低コヒーレンス光干渉による面内複屈折測定

非会員 西 壽巳 (大阪工業大学)

非会員 井上 将吾 (大阪大学)

非会員 満山 照樹 (大阪大学)

非会員 下谷 望 (大阪工業大学)

非会員 芦澤 努 (大阪工業大学)

非会員 丸山 英樹 (九州松下電器)

非会員 近江 雅人 (大阪大学)

会 員 春名 正光 (大阪大学)

Birefringence Measurement by Low Coherence Interferometry

Hisami Nishi, Non-member, *Shougo Inoue, Non-member, *Teruki Mitsuyama, Non-member, Mozumi Shimotani, Non-member, Tsutomu Ashizawa, Non-member, **Hideki Maruyama, Non-member, *Masato Ohmi, Non-member, *Masamitsu Haruna, Member, (Osaka Institute of Technology), *(Osaka University), *(Kyushu Matsushita Electric Co., Ltd.)

We proposed and demonstrated a practical method for simultaneous measurement of the refractive index and the thickness of a transparent plate, based on the low coherence interferometry. This paper suggests that our method is applicable for birefringence measurement using unpolarized light source. Small birefringence of thin medium such as LiTaO₃ crystal is measured with high accuracy, by introducing dispersion compensation into the low coherence interferometry.

キーワード：低コヒーレンス光干渉、複屈折測定、分散補償

1.はじめに

発振スペクトルが半導体レーザに比べて非常に広い、スーパーミネッセントダイオード(SLD)などを光源とする低コヒーレンス光干渉計は、信号光と参照光の光路長差が極めて短い範囲でしか干渉しない特徴を生かして、光計測分野で盛んに研究が進められている。我々は、SLDを光源とするマイケルソン型低コヒーレンス干渉計と微動ステージを融合して、被測定物の屈折率 n と厚さ t を同時精密測定できる新手法を提案し、透明板および生体試料を用いた基礎実験によってその有用性を実証してきた[1-6]。さらに、屈折率が一樣な等方性媒質だけでなく、複屈折媒質の位相屈折率と群屈折率の同時測定法を提案してきた[7]。

従来より、面内複屈折を測定する手法として、古くは偏光顕微鏡とバビネ-ソレイユ補償器を用いる方法[8]、直交2周波ヘテロダイン干渉計を用いる方法[9,10]、また共焦点顕微鏡と低コヒーレンス光源を組み合わせる方法[11]などがある。しかし、いずれも試料の光学軸に対して光源の偏光方向を一定角度で厳密に一致させる必要があり、さらに使用

波長の2分の1以上の比較的大きな複屈折測定が困難な方式もある。

今回、試料厚の薄いサンプルの複屈折を偏光制御なしで精密に測定し、波長スペクトルの比較的大きな低コヒーレンス干渉計で顕在化する、分散による測定精度の影響を実験で確かめた。その結果をもとに分散補償を行うことにより高精度の測定が行えたので報告する。

2.測定原理

<2.1>測定サンプル走査法

測定サンプル走査法[5]による屈折率と厚さの同時測定系を図1に示す。基本的にはマイケルソン型干渉計である。光源は中心波長850nm、コヒーレンス長 $\Delta L_c (= 12\mu\text{m})$:半値全幅FWHM)のSLD(無偏光)である。SLD光はビーム径6mmにコリメートされビームスプリッタ(BS)で信号光(Z方向)と参照光(X方向)に分割される。信号光はステッピングモータで駆動されるステージ2上の被測定サンプル面に対物レンズ(x20)で集光される。サンプルからの反射光は再びBSを経て光検

出器(PD)で受光される。参照光はステッピングモータで駆動されるステージ1上のミラで反射されBSを経てPDで受光される。PZT面上に取り付けられた参照光ミラは、500Hzの正弦波信号を印加され微小振動しているため、位相変調された参照光は信号光とPD上でヘテロダイン検波される。検波された干渉信号強度をPCで解析する。ステージ1,2の位置分解能は0.1 μ mであり、PC制御される。

測定は、まず(1)集光レンズを用いて被測定サンプルの前面にSLD光を集光し、干渉計両アームの光路長が等しくなるよう、参照光ミラ(ステージ1)を移動する。ここから、(2)被測定サンプル(ステージ2)を移動しサンプル後面に集光する。再度、参照光ミラを移動して光路長を等しくする。

図1 測定システムの構成

Fig. 1. Configuration of the measurement system.

このとき、被測定サンプルの移動距離を z_1 、参照光ミラの移動距離を ΔL_1 とすると、被測定サンプルの屈折率 n と厚さ t は z_1 と ΔL_1 の関係式が分かれば、 n と t を分離して算出することが可能になる[1-5]。測定サンプルの前面においてスネルの法則を適用し次式が得られる。

$$z_1 = t \times \sqrt{\frac{1 - \zeta^2}{n^2 - \zeta^2}} \quad (1)$$

ただし、 $\zeta = \sin \theta = N.A.$ でありレンズの開口数である。

一方、参照光ミラの移動距離 ΔL_1 はサンプル移動前後の光路長差と等しいので、

$$\Delta L_1 = n \cdot t - z_1 \quad (2)$$

の関係が成立する。(1)(2)式から t を消去すると、

$$n^2 = \frac{1}{2} \left\{ \zeta^2 + \sqrt{\zeta^4 + 4 \left(1 - \zeta^2 \right) \left(1 + \frac{\Delta L_1}{z_1} \right)^2} \right\} \quad (3)$$

という屈折率 n を求める式が得られる。同時に、厚さ t は(2)式より、

$$t = \frac{\Delta L_1 + z_1}{n} \quad (4)$$

で求められる。

<2.2> 複屈折の測定原理

一軸性電気光学結晶などの複屈折媒質の面内複屈折を測定する光学系について述べる。測定系の基本原理は2.1で述べたものとほぼ同一である。図2に示すように、無偏光のSLDから放射される光線は任意の互いに直交する2つの直線偏光成分の和として表される。

図2 複屈折の測定原理

Fig. 2. Principle of birefringence measurement.

被測定サンプルに入射した光線は複屈折材料のY軸、Z軸方向の2偏光成分に分離する。そして、これら二つがそれぞれ屈折率 n_o (常光)、 n_e (異常光)を経験しながらサンプル内を伝搬する。その結果、二つの直線偏光成分が通った光路長に $\Delta n \cdot t = (n_o - n_e) \cdot t$ の差が生じる。低コヒーレンス干渉なので、この差は偏光制御なしで求められる。なお、常光、異常光のいずれか一方を偏光子で選択し測定することもできるが、2度測定する必要がある。光路長差 $\Delta n \cdot t$ は、常光と異常光の z_1 、 ΔL_1 の測定値 z_o 、 ΔL_o 、 z_e 、 ΔL_e を用いて

$$\Delta n \cdot t = (n_o - n_e) \cdot t = (\Delta L_o + z_o) - (\Delta L_e + z_e) \quad (5)$$

で与えられる[7]。

なお、ここで測定される屈折率は光源の波長スペクトルが広く、低コヒーレンス状態なので「群屈折率」[12]として求められ[5-7]、 Δn_g は群屈折率差である。

3. 複屈折の測定

<3.1> LiNbO₃の複屈折測定

2.1で述べた測定装置を用いて厚さ $t = 1028 \mu\text{m}$ のXカットLiNbO₃の光路長差 $\Delta n \cdot t$ を測定した。ステージ1とステージ2を駆動して干渉信号のピーク位置を探すため、図3に示すような信号群が得られる。 z_o 、 ΔL_o 、 z_e 、 ΔL_e の測定結果を(5)式に代入して実験値 $\Delta n \cdot t = 94.0 \mu\text{m}$ が得られた。なお、 n と t の測定精度は主に使用する微動ステージの位置決め精度とサンプル厚 t に依存し、1 μm /ステップのステージを用

いた場合には、 $t \geq 1\text{mm}$ で0.1%以下の精度が期待できる。さらに、 $0.1\mu\text{m}/\text{ステップ}$ のステージを用いれば、サンプル厚 $t \geq 0.1\text{mm}$ において0.1%精度を確保できる[7]。

さて、 n, t 同時測定法では2つのステージを駆動して信号ピーク位置を探索するため測定時間がかかる。実用上、 Δn_g あるいは $\Delta n_g \cdot t$ を精度よく測定し、媒質の複屈折性を評価したいという要求が高い。そこで、図1の干渉計において集光レンズを取り除いてSLD平行光をXカットLiNbO₃結晶板に照射する。ステージ1または2のいずれかを走査すれば、極めて短時間で光路長差 $\Delta n_g \cdot t$ を直接測定できる。図4は、この1パススキャン測定法によるXカットLiNbO₃(図3と同一サンプル)の複屈折測定結果である。横軸は参照光ミラ(ステージ1)の移動量、縦軸はPDで検波された交流成分振幅値である。図中2つのピークは異常光(n_e)、常光(n_o)によるものであり、この2つのピーク位置の差が $\Delta n_g \cdot t$ であり、測定値 $94\mu\text{m}$ を得た。

一方、中心波長 $\lambda_c = 850\text{nm}$ におけるLiNbO₃の群屈折率理論値はセルマイヤ方程式より、 $n_o = 2.3411$ 、 $n_e = 2.2497$ であるため[7]、光路長差の理論値は $\Delta n_g \cdot t = (n_o - n_e) \cdot t = 0.0914 \times 1028 = 94.0\mu\text{m}$ となり実験値 $94\mu\text{m}$ と一致した。今回使用したSLDのコヒーレンス長 $\Delta l_c (= 12\mu\text{m})$ に対して、 $\Delta n_g \cdot t \gg \Delta l_c$ なる条件を満たすため、異常光、常光による2つのピークが十分分離した状態で観察された。

図3 サンプル走査法によるLiNbO₃の光路長差測定信号
Fig.3. Detected signals of optical pass difference measurement for a LiNbO₃ crystal by sample scanning method.

図4 1パス走査法によるLiNbO₃の光路長差

Fig. 4. Optical pass difference of a LiNbO₃ crystal by one pass scanning method.

<3.2> LiTaO₃多重反射測定

LiNbO₃は、屈折率差が $\Delta n_g = n_o - n_e = 0.0914$ となり比較的複屈折の大きな媒質である。一方、LiTaO₃は $\Delta n_g = n_o - n_e = -0.0051$ とLiNbO₃に比べて複屈折が小さい。よって、薄いサンプルの場合、光路差が光源のコヒーレンス長より短くなり、常光と異常光の干渉ピークが重なり明瞭に分離できなくなる。そこで、図5に示すように、多重反射成分を利用すると実効的にサンプル厚 t を反射回数倍に拡大できる。

図5 多重反射を用いた光路長差の拡大

Fig. 5. Expansion of optical path difference by multiple reflections.

厚さ $t = 482\mu\text{m}$ のXカットLiTaO₃に対してコヒーレンス長 $\Delta l_c = 7.3\mu\text{m}$ の光源を用いて光路長に対する干渉信号振幅変化を測定した。図6はそれぞれ、(a)サンプル後面(1重反射)、(b)2重反射、(c)3重反射、(d)4重反射での結果である。測定は(A)直線偏光による常光、異常光の個別測定(細線で n_o 、 n_e と表示)、(B)無偏光による常光、異常光の同時測定(太線でWithout polarizerと表示)の2種類を実施した。

(A)直線偏光測定は、無偏光の光源とBS間に偏光子を挿入し回転させ、LiTaO₃の主軸方向に偏光方向を一致させる。さらに、90度偏光方向を回転させることにより、それぞれ常光(n_o)と異常光(n_e)を単独に測定できる。光路長、光路長差、可干渉距離を表1にまとめた。これにより、光路長差がコヒーレンス長より短い場合でも測定できるが、偏光子を回転させて2度測定する必要がある。可干渉距離は反射回数の増加とともに広がっている。

(B)無偏光同時測定では1～3重反射において、光路長差 $4 \Delta n_g \cdot t = 4 \times (-0.0051) \times 482 = -9.83\mu\text{m}$ となり、光路長差がコヒーレンス長($\Delta l_c = 7.3\mu\text{m}$)程度のため、常光と異常光との干渉ピークが明瞭に分離していない。かろうじて、4重反射にて2つの干渉信号ピークが分離されている。さらに、(A)直線偏光測定と対応する干渉信号ピーク位置は一致してはならないはずだが、両者に規則性のない「ずれ」が生じている。

(a) Reflection from the back facet (Single reflection).

(b) Double reflections.

(c) Triple reflections.

(d) Quadruplicate reflections.

図6 多重反射によるLiTaO₃ (t = 482μm)の光路長差測定
Fig. 6. Optical pass difference measurement of LiTaO₃ crystal (t = 482μm) by multiple reflection method.

表1. 直線偏光によるXカットLiTaO₃の複屈折測定結果

Table 1. Birefringence of X cut LiTaO₃ by linear polarizing measurement.

	光路長		光路長差
	$n_{og} \times t$ (μm)	$n_{eg} \times t$ (μm)	$\Delta n_g \times t$ (μm)
前面～後面	1072.9	1070.5	2.4
後面～2重反射	1070.2	1067.5	5.1
2重～3重	1079.5	1078.0	6.6
3重～4重	1060.0	1056.6	10.0

	可干渉距離 Δl_c (μm)	
	常光線	異常光線
前面	7.3	
後面	10.3	10.3
2重反射	13.8	12.3
3重反射	17.1	15.2
4重反射	17.9	18.6

$n_{og}=2.22268$
 $n_{eg}=2.22778$

4.波長分散の影響

<4.1>波長分散のアンバランスによるコヒーレンス長の広がり

マイケルソン干渉計において、光源の波長スペクトルが広がりを持つ場合、参照光アームと信号光アームのいずれかに分散性媒質が存在し両アーム間の分散がアンバランスになると、干渉信号の振幅が低下するとともにピーク位置がシフトすることが知られている[12]。そこで、複屈折が生じないZカットLiNbO₃ (厚さt = 515μm)を分散媒質として用いて、2重反射までのコヒーレンス長を測定した。表2に示すように可干渉距離 Δl_c は、サンプル厚の増加とともに7.8μmから16.4μmへと増大する。同じく、低分散媒質である熔融石英 (厚さt = 1022μm)を測定すると Δl_c は8.1μmから7.8μmとほとんど変化しなかった。以上の結果より、干渉計両アーム間の波長分散のアンバランスが可干渉距離を広げている事が確認できた。

表2 分散媒質の等価厚み増大によるコヒーレンス長広がり

Table 2. Coherent length spreading due to increasing of effective thickness of dispersive medium (Z cut LiNbO₃).

$n_{og} \times t$ (μm)	Δl_c (μm)		
前面～後面	1210.2	前面	7.8
後面～2重反射	1213.6	後面	12.0
		2重反射	16.4

<4.2>波長分散の補償

参照光ミラとBSの間に、分散補償材としてサンプルのLiTaO₃の4重反射伝搬距離4tとほぼ同等厚のZカット (複屈折を生じない) LiNbO₃を挿入し測定を行った。当然のことながら、サンプル前面での干渉信号プロファイルは23.3μmと広がりがみられたが、4重反射光による干渉信号プロファイルは図7に示すように、(B)無偏光測定で常光(n_o)と異常光(n_e)によるピークが明瞭に分離できている。また、ピーク位置は(A)直線偏光測定のピーク位置 (図中細線)と一致した。光路長差 $\Delta n_g \times 4t = 9.6\mu\text{m}$ となり、偏光子を挿入して測定し

た1重反射の結果 $\Delta n_g \cdot t = 2.4\mu\text{m}$ のちょうど4倍になっている。

図7 分散補償を行った4重反射による光路長差測定

Fig. 7. Optical pass difference measurement by quadruplicate reflections with dispersion compensation.

5.まとめ

低コヒーレンス干渉計を用いて、薄い電気光学結晶などの面内微小複屈折が測定可能な測定法を提案した。サインブル厚が薄く光路長差が光源のコヒーレンス長以下の場合には、サンプルの両面の多重反射を利用し実効的に光路長差を拡大する手法を用いた。そのとき、信号、参照光両アーム間の媒質の波長分散アンバランスによる干渉信号の広がり、サンプルと類似した分散値をもつ補償用媒質をもう一方のアームに挿入することにより、干渉ピーク幅が広がる影響を大幅に改善されることを明らかにした。

具体例として、厚さ $t = 482\mu\text{m}$ のXカットLiTaO₃の4重反射測定において光源のコヒーレンス長と同等の光路長差 $\Delta n_g \times 4t = 9.6\mu\text{m}$ を明瞭に分離して測定できた。以上の結果より、偏光子を用いずとも無偏光多重反射において、微小複屈折測定が可能となることを示した。

謝辞：日頃ご指導頂く阪大院工・西原浩教授、有益なご助言を頂く阪大院工・伊東一良教授および大阪電通大・橋本正弘教授、本研究をご援助頂く九州松下電器(株)デバイス部門担当取締役・紙中伸征氏に感謝の意を表します。本研究は文部省科学研究費基盤研究A(課題番号07555018)の援助を受けた。記して謝意を表する。

(平成10年10月26日受付、平成11年3月8日再受付)

参考文献

- [1] 近江,白石,田尻,春名:信学技報, OPE95-116 (1995).
- [2] 田尻,白石,近江,春名:信学技報, OPE95-121 (1996).
- [3] M.Ohmi, T.Shiraishi, H.Tajiri, M.Haruna:OFS'96, We3-40, Sapporo, May 1996.
- [4] 田尻,白石,近江,春名:第33回日本ME学会講演36 (1996).
- [5] 田尻,白石,近江,春名:応物光波センシング技術研究会, LST17-6 (1996).
- [6] M.Haruna, M.Ohmi, H.Tajiri, T.Mitsuyama, H.Maruyama, M.Hashimoto: Optics Letter, Vol.23, No.12, pp.966-968 (1998).
- [7] 田尻,満山,近江,丸山,春名:信学技報, OPE96-116 (1997).
- [8] 久保田,浮田,會田編:「光学技術ハンドブック」, p.297, 朝倉書店 (1975).
- [9] 梅田,高和:信学論, C-I, J73-C-I, 10, p.652 (1990).
- [10] 佐藤,山本,小穴,巫,本間,高橋:第58回応物光波学会講演会予稿集, 4a-L-5 (1997).
- [11] 深野,松本,山口:第58回応物光波学会講演会予稿集, 3p-L-13 (1997).
- [12] 鶴田著:「応用光学II」, 4-I-7項, 培風館 (1990).

西 壽 巳

(非会員) 1955年12月18日生。1978年3月大阪大学工学部電子工学科卒業。1980年3月同大学大学院工学研究科電子工学専攻博士前期課程修了。同年4月～1997年3月日本板硝子(株)勤務。1997年4月大阪工業大学工学部電子工学科助教授、現在に至る。屈折率分布型レンズ、光応用計測、画像計測の研究に従事。工学博士。応用物理学学会会員。日本光学会会員。電子情報通信学会会員。

井 上 将 吾

(非会員) 1975年9月4日生。1998年3月大阪大学工学部電子工学科卒。現在同大学工学研究科電子工学専攻。低コヒーレンス光干渉計測の研究に従事。

満 山 照 樹

(非会員) 1973年11月1日生。1996年3月大阪大学工学部電子工学科卒。1998年3月同大学工学研究科電子工学専攻修了。同年4月(株)東京電力に入社。在学中は低コヒーレンス光干渉計測の研究に従事。

下 谷 望

(非会員) 1976年2月28日生。1998年3月大阪工業大学工学部電子工学科卒。同年4月テラメックス(株)に入社。在学中は低コヒーレンス光干渉計測の研究に従事。

芦 澤 努

(非会員) 1974年4月8日生。1998年3月大阪工業大学工学部電子工学科卒。同年4月にタツタ電線(株)入社。在学中は低コヒーレンス光干渉計測の研究に従事。

丸 山 英 樹

(非会員) 1963年10月7日生。1984年3月国立久留米高専工業化学科卒業。同年4月～1990年1月三菱電線工業中央研究所に勤務、光ファイバおよび光導波路の研究に従事。1990年2月九州松下電器入社、現在に至る。1992年6月～1993年10月大阪大学電子工学科西原研究室研究生。光応用計測、光導波路デバイスの研究に従事。応用物理学学会会員。電子情報通信学会会員。

近 江 雅 人 (非会員) 1966年9月17日生。1990年福井大学工学部電気工学科卒、1992年大阪大学大学院工学研究科電磁エネルギー工学専攻・修士課程修了、1995年同大学院博士課程修了、1995年4月同大医学部助手、現在に至る。固体レーザー、生体光計測、医用光学の研究に従事。工学博士。応用物理学会、電子情報通信学会、日本ME学会、レーザー学会の各会員。

春 名 正 光 (会員) 1945年11月20日生。1968年大阪大学工学部電子工学科卒、1970年同大工学研究科電子工学専攻・修士課程了、1973年同博士課程単位取得退学、同年4月大工学部助手、1988年4月同助教授、1994年4月同大医学部教授、現在に至る。光導波路、レーザー応用プロセス、光センシングの研究を経て、現在は医用光学、光エレクトロニクス、生体光計測の研究に従事。工博。電気学会、電子情報通信学会、応用物理学会、日本ME学会、レーザー学会、IEEEの各会員