

## 研究速報

## 差周波発生用積層型非線形光学結晶に関する考察

鈴木 健夫

NHK 放送科学基礎研究所 〒157 東京都世田谷区砧 1-10-11

(1984年7月10日受理)

## A Study on Periodically Laminated Nonlinear Optical Crystals for Defference Frequency Generation

Takeo SUZUKI

NHK Broadcasting Science Research Laboratories,  
1-10-11, Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo 157

A few problems are discussed about tunable far infrared generation using periodically laminated nonlinear optical crystals with CO<sub>2</sub> lasers. It is pointed out that tunable band width becomes broad as the coherent length  $L_c$  of nonlinear optical crystal is larger.

非線形光学結晶内で波長  $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  の光を混合して差周波に相当する波長  $\lambda_3$  の光を発生させることが知られている。  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  として色素レーザーを用いると  $\lambda_3$  はきわめて広い波長域をカバーすることができる。波長可変 CO<sub>2</sub> レーザー光を用いると  $\lambda_3$  は 100~1000  $\mu\text{m}$  程度に多少せばまるが、変換効率の最大値  $\eta$  を与えるマンローの関係式  $\eta = \lambda_1/\lambda_3$  により効率が向上することが期待される。このような系では入射光 ( $\lambda_1, \lambda_2$ ) と発生光 ( $\lambda_3$ ) の両者に対して透明領域を持ち、しかもなるべく非線形光学定数が大きい物質を用いることが好ましいということから GaAs などの結晶が用いられる。しかし、この結晶は光学的に等方なので複屈折を利用した位相整合をとることができない。そのため入射光、発生光ともに異なる方向をとる noncollinear な配置<sup>2)</sup>が用いられたが、この系では配置が複雑になるので collinear な系が扱いやすさの点で有利である。Thompson ら<sup>3)</sup>や岡田ら<sup>4)</sup>は第二次高周波発生に厚みがコヒーレント長  $L_c$  に等しい結晶の向きを交互にかえた積層型非線形素子を用いたが、これを差周波発生に collinear な系として用いた場合の問題点を考察したのでここに報告する。

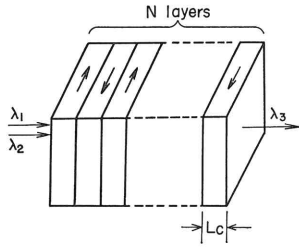
積層型非線形素子は関与する光の  $k$  ベクトルのミスマッチ  $\Delta k$  ( $\Delta k = k_1 - k_2 - k_3$ , ここで  $k_1, k_2$  は入射光の波数ベクトルの大きさ,  $k_3$  は差周波光の波数ベクトルの大きさ) によって決まるコヒーレント長  $L_c$  ( $L_c = \pi/\Delta k$ ) を単位の厚みとし、この厚みの結晶を非線形光学係数の符

号が交互に反対になるように積み重ねたもので、Fig. 1 にそれを模式的に示した。

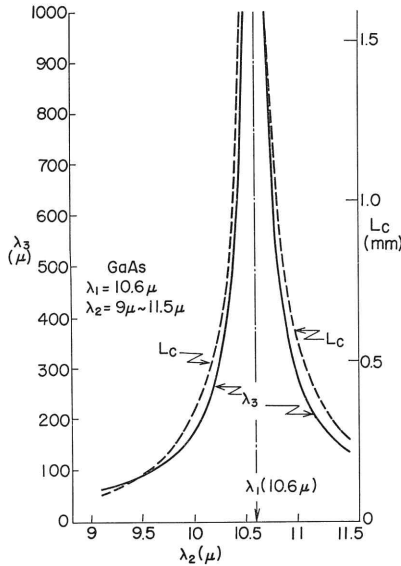
波長可変素子として用いた場合の第一の問題点は波長によって  $\Delta k$  が異なり、したがって  $L_c$  が変化することである。  $\Delta k$  は、  $\Delta k = c(n_1\omega_1 - n_2\omega_2 - n_3\omega_3)$  によって与えられる。ここで  $n$  は非線形結晶の屈折率、  $\omega$  は光の角周波数、添字 1, 2 は入射光, 3 は差周波の光を示す。CO<sub>2</sub> レーザーを入射光に用いる場合は、入射光はフォノン吸収バンドより短波長になり、発生光は吸収バンドより長波長になるので多くの結晶で

$$n_3 > n_1, n_2$$

が成立する。GaAs を用いた場合、入射光の一方を 10.6  $\mu\text{m}$ 、他方を 9.1  $\mu\text{m}$  から 11  $\mu\text{m}$  程度まで変化させた場合の  $\lambda_3$  と  $L_c$  を計算すると Fig. 2 のようになる。ここで屈折率は Johnson ら<sup>5)</sup>が報告した値を用いた。このような波長依存特性を持つため固定された結晶の厚み  $L_c$  に対しては差周波発生の変換率が変化することとなる。結晶の厚みが  $L_c$  からずれた場合の出力は岡田ら<sup>4)</sup>によって与えられている。出力波長  $\lambda_3$  が変化した場合に結晶の厚みが  $L_c$  からずれたことに対応させることができるので出力依存性を  $\lambda_3$  の関数として計算することができる。変換効率が小さく、入射光パワーの減少が無視できるときの一例を重合せの枚数  $N$  をパラメーターとして示すと Fig. 3 のようになる。縦軸は波長  $\lambda_3$  の相対的出力を示す。この図から明らかのように  $N$  が大きい



**Fig. 1** A structure of periodically laminated nonlinear optical crystal (schematic).

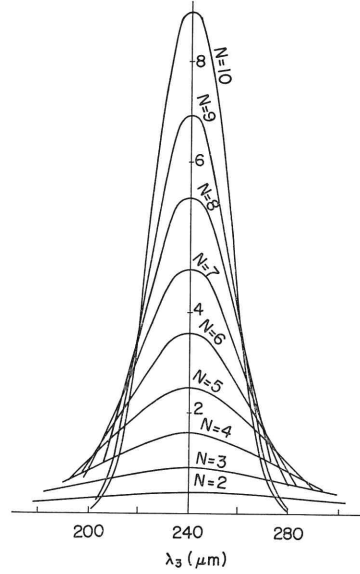


**Fig. 2** Coherent length  $L_c$  and  $\lambda_3$  of GaAs as a function of  $\lambda_2$ .  $\lambda_1$  is fixed at  $10.6 \mu\text{m}$ .

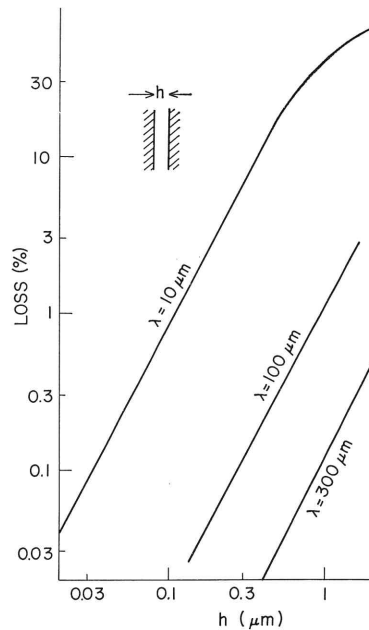
ほど出力は大きくなるのは結晶の全体の厚みが増すためであり、当然のことである。また、 $N$ が大きいほど、波長依存性が強くなる様子が現れているが、これはコヒーレント長と結晶の厚みのずれの効果が積み重なって大きな影響を与えるためであると解釈できる。

この例では隣り合う結晶面は optical contact されていると仮定したが、わずかな間隙  $h$  が存在する場合には反射損失が生じる。これを Born<sup>ら</sup>に従って計算すると **Fig. 4** のようになる。ただし結晶および間隙の屈折率をおのおの 3.5 および 1.0 とし、損失は 1 対の接する面で生じる量で示した。損失を  $\lambda \approx 100 \mu\text{m}$  で 1% 以内に抑えるには  $h$  は  $1 \mu\text{m}$  以下にする必要があることがわかる。反射損失の全体の大きさを少なくするためには間隙  $h$  を小さくすることと、面の数、したがって  $N$  を小さくすることが要求される。

以上のことから波長依存性をなるべく平坦にし、しか



**Fig. 3** Dependence of output power (in arbitrary unit) on  $\lambda_3$ .  $N$  is the number of layers.  $\lambda_1 = 10.6 \mu\text{m}$ .



**Fig. 4** Reflection loss due to air gap of thickness  $h$ . Refractive index of the crystal is assumed to be 3.5.

も損失を小さくするためには、全体の厚みを一定にした場合と比較すると、 $L_c$  の小さな結晶を枚数を多く積み重ねるよりは、 $L_c$  の大きな結晶を枚数を少なく積み重ねるのが得策といえる。

種々の結晶の分散特性<sup>7)</sup>から  $L_c$  を  $\lambda_3$  の関数として

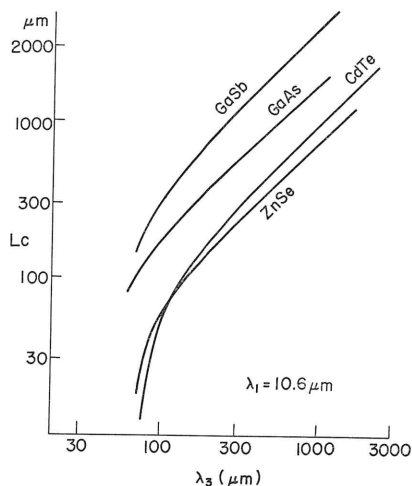


Fig. 5 Coherent length  $L_c$  of various materials as a function of  $\lambda_s$ .

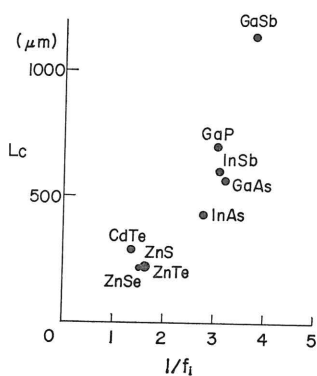


Fig. 6 Coherent length  $L_c$  as a function of reciprocal of ionicity  $f_i$  when  $\lambda_l = 10.6 \mu\text{m}$  and  $\lambda_s = 300 \mu\text{m}$ .

計算すると Fig. 5 のようになる。いずれも  $L_c$  の波長依存性はほぼ同様に大きい、その値は結晶によりかなりの差があることが認められる。 $L_c$  の大小は主としてフォノンに吸収バンドより短波長の光に対する屈折率と

長波長の光に対する屈折率の差に依存し、差が大きいほど  $L_c$  は小さくなる。換言すると低周波の誘電率  $\epsilon_0$  と高周波の誘電率  $\epsilon_\infty$  の差  $\epsilon_0 - \epsilon_\infty$  が大きいほど  $L_c$  が小さくなることを意味する。この差は結晶を構成する原子の結合のイオン性が強いほど大きくなり、共有性が強いほど小さくなるであろうことは容易に見当がつく。Fig. 6 は Philips の定義<sup>9)</sup>によるイオン性  $f_i$  の逆数と  $L_c$  の関係をプロットしたものであり、両者の間に強い相関が存在することが示されている。従来、非線形光学結晶の良否の判定に非線形光学係数と吸収係数が重要視されていたが、積層形で波長可変性が要求される場合にはこれと並んでコヒーレント長  $L_c$  の長いことが重要なポイントとして考慮される必要がある。そして、この  $L_c$  の大小については共有結合性の強い結晶ほど  $L_c$  が大きいということから定性的な予測が可能であるといえる。

この考察に関して NHK 放送科学基礎研究所の龍岡静夫元所長、同研究所岡田正勝主任研究員に有益な討論をしていただいたことを記して感謝の意を表する。

#### 文 献

- 1) M. Yamanaka, M. Wakamiya, M. Takada and H. Yoshinaga: *3rd Int. Conf. Submm. Waves and Their Appl.* (Univ. Surry, England, 1978) p. 61.
- 2) F.F. Geyer and H. Y. Fan: *J. Appl. phys.*, **50** (1979) 30.
- 3) D. E. Thompson, J. D. McMullen and D. B. Anderson: *Appl. Phys. Lett.*, **29** (1976) 113.
- 4) 岡田正勝, 滝沢國治, 家入勝吾: *NHK 技術研究*, **29** (1977) 25.
- 5) C. J. Johnson, G. H. Sherman and R. Weil: *Appl. Opt.*, **8** (1969) 1667.
- 6) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics* (Pergamon Press, 1959) p. 62.
- 7) T. Hattori, Y. Homma and A. Mitsuishi: *Opt. Commun.*, **7** (1973) 229.
- 8) J. C. Philips: *Bonds and Bands in Semiconductors* (Academic Press, New York and London, 1973) Chap. 2.