

热效应对光折变晶体两波耦合的特性影响的理论分析

吉选芒 王金来

(山西运城高等专科学校物理系, 运城 044000)

安毓英 刘劲松

(西安电子科技大学技术物理系, 西安 710071)

摘 要 用一种模型对两波耦合进行了分析, 导出了强度和相位的解析式。对影响两波耦合的参数进行了理论分析。分析了对 BaTiO₃ 光折变晶体的两波耦合的测量结果。

关键词 光折变晶体, 两波耦合, 耦合常数。

1 引 言

在光折变效应中, 两波耦合是一种最基本的非线性现象。以前, 大多数研究者在处理光折变晶体两波耦合时, 认为能量转移耦合常数与光强无关^[1, 2]。同时为了处理问题的方便, 也忽略了热激发速率的影响。但从最近的一些文献^[3]和本文作者的实验中, 发现一些光折变晶体, 如: KNSBN·Ce、BaTiO₃ 其耦合常数明显与光强有关, 同时发现热激发速率对两波耦合影响甚大。本文采用文献[3]中所用的模型, 该模型是 Ja^[4]首先提出的。在文献[3]中, 只推出了强度的表达式, 而没有给出相位的表达式。本文则给出了相位的解析表达式, 引入了饱和强度的概念。对影响两波耦合的诸参数进行了理论分析。用 BaTiO₃ 晶体两波耦合测量结果, 证明了 Ja 模型正确性。

2 两波耦合方程的修正及解析解

对于单边入射两波耦合, 耦合波强度方程为:^[5]

$$\frac{dI_1}{dZ} = -\frac{\Gamma I_1 I_2}{I_1 + I_2} - \alpha I_1 \quad (1)$$

$$\frac{dI_2}{dZ} = \Gamma \frac{I_1 I_2}{I_1 + I_2} - \alpha I_2 \quad (2)$$

相位方程为:

$$\frac{d\psi_1}{dZ} = \frac{\Gamma I_2}{I_1 + I_2} \quad (3)$$

$$\frac{d\psi_2}{dZ} = \frac{\Gamma' I_1}{I_1 + I_2} \quad (4)$$

式中, I_1 、 I_2 分别为晶体中泵浦光和信号光的强度, Γ 和 Γ' 分别为强度耦合常数和相位耦合常数。考虑热激发的影响时, 利用 $\text{Ja}^{[4]}$ 模型, 可以将 Γ 和 Γ' 修正为如下形式:

$$\Gamma = \frac{\Gamma_s(I_1 + I_2)}{(I_1 + I_2 + I_s)} \quad (5)$$

$$\Gamma' = \Gamma'_s \frac{(I_1 + I_2)}{(I_1 + I_2 + I_s)} \quad (6)$$

Γ_s 、 Γ'_s 分别为强度耦合常数和相位耦合系数饱和值。 $I_s = \beta/s$ 称为饱和光强, β 为材料的热激发速率, s 为光电离常数。这样, (1)~(4) 式可变为:

$$\frac{dI_1}{dZ} = - \frac{\Gamma_s I_1 I_2}{(I_1 + I_2 + I_s)} - \alpha I_1 \quad (7)$$

$$\frac{dI_2}{dZ} = \frac{\Gamma_s I_1 I_2}{(I_1 + I_2 + I_s)} - \alpha I_2 \quad (8)$$

$$\frac{d\psi_1}{dZ} = \frac{\Gamma'_s I_2}{(I_1 + I_2 + I_s)} \quad (9)$$

$$\frac{d\psi_2}{dZ} = \frac{\Gamma'_s I_1}{(I_1 + I_2 + I_s)} \quad (10)$$

经过求解方程(7)~(10) 式, 可得到:

$$I_1(Z) = \frac{I_1(0)(1 + m^{-1}) \exp(-\alpha Z)}{1 + b^{(-\Gamma_s/\alpha)}/m} \quad (11)$$

$$I_2(Z) = \frac{I_2(0)(1 + m) \exp(-\alpha Z)}{1 + mb^{\Gamma_s/\alpha}} \quad (12)$$

式中, $m = I_1(0)/I_2(0)$ 为入射光的泵浦与信号比。 $I_0 = I_1(0) + I_2(0)$ 为入射总光强。

$$b = [I_0 \exp(-\alpha Z) + I_s]/(I_0 + I_s)$$

把 $I_1(z)$ 、 $I_2(z)$ 直接代入(9) 式和(10) 式, 然后积分, 可以得到:

$$\psi_1(Z) - \psi_1(0) = \frac{\Gamma'_s}{\Gamma_s} \ln \frac{m + (1 + \beta/sI_0)^{\Gamma_s/\alpha} [\exp(-\alpha Z) + \beta/sI_0]^{-\Gamma_s/\alpha}}{1 + m} \quad (13)$$

$$\psi_2(Z) - \psi_2(0) = \frac{\Gamma'_s}{\Gamma_s} \ln \frac{1 + m}{1 + m(1 + \beta/sI_0)^{-\Gamma_s/\alpha} [\exp(-\alpha z) + \beta/sI_0]^{\Gamma_s/\alpha}} \quad (14)$$

当 $I_s/I_0 \ll 1$ 时, 上述解可回到文献[5] 给出的解析解。

由(12) 式可导出信号光有效增益:

$$\eta = \frac{1 + m}{1 + mb^{\Gamma_s/\alpha}} \quad (15)$$

如果 $I_s/I_0 \ll 1$, (15) 式变为:

$$\eta = \frac{1 + m}{1 + m \exp(-\Gamma_s d)} \quad (16)$$

(16) 式就是通常人们在忽略热激发时推出的解析表达式。

3 热效应对光折变晶体两波耦合的特征影响的理论分析

图 1 给出了信号光 $I_2(d)$ 与晶体厚度的变化关系曲线, 以 I_s 为参变量 ($I_s = 0, 10^2, 10^3, 10^4$), 其它参数取 $m = 10, I_0 = 1000 \text{ (W/m}^2\text{)}, \Gamma_s = 10 \text{ cm}^{-1}, \alpha = 1 \text{ cm}^{-1}$ 。由图可见, 由于吸收系数的存在, 在总入射光强固定情况下, 晶体应有一个最佳厚度, 才能获得最大的信号光。 I_s 越大, 信号光受到的影响越显著。

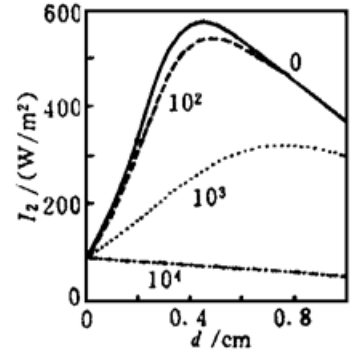


Fig. 1 The dependence of the intensity of output signal beam from the crystal on the thickness of the crystal

图 2 给出了利用(15)式计算的信号光有效增益随入射总光强的变化关系, 以 I_s 为参变量。其中 $m = 1, d = 1 \text{ cm}, \Gamma_s = 5 \text{ cm}^{-1}, \alpha = 1 \text{ cm}^{-1}$ 。利用本文提出的模型, I_s 取 0 和任何正的数值, 从微分方程得到的解析解都成立。但从实验上来看, 热激发对两波耦合的总体影响是非相干的擦除作用, 只有在 I_s 的作用小于相干作用情况下, 两波耦合效果在实验上才会十分明显。为了理论分析的需要, 分别选取 I_s 为 0、10、 10^2 、 $10^3 \text{ (W/m}^2\text{)}$ 四个数值, 计算了四条有效增益 η 随 I_0 的变化关系。考虑到 $I_0 \ll I_s$ 情况, 两波耦合难以发生, 同时为了理论能解释实验现象的需要, 每条曲线的 I_0 取值范围应加以限定。由图 2 可以看出, 在 I_0 较 I_s 小时, 两波耦合效果不明显。而当 $I_0 = I_s$ 时, 有效增益变化的斜率最大。当 $I_0 \gg I_s$ 时, 有效增益趋于饱和。当 $I_s = 0$ 时, 则 η 与 I_0 无关。 η 达到饱和值所需总入射光强 I_0 随 I_s 增大而增大, 在同一光强下, η 随 I_s 增大而减小。在实验中拟合出的 I_s 值 68.5 W/m^2 与理论计算中的 I_s 为 10、 10^2 、 $10^3 \text{ (W/m}^2\text{)}$ 是没有联系的。

图 3 给出了用(14)式计算出的信号光的相位差 $\psi_2(d) - \psi_2(0)$ 与入射光泵浦与信号比 m 的关系。图中以饱和强度 I_s 为参变量, $d = 0.45 \text{ cm}, I_0 = 1000 \text{ (W/m}^2\text{)}, 2\Gamma_s = \Gamma_s = 10 \text{ cm}^{-1}, \alpha = 1 \text{ cm}^{-1}$ 。由图可见, 随着泵浦与信号比 m 的增大, 相位差呈非线性增大的关系。饱和和光强 I_s 越大, 相位差增加愈缓慢。

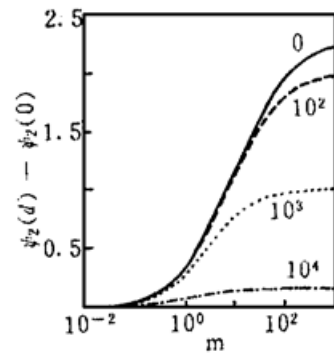
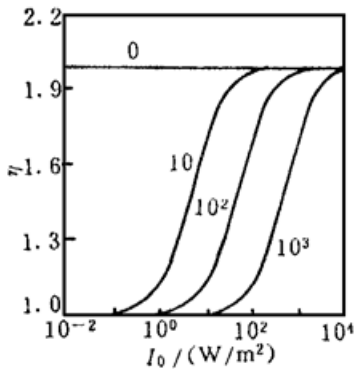


Fig. 2 The dependence of the gain of signal beam on the total incident intensity

Fig. 3 The dependence of the phase difference of signal beam on the initial ratio

4 BaTiO₃ 晶体两波耦合实验结果

用 BaTiO₃ 晶体进行两波耦合实验, 测量信号光的有效增益在不同入射总光强 I_0 下的变化关系, 如图 4 中的黑点所示。

实验中选取两入射光束夹角为 16° ，晶体尺寸为 $5 \times 4 \times 3 \text{ mm}^3$ 。通光方向厚度 $d = 5 \text{ mm}$ 。将入射总光强从很弱调节到将近 1000 W/m^2 ，保持 $m = 1.5$ ，实验中测出吸收系数 $\alpha = 1.91 \text{ cm}^{-1}$ ，饱和耦合常数 $\Gamma_s = 2.9 \text{ cm}^{-1}$ ，理论拟合得出饱和强度 $I_s = 68.5 \text{ W/m}^2$ 。从图 4 可以看出，用 (15) 式拟合曲线与实验点符合的较好。这说明 Ja 模型用来解释两波耦合有效增益的强度特性是成功的。

结 论 本文用 Ja 模型，在文献[3]工作的基础上，推出了两波耦合强度和相位的解析表达式，并对所得结果进行了理论分析，进一步用 BaTiO_3 晶体两波耦合实验结果，证明了该模型在处理强度特性时的正确性。

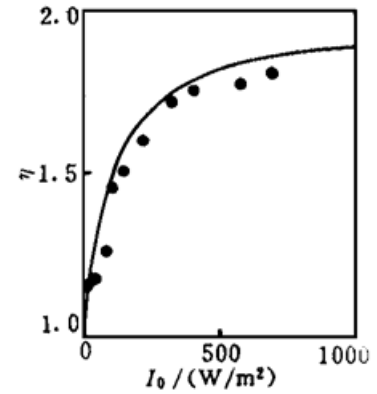


Fig. 4 Experimental and theoretical results for the dependence of the two-wave mixing gain on the total intensity in BaTiO_3 crystal

参 考 文 献

- [1] Pochi Yeh, Two-wave mixing in nonlinear media. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **QE-25**(3) : 484~497
- [2] N. V. Kukhtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov *et al.*, Holographic Storage in electro optic crystal. *I. Steady State. Ferroelectrics*, 1979, **22** : 949~ 960
- [3] 朱瑞德, 王 韧, 谭健华等, 掺杂的铌酸钾钠锆钡晶体二波耦合增益系数的研究. *物理学报*, 1992, **41** (9) : 1444~ 1445
- [4] Y. H. Ja, Intensity dependence of stationary energy transfer in degenerate two-wave mixing in a reflection geometry with photorefractive crystals. *Opt. & Quantum Electron.*, 1985, **17**(4) : 291~ 295
- [5] 刘思敏, 郭 儒, 凌振芳, 光折变非线性光学. 北京, 中国标准出版社, 1992, **12** : 60~ 63

The Effect of Physical Parameters on Two-Beam Mixing in Photorefractive Crystal

Ji Xuanmang Wang Jinlai

(Department of Physics, Yuncheng Advanced Training College, Yuncheng 044000)

An Yuying Liu Jinsong

(Applied Physics Department, Xidian University, Xi'an 710071)

(Received 10 April 1996; revised 5 May 1997)

Abstract The analytical expression for the intensity and phase through two-wave coupling in photorefractive crystal is deduced with a simple model. The effect of parameters on the two-wave mixing was analyzed theoretically. The experimental data of two-wave mixing in BaTiO_3 crystal are discussed.

Key words photorefractive crystal, two-wave mixing, coupling constant.