

光伏晶体中复色宽光束的调制不稳定性研究

彭小兰¹ 周亚民² 王红成¹

(¹ 东莞理工学院电子工程学院, 广东 东莞 523808; ² 东莞理工学院化学与环境工程学院, 广东 东莞 523808)

摘要 研究了在有均匀背景照明的光伏光折变晶体中两种具有不同频率的宽光束的调制不稳定性。结果表明, 复色宽光束的调制失稳可以由两信号光对背景光的 Glass 系数比 r_1 和 r_2 来控制, 且其调制失稳增长率还依赖于复色光中两分量成分的强度 f 与 g 之比。对于 $r_1 > 1$ 且 $r_2 > 1$ 的情况, 当 $f < 0.5$ 时, 随着 g 的增大, 最大调制不稳定性增益先随之增大而后减小; 而当 $f > 0.5$ 时, 最大调制不稳定性增益随着 g 的增大而减小, 当 g 取足够大的值时调制不稳定性受到抑制, 从而趋近于 0。对于 $r_1 > 1, r_2 < 1$ 的情况, 当 $f < 4$ 时, 对应于 $r_2 < 1$ 的信号光可以抑制甚至完全禁止另一束对应于 $r_1 > 1$ 的信号光的调制不稳定性, 而 $f > 4$ 时调制不稳定性增益比较小。在 $r_1 < 1, r_2 < 1$ 时两复色宽光束不发生调制失稳。

关键词 非线性光学; 调制不稳定性; 光伏效应; 复色光

中图分类号 O43 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0219002

Study on Modulation Instability of Broad Polychromatic Beams in Photovoltaic Crystal

Peng Xiaolan¹ Zhou Yamin² Wang Hongcheng¹

¹ College of Electronic Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan, Guangdong 523808, China

² College of Chemistry and Environmental Engineering, Dongguan University of Technology,

Dongguan, Guangdong 523808, China

Abstract The modulation instability of two broad beams with different frequencies is investigated in a photovoltaic photorefractive crystal with a uniform background illumination. It is shown that modulation instability of broad polychromatic beams can be adjusted and controlled by the Glass coefficient ratios (r_1, r_2) of the signal and background beams. It is also found that the strength of modulation instability depends on the ratio of beam intensities f and g . For the case of $r_1 > 1, r_2 > 1$, the maximum modulation instability gain increases first and then decreases with the increase of g when $f < 0.5$, while it decreases monotonically when $f > 0.5$. For large g , the modulation instability is suppressed and tends to be 0. For the case $r_1 > 1, r_2 < 1$, the signal beam whose r_2 is less than 1 can suppress the modulation instability of the other signal beam whose $r_1 > 1$ when $f < 4$. If $f > 4$, the modulation gain is always very small. For the case $r_1 < 1, r_2 < 1$, the polychromatic broad beams do not undergo modulation instability.

Key words nonlinear optics; modulation instability; photovoltaic effect; polychromatic beams

OCIS codes 190.3100; 190.4420; 190.6135

1 引言

近十多年以来, 光折变空间孤子由于在全光开关、光互联及光学计算等方面有巨大的潜在应用, 引起了人们的广泛关注^[1]。所谓光折变空间孤子就是当一束窄的光束在光折变介质中传播时, 由光折变非线性效应引起的自聚焦与光束本身的自由衍射相平

衡, 从而其形状在传播过程中保持不变的一种传播状态。迄今为止, 人们已经证明了在光折变晶体中能观察到屏蔽孤子^[2~5]、光伏孤子^[6~8]、屏蔽-光伏孤子^[9~12]及其他因光照射而致使折射率产生改变而形成的稳态空间孤子^[13,14]。一般地, 孤子的形成都与所谓的调制不稳定性相关^[15~19]。所谓调制不稳定性,

收稿日期: 2010-07-07; 收到修改稿日期: 2010-09-15

基金项目: 东莞市科技计划项目(200910814038)和广东省高校优秀青年创新人才培养计划项目(LYM10124)资助课题。

作者简介: 彭小兰(1970—), 女, 硕士, 实验师, 主要从事光学空间孤子方面的研究。E-mail: pengxl@dgut.edu.cn

就是当一束宽度非常宽的光束在自聚焦介质中传播时,由于非线性效应的作用使得宽光束所受到的振幅和相位扰动被指数放大,从而自发形成一定的模式或光学丝的现象。迄今为止,这种调制不稳定性已经被人们通过实验或理论的方法在克尔介质及光折变介质等非线性介质中广泛地研究^[15~18]。

当入射到光伏光折变材料为不同频率的两束光时,这两束光通过光伏效应在材料中共同产生一个空间电荷场,该空间电荷场通过线性电光效应改变材料的折射率,形成光波导。如果该光波导恰好抑制光束的衍射,两光束就同时发生自陷,则形成了复色光伏空间孤子^[20]。这种复色光伏空间孤子属于非相干空间孤子的一种。理论和实验研究表明,非相干光束在传输过程中也会经历调制不稳定性^[21,22]。近年来,非相干调制不稳定性在非局域非线性媒质和非线性光子晶格中也已得到研究^[23,24]。最近,余卫龙等^[25]又研究光致异构非线性聚合物中非相干耦合光束的调制不稳定性。本文将针对光伏光折变晶体中复色光的调制不稳定性进行研究,讨论两信号光的光强及其与背景光的 Glass 系数之比对调制不稳定性的影响。

2 调制不稳定性

考察两束光强分别为 I_1 和 I_2 的不同频率的线偏振信号光在一块状光伏光折变材料中沿着 z 方向传播。为了增强材料的非线性效应,还需加上一个均匀的背景光 I_b 照明光伏晶体。假定信号光 I_1 和 I_2 为 e 光,且只能沿 x 方向自由衍射,背景光 I_b 为 o 光,光伏晶体的 c 轴沿 x 方向放置。在考虑了背景光的光伏效应并同时忽略了扩散效应的情况下,这两束信

号光所满足的方程可以写为^[7,26]

$$\begin{cases} \frac{\partial u_1}{\partial \zeta} = \frac{i}{L_1} \left(\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi^2} + b_1 \frac{1+r_1|u_1|^2+r_2|u_2|^2}{1+|u_1|^2+|u_2|^2} u_1 \right) \\ \frac{\partial u_2}{\partial \zeta} = \frac{i}{L_2} \left(\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} + b_2 \frac{1+r_1|u_1|^2+r_2|u_2|^2}{1+|u_1|^2+|u_2|^2} u_2 \right) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $u_j (j = 1, 2)$ 为第 j 个信号光的光场振幅, $|u_j|^2 = s_j I_j / s_b I_b$, s_j 和 s_b 分别为信号光和背景光的光电离吸收截面。 $\zeta = z/z_0$, $\xi = x/x_0$, $L_j = k_j x_0^2 / z_0$, $b_j = k_j^2 x_0^2 n_j^2 \gamma_{\text{eff}} E_p / 2$, $r_j = \kappa_j^e / \kappa_b^o$ 。 x_0 和 z_0 为任意的空间尺度。 k_j 为真空中的波矢, n_j 为信号光的线性折射率, γ_{eff} 为有效线性电光系数, E_p 为光伏空间光电场, κ_j^e 和 κ_b^o 分别为信号光和背景光的 Glass 系数。

(1)式有如下简单形式的平面波解:

$$\begin{cases} u_1 = f \exp(i\Gamma_1 \zeta) \\ u_2 = g \exp(i\Gamma_2 \zeta) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 f 和 g 分别为两不同波长信号光的无量纲振幅, Γ_1 与 Γ_2 定义为

$$\begin{cases} \Gamma_1 = \frac{b_1}{L_1} \cdot \frac{1+r_1 f^2+r_2 g^2}{1+f^2+g^2} \\ \Gamma_2 = \frac{b_2}{L_2} \cdot \frac{1+r_1 f^2+r_2 g^2}{1+f^2+g^2} \end{cases}. \quad (3)$$

为了研究如(2)式所示的平面波解的调制不稳定性,在其基础上加上微小的扰动

$$\begin{cases} u_1 = [f + \sigma_1(\xi, \zeta)] \exp(i\Gamma_1 \zeta) \\ u_2 = [g + \sigma_2(\xi, \zeta)] \exp(i\Gamma_2 \zeta) \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $\sigma_1(\xi, \zeta)$ 和 $\sigma_2(\xi, \zeta)$ 分别为非常小的扰动,即 $|\sigma_1(\xi, \zeta)| \ll f$, $|\sigma_2(\xi, \zeta)| \ll g$ 。当(4)式代入(1)式中,并略去 σ_1 及 σ_2 的高阶项,可以获得如下形式的线性化方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_1}{\partial \zeta} = \frac{i}{L_1} \left[\frac{1}{2} \frac{\partial^2 \sigma_1}{\partial \xi^2} + b_1 V_{11} (\sigma_1 + \sigma_1^*) + b_1 V_{12} (\sigma_2 + \sigma_2^*) \right] = 0 \\ \frac{\partial \sigma_2}{\partial \zeta} = \frac{i}{L_2} \left[\frac{1}{2} \frac{\partial^2 \sigma_2}{\partial \xi^2} + b_2 V_{21} (\sigma_1 + \sigma_1^*) + b_2 V_{22} (\sigma_2 + \sigma_2^*) \right] = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

式中

$$\begin{cases} V_{11} = \frac{[(r_1-1) + (r_1-r_2)g^2]f^2}{(1+f^2+g^2)^2}, & V_{12} = \frac{[(r_2-1) + (r_2-r_1)f^2]fg}{(1+f^2+g^2)^2}, \\ V_{21} = \frac{[(r_1-1) + (r_1-r_2)g^2]fg}{(1+f^2+g^2)^2}, & V_{22} = \frac{[(r_2-1) + (r_2-r_1)f^2]g^2}{(1+f^2+g^2)^2} \end{cases}. \quad (6)$$

式中 * 代表为其复数形式。假定扰动有如下形式

$$\sigma_j(\xi, \zeta) = c_j \cos(K\xi + \Omega \zeta) + i d_j \sin(K\xi + \Omega \zeta), \quad (j = 1, 2)$$

式中 K 和 Ω 分别为无量纲波数及扰动波的空间频率。将(6)式代入(5)式,得到

$$\begin{bmatrix} K & \frac{\Omega^2}{2L_1} & 0 & 0 \\ \frac{\Omega^2}{2L_1} - \frac{2b_1V_{11}}{L_1} & K & -\frac{2b_1V_{12}}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & K & \frac{\Omega^2}{2L_2} \\ -\frac{2b_2V_{21}}{L_2} & 0 & \frac{\Omega^2}{2L_2} - \frac{2b_2V_{22}}{L_2} & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ d_1 \\ c_2 \\ d_2 \end{bmatrix} = 0. \quad (7)$$

要使得(7)式有非平庸解,则 c_1, c_2, d_1, d_2 的系数所构成的行列式必须为零,即

$$K^4 - TK^2 + D = 0, \quad (8)$$

式中

$$T = \frac{\Omega^2}{2L_1} \left(\frac{\Omega^2}{2L_1} - \frac{2b_1V_{11}}{L_1} \right) + \frac{\Omega^2}{2L_2} \left(\frac{\Omega^2}{2L_2} - \frac{2b_2V_{22}}{L_2} \right),$$

$$D = \frac{\Omega^4}{4L_1L_2} \left(\frac{\Omega^2}{2L_1} - \frac{2b_1V_{11}}{L_1} \right) \left(\frac{\Omega^2}{2L_2} - \frac{2b_2V_{22}}{L_2} \right) - \left(\frac{\Omega^2}{L_1L_2} \right)^2 b_1b_2V_{12}V_{21}.$$

如果 Ω 取某些值时 K 的虚部不为零,则扰动 σ_1 与 σ_2 将随着传输距离的增大指数增长,从而使得平面波解变得极为不稳定.由于这一现象会使得稳态光场振幅产生调制,故称之为调制不稳定性.因此,(8)式描述了两个不同波长的光束即复色光的调制失稳.其不稳定增长率(或称之为调制不稳定性增益)为 $G(\Omega) = |\text{Im } K|$,即为无量纲波数 K 的虚部.(8)式有如下形式的解:

$$K_{\pm}^2 = \frac{1}{2} (T \pm \sqrt{T^2 - 4D}). \quad (9)$$

显然,若 $T^2 - 4D \geq 0$,则 K^2 为两实数解,此时小的信号扰动不会引起宽光束发生调制不稳定性;若 $T^2 - 4D < 0$,则 K^2 为带有虚部的两复数解,从而具有一定大小的不稳定性增长率,根据(9)式可知,调制失稳发生的空间频率取值范围为

$$|\Omega| < \{ 2(b_1V_{11} + b_2V_{22}) + 2[(b_1V_{11} + b_2V_{22})^2 - 4b_1b_2(V_{11}V_{22} - V_{12}V_{21})]^{1/2} \}^{1/2}. \quad (10)$$

当 Ω 在(10)式以外取值时,则无论 r_1, r_2, f, g 等取何值, K 始终取实数,说明光束对大空间频率的微扰调制始终为调制稳定的。

3 复色光调制失稳

为了研究两种不同波长的宽光束在光伏光折变介质中的调制不稳定性,假定用掺铜的铌酸钾铽钽钡($\text{Cu}:\text{KNSBN}$)晶体作为光伏光折变介质,这种非线性介质在光照下折射率改变为正值,即 $E_p > 0$ ^[7]。通

常,为了更好地增强非线性效应,还需加上另外一束均匀的背景光照明 $\text{Cu}:\text{KNSBN}$ 晶体.若在此晶体中传输的信号光只有一束,则信号光与背景光的有效 Glass 系数之比 $r > 1$ 时可以在这种光伏晶体中形成亮空间孤子,而当 $r < 1$ 时只能形成暗空间孤子,这一结论已在以前的理论及实验中得到了证实^[7]。换句话说,当单束的宽信号光在 $\text{Cu}:\text{KNSBN}$ 中传输时,只有其频率满足一定的要求使得它与背景光的有效 Glass 系数之比 $r > 1$ 才具有调制不稳定性。

下面,从数值上研究两个不同频率的宽光束在有均匀背景光照明时的光伏晶体中的调制不稳定性并讨论各光束参数对调制不稳定性增长率的影响,通过前面的分析,只需要令 $u_2 = 0$ 即可以得到已知的单光束情况.要注意的是,背景光(o光)在此光伏光折变晶体中也能感受到非常弱的非线性,即使它发生了调制不稳定,其强度也是非常小的,在有限的传播距离内不会产生明显的效应.这样,假定背景光在整个传输过程中都能保持稳定传播.虽然信号光也是线偏振光束,但它由于是 e 光,且其偏振方向沿着晶体的 c 轴方向,因此它将经历非线性的作用并在某些条件下产生调制不稳定性。

3.1 $r_1 > 1$ 且 $r_2 > 1$ 的情况

为了方便起见,假定两信号光在真空的波长分别为 $\lambda_1 = 488 \text{ nm}$ 及 $\lambda_2 = 514.5 \text{ nm}$,均匀的背景光在真空中的波长为 $\lambda_b = 488 \text{ nm}$,从而 $r_1 = 2.5$, $r_2 = 1.6$ ^[7,26]。在计算中,令任意无量纲化尺度坐标 $x_0 = 11.362 \mu\text{m}$, $z_0 = 1.578 \text{ mm}$ 。经计算可知, $b_1 = 65.817$, $b_2 = 57.135$, $L_1 = 2.370$, $L_2 = 2.228$ 。

根据(9)式,可以得到 f 分别取 0.1 及 1, g 取不同值时的调制不稳定增益谱,分别如图 1(a), (b) 所示.图 1(a)给出的是 $f = 0.1$ 时的调制不稳定性增益谱.从图上可以看到,当 $g = 0.1$ 时,最大调制增益较小,调制的截止频率也较小.如果增大 g 至 1 时,最大调制增益将变大,调制截止频率也增大.进一步增大 g 的取值,如 $g = 2, g = 5$ 等情况时,最大调制增益又快速变小,且调制截止频率也进一步

变小。而在图 1(b)所示的 $f=1$ 的情况时,情况变得有所不同。当 g 取较小值时,最大调制增益较大,而当 g 取较大值时最大调制增益就变得越来越大。这些结果在图 2 所示的最大调制不稳定增益 G_{\max} 与 M 的关系图中得到更好的体现。从图 2 可以很清晰地看到,当 $f < 0.5$ 时,随着 g 的增大,最大调制不稳定增益先随之增大而后减小,而当 $f > 0.5$ 时,最大调制不稳定增益随着 g 的增大而减小,当 g 取

足够大的值时调制不稳定性受到抑制,从而趋近于零。这意味着必须选择合适的 f 及 g 值来获得最大的调制不稳定性增益。例如,当 $f=0.1$ 时, g 的最佳取值应为 1,此时这两束不同频率的宽光束最容易产生调制不稳定性,从而更容易获得光学空间孤子。这一结果说明应该选择合适光强的两个不同频率光束,来形成复色光伏孤子。

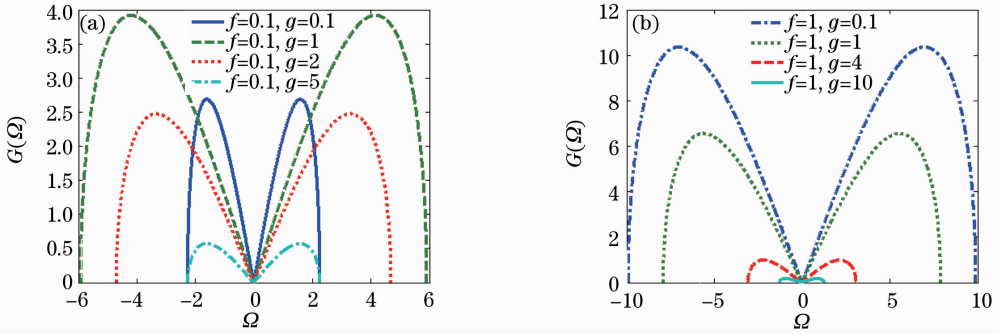


图 1 $r_1=2.5, r_2=1.6, f$ 分别取 0.1(a)和 1(b), g 取不同值时的调制不稳定增益谱

Fig. 1 Modulation instability gain spectrum for different values of g when $r_1=2.5,$

$r_2=1.6,$ and f is set as 0.1 (a) and 1(b)

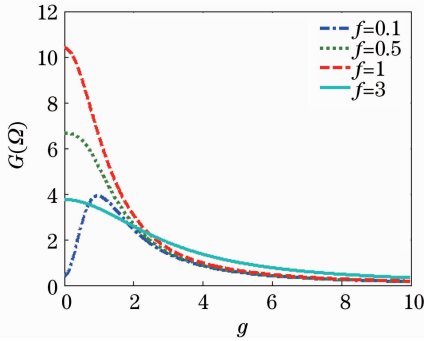


图 2 当 $r_1=2.5, r_2=1.6, f$ 取不同值时最大调制不稳定增益随 g 的变化关系

Fig. 2 Relation between the maximum modulation instability gain and g for different values of f when $r_1=2.5, r_2=1.6$

3.2 $r_1 > 1$ 且 $r_2 < 1$ 的情况

选择 $\lambda_1=488 \text{ nm}$ 及 $\lambda_2=532 \text{ nm}$ 的两束宽光束作为信号光,这样 $r_1=2.5, r_2=0.8$ 。根据(9)式,可以得到 $f=1, g$ 取不同值时的调制不稳定性增益谱。从图 3 可以看出,当 $r_1 > 1$ 且 $r_2 < 1$ 时,两不同频率的宽光束可以产生调制不稳定性,并且随着 g 的增大,调制不稳定的空间截止频率随之变小,而最大调制不稳定增长率也随之变小。这一结果也可以在如图 4 所示的最大调制不稳定增益随 g 的变化关系图上得到。从图 4 上可以看到,当 $f < 4$ 时,

对应于 $r_2 < 1$ 的信号光可以压缩甚至完全禁止另一束对应于 $r_1 > 1$ 的信号光的调制不稳定性。而且,当 f 的取值越小且 g 的取值越大即 g 与 f 的比值越大时,调制不稳定性得到越大程度的抑制。这一单调递减关系在 $f=4$ 时发生了改变。当 $f > 4$ 时,最大调制不稳定增益是随着 g 的增大先增大,而后单调递减,即最大调制不稳定增益有一个极大值,但是此时的最大调制不稳定增益都比较小。这些结果暗示了若要在 $f < 4$ 时形成复色亮光伏孤子,则需要使得 g 尽可能的小,而当 $f > 4$ 时,则需要选择合适大小的 g 值。

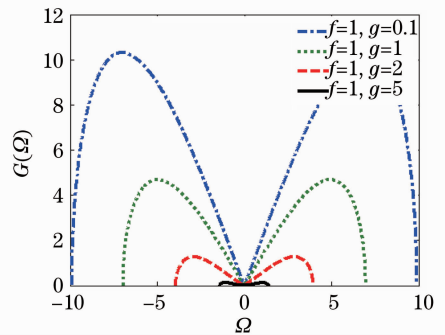


图 3 $r_1=2.5, r_2=0.8, f=1, g$ 取不同值时的调制不稳定增益谱

Fig. 3 Modulation instability gain spectrum for different values of g when $r_1=2.5, r_2=0.8, f=1$

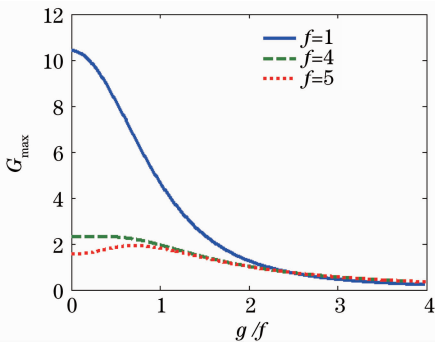


图4 $r_1=2.5$, $r_2=0.8$, f 分别取 1, 4, 5 时最大调制不稳定性增益与 g/f 的变化关系

Fig. 4 Relation between the maximum modulation instability gain and g/f when $r_1=2.5$, $r_2=0.8$, and f is set as 1, 4, and 5, respectively

3.3 $r_1 < 1$ 且 $r_2 < 1$ 的情况

在这种情况下,无论 f 与 g 取何值,(10)式等号右边的式子总是为零,即无量纲波数 K 始终为实数,从而不能得到复色光束的调制不稳定性,从而不能支持复色亮孤子,在这种情况下只能形成复色暗孤子。

4 结 论

研究了两不同频率的宽光束在光伏晶体 Cu:KNSBN 中的调制不稳定性。结果表明,复色光调制不稳定性可以通过复色光束的光强比以及复色信号光与背景光的 Glass 系数之比来进行调节及控制。对于 $r_1 > 1$ 且 $r_2 > 1$ 的情况,一信号光的调制不稳定性由于受到另外一束信号光的相互作用而得到加强或抑制。对于 $r_1 > 1$ 且 $r_2 < 1$ 的情况,一束信号光的调制不稳定性可以被另外一束信号抑制或完全抑制。当 $r_1 < 1$ 且 $r_2 < 1$ 时,两个不同频率的宽光束都是调制稳定的。针对复色光调制不稳定的研究一方面为研究复色光伏孤子的形成条件提供了参考依据,另一方面也为控制光束在非线形介质中稳定传输提供了一个可行的方案。

参 考 文 献

- 1 F. T. Arecchi, S. Boccaletti, P. Ramazza. Pattern formation and competition in nonlinear optics[J]. *Phys. Rep.*, 1999, **318**: 1~83
- 2 M. Segev, G. C. Valley, B. Crosignani *et al.*. Steady-state spatial screening solitons in photorefractive materials with external applied field[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**(24): 3211~3214
- 3 Zhang Yu, Hou Chunfeng, Wang Fei *et al.*. Temperature effects on the screening spatial solitons in two-photon photorefractive media[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 866~871

张宇,侯春风,王飞等.双光子光折变介质中屏蔽空间孤子

的温度特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 866~871

- 4 Hao Zhonghua, Liu Jingsong. Self-deflection of bright soliton in a separate bright-dark screening soliton pair based on higher-order space charge field[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(6): 353~356
- 5 Ji Xuanmang, Jiang Qichang, Liu Jinsong. Separate screening-photovoltaic soliton pairs in series two-photon photorefractive crystal circuit[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2370~2376
- 6 吉选芒,姜其畅,刘劲松.双光子光折变晶体串联回路中独立屏蔽光伏孤子对[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2370~2376
- 7 M. Taya, M. C. Bashaw, M. M. Fejer *et al.*. Observation of dark photovoltaic spatial solitons [J]. *Phys. Rev. A*, 1995, **52**(4): 3095~3100
- 8 Wang Hongcheng, Jiang Desheng, Wang Xiaosheng *et al.*. Study on one-dimensional gray photovoltaic spatial solitons and their stability[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1111~1116
- 9 王红成,江德生,王晓生等.一维光伏空间灰孤子及其稳定性研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1111~1116
- 10 Zhu Nan, Guo Ru, Liu Simin *et al.*. Photovoltaic gray spatial solitons in photorefractive crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7): 903~907
- 11 朱楠,郭儒,刘思敏等.光折变晶体中的光生伏打灰空间孤子[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7): 903~907
- 12 Lu Keqing, Zhang Yanpeng, Tang Tiantong *et al.*. Self-deflection of steady-state spatial solitons in biased photorefractive-photovoltaic crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(2): 134~138
- 13 卢克清,张彦鹏,唐天同等.有偏压的光伏光折变晶体中屏蔽光伏孤子的自偏转 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(2): 134~138
- 14 Tan Xin, Liu Jingsong. Self-deflection of bright photorefractive solitons[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11): 1307~1311
- 15 谭欣,刘劲松.光折变明孤子的自偏转演化特性[J]. *光学学报*, 2002, **22**(11): 1307~1311
- 16 Lu Keqing, Zhao Wei, Qian Shixiong *et al.*. Incoherently coupled low amplitude soliton pairs in biased photorefractive-photovoltaic crystals[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 563~566
- 17 卢克清,赵卫,钱士雄等.有偏压光伏光折变晶体中低振幅非相干耦合孤子对 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 563~566
- 18 Ji Xuanmang, Jiang Qichang, Liu Jinsong. Separate screening-photovoltaic soliton pairs in series two-photon photorefractive crystal circuit[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2370~2376
- 19 吉选芒,姜其畅,刘劲松.双光子光折变晶体串联回路中独立屏蔽光伏孤子对[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2370~2376
- 20 Wang Hongcheng, Peng Xiaolan, Chen Shaowen *et al.*. Incoherently coupled soliton family supported by two-photon isomerization nonlinearity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2264~2269
- 21 王红成,彭小兰,陈少文等.基于双光子异构非线性的非相干耦合孤子族[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2264~2269
- 22 Zeng Chunxiang, Wang Xinghua, Xie Liangxing *et al.*. 1+2-dimensional super Gaussian nonlocal spatial soliton[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 213~216
- 23 曾春香,王形华,谢良星等.1+2维超高斯型非局域空间光孤子[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 213~216
- 24 M. I. Carvalho, S. R. Singh, D. N. Christodoulides. Modulational instability of quasi-plane-wave optical beams biased in photorefractive crystals [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **126**: 167~174
- 25 K. Q. Lu, W. Zhao, Y. L. Yang *et al.*. Modulation Instability in biased photorefractive-photovoltaic crystals[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(6): 1086~1088
- 26 H. C. Wang, W. L. She. Modulation instability of broad optical beams in nonlinear media with general nonlinearity [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(2): 108~110
- 27 H. C. Wang, W. L. She. Modulation instability and interaction of non-paraxial beams in self-focusing Kerr media [J]. *Opt.*

- Commun., 2005, **25**(4): 145~151
- 19 Zhong Xianqiong, Xiang Anping. Modulation instability induced by cross-phase modulation in case of high-order dispersion and saturable nonlinearity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 391~397
钟先琼, 向安平. 高阶色散和饱和非线性下的交叉相位调制不稳定性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 391~397
- 20 X. S. Wang, G. G. He, W. L. She *et al.*. Polychromatic photovoltaic spatial solitons[J]. *Acta Physics Sinica*, 2001, **50**(3): 496~500
王晓生, 何国岗, 余卫龙等. 复色光光伏空间孤子[J]. *物理学报*, 2001, **50**(3): 496~500
- 21 M. Soljačić, M. Segev, T. Coskun *et al.*. Modulation instability of incoherent beams in noninstantaneous nonlinear media[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(1): 467~470
- 22 D. Kip, M. Soljačić, M. Segev, E. Eugenieva *et al.*. Modulation instability and pattern formation in spatially incoherent light beams[J]. *Science*, 2000, **290**(5491): 495~498
- 23 H. Buljan, A. Šiber, M. Soljačić *et al.*. Propagation of incoherent “white” light and modulation instability in noninstantaneous nonlinear media[J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **66**(3): 035601(R)
- 24 M. Jablan, H. Buljan, O. Manela *et al.*. Incoherent modulation instability in a nonlinear photonic lattice[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(8): 4623~4633
- 25 B. Z. Zhang, H. Cui, W. L. She. Modulational instability of incoherently coupled beams in a zobenzene-containing polymer with photoisomerization nonlinearity[J]. *Chin. Phys. B*, 2009, **18**(1): 209~214
- 26 B. Z. Zhang, H. C. Wang, W. L. She. Internal mode of incoherent photovoltaic vector solitons[J]. *Chin. Phys.*, 2007, **16**(4): 1052~1056