

近代
与综合实验

基于二波耦合的光学图像放大

张 丽, 田逢春, 罗 宇, 胡又文, 张文理

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044)

摘 要:理论分析表明二波耦合效应在扩散机制下可实现光强的放大而不影响相位. 通过偏振态实验确定二波耦合光学图像放大的入射光最佳偏振态为 P 态, 利用光爬行效应减小掺铁铌酸锂晶体进行二波耦合实验所引入的光散射噪声, 并确定入射光辐照顺序以及入射光角度不小于 20° . 根据经典的二波耦合实验方案实现了光学图像放大实验, 最佳的实验条件为: 入射绿光波长 532 nm, 入射角度 $32^\circ \sim 33^\circ$, 入射信号光光强 $7.2 \mu\text{W}$, 泵浦光光强 13.89 mW.

关键词:二波耦合; 光学图像放大; 光爬行效应; 偏振态

中图分类号: O739; O437

文献标识码: A

文章编号: 1005-4642(2017)11-0001-06

1966 年 Bell 实验室做 LiNbO_3 晶体的激光倍频实验时首次发现非线性晶体的光折变效应. 受限于光学技术的发展, 直到 1979 年 Kukharev 等人才提出描述光折变效应理论基础的带运输模型, 从而促使了光折变技术的飞速发展. 非线性晶体的光折变二波耦合效应应用非常广泛, 如相干光放大^[1-3]、实时全息存储^[4-6]、图像处理^[7]、光计算^[8-9]、相位共轭器^[10-11]、空间光调制器^[12]等. 其中与染料激光放大、光参量放大和振幅调制光放大相比, 二波耦合光放大具有增益大、稳定性高、噪声小、均匀性好等特点, 近些年来在光学信息处理中得到了广泛应用. 国内外学者对光折变二波耦合实现低噪声、高增益光学图像放大进行了深入的研究, 主要使用的光折变材料是钛酸钡 (BaTiO_3)^[13]、钛酸铋 (BTO)^[14] 和铌酸锶钡 (SBN)^[15], 而使用掺铁铌酸锂 ($\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$) 实现低噪声、高增益二波耦合光放大的研究相对较少, 其原因是 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体存在着很强的散射噪声, 会严重影响放大图像的质量, 因此本文利用光爬行效应减小散射噪声以提高放大图像的质量^[16]. 本文给出了 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体实现二波耦合光学图像放大的实验条件, 并对比不同的入射角度、入射光强比、入射波长条件下的实验结果, 分析影响实验效果的因素.

1 二波耦合光放大理论

两入射光在光折变晶体内耦合形成干涉条纹, 在干涉相长处产生光激发载流子, 载流子的迁移、扩散将引起空间电荷场的变化, 进而由电光效应引起折射率的空间调制, 即写入体相位栅^[6]. 体相位栅与干涉条纹之间存在着空间相移 φ , 如图 1 所示, 该相移的大小取决于载流子的迁移机制, 当其工作于扩散机制时, 空间相移 $\varphi = \pi/2$, 当其工作于漂移机制时, 空间相移 $\varphi = 0$.

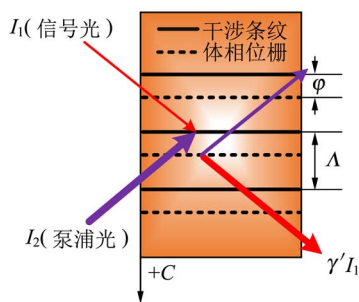


图 1 二波耦合示意图

本文采用的二波耦合光放大是同侧入射, 其光强耦合方程为

$$\frac{dI_1}{dr} = -\gamma' \frac{I_1 I_2}{I_1 + I_2} - \alpha I_1, \quad (1)$$

收稿日期: 2017-06-19; 修改日期: 2017-08-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 61071190); 重庆市基础科学与前沿技术研究专项项目 (No. cstc2015jcyjBX0042)

作者简介: 张 丽 (1990—), 女, 四川成都人, 重庆大学通信工程学院 2014 级硕士研究生, 研究方向为光学信息处理.

指导教师: 田逢春 (1963—), 男, 重庆巴县人, 重庆大学通信工程学院教授, 博士, 研究方向为图像及生物医学信号处理.



$$\frac{dI_2}{dr} = \gamma' \frac{I_1 I_2}{I_1 + I_2} - \alpha I_2, \quad (2)$$

$$\gamma' = 2 \frac{\pi n_1}{\lambda \cos \theta} \sin \varphi, \quad (3)$$

其中, I_1 与 I_2 分别为信号光与泵浦光的光强, α 为晶体的吸收系数, n_1 为由 Pockels 效应引起的折射率变化, θ 为布拉格角, λ 为波长, γ' 为光强耦合系数. 从式(1)~(3)可看出, 2 束入射光之间实现能量的转移依赖于光强耦合系数 γ' , 当光激发载流子的迁移机制为扩散作用时, 体相位栅与干涉条纹间的空间相移 $\varphi = \pi/2$, 此时光强耦合系数最大, 即 2 束入射光可实现最大的能量转移^[17].

2 束入射光的相位耦合方程为

$$\frac{d\varphi_1}{dz} = \beta \frac{I_2}{I_1 + I_2}, \quad (4)$$

$$\frac{d\varphi_2}{dz} = \beta \frac{I_1}{I_1 + I_2}, \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\pi n_1}{\lambda \cos \theta} \cos \varphi, \quad (6)$$

其中, β 为相位耦合系数. 由此可以看出, 当体相位栅与干涉条纹的空间相移 $\varphi = \pi/2$ 时, 光强耦合达到最大, 且相位耦合系数 $\beta = 0$, 即在实现信号光放大的同时相位不发生变化.

2 二波耦合实验条件

2.1 入射光偏振态

根据二波耦合理论分析可知, 2 束入射光须是同偏振态, 因此需要确定 2 束入射光的偏振态^[18]. 下面将分析 2 种情况下的二波耦合效应: 一是 2 束入射光的偏振态同为 S 态; 二是 2 束入射光的偏振态同为 P 态.

具体实验参量如表 1 所示, 表中实验结果如图 2 所示, 其中 d 为晶体的厚度.

由实验结果可以看出, 2 束入射光的偏振态为 P 态时, 二波耦合的响应时间较 S 态时明显缩短, 因此为了实验顺利进行, 采用 2 束入射光为 P 态的方式进行二波耦合光学图像放大实验.

表 1 二波耦合偏振态实验参量

晶体	偏振态	d/mm	P_2/mW	$P_1/\mu\text{W}$	$P_2 : P_1$	放大倍数
LiNbO ₃ : Fe(武汉)	S 态	3.8	20.80	4.5	4 622	310
LiNbO ₃ : Fe(武汉)	S 态	5.0	20.21	4.0	5 053	235
LiNbO ₃ : Fe(上海)	P 态	3.8	14.24	20.0	712	11
LiNbO ₃ : Fe(武汉)	P 态	3.8	20.08	20.0	1 004	13

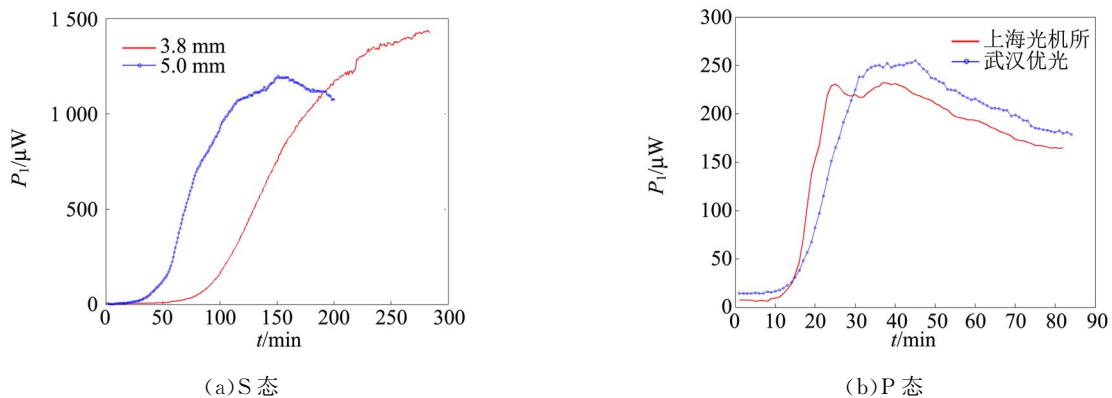


图 2 信号光光强变化曲线图

2.2 光爬行效应

使用 LiNbO₃ : Fe 晶体进行二波耦合实验, 泵浦光的前向散射光很严重, 会影响图像放大的质量, 因此利用光爬行效应减小散射光以保证放大图像的质量. 该方法主要是利用 LiNbO₃ : Fe

晶体的厚度^[19]和入射光斑的尺寸^[20]实现前向散射光与爬行光之间的有效竞争, 当入射角度足够大时, 前向散射光会完全被抑制, 能量全部转移到爬行光, 此时实现了噪声的抑制^[16].

根据以上分析, 设计的光爬行效应实验光路

如图 3 所示. 从 35 mW 的 He-Ne 激光器 LD 出射的光束(P 偏振态)经反射镜 M 反射后,由透镜 L 将激光束进行聚焦,其焦点在 LiNbO₃:Fe 晶体 D-LN 表面,然后在晶体后面接收屏 Re₁ 上观察透射光束(前向散射光)的变化情况,接收屏 Re₂ 上观察晶体的近 90° 散射光. 实验中入射光爬行的过程中先向两侧逐渐散射,然后集中到右侧散射,而左侧的散射光逐渐减弱直至基本被抑制. 图 4 为竞争结束后接收屏 Re₁ 上观察到的光斑,分别为透射光斑(1)和远离入射光方向的前向散射光(右),同时,在晶体的近 90° 方向上(Re₂ 位置)观察到的结果如图 5 所示.

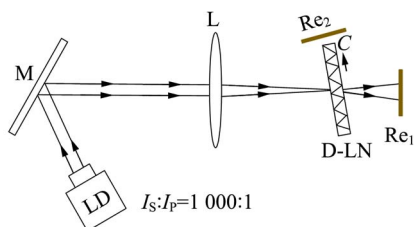


图 3 光爬行效应实验光路图

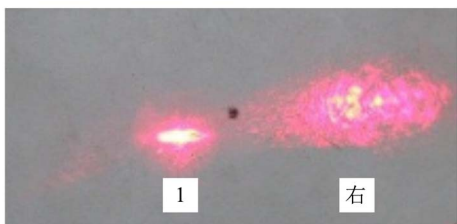


图 4 前向散射光实验图

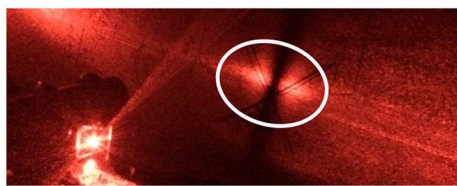


图 5 近 90° 散射光实验图

由上述实验结果可知,在进行二波耦合实现光学图像放大的实验中,合理地控制泵浦光和信号光的入射角度,可以使信号光的透射方向在泵浦光的左侧散射区域,因此当泵浦光完成竞争之后,该区域内的散射光基本被抑制,则保证信号光图像不被噪声淹没,实现了降低噪声的目的.

3 基于二波耦合的光学图像放大实验

根据上文的实验确定了二波耦合实现光学图像放大的实验条件,结合经典的实验方案设计二波耦合光学图像放大实验^[21],并且设置不同的实验条件分析对放大效果的影响.

3.1 光学实验平台设计

根据以上条件,使用实验室波长为 532 nm 的激光器设计实验光路图如图 6 所示.

对图 6 的实验光路进行如下分析:从激光器 LD(波长 532 nm,功率 135 mW)输出的光束经半波片 HWP 改变偏振态为 P 态,随后入射到偏振分光棱镜 PBS 以保证透射光为 P 态,然后入射到分光棱镜 BS₁ 上,将 BS₁ 的反射光作为泵浦光,透射光作为信号光. 信号光经针孔滤波器 SP (I_s: I_p=1 000:1)和透镜 L₁ 扩束、准直为平面波,此时通过光阑 H₁ 和胶片 O(输入图像)来控制光斑的大小以及加载图像信息,信号光路中放置的偏振片 P₁ 和 P₂,前者为了控制信号光的光强大小,后者保证入射到晶体的光偏振态为 P 态. 输入图像经过透镜 L₂ 聚焦后打在 LiNbO₃:Fe 晶体 D-LN 上并且与泵浦光完全重合;BS₁ 的反射光(泵浦光)经过反射镜 M₁、衰减片 PF、偏振片 P₃ 和光阑 H₂ 后照射到 LiNbO₃:Fe 晶体 D-LN 上,其中反射镜 M₁ 用于调节泵浦光的入射角度,并使其与信号光完全重合,衰减片 PF 用于控

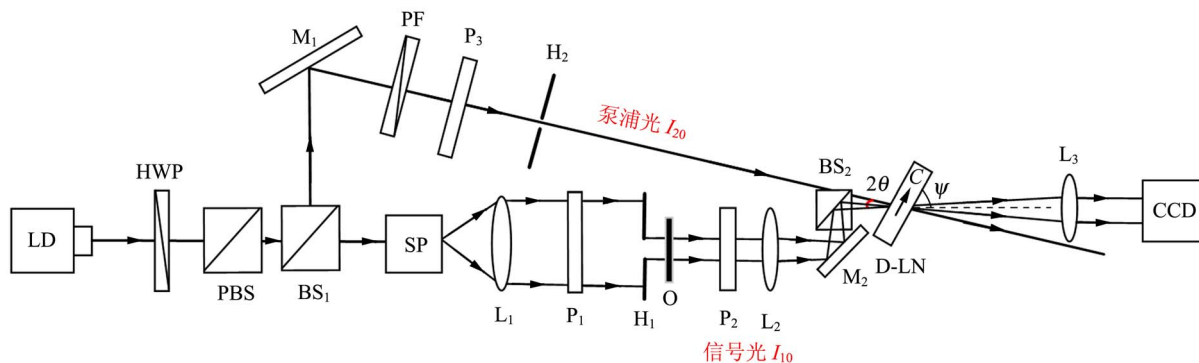


图 6 光学图像放大实验光路图

制泵浦光的光强大小, 偏振片 P_3 用于控制泵浦光的偏振态为 P 态. 最后, 在离 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体 D-LN 1 倍焦距的信号光光路中放置透镜 L_3 , 通过 CCD 采集放大后的图像信息.

3.2 实验中的注意事项

1) 泵浦光和信号光偏振态须相同, 同为 P 态.

2) 泵浦光与信号光在晶体表面完全重合, 且保证信号光光斑在泵浦光光斑的正中心.

3) 信号光的入射角度大于泵浦光的入射角度, 且 2 束光的入射角度均大于 20° , 同时控制 2 束光的角度差在 8° 左右.

4) 仅泵浦光照射晶体, 使其在晶体内产生前

向散射光与爬行光的竞争过程, 当爬行结束后再照射信号光.

5) 实验结束后, 对晶体内的体相位栅进行擦除, 以阻止其对后续实验结果的影响. 采用均匀紫外光辐射晶体的方式, 擦除时间设置为 24 h.

3.3 实验结果

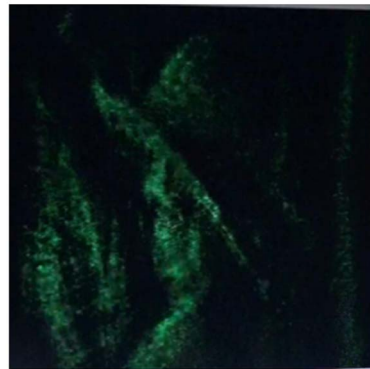
根据 3.1 和 3.2 所述的实验平台和实验操作步骤构建二波耦合实现光学图像放大的实验光路, 针对不同入射角度、入射光强以及入射波长, 设置实验的初始条件见表 2 (D_2 为泵浦光光斑直径). 根据表 2 中的 4 组实验条件进行光学图像放大实验, 得到的实验结果见图 7~10.

表 2 光学图像放大实验初始条件

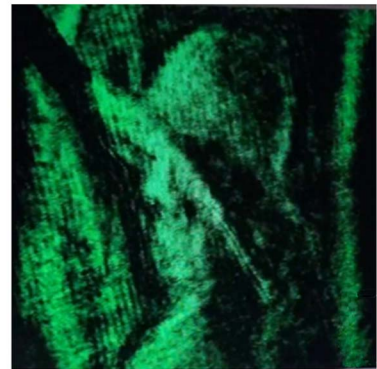
组号	λ / nm	$P_1 / \mu\text{W}$	P_2 / mW	$P_{20} : P_{10}$	D_2 / mm	ψ
1	532	7.2	13.89	1 930	3	$32^\circ \sim 33^\circ$
2	532	7.2	13.89	1 930	3	45°
3	532	5.0	15.00	3 000	3	$26^\circ \sim 27^\circ$
4	671	21.7	56.30	2 600	2	$32^\circ \sim 33^\circ$



(a) 初始信号光图像

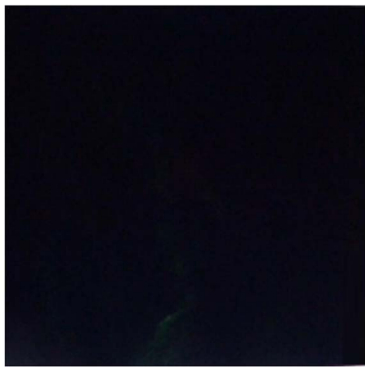


(b) 2 min 时信号光图像



(c) 4 min 时信号光图像

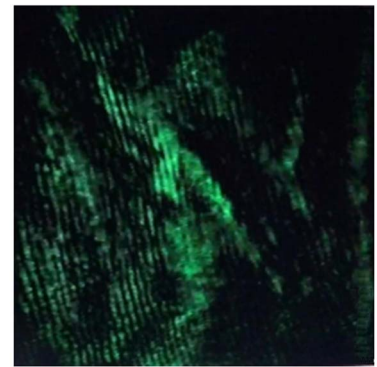
图 7 光学图像放大实验效果图(第 1 组)



(a) 初始信号光图像



(b) 2 min 时信号光图像



(c) 4 min 时信号光图像

图 8 光学图像放大实验效果图(第 2 组)

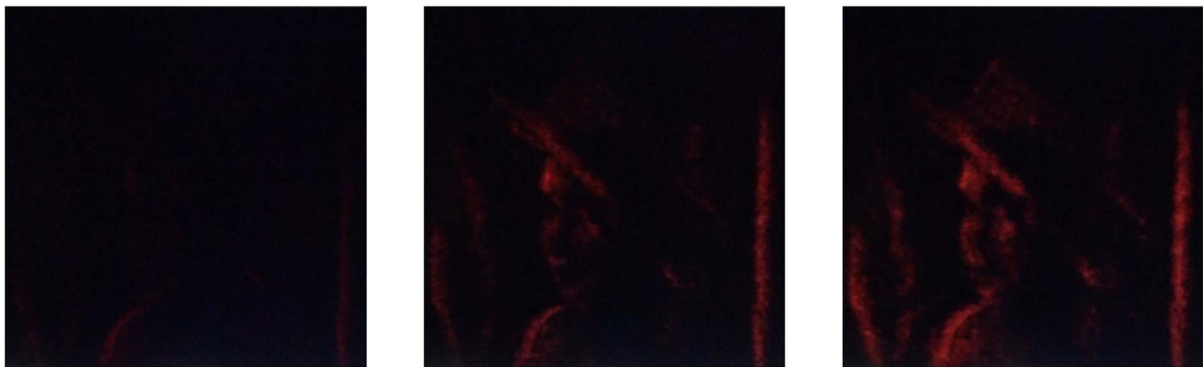


(a)初始信号光图像

(b)2 min 时信号光图像

(c)4 min 时信号光图像

图 9 光学图像放大实验效果图(第 3 组)



(a)初始信号光图像

(b)30 min 时信号光图像

(c)60 min 时信号光图像

图 10 光学图像放大实验效果图(第 4 组)

3.4 实验数据处理与分析

为了更客观地分析上述实验结果,对 4 组数据进行绿色(或红色)分量提取、旋转剪切、图像尺寸、中值滤波等处理,使得实验结果图与输入图像保持一致,然后分别计算其信噪比和平均放大倍数,具体数据如表 3 所示.

表 3 各组实验数据的信噪比与放大倍数

组号	$R_{s/n1}$	$R_{s/n2}$	放大倍数
1	10.19	10.21	6.91
2	7.49	7.44	3.78
3	6.84	6.83	1.84
4	6.83	6.83	2.29

注: $R_{s/n1}$ 和 $R_{s/n2}$ 分别为输入图片与灰度处理和中值滤波后图片的信噪比.

根据 4 组实验结果可以得出以下结论:

1)当入射角度不同时其放大效果不同,实验的最佳角度为 $32^{\circ}\sim 33^{\circ}$.

2)对于不同的泵浦光和信号光初始入射功率比,得到的放大效果也不相同,经实验验证最佳的人射光强为信号光 $7.2\ \mu\text{W}$ 、泵浦光 $13.89\ \text{mW}$.

3)入射波长不同时,其放大效果也不同.实验中当光源从波长 $532\ \text{nm}$ 的绿光改为波长 $671\ \text{nm}$ 的红光后,其入射光的功率变大,光爬行效应的的时间变长,而且二波耦合的实验周期也增加,这说明输入光的波长对二波耦合效应有较大影响.

综上所述,本实验平台初步实现了光学图像放大,并且得到了最佳的实验条件.

4 结 论

通过入射光偏振态实验确定了基于二波耦合的光学图像放大实验 2 束光的入射偏振态为 P 态,且利用泵浦光的爬行效应降低信号光方向上的散射噪声,从而实现了较为清晰的光学图像放大效果.同时,通过实验对比不同入射角度、入射

光强比、入射波长,分析各因素对二波耦合光学图像放大的影响,得出了最佳的实验条件.

参考文献:

- [1] Huignard J P, Marrakchi A. Coherent signal beam amplification in two-wave mixing experiments with photorefractive $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystals [J]. *Optics Communications*, 1981,38(4):249-254.
- [2] Laeri F, Tschudi T, Albers J. Coherent CW image amplifier and oscillator using two-wave interaction in a BaTiO_3 crystal [J]. *Optics Communications*, 1983,47(6):387-390.
- [3] Ramazza P L, Zhao M J. Experimental study of two-wave mixing amplification in Cu-doped KNSBN [J]. *Optics Communications*, 1993,102(1/2):93-99.
- [4] Charrière F, Kühn J, Colomb T, et al. Characterization of microlenses by digital holographic microscopy [J]. *Applied Optics*, 2006,45(5):829-835.
- [5] Darakis E, Khanam T, Rajendran A, et al. Micro-particle characterization using digital holography [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010,65(2):1037-1044.
- [6] Koukourakis N, Abdelwahab T, Li M Y, et al. Photorefractive two-wave mixing for image amplification in digital holography [J]. *Optics Express*, 2011,19(22):22004-22023.
- [7] Markov V, Odulov S, Soskin M. Real-time contrast reversal using two-wave mixing in LiNbO_3 [J]. *Optics Laser Technology*, 1979,11:95-99.
- [8] Fainman Y, Guest C C, Lee S H. Optical digital logic operations by two-beam coupling in photorefractive materials [J]. *Applied Optics*, 1986,25(10):1598-1603.
- [9] Gerlovin I Y, Ovsyankin V V, Stroganov B V, et al. Coherent transients in semiconductor nanostructures as a basis for optical logical operations [J]. *Nanotechnology*, 2000,11(4):383-386.
- [10] Xu K B, Xu H Y, Hong J. Observation of optical wave phase and wave-front correction in photorefractive two-wave mixing [J]. *Optics Communications*, 1989,69(5/6):429-432.
- [11] Lucchetti L, Fabrizio M D, Gentili M, et al. Optical phase conjugation and efficient wave front correction of weak light beams by dye-doped liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2003,83(26):5389-5391.
- [12] Marrakchi A. Two beam coupling photorefractive spatial light modulation with reversible contrast [J]. *Applied Physics Letters*, 1988,53(8):634-636.
- [13] Rajbenbach H, Delboulbé A, Huignard J P. Noise suppression in photorefractive image amplifiers [J]. *Optics Letters*, 2014,14(22):1275-1277.
- [14] Baade T, Kiessling A, Kowarschik R. A simple method for image restoration and image pre-processing using two-wave mixing in $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ [J]. *Journal of Optics A Pure & Applied Optics*, 2001,3(4):250-254.
- [15] Gilbreath G C. Photorefractive two-wave mixing characteristics for image amplification in diffusion-driven media [J]. *Proc. SPIE*, 1991,1409(10):87-99.
- [16] Xu Jingjun, Zhang Guangyin, Liu Simin, et al. Noise suppression for photorefractive image amplification in the $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ crystal sheet [J]. *Applied Physics Letters*, 1994,64(18):2332-2334.
- [17] Chi M J, Huignard J P, Petersen P M. A general theory of two-wave mixing in nonlinear media [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2009,26(8):1578-1584.
- [18] Katyal N, Natasha, Roy A, et al. The influence of pump beam polarization on the signal beam in TWM in photorefractive crystals; Transmission geometry [J]. *Optik*, 2011,122(3):207-210.
- [19] Zhang Jingwen, Sun Wanjun, Bian Shaoping, et al. Very high photorefractive gain in two-beam coupling with thin iron-doped LiNbO_3 crystal [J]. *Chinese Physics Letters*, 1993,10(4):227-230.
- [20] Zhang Guangyin, Li Qingxin, Ho Pingpei, et al. Dependence of speckle size on the laser beam size via photo-induced light scattering in $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ [J]. *Applied Optics*, 1986,25(17):2955-2959.
- [21] Kamber N Y, Xu Jingjun, Mikha S M, et al. Threshold effect of incident light intensity for the resistance against the photorefractive light-induced scattering in doped lithium niobate crystals [J]. *Optics Communications*, 2000,176(1/3):91-96.

(下转第 12 页)

- 理学报, 2003, 52(11): 2859-2864.
- [14] 王艾玲, 刘江涛, 周云松, 等. 各向异性场对三明治膜巨磁阻抗效应的影响[J]. 物理学报, 2004, 53(3): 905-910.
- [15] 袁帅, 张吉涛, 许志强, 等. 剩磁效应对 SmFe₂/PZT 多铁异质结构动态磁机特性及磁场传感特性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2017, 51(2): 177-183.

Nonlinearity of GMI effect in iron-based amorphous ribbon researched by using Nyquist figure

XU Zhi-qiang, ZHAO Qian-kun

(College of Electric and Information Engineering,
Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The real and imaginary parts of the impedance of giant magneto-impedance effect were measured, and the real and imaginary parts of the permeability were calculated. The principle of the nonlinearity of GMI effect was proposed based on the nonlinearity of the permeability, and the LC resonant frequency of EC model of permeability by Nyquist figure was pointed out. The results showed that the irregularity of the changes of permeability of iron-based amorphous ribbon in transverse and longitudinal magnetization process led to nonlinear changes of the GMI effect. Under 5 MHz excitation, the magnetic loss angle remained consistent. The nonlinear relation between permeability and longitudinal magnetic field was transformed into the relationship between modulus value of permeability and longitudinal magnetic field, and the function of permeability and the longitudinal magnetic field was obtained by fitting the experimental data.

Key words: giant magneto-impedance effect; nonlinearity; Nyquist figure; permeability; magnetic loss angle; EC model

[责任编辑:任德香]

(上接第 6 页)

Optical image amplification based on two-wave coupling

ZHANG Li, TIAN Feng-chun, LUO Yu, HU You-wen, ZHANG Wen-li

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Theoretical analysis indicated that the amplification process based on two-wave coupling did not affect the phase of the wave field. The optimal polarization state of incident beams was determined as P state by experiment. The light scattering noise induced by two-wave coupling in LiNbO₃:Fe crystal was reduced through the light climbing effect. At the same time, the irradiation order was determined and the incident angle of the two incident beams was not less than 20°. What's more, the experiment of optical image amplification was carried out according to classical two-wave coupling experiments. The optimal experiment condition was following. The wavelength of the incident green light was 532 nm, the incident angle was about 32°~33°, the power of the signal light was 7.2 μW, and the power of the pump light was 13.89 mW.

Key words: two-wave coupling; optical image amplification; light climbing effect; polarization state

[责任编辑:任德香]