低エネルギー電子ビーム励起極端紫外光源の開発

米田研究室 引地 学 0212104

1.序論

極端紫外(EUV)領域の光は、波長数十 nm、フォトン エネルギー数百 eV の波長帯で、特に、波長 13.5nm の EUV 光は、将来の光リソグラフィ用光源として非常に 注目されている。さて、現在勢力的に開発されている リソグラフィ用 EUV 光源は、レーザー生成プラズマ方 式と放電生成プラズマ方式の二つである。この手法は、 どちらも数十 kW 以上のエネルギーを物質に与えてプ ラズマ化させることによって 10 価程度の多価イオン を作り、特異な遷移をする 4d-4f 遷移から放射される 熱平衡な EUV 光を得るというものである。

しかし、この手法の場合、物質の温度は数万度以上 に達するため、その際に大量のデブリ(イオンなどの 飛散粒子の総称)が発生し、周辺の光学素子の汚染や 破壊をもたらす。そのため、検査用や分光用の EUV 光 源としては不向きで、別途静的で安定な EUV 光源が要 求されている。

一方、X線放出には、内殻を電子や光子により励起 し、K線などを出す方法もある。この手法の場合、 物質の温度上昇による液化、気化等の状態変化が起こ らないため、物質の固体状態を保つことが可能である。 しかし、現在では keV 以上のX線源のみこの手法が 用いられている。

そこで、本研究では、13.5nm を含む波長帯におけ る静的な EUV 光源として、X線源に用いられている 内殻励起法を応用し、E U V の放射エネルギー程度の 低エネルギー電子ビームを用いた光源の開発を行う ことを目的としている。そして、その第一段階として、 この領域において、内殻励起法によって発光が見込め る物質である Ge を用いた原理実証実験を行う。



図 1.1 内殻励起法による発光の模式図

2. EUV 光源材料

M製励起(n=4_n=3)

本研究では、リソグラフィ用の光源材料に用いられ ている Xe や Sn に代わって、ゲルマニウム(Ge;原子 番号 32, $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$)を使用する。 そのため、選択されるべき光は、n=4 n=3 の緩和光 となる。

さて、内殻励起において 13.5nm 付近の EUV 発光 が見込める物質を表 2.1 に示す。

元心のる物具					
		物質	K 線の放出波長 [nm]		
K 殼励起 (n=2	n=1)	Be	11.5		
		物質	イオン化エネル ギー[eV]	励起軌道	放出波長 [nm]
L 殼励起 (n=3	n=2)	Mg	80.1 ~ 266.0	$2 p^1 \sim 2 p^6 \rightarrow 3 d$	6.4 ~ 18.6

166.8 ~ 401.4

93.5~151

 $2 p^1 \sim 2 p^6 \rightarrow 3 d$

 $3d^8 \sim 3d^{10} \rightarrow 4\mu$

4.4 ~ 9.6

表 2.1 内殻励起において 13.5nm 付近の EUV 発光が 見込める物質

まず、K 殻励起においては、特性X線の放出波長から物質を選定することができる[1]。K 殻励起の場合、 Be(Z=4)でその放出波長は 11.5nm であり、B(Z=5)以 降では EUV 領域よりも短波長となってしまうため、 内殻励起に用いることができる物質は Be のみである。

次に、L 殻励起以降の物質を選定する。L 殻以降の 物質の場合、K 線放出においてその波長が EUV 領 域に相当する物質のデータが存在せず、特性X線の放 出波長から物質を選定することができない。そこで、 物質の各軌道でのイオン化エネルギーとその際の放 出波長のデータを用いてある程度の物質の見積もり を行った[2][3]。なお、このデータは外殻に電子が存 在しない場合の値であるため、内殻励起の値とは異な る。このような方法を用いて物質を選定すると、L 殻 励起において Mg、Al、Si、M 殻励起において Ge と なる。それぞれのイオン化エネルギーと放出波長は表 2.1 に示す。ただし、L 殻・M 殻の各値は、それぞれ 2p 軌道から 3d 軌道、及び 3d 軌道から 4p 軌道への 励起のみであるので、実際にはこの値よりも広範囲の 放出波長が期待される。

さて、光源を作成する場合に重要となるのは、要求される波長帯においてたくさんのスペクトル線を持っ

ているということである。そのため、原子番号の大き い物質ほど、励起の仕方が複数存在し、広帯域な発光 が期待できる。特に Ge の場合、励起において 16.5nm ~20.8nm の波長帯に 222 本ものスペクトル線を持っ ている。したがって、Ge の内殻励起による発光の場 合でも、そのスペクトル線は非常に広帯域のものが得 られることが期待される。

3.電子ビーム源の試作





図 3.1 試作した電子ビーム源の模式図と その寸法

試作した電子ビーム源は図 3.1 のようになっている。 フィラメントから放出された熱電子はグリットで加 速され、静電レンズで Ge 先端に照射される。

材質としては、フィラメントがタングステン、グリ ットと静電レンズ(ワッシャ)はステンレス、それ以 外のパーツはセラミック(絶縁・耐熱媒質)を使用し た。また、静電レンズはアース電位のポテンシャルを 保つため、絶縁・耐熱性に優れた樹脂接着剤でセラミ ック上に固定されている。さらに、Geの先端は45° にカットされ、2 sr 方向に発光が取り出せる構造に なっている。

また、加速電圧は、電子のエネルギーを 100eV 付 近で調節することができるように、0V~300V までの 可変直流電圧源を用いている。なお、今回作成した電 子ビーム源はフィラメント - グリット間が 4.1mm、 グリット - 静電レンズ間が 6.8mm、静電レンズ - Ge 間が 4.2mm である。

さて、作成した電子ビーム源の電子電流対加速電圧 特性、及び電子電流対時間特性は図 3.2、図 3.3 のよ うになっている。図 3.2 の黒の実線は空間電荷モード の理論式を表しており、青の実線が試作した電子ビー ム源のデータの近似曲線である。青い実線の傾きは

1.5と加速電圧V対してV^{3/2}という空間電荷モードの 理論式に傾きが一致しており、この電子ビーム源は電 子放出が充分で、時間的にも安定しているといえる。



図 3.2 電子電流対加速電圧特性



図 3.3 電子電流対時間特性

4.集光ミラー

Ge から放射される光は 2 sr 方向に放射されるた め、光を集光させなければならない。そのため、本研 究では球面ミラー(曲率半径 r = 3000mm,反射率 R = 90%,材質 SQ)を用いる。また、球面ミラーの表 面には「金」を蒸着する。通常、EUV 領域の光は物 質の吸収が激しく、反射率はとても低いが、金を用い た斜入射(入射角1 rad 未満)反射の場合にはある程 度高い反射率を得ることができる。ただし、EUV 領 域の場合、その周波数は10¹⁶ Hz オーダーと非常に高 いため、表皮効果が大きく、蒸着を行う場合には、金 の膜厚が EUV 光のスキンデプス以上でなければなら ない。ちなみに、13.5nm の EUV 光における真空中 の金のスキンデプスは、 =0.51nm である。図 4.1

に金の各入射角度に対する反射率を示す[4]。



球面ミラーで反射、集光した光が一段目スリット上 にスポットする条件は以下の式で与えられる。ただし、 r1 [m]がGeの先端から球面ミラーの中心までの距離、 r2 [m]がミラーの中心から一段目スリットまでの距離、 Rt [m]が球面ミラーの曲率半径、 [rad]が球面ミラ ーの垂線と入射光のなす角度である。



 $\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{2}{R_t \cos \theta}$ (4.

なお、本研究の場合、 =1.5rad(86°)であり、入射 角は 66mrad で、13.5nm の EUV 光に対して 87%の 反射率が得られる計算となる。

5.スペクトル分光測定

図 5.1 に測定装置の模式図を示す。Ge から放射さ れた光は、球面ミラーで集光し、反射される。その後、 一段目スリットを通った光が回折格子に入る。そして、 波長分解された光が二段目スリットを通って電子増 倍管の受光面で検出される。電子増倍管において検出 されたフォトンは、電子に変換され、4×10⁷に増幅さ れ、電流シグナルとなる。さらにそのシグナルはアン

プを用いて10⁸V/Aに増幅され、その電圧の変化をペ

ンレコーダーで記録する。なお、光源部の温度上昇に よる真空度の低下を考慮して、真空ポンプによる排気 は別段排気を行っている。それぞれ一段目排気はロー タリーポンプを使用しており、二段目排気は、光源と 回折格子においてディフュージョンポンプ、電子増倍 管においてターボ分子ポンプ(回転数約 27000rpm) を使用している。到達真空度は現状で、光源部分が

- 4~6×10⁻⁵*Torr*、電子増倍管部分が1~2×10⁻⁵*Torr*である。また、回折格子は電気信号制御で15秒おきに1
 - ずつ回して測定している。



スペクトル分光測定の結果を図 5.2、及び図 5.3 に 示す。なお、このデータはペンレコーダーで記録され たものを 1 ピクセルずつ読み込んで各波長ごとに平 均したものである。



図 5.4 に使用している電子増倍管の分光感度特性 を示す。図 5.2、図 5.3 において観測している波長帯 は、図 5.4 からわかるように感度をもたないため実際 のシグナルはもっと大きな値になると推測される。ま た、120 付近と 170 付近での量子効率にも 2%~3% 程度の差が見込めるため、そのことも考慮する必要が ある。



図 5.4 電子増倍管の分光感度特性。EUV 領域 (~200)には感度をもたないことが読み取れ る。なお、この分光感度特性は、浜松フォトニ クス社の電子増倍管ヘッドオン型 R595の仕様 書より引用した。

さて、まず加速電圧 150V の場合、175 ~178 の ところに非常に大きく、幅の狭いシグナルが得られた。 しかし、Ge のイオン化ポテンシャルによる見積もり では、16.5nm~20.8nm の波長帯において非常に広帯 域のスペクトル線が得られるはずである。ここから、 加速電圧 150V に対して、電子は、6価のイオン化ポ テンシャル 151eV に相当するエネルギーを持ってい ないことがわかる。そのため、Ge は5価までしかイ オン化しておらず、その際の放出波長は最低 218.2 であるため、このような結果が得られたと考えられる。 一方、加速電圧 300V の場合、160 以降で広帯域なス ペクトル線が観測されており、これは、6価の Ge イ オンから放射されたイオン発光によるものであると 考えられる。この場合の放出波長は 165 ~208 で あり、確かに一致している。

しかし、注目すべき点は、加速電圧 150V のデータ において、イオン発光では考えられない波長帯(200

以下)において光のスペクトルが観測されていると いうことである。これはまさに内殻励起によって放射 された光が観測されている結果である。図 5.2 のうち、 量子効率を考慮して光のスペクトルと考えられるの は、113 ~ 134 、138 ~ 141 、及び 175 ~ 178 の波長帯のシグナルである。特に 113 ~ 134 の 波長帯においては、ある程度幅のあるスペクトルが観 測されている。ただし、このスペクトルデータは非常 に微弱な信号を電子増倍管とアンプを用いて10¹⁶倍 に増幅しているということを念頭に置かなければな らない。Ge に到達した電子密度に対して、電子増倍 管の受光面に到達した光子密度の比を取ると、その変 換効率は数μ%程度である。

6.結論

本研究では、13.5nm を含む波長帯における静的な EUV 光源の開発を目標に、その領域において、内殻 励起法によって発光が見込める物質である Ge を用い た原理実証実験を行った。具体的には、加速電圧 300V 以下で駆動可能な電子ビーム源を試作し、8.5nm~ 20nmまでの波長帯におけるスペクトル分光測定を行 った。その結果、加速電圧 150V において内殻励起に よる発光が 11.3nm~13.4nm、13.8nm~14.1nm、及 び 17.5nm~17.8nm の波長帯において微弱(変換効 率数µ%)ではあるが、観測された。

したがって、Geを用いた100eV程度のエネルギーの電子ビームによる内殻励起によって、EUV領域での発光が見込めるという原理実証が、実験的に成されたといえる。

そこで、今後の課題としては、まず、加速電圧を 100V~150Vの間で変化させてスペクトル分光測定 を行い、どのような条件の時に13.5nmを含む波長帯 において発光が観測されるのかどうかを明らかにす る必要がある。そして、その条件が明らかとなったら、 次に市販のより優れた電子ビーム源を用いて、変換効 率の飛躍的な向上等を目標に本格的な光源開発に移 っていく予定である。

参考文献

[1]理科年表 (国立天文台, 1995).

- [2]R.L.Kelly, Atomic and Ionic Spectrum Lines below 2000 Angstoms: Hydrogen through Krypton Part 1(H-Cr).
- [3] R.L.Kelly, Atomic and Ionic Spectrum Lines below 2000 Angstoms: Hydrogen through Krypton Part 2(Mn-Kr).
- [4]B.L.Henke, E.M.Gullikson, and J.C.Davis, "Specular Reflectivity for Mirrors", Atomic Data and Nuclear Data Tables, Vol. 54, No. 2, July 1993.