

[F18p35]

LASER COMPTON SCATTERING USING LINAC

Hiroki Hane, Hideaki Ohgaki*, Hiroyuki Toyokawa*, Takayoshi Mamime, Yutaka Hayashi

ULSI R&D Laboratories, Semiconductor Company, SONY Corporation

4-14-1 Asahi-cho, Atsugi-shi 243-0014, Japan

*Quantum Radiation Division, Electrotechnical Laboratory

1-1-4 Umezono, Tsukuba-shi 305-8568, Japan

Abstract

We report on the experiment on Laser Compton Scattering (LCS) using linac to develop a light source for future lithography. Photons of the wavelength range from 3 to 13nm are generated by LCS with Nd:YAG laser (1064nm) and linac injector (electrons accelerating from 2 to 5MeV). Practical use for lithography, a photon yield is needed more than the order of $10^{16}/s$, which will be realized by using high power laser and high current electron gun.

リニアックを用いたレーザーコンプトン散乱

1. はじめに

電子技術総合研究所のリニアック(TELL)を用いてレーザーコンプトン散乱(LCS)実験を行っている。この実験はLCSを、リソグラフィ光源等の新規応用分野へ拡張していくことを目的としている。

SIA(Semiconductor Industry Association)のロードマップによると、2006年以降には、半導体の回路パターンは線幅が $0.1\mu m$ 以下になると予想される。この線幅 $0.1\mu m$ 以下では等倍X線リソグラフィに加え $10\sim 14nm$ の波長(極端紫外: EUV)を用いる縮小X線リソグラフィの研究が進んでいる。EUVの光源としては、シンクロトロン放射光(SR)やレーザープラズマ光源(LPS)が主として検討されている。しかしSRの装置は、高価で設置面積が大きいことと、一台でラインの全ての露光装置をまかなうことになることから、大掛かりなシステムを長期に亘って生産レベルで安定稼働させるという課題を残している。LPSの装置は設置面積が小さく露光装置と一対一に対応するが、プラズマ生成時に発生する飛散粒子が問題となる。一方、LCSの装置は、設置面積も小さく、露光装置と一対一に対応する。また、LCSで得られるフォトン(以下、LCSフォトン)は、電子の加速エネルギーを変えることによりVUV(真空紫外)~軟X線領域まで波長を変えることが可能で一度技術を確立すれば同一線上の技術で多世代にわ

たってリソグラフィの光源として利用できる。

2. 実験装置とLCSフォトンの波長

TELLのバンチャー直後に 45° の分岐管を取り付け、その先に反応チャンバーを設置した。Fig.1に概略図を示す。Fig.1に示した装置のうち、分光器を除く全ての設置を完了した。ビームモニターにはデマルケストを用い、電子ビームを反応チャンバー中心に導き、ビームモニターの発光をビデオカメラでモニターしながら四極磁石に流す電流値を最適化して、反応チャンバー中心における電子ビーム径を絞った。この時のビームモニターの発光を、パソコンに取り込み、x,y方向のそれぞれの発光強度分布プロットをガウスフィッティングして、電子ビーム径を測定した所、ビーム半径はx方向が $2.2mm$ 、y方向が $1.7mm$ と分かった。シミュレーションによるビーム径の値も同程度であり、現状の電磁石の系ではこの値がベストに近いと考えられるが、今後より電子ビーム径を絞り数百 μm 以下にできる様に、四極磁石を増やすことも検討している。現在は分光器の納入待ちであり、レーザー光学系の配置、及び、レーザーパルスと電子パルスのコインシデンスのテストを行っているところである。反応チャンバーの窓からNd:YAGレーザー($1064nm$)光を、電子の入射方向に対して 135° の角度で入射し反応チャンバーの中心で加速電子と衝突させることにより、

LCS フォトンが得られる。電子の加速エネルギーは TELL のバンチャー部分による加速のみの 2~5MeV と考えられる。この電子エネルギーは我々の実験においては必要十分なもので、我々が希望する波長 1~10 数 nm の LCS フォトンが得られることを以下に述べる。

LCS フォトンの波長を求めるには、LCS がローレンツ変換した電子静止系では通常のコンプトン散乱と同じであるので、これを実験室系に戻せばよい。このようにして求めた、電子の加速エネルギーに対する LCS フォトンの波長を Fig.2 に示す(135° 衝突の場合)。Fig.2 から、LCS フォトンの波長は電子の加速エネルギーによって 2.7nm~13.2nm と連続的に可変であることが分かる。現在検討が進んでいる多層膜ミラーは 11.5nm、若しくは、13nm 付近で反射率が最大になるものであるので、EUV リソグラフィの第一世代の波長は 11.5nm、若しくは、13nm になる可能性が高い²⁾。Fig.2 より本実験でもこの付近の波長における LCS フォトンの検討を行うことができると思われる。

また、個々の電子の加速エネルギーにおける LCS フォトンの波長の広がり、その散乱角に依存する。つまり、LCS フォトンは電子の進行方向の非常に小さい立体角のなかに散乱するが、それをさらにコリメートすることにより、リソグラフィに必要な単色性の強いフォトンを得ることができる。例えば、現在の実験系ではコリメータの半角を 2° とすることにより波長 13nm に対して約 2% の単色度となる。

3. LCS フォトン収量の概算

LCS をリソグラフィ光源として実用に供するための最も重要なパラメーターとしては波長の可変性、安定性、単色性に加え、その収量が挙げられる。将来的には ~5mJ/cm² 程度の感度を有する X 線リソグラフィに最適化されたフォトレジストが開発されるものと考えられている。この感度を前提とすると必要なフォトン数は 10¹⁶/cm² と概算される。実際の露光システムの集光光学系、結像光学系の反射ロスや必要なスループット等を考慮すると実用的には 10¹⁶/s 程度のフォトン数が必要になると考えられる。これらの概算結果を念頭に置いて LCS により達成され得る LCS フォトンの収量を概算してみる。LCS フォトン収量を考える基本となる LCS の散乱断面積は、クライン・仁科の式より求められ

る。コリメータの半角を 2° とした場合にコリメータが見込む立体角で積分した散乱断面積 σ を概算すると、 $\sigma=1.5 \times 10^{26} \text{ cm}^2$ となる。電子ビーム、レーザービームともにパルス状で、ガウス分布を仮定した場合、この σ をもとに LCS フォトンの収量は (1) 式で近似できる。

$$y = \frac{2N_e N_p \sigma L}{A \tau c} \quad (1)$$

ここで、 y を LCS フォトンの収量として N_e はパルス当たりの入射電子数、 N_p はパルス当たりの入射レーザーフォトン数、 L は有効反応長である。 A 、 τ は、それぞれ入射電子ビームとレーザービームのうち、大きいほうの断面積と長いほうのパルス幅を示す。

我々の実験系のレイアウトではレーザーの入射角を 135° としているため $\tau c \sim 10^4 \text{ cm}$ に対して L は ~1.5mm なので $L/\tau c$ により収量が 10^{-5} 倍となるが、将来の実用化の際には入射角を最適に設計できる。また、フェムト秒パルス X 線生成を目指してレーザーや電子銃から出射されるフォトンパルス、電子バンチの短パルス化が進んでおり、10~100 ps のレーザーパルスと電子バンチが実現できる。その結果、(1) 式の $L/\tau c$ は 1 とでき、以下 $L/\tau c=1$ として計算する。

TELL の場合 パルス内平均電流は 200mA 程度であるからパルス幅を 1 μ s とした場合 $N_e=1.2 \times 10^{12}$ である。レーザーは Nd:YAG (1064nm、2J、10Hz) を用いており、 $N_p=1.1 \times 10^{19}$ である。レーザー・電子ビームともに直径 100 μ m 程度まで絞ると、フォトン収量は 5×10^9 /s となる。繰り返しは 10Hz であるので、 5×10^{10} /s が見込まれる。

この 5×10^{10} /s のフォトン収量に対し、以下を考慮すると、 $10^{15} \sim 10^{16}$ /s のフォトン収量が得られると期待できる。米国では次々世代リソグラフィ光源として LPS が鋭意進められているが、このプラズマを発生させるための高出力レーザーとして現在、出力 0.5J、繰り返し 3KHz の固体レーザーが実現されると期待されている。このレーザーを用いればフォトン収量は、我々が用いている出力 2J、10Hz のレーザーを用いた場合の 5×10^{10} /s に対して 75 倍となる。また、この繰り返しで入射されるフォトンと電子が一度すれ違ってしまふと二度と有効に活用できないという効率の低さが注目される。この効率の低さを向上させるためフォトン是一对の共振器の中で反復反射させることによって蓄積する一

方、電子はリングの中で周回を重ね、各々のビームを繰り返し衝突させる方法が有効であると考えられる。現在、最も反射率の高いミラーは反射率が99.99%であるからミラーの透過ロスを見れば共振器中で光はおおよそ 10^4 回反復反射する。共振器の長さを1m とするとこの間の所要時間はおおよそ $30\mu\text{s}$ である。つまり、電子の貯蔵といっても数十 μs 程度電子がリング中を周回出来れば良い。この場合 LCS フォトン収量は 10^4 倍となる。以上を総合すると、上述の技術成果を踏まえて将来的には $10^{15}\sim 10^{16}$ /s の LCS フォトン収量が実現され得ると期待される。

4. 終わりに

LCS は、一度技術を確立すれば同一線上の技術で多世代にわたってリソグラフィーの光源として利用できる。また、1 で述べたように SR や LPS と比較してもアドバンテージがある。しかし、LCS フォトン収量が小さいことがネックとなる。収量増大のため我々は、マルチパスセルと電子リングによる電子蓄積の組み合わせを考えている。また、レーザーは高出力、高繰り返し回数のものが次々に実現されているので、これらとの組み合わせで実用的な収量が得られると考えられる。

他に、主として FEL のために高出力のフォトカソード電子銃の研究がなされている。フォトカソード電子銃では、バンチ当りのピーク強度は高いが、バンチ幅が小さく、パルスに含まれる電子数はそれほど大きくはなくなってしまう。この電子数を改善するブレークスルーが望まれるが、フォトカソード電子銃であれば電子は、高電界により一気に加速されるので空間電荷効果を受けず、我々が用いる数 MeV 以下の加速領域においてもビームを絞ることがより容易となり、装置もコンパクトにできる等の利点があり、LCS への応用が期待される。

参考文献

- 1) T. Mamime and H. Ohgaki, JJAP. Vol. 37(1998)L184
- 2) D.T. アトウッド他 FED ジャーナル Vol. 8 No. 2(1997)

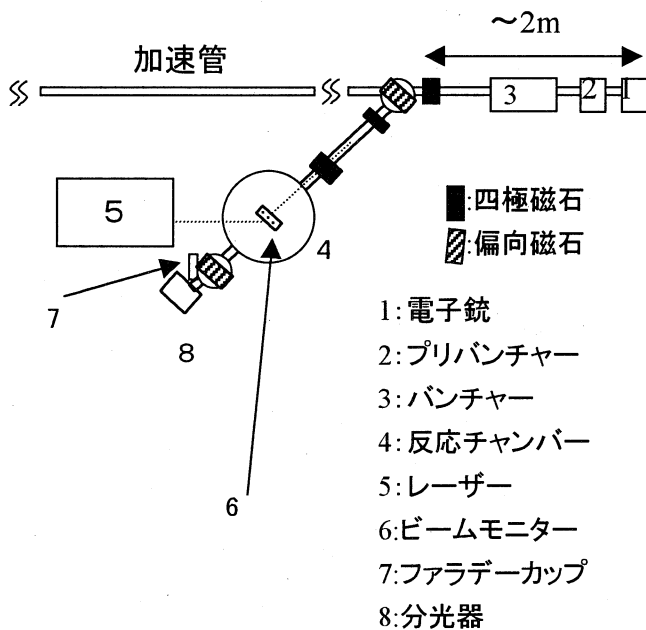


Fig.1 実験装置の概略図

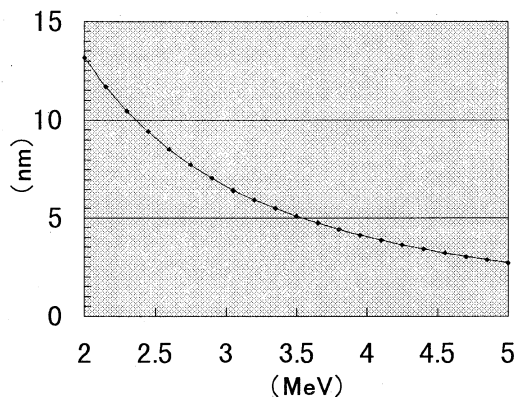


Fig.2 加速エネルギーとphoton 波長