applied for the X-ray generation.

多面鏡システム II

—逆コンプトン散乱によるリソグラフィ用X線源—

1. はじめに リソグラフィ用X線源について
次世代半導体開発は、1GB以上のメモリーを目標として、新しいリソグラフィ用X線光源を必要としている。それには、波長10nm~13nmの軟X線を1秒あたり 10^{13} 個以上発生させる光源が要請されるという。[1]

本研究は、このX線を約10MeVの電子線と炭酸ガスレーザーガスレーザー光(10.6 μ m)により実現するものである。電子ビームと光子ビームそれぞれを蓄積リングと増幅機能つき多面鏡システム[2]により、逆コンプトン散乱の小さい衝突散乱断面積を克服し効率良い卓上装置でX線を発生しようというものである。

2. 逆コンプトン散乱

図1のように相対論的速度を持つ電子と光子を有る角度 θ_1 で衝突すると、光子の波長が変わつ

て散乱する。これを逆コンプトン散乱という。入射光子、散乱光子のエネルギーをそれぞれ k_1, k_2 とすれば、 θ_2 に散乱する光は次式で与えられる。 $K_2(\theta_2) = k_1(1 - \beta \cos \theta_1) / [1 - \beta \cos \theta_2 + k_1 \{1 - \cos(\theta_1 - \theta_2)\} / E_e]$ もし、 $k_1/E_e \ll 1$ 、 $\theta_2 \ll 1$ の場合には、発生する光の波長 λ は;

$$\lambda_2(\theta_2) = \lambda_1 (1 + \beta \gamma^2 \theta_2^2) / 4\gamma^2 (1 - \beta \cos \theta_1)$$

で表される。ここで、 λ_1 、 λ_2 はレーザー光及び散乱光の波長、 γ は電子ビームの運動エネルギーを静止質量エネルギー単位で表した量である。この式から、最も強力で実用的な炭酸ガスレーザーを用い、電子ビームエネルギーと角度 θ_1 の関数として散乱光の波長は表1のようになる。この表から8MeV、交叉角25度の場合*を選定する。(X線の広がり角は $1/\gamma$ はになるのでできるだけ高エネルギー電子ビームが望ましいが)

$\pi - \theta_1$ (rad)	7 MeV, λ_2 (nm)	8 MeV, λ_2 (nm)	9 MeV, λ_2 (nm)	10 MeV, λ_2 (nm)
0	12.27	9.553	8.142	6.291
0.436(25 degree)	12.88	10.02*	8.542	6.600
$\pi/4$	14.37	11.19	9.535	7.369
$\pi/3$	16.36	12.73	10.854	8.387

表1 交叉角 θ_1 と波長($\theta_2 = 0$ の場合)

さて、光子ビーム径が電子ビーム径より大きく、その相互作用領域を光子ビームがカバーする場合には、その散乱光の発生量Yは、単バンチあたり

$$Y = (1 - \beta \cos \theta_2) N_e n_p \sigma L / \beta \approx 2 N_e n_p \sigma L = 2 N_e N_p \sigma L / A \tau c \approx 2 N_e N_p \sigma / A$$

である。ここで N_e は1バンチ内の電子数、 N_p は1バンチ内の光子数、 n_p は光子密度、 σ はコンプトン散乱の衝突断面積(約 $0.5 \times 10^{-28} \text{ m}^2$)、Aは光子ビームの断面積、 τ は照射時間、cは光速である。したがって、もし、1秒あたり f_{RF} 回衝突する場合には、1秒あたりの発生量は、 $Y = 2 N_e N_p \sigma f_{RF} / A \text{ sec}^{-1}$ となる。電子、光子ビームのビームウエスト径を0.1mmと絞れるから、 $Y = 1 \times 10^{13}$ 、 $f_{RF} = 2.856 \times 10^9$ 、 $A =$

$(0.5 \times 10^{-4})^2 \pi$ とにおいて、 $N_e N_p = 0.27 \times 10^{24}$ が得られる。これは、1A相当($N_e = 2.2 \times 10^9$, 0.35 nC/バンチ)の電流を蓄積したところに、1バンチあたりの光子数 $N_p = 1.23 \times 10^{14}$ (6.6kW相当)を衝突させればよいことになり十分実現性の高いものとなる。

2. 装置の概念

本装置は主として、入射器としての電子線形加速器、電子蓄積リング、炭酸ガスレーザー、そして増幅機能つき多面鏡システムから構成される。2図。すべての機器は $f_{RF} = 2.856 \times 10^9$ で同期して運転されるとする。

(1) 炭酸ガスレーザーと増幅機能つき多面鏡システム

多面鏡システムは原研—KEK の中性子科学研究プロジェクトの荷電変換用に開発されたものであるがさまざまな分野で応用できるものである。3図。その運転モードとしては、集中ビームモード、10 p s の短パルスモード (研究会で説明)、多重度16 (片側多面鏡上の鏡面数)、とすれば、400W相当のレーザーでよいことになる。

また逆に、鏡面の耐熱力を1個の鏡面あたり40 kWとすれば100倍の光子密度が可能となり、つまり、 10^{15} 個/秒のX線がえられることになる。もし10.6 μ mの光に対しては反射率99.9%は得られるとすれば、1個の鏡面あたり40Wの損失となり、全体で40個の鏡面では約1.6kWの損失となるから、この分のエネルギーを増幅部で補えばよい。

蓄積リングの中の電子ビームは6 p s 程度にバンチしているとす。この電子ビームを十分カバーする体積をもつためレーザー光の長さを10 p s としよう。つまり、炭酸ガスレーザーを2896 MHz、10 p s で発振させる。このような極めて高い光子密度の短パルス化の方法は、4図のようなスライス方式がブルックヘブンの人人によって提案されている。[3]。その光をPockel cell と偏光子を使って増幅部つきの多面鏡システム中に入れれば、充分長い時間巡回させることができ大出力が得られる。

(2) 8 MeV電子蓄積リング

蓄積リングはレーストラック型とし2本の直線部をもつChasman-Green型ラティスを考える。ディスパージョンフリーの直線部の一方には入射部と加速部を、他方の直線部に多面鏡システムを配置する。RF周波数は2856 MHzであるから、波長は10.5 cmであり、1周3.15 mとしバンチ数は30とする。リングの曲率半径を20 cmとして直線部の長さは94.7 cmとなる。偏向磁石の強度は0.4から0.5Tで長さ5~6 cmの寸法となり、円弧部の残りの部分に4重極磁石を配置できる十分な余裕をもつ。電磁石でも永久磁石方式でも可能である。

この蓄積リングでもっとも問題となるのが、低エネルギー電子ビーム蓄積のためベータatron振動の減衰時間が長いことと、タウシェック時間が短いことである。前者は強力なレーザー光との相互作用によるダンピング作用、つまりレーザー冷却効果に期待する。[4]

電子のリング一周あたりの偏向磁石による放射減衰は次式で与えられる。

$$U_0 = 8.85 \times 10^{-2} E[\text{GeV}]^4 / \rho[\text{m}] \quad [\text{MeV/turn}]$$

$\rho = 6.0 \text{ cm}$ ($B = 0.44 \text{ T}$) として $U_0 = 6 \times 10^{-9}$ が得られ、 T_0 を周期として $1/\tau = U_0/2ET_0$ から、 τ は27秒となり、入射を考えると長すぎる。しかし、逆コンプトン散乱によるX線放射による放射減衰を考えると、

$N_e = 2.2 \times 10^{10}$ 個 X30バンチの電子が1秒あたり100eVのX線を 10^{15} 個を放出することから、8MeV電子の放射減衰時間 τ は1秒となる。この程度の減衰時間 τ は本計画のキーテクノロジーとして使えると思われる。[4]

タウシェック時間 τ' は次式から得られる：

$$1/\tau' = \pi^{1/2} c r_e^2 N_e F(\epsilon_A) / \gamma^3 V_b \sigma_x' (\Delta p/p)_c$$

ここで、 r_e は電子の古典半径、 $F(\epsilon_A)$ は運動量アクセプタンスと縦方向に変換された横方向の運動量の広がり σ_x' の2乗、 ϵ_A の関数である。 V_b はビームの体積、 σ_x' 水平方向の広がり、 $(\Delta p/p)_c$ は運動量アクセプタンスである。電子バンチの体積を長さ3mm x 2.5mm半径のビームとし、他は適当と思われる値を入れると15分となる。予想どおり短いがこの程度ならば入射法を工夫すれば問題ないと思われる。

(3) 電子線形加速器

入射はキッカーマグネット方式で4ターン入射とするか、スロー入射法にすればよい。2856 MHzのRF銃に加速管をとりつけ8MeVを得る。同じ周波数の加速管を用いて蓄積リングの加速キャビティとする。RF銃はホトカソードを利用し、30バンチX4ターン〔約40ns,0.25A〕分を1度あるいは数度にわけて1ppsパルス入射すればよい。

3. おわりに

多面鏡システムに増幅部を装着し大出力のレーザービームを蓄積・維持する。さらに、電子蓄積リングに電子ビームを蓄積する。この電子ビームと光子ビームを反応部に局所的に集中させることにより、逆コンプトン散乱をきわめて効果的効率的に発生させることができる。これにより卓上に置けるようなリソグラフィ用X線源(10-13 nm, $1 \times 10^{15}/\text{sec}$)の概念が構築することができる。

また、同じ方式により、レーザーの波長を変えることにより(たとえばYAGレーザー、1.06 μ m)により、ナノメーター程度のX線発生も可能となりX線顕微鏡用の波長可変の光源を開発できる。

参考文献

- [1] Hiroki Hane et al : Observation of Photons from Linac based Laser Compton Scattering, Proc. of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, p66 (1999).
- [2] Yasuo Suzuki : Multi-mirror System, Proc. of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp63 (1999).
- [3] I.V.Rogorelsky : Ultra-bright X-ray and gamma sources by Compton backscattering of CO₂ laser beams, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A411 pp172-187 (1998).
- [4] Zhirong Huang and Ronald D. Ruth : Laser-Electron Storage Ring, Physical Review Letters, Volume 80, pp976-979 (1998).

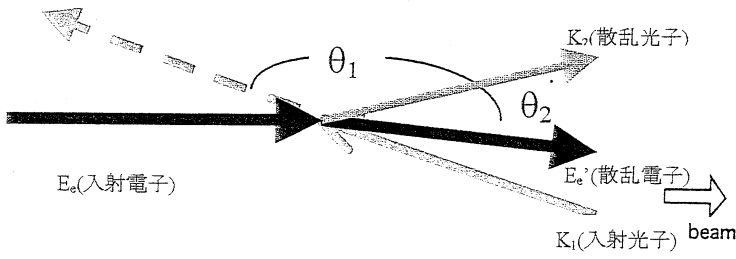


図1 逆コンプトン散乱

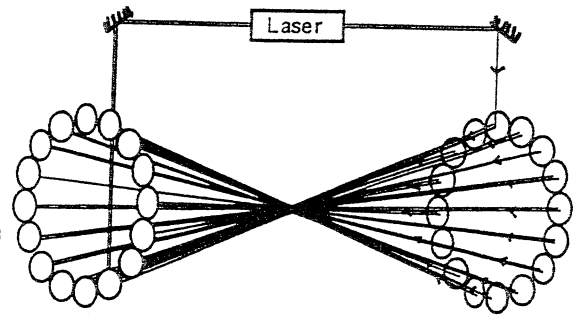


図3 多面鏡システムの光路 (往路)

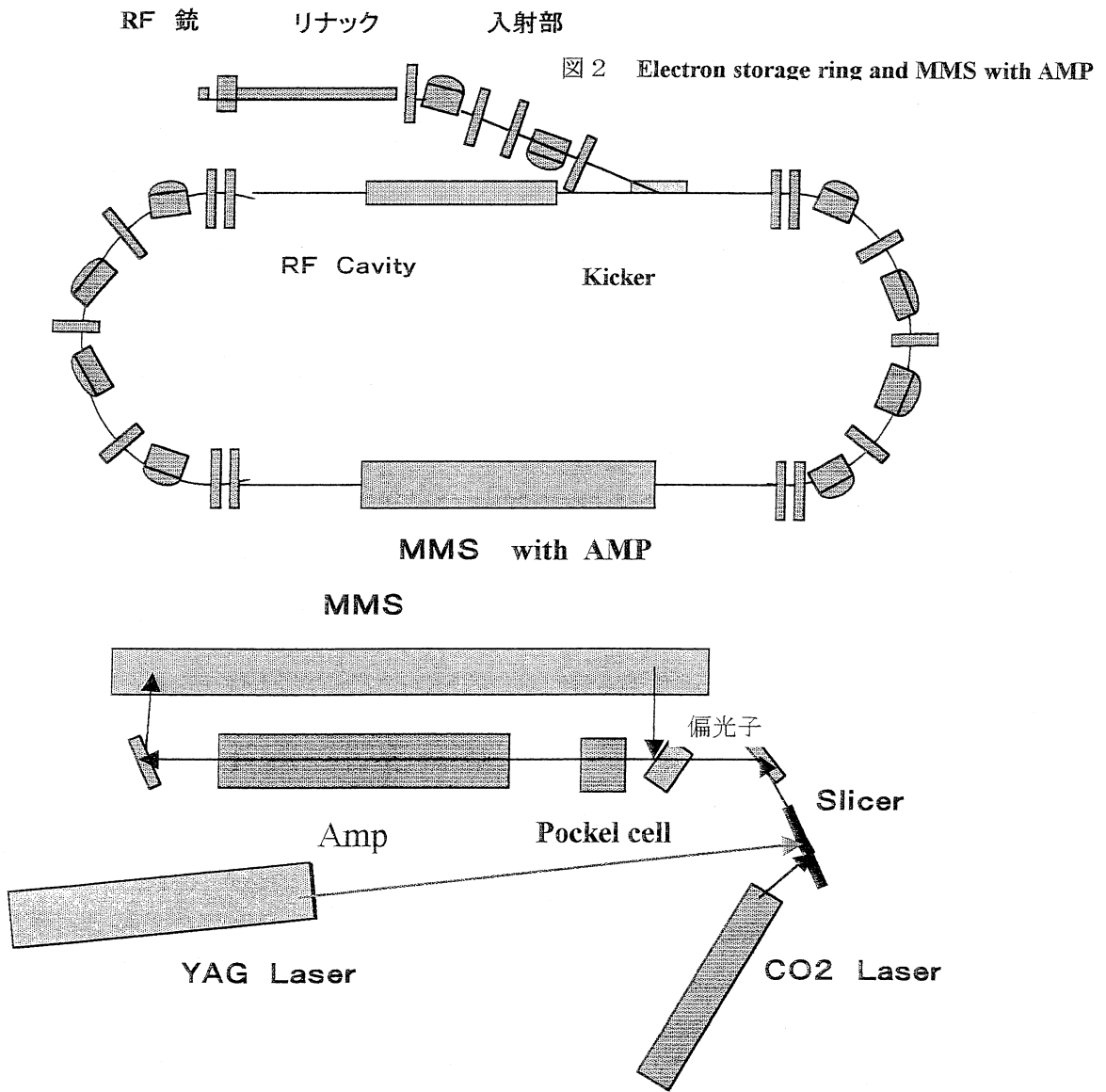


図4 10ps Co2 Laser and MMS with AMP