

強減光時における磁気光学偏光制御に向けた微弱光における磁性薄膜の透過率と光子数変換評価

Evaluation of Transmittance and Photon Number Conversion in Magnetic Thin Films under Weak Light for Magneto-Optical Polarization Control of Weak Light under Strong Attenuation

○竹内秀曜<sup>1</sup>, 若林達也<sup>2</sup>, 吉川大貴<sup>3</sup>, 塚本新<sup>3</sup>

\*Shuyo Takeuchi<sup>1</sup>, Tatsuya Wakabayashi<sup>2</sup>, Hiroki Yoshikawa<sup>2</sup>, Arata Tsukamoto<sup>3</sup>

Abstract : High-speed polarization control is crucial for practical QKD, and millisecond-scale liquid-crystal devices are too slow. We pursue ultrafast control via the magneto-optic effect and built a weak-light evaluation pipeline that links optical attenuation to photon-number estimation. A 632.8-nm He-Ne continuous source was attenuated under multiple conditions with ND filters, detected by a photodetector, and converted to photon flux. Inserting a SiN/Gd<sub>23</sub>(FeCo)<sub>77</sub>/SiN thin film, we recorded detected voltage versus analyzer angle  $\theta$  for both (+M) and (-M) magnetization states, confirming that transmittance is maintained under weak-light conditions. Calibration further indicates an optical density of ~16 is required to reach the single-photon level. These results validate thin-film transmission at weak light and establish a quantitative path toward single-photon measurements and ultrafast magneto-optical polarization control.

1. はじめに

従来の偏光制御デバイスでは、液晶可変位相子 (LCVR) などの ms オーダーの偏光状態制御方式が広く用いられている。しかし、量子鍵配送 (QKD) などをはじめとして社会実装を目論む上での偏光制御には ns ~ ps での動作が求められている<sup>[1]</sup>。そのため、単一光子偏光状態制御の高速化に向けた研究が行われている<sup>[2][3]</sup>。本研究では、磁気光学効果を用いた高速な偏光状態制御可能な光子源の実現を目標に、Si-Photo Multiplier tube における受光光子数の算出、検出路への光子到達を電気的変換による出力電圧値から光子数を換算、また、シード光を強く減光する微弱光生成部、電気的光検出器、からなり制御光学系の評価を行う原理システムを試作し、減光条件下での光子数変換と、磁性薄膜も用いた、光強度依存性について評価を行った。

2. 実験方法

Fig.1 光強度測定系を示す。He-Ne レーザー ( $\lambda = 632.8[\text{nm}]$ ) (シード光) を光源とし、ND フィルター1 (透過率 33.3[%] ( $\lambda = 632.8[\text{nm}]$ )), ND フィルター2 (透過率 0.86[%] ( $\lambda = 632.8[\text{nm}]$ )) を Table 1 の条件で挿入し、入射光  $I_0$  を減光し、出力光  $I_{out}$  をフォトダイオード(PD)で測定した。

まず、Fig.1 (a) の光強度測定系を用いて、各条件での ND に対して光強度  $I$  を測定し、減光を確認した。また測定した値を基に、光子数  $N$  を算出した。光子数の変換には以下式 (1) を用いる。

$$N = \frac{I_{out}\lambda}{hc} \tag{1}$$

$N$ : 光子数 [ $N_{\text{photon}}/\text{s}$ ],  $\lambda$ : 波長 ( $\cong 632.8 [\text{nm}]$ ),

$h$ : プランク定数 ( $\cong 6.626 \times 10^{-34} [\text{J}\cdot\text{s}]$ ),  $c$ : 光速 ( $\cong 3 \times 10^8 [\text{m}/\text{s}]$ )

次に、DC・RF マグネトロンスパッタ法により、層構成 SiN (5nm) / Ge<sub>23</sub>(FeCo)<sub>77</sub> (20nm) / SiN (5nm) / glass sub. の試料を用いて Fig.1 (b) の光強度測定系を構築した。本測定系では偏光子を固定し、検光子  $\theta$  を 0 ~ 20[deg.]まで 0.5[deg.] ,

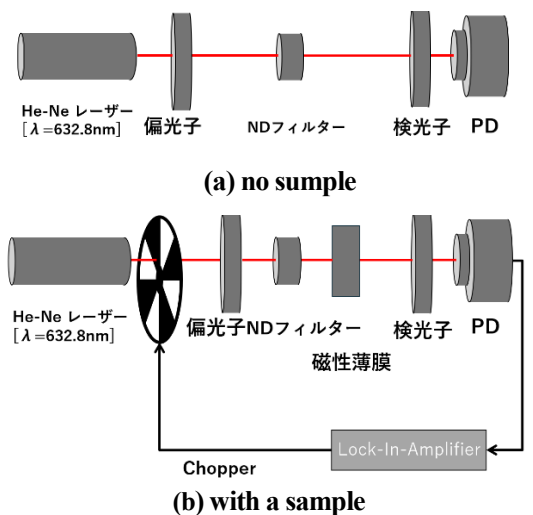


Fig. 1 Optical Intensity Measurement System Using ND Filters and Magnetic sample Films

1 : 日大理工・学部・電子 2 : 日大理工・院 (前)・電子 3 : 日大理工・教員・電子

20~30[deg.]までは、5[deg.]ずつ角度変化させた。また、垂直磁気異方性薄膜の磁化状態を永久磁石により変化させ、測定試料面が光源側に  $N$  極となる状態を  $+M$ 、光源側に  $S$  極となる状態を  $-M$  として、検光子角度変化による、光検出電圧を測定した。

**Table 1 Conditions for inserting an ND Filter**

条件1	条件2	条件3	条件4
フィルター無し	ND フィルター1	ND フィルター2	ND フィルター1 ND フィルター2

**3. 結果と考察**

Fig. 2 に測定系 Fig.1(a) における透過率の理論値及び実測値の結果を示す。この結果より、各値はこの測定系は減光が理論値と差が各条件において条件2 : +7 [%], 条件3 : +0.14 [%], 条件4 : +0.03 [%]であることが示された。また、光子数換算を行った時、各条件はそれぞれ、条件2 : +7 [%], 条件3 : +0.14 [%], 条件4 : +0.03 [%]であった。この結果より、透過光における透過率と光子数は同じ形で推移することがわかる。また、Fig.2 の推移から、シード光強度を単一光子のレベルにするために OD16 程度の減光が必要であると見積った。

また、Fig. 3 (a) に測定系 Fig. 1 (b) における  $+M$  状態の光検出電圧を光強度毎の各条件下で示す。検光子角に対し、 $\cos^2(\theta)$  に対応した減光を確認した。さらに  $-M$  状態での光強度毎グラフを同様に Fig. 3 (b) に示す。  $+M$  状態でのグラフを取得すると、 $+M$  状態と  $-M$  状態双方において、概形が似る事が確認できる。さらに、 $\cos^2(\theta)$  にも同様に従うことが分かり、本システムは光検出電圧は  $+M$  状態と  $-M$  状態に依存せず、検光子角  $\theta$  に依存して減少することを評価した。

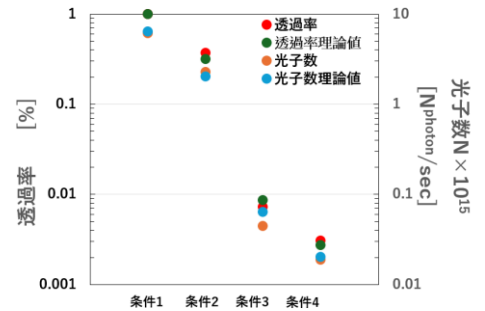
以上の結果より、光強度に依存せず偏光状態の確認をすることができた。

**4. まとめ**

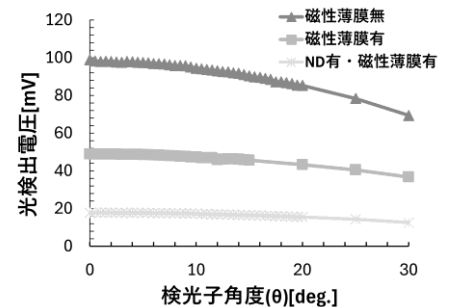
本研究では、磁気光学効果による偏光制御光子源の実現を目指し、ND フィルターを用いてシード光を減光した微弱光実験系を構築し、透過率、光子数の換算、磁性薄膜を用いた光検出電圧における検光子角度  $\theta$  の評価を行った。結果より偏光評価が光強度に依存せず成立することが示されると同時に、光強度減光時に PD で光強度  $I$  を測定することで、光子数換算可能な、原理検証システムの構築ができた事を示す。本実験では、シード光強度減光による微弱光生成部、電気的光検出器、の制御光学系の内、減光時の評価を行う原理システムを試作し、評価を行った。

**5. 参考文献**

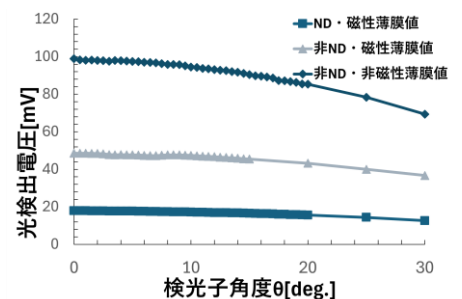
[1] Andrei Kirilyuk, Alexey V. Kimel, and Theo Rasing, "Ultrafast optical manipulation of magnetic order", *Rev. Mod. Phys.* 82, 2731–2784 (2010).  
 [2] Dong-Dong Li, Song Gao, Guo-Chun Li, Lu Xue, Li-Wei Wang, Chang-Bin Lu, Yao Xiang, Zi-Yan Zhao, Long-Chuan Yan, Zhi-Yu Chen, Gang Yu, Jian-Hong Liu, "Field implementation of long-distance quantum key distribution over aerial fiber with fast polarization feedback", Vol. 26, Issue 18, pp. 22793–22800 (2018).  
 [3] J. Chen, G. Wu, Y. Li, E. Wu, and H. Zeng : *Opt. Express* 15, 26, 17928–17936, (2007).



**Fig. 2 Experimental and theoretical transmittance for Conditions for inserting an DN filter**



**(a) The photodetection voltage for each magnetization state under each condition for each light intensity**



**(b) Differences in each magnetization state**

**Fig. 3 Photodetection voltage of magnetic sample film at each magnetization state**