総 説

Bi₁₂SiO₂₀ 単結晶を用いた画像素子の開発と応用

神戸大学工学部 峯本 工

Takumi Minemoto: Optical Image Converters Using Bi₁₂SiO₂₀ Single Crystal and Their Applications.

There are many kinds of image converters using Bi₁₂SiO₂₀ single crystal up to date. Also the possibility of applications has been described by many workers. But, for the applications of the converters, there are many difficult problems to be solved. In this paper, the principles of the converters are explained together with interesting applications. And the problems to be solved are pointed out.

(Received November 27, 1989)

1. はじめに

大量情報の処理を必要とする今日の社会において、これを高速かつ低いコストで実現する小形のシステムが待望されている。このような背景のもとで光学系による並列演算処理方式に関心がもたれている。このような光学系を構成するには空間光変調素子、光接続素子などの画像変換素子が欠かせない。これらの素子を構成する材料として、電気光学効果を示す材料、非線形光学結晶、液晶、非線形光学高分子材料などの開発およびこれらの材料による素子の研究が最近急速に盛んになってきている。

Bi₁₂SiO₂₀ 単結晶（以下BSO結晶と略す）は電気光学効果、光伝導効果、光屈折率効果を示す光学的特性に優れたものを持つ興味ある材料である。BSO結晶のこれらの効果を利用して、PROM素子やPRIZ素子などの空間光変調素子¹⁾やホログラム記録素子に利用されている。また、BSO結晶の光屈折率効果を利用した2光波混合素子や位相共役波発生素子も作られ、画像変換などへの応用が研究されている。以下では、はじめにBSO結晶の特性を簡単に紹介し、BSO結晶を利用した上記の画像素子の開発状況と提案検討されている応用面について述べる。

2. BSO結晶の特性

Bi₁₂SiO₂₀ 結晶はBiO₂とSiO₂の酸化化合物結晶で点群23二属し、チョクラ

Table 1. Characteristics of Bi₁₂SiO₂₀ single crystal.

項 目	値	測定条件
格子定数	10.3×10^{-10} m	
密度	9.2 g/m ³	
比誘電率	56	100 kHz
屈折率	2.53	633 nm
比抵抗	10^{14} Ω·cm	暗状態
	10^8 Ω·cm	458 nm, 2.5 mW·cm ⁻²
電気光学係数 (γ ₄₁)	5×10^{-12} m/V	633 nm
半波長電圧	3900 V	633 nm
	6800 V	870 nm
旋光能	22 °/mm	633 nm
	10.5 °/mm	870 nm
ペルデ定数	3.67×10^{-3} °/(Oe·cm)	633 nm
	9.33×10^{-4} °/(Oe·cm)	1150 nm
表面弾性波伝播速度	1660 m/s	
同上温度係数	118×10^{-6} °C ⁻¹	
電気機械結合係数	1.4×10^{-2}	

スキー法²⁾ またはEFG法^{3,4)}で育成され、光伝導効果、電気光学効果、Faraday 効果を示す光学的特性に優れたものを持つ材料である。下記に紹介する画像素子を構成する際に利用する特性の主だたものについて簡単に述べる。

BSO結晶の光伝導効果は、近紫外光から青色光で大きく赤色光では著しく減少する顕著な波長依存性を示す。⁵⁾ 波長370 nmの光伝導率は630 nm 10^3 – 10^4 倍である。結晶は比較的大きな一次電気光学定数 γ_{41} を持ち、結晶内に電界が存在すると Pockels効果を示す。⁶⁾ 結晶の光学活性は比較的大きく、波長の増加につれて減少する波長依存性を示す。⁷⁾ また、Faraday効果の大きさを表すベルデ定数も同じ傾向の波長依存性を示す。⁷⁾

BSO結晶の主な定数を Table 1 に示す。⁸⁾

3・PROM素子の開発と応用

3-1 PROM素子の原理・構造・特性⁹⁾

この素子はBSO結晶の光導伝性を利用して画像情報の光強度分布を結晶板内の電荷分布に変換し、電荷分布の像として記録する。記録画像の読出し(変換)は電荷分布が結晶板内に作る電界によるPockels 効果を利用して行われるので、この素子はPockels Readout Optical Modulator (PROM) と呼ばれている。

素子は〈001〉または〈100〉軸に垂直な平面を持つように切り出したBSO結晶板の両面を精密光学研磨し、透明な絶縁膜を間に挟んで透明電極をつけて構成する。その典型的な構造はFig. 1 に示す。

PROM素子の動作は消去、書込み、記憶、読出しの四つ姿態に分解される。^{*} 現状の素子特性値をTable 2 に示す。

3-2 PROM素子の開発と問題点

PROM素子の現時点における問題点は次のようにまとめられる。

1. 素子の半波長電圧が高く、同電圧下での動作が行えず、BSO結晶の電気光学効果の持つ dynamic range を全て利用できていない。
2. 素子の解像力が低く、一度に取り扱える情報量が少ない。
3. 感度が低い。
4. 動作サイクル時間が長い。

これらの問題を解決するために、下記のような研究が行われ、一部では成果も上がりつつある。

3-3 PROM素子開発の最近の成果

素子の半波長電圧が高い問題を解決する方法は、絶縁体膜に誘電率が大きく、絶縁耐圧が高く、光学的に均質透明で均一に薄く加工できる物質を使用することである。最近、ガラス板を 10–20 μm に注*) 詳しくは文献 9, 10 を参照。

Fig. 1. Basic structure of PROM.

Table 2. Specifications of PROM.

最大有効画面	38	m ϕ
BSO結晶板の大きさ	300–800	μm
絶縁膜(パリレン)	6	μm
素子印加電圧	2	kV以下
出力像コントラスト比	1000:1	
フレームレート	200	frames/s以下
書込み感度	約0.5	(422 nm)
解像力	10–20	(MTF=0.5)
記憶時間	2	時間(暗所)
素子寿命	10^6	回以上

薄く研磨したものを絶縁板に使用して、従来のバリレン膜を使用した素子より広範囲に電気光学効果を利用できるようになった。¹¹⁾ 絶縁板に LiTaO₃ (LT) などの強誘電体を用いて素子半波長電圧の低下が図られた。¹²⁾ また、電気光学効果を持つ強誘電体の板を絶縁板に使用し、Fig. 2 のように BSO と絶縁板結晶の屈折率主軸が反平行になるように組み合わせて、両方の電気光学効果を重畳して利用する新構造素子の試作が行われ、半波長電圧 (3.3 kV) を印加して素子を動作させることに成功している。¹³⁾ しかし、ガラス板を使用する素子以外のものでは、まだ変換画像の画質が悪く、解像力も低いので今後材料および加工法などについて更に検討する必要がある。

Fig. 2. Structure of new device with double layers.

素子の解像力に関しては、これまで素子の変調伝達特性 (MTF) 測定結果を低い空間周波数域あるいは高い空間周波数域のどちらか一方では説明できたが、空間周波数全域にわたって説明できる解析モデルがなく、解像力向上のための条件を明確にできなかった。最近、boundary element method と iterative method を併用した計算機による近似解放により、BSO 結晶板内のキャリアの動きを考慮した解析モデルで空間周波数全域にわたって素子の MTF を説明できた。¹⁴⁾ そして、素子解像力向上のためには、

- (1) BSO 結晶板を薄くすること、
  - (2) 誘電率の大きな薄い絶縁膜を使用すること、
- が必要であると明確にできた。この結果は、P を少量混入した導電性 BSO 結晶基盤の上に純粋の BSO 結晶をエピタキシャル成長させて作った新構造の薄膜型素子 (Fig. 3) で限界解像度 80 lp/mm が得られたこと¹⁵⁾ やガラスの薄板と厚さ 50 μm の BSO 結晶板を用いた素子で限界分解能 40 lp/mm が得られた¹⁶⁾ ことによって確かめられた。

Fig. 3. Structure of the thin film PROM.

感度の向上を図るには、(I) BSO 結晶の photoconductivity を良くする、または (II) BSO 結晶板を書込み光の波長に最適な厚さにする¹⁷⁾ ことである。後者の方法は素子の解像力を良くすることと矛盾する場合がほとんどである、したがって、(I) の方法に依らざるをえない。長尾らは、最近、 $6\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot x(\text{B}^{3+}_{0.5}\text{P}_{0.5})\text{O}_2 \cdot (1-x)\text{SiO}_2$ 融液から $\text{Bi}_{12}(\text{B}^{3+}\text{PSi})\text{O}_{20}$ 単結晶を引き上げ、この結晶が可視光域で BSO 結晶の 10-100 倍の photoconductivity を持ち、電気光学効果は BSO 結晶とほぼ同じであることを確認した。¹⁸⁾ まだ、BSO 結晶のように大きな単結晶を引き上げることに成功していないが、今後の進展が期待される。

素子の動作速度は感度と素子への外部印加電圧の制御速度に依存して決まる。後者は素子の構造および BSO 結晶の誘電率が大きいことから、素子の電気容量が大きく、高速動作は余り期待できない。現時点では動作速度の限界はほぼ 1/200 s 程度と言われている。ただし、上記の薄膜型素子では電気容量が小さく、かつ画像の消去に関与する素子内の電荷の移動が抵抗性要素を通して行われるため、

消去時間が $20 \mu\text{s}$ 以下と短くなり、素子の動作速度は書き込み時間のみで決まる。¹⁵⁾

3-4 PROM素子の応用⁸⁻¹⁰⁾

画像変換素子PROMの応用はいろいろと提案されている。早期に提案された応用として、インコヒーレント光画像をコヒーレント画像に変換し、Fourier変換、フィルタリング処理や画像間相関の演算などを光学系で行うことがある。残念ながら現時点では素子の分解能(記録できる画像容量)がまだ不十分なため、この方面への実用化にはまだ到っていない。

最近の新しい応用事例として、スペックル写真法におけるスペックルグラム記録素子としての利用がある。¹⁹⁾ スペックル写真法への応用における利点は、準実時間記録が可能なことと、写真乾板などと異なり in situ で dry process である点にある。

また、光並列演算系のデータ入力素子及び演算子への利用も最近の話題である。この分野では演算系へのデータの大容量並列入力、並列演算、データや演算結果の一時記憶に利用される。^{10, 20, 21)} 応用の一例を

Fig. 4 に示す。この系では2値2変数の論理演算が可能であり、演算結果を電子回路系を経由して帰還する回路を備えているので次の演算の入力データとして再び使用する繰返し演算も可能である。系の中にPROM

Fig. 4. Schematic diagram of the optical parallel logic gate. A1, A1' and A2: analyzers. DM1 and DM2: dichroic mirrors. L1-L5: lenses. P: polarizer. SH: shutter.

OM素子は2個使用され、データの入力と演算子の一部品としての役目を果たしている。上の系で並列演算を実行して、鶴の写真の中から等輝度の部分を抽出した例を Fig. 5 に示す。

以上、PROM素子の応用例を上げたが、素子の解像度がまだ十分でないため、画像処理および光並列演算系への応用においても実用化の段階には到っていない。今後の研究開発を待たなければならない。また、PROM素子は光学系を利用した情報の並列演算・処理と言う点に関しては大変便利な機能を持っているので、BSO結晶だけでなく、同様の性質をもつ新材料の開発も考える必要がある。

4. PRIZ素子²²⁾

PRIZ素子は $\langle 111 \rangle$ または $\langle 110 \rangle$ 軸に垂直に切り出したBSO結晶板を Fig. 1 のPROM素子と同じように絶縁体膜と透明電極で挟み込んで作られる。²³⁻²⁵⁾ 動作原理もPROMとほとんど同じであるが、記録されている画像の読出しはBSO結晶板内の電界による横方向電気光学効果を利用して行われる。素子の感度、解像力ともにPROMと大きな差はないが、MTF特性は低い空間周波数域と高い空間周波数域で低下する帯域通過形フィルタのようになる。

PRIZ素子の変形として、研磨したBSO結晶板の表面に直接透明電極をつけた conducting PRIZ も

Fig. 5. Results of extraction of contours by repetitive parallel optical computing.

(a) original analog image. (b) binary images of each bit in binary-8 bits data.

(c) experimental results of extracted contours by using the optical computing system shown in Fig. 4. (d) expected results of contours.

作られた。²⁶⁾ この素子は上記のPRIZと異なり、解像度が書き込み露光量に依存して変化したり、画像のパルス書き込みに対して独特の振舞いをする。²⁷⁾

PRIZ素子から読み出された像(変換像)は書き込み像を微分したような形になるので、画像の輪郭抽出などに応用される。²⁵⁾

5. 光屈折率効果素子^{28, 29)}

光屈折率効果とは、光の強度分布によって物質の中に屈折率分布が誘起される現象を言う。ただし、その屈折率分布は、永遠に解消できない欠損として残るのではなく、物質を加熱したり、一様な光で物質を照射したりすることによって簡単に消去できる。光屈折率効果の起源は、光によって物質中に誘起された電子とホールが外部電界によるドリフトや熱拡散によって分離し、物質中に電界分布を作り、この電界によって結晶が歪み、電気光学効果が起こるためであると考えられている (Fig. 6)。

Fig. 6. The photorefractive effect. Light with a spatially periodic intensity pattern $I(x)$ causes charges to drift and diffuse through the crystal. In the absence of any uniform electric field, the charges tend to pile up in the dark regions of the crystal. The resulting charge density $\rho(x)$ creates a strong electric field $E(x)$. This electric field distorts the crystal lattice as shown by the arrows, to create a periodic refractive-index variation $\Delta n(x)$ by the linear electro-optic (Pockels) effect. Note the spatial shift between $I(x)$ and $\Delta n(x)$.

B S O 結晶は光屈折率効果が起こり、ホログラム記録素子として利用される。また、2 光波混合による実時間ホログラム記録素子や画像増幅、2 光波混合画像変換素子、4 光波混合による位相共役波発生素子、4 光波混合画像変換素子などの研究が盛んに進められている。

5-1 ホログラム記録素子

ホログラム記録素子は $\langle 110 \rangle$ 軸に垂直に切り出された数 mm の厚さの結晶板である。²⁸⁾ 結晶板の $\langle 110 \rangle$ 軸に垂直な二面に透明電極をつけて使用する場合もある。

素子に記録可能な干渉縞の空間周波数帯域は数 10–2000 lp/mm と広く、この素子は比較的感度も高く、現像処理などの面倒な process が不要である利点を持っている。しかし、ホログラムの回折効率は、素子に 15 kV/cm の電圧を印加したもとの空間周波数 100 lp/mm で最高 15% 程度、³⁰⁾ 空間周波数が高くなるにつれて低下し 1000 lp/mm では数% になる。高い空間周波数領域では外部から電圧を印加する効果がほとんど無くなると言われている。このように回折効率が低いことが難点である。現在、これを向上することが課題となっている。ホログラムの回折効率を向上する方法が種々検討されてきているが、いまだに B S O 結晶板の最適厚ささえも見極められていない。これは B S O 結晶が大きな光学活性を持っているために、結晶内を伝搬する書込み光および読出し光の偏向状態が非常に複雑に変化することも一因と考えられる。今後、B S O 結晶板内部を伝搬する光の偏向状態の詳細な解析を行い、書込み光干渉縞の visibility の変化と読出し光の偏向状態を推測できるようにする必要がある。また、B S O 結晶の電気抵抗率や結晶内の不純物準位濃度と回折効率の関係も明らかにしなければならない。³¹⁾

この素子の応用分野はホログラフィーの記録、再生が関与する分野全般に及ぶ。特に、ホログラフ

注**) 素子は、また、 $\langle 110 \rangle$ 軸に垂直に切り出し、 $\langle 110 \rangle$ 軸に垂直な二面に電極をつけて作られる場合もある。

ィー干渉応用計測の方面に利用すると便利である。

5-2 2 光波混合素子と応用

2 光波混合を実現する BSO 結晶を用いた素子は、 $\langle 110 \rangle$ 軸に垂直な面を持つように切り出した 10 mm 程度の厚さの結晶板で作られる。

素子にコヒーレントな信号光（波数ベクトル k_s ）と参照光（波数ベクトル k_r ）を同時に照射し、干渉縞のベクトル K が $k_s = k_r - K$ を満足するようにすると、実時間で素子から信号光と同じ波面を持った回折光が得られる（Fig. 7）。³²⁾

つまり、実時間ホログラフィーの記録再生が可能になる。また、参照光の強度を強くし、周波数を僅かにずらして素子内の干渉縞が適当な速さで走るようにすると、信号光が増幅され、画像の増幅が行える。^{33, 34)} しかし、

BSO 結晶ではまだ回折効率が低く、画像増幅の倍率も大きくない。現在、素子にとって好ましい BSO 結晶の特性を含めて、素子の最適動作条件などの探求が行われている。

5-3 4 光波混合素子と応用

位相共役波発生素子も 2 光波混合素子と同じく $\langle 110 \rangle$ 軸に垂直に切り出された 10 mm 程度の厚さの結晶板で作られる。基本的な 4 光波混合光学系を Fig. 8 に示す。この光学系の特徴は互いに反平行に進行する 2 つのポンピング光と信号光によって信号光と位相共役な第 4 の光波が発生することである。素子の内部に 2 つのポンピング光によって作られる干渉縞の縞ベクトルを K 、ポンピング光の波数ベクトルを k_r とすると位相共役波の波数ベクトル k_c は $k_c = -k_r + K$ の関係を満足するよう配置されなければならない。

位相共役光は信号光と同じ波面を持ち、信号光と反対方向に進行する。位相共役光のこの性質は興味あふれるものである。例えば、Fig. 8 における信号波が右に進行するにしたがって波面が乱れる場合を想像しよう。この場合の位相共役波は発生後、信号波の波面の乱れを補正しながら左に進行することになる。

位相共役波のこのような特長を生かし、実時間ホログラフィー、³⁵⁾ ホログラフィー干渉計測、³⁶⁾

Fig. 7. Dynamic holography in photorefractive crystals by degenerate two wave mixing. Continuous lines: interference pattern. Dashed lines: index modulation. K : grating vector. k_s and k_r : wave vectors of signal beam and pump beam, respectively

Fig. 8. Phase-conjugate wave generation in photorefractive crystals by degenerate four wave mixing. Continuous lines: interference pattern. Dashed lines: index modulation. K : grating vector. k_s , k_c and k_r : wave vectors of signal beam, phase-conjugate wave and pump beam, respectively.

相関演算などの画像処理、³⁷⁾ 並列論理演算、³⁸⁾ インコヒーレント画像のコヒーレント画像への変換、^{39, 40)} 等々、各種の精密計測法や光通信への応用など色々提案され、実験研究が行われている。この場合もBSO結晶の素子の変換効率が低いため、それを向上する手法を探究しなければならない。

6. おわりに

上記のようにBSOを利用した画像素子はそれぞれ興味ある特性を持っており、種々の方面に利用できる可能性を秘めている。しかし、BSO結晶や $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 単結晶などselenite系の単結晶は大きな光活性を示し、画像素子の特性にあまり良い結果を及ぼさない。この点で、これらの結晶による画像素子には限界があるかもしれないが、今後、BSO結晶自体の特性改良をはじめ各素子の構造改善および最適動作条件の探求により、早期の実用化が実現することを望むとともに、光活性をほとんど示さず、光伝導性と電気光学効果はBSO結晶を凌ぐ新しい材料が近い将来出現することを期待する。

これまで光学材料と言うとガラスと写真等の感光材料と思われ、新素材の開発にたいする研究量も熱意も電子材料などに較べ圧倒的に少なかったと言える。情報通信、情報処理、精密計測などの分野における光の有用性が示されてきた今日、より多くの研究者が光学関係新素材の開発に参画され、一日も早く大量情報の超高速通信及び超高速処理システムが実現すること期待する。現時点においては、この方面の進歩はその多くが新素材の出現如何に懸かっているとと言っても過言ではない。

参考文献

- 1) 空間光変調素子についての解説は 峯本工, 陳靖: 光学, **18** (1989) 337 を参照
- 2) 多田紘二, 難波宏邦, 工原美樹, 龍見雅美, 井口悟, 浜崎祐司, 西脇由和, 津野浩一: 日本化学会誌 No. 10 (1981) 1630.
- 3) 宮本大樹, 宮本敬, 薦田俊策: レーザ研究, **9** (1981) 288.
- 4) 宮本敬, 高橋弓弦, 稲村偉, 宮本大樹, 金豪健: 粉体粉末冶金境界講演会概要集 (平成元年秋季大会) (1989) P. 14.
- 5) J. Feinleib and D. S. Oliver: Appl. Opt., **11** (1972) 2752.
- 6) R. E. Aldrich, S. L. Hou and M. L. Havill: J. Appl. Phys., **42** (1971) 493.
- 7) A. Feldman, W. S. Brower, Jr., and D. Horowitz: Appl. Phys. Lett., **16** (1970) 201.
- 8) 峯本工: オプトロニクス No. 4 (1985) 55.
- 9) 末元好郎, 藤田茂, 峯本工: 光学, **7** (1978) 194.
- 10) 峯本工: O plus E, No. 86 (1987) 83.
- 11) 景虹, 陳靖, 峯本工: 光学, **18** (1989) 627.
- 12) 陳靖, 武貞俊司, 峯本工: 第50回応用物理学会学術講演会予稿集 (1989) p. 761.
- 13) J. Chen and T. Minemoto: Opt. Commun., **71** (1989) 29.
- 14) J. Chen and T. Minemoto: J. Opt. Soc. Am., **A6** (1989) 1281.
- 15) 長尾康之, 三村栄紀: 第50回応用物理学会学術講演会予稿集 (1989) P. 761.
- 16) 神戸大学峯本研究室と日本ガイシ(株)応用研究所の共同研究によって1989年11月に確認
- 17) G. S. Lipson and P. Nisenson: Appl. Opt., **13** (1974) 2052.
- 18) 長尾康之, 三村栄紀: 第34回応用物理関係連合講演会予稿集 (1987) 641, 第35回応用物理関係連合講演会予稿集 (1988) p. 987.
- 19) K. Nakagawa and T. Minemoto: Opt. Commun., **70** (1989) 288.
- 20) T. Minemoto, K. Okamoto and K. Miyamoto: Appl. Opt., **24** (1985) 2055.

- 21) T. Minemoto, S. Numata and K. Miyamoto: Appl. Opt., **25** (1986) 948 and Appl. Opt., **25** (1986) 4046.
- 22) "Photorefractive Materials and Their Applications II", Topics in Applied Physics 62, ed. by P. Gunter and J. P. Huignard, Springer-Verlag (1989) Chap.8, p. 325.
- 23) M. P. Petrov, A. V. Khomenko, V. I. Berezkin and M. V. Krasin'kova: Mikroelektronika, **8** (1979) 20.
- 24) M. P. Petrov, A. V. Khomenko, M. V. Krasin'kova, and M. G. Shlyagin: Sov. Phys. Tech. Phys., **26** (1981) 816.
- 25) D. Casasent, F. Caimi, M. P. Petrov, A. V. Khomenko: Appl. Opt., **21** (1982) 2846.
- 26) M. E. Nilus and T. E. Luke: Opt. Commun., **57** (1986) 385.
- 27) P. J. Gardner and T. E. Luke: Opt. Commun., **73** (1989) 19.
- 28) "Photorefractive Materials and Their Applications I", Topics in Applied Physics 61, ed. by P. Gunter and J. P. Huignard, Springer-Verlag (1987).
- 29) "Photorefractive Materials and Their Applications II", Topics in Applied Physics 62, ed. by P. Gunter and J. P. Huignard, Springer-Verlag (1989)
- 30) 久田重善, 峯本工, 藤田武良, 杉原清: 昭和64年度精密工学会春季大会講演予稿集 (1989) p. 291.
- 31) J. P. Herriau, D. Rojas and J. P. Huignard: Ferroelectrics, **75** (1987) 271.
- 32) J. P. Huignard and F. Micheron: Appl. Phys. Lett., **2** (1976) 438.
- 33) N. V. Kukhtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov, M. S. Soskin and V. L. Vinetskii: Ferroelectrics, **22** (1979) 961.
- 34) J. P. Huignard and A. Marrakchi: Opt. Commun., **38** (1981) 249.
- 35) G. J. Dunning and R. C. Lind: Opt. Lett., **46** (1985) 113.
- 36) A. Marrakchi, J. P. Huignard and J. P. Herriau: Opt. Commun., **34** (1980) 15.
- 37) L. Pichon and J. P. Huignard: Opt. Commun., **36** (1981) 277.
- 38) N. A. Vainos, J. A. Khoury and R. W. Eason: Opt. Lett., **13** (1988) 503.
- 39) A. Marrakchi, A. R. Tanguay Jr., J. Yu and D. Psaltis: Opt. Eng., **24** (1985) 124.
- 40) "Photorefractive Materials and Their Applications II", Topics in Applied Physics 62, ed. by P. Gunter and J. P. Huignard, Springer-Verlag (1989) Chap.7, p. 275.