

研究

BSO 単結晶中における異方性自己回折を用いた 光学的ロックイン検出

鄭 和 翊・伏 見 純・吉 見 隆 大・横 田 英 嗣

東海大学工学部光学工学科 〒259-12 平塚市北金目 1117

(1994年11月16日受付, 1995年4月27日受理)

Optical Lock-in Detection by Anisotropic Self-Diffraction in BSO Crystal

Kazuyoku TEI, Jun FUSHIMI, Takahiro YOSHIMI and Hideshi YOKOTA

Department of Electro-photo Optics, Faculty of Engineering, Tokai University,
1117, Kitakaname, Hiratsuka 259-12

(Received November 16, 1994; Accepted April 27, 1995)

In the process of anisotropic self-diffraction in photorefractive BSO ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) crystals the polarization of the diffracted reference beam can be orthogonal to that of the transmitted signal beam. In our experiments the diffracted reference beam was isolated from the transmitted signal beam by an analyzer with the signal-to-background ratio of 235. Using this technique an optical lock-in detection was realized for a phase modulated beam in the configuration of two-wave mixing. The function of band-pass filtering having the center frequency that is the same as the modulation frequency of the reference beam was also confirmed.

1. 序 論

フォトリフラクティブ単結晶 BSO ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) は高感度, 高速応答の実時間ホログラフィー材料として様々な分野に応用されている。しかし, この結晶は旋光性を有しているためにフォトリフラクティブグレーティングの書込み, 読出しの実行とその解析に複雑さを伴う。一般的に, グレーティングの読出しをする際, プローブ光の偏光状態の最適条件は旋光性と電気光学効果, さらにグレーティングの異方性を考慮した coupled wave equation^{1,2)} を解くことによって導かれる。

外部電界を印加しない場合, BSO 結晶内で回折された光波の偏光状態と透過プローブ光の偏光状態を直交させることができる。一方, 外部電界を印加した場合, 両光波の偏光状態を直交させることは厳密な意味では不可能である²⁾。

前者の関係は二光波混合における自己回折光と透過シグナル光についても成立し, 異方性自己回折 (anisotropic self-diffraction) として知られている³⁻⁷⁾。KNbO₃,

BaTiO₃ 等の異方性結晶における異方性自己回折^{6,7)} では自己回折光は入射二光波と異なる角度で回折するが, BSO や GaAs 等の等方性結晶では自己回折光を空間的に分離できないため, 検光子等を用いて分離する³⁻⁵⁾。

フォトリフラクティブ効果を利用した多くの応用は四光波混合による位相共振波の発生や, 書込み光とは異なる波長を用いたグレーティングの読出しを基本としている。これらにおいては対向する両ポンプ光の調整やブラッグ条件を満足すべく読出し光の調整を要求される。異方性自己回折を用いる上での大きな利点は光学系の簡素化にある。異方性自己回折では結晶に入射する二光波のうち的一方が読出し光となるため上記の調整を必要としない。このことはすでにホログラフィー干渉計^{3,4)} や photorefractive spatial light modulator; PSLM⁶⁾ に応用されている。

最近, 四光波混合を用いて光学的ロックイン検出が可能であることが Khoury らによって示されている⁸⁻¹¹⁾。Khoury らはこのことを利用して異なる周波数で変調された複数枚の画像信号の中から任意の1枚を選択的に抽

出できることを示した。この時結晶は乗算器と積分器の機能を合わせもった多機能素子と見なすことができる。

本研究は Khoury らによって提案された光学的ロックイン検出が BSO 結晶中における異方性自己回折を用いて実現できること、これを示すことを目的としている。

2. BSO 単結晶中における異方性自己回折

BSO 単結晶中に外部電界を印加しない場合の異方性自己回折について議論する。

Fig. 1(a)は本研究で使用した BSO の結晶配置である。結晶は 3 面 $(\bar{1}10)$, (110) , (001) が露出するようにカットし、光波は $(1\bar{1}0)$ 面より入射した。また結晶の $\langle 001 \rangle$ 軸と結晶中に書き込まれたグレーティングのグレーティングベクトル \mathbf{K}_G とは直交するようにした。この場合の屈折率変化は $\langle 001 \rangle$ 軸を挟んで $\pm 45^\circ$ 方向の x' , y' 軸方向の直線偏波に対して発生し、それらの絶対値は等しく符号が互いに反対である。

BSO の電気光学定数は KNbO_3 , BaTiO_3 等のフォトリフラクティブ結晶と比べて小さいためにグレーティング形成時に energy transfer の影響は無視できる。したがって、自己回折光を問題にする場合においてもグレーティングはすでに書き込まれているものとして取り扱う

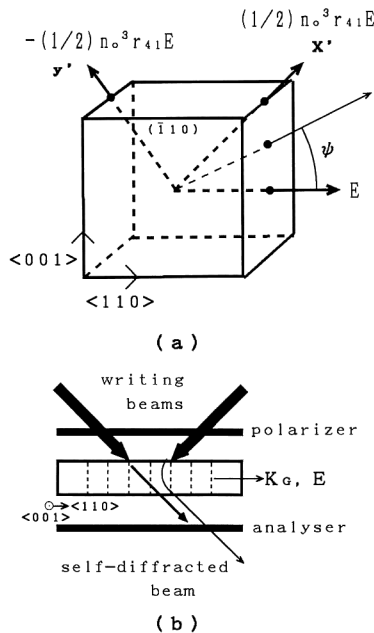


Fig. 1 Anisotropic self-diffraction in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystal. (a) crystal orientation, (b) self-diffraction process. E is the space-charge field and \mathbf{K}_G is the grating vector.

ことができる。ここで結晶に入射する二光波のうち一方はシグナル光、他方を参照光とし、その両光波の入射偏光状態は等しく直線偏光とする。

結晶に光学活性がないと仮定するとグレーティングは直線位相子の振舞いをするが³⁾これは結晶中のグレーティングが Fig. 1(a)に示したような異方性をもっているためである。参照光の一部は自己回折光として透過シグナル光の方向へ回折されるが、その偏光状態は異方性グレーティングの影響を受け変化する。一方、透過シグナル光はグレーティングの異方性の影響を受けないので偏光状態に変化はない。たとえば、入射参照光の直線偏光の方位角が異方性グレーティングの主軸 (x' 軸または y' 軸) に対して θ だけ傾いていたとすると、自己回折光の方位角は $-\theta$ となる。したがって結晶に入射する両光波の直線偏光の方位が $\langle 001 \rangle$ 軸に平行なとき、透過シグナル光と自己回折光の偏光状態は直交するため、検光子によって分離することができる (Fig. 1(b)参照)。

一方、結晶に光学活性が存在する場合には、シグナル光と参照光の直線偏光の方位が結晶の中心で $\langle 001 \rangle$ 軸と平行になるとき、透過シグナル光と自己回折光の偏光状態を直交させることができる^{3,4)}。

入射二光波の直線偏光の方位角 ψ に対する自己回折光強度の変化を測定した結果を Fig. 2 に示す。実験に用いた結晶の厚さは 2.3 mm である。光源には LD 励起 YAG レーザーの第二高調波 (532 nm) を用い、二光波の交差角は結晶の外で測って約 60° 、二光波の強度比は 0.2 であった。強度比は参照光強度に対するシグナル光強度の比と定義した。また、直線偏光の方位角 ψ は

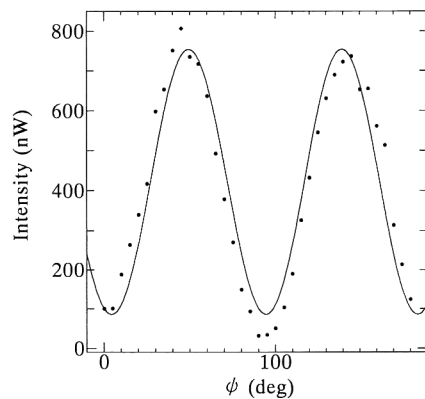


Fig. 2 Dependence of the self-diffracted light intensity on the azimuth ψ of two linearly polarized input waves. The azimuth ψ was measured from the $\langle 110 \rangle$ axis. (Solid line: curve fitting according to the square of sine function)

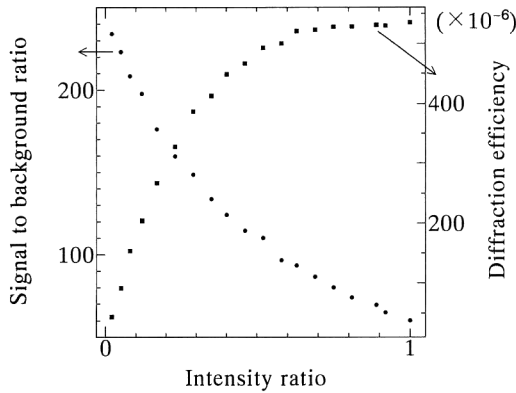


Fig. 3 Dependence of the signal-to-background ratio (●) and the diffraction efficiency (■) on the intensity ratio of signal wave to reference wave. The signal-to-background ratio was defined as the ratio of the self-diffracted reference to the residual transmitted signal.

$\langle 110 \rangle$ 軸に平行であるときを 0° , $\langle 001 \rangle$ 軸と平行であるときを 90° とした。BSO は Fig. 1 (b) に示すように偏光子と検光子によって挟まれているが、結晶に入射する二光波の直線偏光方向の方位角は偏光子によって定められ、検光子は常に透過シグナル光の偏光方向方位角と直交するよう設定した。波長 532 nm の光に対する BSO 光学活性は約 36°mm^{-1} で、これを考慮すると、光波が結晶の中心に達するまでに直線偏光方向の方位は約 41° 回転する。したがって、透過シグナル光と自己回折光の偏光状態を直交させるためには偏光子を 49° の方位角に設定すればよい。実験結果はこのことと良く一致している。ちなみに図中の実線は正弦関数の自乗でフィッティングをしたものである。

回折効率と信号対雑音比の変化を強度比に関して測定した結果を Fig. 3 に示す。回折効率は強度比が 1 のとき最大になり、強度比が増加するとともに単調に増加することを図は示している。また、横軸を干渉縞のコントラストの自乗にとると直線上にのりことも確認される。それとは逆に、信号対雑音比は強度比が増加するとともに単調に減少している。これらは強度比の増加に伴って回折光強度が増加する割合よりも洩れ光の増加の割合の方が大きいためである。ここで信号対雑音比は検光子から洩れ出てくる透過シグナル光強度に対する回折光強度として定義している。信号対雑音比の最大値は約 235 であり、これは Troth らの結果⁴⁾ の 3 倍程度の値に相当する。本研究で用いた偏光子と検光子は約 50 dB の消光比をもつが、結晶を間に置くとシグナル光は結晶内の

屈折率ゆらぎの影響を受けるために約 45 dB まで減少した。したがって結晶に屈折率ゆらぎがない理想的な場合の信号対雑音比は 700 以上であると見積もることができる。

3. 光学的ロックイン検出への応用

BSO 単結晶中における異方性自己回折の性質を利用することによって、自己回折光は大きな信号対雑音比 (約 24 dB) をもって取り出すことができた。これは四光波混合を用いた場合¹⁰⁾ よりも大きな値である。

本研究では両光波が位相変調を受けている場合^{8,10)} の光学的ロックイン検出について実験的に検証する。この節では、結晶が電子工学におけるロックインアンプと類似の応答を示し、ミキサとローパスフィルターの機能を同時に合わせもつこと、さらには結晶の応答時間が周波数帯域幅を決める時定数に相当することを示す。

フォトリラクティブ結晶内でグレーティングの形成されるまでの時定数を τ として定義し、またシグナル光と参照光は変調指数 μ_1, μ_2 , 変調角周波数 ω_1, ω_2 でそれぞれ位相変調をされ、これら変調角周波数には

$$\omega_1, \omega_2 \gg 2\pi/\tau \quad (1)$$

という関係が成り立っていると仮定する。これらの二光波が結晶内で交差することによって形成される space-charge field⁹⁾ は

$$E_{sc} \propto J_0(\mu_1)J_0(\mu_2) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_n(\mu_1)J_n(\mu_2)}{\tau^2(n^2\nu^2 + 1/\tau^2)} \cos(n\nu t + n\phi) \\ + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\nu J_n(\mu_1)J_n(\mu_2)}{\tau(n^2\nu^2 + 1/\tau^2)} \sin(n\nu t + n\phi) \quad (2)$$

$$\nu = \omega_1 - \omega_2 \quad (3)$$

となる。ただし、ここで ϕ は変調信号間の位相差、 $J_n(\mu)$ は n 次のベッセル関数である。

また BSO のような電気光学定数の小さな結晶における回折効率 η は

$$\eta \propto |E_{sc}|^2 \quad (4)$$

と置くことができる。これは位相共役波の発生効率であるとともに自己回折光の回折効率でもある。式(2)は参照光の変調周波数を調整することによって、任意の位相変調光(シグナル光)を選択的に検出できることを示している。また式(2)において $\nu=0$ と置くとき自己回折光強度は変調指数と変調信号間の位相差に依存し、結晶が phase-sensitive detector (PSD) として機能することが明らかとなる。

光学的ロックイン検出のための実験配置図を Fig. 4 に示す。LD 励起 YAG レーザー (532 nm) のビームには

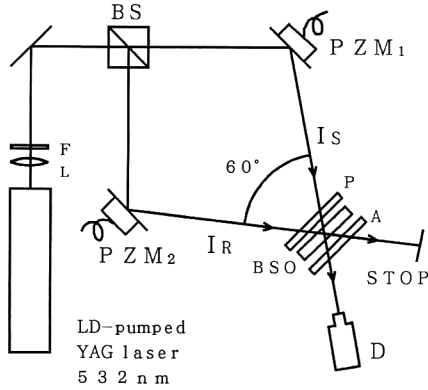
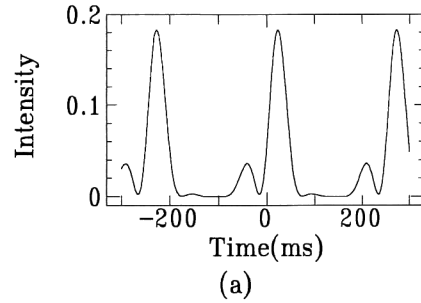


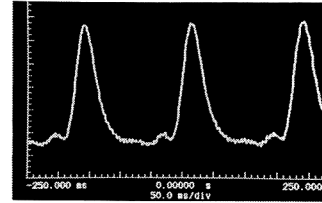
Fig. 4 Experimental setup for optical lock-in detection by anisotropic self-diffraction. L, collimating lens; F, optical filter; BS, beam splitter; PZM₁, PZM₂, mirrors attached to the piezoceramic transducer; P, polarizer; A, analyzer; D, photo-diode.

基本波と励起光が残留する。これらは見かけ上偏光子等の消光比を低下させるため、光学フィルターを用いて波長 532 nm の光だけをとり出した。レーザービームはビームスプリッターによってシグナル光と参照光の 2 本に分割された後、交差角 60° で結晶に入射する。また両光波はそれぞれ別のピエゾミラーによって位相変調を受ける。BSO は偏光子と検光子によって挟まれているが、偏光子はレーザーの偏光状態の方位が結晶の中心で $\langle 001 \rangle$ 軸と平行となるよう設定されており、検光子は透過シグナル光の消光位置に設定されている。

シグナル光と参照光のそれぞれの変調信号にわずかな周波数差を与えたときの自己回折光の挙動を **Fig. 5** と **Fig. 6** に示す。これらは結晶が電子工学におけるミキサと類似の機能を有していることを示している。Fig. 5 において、シグナル光と参照光の変調周波数はそれぞれ約 298 Hz と 302 Hz、変調指数は 2.90 rad, 2.88 rad と設定した。Fig. 5(a) は式 (2) を用いて描いた理論曲線で、5 次のベッセル関数を含む項までの和をとり、結晶の時定数は 50 ms とした。なお、この時定数は実験的に求めた値である。Fig. 5(b) は測定波形写真で理論と実験とで良く一致していることがわかる。式 (2) から明らかなように自己回折光は基本周波数を ν とする多数の高次成分を含むことになるが、このことが電子工学におけるミキサと異なり、Fig. 5 のように波形を歪ませる原因である。波形歪みは周波数差 ν と変調指数 μ_1, μ_2 によって様々に変化する。Fig. 6 は変調指数を 1.45 rad, 1.44 rad と設定したものであるが、この場合、高

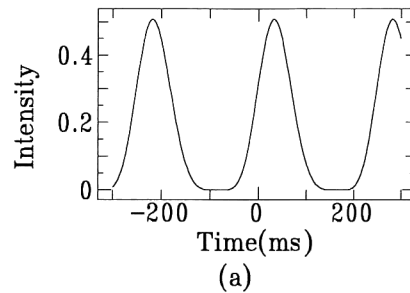


(a)

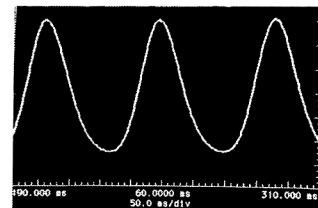


(b)

Fig. 5 Photorefractive mixer output. (a) theoretical curve, (b) oscilloscope trace. Two waves are modulated by 2.90 rad and 2.88 rad.



(a)



(b)

Fig. 6 Photorefractive mixer output. (a) theoretical curve, (b) oscilloscope trace. Two waves are modulated by 1.45 rad and 1.44 rad.

次の項の影響が比較的少ないことがわかる。

シグナル光と参照光の変調周波数を等しくし、変調信号間に位相差を与えたときの自己回折光強度を **Fig. 7** に示す。黒丸は実験値、実線は理論曲線である。この理

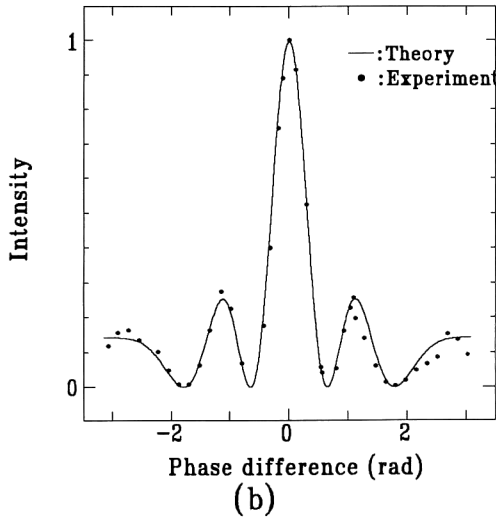
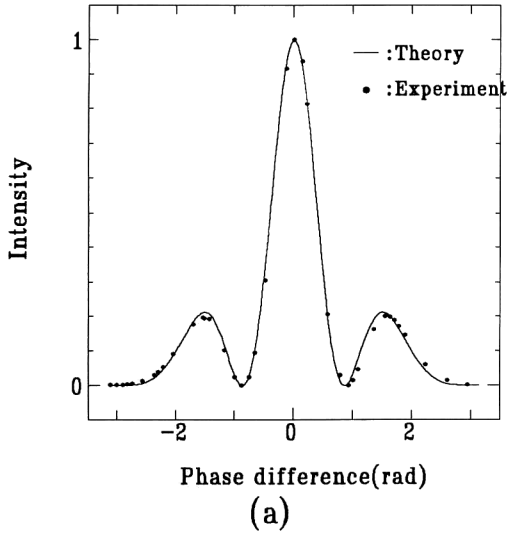


Fig. 7 Dependence of the self-diffracted light intensity on the phase difference of two modulation signals. (a) two waves are modulated by 3.1 rad and 2.4 rad, (b) two waves are modulated by 3.9 rad and 3.0 rad.

論曲線は式(2)において $\nu=0$ と置いて描かれたものである。Fig. 7(a)の変調指数は μ_1 が3.1 radで μ_2 が2.4 rad, Fig. 7(b)は μ_1 が3.9 radで μ_2 が3.0 radである。両図ともに $\phi=0$ において鋭いピークが現れており、結晶がPSDとして機能していることを示している。しかしFig. 5と同様に高次項の影響により $\phi=0$ 以外にサブピークが現れているが、これらも変調指数によって様々に変化する。

参照光の変調周波数を掃引したときの自己回折光強度

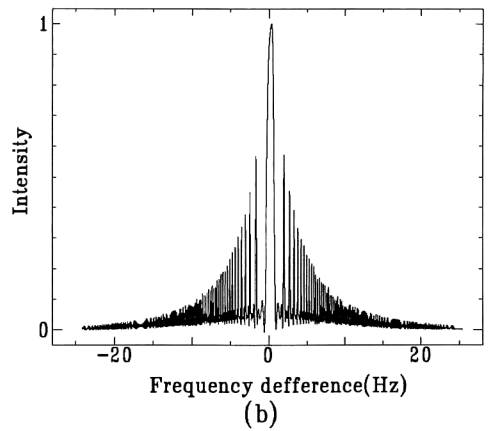
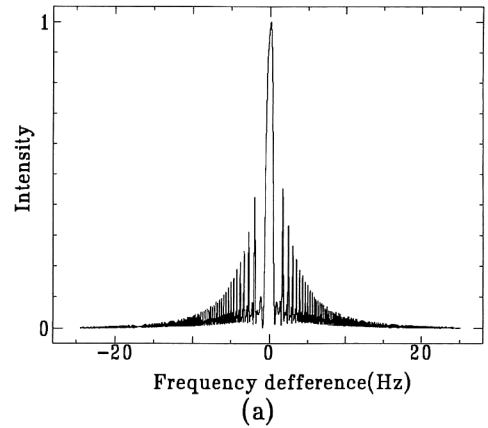


Fig. 8 Photorefractive band-pass filtering. Both of two waves are modulated by 1.8 rad. (a) both intensities of two waves are 1.7 mW, (b) both intensities are 3.4 mW.

の変化をFig. 8に示す。掃引速度は約1.5 Hz/sとし、シグナル光の変調周波数は250 Hzに設定した。また両光波の変調指数はともに1.8 radとし、強度比は1とした。Fig. 8(a)は参照光の入射パワーが約1.7 mW, Fig. 8(b)は3.4 mWのときの自己回折光強度である。入射パワーは偏光子に入射する前の値で、そのときのビーム径は約0.6 mmであった。Fig. 8より入射光強度によって周波数帯域幅が変化することは明らかであるが、これは結晶の応答時間が強度に依存するためである。Fig. 5やFig. 7のところで述べたように、高次項の影響が無視できないため、Fig. 8のプロットの包絡線は簡単な関数形で表すことはできないが、入射光強度の増加に伴い帯域幅も増加することは図より明らかである。これは光強度によって周波数帯域幅が制御できることを意味している。

以上のことより、四光波混合を用いた場合と同様

に⁸⁻¹¹⁾, 位相変調光の光学的ロックイン検出が二光波混合を用いて実現できることがわかる。

4. おわりに

BSO 単結晶中の異方性自己回折における自己回折光を大きな信号対雑音比(約 24 dB)で取り出すことができた。この性質を利用して Khoury らによって提案されたものの多くが, より簡単な光学系で実現できる。またこの性質は PSLM⁹⁾ 等にも応用できるものと思われるが, BSO 単結晶は回折効率が低いのが難点である。

BSO 単結晶は電気光学定数が小さいため高い回折効率を得るためには外部電界を印加しなければならない。この場合の自己回折¹²⁾に関する解析は十分になされておらず, 今後の課題である。

文 献

- 1) A. Marrakchi, R. V. Johnson and A. R. Tanguay, Jr.: "Polarization properties of photorefractive diffraction in electrooptic and optically active sillenite crystals (Bragg regime)," *J. Opt. Soc. Am. B*, **3** (1986) 321-336.
- 2) A. Brignon and K. H. Wagner: "Polarization state evolution and eigenmode switching in photorefractive BSO," *Opt. Commun.*, **101** (1993) 239-246.
- 3) A. A. Kamshilin and M. P. Petrov: "Continuous reconstruction of holographic interferograms through anisotropic diffraction in photorefractive crystals," *Opt. Commun.*, **53** (1985) 23-26.
- 4) R. C. Troth and J. C. Dainty: "Holographic interferometry using anisotropic self-diffraction in Bi₁₂SiO₂₀," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 53-55.
- 5) A. Partovi, E. M. Garmire and L. J. Cheng: "Enhanced beam coupling modulation using the polarization properties of photorefractive GaAs," *Appl. Phys. Lett.*, **51** (1987) 299-301.
- 6) E. Volt and P. Günter: "Photorefractive spatial light modulation by anisotropic self-diffraction in KNbO₃ crystals," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 769-771.
- 7) N. V. Kukhtarev, E. Krätzig, H. C. Ktlich, R. A. Rupp and J. Albers: "Anisotropic selfdiffraction in BaTiO₃," *Appl. Phys. B*, **35** (1984) 17-21.
- 8) J. Khoury, V. Ryan, C. Woods and M. Cronin-Golomb: "Photorefractive optical lock-in detector," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 1442-1444.
- 9) J. Khoury, V. Ryan, M. Cronin-Golomb and C. Woods: "Photorefractive frequency convertor and phase-sensitive detector," *J. Opt. Soc. Am. B*, **10** (1993) 72-82.
- 10) J. Khoury, J. S. Kane, J. Kierstead, C. Woods and P. Hemmer: "Real-time holographic baseband frequency demodulator," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 2909-2916.
- 11) J. Khoury, M. Cronin-Golomb and C. Woods: "Real-time holographic frequency-division demultiplexing: theoretical aspects," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 5390-5395.
- 12) N. V. Kukhtarev, G. E. Dovgalenko and V. N. Starkov: "Influence of the optical activity on hologram formation in photorefractive crystals," *Appl. Phys. A*, **33** (1984) 227-230.