ポッケルス光導波路反射型電界センサ

学生員 高 橋 紹 大 (東京大)

正 員 日 高 邦 彦 (東京大)

正 員 河 野 照 哉 (工学院大)

Pockels Optical-waveguide Reflecting Sensor for Electric Field Measurement

Tsuguhiro Takahashi, student member, Kunihiko Hidaka, member (The University of Tokyo)
and Teruya Kouno, member (Kougakuin University)

キーワード: 電界, センサ, ポッケルス, 光導波路, 誘電体ミラー

1. はじめに

ポッケルス効果を利用する電界センサは, 光応用測定法であることから種々の利点を持ち⁽¹⁾, 送電線や電力機器近傍の商用周波から数 10MHz 成分を持つ過渡電界の直接測定に有力である。センサの位置分解能の向上を図るという観点から, 著者らは光導波路技術を利用した小型センサの開発を行ってきた⁽²⁾が, 今回幅 7 μ m, 長さ 1mm で, 一端に誘電体ミラーを持つ LiNbO₃ 導波路を用いた反射型センサの開発を始めた。このセンサは従来のものに比べ, 次のような利点を有する。1) 光ファイバが導波路の片端のみに接続されるため, 測定時の操作性に優れる, 2) 伝搬光は導波路を往復するため, 実質的な導波路長は 2 倍となり, 電界感度が向上する, 3) 導波路に定偏波ファイバを 1 本接続するのみという簡潔な構造で, 波長板等の光学部品の接着は不要である, 4) 光学アライメントは, 導波路へのファイバの接続一箇所のみで, 組立の信頼性が向上する。

2. 測定原理

詳しくは参考文献⁽²⁾に譲るが, 基本的には導波路内に独立に存在する 2 つのモード, TE モードと TM モード (正確には E_{pq}^x モードと E_{pq}^y モード, あるいは TE-like モードと TM-like モード⁽³⁾) の間の干渉を利用して測定を行う。導波路に両モードを等しく励振すると, おのおの異なるモード屈折率で伝搬し, 導波路の出口である位相差 Γ が生じる。この Γ はポッケルス効果により, 印加電界に比例して変化する。導波路の出口で両モードを等しく取り出し干渉させると, 光出力 P_{out} は導波路への全入射光パワー P_{in} を用いて,

図 1 反射型センサの構成

Fig. 1. Schematic diagram of reflecting sensor

$$P_{out} = \frac{1}{2}(1 + \cos \Gamma) \cdot P_{in} \dots \dots \dots (1)$$

と表される。光検出器で光電変換すると P_{out} に比例した電気信号が得られるので, 最終的な電気信号から (1) 式を通じ, Γ , つまり印加電界を知ることができる。

3. 反射型センサ

これまでの導波路センサはすべて導波路の両端にファイバが接続されていたため, 測定空間へある一方向から挿入したい場合不便であった。そこで導波路の一端に誘電体多層膜によるミラーを形成し, ファイバは導波路の片側のみに接続し, 伝搬光の入出力を兼ねる, という構造のセンサの開発を行った。

図 2 反射型センサの写真

Fig. 2. Picture of reflecting sensor

反射型センサの構成を図 1 に示す。使用した導波路は幅 $7\mu\text{m}$ 、深さ $3\mu\text{m}$ 、長さ 1mm の y カット z 伝搬 LiNbO_3 導波路で、導波路基板は $1 \times 3 \times 0.5\text{mm}^3$ 、全体は $10 \times 3 \times 1\text{mm}^3$ のガラス板上に固定されている。センサの写真を図 2 に示す。このセンサで測定される電界は図 1 中の y 方向成分のみである。

光源 (波長 $1.3\mu\text{m}$ の LD) からの光は光カプラで 2 つに分岐し、その一方が導波路に入射、導波路内を伝搬後誘電体ミラーで反射し、導波路を逆向きに伝搬、再びファイバに戻り、さらに光カプラによって半分が光検出器 (PD) に導かれる。光カプラも含め、使用されているファイバはすべて定偏波ファイバであり、導波路への入射光は、ファイバの途中で接着固定された超小型偏光子 (厚さ $30\mu\text{m}$ 、消光比 55dB 以上) と定偏波ファイバによって結晶の x, y 軸に対して 45 度の傾きを持つ直線偏光となり、導波路内に TE, TM 両モードを同位相、同振幅で励振する。また導波路からの出射光は両モード間の位相差によってある楕円偏光となるが、上述の超小型偏光子によって入射光と同じ方向の成分のみ取り出されるので、両モードは等しく取り出され、干渉させられることになる。

このセンサでは、伝搬光は導波路を往復するため、導波路を実質 2mm 伝搬し、両モード間には導波路形状に起因する複屈折により印加電界が 0 のときに 40 度の位相差が存在している。従ってセンサからの出力光強度 P_{out} は、(1) 式で $\Gamma=40$ 度の光学的バイアス値を中心に電界に応じて変化することになる。このとき 40 度を中心とした Γ の変化が小さければ、(1) 式の P_{out} および光電変換された後の電気信号出力は Γ に対して直線的に変化する。従って印加電界がある範囲内では、電界と出力との間に近似的な直線関係が得られる。

この反射型センサを電極で挟み、電圧を印加して図 1 の y 方向に平等電界を作り、交流および立ち上がりが約 10ns のステップ電界に対する特性を調べた。ステップ応答波形を図 3 に、また印加交流電界波高値に対するセンサ出力波高値、すなわち交流感度特性を図 4 に示す。波形の比較は印加電圧波形と行い、また図 4 の横軸は、使用した電極

図 3 反射型センサのステップ応答波形

Fig. 3. Output signal for applied step voltage

図 4 反射型センサの交流感度特性

Fig. 4. Relation between output of sensor and applied AC electric field

形状についての電荷重畳法による電界計算をもとに、導波路への印加電界値に換算されている。図 3 でセンサ出力波形の、振動成分は光源の不安定性によるもので、また立ち上がりは約 200ns であったが、これは光検出回路の周波数特性に起因していることを確認した。図 4 より約 5kV/cm までの範囲では印加電界に対するセンサ出力の直線性が確認できる。また数値計算より、約 8kV/cm までは、直線性からの偏差 5% 以下で測定できるという結果が得られている。最低感度は、光源の強度変化 (ノイズ) に依存するが、現在 100V/cm 程度である。

今後は S/N 比の向上を考え、導波路の最適設計や戻り光の除去による光源の安定化、光源に変調をかける等の信号処理などを行っていく予定である。

(平成 7 年 7 月 31 日受付)

文 献

- (1) 日高・高田: 電学論 A, **111**, pp.1-8 (平 3-1)
 - (2) 高橋・日高・河野: 電学論 B, **114**, pp.26-32 (平 6-1)
 - (3) 西原・春名・柘原: 「光集積回路」, オーム社, 2 章 (1985)
- 高橋紹大 (学生員) 1967 年 10 月 7 日生。1991 年 3 月東京大学工学部電気工学科卒業。1993 年 3 月同大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年 4 月より同大学院博士課程在学中。1992 年電気学会論文発表賞受賞。
- 日高邦彦 (正員) 1953 年 4 月 27 日生。1976 年 3 月東京大学工学部電気工学科卒業。現在東京大学工学部電気工学科助教授。工学博士。
- 河野照哉 (正員) 1934 年 6 月 21 日生。1957 年 3 月東京大学工学部電気工学科卒業。1979 年東京大学工学部教授。1995 年 4 月, 工学院大学工学部電気工学科教授。工学博士。