構造性複屈折を用いた広帯域 1/4 波長板の最適設計

Optimum Design of Wide-band Quarter Wave Plates (QWPs) Utilizing Form Birefringence

今 榮 真紀子*	宮越博史*	増田修*	古田和三*
Imae, Makiko	Miyakoshi, Hiroshi	Masuda, Osamu	Furuta, Kazumi

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てい る。今回我々は、構造性複屈折を利用して広帯域1/4波長 板の実現を目指した。

構造性複屈折は、サブ波長オーダーの周期構造により 発現する。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構造設計手法 を開発した。設計においては、光学性能のみならず加工 容易性も考慮した。

その結果、すべての目標性能を満たし、加えて高い加 工性が期待できる最適設計解を導くことができた。さら に我々の持つナノインプリント技術を用いて、実際に所 望の広帯域1/4波長板が作製可能であることを確認した。

Abstract

Quarter wave plates (QWPs) are one of the principal components of an optical pickup. Soon, QWPs will have to accommodate not only the different wavelengths utilized by CDs and DVDs, but also the blue laser light of nextgeneration 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 developed a systematized structure design method that obtains both constant retardation properties and high transmittance with wide-band QWPs.

Because both optical performance and feasibility of fabrication were targeted, an optimum design has been achieved that satisfies target performance and provides high productivity, including the confirmed feasibility of using nanoimprint lithography to fabricate these wide-band QWPs.

1 はじめに

1/4波長板は,通過する光のTE-TM偏波の間に1/4波長 = 90°の位相差を生じさせ,直線偏光を円偏光に,円偏光 を直線偏光に変換する光学素子である。現在,波長板と して液晶や位相差フィルム,水晶波長板が多く使われて いる。一般的な波長板は,特定の波長に対して作製され る。言い換えれば,ある波長のために作製された1/4波長 板は,他の波長では1/4波長板として機能しない。広範囲 にわたる波長帯域において一定の性能を保つことのでき る波長板は,複数波長の光を使用する分野で有効なデバ イスとなる。

サブ波長オーダーの周期構造により発現する構造性複 屈折を利用した波長板は、ある波長帯域に対してアクロ マチックな位相差性能を持たせることができる¹⁾。有効媒 質理論(Effective Medium Theory; EMT)で言えば、光 の波長より短いピッチを持つ構造は、周期を持つ方向と 持たない方向で異なる有効屈折率 *n*_{TE}, *n*_{TM}を持ち、あた かも複屈折材料であるかのように振舞う。この有効屈折 率差により各偏波方向の光の伝播速度に差ができるた め、通過する光が位相差を生じる。こうして波長板とし ての機能を発現する。

構造性複屈折波長板は、複屈折が材料のみに依存していた従来の波長板と異なり、サブ波長構造の寸法選択で 複屈折の大きさを制御できるという特徴を持つ。例えば Fig.1に示すサブ波長構造(SubWavelength Structure; SWS)の有効屈折率 *n*_{TE}, *n*_{TM}を

 $n_{TE} = \{ f \cdot n_1 \exp 2 + (1 - f) \cdot n_2 \exp 2 \} \exp(1/2)$ (1) $n_{TM} = \{ f \cdot n_1 \exp(-2) + (1 - f) \cdot n_2 \exp(-2) \} \exp(-1/2)$ (2)



Fig.1 Schematic of subwavelength structure (SWS) model

^{*}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 ナノ加工開発室

と見積もることができる。さらに入射光の波長 λ に対して位相差 δ が

 $\delta = (n_{TE} - n_{TM}) \cdot H = \lambda / 4 \tag{3}$

を満たす構造高さHを選ぶことで、1/4波長板となる²⁾。

今回我々は、光ピックアップの小型化・低コスト化の ために、次世代光ディスク、DVD、CDの3波長(405nm, 650nm, 780nm)をカバーする広帯域1/4波長板の構造設 計検討を行った。これだけ広範囲の波長帯域で一定の位 相差性能を発現する構造性複屈折波長板の設計先例は少 ない。

またピッチ寸法が光の波長に対して十分小さくない場 合,構造により回折光が発生してしまう。このため,ど の寸法でも必ず高い透過率を得られるわけではない。こ の透過率低下は光学部品として無視できない大きさであ り,透過率を考慮した設計が必要となる。

加えて,これまで構造性複屈折を利用した光学素子の 製品化例が少なかった理由は,構造が微細なため加工が 非常に難しいことにあった。そこで,我々の持つナノイ ンプリント技術での加工性を視野に入れた設計を目指す。

以上,今回我々は前述したすべてを適えることを目標 として広帯域1/4波長板の設計検討を行った。

2 理論解析手法

設計に先立ち,構造性複屈折波長板の光波の振る舞い を知るための理論解析手法について述べる。

周期構造を持つ回折光学素子の特性を知るために,多 くの場合,計算が容易で計算時間を短縮できるという理 由から,光波の振動方向を考えずスカラー量として扱う スカラー回折理論が用いられている。しかし今回作製す るサブ波長構造のように,ピッチが波長程度に小さい場 合,スカラー理論ではその特性を正確に知ることができ なくなる³⁾。そのため,光波をベクトル的に扱うベクトル 回折理論を用いなければならない。そこで今回は,ベク トル回折理論の中でも,電場と磁場の振る舞いを一切の 近似を行わずに厳密解として求めることができる厳密結 合波解析 (Rigorous Coupled Wave Analysis;以降, RCWAと略記する)を用いて波長板設計を行った。

3 設計背景

3.1 目標性能

目指す広帯域1/4波長板の目標性能をTable 1に示す。

Table 1 Tar	get performance of QWP
– Transmission (T)	> 90 %

– Retardation (δ)	90° $\pm 3^{\circ}$	(λ =405nm)
	$90^{\circ} \pm 6^{\circ}$	(λ =650nm)
	90° $\pm 15^{\circ}$	(λ =780nm)

3. 2 設計パラメータ

構造性複屈折波長板の性能を決める主なパラメータを 以下に示す。

- ・ 波長 (λ)
- ・ 波長 λ における屈折率 $(n_{1\lambda}, n_{2\lambda})$
- ・ ピッチ (P)
- フィリングファクター (f)
- 高さ(H)

今回は, $n_1 = 1$ (Air), $n_2 = 1.55$ (ポリオレフィン系樹脂) を用いることにした。波長帯域は前述した通り, 405nm~ 780nmである。よって, ピッチP, フィリングファクターf, 高さHの3つのパラメータから波長板性能が決定される。

3.3 2枚構成

(3)式で位相差δが高さHにおおよそ比例することを示した。RCWAで計算してみると、位相差δが90°得られる広帯域波長板を得るためには、構造高さHが2000nm以上、 アスペクト比10程度の構造が必要となる。この寸法の構造を加工することは、ナノインプリント技術を用いても困難である。

そこで我々は, Fig. 2 に示すように 2 枚貼り合わせ構成 で波長板を作製することにした。



Fig.2 Two-piece composition wave plate

この構成は1枚あたりの高さHを半分程度にできるた め、ナノインプリントでの加工性や生産性の向上が期待 できる。今回我々が開発したのは、構造寸法が同じで、 1枚あたりの位相差が45°以上の素子を2枚組み合わせる 方法である。この2枚の波長板を光学軸が非平行になる ように配置することで、位相差を90°に合わせ込む。詳細 な原理説明は主題から逸れるので割愛するが、こうすれ ば型が1種類で済むため生産コスト的にも有利となる。 さらに素子単体の性能を評価してから主軸をずらす角度 を最適に決定すれば、加工による寸法誤差から生じる性 能ずれを調整することができる。この光学軸方向ずらし 配置の採用により、2枚の位相差の合計が90°になる設計 解を探す必要がなくなり、設計自由度は大幅に向上し た。

以上の背景を踏まえ,実際に行った設計検討について 次節で述べる。

4 設計手法

前節3.1に透過率と位相差の目標性能をあげたが, Fig.3中の数式で示すように,透過率,位相差ともに RCWAシミュレーションからアウトプットされる電場ベ クトルの値から計算できる。それぞれの性能を,横軸を 構造高さHとしてプロットした場合,Fig.3(a)のように TE透過率とTM透過率のピークがちょうど重なり合うと き,位相差は高さH変化に対して一定の性能をとるよう になる。これは,加工時に発生する高さ寸法誤差に対し て強い設計と言え,特に今回のように成形性の制御が難 しい素子を作製する場合には考慮しておかなければなら ないポイントである。

一方, **Fig. 3 (b)**, (**c**)のようにTE-TM透過率のピーク 位置がずれているとき,位相差性能は下に凸もしくは上 に凸の挙動を示す。



Fig.3 Relationship between transmission and retardation

以上に述べたように,透過率と位相差性能は独立では なく,それぞれの目標性能を両立させた設計を行うのは 容易ではないことがわかる。

①透過率の目標を満たすための設計手法

構造高さに対する透過率性能のRCWAシミュレーション 結果を**Fig.4**に示す。

波長650nm,780nmではほぼ均一に高い透過率となるの に対し,波長405nmでは波打ち,透過率が大きく変動して いることがわかる。本論文において我々はこれを'透過 率の変動'と呼ぶことにする。

ここで,前節**3.3**で述べたように,今回作製する波 長板は1枚で位相差が45°以上得られなければならない。 これを踏まえると,**Fig.4**の δ (λ 405nm)のプロットか ら,高さ*H*は少なくとも1000nm以上必要となることがわ かる。そこで我々は,必要な位相差が得られ,且つ高さ*H* をなるべく低くできる設計解を目指すべく,図中に 「Target」と示したピーク部分に狙いを絞り,更なる透 過率向上の検討を行った。

TE, TMそれぞれの透過率のピークが重なる時, TE-



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

TM平均透過率は最も高くなる。Fig.4の上図からわかる ように,TEとTMの'透過率の変動'の挙動は異なって いる。これを制御するためには,ピッチPかフィリング ファクターfを操作すればよい。この関係をFig.5に示す。



Fig.5 Pitch and filling factor dependency of transmission fluctuation ($P_1 < P_2$ or $f_1 < f_2$)

P or f の変化に対する感度はTEとTMで異なるため, 寸法パラメータを最適に選択すれば,それぞれのピーク 位置を合わせ込める。実際にPとfを変え,ピークを合 わせ込んだ設計例をFig.6に示す。Target付近でのTE-TM平均透過率は,92.7%から97.0%へと向上した。



after optimization calculated via RCWA

②位相差広帯域性の目標を満たすための設計手法

位相差性能のフィリングファクター依存性を**Fig.7**に示す。



calculated via RCWA

このグラフより,短波長ほど大きい位相差を生じることがわかる。また,フィリングファクター f >0.6の領域で3波長の位相差量が近づく,つまり位相差広帯域性が良くなることがわかる。ただし加工の難しさから f <0.8と制限される。

透過率向上検討と同じように,横軸を構造高さにして 位相差性能をプロットしたものを**Fig.8**に示す。



透過率と同様に,位相差も構造高さの変化に伴い変動 しながら増加していくことがわかる。この'位相差の変 動'は特に波長405nmで顕著に表れる。ここで,広帯域性 を向上させるには2つの方法がある。第一に,フィリン グファクターfの制御により,構造高さに伴う位相差変化 量を変える方法である。波長が短いほどこの効果は大き いため, fを最適に制御すればそれぞれの波長の位相差 近似線を近づけることができる。この関係をFig.9に示 す。

第二は、'位相差の変動'を利用する方法である。前述 したように、変動が大きいということは加工による寸法 誤差が生じたときの性能変化が大きくなってしまうと言 え、本来は小さくすべきである。しかしここでは意図的 に'位相差の変動'を大きくし、各波長で生じる位相差 を近づける。'位相差の変動'はピッチ*P*で制御できる。 この関係を**Fig.10**に示す。



Fig.9 Filling factor dependency of retardation fluctuation ($f_1 < f_2$)



Fig.10 Pitch dependency of retardation fluctuation ($P_1 < P_2$)

Pとfの制御にて位相差の広帯域性を向上させた設計 例をFig.11に示す。この操作により、Target付近で波長 405nmと780nmの間で17°あった位相差バラツキを、9°ま で小さくすることができた。



-ig.11 Retardation vs. structural height of SWS after optimization calculated via RCWA

以上に目標性能を満たすための設計手法を示したが, 先に述べたように透過率と位相差は独立ではない。つま り,透過率か位相差のどちらかを制御しようとしてある 寸法パラメータを変えると,同時にもう一方の性能も変 わってしまう。よって,①→②の操作を1度行っただけ では最適設計解に導けず,これを何度も繰り返し,徐々 に最適解へ収束させていかなければならない。

複数のトレードオフを考慮して導いた最適設計解を次 節に示す。

5 設計解及び素子作製結果

5.1 設計解

最適設計した 2 枚構成波長板の特性を**Table 2**に示す。 位相差 δ は,波長405nmにおいて δ =90°の位相差となるように 2 枚の素子の光学軸角度を調整した場合の各波長の 位相差を示す。透過率と位相差広帯域性ともに、目標性 能を満たしている。

λ	T _{ave.}	δ
405nm	91.74%	90°
650nm	95.28%	90° -4.7°
780nm	96.29%	90° -14.5°

また、構造寸法を基にしてナノインプリントの加工容 易性を表したグラフ上に、選定した設計解をプロットし たものをFig.12に示す。このグラフより、ナノインプリン トでの加工性が高い設計解を選定できていることがわか る。



nanoimprint lithography

5.2 素子作製

Fig.13に素子作製のプロセスを示す。サブ波長構造は*φ* 4 mmの領域に加工した。

モールドはSi製で,電子線描画,ドライエッチング加工 により製作した。金型の溝部側壁は,充填性,離型性向 上のため平滑に仕上げた。

樹脂への転写は,超微細構造の型転写技術として高い 生産性が期待できるナノインプリント技術で行った。熱 式インプリント法の基本プロセスは,樹脂基材を把持 し,Si型を樹脂のガラス転移点(Tg)以上に加熱,金型 を所望の圧力で樹脂にプレスしたのち冷却,離型する⁴⁾。



Fig.13 Fabrication process

離型動作を精密に制御することで, Fig.14のとおり良好 な転写ができた。

加工した素子を2枚貼り合わせ、広帯域1/4波長板を作 製した。





5.3 光学評価

作製した波長板の光学評価結果をFig.15に示す。透過率 T及び位相差δに関する実測性能は、RCWAから導いた 設計性能と非常に良い一致となっている。この結果は、 ほぼ設計寸法通りのサブ波長構造を持つ波長板が作製で きていることを示す。



Fig.15 Measured and RCWA design values

6 まとめ

構造性複屈折を利用した1/4波長板の設計において,寸 法パラメータと波長板性能の関係を体系化した最適設計 手法を開発した。結果,位相差の広帯域性と高透過率を 両立し,且つ高い加工性が期待できる設計解を導くこと ができた。

加えて,設計した最適設計解を基に実際に波長板作製 を行い,その実測光学性能が設計性能と良い一致を示す ことを確認した。これは,我々のナノインプリント技術 を用いて広帯域1/4波長板が実現できたことを意味する。

今回開発した設計手法は、次世代光ディスク、DVD, CDの3波長をカバーする広帯域1/4波長板以外の光学素子 設計にも応用できる。また設計時間の短縮にも大いに寄 与するものと考えられる。今後、波長板作製へ向けて開 発してきた我々の微細加工技術を生かし、他製品への応 用を目指してゆく。

●参考文献

- H.Kikuta, Y.Ohira and K.Iwata, Appl. Opt., 36(7) 1556-1572 (1997)
- 市川裕之, "日本光学会主催 第29回冬季講習会 回折光学素子の 設計・作製技術", 2003, P.105-117
- 高木康博, "日本光学会主催 第29回冬季講習会 回折光学素子の 設計・作製技術", 2003, P.73-89
- 4) 宮越博史他, KONICA MINOLTA Tech. Rep., Vol. 2, 97-100 (2005)