

レーザー干渉計を用いた石英ガラス屈折率均質性の計測

(株)ニコン ガラス事業室

吉田 明子

Refractive index homogeneity measurement of silica glass by Laser interferometer

Akiko Yoshida

NIKON Corporation Glass Division

1. はじめに

半導体露光装置に用いられる石英ガラスには高い屈折率均質性が要求される。屈折率の不均質が結像性能に大きく影響するためである。本稿では石英ガラスの屈折率均質性をレーザー干渉計を用いて計測する例を紹介する。

2. レーザー干渉計の原理

ガラスの屈折率均質性を評価する手法として、干渉計法、シュリーレン法などが知られている。レーザー光源を用いるレーザー干渉計はガラスの屈折率均質性を高精度に計測することができる。中でもフィゾー型干渉計は、その構成上の特徴から屈折率均質性の高精度計測に適している。

フィゾー型干渉計の構成例を図1に示す。フ

ィゾー干渉計はレーザー光源、ビームスプリッター、高精度に研磨された参照面（フィゾー面ともよばれる）およびミラー面、CCDカメラ、などから構成される。フィゾー干渉計による内部不均質の計測では、フィゾー面とミラー面との間に被検物を配置する。被検物を透過してミラー面によって折り返された光と参照面で折り返された光との干渉縞をCCDで観察する。被検物の屈折率不均質は、干渉縞の本数や部分的なゆらぎとして観察される。参照面以前の光路は共通であるため、振動等の環境からのノイズを受けにくく、被検物の不均質の高精度計測が可能となっている。高精度計測の実現のためには、温度・振動などの周辺環境の整備は言うまでもない。また被検物を安定して保持するための治具の最適化も欠かせない。

フィゾー型干渉計の代表的な計測方法として、浸液法、ポリッシュドホモ法、FT-PSI法が挙げられる。浸液法は研削仕上りの被検物の表面に被検物と同じ屈折率を持つオイル（浸液）を塗布し見かけ上透明にして光を透過させ

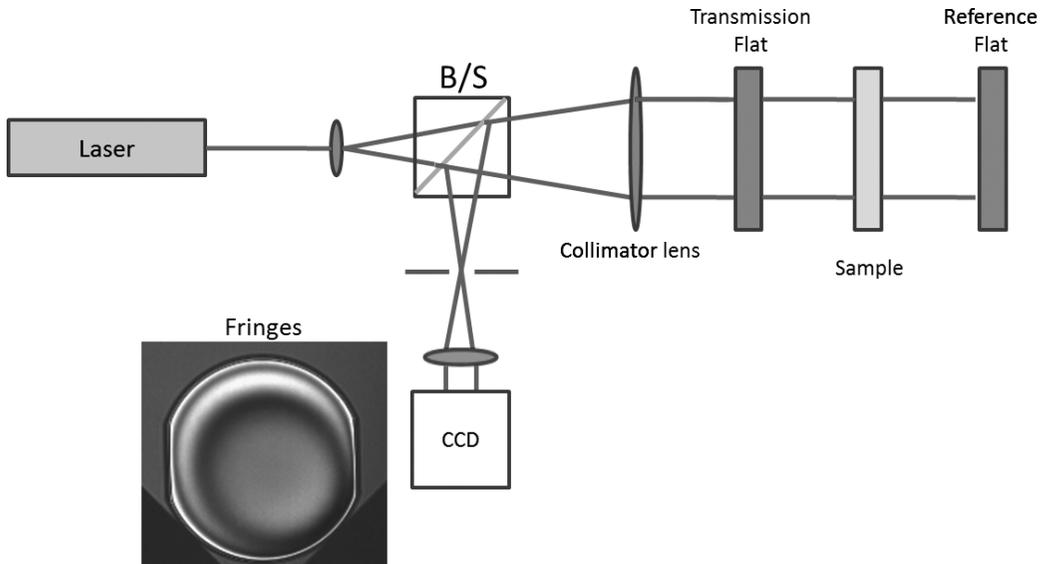


図1 フィゾー干渉計の構成例

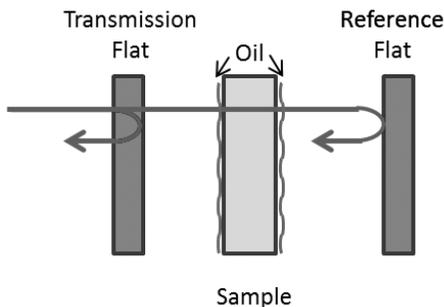


図2 浸液法

て干渉縞を得る(図2)。被検物の作製が容易・安価である反面、塗布した浸液の厚み不均等や経時変化などが計測誤差となり、高精度化には限界がある。浸液の均一な塗布には熟練が必要であるため、作業者による差も生じやすい。

ポリッシュドホモ法およびFT-PSI法では被検物は研磨されていることが必須である。浸液の影響を排除できることから計測の安定性および高精度化が期待できる。ポリッシュドホモ法は被検物をクサビ状に高精度研磨し、ミラー面、被検物の表面、裏面、被検物を透過したミラー面、と参照面との4種の干渉縞をそれぞれ独立して取得する(図3)。得られた4つの波

面から被検物の屈折率均質性を算出することができる。

被検物にクサビ角をつけて高精度研磨する必要がある、サンプル作製費用が高いという難点がある。また各波面を測定する場合の光軸中心の位置決め制御が必要であり、測定には習熟を要する。FT-PSI法も被検物を高精度に研磨する必要があるが平行平板で良く、サンプル作製の難易度はそれほど高くない。FT-PSI法ではポリッシュドホモ法で計測する4波面に加えて、被検物の表裏面および被検物裏面とミラー面の干渉波面の6波面を同時計測し、フーリエ変換を用いて波面分離を行った後、被検物の屈折率均質性を算出する(図4)¹⁾。被検物の屈折率均質性と同時に表裏面の反射波面精度も計測できる点がユニークである。FT-PSI法による計測は、浸液を用いないこと、多波面同時計測のため光軸中心の位置決め制御が不要なこと、から、上述の2つの測定方法に比べて高精度計測が可能である。いずれの計測手法を選択するかは、要求されている精度とコストとの兼ね合いによる。

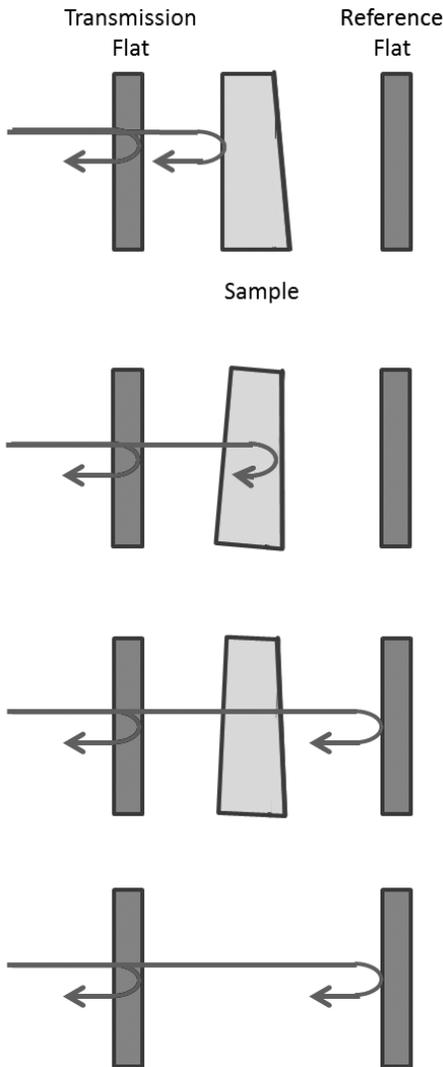


図3 ポリッシュドホモ法

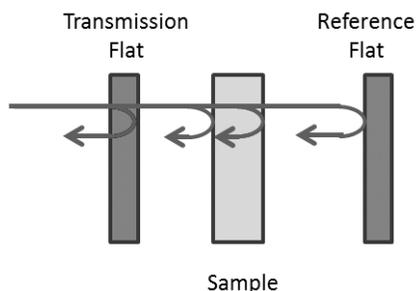


図4 FT-PSI法

3. 石英ガラスの屈折率均質性と干渉計による計測の例

石英ガラスの屈折率分布は、主に製法に起因する組成分布、および構造に起因する密度揺らぎによって形成される。組成分布の主要因として、製法上石英ガラスの構造内に取り込まれるOH基、塩素などが挙げられる。一方構造起因の密度揺らぎは、熱履歴に大きく影響される²⁾³⁾。現在では、合成条件の最適化（温度分布制御など）⁴⁾、および二次的な熱処理であるアニール条件の最適化により屈折率均質性の高い石英ガラスを得ることができるようになった⁵⁾。投影レンズに用いられる石英ガラスの屈折率均質性をフィゾー干渉計を用いて測定した例を示す（図5）。波面が高い部分は屈折率が低く、波面が低い部分は屈折率が高いことを示している。製法の最適化による成分濃度分布の抑制および精密アニールによりφ300mm全面にわたり高均質を達成できた。

さらに近年では、拡大成形処理により高均質を保ったまま直径650mm以上の石英ガラスを得ることができるようになった。図6はφ600mmにおいて屈折率均質性2ppmの例である。測定はFT-PSI法にて行った。このような大口径品の計測の際には波面合成という技術が用いられる。一般に干渉計の計測はフィゾー面の口径よりも小さい径の被検物に限られるが、波面合成技術を適用することにより、干渉計のフィゾー面よりも大きな口径をもつ被検物も計測できる。被検物全面をカバーできるように複数個所で重なり合う透過波面を計測する。重ねあわせ部のチルト補正を行いながら各データを接続して複数波面を一つの波面に合成し、大口径被検物の内部均質性データを得ることができる。

石英ガラスにエキシマレーザーのような高出力のレーザーを照射することにより、屈折率均質性の変化が誘起される。屈折率が上昇する場合をコンパクション、屈折率が低下する場合を

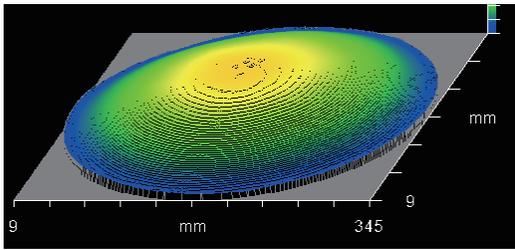


図5 投影レンズの干渉計測定例

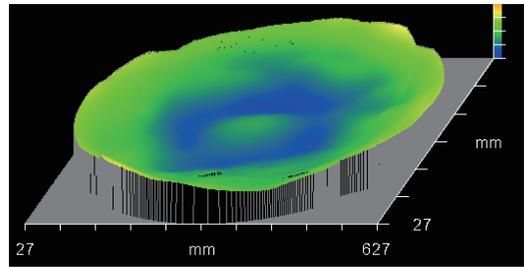
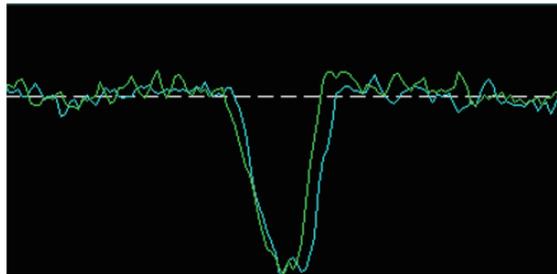
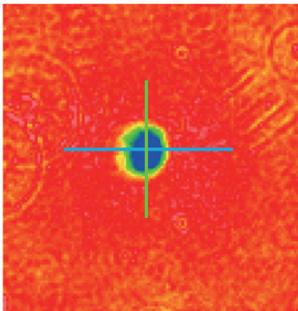


図6 大口径品の干渉計測定例

コンパクションの測定例



レアファクションの測定例

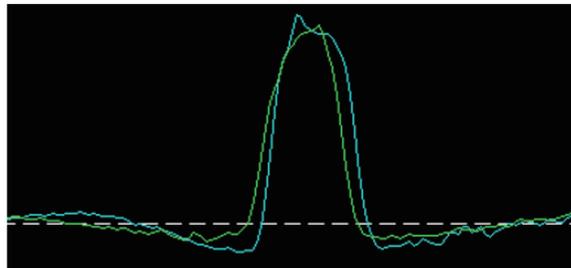
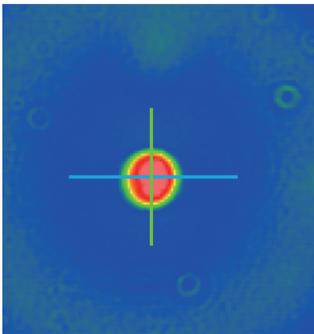


図7 コンパクション、レアファクションの例

レアファクションと呼ぶ。これらの現象は、エキシマレーザーの照射による石英ガラスのSi-O-Si結合の開裂および再結合が原因と考えられている。コンパクション・レアファクションの計測例を図7に示す。2D図は、石英ガラスサンプルの中心に円形のエキシマレーザーを照射し、照射部のみ屈折率が変化していることを示しており、断面図は照射部の透過波面の位相差を示している。コンパクションでは照射部の

波面が未照射の部分に比べて遅れている、つまり屈折率が上昇していることがわかる。一方レアファクションでは照射部の波面が未照射の部分に比べて進んでいる、つまり屈折率が低下していることがわかる。屈折率変化の抑制には溶存水素分子濃度、OH基濃度の最適化、基本構造の安定化が有効と考えられている⁶⁾。コンパクション・レアファクションといった現象は、半導体露光装置においては結像性能の劣化に直

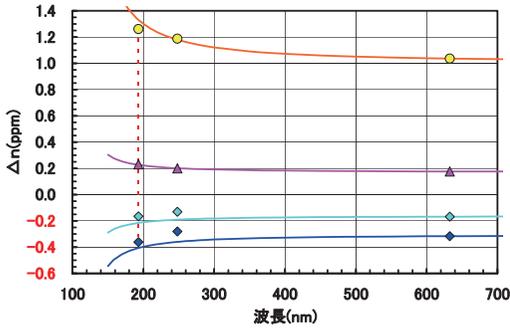


図8 コンパクション、レアファクションの波長依存性の測定例

結するため、露光装置の光学設計において、これらの現象があらかじめ高精度に計測され石英ガラスの寿命予測が正確になされていることが重要である。

最後にコンパクション・レアファクションの波長依存性について述べる。現在入手できる一般的な干渉計の光源は He-Ne レーザー（波長 632.8 nm）である。しかし、実際には石英ガラスは紫外から赤外までさまざまな波長領域において光学部品として使用される。半導体露光装置に用いられる光源は ArF（193.4 nm）、KrF（248.3 nm）などの真空紫外線である。そこで、使用波長におけるコンパクション・レアファクションを実測し、波長依存性を検証した例を紹介したい。石英ガラスの密度変化に伴う屈折率変化の波長分散は、ローレンツローレンス式の微分式により、以下のように記述される。

$$\Delta n/n = (\Delta\rho/\rho) \cdot (1 + \Omega) \cdot (n^2 - 1) \cdot (n^2 + 2) / 6 n^2$$

ρ : 密度

Ω : 相対密度変化と相対分極率変化の比率:

$$\Omega = -0.19 \pm 0.04$$

$$n@632.8 \text{ nm} = 1.4570, n@248.3 \text{ nm}$$

$$= 1.5084, n@193.4 \text{ nm} = 1.5601$$

石英ガラスに ArF エキシマレーザーを照射し、コンパクション・レアファクションを誘起した。これらのサンプルを He-Ne レーザー、ArF エキシマレーザー、KrF エキシマレーザーを光源とする干渉計で計測した結果を図 8 に示す。屈折率変動の波長依存性はローレンツローレンス式の微分式に従うことが実測により確かめられた。

4. おわりに

石英ガラスの屈折率均質性をレーザー干渉計によって計測する例を紹介した。露光装置の高精細化に伴い、Zernike フィットting など高次の対称性を含む解析が要求されるようになり、干渉計の計測もさらなる高精度化が求められている。温度・振動・気流など測定環境の整備や、被検物の作製精度・被検物の保持方法の最適化、などにより一層の工夫が必要である。

参考文献

- 1) L. L. Deck, Proc. SPIE, Vol 4451 (2001), 424-431
- 2) 非晶質シリカガラスハンドブック (1999), 110-119
- 3) K. Saito and A. L. Ikushima, Prog. Theor. Phys. Suppl., 126 (1997), 277-280
- 4) 小峯典男, 中川和博, 高野潤, 神保宏樹, 平岩弘之, “石英ガラスの製造装置および製造方法”, 公開特許公報 平 07-053226
- 5) 小峯典男, 藤原誠志, 神保宏樹, “石英ガラスおよびその製造方法”, 公開特許公報 平 11-092153
- 6) 小峯典男, 平岩弘之, “紫外線照射により緻密化が抑制された石英ガラス部材”, 公開特許公報 平 9-12323