

気になる論文コーナー

EUVリソグラフィにおける、マスク粗さのコンタクトサイズ変動への影響

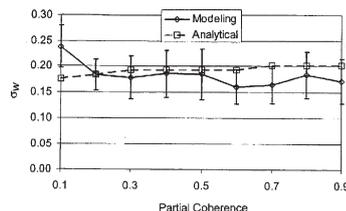
Effect of Mask-Roughness on Printed Contact-Size Variation in Extreme-Ultraviolet Lithography
[P. P. Naulleau: Appl. Opt., 44, No. 2 (2005) 183-189]

EUV リソグラフィとは電子回路製造のための次世代技術であり、回路線幅 32 nm 以下で適用される。波長 13.5 nm の軟 X 線を用い、回路原版 (マスク) を反射型結像光学系を介してウェハ上へ投影することで行う。波長の短さ、反射型であること等から光学素子の製造精度への要求は厳しさを増しており、本論文ではマスク表面粗さの像性能への影響の見積もりを行っている。

マスク上に投影光学系の回折限界程度の微細なドット状パターン (コンタクトホールパターン。ウェハ上で $\phi 30$ nm) を配置し、照明系 σ (コヒーレンスファクター) 0.7 等の条件を想定している。この条件下では、マスク表面粗さとウェハ上の像の関係は統計的な扱いが容易なランダムフェーズで表されることを示し、シンプルな理論式を導いている。この式から、マスク表面粗さの影響は無視できない量であり、当時の表面粗さ実績値の半分程度 (0.045 nmRMS) に抑えるのが望ましいこと、マスク表面粗さの周期がドット状パターンサイズと同程度の場合に影響が大きいこと等を導いている。さらに、部分

コヒーレント結像計算と上記理論式がよく一致することを確認するとともに、照明系 σ の影響は小さいことを導いている。(図 6, 文献 28)

見通しのよいシンプルな理論であり、製造現場等でのわかりやすい指針となると思われる。今後、より一般的な条件でのわかりやすい指針への展開が望まれる。(佐々木隆洋)



今回の理論式 (analytical) と部分コヒーレント結像計算 (modeling) の比較。縦軸: コンタクトサイズ標準偏差, 横軸: 照明系の σ

カラー構造化照明顕微鏡による単一露光光セクションング

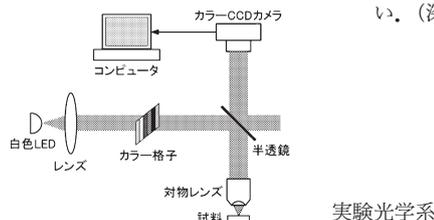
Single-Exposure Optical Sectioning by Color Structured Illumination Microscopy
[L. G. Krzewina and M. K. Kim: Opt. Lett., 31, No. 4 (2006) 477-479]

共焦点顕微鏡と同様に光断層像が得られる顕微鏡として、構造化された照明パターンを用いた方法が知られている。この方法は試料と共役な位置に置かれた二次元格子パターンを試料に投影し、さらに試料と共役な位置にある CCD カメラでそれを撮像する。格子をアクチュエーター等で移動させ、格子パターンの位相を 120 度ずつ変えて 3 回撮像し、それらの画像 (位相シフト像) から振幅に関する位相シフト演算により光断層像が得られる。この方法は面測定であるため、本質的に高速測定に適する。しかし、位相シフト像を得るため最低 3 回撮像しなければならないことが、高速化の妨げとなっていた。本論文では、特別な色順列をもつカラー格子による照明と色分解のためのカラー CCD カメラを用い、機械的な移動部なしに単一の露光で 3 枚の位相シフト像と同等な画像を得る方法を提案している。

カラー格子には、35 mm のスライドフィルムに緑、黄色、赤、マゼンダ、青、シアンの色順列を繰り返したパターンを用いている。白色 LED からの光をカラー格子を通して試料に投影し、カラー CCD で撮像す

ると、CCD の赤、緑、青の各チャンネルには焦点が合っている部分に高コントラストな縞パターンが入り、かつ、位相がそれぞれ 120 度ずつ異なる位相シフト像が撮像される。原理確認実験として、ガンの腹部の光断層像を得ている。また単一露光のみで撮像が可能のため、動的試料に対しても応用可能であり、物体の移動速度に関する議論がなされている。(図 3, 文献 5)

特別な色順列のパターンを用いて位相シフト像を得る点が興味深い。(深野 天)

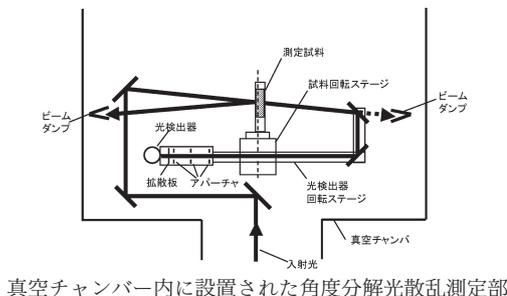


深紫外線および真空紫外線領域における光学素子の角度分解光散乱特性の測定システム

Measurement System to Determine the Total and Angle-Resolved Light Scattering of Optical Components in the Deep-Ultraviolet and Vacuum-Ultraviolet Spectral Regions
[S. Schroeder, S. Gliech and A. Duparre: Appl. Opt., 44, No. 29 (2005) 6093-6107]

著者らは、波長 193 nm の深紫外線と波長 157 nm の真空紫外線領域において、表面粗さがナノメートルオーダーの光リソグラフィ用光学部品の散乱光強度と、その角度特性を測定する装置を提案した。同波長領域ではレイリー散乱の影響を無視できないため、光源と測定装置を真空チャンパー内に配置した。光源には、両波長で駆動できるビーム径 0.9 mm, パルス幅 15 ns のエキシマレーザーを用いた。全散乱光強度の測定ではコブレンツ半球で集光した散乱光を光電子増倍管で検出しており、アパーチャーによる迷光除去、照射光強度のモニタリング、複数回パルス照射による平均処理等により、ノイズレベルを 10^{-6} に抑制している。また散乱光の角度依存性の測定では、回転アームで光源方向と観察方向を 0.01° の精度で制御し、見込み角 2.1×10^{-5} sr での反射光強度を測定しており、光源と検出器のフィルター切り替え、光電子増倍管の増幅電圧の制御等により、9 桁のダイナミックレンジを達成した。実験では、光学部品、および多層膜コートの散乱光特性を測定した。(図 16, 文献 32)

真空中に装置を配置し、気体の散乱の影響を排除している点に大きな特色がある。きわめて高精度であり、短波長化の著しい光リソグラフィの生産機器、光学部品の研究開発を支える計測装置として、応用が期待される。(赤尾 佳則)



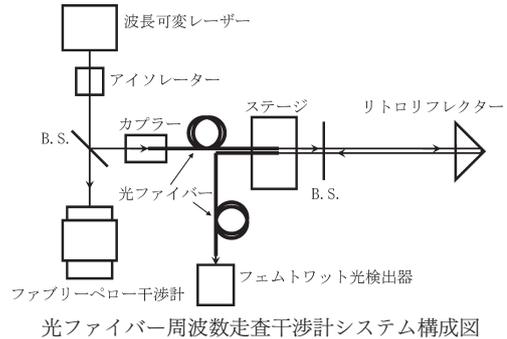
周波数走査干渉法による高精度絶対距離と振動測定

High-Precision Absolute Distance and Vibration Measurement with Frequency Scanned Interferometry
[H.-J. Yang, J. Deibel, S. Nyberg and K. Riles: Appl. Opt., 44, No. 19 (2005) 3937-3944]

三次元空間の位置をマイクロメートルのオーダーで測定するニーズがある。そのために、周波数走査干渉法により1 m以下の距離を絶対測定することを目的としている。

周波数走査を使った干渉による絶対距離の測定の場合、周波数走査の正確さが測定精度に影響を及ぼす。そこで、著者らはファブリー・ペロー干渉計を用いて、周波数走査量を正確に読み取っている。加えて、周波数走査して得られたデータを複数の区間に分割し、それぞれの区間のデータにより測定値を算出して、平均化することによって、振動による測定誤差の影響を低減している。これにより、100~700 mmの領域において、測定値のばらつき標準偏差が63 nmという実験結果を得ている。一方で、それぞれの区間のデータを活用して対象物の位置を算出することによって、0.1~100 Hzで振幅が数nmの振動の測定も試みている。また、いくつかの誤差要因をあげ不確かさの見積もりをしており、その中でシステムに起因する不確かさは1.9 ppmであると考察している。(図7, 表1, 文献13)

干渉計により絶対距離の測定を実現している点では興味深い。現実実験機ではデータ取得に秒から数十秒の時間が必要な点に、改良が望まれる。(川崎 和彦)



光ファイバー周波数走査干渉計システム構成図

波長1.5 μmのフェムト秒パルスによるニオブ酸リチウム結晶のフォトリフラクティブ効果

Photorefractive Effect in Iron-Doped Lithium Niobate Crystals Induced by Femtosecond Pulses of 1.5 μm Wavelength
[O. Beyer, I. Breunig, F. Kalkum and K. Buse: Appl. Phys. Lett., 88, (2006) 051120]

フォトリフラクティブ効果とは、入射した光の空間的強度分布に応じて結晶内の不純物が光イオン化して電荷が空間的に移動し、形成された空間電場から電気光学効果を介して屈折率変化が誘起される現象である。しかし、通信波長帯域である1.5 μm付近の波長では、不純物の光イオン化を起こすための光子エネルギーが十分ではないため、屈折率変化を誘起することは難しく、またこの波長領域においてフォトリフラクティブ感度をもつ強誘電体材料の報告はほとんどない。

本論文では、波長1.5 μmのフェムト秒パルスの多光子吸収過程を用いて、初めてニオブ酸リチウム結晶においてフォトリフラクティブ効果を観測している。実験では、パルス幅約130 fs、光強度50~260 GW/cm²のパルス光をFeを添加したニオブ酸リチウム結晶に入射させ、屈折率変化の様子を波長633 nmの光で干渉計により観測している。その結果、 $\Delta n \sim 10^{-3}$ という大きな屈折率変化が誘起され、また記録光の偏光方向により屈折率変化の大きさや符号が異なるという現象

が観測された。このように、記録光の偏光方向に依存して、形成される空間電場の大きさや符号が変化するという現象は、通常の可視領域での記録ではみられないことであり、非常に特異な現象である。著者らはこれらの原因を、フォトリフラクティブ効果の駆動力である光起電力電流の向きと大きさが偏光により異なるためとしている。(図4, 文献16)

通信帯域の波長におけるフォトリフラクティブ効果は、これまでメモリー性に乏しい半導体材料でしか観測されていない。一方で、ニオブ酸リチウム結晶は、年オーダーで屈折率変化を保持することができ、厚いホログラムの特性を生かした狭帯域波長選択フィルターや光合分波デバイスなどへの応用が期待できる。今回のような通信波長帯域においてさらに屈折率変化を効率よく誘起できるようになれば、大変興味深い。(藤村 隆史)

半導体ナノ構造中の超低速光 (<200 m/s) の伝搬

Ultraslow Light (<200 m/s) Propagation in a Semiconductor Nanostructure

[P. Palinginis, S. Crankshaw, F. Sedgwick, E.-T. Kim, M. Moewe, C. J. Chang-Hasnain, H. Wang and S.-L. Chuang: Appl. Phys. Lett., 87, No. 17 (2005) 171102]

光遅延デバイスは、すべてを光で処理する光情報処理にとって重要なデバイスである。この光遅延デバイスには、光の位相の制御技術と、それに基づく広帯域で高解像度の群速度の制御技術が必要である。近年、CPO (coherent population oscillation) を用いて超低速光を原子気体や固体結晶中で発生させることができるようになり、その可能性がひらけてきた。このような中、光遅延デバイスを半導体で実現することは、小型化や集積化の容易さなどから注目を集めている。著者らは、半導体量子井戸構造中で発生した超低速光の遅延時間を直接測定することに初めて成功している。試料はサファイア基板に固定され、GaAs基板が除去されたGaAs(13 nm)/Al_{0.3}Ga_{0.7}As(15 nm)からなる15層の多重量子井戸で、10 Kに冷却した状態で使用された。チタンサファイアレーザー光をヘビーホールの励起子吸収のピーク波長にチューニングし、さらに電気光学変調器で変調した状態でこの試料へ照射して、その透過光の時間遅れを計測した。その結果、1 ns以上の遅延時間が観測された。活性領域(GaAs)の長さは195(=13×15)nm

であることから、その群速度は200 m/s以下に相当する。この遅延時間は照射するレーザー光の強度に依存することも確認された。照射強度により遅延時間を可変できることから、可変光バッファー等への応用も期待される。(図3, 文献16)

1 ns以上の遅延を200 nm以下の領域で実現できることを実証したことは注目に値する。使用温度が低く、波長の制限があるなどの制約条件は多いが、特性は十分であり光情報処理などへの応用が期待される。(山本 博昭)