



光第2高調波発生用有機結晶コアファイバーの設計

竹 間 清 文

パイオニア(株)総合研究所 〒350-02 鶴ヶ島市富士見 6-1-1

(1992年7月23日受付, 1992年9月4日受理)

Design of Organic Crystal-Cored Fibers for Optical Frequency Doubling

Kiyofumi CHIKUMA

Corporate Research and Development Laboratory, Pioneer Electronic Corporation,
6-1-1, Fujimi, Tsurugashima 350-02

(Received July 23, 1992; Accepted September 4, 1992)

A formulation for the optical second-harmonic power is derived from differential equations with boundary conditions for a crystal-cored fiber. The second-harmonic wave is generated due to the Cerenkov radiation type of phase-matching. The prerequisite condition for high efficiency is expressed by a simple relation of refractive indices of a core crystal, the core radius and the fundamental wavelength. An organic crystal-cored fiber can be designed by the guiding principle derived here, by which the core radius, the cladding glass and the fundamental wavelength can be optimally selected.

1. ま え が き

小型で安価な青色コヒーレント光源を実現するため、半導体レーザーを基本波光源に用い、光導波路を利用する波長変換素子がいろいろ提案されている¹⁻¹¹⁾。半導体レーザーは、ガスレーザーなどに比べて、出力が百mW程度と比較的低出力なこと、発振波長が温度や戻り光、駆動電流により変化することから、これを利用した実用的な波長変換素子には、大きな非線形定数を利用した波長変換効率の高い素子であることと同時に、基本波の波長許容範囲の広いことが望まれる。

基本波光および高調波光の導波モード同士の伝搬定数を一致させ位相整合を行う「導波-導波型波長変換素子」¹⁻³⁾は以前より良く研究されてきた方法である。しかしながら、この方式では作製誤差、動作温度等を非常に厳しく管理する必要がある、最近の研究は、これらの困難を克服するための改善方法に関するものが多い。

強誘電体結晶の非線形定数をドメイン反転と呼ばれる手法を用いて周期的に変調し、基本波光と高調波光の導波モード間の伝搬定数の差分を補償する「擬位相整合型」波長変換素子が最近とくに活発に研究されてい

る^{4,5)}。一般に大きな値を持つ非線形テンソルの対角成分を利用できるため、高効率な変換が期待できる有利な方法ではあるが、基本波光源の波長許容半値幅が非常に狭く、半導体レーザーの波長変換を考えた場合、波長許容幅改善が不可欠である。対策として、反転ピッチの微小変調による許容幅拡大や⁶⁾、ドメイン反転回折格子をDBRに兼用し擬位相整合条件を満足する波長を発振させる方法等が提案されている⁷⁾。

実用的な波長変換素子を実現するためには、位相整合条件の緩和が不可欠となるが、「チェレンコフ放射型位相整合」はこの条件を著しく緩和することが可能な方式である⁸⁻¹¹⁾。とくに、数 μm 径の孔の空いた中空ガラスに有機非線形材料を充填し結晶化させた有機結晶コアファイバー⁹⁻¹¹⁾は容易な位相整合と有機材料のもつ大きな非線形性が利用でき、しかも高調波が軸対称に放射されアキシコンを使った光学系により回折限界に集光できること¹¹⁾から実用デバイスになり得ると期待がかけられてきた。この素子に関して、筆者らは高調波光に対するコアでの屈折率段差を無視する近似を用いて解析を行い位相整合の特徴等を論じてきた¹²⁾。コアおよびクラッドの境界での屈折率段差を考慮した解析は、数値的¹³⁾あるいは

は、モード展開法による解析¹⁴⁾が試みられているが、筆者らは、微分方程式を Green 関数の方法で直接解き、高調波出力算出式¹⁵⁾を得た。この式を用いて変換効率の評価を行い、さらに最適設計方法ならびに結晶コアファイバーに用いる有機非線形材料に必要な条件を明確にすることができた。この条件は実用的な素子設計の際に有用であり、結晶コアファイバー用の有機非線形材料探査の指針となるものである。以下これについて述べる。

2. 第二高調波出力の算出式

コアを形成する非線形結晶の異方性ならびに、波長変換による基本波の減衰を無視する近似的な取扱を行い、ファイバーに導波される基本波の LP₀₁ モードで非線形分極 P^{NL} が励起され、この分極により、第二高調波が発生する場合について解析を行った¹⁵⁾。

実際ファイバー軸 (z 軸) 方向に導波される LP₀₁ モードの基本波によって $z = -L/2$ と $L/2$ に励起された非線形分極 P^{NL} は、非線形定数 d と基本波の導波パワーより求められる定数 C を用い、

$$P^{NL} = \varepsilon_0 d C J_0(Ur)^2 \exp(-i2\beta z) \quad (1)$$

で表される。基本波の全導波パワー P^ω のうちコアの界分布 $J_0(Ur)$ に寄与するパワーを計算することによって定数 C は求められ、

$$C \equiv \frac{2(\mu_0/\varepsilon_0)^{1/2} W^2 P^\omega}{\pi a^2 N^\omega (U^2 + W^2)} \quad (2)$$

で表される。

ここで N^ω および $J_0(Ur)$ は伝搬定数 β で導波される LP₀₁ モードの実効屈折率および電界分布関数を示し、コアの半径を a 、コアおよびクラッドの基本波に対する誘電率をそれぞれ ε_g^ω 、 ε_s^ω で表せば、

$$U = (\omega^2 \mu_0 \varepsilon_g^\omega - \beta^2)^{1/2} a, \quad W = (\beta^2 - \omega^2 \mu_0 \varepsilon_s^\omega)^{1/2} a$$

である。

コアとクラッドとの境界で、屈折率段差があること、すなわち、境界条件を考慮し、Green 関数の方法を利用して非線形分極(1)により発生する第二高調波振幅を求めた。求められた第二高調波からそのパワーを求めれば、

$$P^{2\omega} = 8\pi\omega^3 \mu_0 \varepsilon_0^2 d^2 C^2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} F(K) G(K) \frac{\sin^2[(2\beta - K)L/2]}{(2\beta - K)^2} dK \quad (3)$$

$$F(K) = \left| \int_0^a J_0(r\gamma) J_0(Ur)^2 r dr \right|^2 \quad (4)$$

$$G(K) = \text{Real}$$

$$\cdot \left\{ \frac{\eta N_0(a\gamma) H_1^{(1)}(a\gamma) - \gamma N_1(a\gamma) H_0^{(1)}(a\gamma)}{\eta J_0(a\gamma) H_1^{(1)}(a\gamma) - \gamma J_1(a\gamma) H_0^{(1)}(a\gamma)} \right\} \quad (5)$$

となる。ただし、 $\gamma^2 = 4\omega^2 \mu_0 \varepsilon_g - K^2$ 、 $\eta^2 = 4\omega^2 \mu_0 \varepsilon_s - K^2$ である。 $F(K)$ は非線形分極と高調波のコア内での界分布を反映する関数との積の積分であり、 $G(K)$ はコアとクラッドとの境界で高調波が反射することを反映し、境界で屈折率段差が無いならば $G(K) = 1$ である。導波される基本波の等価屈折率がクラッドの高調波に対する屈折率よりも小さく、チェレンコフ放射条件が満たされる場合には $G(K)$ は K に対する解析関数である。 $\sin^2[(2\beta - K)L/2]/(2\beta - K)^2$ は位相整合を表現し、高調波出力算出には z 方向の伝搬定数が 2β 近傍の放射光すべてを考慮する必要がある。またこの位相整合因子はファイバー長が mm 程度の長さにおいて $\pi L \delta(2\beta - K)/2$ に近似することができ(3)式からチェレンコフ放射光の出力は

$$P^{2\omega} = 4\pi^2 \omega^3 \mu_0 \varepsilon_0^2 d^2 C^2 L F(2\beta) G(2\beta) \quad (6)$$

と簡単な式で表すことができる¹⁵⁾。

3. 結晶コアファイバーの最適設計

3.1 有機非線形材料選定条件

有機結晶コアファイバー出力は(3)あるいは(6)式で表せることがわかったが、この節では算出式中の $F(2\beta)$ を考察し、出力を高めるための条件を導出する。 $F(2\beta)$ は非線形分極および高調波のコア内での分布を反映する二つのベッセル関数の積の積分である。非線形分極は弱導波された基本波の LP₀₁ モードに起因し、 r に対して緩やかに変化する故、定数で置き換え、積分を近似しても大きな誤差は生じない。この時 $F(2\beta) = (a^4/4) [2J_1(a\gamma_B)/(a\gamma_B)]^2 (\gamma_B^2 = 4\omega^2 \mu_0 \varepsilon_g - 4\beta^2)$ と計算される。積分値の γ_B に対する形状は、円形開口の回折像と同様なパターンとなり、 $\gamma_B = 0$ で最大となるフリンジを成す。

$a\gamma_B < 3.833$ ならば積分値は0次回折ピーク内の値をとることになり、そうでない場合と比べ大きな値となる。 $\gamma_B^2 = (4\pi/\lambda)^2 \{ (n_G^{2\omega})^2 - (N^\omega)^2 \}$ (λ は基本波の真空中での波長) であるから、上記の条件は

$$(n_G^{2\omega})^2 - (N^\omega)^2 < 0.093(\lambda/a)^2 \quad (7)$$

と表せる。この条件は結晶コアファイバーで高い変換効率を得るための素子設計に課せられた必要条件である。

また、条件(7)を満足する結晶コアファイバーでは変換効率のコア径依存性が小さく作製条件が緩いが、そうでない場合には、変換効率はコア径の変化に対してピークディップを持ち効率の低いことと併せて実用価値は低い¹⁵⁾。基本波に対するコアの屈折率 n_G^ω は LP₀₁ モード

Table 1 Selection of the organic nonlinear crystals for high conversion efficiency.

Core-crystal (nonlinear tensor)	Fundamental wavelength λ (μm)	Core radius a (μm)	$(n_G^{2\omega})^2 - (n_G^\omega)^2$	$0.093 (\lambda/a)^2$	
MNA (d_{11})	1.06	0.5	1.804	0.418	×
MBANP (d_{22})	1.06	0.5	0.493	0.418	×
DAN (d_{efi})	1.06	1.0	0.069	0.104	○
PCNB (d_{33})	1.06	0.5	0.320	0.418	○
DMNP (d_{32})	0.88	0.7	0.115	0.146	○

の等価屈折率 N^ω よりも必ず大きい故, (7) の条件からコア材料の屈折率に対する条件

$$(n_G^{2\omega})^2 - (n_G^\omega)^2 < 0.093 (\lambda/a)^2 \quad (8)$$

を導き出すことができる. この条件は有機結晶コアファイバに用いる材料の選定条件を示している. 積分値 $F(2\beta)$ にはファクタ $(a^4/4)$ があるため, 小さなコア径は高調波出力の向上の妨げとなる. コア径を波長と同じ程度に選んだ場合, (8) 式を満足する非線形材料は少ない. 有機非線形材料と利用する非線形テンソル成分に対して, 基本波の波長とコア半径を与えた場合, (8) 式を満足するかどうかについてまとめた結果を **Table 1** に示す. 2-methyl-4-nitroaniline (MNA)¹⁶⁾ は大きな非線形性をもつが, 屈折率の波長分散が大きく, 結晶コアファイバ材料としては望ましくないことがわかる. (一) 2-(α -methylbenzylamino)-5-nitropyridine (MBANP)¹⁷⁾ は吸収端が比較的短波長にあり屈折率分散が MNA に比較して小さいが, なお条件を満たさない. ここで MNA は d_{11} を MBANP は d_{22} を利用するコア内結晶配向を仮定した. 4-(N,N-dimethylamino)-3-acetamidonitrobenzene (DAN)^{18,19)} は d_{22} を有効に利用する配向が報告され, 複屈折により波長分散を補償できるため条件(8)を満たすことができる. 4-nitro-phenylcarbamic acid isopropylester (PCNB)²⁰⁾ は最近開発された材料であるが, 青色透明性が高く, 1.064 μm の波長変換では屈折率分散が小さいので, d_{33} を利用する配向を仮定しても条件を満たすことができる. d_{32} が最大成分である 3,5-dimethyl-1-(4-nitrophenyl)-pyrazol (DMNP)²¹⁾ はコア内で都合の良い配向をとり, この成分を完全に利用できる. しかも高調波が青色となる波長域で(8)の条件を満足するため, 半導体レーザーの波長変換用結晶コアファイバ材料として非常に有望である.

条件(8)を満たす, DAN, PCNB および DMNP を用いた結晶コアファイバの波長変換効率のコア半径依存性を **Fig. 1** に示す. これらの計算に際しては, 基本波の波長および導波パワーはそれぞれ 1064 nm および

40 mW とし, ファイバ長は 1 mm とした. また, 基本波がシングルモードとはならないコア径に対しては, LP₀₁ モードに 40 mW カップリングされると仮定し,

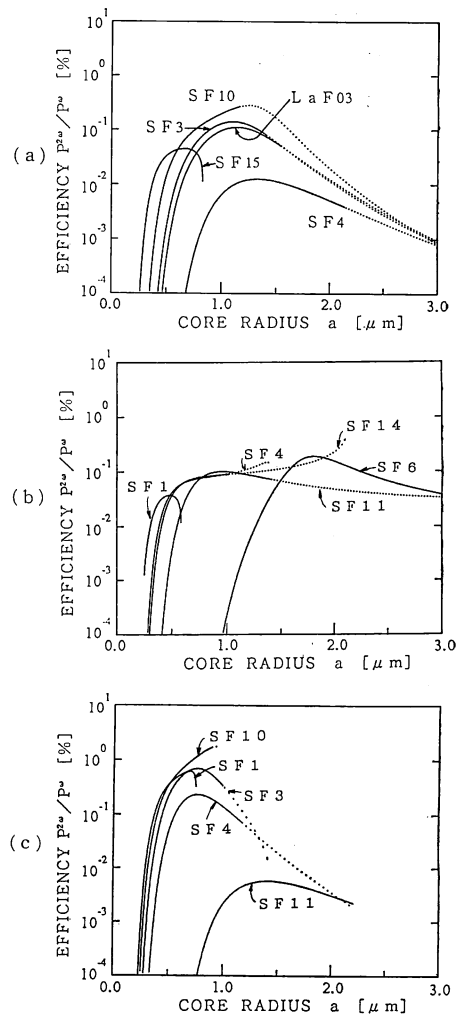


Fig. 1 Conversion efficiency $P^{2\omega}/P^\omega$ as a function of core radius a for several kinds of cladding glass and fundamental wavelength 1064 nm. (a) DAN, (b) PCNB, (c) DMNP.

さらにこの範囲は波線で示した. なお, DAN および DMNP の場合には報告されている配向を, PCNB では d_{33} を完全に利用する配向を仮定した. DAN を用いた結晶コアファイバーではクラッドガラスにフリントガラスである SF 10 を用いた場合大きな変換効率を得ることができる. PCNB, DMNP ではそれぞれ, SF 6, SF 10 をクラッドガラスに選択した場合, 大きな変換効率を得ることができる.

コア材料を条件(8)式で選定した後, クラッドガラスの選択によって大きく効率が変化することは, 高調波のパワーを与える(6)式中の他のファクター $G(2\beta)$ の寄与も大きいことを示唆している.

次の節では $G(2\beta)$ の振舞いについて考察し, ファイバーの最適設計条件を明らかにする.

3.2 変換波長選定条件

前節で述べたように $(n_c^{2\omega})^2 - (N^\omega)^2$ が負にならない範囲では, $F(2\beta)$ の値は γ_B を変数に持つ airy パターンから評価できるが, $(n_c^{2\omega})^2 - (N^\omega)^2$ が負の場合については新たに考察し直す必要がある.

非線形テンソルの非対角成分を利用するような材料をコア材料とした場合, 材料の複屈折性により, 基本波に対するコアの屈折率よりも第二高調波に対するコアの屈折率 $n_c^{2\omega}$ が小さいと, 導波する基本波の等価屈折率 N^ω よりも $n_c^{2\omega}$ が小さくなる場合があり得る.

この時, コア内での第二高調波は境界に沿った方向(ファイバー軸方向)の伝搬方向成分しかもたないが, クラッド内での放射角 θ はクラッドの高調波に対する屈折率 $n_s^{2\omega}$ が N^ω よりも大きいならば, $\cos\theta = N^\omega/n_s^{2\omega}$ で定められる. すなわちクラッド内の第二高調波はクラッドからコアに臨界角を越えて入射した光が全反射されたように放射される.

$(n_c^{2\omega})^2 - (N^\omega)^2$ が負の場合 γ_B は, 純虚数すなわち $\gamma_B = i\sigma_B$ であり, 高調波のコア内での界分布を反映するベッセル関数 $J_0(r\gamma_B)$ は $I_0(r\sigma_B)$ で置き換えることができる. $I_0(r\sigma_B)$ は r に関して単調増加関数であるから, 積分 $F(2\beta)$ の値は, $n_c^{2\omega}$ が N^ω に比べて小さいほど大きな値となる. この場合には $F(2\beta)$ の値は大きいにもかかわらず, 高調波出力は大きくならない. なぜならば, γ が純虚数 ($=i\sigma$) である場合には(5)式は以下のように変形され,

$$G(K) = \text{Real}$$

$$\cdot \left(\frac{i2\eta K_0(a\sigma)H_1^{(1)}(a\eta) - \sigma K_1(a\sigma)H_0^{(1)}(a\eta)}{\pi \eta I_0(a\sigma)H_1^{(1)}(a\eta) + \varepsilon I_1(a\sigma)H_0^{(1)}(a\eta)} \right) \quad (9)$$

$G(2\beta)$ の値は γ が実数である場合に比べて非常に小さくなるからである. これより(7)の条件は,

$$0 < (n_c^{2\omega})^2 - (N^\omega)^2 < 0.093(\lambda/a)^2 \quad (7a)$$

と修正される. この範囲で $G(2\beta)$ の値を最大になるようにコアおよびクラッドの屈折率をうまく選ぶことで最適設計が達成される. これを実例で示す.

コア材料に DMNP を用い, クラッドに SF 15 およ

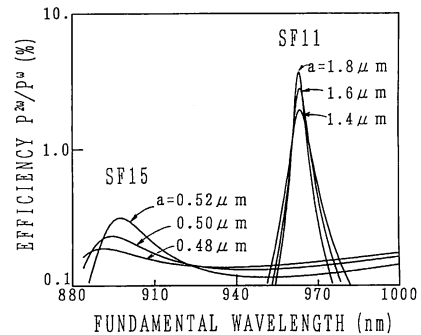


Fig. 2 Conversion efficiency $P^{2\omega}/P^\omega$ as a function of the fundamental wavelength taking core radius a as a parameter for the DMNP crystal-cored fibers with SF15 and SF11 glass cladding respectively.

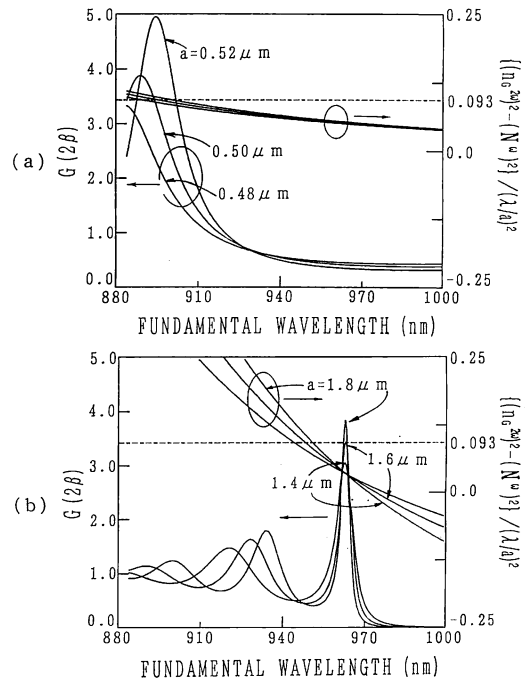


Fig. 3 $G(2\beta)$ and $\{(n_c^{2\omega})^2 - (N^\omega)^2\} / (\lambda/a)^2$ as a function of the fundamental wavelength taking core radius a as a parameter. (a) DMNP/SF15 fiber, (b) DMNP/SF11 fiber.

び SF 11 ガラスを用いた結晶コアファイバーの波長変換効率の基本波波長依存性をコア半径をパラメータとし計算し Fig. 2 に示した. この時, 基本波の導波パワー 40 mW, 素子長 1 mm とした. SF 11 ファイバーの場合, 900%/Wch もの変換効率を得られ, 許容波長半値幅 5 nm と擬位相整合素子の 25 倍も大きく InGaAs 系半導体レーザーを用いた青色光源素子として非常に有望である. この理由を明確にするために Fig. 3 に SF 15 および SF 11 ファイバーにおける $\{(ng^{2\omega})^2 - (N^{\omega})^2\}/(\lambda/a)^2$ および $G(2\beta)$ の基本波波長依存性を示した. DMNP/SF 15 ファイバーで 900 nm 以上の長波長域で条件 (7a) を満たしてはいるが, $G(2\beta)$ は 890 nm 付近で大きい. 一方, DMNP/SF 11 の場合では, 950 nm 以下および 975 nm 以上の波長域では条件 (7a) を満たさないため変換効率は小さいが, 960 nm 付近にある $G(2\beta)$ の極大付近では条件 (7a) を満たし, 変換効率が非常に大きくなっている. 以上のように, クラッドガラスと基本波の波長を適当に選び, 条件 (7a) を満足するとともに $G(2\beta)$ の極大を利用することで最適な設計が達成されることがわかった.

4. 結 言

位相整合が容易に達成され, 高い変換効率が期待できるチェレンコフ放射型位相整合を用いた有機結晶コアファイバーから放射される第二高調波の出力算出式を導出した. この算出式から, 高効率な結晶コアファイバーを設計するための必要条件を導いた. 併せて, 結晶コアファイバー用のコア材料として有用な, 非線形結晶の選定条件も明らかにすることができた. さらに, 上記の条件を満足する材料の一例として DMNP をコア材料に選び, クラッドガラス, 変換波長を最適に設定することで大きな変換効率を得られることを示し, この設計例を通じて, 素子の最適設計手法について述べた.

この素子を利用した短波長コヒーレント光源を実現するためにはアキシコンを使った波面変換光学系が必要であるが, 今回論じた設計指針は変換効率を主に考えたものであり, アキシコン利用法を含めた観点からの議論が必要であると思われる²²⁾.

現在のところ, 結晶コアファイバー用材料選定条件 (7a) を満足し LiNbO₃ の d_{33} を越える非線形定数をもつ材料は非常に少なく, しかも屈折率のデータが設計を行うほど十分でない, ファイバー内での結晶配向が不明である等, さまざまな制約があり, なかなか仕様通りの素子設計を行うことは難しい. 大きな非線形性をも

ちしかも屈折率分散の小さいことは青色透明性, コア内の結晶方位制御等とともに今後に課せられた課題であるが, これらの条件を備えもつ材料の出現を有機材料の多様性に期待し, 有機結晶コアファイバーが実用化されることを切望する.

最後に本研究に際し多くのご教示をいただいた慶応大学理工学部電気工学科梅垣真祐教授に感謝の意を表します.

文 献

- 1) H. Ito and H. Inaba: "Efficient phase-matched second-harmonic generation method in four-layered optical waveguide structure," *Opt. Lett.*, **2** (1978) 139-141.
- 2) N. Uesugi and T. Kimura: "Efficient second-harmonic generation in three-dimensional LiNbO₃ optical waveguide," *Appl. Phys. Lett.*, **29** (1976) 572-574.
- 3) H. Tamada, A. Yamada and M. Saitoh: "LiNbO₃ thin-film optical waveguide grown by liquid phase epitaxy and its application to second-harmonic generation," *J. Appl. Phys.*, **70** (1991) 2536-2541.
- 4) C. Poel, J. D. Bierlein and J. B. Brown: "Efficient type I blue second harmonic generation in periodically segmented KTiPO₄ (KTP) waveguides," *CLEO '90, CPDP 33-1/173* (1990).
- 5) K. Mizuuchi, K. Yamamoto and T. Taniuchi: "Blue-light generation by quasi-phase-matched second-harmonic generation in LiTaO₃," *CLEO '91, CTuV 3* (1991).
- 6) T. Suhara and H. Nishihara: "Theoretical analysis of waveguide second-harmonic generation phase matched with uniform and chirped gratings," *IEEE J. Quantum Electron.*, **26** (1990) 1265-1276.
- 7) K. Shinozaki, T. Fukunaga, K. Watanabe and T. Kamijoh: "Self-quasi-phase-matched second-harmonic generation in the proton-exchanged LiNbO₃ optical waveguide with periodically domain-inverted regions," *Appl. Phys. Lett.*, **59** (1991) 510-512.
- 8) T. Taniuchi and K. Yamamoto: "Second harmonic generation by Cherenkov radiation in proton-exchanged LiNbO₃ optical waveguide," *Tech. Digest of CLEO '86 WR3* (1986).
- 9) S. Umegaki, Y. Takahashi, A. Manabe and S. Tanaka: "Optical second-harmonic generation in an organic crystal-core fiber," *Extended Abstracts: Nonlinear Optical Materials* (ed. D. A. B. Miller, Proc. Symp. O, Fall Meeting of the Materials Research Society, 1985) pp. 97-99.
- 10) A. Harada, Y. Okazaki, K. Kamiyama and S. Umegaki: "Generation of blue coherent light from a continuous-wave semiconductor laser using an organic crystal-cored fiber," *Appl. Phys. Lett.*, **59** (1991) 1535-1537.
- 11) T. Uemiya, N. Uenishi, Y. Shimizu, S. Okamoto, K. Chikuma, T. Tohma and S. Umegaki: "Crystal-cored fiber using organic material and focusing properties of generated second-harmonic waves," *Nonlinear Optical Properties of Materials*, eds. H.

- Schlossberg and R. Wick (Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **1148** (1989)) pp. 207-212.
- 12) K. Chikuma and S. Umegaki: "Characteristics of optical second-harmonic generation due to Cerenkov-radiation-type phase matching," J. Opt. Soc. Am. B, **7** (1990) 768-775.
 - 13) K. Hayata, K. Yanagawa and M. Koshiha: "Field analysis of the Cerenkov doubling of infrared coherent radiation utilizing an organic crystal core bounded by a glass capillary," J. Appl. Phys., **68** (1990) 6033-6043.
 - 14) K. I. White and B. K. Nayar: "Second-harmonic generation in nonlinear fiber waveguides: efficient designs using radiation modes," J. Opt. Soc. Am. B, **5** (1988) 317-324.
 - 15) K. Chikuma and S. Umegaki: "Theory of optical second-harmonic generation in crystal-cored fibers based on phase matching of Cerenkov radiation type," J. Opt. Soc. Am. B, **9** (1992) 1083-1092.
 - 16) R. Morita, N. Ogasawara, S. Umegaki and R. Ito: "Refractive indices of 2-methyl-4-nitroaniline (MNA)," Jpn. J. Appl. Phys., **26** (1987) L1711-L1713.
 - 17) T. Kondo, R. Morita, N. Ogasawara, S. Umegaki and R. Ito: "A nonlinear optical organic crystal for waveguide SHG devices: (-)-2-(α -methylbenzylamino)-5-nitropyridine (MBANP)," Jpn. J. Appl. Phys., **28** (1989) L1622-L1628.
 - 18) P. Kerkoc, Ch. Bosshard, H. Arend and P. Günter: "Growth and characterization of 4-(N,N-dimethylamino)-3-acetamidonitrobenzene single-crystal cored fibers," Appl. Phys. Lett., **54** (1989) 487-489.
 - 19) P. Kerkoc, M. Zgonik, K. Sutter, Ch. Bosshard and P. Günter: "Optical and nonlinear optical properties of 4-(N,N-dimethylamino)-3-acetamidonitrobenzene single crystals," Appl. Phys. Lett., **54** (1989) 2062-2064.
 - 20) T. Hosomi, S. Katogi, M. Takashima and S. Miyata: "Efficient second harmonic generation in single crystal of 4-nitrophenylcarbamic acid isopropylester," 繊維学会宮崎基金国際シンポジウム: 第8回オプティックスとエレクトロニクスに関するシンポジウム予稿.
 - 21) 岡崎洋二: 特公平 3-10229.
 - 22) 竹間清文: "チェレンコフ放射型波長変換素子の解析", 光技術コンタクト, **28** (1990) 22-30.