

文章编号 : 0253-2239(2001)06-0737-04

光擦除双光束耦合多级光探测器的研究*

吉选芒 王金来

(山西运城高等专科学校物理系,运城 044000)

刘劲松 安毓英

(西安电子科技大学技术物理学院,西安 710071)

摘要: 基于光擦除和双光束耦合的基本原理,提出了一种多级光探测的方法。用带导模型和耦合波方程建立了理论公式。用三块 Ce:KNSBN 晶体和 He-Ne 激光进行了实验演示。理论分析与实验研究均表明所提出的方法是可行的。

关键词: 光擦除;双光束耦合;多级光探测

中图分类号:TB96 文献标识码:A

1 引 言

为了探测微弱光信号,如能在光电探测器前端先对光进行放大,则能极大地降低对光电探测器各项指标的要求。光放大技术大致可分为强光放大和弱光放大。前者主要针对大功率激光技术,如激光焊接、激光核聚变等。后者主要针对微弱激光探测、光计算等。现有的弱光放大技术包括注入放大技术、光纤放大技术以及基于非线性光学的耦合波放大技术等。前两者的光放大机理是先通过电或者光激励介质使其达到粒子数反转,然后对入射的微弱光信号进行放大。优点是技术较为成熟,不要求入射光与系统内部的激励光是否相干,缺点是结构较为复杂,能量利用率较低。耦合波放大技术是近年来随着光折变非线性光学的发展而形成的一种对微弱光信号进行放大的非常有效的技术。但这种技术却要求被放大的光与系统内部的激励光是相干的,否则系统对信号不响应,从而极大地限制了这种技术的应用。此外,在小信号工作时能量利用率不高是其另一缺点。如能克服这一弱点便可得到一种行之有效的弱光探测放大新技术。为此,基于光折变非线性光学中的光擦除和双光束耦合这两个物理过程,我们提出了一种新方案——光擦除双光束耦合多级光探测器新技术。理论和实验均证明本方案是可行的。

2 基本原理和实验演示

图 1 是我们提出的光擦除双光束耦合多级光探测器原理图。

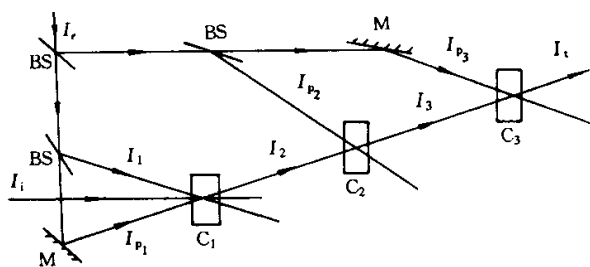


Fig. 1 Configuration of multi-stage optical detection with an optically erased two-beam coupling

系统的总光强 I_e 经分束镜 BS 和全反镜 M 分为 I_1 、 I_{p1} 、 I_{p2} 和 I_{p3} 。 I_2 、 I_3 、 I_t 分别是 I_{p1} 、 I_2 和 I_3 从晶体 C_1 、 C_2 、 C_3 透射出的光强。适当安排光路,使 I_1 和 I_{p1} 、 I_2 和 I_{p2} 、 I_3 和 I_{p3} 分别在晶体 C_1 、 C_2 和 C_3 中相干涉而进行双光束耦合。 I_1 、 I_2 、 I_3 是信号光, I_{p1} 、 I_{p2} 、 I_{p3} 是抽运光。这时用与 I_1 和 I_{p1} 都不相干的一束光 I_i 照射到晶体 C_1 上, I_i 就是我们要探测的外来光。它可对晶体 C_1 中的 I_1 和 I_{p1} 形成的折射率光栅进行擦除,从而降低了 C_1 中的双光束耦合效率,减小了从抽运光 I_{p1} 转向信号光 I_1 的能量,从而使 I_2 增大。这样用被探测的光信号来照射晶体 C_1 ,就可以将弱光信号响应到系统中来,为后面的放大系统提供输入信号。 I_i 与 I_1 和 I_{p1} 同时照射到晶体

* 国防科技预研基金资助项目。

C_1 上实现了光擦除双光束耦合, I_i 为擦除光, I_1 和 I_{p1} 为双光束耦合的光束, 这样的作用可实现非相干光对相干光的控制作用。为了使这种光擦除作用明显可测, 就要求 I_1 和 I_{p1} 必须是同等的微弱。因此 I_2 和 I_1 之间也是同等微弱的。通过晶体 C_1 进行光擦除双光束耦合, 只解决了被探测光的响应和信息转载, 并未解决放大的问题。为此, 首先让 I_{p2} 和 I_2 在晶体 C_2 中进行双光束耦合, 让 C_2 工作在小信号状态, 可以提高放大倍数, 但 I_{p2} 向 I_2 的能量转移较低。为了进一步提高放大倍数, 可用第三块晶体 C_3 , 让 I_{p3} 和 I_3 在 C_3 中进行双光束耦合, 从而可以得到较大的输出信号 I_t 。这就是由三块光折变晶体和适当光路组成光擦除双光束耦合多级光探测器的原理。

实验装置如图 2 所示。

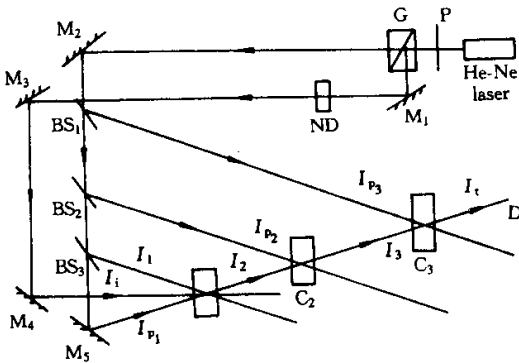


Fig. 2 Experimental setup for studying the optically erased two-beam coupling multi-stage optical detection with three Ce:KNSBN crystal

所用的 He-Ne 激光器的功率为 35 mW, 波长为 632.8 nm。G 为格兰棱镜, $M_1 \sim M_5$ 为全反镜。BS₁、BS₂ 和 BS₃ 为分束镜。C₁、C₂ 和 C₃ 为三块 Ce:KNSBN 晶体。C₁ 的尺寸为 5 mm × 5 mm × 5 mm, C₂ 为 5 mm × 8 mm × 5 mm, C₃ 为 10 mm × 10 mm × 2 mm。D 为功率计, P 为 $\lambda/2$ 波片。ND 为中性密度滤波器, 用以调节被探测信号 I_i 的大小。光路的安排使 I_1 与 I_{p1} 、 I_2 与 I_{p2} 、 I_3 与 I_{p3} 分别在 C₁、C₂、C₃ 中相耦合。实验中 $I_0 = I_1 + I_{p1} = 150 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, $I_p = 850 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, $m = 2.2$ 。实验结果如图 3 中黑圆点所示。结果表明, 擦除光 I_i 可以较好地控制 I_t 的输出。尤其在 I_i 与 I_0 同量级情况下, I_t 随 I_i 变化的特性最好。当擦除光 I_i 较大时, 对 C₁ 中折射率光栅擦除强烈而使 I_t 强度趋于饱和。选取合适的 I_0 , 系统有较好的探测放大作用。增益不高是由于 I_p 选取较小,

另外晶体的增益系数不大也是一个影响因素。

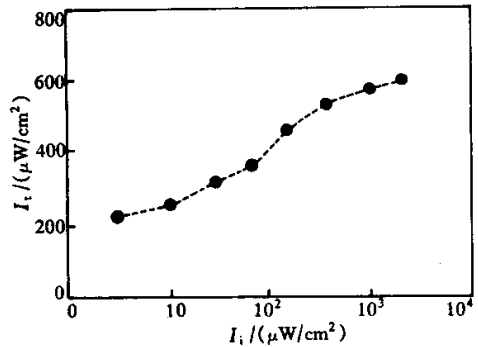


Fig. 3 Output intensity I_t as a function of erasing light intensity I_i for $I_0 = 150 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, $I_p = 850 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ and $m = 2.2$

3 理论分析

在晶体 C_1 中, I_1 和 I_{p1} 进行双光束耦合, 考虑热激发影响后, 满足的耦合波方程为^[1-3]

$$\frac{dI_{p1}}{dz} = -\frac{\Gamma_{s1}}{I_a + I_{s1}} I_{p1} I_1 - \alpha_1 I_{p1}, \quad (1)$$

$$\frac{dI_1}{dz} = \frac{\Gamma_{s1}}{I_a + I_{s1}} I_{p1} I_1 - \alpha_1 I_1, \quad (2)$$

而擦除光 $I_i(z)$ 满足方程

$$dI_i/dz = -\alpha_1 I_i, \quad (3)$$

其中 $I_a = I_{p1}(z) + I_1(z) + I_i(z)$ 为 C_1 内总光强。设

$$A = \frac{I_{s1} + I_0 + I_i}{I_{s1} + (I_0 + I_i) \exp(-\gamma_1)},$$

结合边界条件, 求解 (1) 式~(3) 式可得出第一块晶体 C_1 的输出 I_2 的表达式为

$$I_2 = I_{p1}(d) = \frac{I_0 \exp(-\gamma_1)}{1 + m^{-1} A^{g_1} I_0 / (I_0 + I_i)}, \quad (4)$$

在晶体 C_2 和晶体 C_3 中有和 (1) 式、(2) 式形式一致的耦合波方程。在 C_2 中, I_2 和 I_{p2} 满足方程

$$\frac{dI_{p2}}{dz} = -\frac{\Gamma_{s2}}{I_{02} + I_{s2}} I_{p2} I_2 - \alpha_2 I_{p2}, \quad (5)$$

$$\frac{dI_2}{dz} = \frac{\Gamma_{s2}}{I_{02} + I_{s2}} I_{p2} I_2 - \alpha_2 I_2, \quad (6)$$

其中 $I_{02} = I_{p2}(0) + I_2(0)$ 。

设

$$B = \frac{(I_2 + I_{p2}) \exp(-\gamma_2) + I_{s2}}{I_2 + I_{p2} + I_{s2}},$$

结合边界条件, 求解上述两波耦合波方程^[3,4], 可得晶体 C_2 的输出 I_3 :

$$I_3 = \frac{I_2 + I_{p2}}{I_2 + I_{p2} B^{\beta_2}} I_2 \exp(-\gamma_2). \quad (7)$$

同理, 设

$$Q = \frac{(I_3 + I_{p3}) \exp(-\gamma_3) + I_{s3}}{I_3 + I_{p3} + I_{s3}},$$

求解晶体 C_3 中的耦合波方程, 可得 C_3 的输出 I_t 的表达式:

$$I_t = \frac{I_3 + I_{p3}}{I_3 + I_{p3} Q^{\beta_3}} I_3 \exp(-\gamma_3). \quad (8)$$

上述各式中

$$I_0 = I_{p1} + I_1, \quad m = I_{p1}/I_1, \quad g_k = \Gamma_{sk}/\alpha_k,$$

$$\gamma_k = \alpha_k d_k, \quad I_{sk} = p_k/S_k, \quad k = 1, 2, 3,$$

Γ_s 为晶体双光束耦合指数增益系数, α 为吸收系数, I_s 为饱和强度, β 为热激发速率, S 为光电离常数。下标 1、2、3 分别代表晶体 C_1 、 C_2 、 C_3 。 g_k 称为晶体品质参数, γ_k 为晶体的吸收系数与晶体厚度的乘积。

下面我们对一种最为简单的三级光擦除双光束耦合探测器的输入输出特性进行分析。

设三块晶体的品质参数一样: $g_1 = g_2 = g_3 = g$ 。吸收系数与厚度乘积 γ 也一样, 即令 $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma$ 。饱和强度也一样, 即令 $I_{s1} = I_{s2} = I_{s3} = I_s$ 。

设

$$I_p = I_{p2} + I_{p3}, \quad \eta = I_{p3}/I_{p2},$$

则有

$$I_{p2} = I_p/(1 + \eta), \quad I_{p3} = \eta I_p/(1 + \eta). \quad (9)$$

图 4 给出了利用(4)式、(7)式、(8)式、(9)式计算出的输出强度 I_t 随擦除光 I_i 在不同参数下的理论曲线。其中 I_t 、 I_i 、 I_{p2} 和 I_{p3} 以及 I_s 的单位均为 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。

图 4(a) 是以 I_p 为参变量, $g = \Gamma_s/\alpha = 7$ 、 $I_0 = I_{p1} + I_1 = 10$ 、饱和强度 $I_s = 1$ 、 $\eta = I_{p3}/I_{p2} = 10$ 情况下输出光强 I_t 随擦除光 I_i 变化关系。从中可以看出, 在同一擦除光 I_i 的情况下, I_p 越大, 输出信号 I_t 就越大; 而在同一 I_p 情况下, I_t 随 I_i 的增强而增强, 最终趋于饱和。在 I_i 从 1 ~ 100 范围内, I_i 对 I_t 的控制效果最好, 放大倍数最大。图 4(b) 是以 $g = \Gamma_s/\alpha$ 为参变量, $I_p = 10^4$ 、 $I_s = 1$ 、 $I_0 = 10$ 、 $\eta = 10$ 条件下 I_t 随 I_i 的变化曲线。同一 I_i 情况下, g 越高, I_t 就愈大。在 g 不变情况下, I_t 随 I_i 的变化关系也呈截止、增加而到饱和的变化特征。同样在 I_i 以 1 ~ 100 范围内, I_i 对 I_t 的控制效果最佳。图 4(c) 给出了以 I_s 为

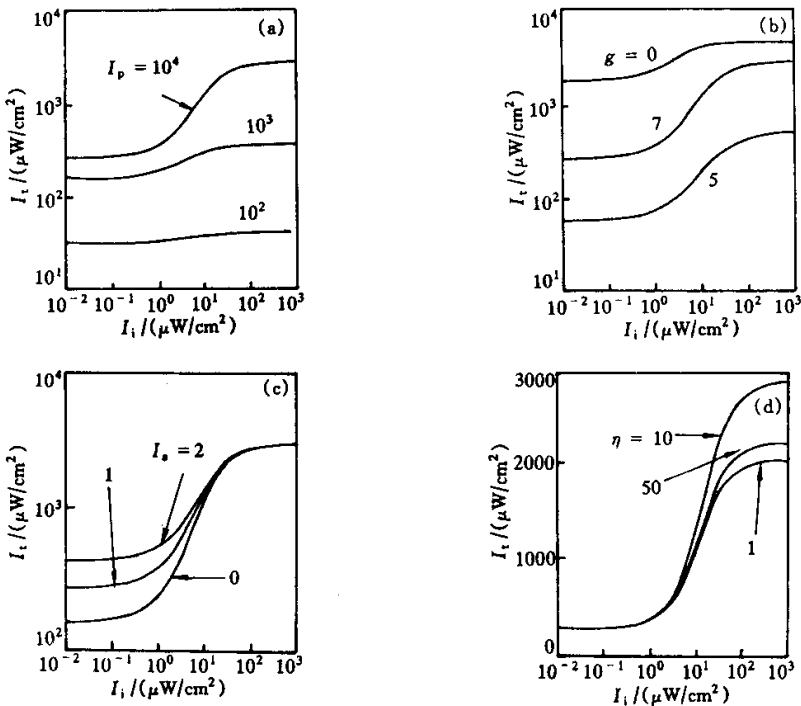


Fig. 4 Output intensities I_t as a function of I_i for an optically erased two - beam multi - stage optical detection configuration with $\gamma=0.7$, $m=1$. (a) $g=7$, $I_0 = 10$, $I_s = 1$, $\eta = 10$; (b) $I_p = 10^4$, $I_s = 1$, $I_0 = 10$, $\eta = 10$; (c) $I_p = 10^4$, $I_0 = 10$, $\eta = 10$, $g = 7$; (d) $g = 7$, $I_0 = 10$, $I_s = 1$, $I_p = 10^4$

为参变量、 $I_p = 10^4$ 、 $I_0 = 10$ 、 $\eta = 10$ 、 $g = 7$ 的情况下, I_t 随 I_i 的变化关系。由图可见, 热激发对晶体的光折变性能影响较大。若忽略热激发的影响, 增益特性则更好。图 4(d) 给出了以 η 为参变量, $g = 7$ 、 $I_0 = 10$ 、 $I_s = 1$ 、 $I_p = 10^4$ 情况下, I_t 随 I_i 的变化关系。很明显, C_2 和 C_3 的抽运光的分配对整个系统输出曲线有较大影响。可以看出, 合理配置 I_{p3} 和 I_{p2} 的比值可以使整个系统有最佳的输出效果。

结论 基于光擦除折射率光栅和双光束耦合这两个基本的物理过程, 提出了一种多级光探测放大的方案。实验和理论都证实利用晶体的光折变非线性光学特性可实现光擦除双光束耦合多级探测放大的作用。由于该器件的入射光 I_i 同其内部的光不相干, 本工作为不相干光之间的相互控制以及光对光的非线性调制提供了一种可行的方式。由于非相干光源发出的非相干光亦可作为擦除光来使用, 故用该器件还可实现非相干光对相干光的控制与调制。该方

案具有许多潜在的应用前景。如果作为开关或应用于时域信息处理, 则需要拥有响应与衰减速度非常快的光折变晶体。这点有待于现有材料的改进和新材料的开发。就目前而言, 光折变半导体是较为理想的材料。另外通过加热^[4]可改变材料的光折变性能。高分子聚合光折变材料的开发也是另一个有潜力的研究方向。

参 考 文 献

- [1] Ja Y H. Intensity dependence of stationary energy transfer in degenerate two-wave mixing in a reflection geometry with photorefractive crystals. *Opt. and Quant. Electron.*, 1985, **17**(4) 291~295
- [2] Yeh P. Two-wave mixing in nonlinear media. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **QE-25**(3) 484~497
- [3] 吉选芒, 王金来, 安毓英等. 热效应对光折变晶体两波耦合的特性影响的理论分析. *光学学报*, 1998, **18**(3): 291~294
- [4] 吉选芒, 安毓英, 刘劲松. Ce:KNSBN 晶体的热激发速率的温度特性. *物理学报*, 1997, **46**(5) 915~918

Study of Multi-Stage Optical Detection with Optically Erased Two-Beam Coupling

Ji Xuanmang Wan Jinlai

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

Liu Jinsong An Yuying

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071)

(Received 22 October 1999; revised 4 April 2000)

Abstract: The method of multi-stage optical detection is presented based on the principle of optically erasing and two-beam coupling. The theoretical formula about the device is built by using the coupling wave equation and band-transport model. An experimental demonstration is done by using Ce:KNSBN crystals and He-Ne laser. The feasibility of the method is proved by theoretical analysis and experimental demonstration.

Key words: optically erasing; two-beam coupling; multi-stage optical detection