

Bi-YIG光CT開発のための材料合成，材料特性測定及び試作光CTの評価

林，宏充

九州大学大学院総合理工学研究科量子プロセス理工学専攻

岩佐，宗八

九州大学大学院総合理工学研究科量子プロセス理工学専攻

植田，清隆

九州大学大学院総合理工学研究科量子プロセス理工学専攻

寺藺，完一

九州電力（株）

他

<https://doi.org/10.15017/16618>

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告．23（1），pp.1-7，2001-06．九州大学大学院総合理工学府
バージョン：
権利関係：

Bi-YIG 光 CT 開発のための材料合成, 材料特性測定及び試作光 CT の評価

林 宏 充* ・岩 佐 宗 八* ・植 田 清 隆***
寺 藪 完 一**** ・竹 下 博 人**** ・樋 口 貞 雄*****

(平成13年2月28日 受理)

The material composition for Bi-YIG laser CT development, material characteristic measurement, and evaluation of the trial production laser CT

Hiromitsu HAYASHI*, Souhachi IWASA**, Kiyotaka UEDA***,
Kanichi TERAZONO****, Hirohito TAKESHITA****,
Sadao HIGUCHI*****

For stable control of electric power systems, robust protection systems, rapid recovery of breakdown points when troubles occur, subsequent stabilization of electric power systems after trouble and simplification of sensing systems, are required. Laser instrumentation can measure the magnetic flux and the electric current without direct physical contact. In this study, as the first step by measuring the characteristics of various materials, we selected an useful optical material for measuring current and calculated its optimum thickness. As the second step, we made an optical current transformer composing of the optical relay system. Finally, we evaluated the performance of the prototype optical current transformer by comparing with pure resistor current transformer.

1. 緒 言

雷撃などの故障現象が発生した送電線を瞬時に検出して遮断するリレー技術は、電力システムの安定運用に不可欠で極めて高い信頼性を要求される。このためには故障発生時の送電線の電流や電圧の変動を正確に計測する変圧器 (PT) や変流器 (CT) などの計器用変成器が必要になる。これまでの PT, CT は電気機械型 (アナログ) リレーの駆動力を得るため、2次側出力を 110V, 5A 定格とする必要があった。そのため、PT, CT は従来の巻線、鉄心、プッシング等を用いた構造は変えられず、特に CT は設置主回路に対して直列計器となっており、これ以上の縮小化とコスト低減が困難な状況にある。一方、現在急速に導入が進んでいるデジタルリレーは、入力部が電子回路で構成され、微小電流量や光信号でも作動できるため、従来仕様の PT, CT に課せられていた2次側出力面からの制約が不要になる。本研究では、デジタルリレーへの適用を念頭に置いて、材料選定、材料の厚み設計の

段階から高圧送電線の電流をレーザにより計測する光 CT を試作した。この試作光 CT の使用レーザや素子の温度特性、素子のレーザ入射光特性、光 CT の振動特性を測定し、試作光 CT の性能を評価した。また、本試作 CT を用い九州電力(株)の模擬送電線にて3層短絡電流等の各種故障試験を実施し電流値を測定し定常電流から故障電流までの広いダイナミックレンジでの測定を行い良好な結果を得た。

2. 原 理

光 CT は磁気光学ファラデー効果¹⁾を利用してケーブルからの漏れ磁界を測定することにより電流を測定するものである。ファラデー効果は磁界と平行方向に直線偏光が結晶を通過するとその偏光面が回転する現象で、回転角 θ は次の式で示される。

$$\theta = VHL \dots \dots \dots (1)$$

ここで V: ヴェルデ定数, H: 磁界の強さ, L: 結晶の長さである。

Fig. 1 にファラデー回転角の測定原理図を示す。レーザからの光を偏光子により直線偏光にし、磁界を印加したファラデー素子に入射する。偏光子から45度傾けた検光子にその光を入射することによって、ファ

*量子プロセス理工学専攻博士課程
**量子プロセス理工学専攻修士課程
***量子プロセス理工学専攻
****九州電力(株)
*****(財)電力中央研究所

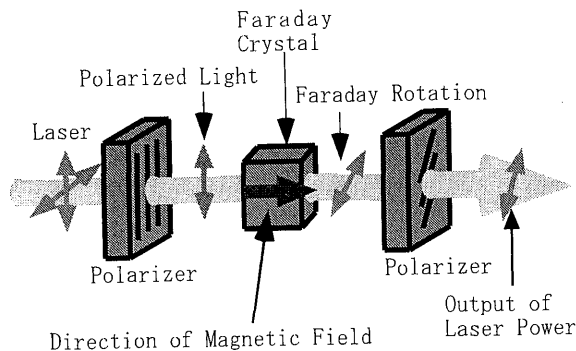


Fig. 1 The principle figure of optical current transformer

ラダー回転を光の強度として読み取ることができる。代表的なファラデー回転角測定方法としてはクロスニコル法²⁾があり、偏光子、検光子、フォトダイオード、アンプ、磁気光学材料、光源等から構成され、検光子を回転させ消光状態の角度を測定する。実際に光 CT として用いる場合は検光子の偏光角を偏光子に対して 45 [deg] 傾けて配置する。検光子を透過した光は偏波面の回転角の大きさに比例した光出力で、それをフォトダイオードなどで電気信号に変換し電流を計測する。

3. 材料特性と光 CT の設計

光 CT の設計を設計するために、まずバルク Bi-YIG と Ga-YIG の波長 - 透過率特性を測定した。Fig. 2 が示すように、Bi-YIG, Ga-YIG とともに波長が約 1000nm から透過率が大きくなり約 1100nm でピークになる。また、YIG 結晶等のファラデー素子のヴェルデ定数は波長が短くなるほど大きくなる³⁾。上記 2 つを考慮すると、波長 1100nm 程度で出来るだけ短波長のレーザー波長が光 CT として有用であることが分かる。また、光 CT の小型化や光量の安定化、コストの低減のために半導体レーザーを用いると、1310nm の半導体レーザーが適していることがわかった。1310nm の半導体レーザーは光通信などに利用されているため、大量に生産されている。そのため、コストの低減に繋がり、また製品の信頼性や安定性も良いと思われる。この波長 1310nm の時の厚みが感度に与える影響を考慮し、測定のス/N 比を向上させる最適な厚みを検討した。素子に磁界 H を印加したとき、光 CT からの信号 S の大きさはファラデー回転角の十分小さいところでは回転

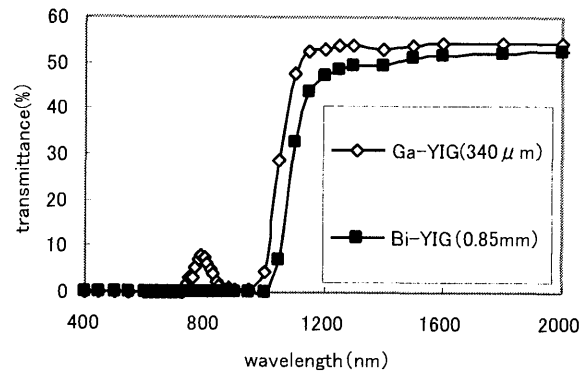


Fig. 2 Wave length-permeability curve of Ga-YIG and Bi-YIG

角と素子からの透過光の強度 (直流分: $I_0 \exp(-kX)$) に比例すると考えられる。すなわち

$$S \propto I_0 \exp(-kL) \text{ VHL} \dots\dots\dots (2)$$

となる。ただし、 I_0 : 入射光の強度、 k : 吸収係数である。

このとき結晶厚 L の影響のみを考え、C を比例係数として

$$S = C \exp(-kX) X \dots\dots\dots (3)$$

と表すと、 $X = 1/k$ のとき S は最大値をとることが分かる。したがってこのときの L を最適な素子厚として、最適な素子厚を計算した。また、最適厚の $X = 1/k$ における感度係数 (deg · m/A) を計算した。各材料の特性比較を Table 1 に示す。ここで、Bi-YIG が従来用いていた Ga-YIG に対して約 7 倍の測定感度を持つことが分かる。この結果より本研究では光 CT の光学結晶に Bi-YIG を使い、厚さを 1.2mm に研磨し、使用レーザー波長を 1310nm とし光 CT を構成した。今回の模擬送電線の定常電流は 5A であり、光 CT を送電線の中心から 2 cm の所に接続した場合、結晶部の発生磁束密度は 0.05mT と計算される。この時ファラデー回転角は最大で 2.12 [deg] となり、受光素子の受光感度と偏光子の透過率等を考慮するとアンプ前段で約 0.1mV の出力になり、十分に測定できることが

Table 1 Verdet constant and sensitivity coefficient of Bulk Ga-YIG and Bulk Bi-YIG

Bulk	Laser Wavelength	Verdet Constant [deg/T · μm]	Optimum Thickness [μm]	Sensitivity Coefficient in Optimum Thickness [deg/T]
Ga : YIG	780	0.47	120	56.4
Bi : YIG	1310	0.33	1200	396.0

分かる。また、検光子の透過光強度を偏光角に比例すると近似した誤差は $3.12E-8\%$ であり、十分に近似されている。今回の短絡電流は約 50A でありその時の近似誤差も $3.08E-5\%$ であり十分測定可能である。誤差範囲を 1% としてこの CT の測定レンジを計算するとこの配置では 1800A まで測定可能だということが分かった。また、Bi-YIG は 30mT 前後で飽和するため、1800A 測定時の発生磁束密度 18mT までは材料の飽和磁界の影響はない。

4. PLD 法による材料合成とその評価

光 CT 作成において、測定感度の高い材料を用いることは重要である。ファラデー素子の一つである YIG は Bi や Ce 等のドーパ材の添加量や種類を変える事により、測定感度を改良することができる。その合成条件を調べるには PLD 法が最も効率が良く、PLD 法により光 CT 用光学素子の Bi-YIG を合成した。PLD 法による成膜は非常に複雑な成膜パラメータがあり、その中で基板温度、酸素圧力、ターゲット基板間距離の最適値を選定した。選定には XRD 解析、SEM 観察による結果により考察した。その結果、基板温度を 520°C 、酸素圧力を 125mTorr、ターゲット-基板間距離を 30mm に設定し、 $\text{Bi}_1\text{Y}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 及び $\text{Bi}_2\text{Y}_1\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ を合成し、バルク結晶の Bi-YIG 及び YIG と比較した。Table 2 に作成した薄膜の性能特性を示す。まずヴェルデ定数の比較であるが測定波長が短いこともあり薄膜のほうが最大で500倍近い値をとっている。しかし、成膜した薄膜の膜厚では感度はバルク YIG 結晶の 8 割程度になる。しかしバルク Bi:YIG は 9 倍の感度があることになる。次に回転感度だけに注目してバルク結晶と同じ回転を得るために必要な膜厚を計算した。波長 500nm においては薄膜 1 枚でもバルク YIG と同じ回転が得られる。また吸収係数から求まる最適膜厚とその時の感度係数を計算した。これより今回作成した薄膜は光吸収が大きく最適膜厚も非常に薄くなることが分かった。バルク結晶と比較しても最適厚では十分な感度がないことが分かる。現段階の性能では膜厚により感度を稼いでも光吸収により測定の感度は稼げないと考えられる。Bi:YIG に

は固有の吸収があることが知られているので、吸収の少ない波長域でのヴェルデ定数の向上が重要である。

5. 光 CT の光入射角特性及び素子の温度特性

光の偏光特性を利用した測定では、測定光の測定素子への入射角や光の振動面の角度が測定感度に影響する。それらを踏まえ、以前我々は Fig. 3 の装置を用いて光 PT の試作のための LiNbO_3 の入射角に対する偏光の振動形の変化を測定した⁴⁾。結果は偏光の振動形の変化により、光出力が振動したデータを得た。実際に各レーザ入射角に固定し検光子を回転させ偏光の状態を測定すると、 LiNbO_3 を透過した直線偏光は入射角の増加に伴い回転しながら、楕円偏光になり、そのまま回転しながら直線偏光に戻っていく、さらに入射角を増加させると、最初の回転と逆方向に回転しながら楕円偏光になり直線偏光に戻った。光 CT 用結晶 Bi-YIG に対しても同様の測定を行った。実験方法は半導体レーザ (キコー技研, 型式 MLX-D12-1310-5, 波長 1310nm, 定格出力 2.4mW) からの直線偏光を Bi-YIG 結晶 (厚さ 1.2mm) に入射し、その透過光を入射レーザに対して直交している検光子 (シグマ光機, グランレーザプリズム, 品番 GTPC-08-20AN) を通してフォトダイオード (浜松フォトニクス, InGaAsPIN

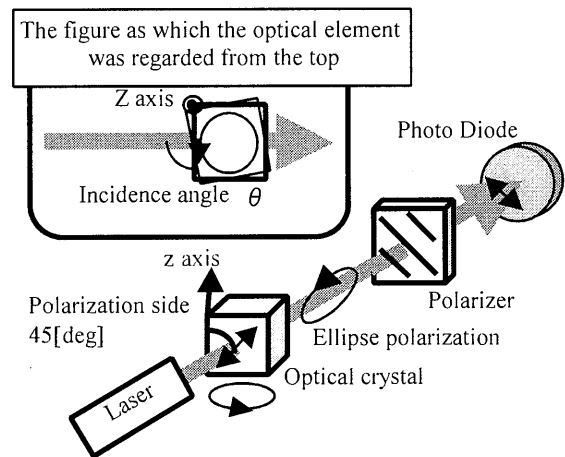


Fig. 3 Penetration polarized light measurement device chart by the angle of incidence of laser.

Table 2 Verdet constant and sensitivity coefficient of Bulk Bi-YIG

Thin Film	Laser Wavelength [nm]	Verdet Constant [deg/T · μm]	Film Thickness [μm]	Sensitivity Coefficient in [deg/T · μm]	Optimum Thickness [μm]	Sensitivity Coefficient in Optimum Thickness [deg/T]
$\text{Bi}_1\text{Y}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	630	10.0	0.73	7.3	1.28	12.8
	500	60.4	0.73	44.1	0.30	18.0
$\text{Bi}_2\text{Y}_1\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	500	160.0	0.26	41.6	0.10	16.0

フォトダイオード, G5832-02) で読み取った。この時光学素子を回転させ光学素子に対するレーザ入射角を可変し, 横軸をレーザ入射角, 縦軸をフォトダイオード出力として測定した。結果を Fig. 4 に示す。この結果は最も透過距離の短い入射角 0[deg] をピークに入射角の増加に伴って, 透過出力が減少していくもので, 入射角に対して偏光の変化が現れていないことを示し, Bi-YIG を用いた光 CT の光入射角は最も出力の大きい 0[deg] が最適であることが分かった。

6. 温度 — ヴェルデ定数測定

本研究では発電所の環境下において電流電圧測定を行う必要があり, 発電所内は温度変化が激しく -20~80度という広い範囲で変化する。その環境下での光 CT や光 PT の測定感度は温度に依存して変化する。また, 光 CT や光 PT の測定感度が発電所内の温度変化によって変化する原因として温度に対するヴェルデ定数の変化やレーザ出力の変化がある。Bi-YIG, Ga-YIG の温度 — ヴェルデ定数特性と Bi-YIG を用いた光 CT 用レーザ, Ga-YIG を用いた光 CT 用レーザの温度 — レーザ出力特性を常温20℃から60℃までの範

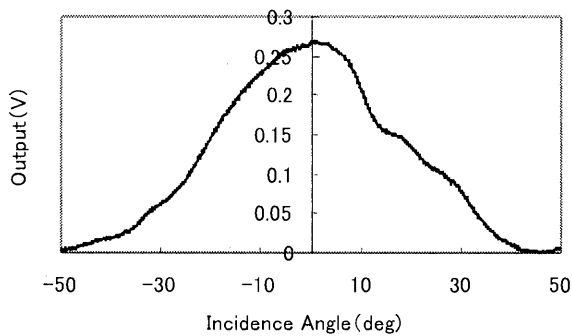


Fig. 4 Optical output characteristic to the angle of incidence of laser

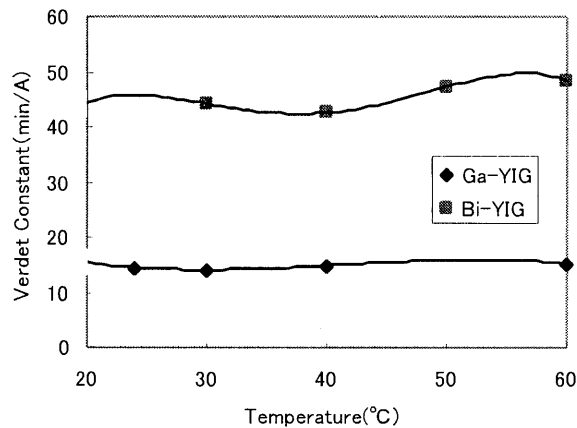


Fig. 5 Temperature-Verde constant curve of Ga-YIG and Bi-YIG

囲で測定し光 CT の温度依存特性を評価した。測定は Fig. 1 のクロスニコル法を用い, 各温度においてファラデー回転角を測定した。Fig. 5 に Ga-YIG と Bi-YIG の温度-ヴェルデ定数曲線を示す。

Ga-YIG, Bi-YIG ともに温度によるヴェルデ定数の変化はヴェルデ定数の大きさに対して10%程度あり両材料とも温度に依存することが分かる。発電所環境下において測定精度を向上させるためには結晶の組成や合成方法により Bi-YIG の温度特性を向上させることや測定材料そのものを発電所内の温度から断熱することが必要であることが分かった。また, Bi-YIG を用いた光 CT 用レーザと Ga-YIG 用光 CT 用レーザの温度 - レーザ出力特性は共に20℃~80℃まで全体の出力にたいして変位が1%未満とフラットな出力を得たため温度に対してレーザ出力は余り依存しないことが分かった。

7. 振動印加中の磁界測定

光計測という技術を用いた光 CT は, 振動の影響が非常に大きく光 CT を作成するにあたり振動に対して考慮することは重要である。今回はレーザ発光素子から測定素子 Bi-YIG と検光子とフォトダイオードまでをひとまとめにして作成した一体型光 CT と, Fig. 6 に示す測定素子と検光子とコーナーキューブプリズムを電流測定部に配置し, レーザ発光部とフォトダイオードを測定部から離すことにより電氣的に絶縁した遠隔型光 CT を試作し, それぞれに振動を印加し磁界測定を行った。1310nm 半導体レーザからの直線偏光を Bi-YIG に入射し, 素子に交流 60Hz の交流磁界を印加した。磁界により回転した直線偏光を入射レーザ偏光面に対して 45[deg] 傾けたグラントムソンプリズムに透過させることにより, 交流磁界を光出力に変換しフォトダイオードで読み取った。フォトダイオ

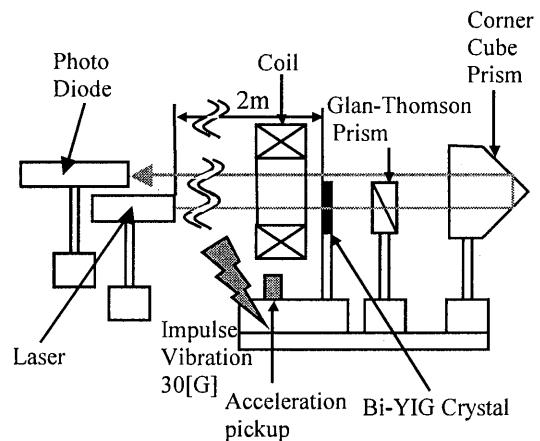


Fig. 6 Magnetic field measurement device when vibration is impressed

ドにレーザを入射するためにコーナーキューブプリズムを用いたのは振動対策であり、振動で光軸の角度がずれても影響が位置のずれとして生じ角度として出ないようにした。印加振動は遮断器開放時に発生する振動 30G を印加して磁界を測定した。Fig. 7 に遠隔型光 CT の印加振動と磁界 1 (mT) の測定結果を載せる。振動の影響により、振動印加後の出力が乱れ磁界測定不能となった。次に同様の振動を印加して、一体型光 CT を用い磁界 0.05 (mT) を測定した。測定結果を Fig. 8 に示す。一体型 CT では遮断機開放時に発生する振動を印加した状態において、安定して電流を読み取れることが分かる。ここで測定磁界は送電線に電流

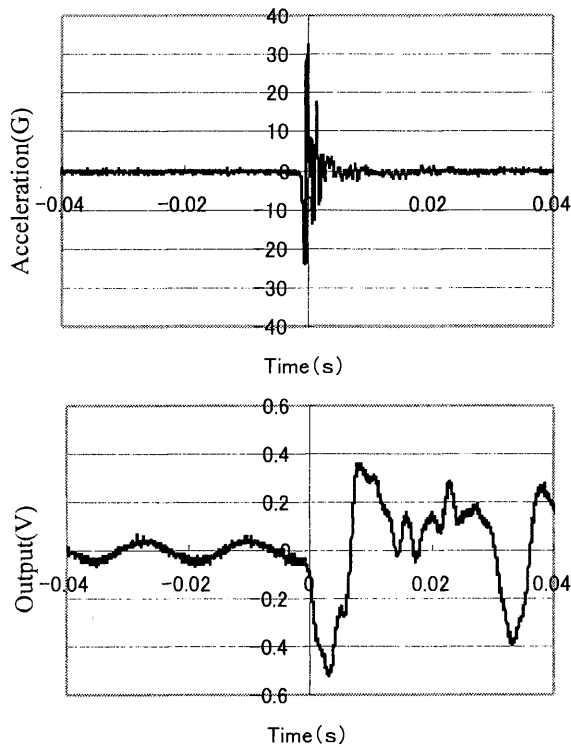


Fig. 7 Impressed vibration strength and magnetic field wave shape by remote sensing CT at alternative magnetic field 1mT

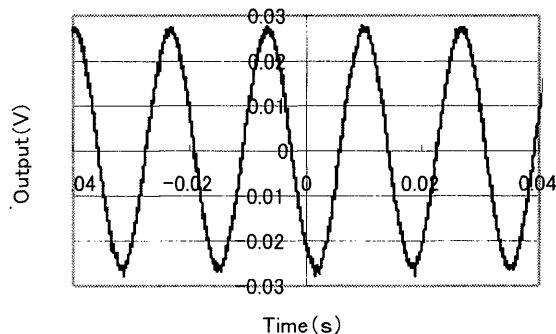
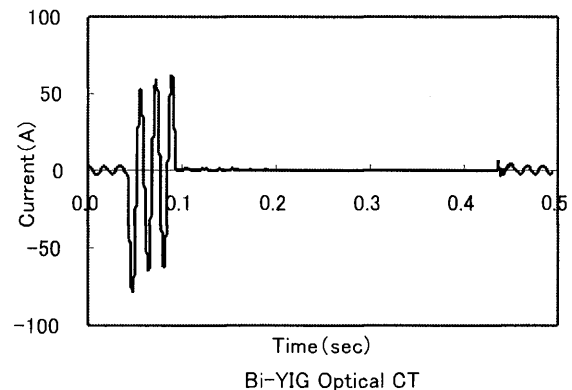


Fig. 8 alternative magnetic field 0.05mT measurement wave shape at 30G impression vibration which uses light CT all-in-one design

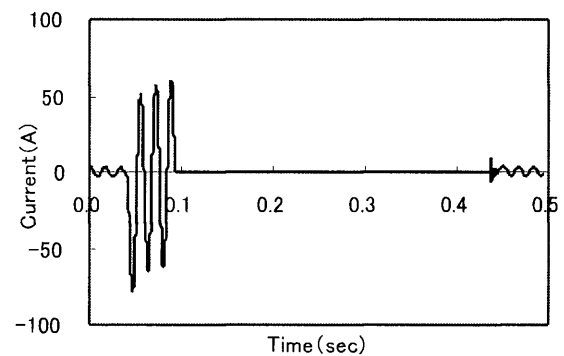
5A 流れた時に、送電線中心から 2 cm はなれた位置で測定した時の発生磁界であり、後述する七隈社員研修場の模擬送電線の定常電流により発生する磁界である。なお、遠隔型 CT では非常に振動に敏感で 0.05 (mT) の測定が困難であったため 1 (mT) を測定した。Fig. 7, Fig. 8 の結果より後述の模擬送電線の電流測定実験には一体化型の光 CT を用いた。

8. 模擬送電線での電流測定実験

本研究では光 CT の光リレーへの適用のため YIG 及び透過率を上げるため Ga-YIG を用いた光 CT を用いて実験を行ってきたが、今回は測定精度を向上させるため Bi-YIG を用いた光 CT を試作した。その試作光 CT を用いて模擬送電線の電流を測定し、シャント抵抗に流れる電流と比較した。電流は定常電流 (5A), 1 線地絡電流, 2 線地絡電流, 3 線地絡電流を測定し、定常電流 5A から短絡電流 50A までを Bi-YIG で精度良く測定することが出来た。Fig. 9 に Bi-YIG とシャント抵抗で測定した模擬送電線の電流波形の比較を示す。定常状態から故障発生 (3.5 サイクル) 24 サイクル遮断後再開路した電流波形を Bi-YIG による光 CT で精度良く測定できているのが確認できる。さらに、定常電流波形を拡大し比較すると



Bi-YIG Optical CT



Pure Resistance CT

Fig. 9 Breakdown current measurement comparison between optical CT with Bi-YIG and pure resistance shunt CT

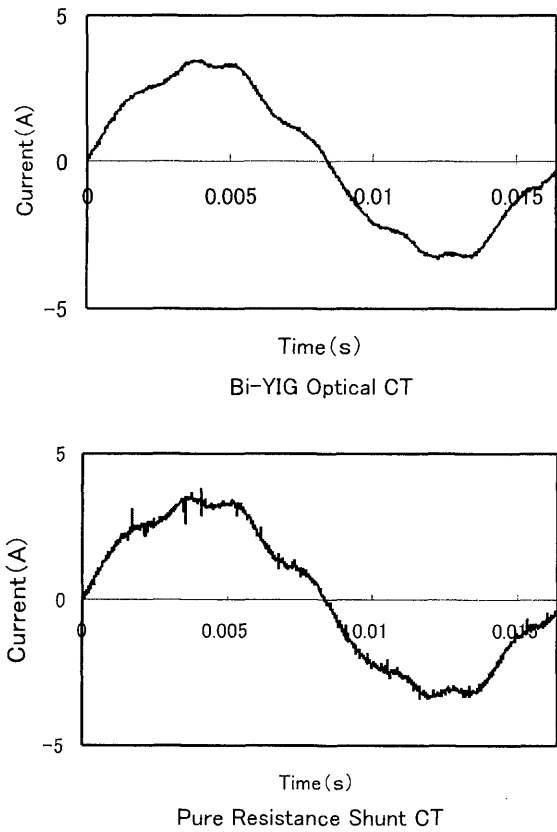


Fig. 10 Stationary current comparison between optical CT with Bi-YIG and pure resistance shunt CT

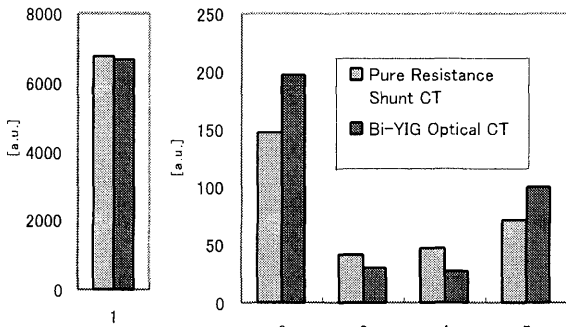


Fig. 11 Fourier analysis comparison between optical CT with Bi-YIG and pure resistance shunt CT

Fig. 10 のようになり, 模擬送電線の歪んだ電流波形もよく合致しているのが読み取れる. これをフーリエ解析して結果が Fig. 11 で基本成分と分布傾向はよく合致しているのが読み取れる. これにより, 光 CT 用結晶に Bi-YIG を用いることにより送電模擬装置の定常電流, 故障電流をシャント抵抗に近い精度で測定することが出来, Ga-YIG を用いた光 CT の 7 倍の精度を得ることが出来た.

9. 結 言

本論文では光学素子の波長によるヴェルデ定数と透過率, ヴェルデ定数の温度特性や透過光の光入射角特

性を測定した. それらの結果を考慮に入れて Bi-YIG を用いた光 CT を設計し試作した. 次に試作光 CT について振動特性試験を行い, 特性の良好であった一体型光 CT を用いて, 九州電力社員研修所の模擬送電線による故障電流を計測し純抵抗シャント CT との比較を行い以下のことが明らかになった.

(1) Bi-YIG, Ga-YIG の波長による透過率, ヴェルデ定数を測定し, 光 CT としての最適な厚さを計算して最適な厚さでの感度の比較を行い, Bi-YIG が Ga-YIG の 7 倍の感度を持つことが分かった.

(2) PLD 法による Bi-YIG の最適合成条件を選定し, 素子を合成することが出来た. 素子厚や透過率のためバルク Bi-YIG に測定感度が及ばなかった.

(3) Bi-YIG のレーザ入射角偏光特性測定を行った結果. Bi-YIG へのレーザ入射角によって, 偏光の振動形に変化は生じないことがわかり, 透過の大きい垂直入射が良いことが分かった.

(4) Bi-YIG と Ga-YIG の温度-ヴェルデ定数特性を測定した結果. 共に温度に対してヴェルデ定数が変化し, 常温時のヴェルデ定数に対して約 10% の誤差が生じた.

(5) Bi-YIG を用いた遠隔型光 CT と一体型光 CT の振動印加時の磁界測定を行った結果. 一体型光 CT を用いて 0.05 [mT] を 30 [G] での振動印加時に測定することが出来た.

(6) 九州電力社員研修所の模擬送電線において, 一体型光 CT を用いて定常電流から故障電流までの広いダイナミックレンジを高精度で測定でき純抵抗シャント抵抗で測定した電流に対し良く合致した.

今後は温度特性を良くするため Bi-YIG に材料をドーブしたものを作成し特性を評価し, 最適な材料を選定する. また, 光 CT の材料部の恒温性を良くする. 振動対策に対して一体型の光 CT は良い特性を示したが, 遠隔測定による高絶縁という光測定の利点を失うため遠隔型での振動特性の改善をする. 今回はコーナーキューブプリズムを用いて振動対策を行ったが十分ではないことが分かった.

10. 謝 辞

本研究において九州大学赤崎正則名誉教授, 村岡克紀教授, 前田三男教授には光学に関する多くの知識を御教授賜り, 岡田龍雄教授, 内野喜一郎教授には今回の材料合成について御協力賜りました. また, 九州電力株式会社の御協力で社員研修所の模擬送電線を使用し貴重なデータを得ることが出来ました. 九州電力株式会社系統運用部の土谷要夫部長, 平山平三郎次長, 中原道隆課長及び, 総合研究所の堤克哉主席研究員, 岡元洋主幹研究員の多大な御援助に対し, 深く感謝いたします.

文 献

- 1) 小川智哉：「結晶物理光学」裳華房，応用物理学選書 1，p. 216-220，昭和51年
- 2) 佐藤勝昭：「光と磁気」朝倉書店，現代人の物理 1，p. 89-90，1988年
- 3) 林宏充・岩佐宗八・近藤剛・植田清隆・樋口貞雄・栗林英行：「光 CT 用磁気光学結晶の波長特性」，平成11電気学会九州支部，No 810
- 4) 林宏充・岩佐宗八・植田清隆・寺菌完一・竹下博人・樋口貞雄：「光 PT 開発のための LiNbO_3 のレーザ入射角偏光特性測定」，平12応物学会九州支部，1Aa-15