

BSO 晶体空间光学双稳态*

盛秋琴 董孝义 张海宁 高立模 金发宏 夏顺保
(南开大学物理系, 天津 300071)

摘 要 在理论上预言了一种新的参量空间光学双稳态, 即以偏置电压为输入参量、 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) 晶体输出的高斯光束远场光斑中心点的光强为输出参量和输入高斯光束功率为常量的一种光学双稳态。并且在实验中分别实现了正偏置和反偏置两种情况下的偏置双稳态。

关键词 BSO 晶体, 自聚焦效应, 光学双稳态。

作者在实验中发现, 在 BSO 晶体的通光方向上加一直流电场, 电场能强烈地影响 BSO 晶体的自聚焦, 如果在晶体后加一小孔径光阑, 则能观察到电场对入射光进行的非线性调制。因此, 当加上正反馈时, 能够形成空间双稳态。这种空间双稳态原理简单, 效应丰富, 可望在高技术领域中得到重要应用。

1 电控自聚焦效应对通过 BSO 晶体的高斯光束远场光斑中心光强的非线性调制

设入射高斯光束的束腰半径为 ω 。当在 BSO 晶体的通光方向加一电压 V 时, 由于电控自聚焦的作用, 激光束经过 BSO 晶体后的焦距 f 与入射光功率 P_0 和电压 V 的关系式^[1]

$$f = \frac{b}{P_0(h + V^2)} \quad (1)$$

式中 h 为表征热效应大小的常数, b 为与 BSO 晶体折射率、光吸收系数、热导系数、光电导系数、入射激光束腰半径和晶体厚度等有关的常数。在电控自聚焦效应作用下, 距离 BSO 晶体后 z_1 处的高斯光束的远场光斑中心点的光强 I_0 与入射光功率 P_0 , 及加在晶体通光方向上的电压 V 的关系式为^[2]

$$I_0 = \frac{2K_s P_0^3 (h + V^2)^2}{d^2} \left[1 + \left[\frac{[2P_0^2(z_1 - b/(h + V^2))](h + V^2)^2}{\kappa d^2} \right] \right]^{-1} \quad (2)$$

式中 $d = \lambda b / \pi \omega$ 。 K_s 为与晶体吸收系数有关的常数。在实际情况下, 晶体厚度为 10 mm, $z_1 = 7.9$ m, $\omega = 2.2$ mm, $\lambda = 514.5$ nm, $b =$

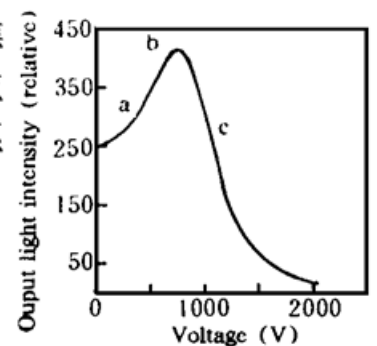


Fig. 1 $I_0 \sim V$ curve ($P_0 = 150$ mW)

* 国家自然科学基金资助和天津自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1995年9月21日; 收到修改稿日期: 1996年2月5日

3. $12 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{mW}$, $h = 2.8 \times 10^6 \text{ V}^2$, $K_s = 2.9 \times 10^{-10}$ 。由(2)式绘出的远场光斑中心点的光强与加在晶体通光方向上的电压 V 的关系如图 1 所示。图中输入光功率 $P_0 = 150 \text{ mW}$ 。

2 以偏置电压为输入参量的空间光学双稳态

由前所述, 电场对通过 BSO 晶体的高斯光束进行了非线性空间型调制, 表现为通过 BSO 晶体的高斯光束由于热效应而引起的远场光斑环状分布^[3]。对光斑中心来说, 加在晶体通光方向上的电压对它的光强进行了非线性调制[见(2)式和图1]。因此, 可使该点的光强转换为电压反馈到晶体的通光方向, 来实现双稳态。与纵向反馈不同, 该双稳态是利用远场光斑某一点的特性来实现反馈的, 因此是一种横向双稳态。该双稳态的反馈方程为

$$V = V_0 + K_r I_0 \tag{3}$$

式中 V 为加在 BSO 晶体通光方向上的反馈电压, V_0 为偏置电压, K_r 为光电转换系数, 也即反馈系数。将调制方程(2)和反馈方程(3)式联立。从广义上说, 只要同时满足非线性和正反馈两个条件, 则不论以何参量为输入、输出参量, 都可以出现双稳态现象。或者说, 只要某一参量是某一输入参量的多值函数, 就有可能出现双稳态现象。将(3)式代入(2)式, 得

$$I_0 = \frac{2K_s P_0^3 [h + (V_0 + K_r I_0)^2]^2}{d^2} \left[1 + \frac{2P_0^2 (z_1 - \frac{b}{h + (V_0 + K_r I_0)^2}) [h + (V_0 + K_r I_0)^2]^2}{kd^2} \right]^{-1} \tag{4}$$

可见 I_0 即是输入光功率 P_0 也是偏置电压 V_0 的多值函数。因此从理论上, 不仅可能以输入光功率 P_0 为输入参量实现空间光学双稳态, 而且可能以偏置电压 V_0 为输入参量实现空间光学双稳态。下面主要讨论以偏置电压为输入参量的空间光学双稳态。

2.1 正偏置空间光学双稳态

图2(a)为当输入光功率 $P_0 = 100 \text{ mW}$, 反馈系数 $K_r = 6000$ 时将(2)(3)式联立得到的 $I_0 \sim V_0$ 曲线。由图2(a)可见, $I_0 \sim V_0$ 曲线呈“S”型, 故理论上认为可以实现双稳态。图3(a)为 $P_0 = 100 \text{ mW}$ 时, 跃变点 C、B 处(见图2(a))的偏置电压 V_{0C} 、 V_{0B} 随反馈系数 K_r 的变化关系。

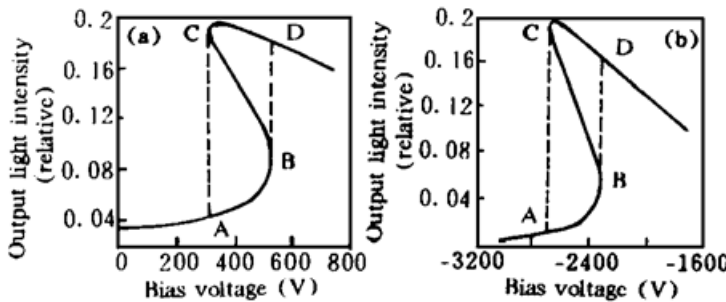


Fig. 2 $I_0 - V_0$ curve ($P_0 = 100 \text{ mW}$, $K_r = 6000$)

(a) Positive bias voltage, (b) Negative bias voltage

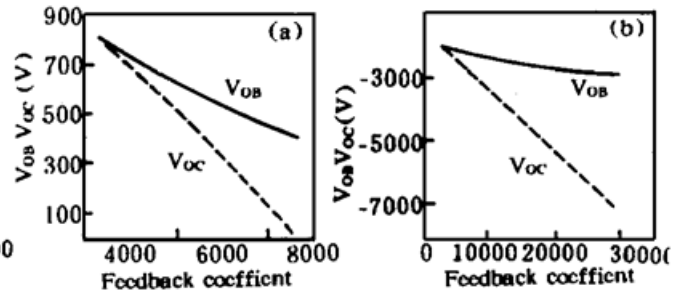


Fig. 3 V_{0B} , $V_{0C} \sim K_r$ curve ($P_0 = 100 \text{ mW}$)

(a) positive bias voltage, (b) Negative bias voltage

设偏置电压的双稳态范围为

$$V_{0r} = V_{0B} - V_{0C} = V_{0D} - V_{0A} \tag{5}$$

由图3(a)知, 随着反馈系数 K_r 的增大, V_{0C} 、 V_{0B} 值逐渐减小, 但双稳态范围即 V_{0C} 、 V_{0B} 的差值即 V_{0r} 的值则逐渐增大。值得注意的是, 当反馈系数 K_r 增大到某一值时, $V_{0C} = 0$, 再增大, 则 V_{0C} 将小于 0。因此, 对某一输入功率来说, 反馈系数 K_r 有一个上限值, 以保证偏置电压为正值。

实验装置如图4所示, 调节偏置电压的大小, 测量经过 BSO 晶体的高斯光束远场光斑中心处的光强 I_0 。结果如图5(a)和图5(b)所示。二者相应的入射光功率 P_0 均为90 mW 左右, 但后者的反馈系数 K_r 大于前者。

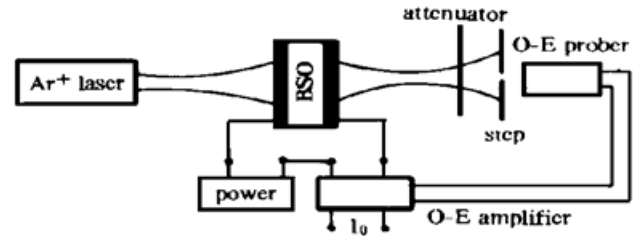


Fig. 4 Experiment setup

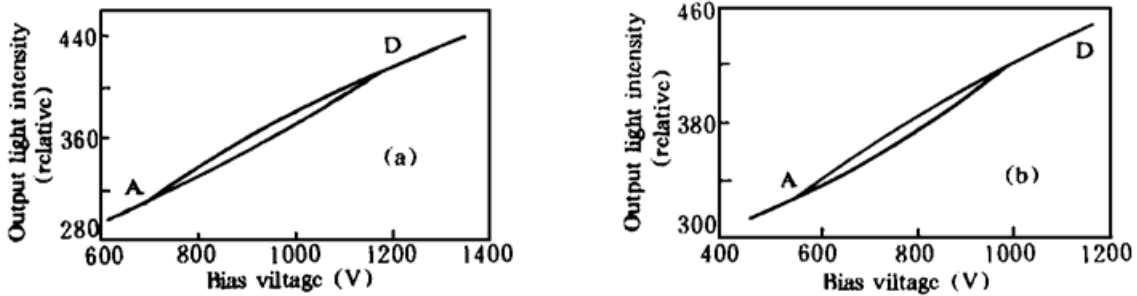


Fig. 5 $I_0 \sim V_0$ experiment curve ($P_0 = 90 \text{ mW}$)

以上两图, 均具有回线形式。但由于器件响应在毫秒量级, 故测得数据趋于平缓。比较两图的 D 、 A 处偏置电压值, 后者均小于前者, 但 D 、 A 点处的偏置电压的差值, 即双稳态范围 V_{or} , 后者却大于前者。这与前面的分析相一致(见图3(a))。可见, 理论与实验基本相符。对于远场的光强分布, 光斑中心光强小时, 相应光斑环数少; 反之, 光斑中心光强大时, 光斑环数增加。对此现象的解释可参考文献[3]。

2.2 负偏置空间光学双稳态

实验装置与图4同, 但偏置电压极性为负。调节偏置电压的大小, 测量经过 BSO 晶体的高斯光束远场光斑中心处的光强 I_0 。结果如图6所示。图中的入射光功率 P_0 均为95 mW 左右。比较图6和图5(a)、图5(b)可见, 当偏置小于零时, 偏置电压的双稳态范围 V_{or} 明显大于正偏置时的情况, 且跃变点 $D(B)$ 、 $A(C)$ 点处的偏置电压的绝对值也明显大于正偏置的情况。输出光强在高低态的差值也比较大, 双稳态的特征比正偏置明显得多。同时, 在实验中还发现, 随着光斑中心光强的增大, 光斑环数的变化情况与正偏置情况恰好相反。即随光斑中心光强的增大, 光斑环数则逐渐减少。由(4)式, 仍以输入光功率 $P_0 = 100 \text{ mW}$, 反馈系数 $K_r = 6000$ 时为例, 将 V_0 取负值作 $I_0 \sim V_0$ 曲线。结果如图2(b)所示。比较图6和图2, 当偏置小于零时, 负偏置时的双稳态范围 V_{or} 明显大于正偏置, 且跃变点 B 、 C 点处的电压的绝对值也明显大于正偏置时的情况。输出光强在高低态的差值也比较大。所以上述实验中的现象在此得到解释。

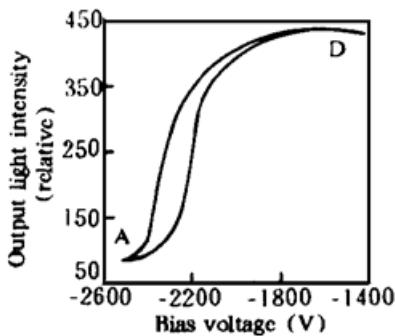


Fig. 6 $I_0 \sim V_0$ experiment curve ($P_0 = 95 \text{ mW}$)

2.3 反馈系数对负偏置双稳态的影响

由图3(b)可见, 随着反馈系数 K_r 的增大, V_{oc} 、 V_{OB} 的值逐渐减小, 但双稳态范围(即 V_{oc} 、 V_{OB} 的差值) 则逐渐增大。与正偏置情况不同, K_r 可以无限增大, 没有上限值。当然, 如果 K_r 过大, 由图3(b), V_{oc} 、 V_{OB} 的绝对值也将很大, 这对 BSO 晶体的耐压性能提出更高要求。图7(a)和图7(b)均为入射光功率为145mW 时的 $I_0 \sim V_0$ 曲线, 后者的反馈系数 K_r 大于前者。

图7(a)中的 $V_{0A} = -1925 \text{ V}$, $V_{0D} = -1650 \text{ V}$, $V_{0R} = V_{0D} - V_{0A} = 275 \text{ V}$ 。图7(b)中的

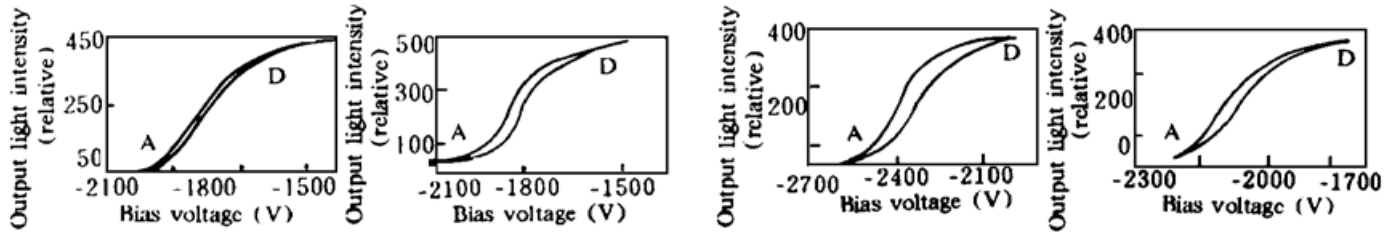


Fig. 7 $I_0 \sim V_0$ experiment curve on negative bias voltage

(a)、(b) $P_0 = 145 \text{ mW}$, (c) $P_0 = 105 \text{ mW}$, (d) $P_0 = 120 \text{ mW}$

$V_{0A} = -2050 \text{ V}$, $V_{0D} = -1750 \text{ V}$, $V_{0r} = V_{0D} - V_{0A} = 300 \text{ V}$ 。符合图3(b)所做的理论分析。图7(c)和图7(d)为在相同的反馈系数条件下,输入光功率 $P_0 = 105 \text{ mW}$, 和输入光功率 $P_0 = 120 \text{ mW}$ 时的 $I_0 \sim V_0$ 曲线。图7(c)的双稳态范围小于图7(d),且随输入光功率 P_0 的增大,双稳态的偏置电压向绝对值减小的方向移动。同时观测到,当输入光功率较小时跃变点 C、B 处的偏置电压 V_{0C} 、 V_{0B} 以及 V_{0r} 的值都随输入光功率的增大而增大,因此理论与实验基本相符。

结 论 本文以偏置电压为输入参量时,无论正偏置,还是负偏置,都出现了双稳态现象。由于正负偏置在调制曲线上起正反馈作用的区域不同,如图1所示,图中输入光功率 $P_0 = 150 \text{ mW}$ 。正反馈时以 AB 段为正反馈部分,由于调制曲线对调制电压是偶对称的,负偏置时以 BC 段作为正反馈部分。可以看出 BC 段的宽度大于 AB 段。因此负偏置时出现双稳态的电压绝对值及范围均大于正偏置;而且不论输入光功率的值为多少,调制曲线的 BC 段总可以作为正反馈部分。而正偏置则不然,由于纯热效应的作用,当输入光功率较大时,AB 段消失。没有了作为正反馈的部分,这就是负偏置情况下,出现双稳态的输入功率范围远大于正偏置的原因。这种双稳态的主要缺点是响应较慢,不过,因为是横向型,尽管单点响应较慢(毫秒级),但实际上是并行控制 $10^3 \sim 10^4$ channel 信息,因此与一维时间双稳态相比较,响应速度仍然是很高的(微秒级)。加之形式新颖,原理简单,所以仍可望在高科技领域获得相当应用。

参 考 文 献

- [1] Cui Guoqi, Dong Xiaoyi, Sheng Qiuqin *et al.*, *Chinese J. Lasers*, 1992, 1(6) ·523~ 526
- [2] 张海宁,董孝义,盛秋琴等, BSO 晶体空间光学双稳态的理论分析. 南开大学学报(自然科学), 1995, 28(1) ·81~ 86
- [3] 李淳飞,周平, 激光热自散焦的远场环形结构. 光学学报, 1986, 6(10) ·885~ 893
- [4] 伍长征等, 激光物理学, 复旦大学出版社, 上海, 1989年9月 ·98~ 123

A New Optical Spatial Bistability in BSO Crystal

Sheng Qiuqin Dong Xiaoyi Zhang Haining Gao Limo
Jin Fahong Xia Shunbao

(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071)

(Received 21 September 1995; revised 5 February 1996)

Abstract A new optical bistability is predicted, in which the bias voltage is referred as input and the light intensity in the centre of far field facula of Gauss light beam passing through $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) crystal as output. This bistability has been demonstrated in the experiment of positive bias voltage and negative bias voltage conditions. The experimental results are in consistent with the theory.

Key words BSO crystal, self-focusing effect, optical bistability.