

ナノインプリント技術を用いた広帯域波長板の作製

Super Wide-band Polymeric Quarter Wave Plates (QWPs) Fabricated by Nanoimprint Technologies

増田 修* 宮越 博史** 齊藤 真紀子*
Masuda, Osamu Miyakoshi, Hiroshi Saito, Makiko
山田 基弘* 森川 雅弘*
Yamada, Motohiro Morikawa, Masahiro

要旨

1/4波長板は、光ピックアップの主要な光学部品のひとつである。青色光を利用する次世代光ディスクの登場により、DVD、CDとの3波長互換の波長板が求められる。今回我々は、構造的複屈折を利用して広帯域1/4波長板の実現を目指した。構造的複屈折は、サブ波長オーダーの周期構造により発現し、この周期構造の寸法選択により光学性能を制御できる。そこで我々は、広い波長帯域で一定の位相差特性を持ち、且つ高透過率を両立できる波長板を設計した。更に、超微細構造の型転写にナノインプリント技術を採用し、ハイアスペクト比の構造的複屈折波長板の製作に成功した。

Abstract

Quarter wave plates (QWPs) are one of the principal components of an optical pickup. QWPs will have to accommodate not only the different wavelengths (λ) utilized by CDs and DVDs, but also the blue laser light of next-generation optical disks. This paper reports the development of wide-band QWPs which utilize form birefringence to provide that capability. Form birefringence is induced by subwavelength periodic structures, allowing optical performance to be controlled through the selection of periodic structural dimensions. Recognizing this, we designed QWPs that obtains both constant retardation properties and high transmittance. In addition, we applied nanoimprint technologies in fabricating high aspect ratio subwavelength structures (SWSs), and succeeded in the fabrication of the QWPs.

1 はじめに

1/4波長板は、光ピックアップにおいて、レーザーの投光路と受光路を効率良く分離するために必須となる光学素子であり、直線偏光を円偏光に、円偏光を直線偏光に変換する機能を持つ。この機能は、サブ波長オーダーの周期構造によって複屈折性を発生させる、いわゆる構造的複屈折で実現することができる¹⁾。

Fig. 1にサブ波長構造とその波長板としての機能を模式的に示す。サブ波長オーダーの周期構造により、構造に垂直な電気ベクトルを持つTM波と、それに直交するTE波とで屈折率差が生じ、両者に位相差が起こる。ここで、発生する位相差量とその広帯域性は、構造寸法により変化させることができる²⁾。従って、一般的な波長板として多く利用されている液晶や位相差フィルム、水晶とは異なり、複屈折材料でなくとも位相差やその広帯域性を構造寸法設計により制御できることが、最大の特徴と言える。しかしながら、そのサブ波長構造には非常に高いアスペクト比が要求され、低コストで製作するのは容易ではない。これが製品化に結びつかない要因の一つと推測される。

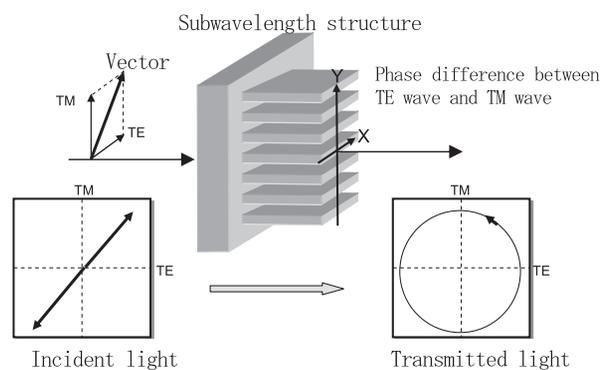


Fig.1 Form birefringence induced by subwavelength structure

一般的な光学材料を使い波長に対して広い広帯域性を持つ1/4波長板を構造的複屈折で得るためには、数百nmの構造周期に対して、高さ $2\mu\text{m}$ 程度の構造が必要となる。加えて、高い透過率を維持するためには10nm程度の高い精度が要求される。我々はこれまで、製作の難度

* コニカミノルタテクノロジーセンター(株) デバイス技術研究所
アドバンスド加工開発室
** コニカミノルタテクノロジーセンター(株) デバイス技術研究所
SJ開発室

日本光学会 微小光学研究グループ 第103回微小光学研究会論文集から転載

を下げるため、約半分の高さの構造を作り、2枚を対向して貼り合わせることで1/4波長相当の位相差をもつ波長板の製作に取り組んできた^{3~5)}。今回は製造コスト、光学性能、薄く軽いといった点で大きなアドバンテージがある1枚で1/4波長板を製作した。Fig. 2に両者の比較を示す。

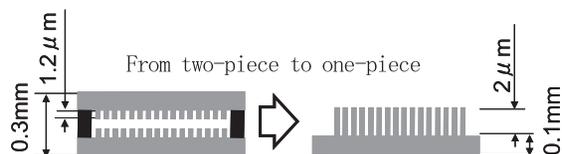


Fig.2 QWPs composition (cross section)

2 設計

構造性複屈折で波長板を得るには、0次光以外の不要な回折光を抑えるため、構造周期 $< \lambda/2$ (λ :使用波長)程度を目安とするのが適切と考えるが、この領域では高い広帯域性を持たせることができない。次世代ディスク、DVD、CDでの使用波長 $\lambda = 405\text{nm}$, 650nm , 780nm に対して広帯域性を得るには、 $\lambda/2 < \text{構造周期} < \lambda$ の範囲にする必要がある。ただし、この構造周期では0次光以外の回折光の発生により、0次光の透過率は構造高さの変化に伴い周期的に変動するため、所望の位相差の得られる構造寸法で必ずしも高い0次光透過率が得られるとは限らない。Fig. 3に一例として、RCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis) を用いたシミュレーション結果を示す。尚、ここで用いた構造は周期370nm、構造の幅255nm、計算波長は405nmである。90degの位相差を生じる構造高さでは、TE波とTM波の平均透過率は75%程度しか得られないことが分かる。このような透過率変動を考慮した上での構造寸法の選定が重要となる。

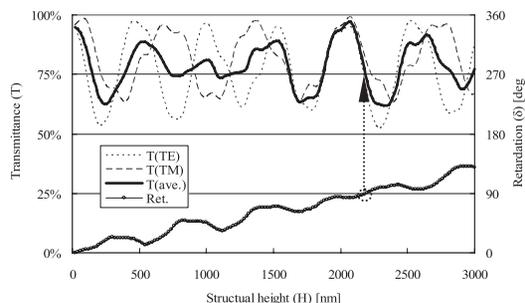


Fig. 3 Transmission vs. structural height of SWS

加えて、広帯域性を得るために、それぞれの波長で生じる位相差のパラツキがなるべく小さくなるように設計する必要がある。ところが通常はFig. 4に示すように発現する位相差性能が波長によって大きく異なってしまう。そこで構造寸法制御により短波長の位相差変動を意

図的に大きくして他の波長と近づけることで広帯域性の良い設計解が得られる。しかし構造高さに対して位相差性能が大きく変化してしまうということは加工誤差において厳しい設計であると言え、構造寸法変化に対して性能変化が小さい(=変動が小さい)設計解が理想的である。これも同様に構造寸法選択により制御できるので、加工誤差に対して強い設計を選択することも重要である。³⁾

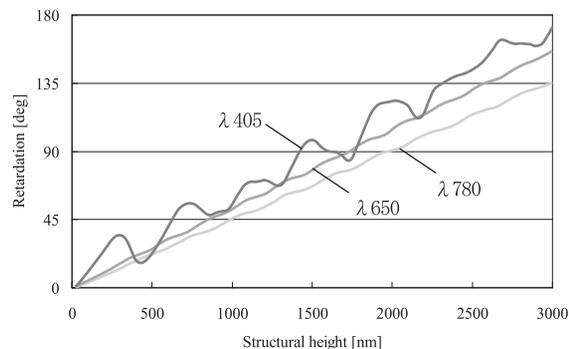


Fig.4 Retardation vs. structural height of SWS calculated via RCWA

これらのトレードオフを踏まえ、設計値を選定した。その透過率及び位相差特性をTable 1に、構造寸法をFig. 5に他の代表的な微細構造と比較する形で示す。一般的な光ピックアップの仕様を満足する特性を持った設計解を得たが、加工が非常に難しい寸法であることが判る。

Table 1 Design performance of QWP calculated via RCWA

λ	T(ave.)	δ
405nm	93.38%	92.0°
650nm	96.26%	95.1°
780nm	94.76%	85.2°

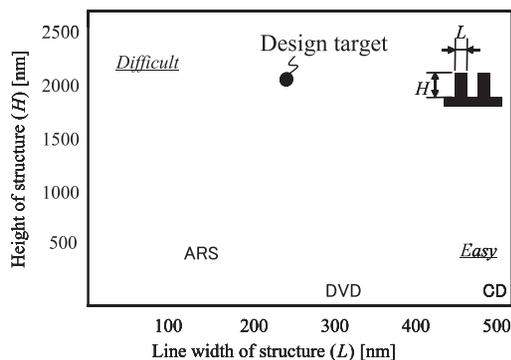


Fig.5 Feasibility of fabricating SWS using nanoimprint lithography

3 製作

3.1 基本プロセス

Fig. 6に素子作製のプロセスを示す。リソグラフィー技術を用いて作製したサブ波長構造を持つシリコンモールドを使い樹脂に転写する方法を採った。サブ波長構造の転写には、微細な高アスペクト比構造の転写可能性のあるナノインプリント法⁶⁾を用いた。ナノインプリントの方式は熱可塑性樹脂の表面に加熱した金型をプレスする「熱式インプリント」を採用した。より具体的には、加熱した金型を常温の被成形材表面にプレスすることで充填、その後、金型を冷却し離型する方法である^{4, 5, 7)}。紫外線硬化樹脂を使用した光インプリント方式も広く知られた方法だが、ブルー耐光性、収縮などの問題があるため、ピックアップ光学系で実績のあるポリオレフィン系樹脂（熱可塑性樹脂）を使用できる本方式を採用した。尚、使用した被成形材の厚みは0.1mmである。

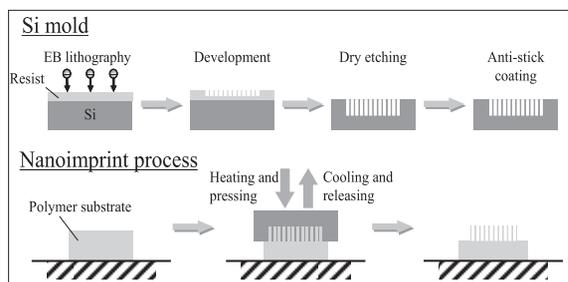


Fig.6 Fabrication process

3.2 モールド作製

基材となる単結晶シリコンに塗布したレジストを電子ビーム描画装置でパターンニングし、それをマスクとしてプラズマによるドライエッチング加工を行い、サブ波長構造を持つモールドを作製した。ここで、ドライエッチングの方法には、エッチングガスにSF₆を使用したDRIE（Deep Reactive Ion Etching）を用いた。

パターン形状を決定するモールドには、非常に高い精度が要求される。設計した光学性能を達成するために、インプリント後の構造に対応する溝の寸法に要求される精度は深さ20nm、幅は10nm程度である。この精度を得るために電子ビーム描画及びドライエッチング加工の両プロセスの最適化を行った。Fig. 7にエッチングのチャンバー内雰囲気安定化を行った後の構造寸法の再現性を確認した結果を示す。図の横軸に示す各サンプルはいずれも異なるタイミングでエッチングしており、溝の深さ1950nm、幅250nmを狙った結果である。溝の深さ、および幅の再現性は、それぞれ $\pm 15\text{nm}$ 、 $\pm 5\text{nm}$ 得られ、必要精度内であることを確認した。

インプリントプロセスでは、サブ波長構造を破壊しないようにモールドと被成形材の離型性確保が重要であ

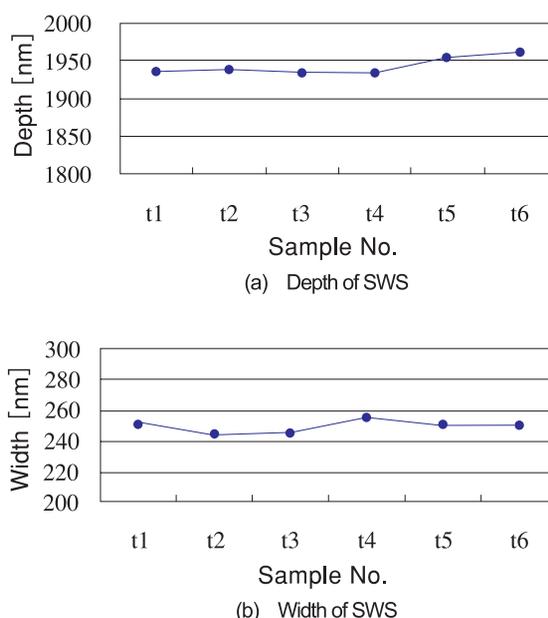


Fig.7 Reproducibility of Si mold for nanoimprint

る。その為に、まずモールド表面にフッ素系薄膜コーティング処理を行った⁷⁾。フッ素系薄膜コーティングの効果は顕著で、処理を行わない場合、離型プロセスでサブ波長構造が破断したが、処理をしたものは破断領域を大幅に減少させることができた。しかしながら、走査型電子顕微鏡（SEM）で詳細に観察するとFig. 8(a)のように、構造の根元が延伸されていることが判かった。そこで、もう一つの改善として、ドライエッチングのプロセスパラメータを調整し、構造側壁の粗さを10nm以下に低減させた。そのモールドを使って転写を試みた結果をFig. 8(b)に示す。構造の根元の延伸をほぼ無くすことに成功した。⁴⁾ この結果から、側壁の粗さによる機械的かみ合いに起因する離型抵抗を減少できたと考える。

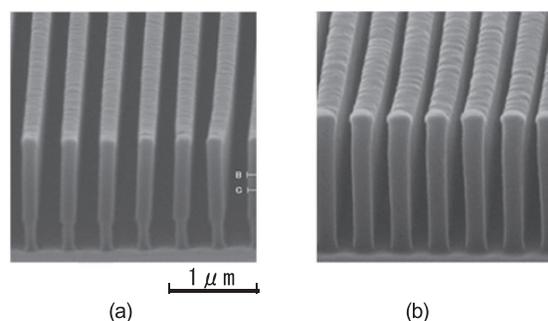


Fig.8 SEM image of cross section of SWSs

3.3 ナノインプリント装置

自社開発した装置外観と構成をFig. 9に示す。

インプリント装置本体に関しては、破断しやすいサブ波長構造部にプレス力方向以外の誤差成分の力を発生さ

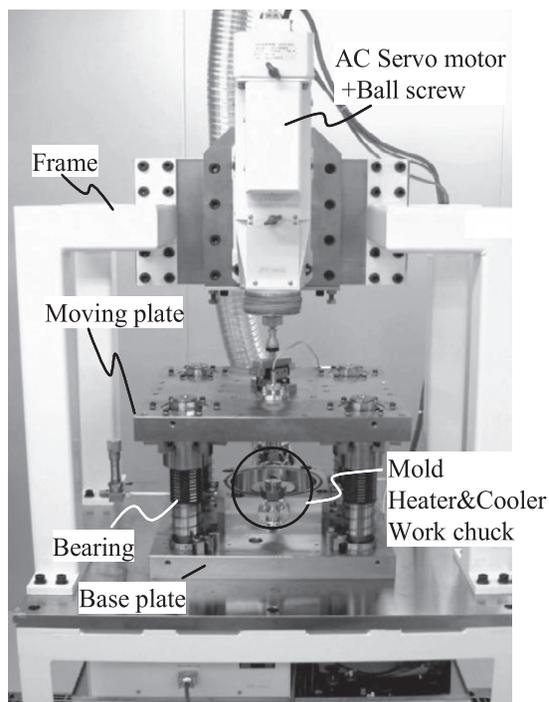


Fig.9 Nanoimprint processing apparatus

せないことを要件として設計した。つまり、真っ直ぐな運動基準に沿ってプレスすることおよびプレス力に対してモーメントを発生させないことが重要となる。

運動基準には有限ころ軸受のガイドポストを4本使用し、誤差運動を小さくするための工夫をした。その結果、運動誤差は可動プレート10mm移動時に0.1 μ mの誤差運動にすることができた。そして、装置全体の構造は、プレス力に対する構造の剛性が軸対称になるようにフレームを配置した。その結果、誤差力の発生はプレス力に対して0.05%に抑えることができた。制御部は、温度、位置、力などの各種センサ信号にもとづいてプロセス制御できるように一元管理できるシステムにした。^{4, 5)}

3. 4 ナノインプリントプロセス

ハイアスペクト比構造のナノインプリントにおいて特に難度が高いのが離型である。モールドに充填したのちサブ波長構造を破壊させることなく離型することは非常に困難である。初期の検討において離型プロセスで発生する欠陥の発生率を最小にするために、主にプロセス中の温度条件（型温度）を最適化した。これは本質的には樹脂の変形および破断問題ととらえ、事前に温度をパラメータとして測定した被成形材の粘弾性特性データを参考に検討した。しかしこの最適化では、サブ波長構造を直径4mmの範囲へインプリントした場合、欠陥を抑制しきれず面積比で3～5%が欠陥として残った。Fig.10はその欠陥の観察像である。

ここで、離型現象について種々の解析を行った結果、Fig.11に示すように、サブ波長構造に作用する離型方向

の張力すなわち離型抵抗力の大きさと生成された欠陥面積の間に強い相関が見られた。この結果から、離型抵抗力を10N以下に抑えて離型を完了させれば欠陥が抑制できると考えられるが、欠陥の生成現象がミリ秒オーダーの現象であるため、サブミリ秒の応答性およびサブマイクロン分解能の微動作が必要になる。そこで、離型専用装置を導入し、無欠陥化に対応した。^{4, 5)} その結果得られた転写品の全体写真をFig.12に示す。

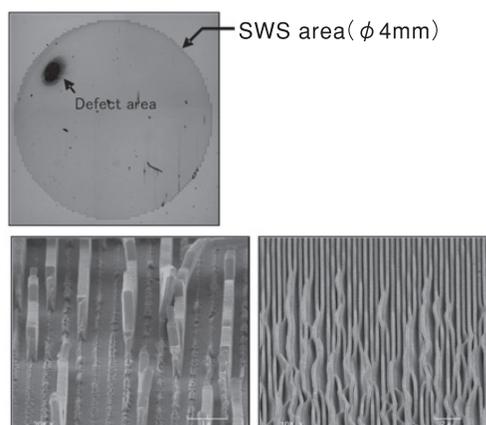


Fig.10 SEM image of defect on polymer SWS after imprint process

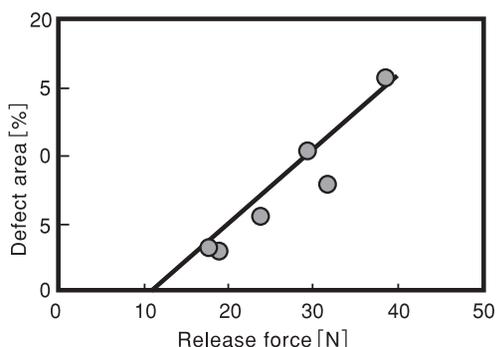


Fig.11 Relationship between defect area and release force



Fig.12 Whole of imprinted pattern

4 評価

4.1 外観評価

試作した広帯域1/4波長板の外観をFig.13(a)に、直交ニコルで観察した結果をFig.13(b)に示す。直径4mmのサブ波長構造領域においてムラ無く均一に仕上がっていることが分かる。また、そのサブ波長構造部のSEM観察像をFig.14に示す。モールドの高アスペクトなサブ波長構造が、変形や破損なく正確に転写されていることを確認した。

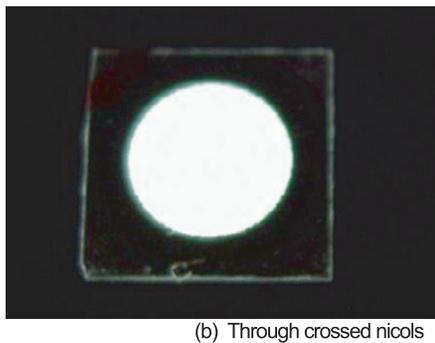
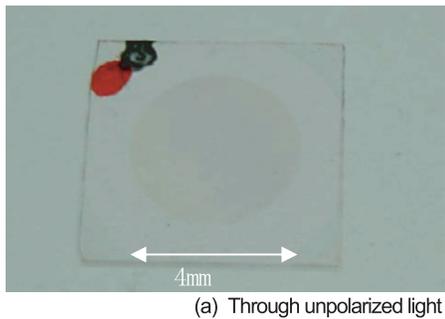


Fig.13 Appearance of QWPs

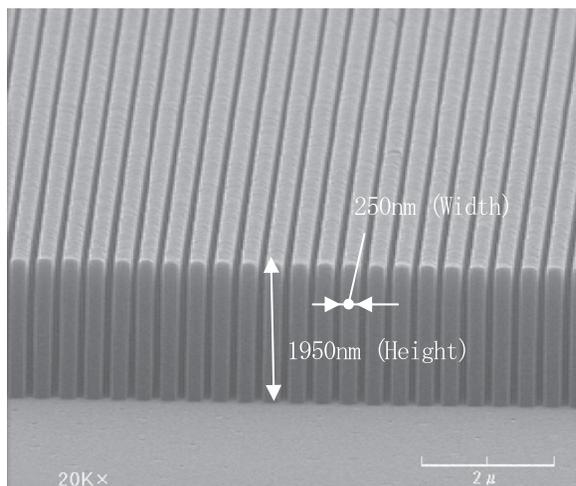
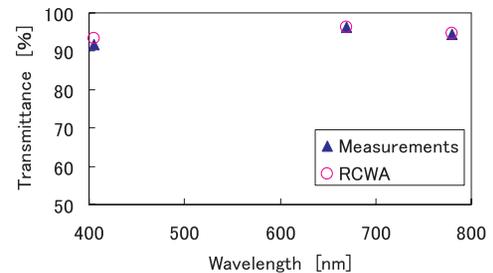


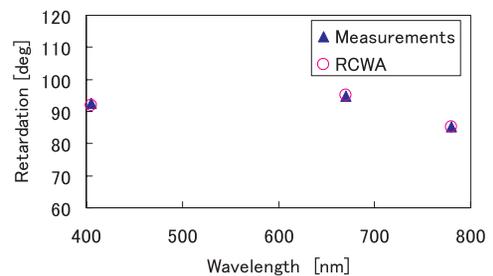
Fig.14 SEM images of nanoimprint fabricated SWS

4.2 光学特性評価

今回試作した広帯域1/4波長板の透過率および位相差の測定結果をFig.15に示す。透過率、位相差の実測性能はRCWAから導いた設計性能に非常に近い値が得られた。



(a) Transmission



(b) Retardation

Fig.15 Measured and RCWA design values

透過波面収差は波長405nmで目標としたRMS10mλ以下を達成できていることが判った。透過波面収差評価時のフリッジパターンをFig.16に示す。

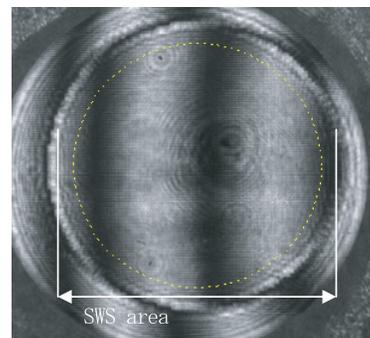
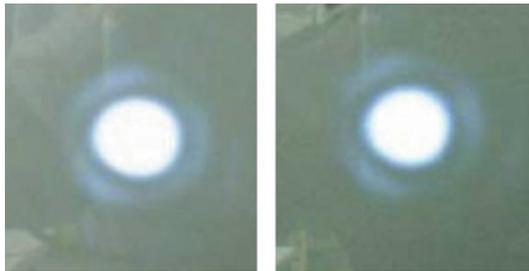


Fig.16 Fringe pattern

更に、本試作品を次世代光ディスクドライブに搭載し、評価を行った。Fig.17は対物レンズで集光されたビームスポットを撮像したものであるが、単一波長用水晶波長板を搭載したものと比較しても遜色のない結果となった。また、Fig.18は、次世代光ディスクの再生信号である。実用可能な再生信号パターンが得られていることを確認した。



(a) Using super wide-band polymeric QWP (b) Using quartz QWP

Fig.17 Focused laser beam image

●参考文献

- 1) 日本光学会光設計研究グループ, “回折光学素子入門”, オプトロニクス社 (1997)
- 2) H.Kikuta, Y.Ohira and K.Iwata, Appl. Opt., **36** (7) 1556-1572 (1997)
- 3) M.Imae, M.Miyakoshi, O.Masuda, K.Furuta, KONICA MINOLTA Tech. Rep., **3** 62-67 (2006)
- 4) H.Miyakoshi, M.Morikawa, O.Masuda, M.Imae, M.Yamada, K.Furuta, OPTRONICS, No. 7, 167-172 (2006)
- 5) M.Morikawa, O.Masuda, H.Miyakoshi, M.Imae, M.Yamada, K.Furuta, ODF '06, Nara, 49-50 (2006)
- 6) Chou, US Pat 5, 772, 905, 6,309,580/APL, **67**, 3114 (1995)/Science, **272**, 85 (1996)
- 7) H.Miyakoshi, M.Morikawa, O.Masuda, K.Furuta, KONICA MINOLTA Tech. Rep., **2** 97-100 (2005)

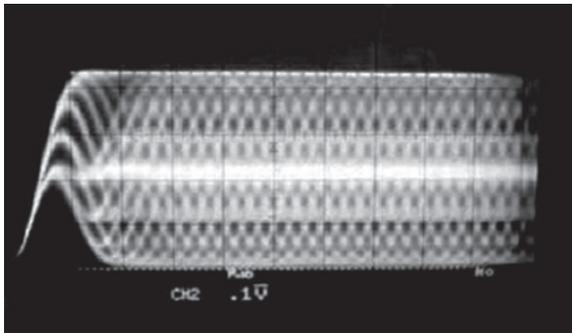


Fig.18 Eye pattern

5 まとめ

ナノインプリントプロセスを用いた構造的複屈折広帯域1/4波長板の作製について報告した。試作した波長板は、波長405～780nmの範囲で一定の位相差特性、且つ高透過率を両立しており、次世代光ディスク用の光ピックアップ光学系にて実用可能なことを確認した。

特に今回1枚で1/4波長板を得たことで、光学性能向上、薄肉、軽量化と共に、低コスト化が図れ、実用化に向けて大きなアドバンテージを得た。

波長板のみならずサブ波長領域の構造を持った素子の機能は非常に魅力的であり、ナノインプリントプロセスは、それらを安価に実現できる製作手法として、高い可能性を持っている。今後、高精度なモールドを如何に安価に作製、さらに寿命を延ばしてゆくかなどの課題を解決し、実用的な生産技術・量産化技術に仕上げてゆきたいと考えている。