

最近の技術から

エキシマレーザーの空間的コヒーレンス

市原 裕・河田真太郎

(株)ニコン 〒140 東京都品川区西大井 1-6-3

1. まえがき

半導体集積回路の集積度が増加するにつれて、その製造装置である露光機（ステッパー）に対してより細かい線幅を解像することが要求されてくる。露光機の光源としては現在水銀ランプが用いられているが、将来はより短波長の光源が必要となる。エキシマレーザーは短波長であることとパワーが大きいことから最も有力な候補と考えられ、すでにこれを光源とした露光機の発表が多数なされている¹⁻³⁾。

もともとエキシマレーザーは、コヒーレンスが低くスペックル等不要な干渉縞が発生する心配がなく、露光機の光源として最適であると言われてきた¹⁾。しかしこの波長域（KrF で 248 nm）では、使えるガラス材料が合成石英と萤石に限られ、かつ接着材がなく貼合せレンズが使えないという制約条件のため、実用になる色消しレンズを作ることはきわめて困難である⁴⁾。そのため合成石英のみで色収差補正のない投影レンズを作らざるを得ない³⁾。それにより生ずる色収差の影響を抑えるためには、光源のスペクトル半価幅を 3 pm 以下にする必要がある³⁾。通常の KrF エキシマレーザーの半価幅はおよそ 400 pm であるので、レーザーの共振器中にエタロン、プリズム、グレーティング等の分散素子を入れ、スペクトルを狭帯化しなければならない⁵⁾。その結果、時間的コヒーレンスのみならず空間的コヒーレンスも上昇

し、たとえば図 2 のような照明光学系を用いた場合露光面（ウェハ上）に不要な干渉パターンが顕著になり、微細パターン形成の障害となる。

以下にわれわれが行った、レーザーの狭帯域化に伴うレーザーのコヒーレンス度の変化の測定と振動ミラーによる空間的コヒーレンス制御によるこの不要な干渉パターンの低減の結果を示す。

2. エキシマレーザーの狭帯域化と 空間的コヒーレンス

エキシマレーザーの空間的コヒーレンスは 2 重回折格子を用いたシアリング干渉計で測定できる⁶⁾。図 1 に、エタロンによって狭帯域化された KrF エキシマレーザーの空間的コヒーレンスを示す⁶⁾。スペクトル幅を狭くするにつれて、時間的コヒーレンスのみならず空間的コヒーレンスも高くなっているのがわかる。一般にエキシマレーザービームの形状は矩形で、短手方向のコヒーレンスは長手方向のコヒーレンスより高い。図 1 には短手方向のコヒーレンス度のみを示した。4 pm まで狭帯化したときの短手方向の空間的コヒーレンス長は 2 mm 程度あり、これは短手方向のビーム径（5 mm 程度）と比較してかなり大きな値といえる。

3. ステッパーの照明系と干渉縞の発生原因

図 2 に、フライアイレンズを使用した場合のエキシマレーザーステッパーの照明系を模式的に示す。レーザー光は、円筒レンズよりなるビーム整形光学系とビームエクスパンダーで所望の大きさに拡げられ、フライアイレンズに入射する。フライアイレンズは通常の（水銀ランプを用いた）ステッパーにも用いられており、一様照明を得ることを目的としている。このフライアイレンズにより入射光は分割され拡げられ、コンデンサーレンズによりレチクル上で重ね合わされる。このとき、フライアイレンズで分割された各波面が互いにインコヒーレントであれば、レチクル上の照明は平均化され一様となる。

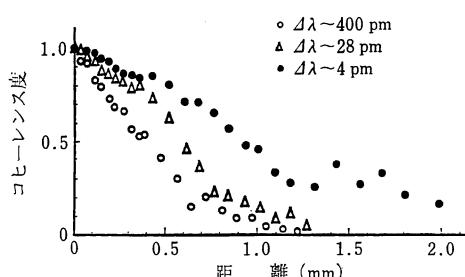


図 1 エキシマレーザーのコヒーレンス度

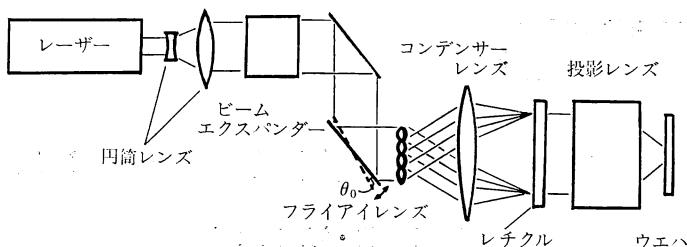


図2 エキシマレーザーステッパーの照明系

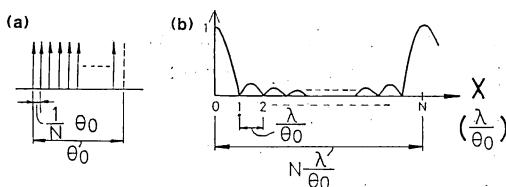
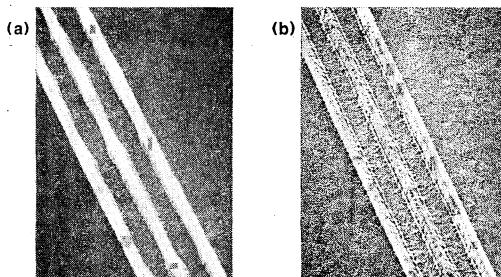


図3 光源の角度分布(a)とコヒーレンス関数(b)

しかし、これらが互いにコヒーレントであれば干渉縞を生じる。この干渉縞のピッチはフライアイレンズの間隔（とコンデンサーレンズの焦点距離）で決まり、コントラストはフライアイレンズの間隔に対応した空間的コヒーレンス度によって決まる。

4. 光源のコヒーレンスの制御と干渉縞のコントラスト

不要な干渉縞の発生を防ぐには、フライアイレンズにより分割される光束を互いにインコヒーレントにすればよい。一般に空間的コヒーレンス関数は、van Cittert-Zernikeの定理により光源のフーリエ変換で与えられる。レーザーの発光パルスに同期してフライアイレンズの前のミラーを振ることにより時間積分すれば、図3(a)のような等角度の平行光線群を得ることができる。このときの空間的コヒーレンス関数は図3(b)で与えられる。図3(b)では等間隔(λ/θ_0)のゼロ点が存在する。この間隔（またはその整数倍）とフライアイレンズの配

図4 0.3 μm ラインアンドスペースパターン
(a)ミラー振りなし, (b)ミラー振りあり

列の間隔を一致させることによってフライアイレンズにより分割され、再び重ね合わされる光は等価的に互いにインコヒーレントとなり不要な干渉パターンを生じない。図4にウェハ上に焼き付けられた 0.3 μm line & space のレジスト像を示す。ミラーを振ることによりレジスト像の同期的な線幅変動がなくなっている。このとき干渉パターンのコントラストは 10% から 2% 以下に低下した。

5. おわりに

エキシマレーザーのスペクトルを狭帯域化することにより、その特徴であるコヒーレンスの低さとパワーの大きさが失われた。しかしここで用いられた方法は、レーザーがさらに狭帯域化された短波長化 (ArF: 193 nm) されても十分対応できると考えられる。エキシマステッパーが量産装置として用いられるためには、レーザーの高出力化が課題である。

文 献

- 1) K. Jain, C. G. Willson and B. J. Lin: "Ultrafast high-resolution contact lithography with excimer lasers," IBM J. Res. Dev., 26 (1982) 151-159.
- 2) V. Pol, et al.: "Excimer laser-based lithography: A deep ultraviolet wafer stepper," SPIE Proc., 633 (1986) 6-16.
- 3) A. Tanimoto, A. Miyaji, Y. Ichihara, T. Uemura and I. Tanaka: "Excimer laser stepper for subhalf-micron lithography," SPIE Proc., 1088 (1989) 434-440.
- 4) 安西 眭: "色消しレンズにあえて挑戦", 日経マイクロデバイス, No. 20 (1987) 103-112.
- 5) R. K. Brimacobe, T. J. McKee, E. D. Mortimer, B. Norris, J. Reid and T. Znotins: "Performance characteristics of a narrow-band industrial excimer laser," SPIE Proc., 1088 (1989) 416-422.
- 6) 引間郁雄, 河田真太郎, 市原 裕, 渡部俊太郎: "エキシマレーザーの空間的コヒーレンス", 第49回応用物理学会学術講演会, 5 p-Q-6 (1988) p. 789.

(1989年10月30日受理)