

相互作用長変化法によるフォトリフラクティブ二光波混合結合係数の測定

Measurement of Photorefractive Two-Wave Mixing Coupling Coefficient Using Varying Interaction Length Method

岡村 秀樹*・志村 努*・伊藤 雅英*・黒田 和男*・小倉 馨夫**
 Hideki OKAMURA, Tsutomu SHIMURA, Masahide ITOH, Kazuo KURODA and Iwao OGURA

1. はじめに

フォトリフラクティブ効果は深い不純物準位をもつ電気光学結晶に特有の現象で代表的な結晶としてはBaTiO₃やLiNbO₃などの強誘電性結晶やBSOなどの常誘電性結晶, GaAsなどの半導体がある。そのような結晶に光を照射し干渉縞を作ると, その光強度の分布に応じてキャリアが光励起され密度分布ができる。それが拡散あるいはドリフトによって電荷分布となりそれによる電界が電気光学効果によって屈折率分布を引き起こす。これらの結晶はリアルタイムホログラムの応用にとどまらず二光波混合による光の増幅, 四光波混合による位相共役波発生などさまざまな利用法があり, 光情報処理などで重要な役割を果たす可能性を期待されている。

二光波混合は最も基礎的な現象であり, その結合係数の測定によってフォトリフラクティブ中心のキャリア密度など結晶の評価に必要な基礎的なパラメータを得ることができる。二光波混合結合係数はFig. 1のように結晶にシグナル波とポンプ波を入射し, ポンプ波を入射したときとしなかったときのシグナル波の出力比を測ることによって測定できる。二光波混合は以下の結合波方程式によって表わせる¹⁾。

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} I_1(x) = \Gamma \frac{I_1(x) I_2(x)}{I_1(x) + I_2(x)} - \alpha I_1(x) \\ \frac{d}{dx} I_2(x) = -\Gamma \frac{I_1(x) I_2(x)}{I_1(x) + I_2(x)} - \alpha I_2(x) \end{cases} \quad (1)$$

ここで I_1, I_2 はそれぞれシグナル波, ポンプ波の強度, Γ, α はそれぞれ結合係数と吸収係数である。これを解くと

$$I_1(x) = I_1(0) \frac{1+m}{m+e^{-\Gamma x}} e^{-\alpha x}, \quad (2)$$

が得られる。ここで入射強度比 $m = I_1(0)/I_2(0)$ とおいた。有効増幅率 g_0 を,

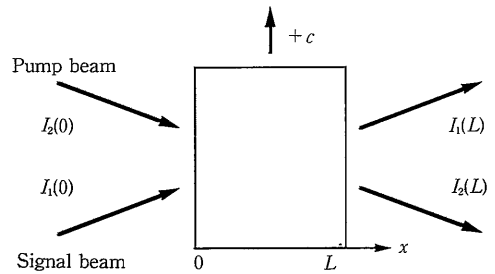


Fig. 1 二光波混合の配置図

$$g_0 = \frac{I_1(L) \text{ with pump beam}}{I_1(L) \text{ without pump beam}}, \quad (3)$$

と定義し, これを測定する。 L は結晶の長さである。すると結合係数 Γ は,

$$\Gamma = \frac{1}{L} \ln \frac{g_0}{1 - m - m g_0}, \quad (4)$$

によって求めることができる。今までの測定はこの方法で行われている²⁾ので本論文ではこの方法を従来法と呼ぶことにする。しかし従来法には次のような問題がある。
 [1]ビームの幅が有限であること,
 [2]ビームファニング (beam fanning)³⁾によるロス,
 [3]ビームが結晶内部で反射を繰り返して複数の相互作用が起きること,
 などである。われわれは再現性の良い安定した測定のできる方法を開発し, その信頼性を検討した。実験は代表的なフォトリフラクティブ結晶であるBaTiO₃について行った。

2. 方 法

[1]の問題は次のような事情によるものである。通常の二光波混合の理論(式(1))は2光波が無限に広がった平面波であると仮定している。しかし実際にはこのような状況で測定を行っているわけではない。シグナル波の出力光強度から結合係数を求める際, 相互作用長が正

*東京大学生産技術研究所 第1部

**千葉大学工学部

研究速報

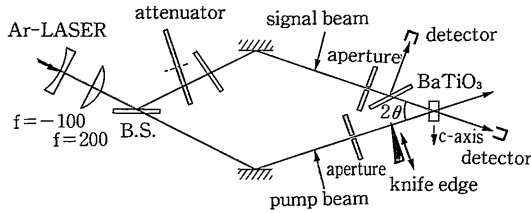


Fig. 2 二光波混合結合係数の測定系

射する。ポンプ波の方も1~3mmの開口を通して不要な部分をカットした後、マイクロメーターによって横方向に動かせるナイフエッジによって外側をカットされ、結晶に入射する。結晶はc軸が2光線の二等分線に垂直で、シグナル光が増幅されるような方向に置いてある。この配置で常光線を入射すると、有効電気光学定数は電気光学定数 γ_{13} と一致する。

サンプルは大きさは5×5×7mm、c軸は7mmの辺に平行である。測定時の気温は20°Cで、結晶前面でのポンプ波とシグナル波のそれぞれの強度は1W/cm²、40mW/cm²程度である。

測定の手順は以下のとおりである。マイクロメーターを動かしてポンプ光がわずかに入射するような状態にし、2本の光束が結晶の入口付近で交差するようにセットする。結晶前面を上下方向に傾けておくと結晶内での光束の反射波が重なるのを防ぐのに効果がある。そこから0.01~0.1mmの刻み幅でマイクロメーターを動かしてポンプ光の幅を太くしていきながらそのつど、出力を測定する。出力が安定するように10分程度置いてから測定を行った。出力が揺らぐ場合はピーク値を採用し、シグナル光を入射せずに測ったバックグラウンド光強度を差し引いた。(4)式あるいは(7)式を用いて Γx の値を求め、対応する相互作用長 x に対してプロットすると x が小さいときは直線になる。この傾きが結合係数 Γ の値そのものを与える。なお傾きをとるときにどの範囲を選ぶかによって誤差が生じるが実測の結果、この誤差は5%程度であることがわかった。

4. 結果

測定結果をFig. 3に示す。入射角 (Fig. 2における θ) について二光波混合結合係数 Γ の測定値をプロットした。四角い点が相互作用長変化法による測定値、黒い三角が従来法による測定値である。従来法で測定した値は相互作用長変化法で測定した値より小さくなっている。

5. 考察

相互作用長変化法で測定したデータをもとに最小自乗



Fig. 3 測定結果。横軸：入射角、縦軸：二光波混合結合係数。四角い点は相互作用長変化法による測定値。三角は従来法による測定値。

法でフィッティングして得たパラメーターをもとにした理論曲線をFig. 4に示す。この結果より有効トラップ密度 $5.6 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ が得られた。

γ_{13} で測定した場合にはビームファニングの影響はほとんどなく、問題なのはポンプ波の反射波による影響だけである。それならばその影響を補正することはできないだろうか？

そこでポンプ波の反射波を考慮した二光波混合を考える。ポンプ波とその反射波は互いに逆向きに進行するのでその結果生じる屈折率格子のピッチは波長の半分となる。このように小さい屈折率格子間隔ではこの結晶の場合、二光波混合によるエネルギーの移動はほとんど起きないとみなしてよいため反射波とシグナル波の結合は無視できる。よってシグナル波の光強度を表す式は、

$$\frac{d}{dx} I_1 = \Gamma \frac{I_1 I_2}{I_1 + I_2 + I_3} - \alpha I_1, \quad (10)$$

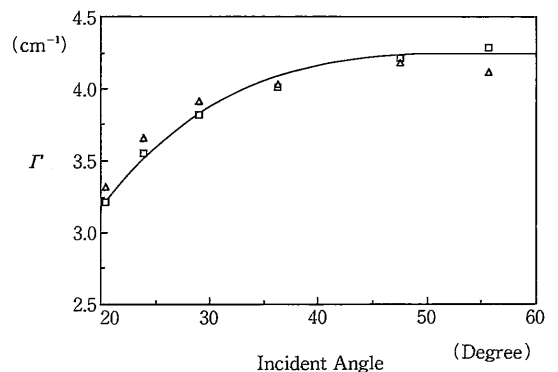


Fig. 4 相互作用長変化法による測定値(四角い点)に対してフィッティングを行った理論曲線。三角の点は従来法による測定値に補正を施したものの。

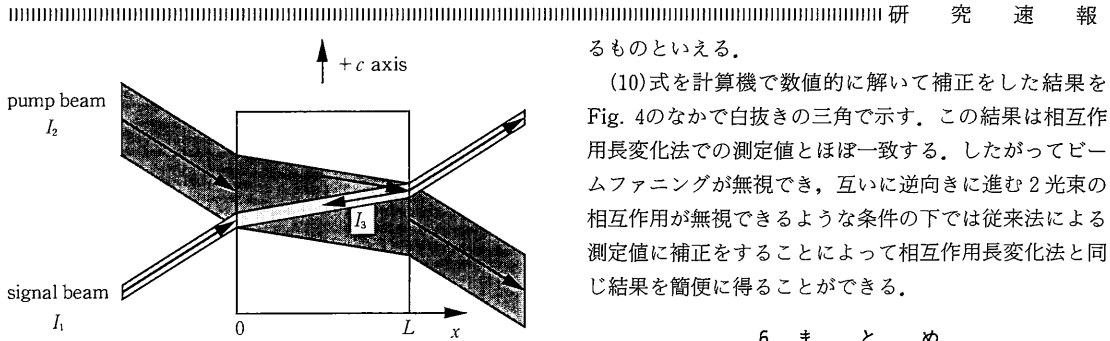


Fig. 5 結晶内の反射を考慮した二光波混合の配置図

となる。ただし I_3 はポンプ波の反射波の強度である (Fig. 5 参照)。シグナル波が結晶中のどの部分でもポンプ波に比べて弱いと仮定して、ポンプ波の相互作用による減衰 (depletion) を考えないことにする。すると I_2 , I_3 は次のようにおくことができる;

$$I_2(x) = I_{20}e^{-\alpha x}, \quad (11)$$

$$I_3(x) = I_{20}R e^{-2\alpha L + \alpha x}. \quad (12)$$

ここで R は結晶後面 ($x=L$) におけるエネルギー反射率である。ここで $I_1(x) \ll I_2(x)$ の場合を考えてみると (10) 式の分母の I_1 が無視できて解析的に積分でき、

$$I_1(L) = I_1(0) e^{(\Gamma - \alpha)L} \left(\frac{1 + R e^{-2\alpha L}}{1 + R} \right)^{\frac{\Gamma}{2\alpha}}, \quad (13)$$

となる。これは線形な増幅 $I_1(0) e^{\Gamma L}$ に補正係数がかかった形になっている。吸収 αL が 0 の極限を考えてみると、

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} I_1(L) = I_1(0) e^{\Gamma L} e^{-\frac{RL\Gamma}{1+R}} = I_1(0) e^{\frac{\Gamma L}{1+R}}, \quad (14)$$

となって実質的に Γ が $1/(1+R)$ に低下した形となっている。一方、ポンプ波、シグナル波間の二光波混合のもととなる干渉縞のモジュレーションはポンプ波の反射波が重なるために $1/(1+R)$ に低下しているはずであり、これは Γ の低下と同じ率である。したがって増幅率の低下はもとの干渉縞のモジュレーションの低下を反映してい

るものといえる。

(10) 式を計算機で数値的に解いて補正をした結果を Fig. 4 のなかで白抜き三角で示す。この結果は相互作用長変化法での測定値とほぼ一致する。したがってビームファニングが無視でき、互いに逆向きに進む 2 光束の相互作用が無視できるような条件の下では従来法による測定値に補正をすることによって相互作用長変化法と同じ結果を簡便に得ることができる。

6. ま と め

従来法の問題点を指摘した。ビームの幅による増幅率の変化を定量的に評価した。また、ビームファニングの影響を受けにくく、実験条件も緩くすむ相互作用長変化法を考案し、実際に BaTiO_3 を用いるような配置において BaTiO_3 の二光波混合結合係数を測定した。この結果従来法で得られた結果よりも実際に入射角 θ の大きい所にゲインのピークがあることがわかった。またビームファニングが無視でき、互いに逆方向に進むビームの相互作用が無視できる場合には反射波の影響を計算で差し引くことが可能であることを示した。

BaTiO_3 の場合は従来法による測定値から簡単な補正で相互作用長変化法による測定値に近い値を得ることができるが、相互作用長変化法はすべてのフォトリフレクティブ結晶の測定に適用可能でゲインが大きい場合や互いに逆向きに進むビームの相互作用が無視できないときにも適用できるためそのような補正ができない場合に有用であろう。 (1991年5月8日受理)

参 考 文 献

- 1) Pochi Yeh, IEEE J. Quantum Electron. 25. 484 (1989)
- 2) M.B. Klein and G.C. Valley, J. Appl. Phys. 57. 4901 (1985)
- 3) J. Feinberg, J. Opt. Soc. Am. 72. 46 (1982).
- 4) N.V. Kukhtarev, Sov. Tech. Phys. Lett. 2, 438 (1976)