

蓄積リング自由電子レーザーによる高平均出力 EUV 光発生 の検討

A STUDY OF HIGH AVERAGE POWER EUV FREE ELECTRON LASER ON THE STORAGE RING

宮本修治^{#, A)}, 橋本 智^{A)}, 木下 博雄^{A)}, 田中 隆次^{B)}, 矢橋 牧名^{B)}, 石川 哲也^{B)}
Shuji Miyamoto^{#, A)}, Satoshi Hashimoto^{A)}, Hiroo Kinoshita^{A)}, Takashi Tanaka^{B)}, Makin Yhshi^{A)}, Tetuya Ishikawa^{A)}

^{A)} LASTI, University of Hyogo

^{B)} RIKEN, SPring-8 center

Abstract

Extreme ultra violet lithography (EUVL) is expected as a next generation semiconductor manufacturing technology. We have been studied a projection optics of EUVL, developments of resist and mask inspections systems at NewSUBARU synchrotron light facility. Reliable high-power source of EUV light is the critical issue at present for EUVL practical use. Research and development of an electron accelerator light source are considered as this countermeasure. Recently, a team in Shanghai proposed a probability of high power EUV light source using PEHG (Phase-merging Enhanced Harmonic Generation) by the storage ring. We start to consider the possibility of this PEHG - FEL testing by NewSUBARU storage ring.

1. はじめに

NewSUBARU放射光施設では、建設当初から、研究開発課題の1つとして、極端紫外線リソグラフィ(EUVL)技術開発[1]を目標とした。このため、当初の縮小投影露光光学系の実証につづき、放射光のコヒーレント成分を用いた多層膜ミラーの干渉計測、干渉露光システムを用いたレジスト(感光保護膜材料)開発、多層膜ミラー上に描画される集積回路マスクパタンの検査システム開発等を実施してきた。

EUVLは今後の16nm線幅の量産技術として予定されており、2020年には10nm線幅の量産技術として期待されている。このようななかで、EUV光源の高出力化と安定化が最大の課題と考えられている。現在までにEUV光源として、錫ドロップレットをCO₂レーザーで照射する、レーザー・プラズマ光源が開発されており、中間集光点での出力が100W程度が達成できており、最新ステッパーでは24時間で1000枚を超えるシリコンウェハの露光が実現できているが、今後250W、さらに1kWを超えるEUV光源出力と、安定な稼働率が求められている。

現在レーザー・プラズマEUV光源での高出力化のためのブレークスルーが見通せない状況のなか、安定な運転が期待できる加速器ベースのEUV光源の可能性の検討が初められている。EUVL用光源は、露光光学系に用いるSiMo多層膜ミラーの特性のため波長が13.5nm±1%に制限されている。

Figure 1に光源を除いた、EUVL露光システムの概略図を示す。EUVステッパーシステムの構成は、EUV光源からの光を照射光学系により反射マスクに当てる。反射マスク上に、目的集積回路パターンが描画されており、このパターンを縮小投影光学系によりウェハ上のレジストに転写することで、シリ

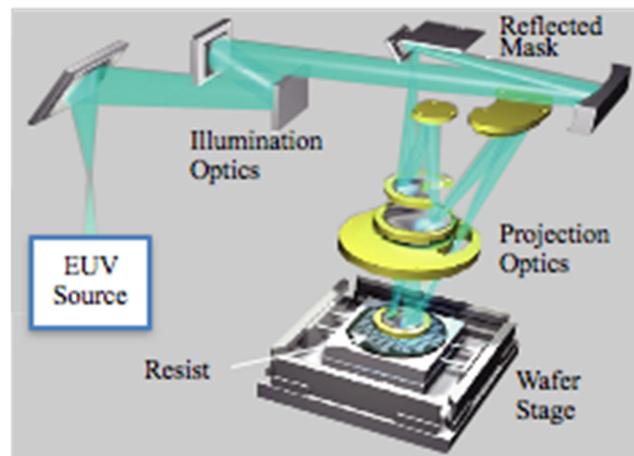


Figure 1: Structure of the EUV stepper system. (courtesy of EUVA)

コンウェハのリソグラフィ加工を行う。マスクから投影画像は4:1に縮小され、マスクとウェハは同期してスキャンする。反射光学系は、マスクも含めてSiMo多層膜ミラーが使われる。SiMo多層膜ミラーのEUV光(波長13.5nm)に対する、直入射反射率は70%程度であるが、照射光学系、投影光学系などで、約15枚の多層膜ミラーを用いるため、ウェハ上でのEUVパワーは、約1/200になる。一方、シリコンウェハ上に塗布される保護膜が光感光性レジストであるが、描画する回路パターンが微細化するとともに、露光感度は低下する傾向にある。

このような露光システムの構成上、EUV光源パワーの要求が高くなっている。さらに将来はEUV光波長以下までの描画を目指しており、そのために光学系ミラーの増加と、さらなる光源パワーの増強が求められる。また生産性に関しても、露光時間の短縮が求められ、実用段階では1時間に100枚のウェハ処理が必要と言われており、EUV光源への要求はさらに高くなる見込みである。

[#] miyamoto@lasti.u-hyogo.ac.jp

2. 加速器を用いた EUV 光源

初期には、EUVL 光源として放射光も検討された。放射光光源は安定で、分光器を用いることでのぞみの波長領域を利用でき、また、アンジュレータ光源では高いスペクトル輝度を得ることが出来る。このため、EUV 露光光学系の試験、レジストの開発、マスク検査システムの実証など、EUVL 技術開発の多くの部分が放射光施設を利用して行われてきた。しかしながら、光源装置としてステッパーに組み込むには、装置が大型なことに加え、放射線管理が必要なことから、半導体製造工場で利用する光源としては別種の小型光源の開発競争が世界的に行われた。この間、半導体製品の微細化の進展に従い、EUV 光源パワーへの要求が増大してきた。このような光源への要求から、また将来の拡張性から、再び加速器光源の検討が行われるようになった。これは、X 線自由電子レーザー(XFEL)の稼働[2]や、エネルギー回収型線形加速器(ERL)での高出力赤外 FEL[3]の実証など、加速器光源技術の急速な進歩が、将来のイノベーションの鍵となると期待されていることもあり、次世代コヒーレント光源への開発課題でもある。

加速器光源とは別に、超短パルスレーザーによる高次高調波発生で、コヒーレント EUV 光の発生も行われてきた[4]。これは、超短パルスのチタン・サファイヤレーザーをガス中で収束させ、非線形相互作用で、50 次を

超える次数の高調波を発生できている。この手法で発生した、コヒーレント EUV 光を用いて、SiMo 多層膜マスクの内部欠陥を、レンズレス顕微鏡(コヒーレントスキヤトロメトリー)で観察することに成功している。

近年、加速器の電子ビームにレーザーでエネルギー変調を与え、電子バンチを短パルスレーザーでスライスしたり、高次高調波を発生させる提案や実験が報告されている。そのなかで、上海のグループが理論計算を報告している PEHG[5](Phase-merging Enhanced Harmonic Generation)法は、蓄積リングで高出力コヒーレント EUV 発生が可能であると提案している。

PEHG による高次高調波の発生スキームは、以下のようになっている。まず、リング内に大きな分散領域を作る。長直線部両端に、Dog-leg を 2 個挿入した形である。このながい分散部に変調アンジュレータ(Modulator)、横方向傾斜アンジュレータ(TGU)、分散シケイン(DS)、放射アンジュレータ(Radiiator)を入れた構成である。変調アンジュレータに、EUV 光(13.5nm)の 20 倍の波長のパルスレーザー光を入射し、蓄積リングの電子バンチにエネルギー変調を与える。この時、変調の深さは、0.1%程度で、蓄積リングでの電子のエネルギー広がり程度である。これに分散方向に磁場を傾斜させたアンジュレーターで、エネルギー変調に Phase-merging 効果を与え、分散シケインでのバンチングの高次成分を増強する。

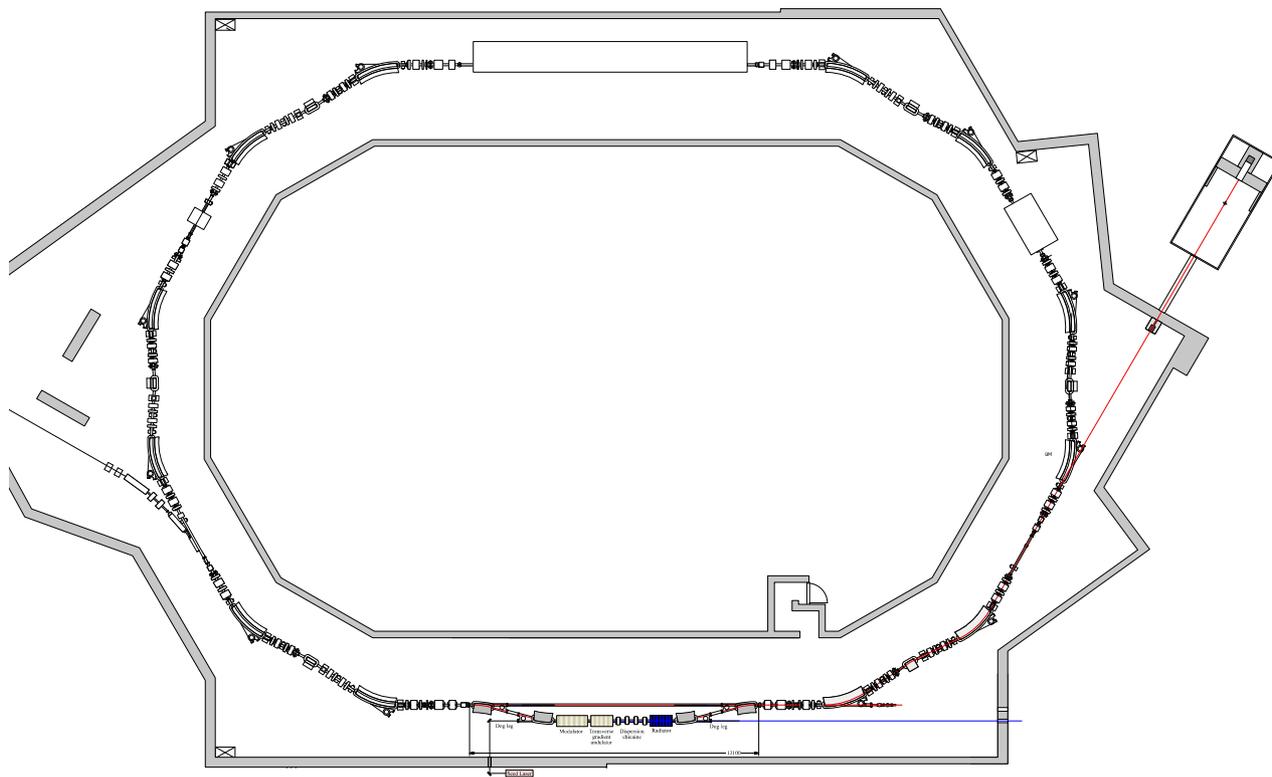


Figure 2: NewSUBARU electron storage ring. Insertion graph is an example of dispersion function of the PEHG beam line.

この手法には、EUV 光を発生するための 1GeV 程度の電子エネルギーと、ある程度長い直線部が必要である。国内の電子蓄積リングでは、NewSUBARU 電子蓄積リングの構成が、この試験に適していると考えられる。そこで、PEHG による EUV 高調波発生の可能性を調べることを目的として、NewSUBARU 電子蓄積リング (Figure 2) で可能な試験配置を元に、必要なパラメーターや改造の可能性を検討するため、シミュレーションによるパラメーター検討を始めた。Table 1 にニュースバル電子蓄積リングのパラメーターを示す。

Electron Energy	0.5 GeV - 1.5 GeV (injection : 1 GeV)
Storage Current	max.: 500 mA topup : 300mA
Emittance	37 nm / 1 GeV
Circumference	118.731 m
RF frequency	499.955 MHz
Harmonic Number	198

3. PEHG 配置と電子変調評価

Figure 3 に長直線部の Dog-leg, Modulator, TGU, Dispersion chicane, Radiator, Dog-leg の配置を示す。まず最初の計算検討では、現在のニュースバル電磁石配置で評価してみた。また、TopUp 運転ができる条件として、電子ビームエネルギーは 1GeV としている。直線部は約 13m でそこに設置可能なサイズとした。ニュースバルの直線部は水平方向のビームサイズが比較的大きいため、0.1% のエネルギーモジュレーションで、ビームサイズ以上分散するように分散は 0.7m 程度とできる。Dog-leg 電磁石強度とサイズを設定した。モジュレータの共鳴波長をレーザー波長とするため、モジュレーター波長が長くなり、ピッチ数があまり取れないため、アンジュ

レータ内での変調レーザーパワーは、 $P_L=100\text{MW}$ 程度が必要となる。

フェムト秒パルス出力の超短パルスレーザーでは、比較的容易な出力であるが、高い EUV 出力を得るためには、レーザーパルス幅も電子ビームパルス幅 ($\sigma_p \sim 60\text{ps}$) 程度以上が望ましい。時間コヒーレンスの長い出力 EUV 光となるため、コヒーレント EUV 応用にも有利である。レーザーは電子パルスに同期した安定なパルス列が必要で、モード同期発振レーザーパルスを用いる。光陰極 RF 電子銃の励起レーザーなどにも利用されており、100MHz 程度の繰り返し周波数のピコ秒パルス列を得ることが出来るが発振器では、出力パルスエネルギーは数 10nJ であるので、増幅して用いることになる。レーザー波長 270nm とするには、近赤外域のレーザーの高調波を用いる。

必要なレーザー出力は、繰り返し周波数を、電子の周囲周波数 ($T=2.5\text{MHz}$) とした場合、

$$P_0 = P_L * \sigma_p * T = 100\text{MW} \times 60\text{ps} \times 2.5\text{MHz} = 15\text{kW}$$

と過大になるため、繰り返しを 3 桁ほど下げて試験を行う。

Figure 3 のシステム内で、レーザー光によりエネルギー変調を受けた電子パルス内の位相に対する電子エネルギー分布を Figure 4 に示す。これは、電子ビームの水平サイズが現状の値、300 μm として計算したもので、ビームサイズが大きすぎるため、Phase-merging の効果はぼやけて、分散部を通過してもあまり密度の急峻化が起こってない様に見える。電子密度分布の高調波成分を計算すると、第 20 次高調波では 0.35% となっており、高次高調波の発生は難しい。

一方、ビームサイズが 50 μm として、同様な計算を行うと、Figure 5 の様に、電子ビームの中心部分は、比較的良くバンチしているように見え、電子密度分布の高調波成分でも、第 20 次高調波では 6% となり、このマイクロバンチ成分で、Radiator アンジュレータ内でコヒーレント放射が十分強くなると期待できる。このように、分散方向のビームサイズを小さくする必要があり、このため、垂直方向への Dog-leg 分散も提案されている。

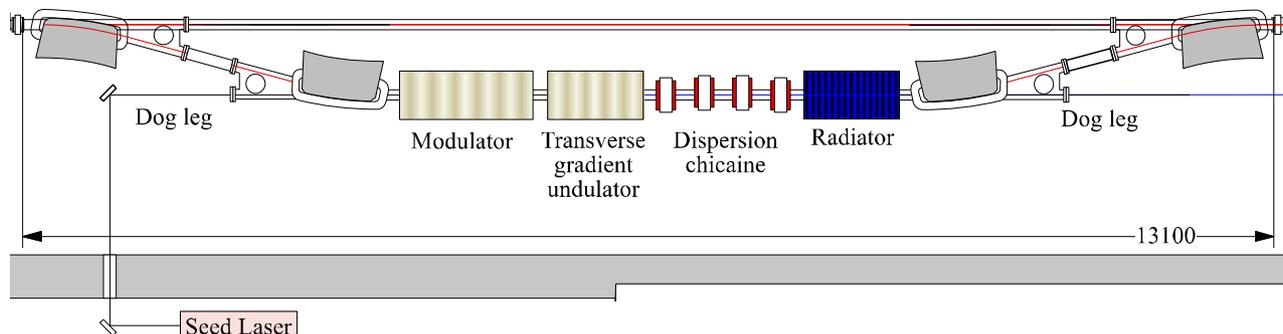


Figure 3: Layout of the PEHG on long straight section of NewSUBARU storage ring.

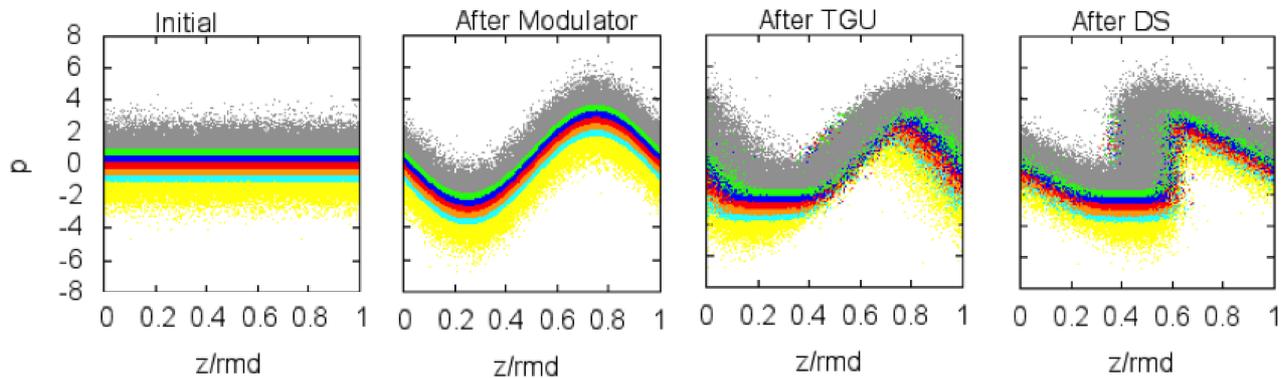


Figure 4: Example of phase-merging and bunching of the beam for beam size of 300 μm .

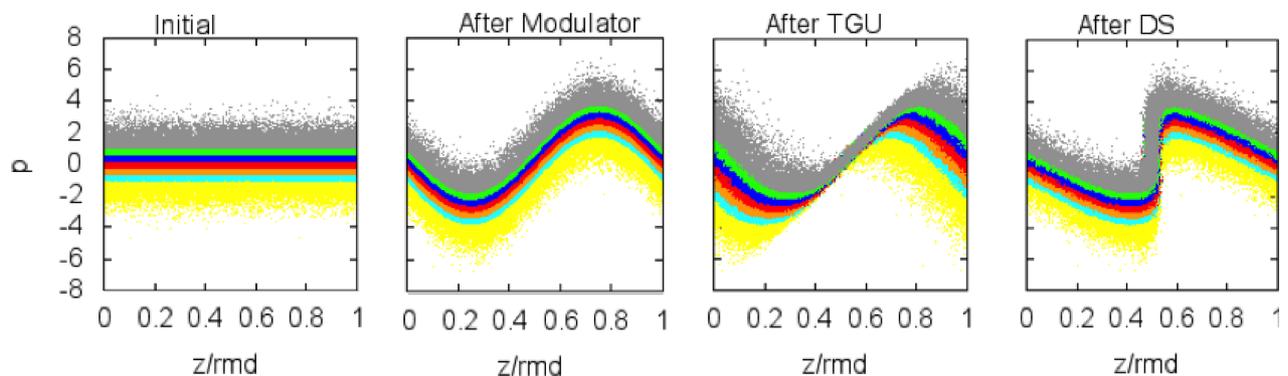


Figure 5: Example of phase-merging and bunching of the beam for beam size of 50 μm .

垂直方向のビームサイズは、ニュースバルでも 50 μm 程度のため、垂直分散での試験も考えられるが、水平方向にアンジュレータギャップを設定する場合の、電子ビームの安定性に問題がでそうである。

これも加えて、PEHGコンポーネントを設置した場合の、蓄積リングの安定性解析を十分に行っていないため、今後リングの安定性と、PEHGの最適化およびレーザー開発の準備に向けて検討を行う。

参考文献

- [1] H. Kinoshita *et al.*, “Soft x-ray reduction lithography using multilayer mirrors”, *J. Vac. Sci. & Technol.*, B7, 1648 (1989).
- [2] T. Ishikawa *et al.*, “A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-angstrom region”, *Nature Photonics* 6(8), pp.540-544 (2012).
<http://xfel.riken.jp>
- [3] R. Hajima *et al.*, “High-efficiency ultrashort pulse generation in a high-gain FEL oscillator near the perfect synchronism”, *Nuclear Instrum. Methods Phys. Res. A*, 483, pp.113-118 (2002).
- [4] K. Midorikawa, “Phase-matched high-order-harmonic generation in a gas-filled hollow fiber”, *Phys. Rev. A* 59(5) (1999).
- [5] C. Feng *et al.*, “Phase-merging enhanced harmonic generation free-electron laser”, *New J. Phys.*, 16, 043021 (2014).