

# 光ヘテロダイン検出方式

Optical Heterodyne Detection System

藤井 陽一\*

Yoichi FUJII

光ヘテロダイン検出方式の概略を説明し、かつ、この検出方式を光ファイバ通信に適用する際の諸問題、すなわち、単一偏波ファイバ、および、光ヘテロダイン検出器用方向性結合器についてのべる

## 1. はじめに

信号光と局発光との差周波数を検出する光検出方式である光ヘテロダイン検出方式は、すでに各方面に応用されつつある。この光検出方式は、

- a) 中間周波数増幅器の帯域を任意に狭くすることにより、極めて高分解能の分光、あるいは、光回路素子の周波数特性を測定する光回路アナライザ等に応用できる。
- b) 発振周波数を掃引できる光源を応用して、上記a)が実現できる。
- c) 局発光のスペクトル幅、周波数安定性に対する要求がきびしい。
- d) 帯域を狭くすると、受信電力も比例して減少し高感度の検出ができない、という欠点がある。このc)、d)は本質的な問題であって解決はできないが、
- e) 信号光、局発光同志の空間位相分布と偏波を光検出器上で一致させる必要がある。この解決法として、次の方法がある。

## 2. 単一モード光ガイド・光ファイバの応用

同じ単一モードで、信号、局発光が入射してくるときは、当然、偏波、電磁界分布も同一であるから、上記の困難がない。誘電体光ガイド、あるいは特別な楕円に近い断面の光ファイバ(写真1参照)を用いると、偏波をふくめた単一モードでの光の伝送が可能である。<sup>5)</sup>

我々は、このような単一偏波モードの光ガイドの、機械的な変形による偏波の安定性を計算したが、それによると、

- α) 一次的には、進行方向を軸とする、ねじれが最も大きい影響を及ぼす。この程度は、伝送モードと最も近い他のモード(通常は直交偏波モード)

との伝搬定数差(平面波の場合は複屈折)  $|\beta_o - \beta_e|$  に比例して、偏波の安定度(伝送モード電力/総合モード電力)が増加する。すなわち、

$$\text{偏波安定度} \propto |\beta_o - \beta_e|/\theta \quad (1)$$

である<sup>1)</sup>  $\theta$  は、軸方向単位長さあたりのねじれの角度で、ねじれがつよいほど  $\theta$  は大きい。したがって、なるべく偏平なガイド、あるいは適当な屈折率分布により、等価的に偏平となるような光ガイド、光ファイバを製作することが必要である。

### β) 光進行方向に垂直な軸のまわりの曲げ

曲げの曲率半径  $R$  が10cmの程度より小さくなると、 $R^{-2}$  に比例する複屈折を生ずることが理論的、実験的にあきらかにされている。ヘテロダイン検波用としては、不規則に変動する曲げが生じないようにする必要がある。

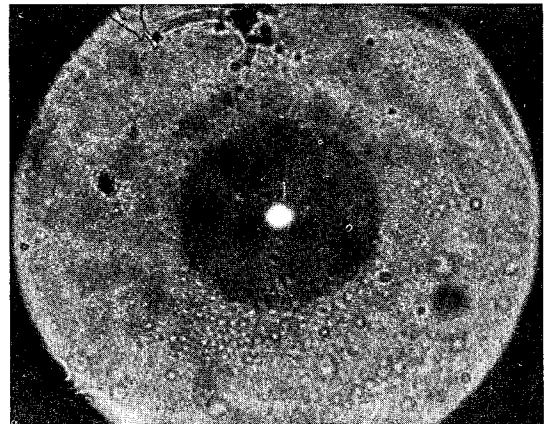


写真1 楕円形断面のコアを有する光ファイバの断面図。中央白い部分がコア。

\* 東京大学生産技術研究所 第3部

r) 機械的変形・音響光学効果

単純な幾何学的寸法の変化に対しては大きな変化を生じない。しかし、円形断面ファイバについては、音響光学効果によって、偏波面の変動を生ずる。

3. 光ヘテロダイン検出用方向性結合器の問題

上記のような光ファイバあるいは光ガイドを用いて、光ヘテロダイン検波を実現するためには、局発光を結合する方向性結合器と、光検出器が必要である。

- A) 光ガイド、光ファイバの方向性結合器は、いくつかの種類のもが開発されている。大別して、分布結合形、半透明鏡形のものがある。光ヘテロダイン検波用としては、結合比が小さくてもよいので、設計は容易である。光検出器との結合、デバイスの小形化、入力との結合の点からは、反射鏡形が有利であると考えられている。
- B) 光検出器については、通常のフォトダイオード、APD、光電子増倍管が、目的に応じて使用できるが、将来は、方向性結合器とモノリシック化したものが開発されることが望ましい。

4. コヒーレント空間波同志の光ヘテロダイン検波

信号、局発光がそれぞれコヒーレントな空間波であるときは、光検出器上での光の位相分布が問題である。すなわち、光ヘテロダイン出力  $I_{out}$  は、

$$I_{out} = K \int_{S_D} a_s(r, \omega_s) e^{i\phi_s(r)} \cdot a_L(r, \omega_L) e^{i\phi_L(r)} \cdot d^2r \quad (2)$$

ただし、 $K$  は光検出器定数、 $a_s, a_L$  は信号、局発光の振幅分布、 $\phi_s, \phi_L$  は位相分布である。そうすると、 $\phi_s(r) - \phi_L(r)$  が一定でないとう出力がうちけされて出ない。したがって、光源が点であると、鋭い空間分解能をもつことになり、我々はこれを光ヘテロダイン・レーザ顕微鏡として応用している。

5. インコヒーレント空間波のヘテロダイン検波

局発光は、コヒーレントで、位相分布が一定でも、信号光がインコヒーレントで、空間的にもランダムな位相をもっている場合は、その空間コヒーレンスによってヘテロダイン出力が異なる。<sup>2)</sup> いま、ヘテロダイン振幅  $h(r, t)$  を次のように定義する。

$$h(r, t) = a_s(r, t) a_L(r) e^{i\omega t} \quad (3)$$

ここで、 $a_s, a_L$  は信号、局発光の振幅である。いま、光検出器上の2つの点  $r_1, r_2$  でのヘテロダイン振幅  $h$  の相関関数を次のように定義する。

$$C(r_1, r_2) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T h(r_1, t) h(r_2, t) dt \quad (4)$$

そのとき、ヘテロダイン出力  $I_{out}$  は、

$$I_{out} = K \int_{S_D} \int_{S_D} C(r_1, r_2) d^2r_1 d^2r_2 \quad (5)$$

となる。インコヒーレント信号光の空間的相関距離が、きわめてみじかいと、 $C(r_1, r_2)$  は、光検出器面上の位置にかかわらず一定値となり、ヘテロダイン出力  $I_{out}$  は、信号、局発全電力を  $P_s, P_L$  として、

$$I_{out} = K P_s P_L \quad (6)$$

となる。すなわち、完全にインコヒーレントである熱放射などの光に対しては、位相面整合にかかわらず、ヘテロダイン出力が得られるということである。これは、熱放射のラジオメータや<sup>2)</sup> 白色光を光源とする光回路アナライザにとって重要な関係である。

6. ヘテロダイン光検出器の問題

光ヘテロダイン用の検出器としての、特別な要求はない。一般の直接検出方式の場合と同じく、高量子効率、高応答速度が必要である。ヘテロダイン検波の場合は、しかし、局発光と結合させる方向性結合器といかに結合させるかが問題である。

- a) 空間波の場合は、半透明鏡、グレーティングの回折光を用いるもの。
- b) 導波光のときは、光導波形の方向性結合器が必要である。a) 項のグレーティング方式は、PIN フォトダイオード上に直接グレーティングを作製することにより、次のようにデバイスを簡略化できる。<sup>3)</sup>

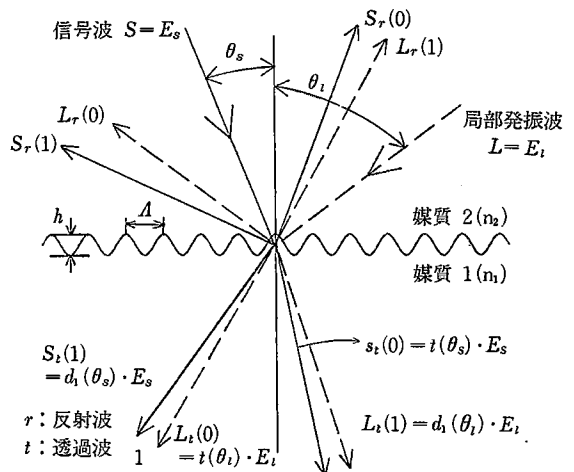


図1 回折格子による光混合の原理図

7. グレーティングを応用した一体化光ヘテロダイン検出器

光ヘテロダイン検出においては、S波とL波の波面を検出器内において合わせなければならない。このため、従来は主として、半透明鏡など方向性結合器が用いられてきた。いま、図1のように振幅  $h$ 、周期への正弦波状回折格子を検出器上につくり、波長がほぼ  $\lambda$  のS波 ( $i=S$ )と波長が  $\lambda$  のL波 ( $i=L$ )を  $\theta_i$ の角度で入れたとする。このとき、透過側の  $m$  次回折波  $S_i(m)$ 、 $L_i(m)$  は検出器内で、 $\sin^{-1}\{(m\lambda/A - n_2 \times \sin \theta_i/n_1)\}$ の方向に現れる。簡単のために、適当な  $\lambda/A$  を選び回折を0次と1次に限定したとする。いま、 $\theta_o$  と  $\theta_s$  とを適切に選べば、透過側において、0次回折波  $L_i(0)$  と1次回折波  $S_i(1)$ の波面を、また、 $L_i(1)$ と  $S_i(0)$ の波面を合わせることができる。そのための条件は、波数保存を考察にした計算により求められ、

$$\sin \theta_s + \sin \theta_l = \lambda/A \tag{7}$$

で与えられる。

次に、上記条件でのヘテロダイン出力を求める。S波の電界を  $E_s \exp(\omega + \omega_s)t$  ( $\omega = 2\pi f$ ,  $\omega_s$  : 検出すべき

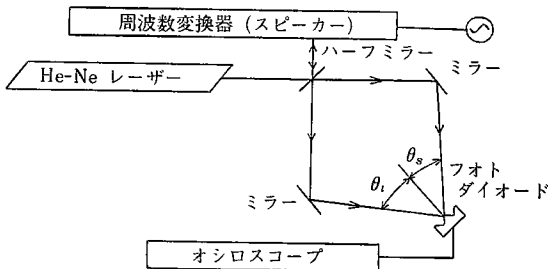


図2 ヘテロダイン検出系の構成

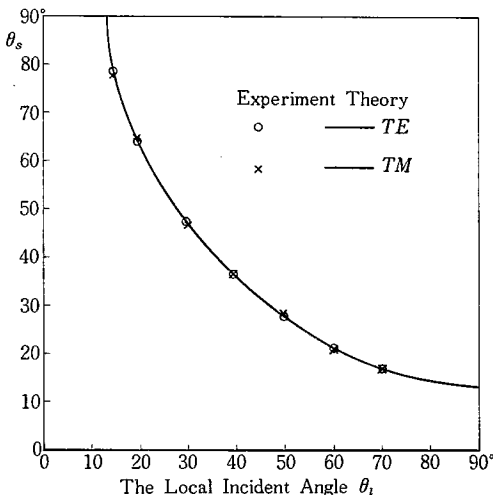


図3 S波、L波入射角間関係 (式(7)参照)

角周波数), L波の電界を  $E_l \exp j\omega t$ と表し、0次と1次透過回折波の電界の透過率を、それぞれ  $t(\theta)$ 、 $d_1(\theta)$ とすれば、図1の①と②の混合波による検出電波をあわせた光ヘテロダイン検出電波は、

$$i_s = 2\alpha K E_s E_l \exp j\omega_s t \tag{8}$$

ここで  $K = t(\theta_s)d_1(\theta_o) + t(\theta_o)d_1(\theta_s)$

$\alpha$  = 量子効率を含んだ係数

となる。上式の  $K$  を求めるには、通常複雑な回折効率の計算を要するが、ここでは  $\sigma (= 2\pi h/\lambda) < 1$  なる条件で求める。  $\sigma$  に関する級数展開で、1次の項まで考えると、 $t$  は従来の透過率の式となり、または  $d_1$  は Tomlinson 等<sup>4)</sup>の式で与えられている。ただし、後者の式は、回折効率と  $\Delta$  が1より十分小さく、かつ  $h < A/2\pi \tan \theta$  なる条件下でのみ有効である。  $K$  は、入射波がTE波よりTM波である時の方が大きいことがわかる。

$S_i$  フォトダイオード (浜松テレビ製 S876-1010BA) の石英コーティング (厚さ 0.3mm) 上に、フォトレジ (Az-1350) の薄膜 (0.3  $\mu\text{m}$ ) を塗布した後、He-Cd レーザー (442nm) の干渉露光法により、 $A = 514\text{nm}$  の格子を作成した。1次の反射回折効率の測定と理論値との比較から  $\Delta \approx 0.5$  を与えた。

図2のように、He-Neレーザーの633nmビームをハーフミラーで分割し、一方をL波とし、他方を周波数変換器を通した後にS波とした。ミラーの調整により入射角をさまざまな値に設定した上で、S波とL波を検出器上の同一地点に入射させた。ヘテロダイン出力はオシロスコープで観測した。

$\theta_l$  を変えたとき、光ヘテロダイン出力が最大となる  $\theta_s$  の値を測定した。図3に示す測定結果は、式(8)から求められた理論値と良好な一致を示しており、本方式の可能性が実証された。なお  $\theta_s$  の半値幅は約5分である。

回折効率の計算において、石英コーティング  $S_i$  界面での反射や  $S_i$  での光吸収を考慮すればよりよい一致がえられると考えられる。

8. おわりに

以上のべてきたように、光ヘテロダイン検出方式を、各方面に応用する上で、本質的な特性の把握と、それを実現するためのデバイス、とくに導波形のデバイスの開発が急務であると考えられる。

ここへのべた計算、あるいは、デバイスは、我々の研究室において継続的に行われている。光ヘテロダイン検出方式に関する研究のそれぞれの一環をなすものであり今後もひきつづき、この分野の研究を行い、この分野の進歩に貢献したいと考えている。これについてご叱正いただければ幸いです。

日頃ご示唆，ご討論いただく斎藤成文名誉教授，本所  
浜崎教授，榊助教授，荒川講師，研究の一部を担当され  
た元大学院生，山下純一郎氏，佐野浩一氏，三沢雅芳氏  
に深謝する。

(1980年12月25日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) Y. Fujii and K. Sano "Polarization Coupling in Twisted Elliptical Optical Fiber"; Appl. Opt., Vol. 19, No. 15; pp. 2602~2605; Aug. 1, 1980
- 2) Y. Fujii, J. Yamashita S. Shikata and S. Sano, "Incoherent Optical Heterodyne Detection and Its Application to Air Pollution Detection, Appl. Opt.; Vol. 17, No. 21 pp. 3444~3449, Nov. 1, 1978
- 3) 榊 裕之, 三沢雅芳, 藤井陽一 "光学格子を用いた一体化光ヘテロダイン検出器" 信学誌; Vol. 63・C, No. 10; pp. 710~711; Oct., 1980
- 4) W. J. Thomlinson et al; "Scattering Efficiency of High-Periodicity Pielectric Gratings, J. Opt. Soc. Am; Vol. 63, No. 6 pp. 685~688, Jun 1973.
- 5) 藤井陽一, 佐野浩一, "だ円断面ファイバの偏波伝送特性" ; 信学誌; Vol 63 - C, No. 8 pp. 471~477; aug., 1980

