

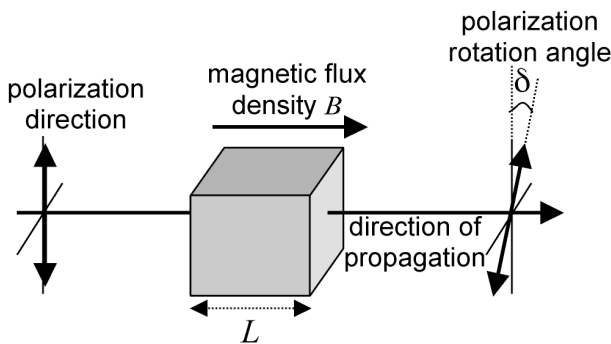
Abstract Linearly polarized light propagating through an ionized region with a nonzero component of the magnetic field parallel to the direction of propagation experiences a rotation of the polarization plane due to the Faraday effect. Accurate measurement of the polarization rotation angle can provide information on electron density and discharge current. A proof-of-principle experiment was performed, in which the rotation of the polarization plane of a linearly polarized laser beam propagating through the immediate vicinity of an impulse discharge in air was measured. A rotation angle of approximately 0.5 degrees was obtained for a peak current of 4 kA.

1. はじめに

本研究ではファラデー効果を用いた雷放電の遠隔計測を目指している。ファラデー効果による偏光面の回転は高精度の偏光ライダーによって捉えられると考えられる。これまでに、雷放電モデルに基づく理論解析を行い、雷放電によって生じる偏光面回転角は1°未満と非常に小さいことを明らかにし^[1]、これを検出するのに必要な30dB以上の偏光測定精度を有する偏光ライダーの設計を行ってきた^[2]。本報告では雷放電を模擬した大気中インパルス放電を対象とした偏光面回転角の測定実験について述べる。

2. 測定原理

直線偏光した光が電離気体（プラズマ）中を伝搬する際に、伝搬方向に沿って磁界成分が存在すると、偏光面はファラデー効果によって回転する。これは式(1)で与えられる左廻りと右廻りの円偏光成分の屈折率 n_{\pm} が異なることに起因する。ここで、 ω_{pe} , ω_{ce} はプラズマ周波数とサイクロトロン周波数、 e と m_e は電子電荷と質量、 ϵ_0 は誘電率、 B は光の伝搬方向における磁束密度の成分である。電離空間が距離 $L=L_1-L_2$ において存在すると、偏光回転角 δ は式(2)によって与えられる。ここで λ は伝搬光の波長であり、数値はMKS単位系 ($L[m]$, $\lambda[m]$, $n_e[m^{-3}]$, $B[T]$) の場合である。偏光面回転を図1に模式的に示す。



$$n_{\pm} = \left(1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \frac{\omega}{\omega \pm \omega_{ce}} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(1)$$

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}} \quad \omega_{ce} = \frac{eB}{m_e}$$

$$\delta = \frac{\pi}{\lambda} \int_{L_1}^{L_2} (n_+ - n_-) dl \dots\dots\dots(2)$$

$$= 2.62 \times 10^{-13} \lambda^2 \int_{L_1}^{L_2} n_e B dl$$

Fig. 1. Rotation of polarization plane by the Faraday effect

3. 実験構成

大気中インパルス放電に伴う伝搬光の偏光回転角の測定に用いた実験装置を図2に示す。高圧電極と接地電極間の距離（ギャップ長）は1mとし、インパルス電圧発生器によって発生させた波頭長1 μ s、波尾長40 μ s、正極性又は負極性の雷インパルス電圧を高圧電極に印加して火花放電を発生させた。インパルス電圧印加時に絶縁破壊を確実に起こすために、印加電圧を50%破壊電圧（絶縁破壊が約50%の確率で起きる電圧）の約2倍とした。連続発振Nd:YAGレーザ（波長532nm、最大出力150mW）の出力光をギャップに対して垂直な方向（水平方向）で接地電極の上方約0.3mを通過させ、レーザ光の初期偏光角を偏光子によって設定した。ギャップを通過したレーザ光の相互直交成分はビームスプリッタによって分離し、フォトダイオードで個別に計測した。レーザと放電ギャップの距離、および放電ギャップと光検出系の距離は共に10m前後であった。また、火花放電に伴う強烈な発光がフォトダイオードに入らないように、ビームスプリッタの上流側に中心波長532nm、半値全幅1nmの干渉フィルタを挿入した。放電電流はログルスキーコイルによって同時に測定し、放電経路はズームレンズとCCDカメラを用いて画像化した。

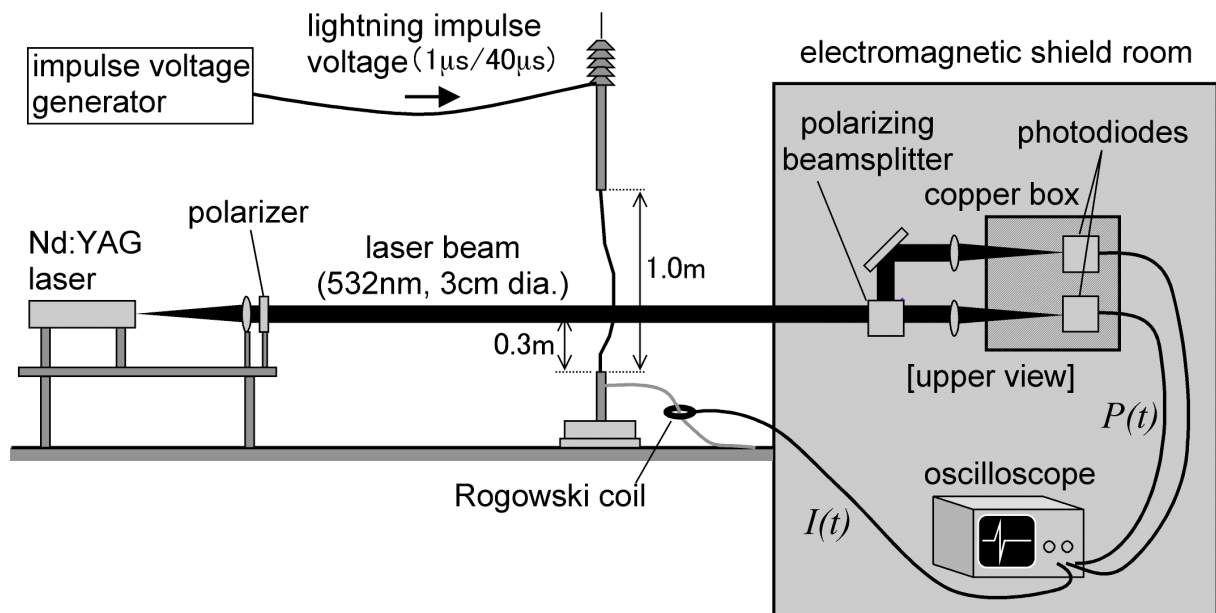


Fig. 2 Experimental arrangement for measuring the rotation angle of a propagating beam due to an impulse discharge in air

放電なしの状態におけるレーザ光の偏光方向は二つの直交偏光成分が等しくなるように設定した。つまり、二つのフォトダイオードによって検出される偏光方向に対して45°の方向となるように設定した。この場合、放電時における直交偏光成分の強度 I_1 、 I_2 は式(3)によって与えられるため、放電に伴う偏光面回転角 δ は式(4)によって求まる。

$$I_1 = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{4} + \delta\right) \dots\dots\dots(3)$$

$$I_2 = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{4} + \delta\right)$$

$$\delta = \tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{I_2}{I_1}}\right) - \frac{\pi}{4} \dots\dots\dots(4)$$

測定された強度値は時間とともに変化するため、式(4)から偏光面回転角が放電開始からの時間の関数として求まる。

4. 実験結果

レーザー光の初期偏光方向は二つのフォトダイオードの出力が4.0Vで等しくなるように設定した。放電発生時における二つフォトダイオードの出力の差分信号 ($=I_1-I_2$) を図3に示す。偏光面回転がない場合、差分信号は0となる。また、放電経路の画像を図4に示す。図4の画像は放電なしで得られた背景画像、放電発光画像、ギャップ位置に紙を挿入して得られたレーザー光のスポットの画像を合成したものであり、図3中の波形A~Dは図4中の画像A~Dに対応する。

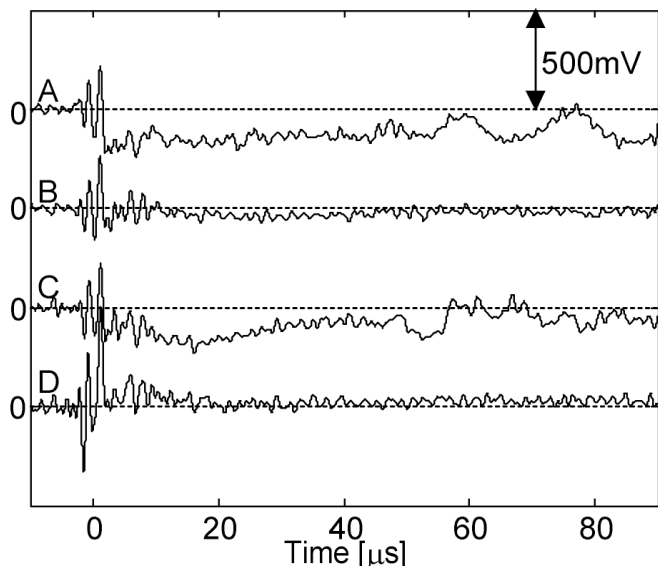


Fig. 3 Differential amplitude of the photodiode outputs obtained for four different shots (deviation from 0 indicates rotation of the polarization plane)

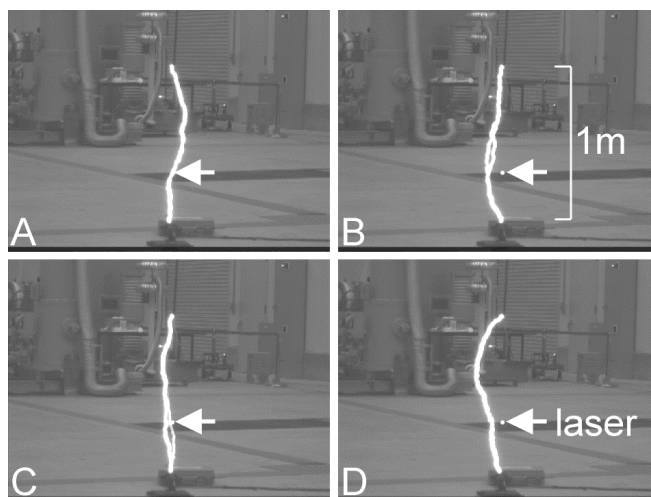


Fig. 4 Path of impulse discharge in air, relative to the position of the laser beam (the images A~D correspond to the waveforms A~D in Fig. 3)

図3の波形と図4の画像を比較すると、レーザー光が放電経路と交叉した場合、又は放電の至近を通過した場合 (A, C) のみ差分信号が現れ、放電から数cmの距離を通過した場合 (B, D) は差分信号が現れないことが分かる。この結果は、ファラデー効果がレーザー光が電離された領域を通過した場合のみ作用することから妥当である。放電経路から数cm離れた場所では電離度が殆ど0であるため、偏光面の回転は起らない。また、放電に伴う衝撃波などの中性粒子密度変化は直交偏光成分に同等に作用することから、偏光成分比には影響を及ぼさず、偏光面回転には寄与しないことを確認している^[3]。

図3に示した結果から偏光面回転角を概算した。図3の波形A, Cの振幅は放電開始 (時間0) の約15 μ s後において $I_1=3.925V$, $I_2=4.075V$ であった。初期設定で振幅は4.0Vとなっていたため、偏光面回転角は式(4)から $\delta=0.54^\circ=9.4\text{mrad}$ となった。これまでに、放電電流2.1kAにおける偏光面回転角は理論解析では約0.2 $^\circ$ と見積もられ^[1]、放電実験では0.29 $^\circ$ を得ている^[4]。本実験における最大電流値は約4kAであったため、偏光面回転角は約0.4~0.6 $^\circ$ になると推測され、測定値0.54 $^\circ$ は妥当であると考えられる。

また、電流値を $I=4\text{kA}$ 、放電からの距離を $r=1\text{mm}$ とした場合の磁束密度は $B=\mu_0 I/2\pi r=0.8\text{T}$ となる。相互作用長を $L=1\text{cm}$ すると、式(2)から平均電子密度 $n_e=1.6\times 10^{25}\text{m}^{-3}$ が得られる。これは平均電離度60%に相当するが、放電経路内においては殆ど完全電離が起こっていると仮定すると妥当な値である。

5. まとめ

大気中インパルス放電に伴うレーザ伝搬光の偏光面回転角を測定し，最大電流値 4kA において回転角 0.54° を得た。これを基に算出した平均電子密度は大気密度の約 60% となったが，電子密度をより正確に測定するには放電経路とレーザ光の距離をより正確に測定する必要がある。

今後は高精度偏光ライダーを用いて雷放電の観測を試みる予定である。

参考文献

- [1] 椎名達雄，本田捷夫，福地哲生：「大気中高電圧放電下における伝搬光偏光面回転角の評価」，電気学会論文誌 A, Vol.127, No.4, pp.187-192 (2007)
- [2] 椎名達雄，宮本正和，本田捷夫，福地哲生，野口和夫：「雷検知を目的としたインライン型ライダーシステムの開発 -計測原理とシステム設計-」，第 25 回レーザセンシングシンポジウム講演論文集，pp.137-140 (2007)
- [3] T. Shiina, T. Honda, and T. Fukuchi, "Optical measurement of high-voltage discharge in air for lidar lightning detection", *Proceedings of APLS 2008 (6th Asia-Pacific Laser Symposium)*, p.157, Nagoya, Japan (2008)
- [4] 椎名達雄，本田捷夫，福地哲生：「電離大気中放電下における伝搬光偏光面回転角の測定」，電気学会論文誌 A, Vol.128, No.7, pp.478-482 (2008)