

深紫外顕微鏡における干渉パターンノイズの均一化

小野 明*・大橋 勝樹**

*株式会社トプコン生産・環境グループ 〒174-8580 東京都板橋区蓮沼町 75-1

**株式会社東芝生産技術センター 〒235-0017 横浜市磯子区新磯子町 33

Suppression of Interference Pattern Noise on Ultra Violet Microscopic Images

Akira ONO* and Katsuki OHASHI**

*General Production & Environment Division, Topcon Corporation, 75-1, Hasunuma-cho, Itabashi-ku, Tokyo 174-8580

**Corporate Manufacturing Engineering Center, Toshiba Corporation, 33, Shin-isogo-cho, Isogo-ku, Yokohama 235-0017

Observation with fine resolution is essential for microscopic inspection, as the rule of semiconductor patterning becomes narrow. The principle method is the use of short wavelength of light illumination. An ultra violet laser has the advantages of short wavelength and high intensity for a light source of such a microscope. But a serious problem of interference pattern noise arises by the use of a laser source. In this paper, we use a rotating random phase disk to suppress the interference pattern noise. The disk is made of quartz glass and is divided into small sub-areas and each area consists of different phase shifters. The phase values of the areas are 0 , $\pi/2$, π and $3\pi/2$ and they are distributed in random order. The disk is inserted into the optical path of a microscope illumination with an ultra violet laser source. As rotating the disk, the interference pattern noises are averaged out and a clear microscopic image can be obtained with high resolution.

1. はじめに

サンプルをできるだけ分解能高く光学的に観察することへのニーズが急速に高まってきている。LSI (large scale integrated circuit) の微細化がその大きな推進役になっている。従来より、光学的な方法として、ニアフィールド・プローブ顕微鏡と、共焦点顕微鏡があり、前者は分解能は高いものの、画像入力速度が遅く、後者は透過光照明画像を得ることは困難である。

分解能を高める基本的方法は照明波長を短くし、深紫外線で観察することである。そこで波長が可視光のおよそ半分の深紫外線で観察すれば分解能は2倍に向上できる。しかし、以下の理由でいままでこの基本的方法が普及しなかった。

- ① 深紫外線に感度をもつ画像入力用カメラが安価な価格で入手できなかった
- ② 深紫外線用の顕微鏡レンズが入手困難だった
- ③ 輝度の高い照明用深紫外光源としてレーザー光源が

あったものの、その可干渉性の高さから、干渉パターンノイズに悩まされてきた

最近①、②に関しては標準品として深紫外線用の画像入力カメラや顕微鏡レンズが入手できるようになってきている。

ここでは、これらを背景に③の課題を解決する方法を提案する。つまり、深紫外レーザー光を高分解能観察用照明に使うとき発生する干渉パターンノイズ均一化方法の開発であって、レーザーとしては連続発振が可能な、発振波長 $257 \mu\text{m}$ 、出力 100 mW の SHG-Ar レーザー (SHG: second harmonic generation) を用いた。

特に微細欠陥観察を目的としているために、通常の顕微鏡システムと同等以上に高速 (ミリ秒・オーダー) で画像を入力できるカメラを用い、干渉パターンノイズの均一化を高速でリアルタイムで実現する方法を開発した。

2. 干渉パターンノイズ均一化方法のサーベイ

干渉性の高い光源を用い、結像光の位相が乱れたとき不規則な形状の干渉パターンが像に重畳される。これを一般

*E-mail: akira.ono@topcon.co.jp

にスペックルパターンノイズと呼ぶ。スペックルパターンノイズは天体観測において、大気ゆらぎによる星像のちらつきから話題になりはじめた。しかし積極的に抑制しようと試みはじめられたのはホログラムの再生像の中のスペックルパターンノイズからである。特にコンピューター・ホログラムやキノフォルムでは、それは深刻なノイズであった。

いままで、光源の波長帯域を広げ、可干渉性を低下させる等のさまざまな試みがされてきた。その中の光学原理に基づいたひとつの方法は、照明光波面の位相をランダムにすることである¹⁾。

位相をランダムにする方法として擬似ランダム位相板が使われる²⁾。この方法ではガラス板をメッシュ状に区切り、それぞれのますをわずかに彫り込むことにより、透過する光の位相を周辺よりシフトさせる。このときシフト量を0, π の2段階から0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ の4段階にランダムに分布させている。これらの位相の統計的重畳作用によってノイズによる強度変動を平均化することができる。

最近では、キノフォルムの位相分布にあらかじめランダムな位相分布を重ね書きし、これを空間光変調器 (spatial light modulator) で像再生させる方法が提案されている³⁾。このとき、ランダム位相だけ変化させると、再生像に重なるノイズが平均化される。

一方、最新の半導体 LSI を製造する KrF エキシマーレーザーステッパーではランダムなパターンではなく、周期性のある干渉パターンノイズが問題となっている。このノイズは点光源であるレーザー光を擬似的に面光源にするために使用されるフライアイレンズによって生じる。フライアイレンズは小さいレンズが規則正しく2次元アレイ状に配列している光学素子であって、周期的なノイズを与える。なお、この分野では、このノイズもスペックルパターンノイズとよばれるが、本論文では通常のスペックルパターンと区別して、これを干渉パターンノイズとよぶ。

この干渉パターンノイズを均一化するためにエキシマーレーザーのパルス発振タイミングに合わせてミラーを振動させ、干渉縞を等間隔に移動させる方法が提案されている⁴⁾。つまり振動によって移動する干渉パターンノイズを重ねることによってノイズを平均化させている。

本論文の目的である高分解能観察のためには、ステッパーの場合と同様にレーザー光を被観察物体を面光源で均一に照明する必要がある。このためフライアイレンズを用いており、上述のような周期性のある干渉パターンノイズが発生する。

ただし振動ミラー方式を用いると以下の問題が生じる。

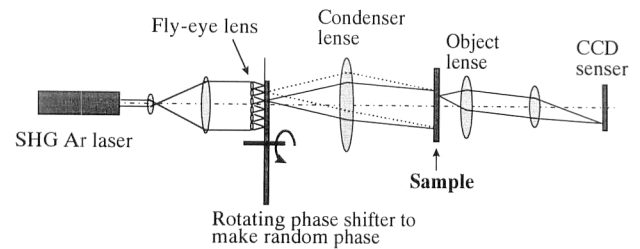


Fig. 1. Schematic diagram of the optical setup.

- ① 正確にミラー角度を制御しないと均一な平均化ができず、システムが複雑になること
- ② 正確にミラー角度を制御するとき、高速性に難点があること
- ③ 振動の折り返し点でミラーの角速度が遅くなる。このため連続発振のレーザーでは、この部分でむらのできる可能性があること

そこで本研究では、前述のホログラムで発生したスペックルパターンノイズを均一化するために用いたランダム位相板方式をさらに発展させた方式を採用した。

3. 回転ランダム位相板による干渉パターンノイズの均一化

3.1 考案した光学系

Fig. 1 に今回用いた光学系の略図を示す。全体的にはケーラ照明の構成になっている。また光学系硝材はすべて深紫外線が透過する石英を用いている。SHG-Ar レーザーから出たレーザー光はエキスパンダーレンズによって拡大される。拡大されたレーザー光はフライアイレンズによって 10×10 に分割される。このフライアイレンズの焦点面の 10×10 の集光点がケーラ照明の光源に相当する。

この焦点位置近くに回転ランダム位相板を置く。回転ランダム位相板を透過したレーザー光はコンデンサーレンズによって試料面に照射される。試料を透過したレーザー光は対物レンズによって拡大され紫外線域に感度をもつ CCD 画像センサー上に結像される。画像データはコンピューターに取り込まれ、ディスプレイ上に表示される。

フライアイレンズによってレーザー光源は擬似的な面光源となっており、このとき面光源が大きいほど照明系の開口数 NA は大きくなる。今回用いた光学系では対物レンズ系、照明系とも NA 0.75 (σ 値=1) を採用した。

Fig. 2 に回転ランダム位相板の概略図を示す。直径 130 mm の石英の円盤から作られている。前面を 0.8 mm のメッシュに区切り、おのおののます目ごとに、0, 133, 266, 399 nm のいずれかの深さで掘り込んである。これらの深さはそれぞれ、0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ の位相変化を与え

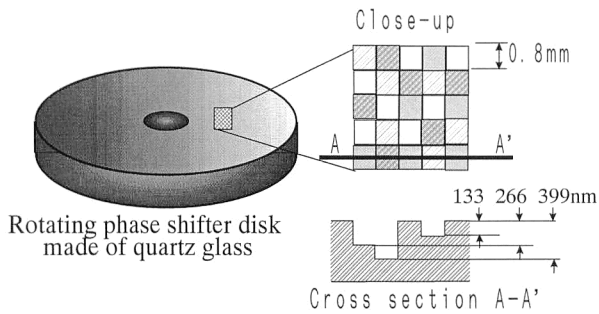


Fig. 2. Rotating phase shifter to make random phase.

る。また、それぞれの深さはランダム関数に従って配列されている。

この位相板を回転させると、順次それぞれのレーザー光の位相はランダムに変化していく。

3.2 干渉パターンノイズ均一化方法の原理

Fig. 1において、フライアイレンズからのレーザー光は試料面で干渉縞を形成する。 m 番目のフライアイレンズからのレーザー光のサンプル上の複素振幅を U_m で表示すると、式 (1) で表せる。

$$U_m = A_m \exp i(\omega t + \delta_m) \quad (1)$$

ここで A_m は振幅、 ω は角振動数、 δ_m は位相である。フライアイレンズの数が全部で M 個あり、それらからのレーザー光を重ね合わせたときの干渉強度は以下の式 (2) で表せる⁵⁾。

$$I = \sum_{mm'} A_m A_{m'} \cos(\delta_m - \delta_{m'}) \quad (2)$$

ここで δ_m は

$$\delta_m = k \left\{ \left(m - \frac{M}{2} \right) \sin \theta \right\} x + \phi \quad (3)$$

与えられる。ただし簡単のため x 軸上の 1 次元で考えてある。ここで k は波数、 θ は隣合うフライアイレンズからのレーザー光同士の交叉角、 ϕ は回転ランダム位相板によって生じる位相変化である。以下レーザー光の強度分布は均一で振幅 A_m はすべて等しいと仮定する。これらの式を用いて干渉パターンノイズの強度分布をシミュレートした結果を Fig. 3 と Fig. 4(a), (b), (c), (d) に示す。

いま、回転ランダム位相板がなく、 ϕ が一定とすると、Fig. 3 に示すように、教科書等によく見受けられる周期性のある鋭いピークをもった干渉縞が現れる。これがレーザー光を照明に用いたときの典型的な干渉パターンノイズである。

次に、 ϕ にランダムな位相を与えた場合の干渉強度分布をコンピューターでシミュレートした結果を Fig. 4(a) に示す。ここで、フライアイレンズの数は $M=10$ とした。ここにみられるように干渉強度分布には周期性は

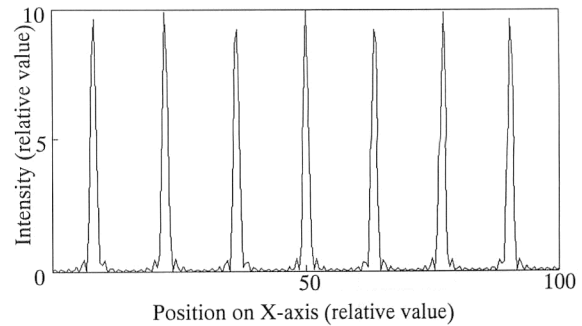


Fig. 3. Intensity distribution of interference patterns obtained without the rotating phase shifter (simulation).

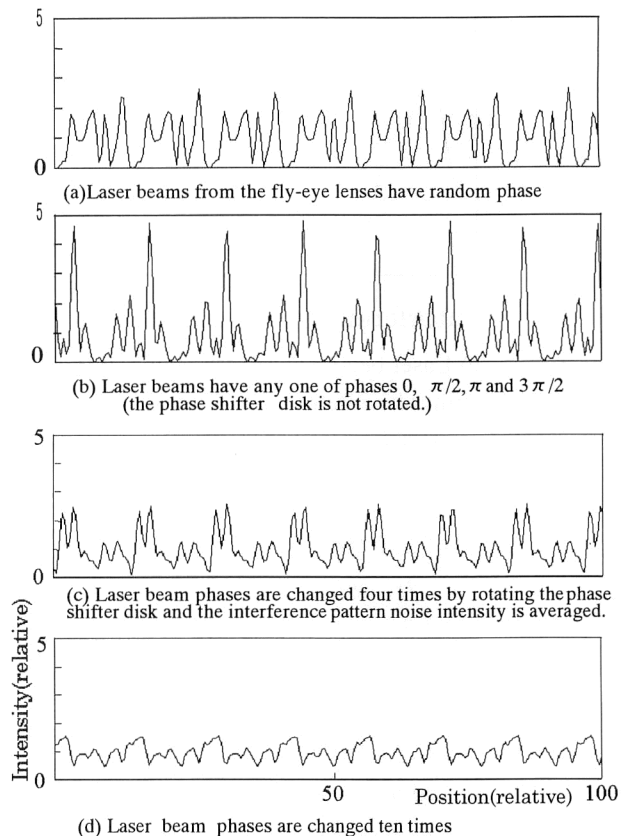


Fig. 4. Intensity distribution of interference pattern noise obtained by using the phase shifter (simulation).

残っているが鋭いピークはいくつものピークに分散する。しかし、本研究で用いた回転ランダム位相板は完全ランダムな位相変化を与えるのではなく、製作を容易にするため前述のように $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ の 4 段階の位相変化をランダムに配列したものである。この位相分布を用いたときの干渉強度分布を同様にコンピューターでシミュレートした結果が Fig. 4(b) である。

Fig. 4(a) と Fig. 4(b) は同様な特性をもっていることがうかがえる。すなわち、 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ の 4 段階のランダムな配列でも、完全ランダム位相と同等な効果を与えられることが確かめられた。

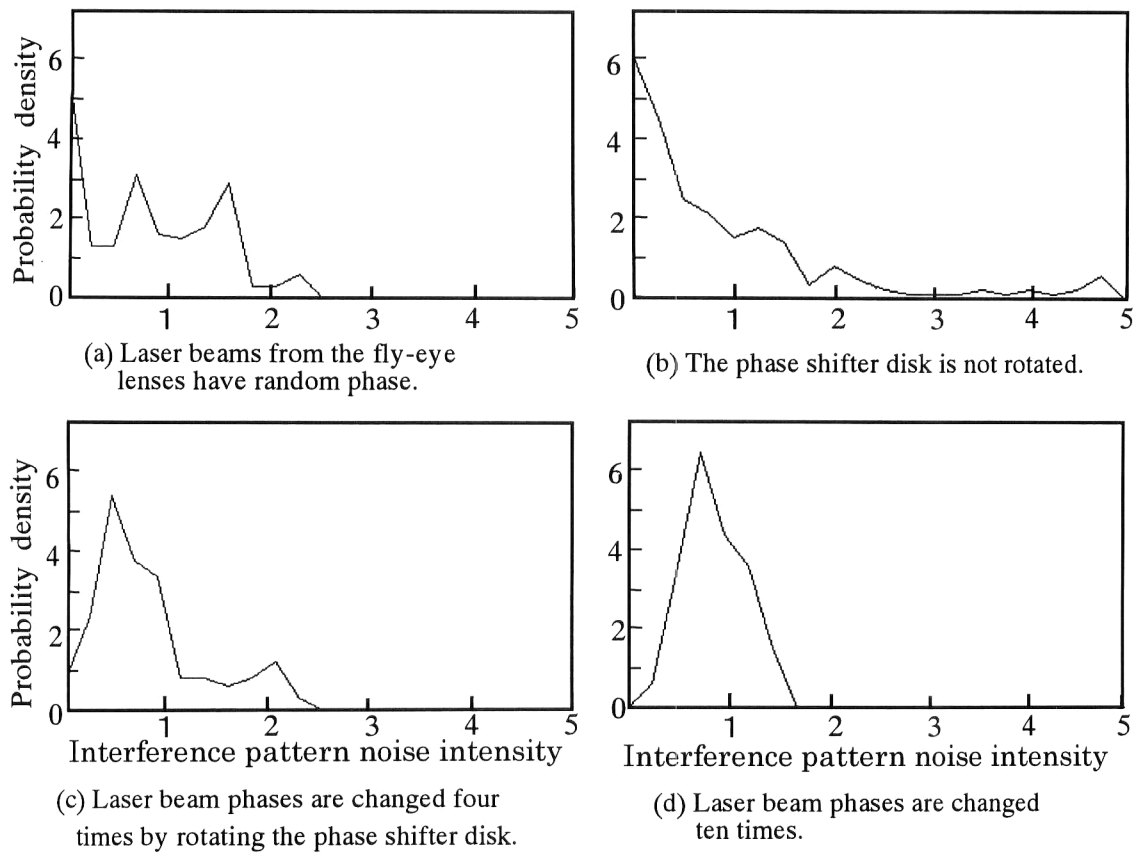


Fig. 5. Probability density distribution of intensity of the interference pattern noise (simulation).

次に、回転ランダム位相板を回転させたときの効果を同様にシミュレートした。回転に従って上記4段階の位相の配列はランダムに変化していくので、カメラには変化していく強度の積分値が記録される。シミュレーションでは回転により位相配列がランダムに変化することを仮想し、回転による4回の変化と、10回の変化による強度分布の積算値を計算した。結果を Fig. 4(c) と Fig. 4(d) にそれぞれ示す。

Fig. 4(b), (c), (d) を比べてみると、回転によって、干渉強度が次第に平均化されていくのがよくわかる。つまり高いピークは下がっていき、谷底部分もゼロに落ちることになっていく。

Fig. 4(a), (b), (c), (d) の強度分布のヒストグラムを計算したのが Fig. 5(a), (b), (c), (d) である。ここで横軸が干渉縞強度、縦軸がヒストグラム頻度である。平均化の回数が増えるに従って、ヒストグラム分布のすそ野が狭くなっていくのがわかる。またグラフの形が次第に正規分布状に近づいていく。

強度分布の確率密度が正規分布をしているならば、統計的には標準偏差によって特徴づけられる確率密度分布の幅は、平均化のための位相変化の回数を N とすると $1/\sqrt{N}$

に減少していくことが予想される。このことから、Fig. 5(a), (b) の結果は正規分布から大きくずれているものの、シミュレーションから、ほぼ $1/\sqrt{N}$ の割合で干渉パターンノイズは平均化できることが期待される。

以上のように考案した回転ランダム位相板の効果が推定される。次章では、これを実験で検証した。

4. 実験結果

Fig. 6 は Fig. 1 に示す光学系で試料面を CCD カメラで観察した結果である。サンプルは石英ガラス板である。Fig. 6(a) は回転ランダム位相板をはずしたとき、Fig. 6(b) は回転ランダム位相板を付けてあるが回転は止めているとき、Fig. 6(c) は 100 rpm で回転させたとき、Fig. 6(d) は 1200 rpm で回転させたときの画像である。CCD カメラの画像取り込みにおける蓄積時間は約 33 ms である。位相板を 100 rpm で回転させたとき約 24 回 ($N=24$)、1200 rpm で回転させたときは約 290 回 ($N=290$) 位相分布は変化する。CCD カメラにはこれらの回数だけ強度分布が重ね書きされる。

Fig. 6(a), (b) では周期性のある干渉パターンが観察される。一方、Fig. 6(c), (d) のように位相板を回転さ

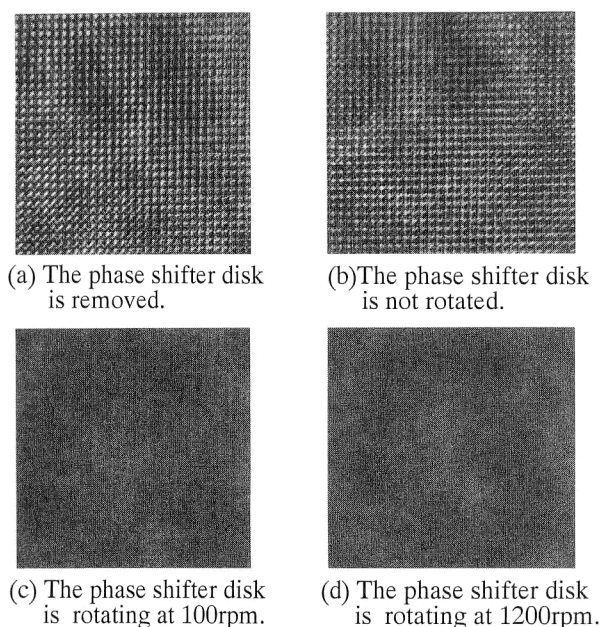


Fig. 6. Interference pattern noise observed experimentally by using a CCD camera.

せると、その回転に従って干渉パターンの鮮明度は低下し、均一な照明が得られていくことがわかる。

Fig. 7は格子パターンが描かれているサンプルを観察した例である。サンプルは半導体LSIリソグラフィー用のマスクで、マスクには $10\mu\text{m}$ ピッチの市松格子状のパターンが形成されている。Fig. 7(a)は位相板を回転させていないとき、Fig. 7(b)は位相板を回転させたときの観察画像である。Fig. 7(a)では光源の干渉パターンのため、市松格子のエッジ部が不鮮明であるが、Fig. 7(b)で

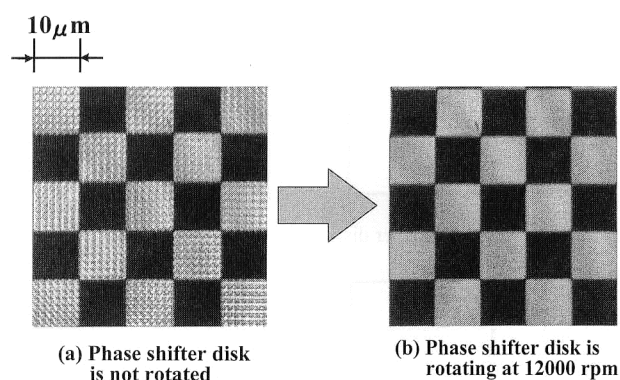


Fig. 7. Sample observation.

はそれが消失して鮮明な画像が得られている。

5. 考 察

Fig. 6(a), (b), (c), (d)のおおのの強度分布を1次元走査して得られた強度分布をFig. 8に示す。なお、レーザーの電源を切り、カメラに光を入れなかったときの信号強度レベルは48(暗レベル)であった。またおおのの強度分布の確率密度分布をFig. 9に示す。

Fig. 8(a)をみると干渉パターンノイズの周期性はあるものの、Fig. 3のシミュレーションで見られるような鋭いピークはみられない。むしろその変動はFig. 4(a)に近い。このことは、フライアイレンズの個々の長さが均一ではなく、わずかにばらついていることを推測させる。この場合には、フライアイレンズから出たレーザー光の位相はすでにランダムと考えられ、位相板の有無で特に大きな変化は生じない。

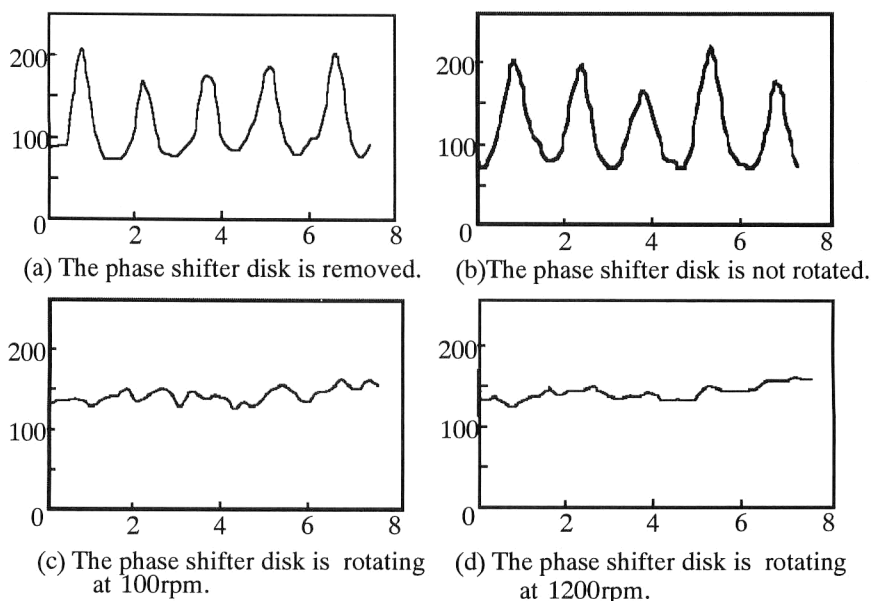


Fig. 8. The intensity distribution of interference pattern noise.

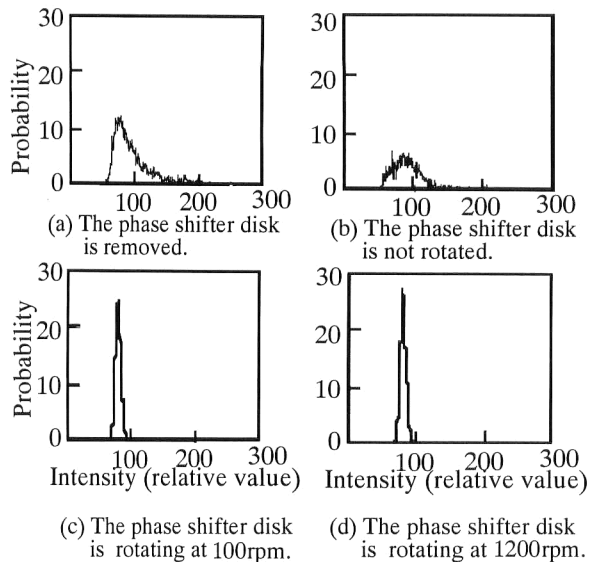


Fig. 9. Probability density distribution of the interference pattern noise obtained by experiment.

さらに Fig. 8(a), (b) において, 最も暗い部分の強度レベルは, 約 70 程度で, 暗レベルの 48 には達していない。また Fig. 9(a), (b) の確率密度分布は Fig. 5(a), (b) のシミュレーション結果に比べると正規分布に近い。

これらの結果は, シミュレーションではレーザー光を完全にコヒーレントとして扱っているが, 実際は空間的コヒーレンス性が若干低いことによると思われる。

Fig. 9(c), (d) では確率密度分布が正規分布に近いのでほぼ $1/\sqrt{N}$ に比例して照明が均一化することがシミュレーションの結果から期待できる。

Fig. 8(b) では強度変動幅 (peak to valley 値) がグラフ上で約 150, (c) では約 30 であり, ほぼ 1/5 となっている。この値は $N=24$ に対する $1/\sqrt{N}$ の値と一致する。

しかし, 1200 rpm で回転させたときは $N=290$ で強度変動幅はおおよそ 1/17 にならなければならないが, Fig. 8(d) には強度分布に大きなうねりが残っており, 強度変動幅も約 30 と大きな変化はない。このため Fig. 9 に示す確率密度分布では (c) と (d) との差はない。これは元々のレーザー光が均一ではなく, 強度分布にむらがあるためと考えられる。

以上により位相板の回転数は 100 rpm ($N=24$) 程度で十分と判断される。それ以上回転数を上げて平均化の母数を大きくしても, 元のレーザー光の強度むらがなくならない限り, 照明の均一化は向上しないことがわかった。

以上 Fig. 4, Fig. 5 のシミュレーションの結果と Fig. 6~9 の実験結果を比較して, 基本的に両者は一致していると判断される。ただし実験結果のほうがレーザー光コヒーレンス性, フライアイレンズ寸法の微少ばらつき等の原因で, 干渉パターンノイズ平均化には条件がよくなっていることがわかった。

6. ま と め

光学分解能を高めるため, 短波長の深紫外レーザー光をフライアイレンズを通して照明に用いる顕微鏡を研究した。特に, このとき発生する干渉パターンノイズを均一化させるためランダム位相板をフライアイレンズ出口で回転させる方法を考案した。

コンピューターシミュレーションにより $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ の 4 段階の位相変化をランダムに与えることによって干渉パターンノイズを平均化できることを推定した。このシミュレーション結果に基づいてランダム位相板を製作し実験を行ったところ, 期待どおりの結果が得られた。

位相板を 100 rpm すなわち位相を 24 回ランダムに変化させて平均化すれば, 十分に干渉パターンノイズを均一化できることが判明した。

文 献

- 1) 加藤 誠: “ホログラフィーにおける干渉パターン抑圧”, 光学, 4 (1975) 263-277.
- 2) 加藤 誠: “飛翔を始めたホログラフィー技術”, 光学, 26 (1997) 200-205.
- 3) J. Amako, H. Miura and T. Sonehara: “Speckle-noise reduction on kinoform reconstruction using a phase-only spatial light modulator,” Appl. Opt., 34 (1995) 3165-3171.
- 4) 牛田一雄: “エキシマレーザーステッパー”, 光学, 23 (1994) 602-608.
- 5) 久保田広: “波動光学” (岩波書店, 1971).