

極紫外リソグラフィー照明系の開発

小松田 秀 其

Development of the Illumination System for Extreme Ultraviolet Lithography

Hideki KOMATSUDA

Various ideas of illumination system for extreme ultraviolet lithography (EUVL) have been proposed. In this paper, three proposals that have high possibility of being manufactured in the near future are reviewed. In review of each idea, I endeavor to pick up the topics that is interesting to optical engineers. In addition, the fundamental view of illumination system was summarized at the beginning of this paper.

Key words: extreme ultraviolet (EUV), lithography, illumination

極紫外リソグラフィー (EUVL: extreme ultraviolet lithography) 用照明系として、これまでにさまざまな方式が提案されてきている。本稿ではこのうち、近い将来実際に製品化される可能性の高い3案を紹介する。(本稿では露光機光学系の各部を以下のように表記する。光源～マスク間光学系：照明系, マスク～被露光面間光学系：投影系)

1. 概 論

照明系には、一般に以下のような性能が求められる。

- a. 高効率な光エネルギーの伝達
- b. マスク面上での適切な照度分布の実現
- c. 投影系瞳上での適切な照度分布の実現
- d. 適切な分光特性の実現
- e. 適切な偏光特性 (通常は無偏光) の実現
- f. これらの特性が時間的に安定であること

これに対し、EUVLは、下記特性をもつ。

- ・ EUV用反射板の1面あたりの反射率は、最大でも70%程度
- ・ 投影系が、有効な像高幅の狭い off-axis 光学系であるため、視野が光軸を軸とする細い円弧となる

このため、EUVL用照明系は、①極力少ない反射面数で、②マスク面上では、光束の形状が円弧状となるよう、光学系を組まなければ、aの高効率という特性は得られない。この制約は、さらに前記b, cの特性 (EUVLの場合は

マスク面上で均一照度、かつ、投影系瞳上で回転対称な照度分布が必要) を実現する際の大きな足かせとなる。

このため、EUVL用照明系の設計解は、従来露光機用の延長ではありえない、と一般には考えられていた。以下に紹介する3案のうち前2案は、この考えに基づき、従来露光機とはまったく異なる構成を採用したものである。これに対し、筆者は従来露光機用照明系と同じ構成をもつ案を考案した。これを第3の案として紹介する。

2. 照明系諸案

2.1 Bow-tie タイプ

本案は1993年に、Sweatt氏により発表された¹⁾。

本案では、光源からの光を最初に受ける第1の反射板が扇状の外形を有しており (aspheric mirror)、その反射面は楕円の回転体の一部となっている。ただし、この楕円の焦点は、1つは回転軸 (axis of symmetry) 上にあるが、一方は軸からはずれた位置にある。このため、回転軸に一致した側の焦点上に点光源を配すると、一方の焦点上に円弧状に伸びた光源像を生じる (ring field) (図1)。そこでさらに、この第1の反射板を5~6枚点光源の周りに配し (図2ではこの反射板をcollecting mirrorsとして示す)、後段の反射板 (flat mirrors & ellipse) により各光束を折り曲げ、円弧状の光源像をマスク面 (reflective mask) 上で重ねあわせることで、点光源から発した光束を全方位に

(株)ニコン 精機カンパニー投影レンズ設計部 (〒360-8559 熊谷市大字御稜ケ原 201-9) E-mail: komatsuda.h@nikon.co.jp

わたってマスク面に導くシステムである (図 2)。

本案では、各扇状反射板に対し、メリディオナル方向のみ光源とマスク面とが共役となっているので、点光源が瞳上では細長い棒状の像となる。そのため、例えば各扇状反射板を 6 枚用いた場合は、射出瞳が図 3(a) に示すような形状となる。ただし円弧状照明範囲の縁に対しては、各棒

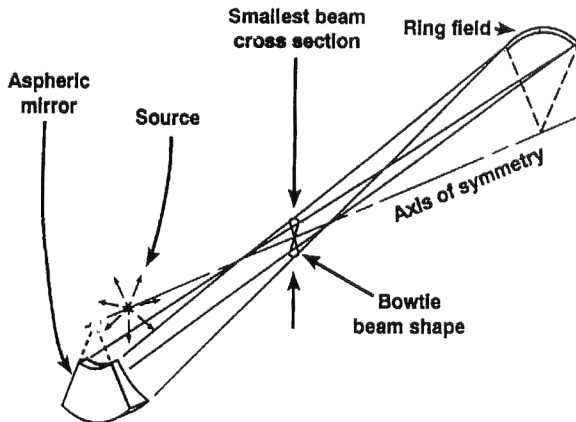


図 1 Bow-tie 照明概念図, 第 1 反射板.

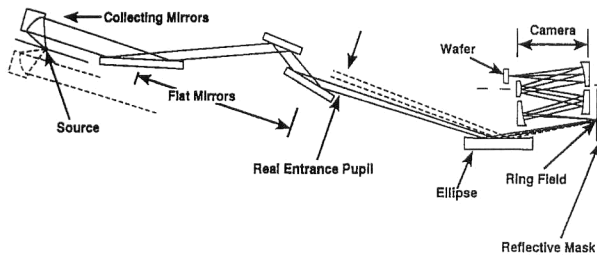


図 2 Bow-tie 照明概念図, 全体構成.

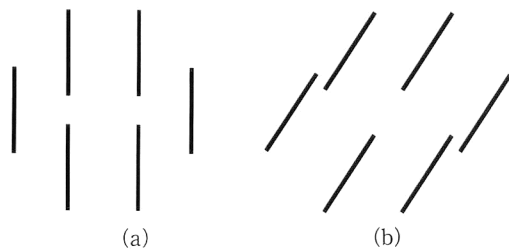


図 3 Bow-tie 瞳強度分布. (a) 対視野中央, (b) 対視野端.

状の像が傾き、射出瞳は図 3(b) に示すような形状となる。

2.2 波板タイプ

1999 年にローレンスリバモア国立研究所より発表された²⁾。ただし、これより 3 年前の 1996 年、Canon より似た内容の特許が出願されている³⁾。

本案、および次に紹介する著者案は、前述した bow-tie タイプとは異なり、光源から発した光束をまず放物面鏡等でほぼ平行にコリメートすることを前提としている。本案ではまず、平行にコリメートした光束を、特殊な形状の反射板に斜入射で受ける (condenser pupil mirror)。この反射板は、駐車場の屋根材等に用いられる塩ビ波板に酷似した形状をもっている。このため、反射した光束は扇状に発散する。これを集光鏡 (re-imaging mirror) にて集光することで、円弧状の光束を得るシステムである (図 4)。

本案もメリディオナル方向のみ光源とマスク面とを共役とするため、射出瞳には、波板状反射板の凹部、凸部に対応して線状の光源像が並ぶ (図 5(a))。また、円弧視野端に対しても、bow-tie タイプと同様、各線状の像が傾くため、射出瞳は図 5(b) に示すような形状となる。

以上 2 つの案はともに、メリディオナル方向に対してはクリティカル照明、サジタル方向に対しては通常のケーラー照明となることから、ケーラークリティカル照明とよばれている。この方式には、2 つの欠点がある。1 つは、EUV 光源が位置の安定性を保証されていないため、露光動作中、照明範囲が安定しないことである。このことは、装置露光量の制御を困難とする。もう 1 つは、図 3, 5 に示すごとく、

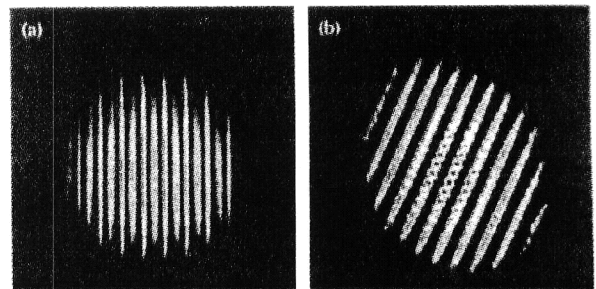


図 5 波板照明瞳強度分布. (a) 対視野中央, (b) 対視野端.

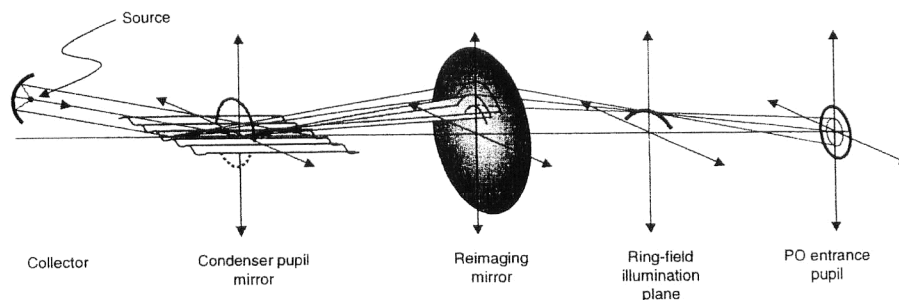


図 4 波板照明概念図.

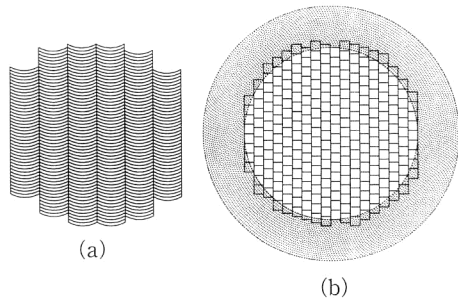


図6 円弧フライアイ照明概念図。

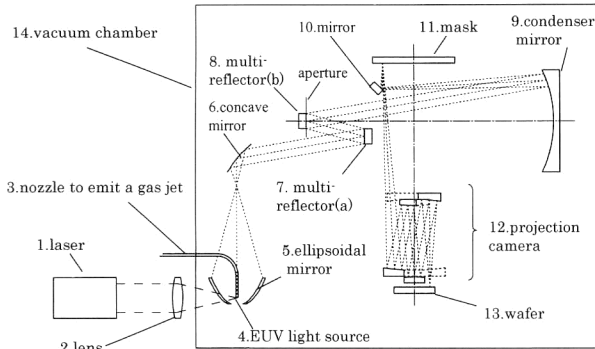


図7 円弧フライアイ照明概念図, 全体構成。

視野位置により射出瞳形状が異なることである。これにより系の解像特性の位置間差が生じるため、露光機をLSI生産に用いる場合は、パターン線幅に不均一性を生じ、良品率を下げる恐れがある。

2.3 円弧フライアイタイプ

本案は1998年に著者が発案したものである⁴⁾。

本案では、円弧状の外形を有する反射板を多数配置した反射板(図6(a))によりまず平行光を受ける。その下流に矩形の外形を有する反射板を多数配置した反射板(図6(b))を配し、個々の矩形反射板により個々の円弧反射板をそれぞれマスク面と共役とし、円弧状の照明範囲を得る。

本案では、マスク面と共役な面が光源ではなく、(円弧状の)反射板であるため、照明範囲が露光動作中に不安定となるという問題はない。また、本案では、図6(b)の反射板が開口絞り位置となり、光軸に対して垂直に配されるため、射出瞳形状が視野位置によらず同一の形状となる。各反射板の配置案を図7に示す。図中、multi-reflector (a)が図6(a)の反射板、同(b)が図6(b)の反射板である。(b)に近接して、開口絞りが配置される。なお、射出瞳形状は、図8に示すような形状となる。

また、円弧反射板と矩形反射板のアスペクト比が大きく異なりながらも、その集合体のアスペクト比をほぼ同一としたことも、本案の特徴である。これにより、物体高とNA

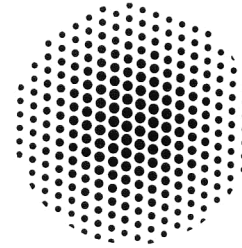


図8 円弧フライアイ照明瞳強度分布(対視野中央および対視野端)。

の積、近軸光学でいうラグランジュの不変量が、光源～マスク面で変化するために、光源から発する光束を広い範囲でマスク面へ導くことが可能となる。

ただし本案は、光学素子の形状が複雑なものとなってしまうために、加工性に多少の難がある。もっとも、この案の加工に関しては検討が進んでおり⁵⁾、おそらく数年のうちには加工に関する問題は解決するはずである。

3. 現状と今後の展望

現時点では、本稿にて紹介した3案のうち、装置として実際に試作されたものは、bow-tieタイプのみである⁶⁾。しかしながら、EUVLの開発は、各分野とも近年進歩が著しく、照明系もまた例外ではない。現時点では諸案が乱立している状態であるが、数年後には各案の優劣が明確となり、照明系システムの本命がみえてくるであろう。

文 献

- 1) W. C. Sweatt: "High-efficiency condenser design for illuminating a ring field," *OSA Proceedings on Soft X-Ray Projection Lithography*, **18** (1993) pp. 70-72.
- 2) H. N. Chapman and K. A. Nugent: "A novel condenser for EUV lithography ring-field projection optics," *Part of SPIE Conference on EUV, X-Ray, and Neutron Optics and Sources* (Denver, Colorado, 1999) pp. 225-236.
- 3) 三宅 明, 塚本雅美: 特開平 10-70058.
- 4) 小松田秀基: 特開平 11-312638.
- 5) H. Takino, T. Kobayashi, N. Shibata, M. Kuki, A. Itoh and H. Komatsuda: "Fabrication of a fly-eye mirror for an extreme ultraviolet lithography illumination system," *Proc. SPIE*, **4343** (2001) 576-584.
- 6) D. A. Tichenor, A. K. Ray-Chaudhuri, W. C. Replogle, R. H. Stulen, G. D. Kubiak, P. D. Rockett, L. E. Klebanoff, K. J. Jefferson, A. Leung, J. B. Wronosky, L. C. Hale, H. N. Chapman, J. S. Taylor, J. A. Folta, C. Montcalm, R. Souffi, E. A. Spiller, K. L. Blaedel, G. E. Sommargren, D. W. Sweeney, P. Naulleau, K. A. Goldberg, E. G. Gullikson, J. Bokor, P. J. Batson, D. T. Attwood, K. H. Jackson, S. D. Hector, C. Gwyn and P. Yan: "System integration and performance of the EUV engineering test stand," *Proc. SPIE*, **4343** (2001) 19-37.

(2002年2月13日受理)