

基于太赫兹时域光谱的 SBN:Ce 陶瓷介电的光调制特性

陈立伟^{1,3}, 柴路^{1,3*}, 胡明列^{1,3}, 栗岩锋^{1,3}, 庞冬青^{1,3},
王清月^{1,3}, 田震^{2,3}, 韩家广^{2,3}, 张伟力^{2,3}

- (1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 超快激光研究室, 天津 300072;
2. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 太赫兹中心, 天津 300072;
3. 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:在室温条件下,基于太赫兹时域频谱(THz-TDS)技术研究了 SBN:Ce 陶瓷在 532 nm 连续激光激发下的介电响应.在外加光场的作用下,该陶瓷的介电常数表现出良好的调制特性,介电改变量达到 8.5%;同时,介电损耗增加了 15%.实验结果表明,该材料折射率的变化 $|\Delta n|$ 与外加光场强度呈现线性关系.通过建立模型,分析了 SBN:Ce 陶瓷的光-铁电机理,这些实验结果可以被归结为,激发的自由载流子在样品内部形成的内建电场导致的介电常数改变.探索铁电陶瓷材料在太赫兹波段的光-铁电性质对于太赫兹波调制器件的研究具有指导意义.

关键词:太赫兹时域频谱技术;掺铈铌酸锶钡;光折变效应;自发极化
中图分类号:O433 **文献标识码:**A

Laser modulation dielectric properties of SBN:Ce ceramics using the Terahertz Time-Domain Spectroscopy

CHEN Li-Wei^{1,3}, CHAI Lu^{1,3*}, HU Ming-Lie^{1,3}, LI Yan-Feng^{1,3}, PANG Dong-Qing^{1,3},
WANG Qing-Yue^{1,3}, TIAN Zhen^{2,3}, HAN Jia-Guang^{2,3}, ZHANG Wei-Li^{2,3}

- (1. Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Center for Terahertz Waves, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology of Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract: The dielectric response of SBN:Ce ceramics to the 532 nm cw laser was investigated at room temperature by means of a terahertz time-domain spectroscopy. When the external laser field is imposed onto the SBN:Ce ceramics, the permittivity of the sample shows an appreciable change with amplitude variation up to 8.5% and the dielectric loss increase 15%, respectively. The refractive index $|\Delta n|$ varies linearly with the intensity of the applied laser. The photo-ferroelectric physical mechanisms of SBN:Ce ceramics can be attributed to the internal space field in the ceramics caused by the light excited free carries with the analytic models. The results present important references for design and selection of the terahertz tunable devices.

Key words: terahertz time-domain spectroscopy, $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Nb}_2\text{O}_6$:Ce ceramics, photorefractive effect, spontaneous polarization

PACS: 87.50.U-, 87.64.K-, 77.84.-s, 78.20.Mg

引言

太赫兹(THz)波是指频率在 0.1 ~ 10THz 的电

磁波,该波段位于红外和毫米波之间.由于其独特的光谱性质,太赫兹波在生物医学诊断^[1]、材料分析^[2]、爆炸物检测^[3]、天文学及卫星通信^[4-5]等领域

收稿日期:2014-08-10,修回日期:2014-11-16

Received date: 2014-08-10, revised date: 2014-11-16

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2014CB339800,2010CB327604,2011CB808101);国家自然科学基金(61027013,61077083,61377041,61377047,61322502);长江学者和创新团队发展计划(IRT13033)

Foundation items: Supported by National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2014CB339800, 2010CB327604, 2011CB808101); National Natural Science of China (61027013,61077083, 61377041, 61377047, 61322502); Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT13033)

作者简介(Biography):陈立伟(1989-),男,天津人,硕士研究生,主要研究领域为太赫兹波技术及其应用. E-mail: chenliwei19890902@126.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: lu_chai@tju.edu.cn

拥有广阔的应用前景.然而,太赫兹功能器件的匮乏逐渐成为了制约其发展的重要因素.目前,人们在致力于研究基于石墨烯^[6]、超材料^[7]、表面等离子基元^[8]、铁电体^[9-10]等材料实现对太赫兹波的调控.因此,寻找合适的材料无论对研究材料本身性质或对太赫兹波调控技术都有重要意义.

铋酸锶钡($\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Nb}_2\text{O}_6$,简称 SBN)属于四方钙钛矿结构铁电体,具有很高的线性光电效应和热释电效应,还具有不潮解、机械性能好等优点,因此被广泛应用于自泵浦相位共轭器^[11]、光调制器^[12]、空间滤波器^[13]和铁电域的光开关^[14].自从 1977 年 Megumi 等人发现 Ce 掺杂可以改善 SBN 的光折变性能之后^[15],人们对 SBN:Ce 的结构^[16]、光折变特性及载流子的输运过程^[17-18]等方面展开了系统的研究.然而,SBN:Ce 在太赫兹波段的光-铁电特性还未被人们所认知.本文的研究重点是在室温条件下,利用太赫兹时域频谱(THz-TDS)技术,研究 SBN:Ce 的介电特性及其光调制特性,并通过建模和理论计算解释了其光调制特性的物理机制.

1 SBN:Ce 陶瓷制备和光调制实验

首先,采用固相合成法制备 $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Nb}_2\text{O}_6:\text{Ce}$ 陶瓷,其中 $x=0.75$,Ce 的含量为 0.1wt%.以 BaCO_3 ($\geq 99\%$)、 SrCO_3 ($\geq 99\%$)、 Nb_2O_5 ($\geq 99\%$)、 CeO_2 ($\geq 99\%$)为原料,按照适当比例进行配料,在去离子水介质中球磨 1.5 h 后,将料放入电热干燥箱中在 1100°C 下预烧 1 h.预烧后的粉末在去离子水介质中再次球磨 4.5 h,烘干后再于 8 MPa 压力下压成的圆柱形坯体,在 1300°C 下烧结成陶瓷.为了能够得到样品的透射信息,我们将其磨薄加工至厚度为 $300\ \mu\text{m}$,并且进行了抛光.

同时,搭建了基于光电导天线的 8f 共焦 THz 时域频谱系统^[19],用于本项实验,如图 1 所示.由钛宝石飞秒激光器产生的波长为 800 nm、重复频率 100 MHz、脉宽 25 fs 的超短激光脉冲作为激励源.飞秒光脉冲经过分束和衰减后,形成两束平均功率均为 10 mW、具有特定时间延迟的光脉冲,其中一束触发 GaAs 光导发射器产生太赫兹脉冲,经过硅透镜和抛物面镜系统准直、聚焦.当 THz 脉冲在系统中传输到光导接收器时,另一束飞秒光脉冲同步触发接收器,通过信号转换放大,将 THz 脉冲转换为电信号输出.系统的有效带宽为 0.1~4.5 THz(对应波长为 $3\ \text{mm}\sim 67\ \mu\text{m}$),振幅信噪比为 $1.5\times 10^4:1$,聚焦到样品上的太赫兹光斑直径为 3.5 mm.我们使用一

台全固态绿光激光器(中心波长 532 nm)来给样品提供外加调制光场.绿光斜入射到样品表面上,与样品的极轴成 45° 角,光斑的直径为 5 mm.整套装置处在干燥空气的环境中,以排除空气中水蒸气对太赫兹波的吸收,避免由其带来的实验干扰.

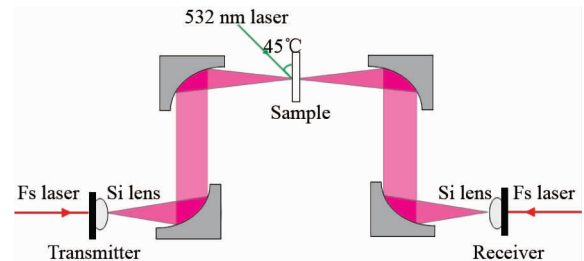


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic of the experimental setup

2 实验结果及讨论

在实验中,主要研究了该样品在不同强度的绿色激光作用下对透过的太赫兹波时域波形的影响.这些结果总结在图 2 中.图 2(a)表示,通过 SBN:Ce 样品后的太赫兹波时域信号与不通过样品的参考信号之间的时间延迟,大约为 5.9 ps.图 2(b)反映了,在给 SBN:Ce 施加调制光后,通过样品的太赫兹波时域信号与外加光场强度之间的关系.结果表明,随着外加调制光场的强度增加,穿过样品的太赫兹时域信号出现时间延迟漂移,并且振幅也逐渐减小.与未加外光场时相比(图中黑线表示);当外加光场强度为 200 mW 时,通过 SBN:Ce 样品后太赫兹时域信号漂移了大约 0.13 ps,信号强度大约从 97.8 下降到了 86.66(图中红线表示);继续增加光场强度到 500 mW 时,通过样品后太赫兹时域信号漂移约 0.27 ps,信号强度下降到了 69.9(图中绿线表示).

通过对图 2 数据进行傅里叶变换,就得到了透过样品的太赫兹频谱及其固有相位的改变,进而计算出样品的复折射率系数和复介电常数.图 3(a)、(b)分别表示,在室温条件下,SBN:Ce 样品在不同外加调制光场强度下的复介电常数的实部和虚部随频率的变化曲线.其中,复介电常数实部是由材料内部的各种位移极化引起的,代表着材料的储能项;而复介电常数的虚部是由材料内部的各种转向极化跟不上外高频电场变化而引起的各种弛豫极化所致,代表着材料的损耗项.由于 SBN:Ce 样品在超过 1.3 THz 后是不透明的,因此我们选择的测量频率范围

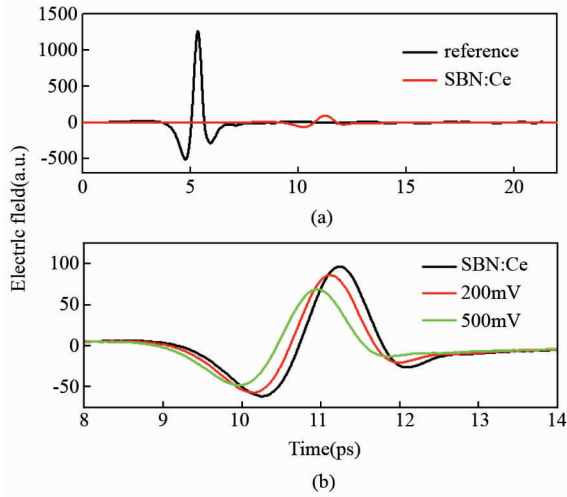


图2 (a)太赫兹波通过 SBN:Ce 陶瓷时域波形图;(b)在外加调制光场作用下透射太赫兹时域信号的时间延迟的特性

Fig. 2 (a)Time domain transmission waveform of SBN:Ce ceramics and (b) its time shift under different external optical fields at room temperature

是 $0.2 \sim 1.3 \text{ THz}$ (6.6 cm^{-1} 到 50 cm^{-1}). 从图 3 可以看出,在 $0.2 \sim 1.3 \text{ THz}$, 样品的介电常数实部随外加光场强度的增大而减小,而介电常数虚部正好相反.

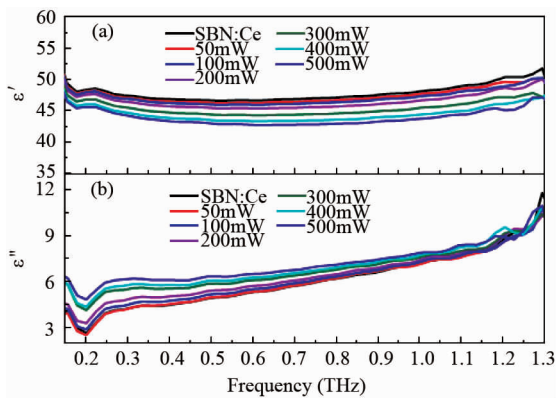


图3 SBN:Ce 陶瓷样品的复介电常数随频率和外加调制光场强度的关系曲线,(a)复介电常数的实部;(b)复介电常数的虚部

Fig. 3 Frequency dependence of (a) real part and (b) imaginary part of complex dielectric constant of SBN:Ce ceramics with different external optical fields

从图 3(a) 反映出的样品复介电常数的实部与外加调制光场强度的关系可见,在小于 1.3 THz 的范围内,样品的介电常数实部与外加调制光场强度的增强成反比,显示出明显的调谐特性. 在实验中,当外加光场强度为 500 mW 时,其介电常数实部的改变量可达 8.6% . 为了进一步说明这种调制关系,

我们选择其中两点太赫兹频率 (0.4 THz 和 0.6 THz) 处的实验数据做出复介电常数的实部与外加调制光场强度之间的关系图,见图 4. 对于 0.4 THz 处,在外加光场强度 500 mW 时的介电改变量约为 7.3% (图 4a); 在 0.6 THz 处的介电改变量可达 8.6% (图 4b).

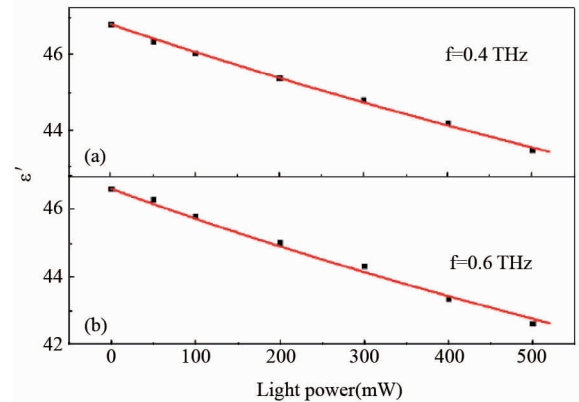


图4 在(a) 0.4 THz 和 (b) 0.6 THz 时的 SBN:Ce 样品复介电常数实部对于不同外加光场强度的相应关系;其中离散点是实验测得数据,实线是通过公式(1)拟合的曲线

Fig. 4 Light intensity dependence of dielectric constant of SBN:Ce at (a) 0.4 THz and (b) 0.6 THz . The data points are measured values, and the solid lines are the fit by Eq. (1)

图 4 中,离散点是实验测量值,红色实线为理论计算的结果. 根据铁电材料的介电常数关系^[20]:

$$\frac{\epsilon'(I)}{\epsilon'_0} = \frac{1}{(1 + \alpha \epsilon'^3 I)^{1/3}}, \quad (1)$$

其中, $\epsilon'(I)$ 和 ϵ'_0 分别为外加光场强度为 I 和 0 时样品的介电常数, α 是一个样品内部非谐作用的序参量. 通过公式(1)的介电常数实部对上图的实验结果进行拟合,获得 $\alpha = 6.206 \times 10^{-9}$ 和 $\alpha = 5.819 \times 10^{-9}$ 时,分别对应在 0.4 THz 和 0.6 THz 处的最佳拟合曲线.

与此相对应,图 3(b) 反映出 SBN:Ce 陶瓷样品的介电常数虚部与外加调制光场强度成正比. 这说明了其介电损耗随外加光场强度的增大而在逐渐增加. 当外加光场强度为 500 mW 时,介电损耗增加了 15% . 出现这种现象的原因是:材料内部有着两种损耗机制,本征损耗 $\tan \delta_c$ 和传导损耗 $\tan \delta_r$. 样品的本征损耗随着外光场强度的增加而减小;而传导损耗则相反,随着外光场强度的增加而增大. 由此可以得出, SBN:Ce 陶瓷样品在外加光场作用时,传导损耗的变化占主导地位. 同时,传导损耗的增加,也会导致样品吸收系数的增加^[21],从而使透过样品的太赫

兹信号逐渐减小,这也解释了图 2 所示的透过太赫兹时域信号随外加光场增加而衰减的现象。

样品介电常数的变化会直接导致样品折射率的变化,即关系为^[22]:

$$\Delta n = \frac{1}{2}(n_o^3 \gamma_{13} - n_e^3 \gamma_{33}) \frac{\Delta P_0}{\epsilon} \propto E \propto I \quad (2)$$

其中, n_o 和 n_e 分别表示样品的寻常光折射率和非常光折射率, γ_{ij} 是线性电光系数, ΔP_0 表示自发极化的改变量, E 表示样品的内空间电场强度, I 表示外加光场的强度. 这说明, 在外加光场作用下, 样品内部的自由载流子重新分布形成了内建电场, 进而改变了样品的折射率. 图 5 为在不同外加光场作用下, SBN:Ce 陶瓷的折射率变化及其线性拟合, 显示出 SBN:Ce 折射率的变化量 $|\Delta n|$ 与外光场强度成线性关系.

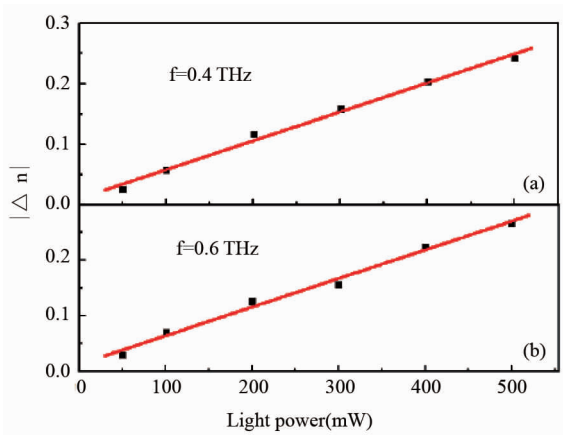


图 5 透过频率为 (a)0.4THz 和 (b)0.6THz 时的 SBN:Ce 样品折射率随外加光场强度的变化关系. 其中数据点是实验测量值, 实线通过公式 (2) 拟合结果

Fig. 5 Light intensity dependence of variation of refractive index at (a) 0.4THz and (b) 0.6THz of SBN:Ce. The data points are measured values, and the solid lines are the fit by Eq. (2)

激光调制必然引入温度改变, 因此热效应的影响必须讨论. 为此, 我们做了如下对比实验. 首先, 在上述光调制实验过程中的每个测量点, 用红外热成像仪, 测量出不同强度激光照射下样品表面的温度, 测量结果列在表 1 中.

表 1 不同功率激光照射下陶瓷表面温度

Table 1 Light intensity dependence of the temperature of SBN:Ce

激光功率 (mw)	0	50	100	200	300	400	500
温度 (°C)	25	35.4	43.6	60.2	88.8	142.5	182.3

根据实测光调制对样品引入的温度数据, 我们制作了加热与恒温可控的样品池. 实验时仍然采用红外热成像仪测温, 并用控温器维持温度与光调制实验时测量的温度值一致, 这样就保证不改变原光调制实验的温度条件. 在没有外加光场, 只有加热的条件下, 我们重复上述实验过程, 测量了不同温度下透过样品的太赫兹时域信号大小, 结果如图 6 所示. 通过与图 2(b) 对比, 可以清楚地表明: 太赫兹时域信号没有出现频移, 仅振幅同样出现了逐渐变小的趋势, 但是变化幅度非常微弱. 因此, 可以得出以下结论, 热效应对本样品的光调制中的太赫兹频率变化没有影响; 而对于太赫兹振幅调制的影响也远小于激光调制的效果. 因此, 激光调制中的热效应对本样品的光调制实验的影响可以忽略.

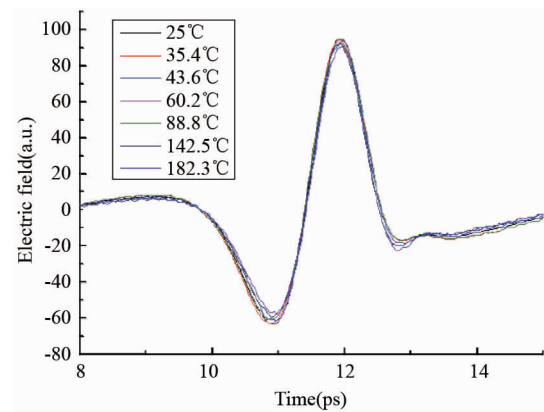


图 6 不同温度下透射太赫兹时域信号的变化
Fig. 6 Time domain transmission waveform of SBN:Ce ceramics at different temperature

SBN:Ce 样品的外加光场的调制现象的微观机理可以解释如下: SBN:Ce 样品中 Ce^{3+}/Ce^{4+} 是深能级中心, 占据 Sr/Ba 位^[23], 且 Ce^{3+} 作为光折变效应中主要的电子施主离子^[16], 忽略热力学效应. 当外加光场作用到样品时, Ce^{3+} 和 Ce^{4+} 离子会发生电子交换: $Ce^{3+} + h\omega \rightarrow Ce^{4+} + e$. 在光照区域, Ce^{3+} 中的电子被激发跃迁到导带, 在光生伏打效应作用下沿一定方向移动, 最终被 Ce^{4+} 离子捕获^[24]. 漂移和扩散也有助于这一运动的发生. 这一过程可以用图 7 示意性的表示出来.

其中图 7(a) 表示出了自发极化的方向, 图 7(b) 表示在入射光作用下, Ce^{3+} 的一个电子被激发, 而且在电场作用下漂移, 到达某个 Ce^{4+} 离子发生陷获, 图 7(c) 表示非平衡电子的激发和陷获形成的空间电荷, 即失去电子区域带正电, 获得电子区域带负电, 图 7(d) 示出空间电荷场的方向. 载流子的运动导致了样

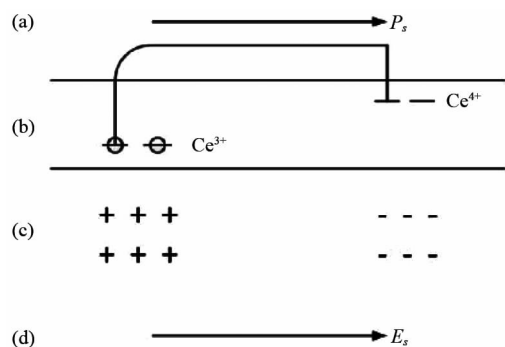


图7 电子输运形成空间电荷场示意图
Fig.7 Schematic of space charge field by electron transport

品内部电荷的重新分布,改变了样品的宏观自发极化.同时,载流子的运动在样品内部形成了空间电场,这将改变材料的一些内部特征,如畴结构、开关机制和矫顽场等,对样品的自发极化也产生了一定的屏蔽作用.同时,光激发自由载流子在材料表面形成光生等离子体,也对空间电场产生一定影响.内建电场通过线性电光效应改变了样品的折射率^[22].

3 结语

基于太赫兹时域频谱技术研究了在外加光场作用下SBN:Ce陶瓷样品的介电响应特性.在室温条件和外加500 mW光场强度的条件下,该样品实现了介电常数改变量达到8.5%和介电损耗增加了15%.由此获得该样品的折射率变化与外加光场的强度呈现线性关系.这些现象是由光生伏打效应和内建电场对自发极化屏蔽机制的共同作用的结果.上述结果能为人们更好的认识铁电材料在太赫兹波段的物理性质提供帮助,同时对该类材料作为太赫兹波的振幅和相位调制器件的应用研究具有指导意义.

致谢:衷心感谢天津大学电子信息工程学院肖谧副教授课题组提供SBN:Ce陶瓷样品

References

[1] KIM S M, BAUGHMAN W, WILBERT D S, *et al.* High sensitivity and high selectivity terahertz biomedical imaging [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(11): 110009.
[2] CAO Bing-hua, HOU Di-bo, YAN Zhi-gang, *et al.* Method for detection of pesticide residue based on terahertz time domain spectroscopy [J]. *J. Infrared. Millim. Waves* (曹丙花, 侯迪波, 颜志刚等. 基于太赫兹时域光谱技术的农药残留检测方法. *红外与毫米波学报*), 2008, 27(6): 429-432.
[3] SHEN Y C, LO T, TADAY P F, *et al.* Detection and iden-

tification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(24): 241116.
[4] FEDERICI J, MOELLER L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(11): 111101.
[5] YAO Jian-quan, CHI Nan, YANG Peng-fei, *et al.* Study and outlook of terahertz communication technology[J]. *Chinese J. Lasers*(姚建铨, 迟楠, 杨鹏飞, 等. 太赫兹通信技术的研究与展望. *中国激光*), 2009, 36(9): 2213-2233.
[6] SENSALÉ-RODRIGUEZ B, YAN R, RAFIQUE S, *et al.* Extraordinary control of terahertz beam reflectance in graphene electro-absorption modulators [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(9): 4518-4522.
[7] FANG An-Le, DAI Xiao-Yu, LING Xiao-Hui, *et al.* Metamaterials at terahertz and their Applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress* (方安乐, 戴小玉, 凌晓辉, 等. 太赫兹超常材料及应用. *激光与光电子学进展*), 2010, 47(5): 051601.
[8] WANG Wen-Tao, LIU Jian-Jun, HONG Zhi. Terahertz multiband terahertz filter based on three nested closed rings [J]. *Acta Optica Sinica*, (王文涛, 刘建军, 洪治. 基于三个方形封闭谐振环的多频带太赫兹滤波器. *光学学报*), 2013, 33(3): 244-247.
[9] KUZEL P, KADLEC F, NEMEC H, *et al.* Dielectric tunability of SrTiO₃ thin films in the terahertz range[J]. *Applied physics letters*, 2006, 88(10): 102901.
[10] WU L, JIANG L, XU Y, *et al.* Optical tuning of dielectric properties of Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO₃-La (Mg_{0.5}Ti_{0.5})O₃ ceramics in the terahertz range[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(19): 191111.
[11] BOGODAEV N V, ELISEEV V V, IVLEVA L I, *et al.* Double phase-conjugate mirror; experimental investigation and comparison with theory[J]. *JOSA B*, 1992, 9(8): 1493-1498.
[12] MA J, LIU L R, WU S D, *et al.* Photorefractive spatial light modulation by electrocontrolled beam coupling in SBN:Ce crystals [J]. *Optics Communications*. 1989, 70(3): 181-194
[13] MA J, LIU L R, WANG Z J, *et al.* Controllable real-time simple spatial filter based on selectively erasing in photorefractive two-beam coupling [J]. *Optics communications*, 1989, 74(1): 15-18.
[14] KAHMANN F, PANKRATH R, RUPP R A. Photoassisted generation of ferroelectric domain gratings in SBN [J]. *Optics communications*, 1994, 107(1): 6-10.
[15] MEGUMI K, KOZUKA H, KOBAYASHI M, *et al.* High-sensitive holographic storage in Ce-doped SBN [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 30(12): 631-633.
[16] NIEMANN R, BUSE K, PANKRATH R, *et al.* XPS study of photorefractive Sr_{0.61}Ba_{0.39}Nb₂O₆:Ce crystals [J]. *Solid state communications*, 1996, 98(3): 209-213.
[17] BUSE K. Light-induced charge transport processes in photorefractive crystals II: Materials [J]. *Applied Physics B*, 1997, 64(4): 391-407.
[18] BUSE K, STEVENDAAL U, PANKRATH R, *et al.* Light-induced charge transport properties of Sr_{0.61}Ba_{0.39}Nb₂O₆:Ce crystals [J]. *JOSA B*, 1996, 13(7): 1461-1467.

References

- [1] CHU K R. The electron cyclotron maser [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2004, **76**(2): 489 - 540.
- [2] CHU K R, CHEN Han-Ying, HUANG Chien-Lung, *et al.* Theory and Experiment of Ultra high Gain Gyrotron Traveling Wave Amplifier [J]. *IEEE Trans. On Plasma Science*, 1999, **27**(2): 391 - 403.
- [3] SONG H H, McDermott D B, Hirata Y, *et al.* Theory and experiment of a 94 GHz gyrotron traveling-wave amplifier [J]. *PHYSICS OF PLASMAS*, 2004, **11**(5): 2935 - 2941.
- [4] YAN Ran, LUO Yong, LIU Guo, *et al.* Design and Experiment of a Q-band Gyro-TWT Loaded With Lossy Dielectric [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2012, **59**(12): 3612 - 3617.
- [5] DU Chao-Hai, LIU Pu-Kun. A Lossy Dielectric Ring Loaded Waveguide with Suppressed Periodicity for Gyro-TWTs Applications [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2009, **56**(10): 2335 - 2342 .
- [6] Garven M, Calame J P, Danly B G, *et al.* A gyrotron traveling wave tube amplifier experiment with a ceramic loaded interaction region [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci*, 2002, **30**(3): 885 - 893.
- [7] Bratman V L, Cross A W, Denisov G G, *et al.* High-gain-wide-band gyrotron travelling wave amplifier with a helically corrugated waveguide [J]. *Phys. Rev. Lett*, 2000, **84**(12): 2746 - 2749.
- [8] Cross A W, HE W L, Phelps A D R, *et al.* Helically corrugated waveguide gyrotron traveling wave amplifier using a thermionic cathode electron gun [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2007, **90**(25): 253501 - 253501 - 3.
- [9] GENG Zhi-Hui, LIU Pu-Kun, SU Y N, *et al.* Design and Simulation of an Ultra-Broadband Ku-Band Gyro-TWT for Radar Applications [J]. *Int J Infrared Milli Waves*, 2008, **29**(10): 627 - 633 .
- [10] YAN Ran, TANG Yong, LUO Yong. Design and Experimental Study of a High Gain W-Band Gyro-TWT with Non-uniform Periodic Dielectric Loaded Waveguide [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2014, **61**(7): 2564 - 2569.
- [11] TANG Yong, LUO Yong, XU Yong, *et al.* Self-consistent Nonlinear Analysis and 3D Particle In Cell Simulation of a W-band Gyro-TWT [J]. *Int J Infrared Milli Waves*, 2014, DOI 10.1007/s10762 - 014 - 0087 - 7.
- [12] WANG E-Feng, ZENG Xu, LIU Bentian, *et al.* Experimental Study of High-Power Gyrotron Traveling-Wave Tube With Periodic Lossy Material Loading [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, **40**(7): 1846 - 1853.
- [13] 贾云峰, 来国军, 刘濮鲲. Ka 波段基波回旋行波管放大器的模拟与设计. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(5): 386 - 389.
- [14] 来国军, 刘濮鲲. W 波段回旋行波管放大器速度零散的分析 [J]. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(6): 447 - 450.
- [15] DU Chao-Hai, CHANG Tsun-Hsu, LIU Pu-Kun, *et al.* Design of a W-band Gyro-TWT Amplifier With a Lossy Ceramic-Loaded Circuit [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2013, **60**(7): 2388 - 2394.
- [16] Granatstein V L, Levush B, Danly B G, *et al.* *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1997, **25**, 1322.
- [17] Lawson W. Magnetron injection gun scaling [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci*, 1988, **16**(2): 290 - 295.
- [18] JIANG Wei, LUO Yong, YAN Ran. *Computational Design and Optimization of a Magnetron Injection Gun* [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2014, **61**(7): 2547 - 2551.
- [19] 徐勇, 罗勇, 王建勋, 等. 34GHz TE01 模基波回旋速调管高频系统设计与实验 [J]. *红外与毫米波学报*, 2013, **32**(6): 531 - 537.
- [20] WANG Hui, LI Hong-Fui, LUO Yong. *Analysis and Design of Ka-Band Gyro-TWT Output Structure with Dolph Chebyshev Waveguide Taper* [C]. 2008 *International conference on Infrared and Millimeter Waves and THz Conference*, 2008.
- [19] HAN J, ZHANG W, CHEN W, *et al.* Far-infrared characteristics of ZnS nanoparticles measured by terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2006, **110**(5): 1989 - 1993.
- [20] JOHNSON K M. Variation of dielectric constant with voltage in ferroelectrics and its application to parametric devices [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, **33**(9): 2826 - 2831.
- [21] CHEN Y C, WU L, CHOU Y P, *et al.* Curve-fitting of direct-current field dependence of dielectric constant and loss factor of Al₂O₃-doped barium strontium titanate. *Mater. Sci. Eng. B*, 2000, **76**(2): 95 - 100.
- [22] CHEN F S. Optically induced change of refractive indices in LiNbO₃ and LiTaO₃ [J]. *Journal of applied physics*, 2003, **40**(8): 3389 - 3396.
- [23] WOIKE T, WECKWERTH G, PALME H, *et al.* Instrumental neutron activation and absorption spectroscopy of photorefractive strontium-barium niobate single crystals doped with cerium [J]. *Solid state communications*, 1997, **102**(10): 743 - 747.
- [24] BUSE K, ADIBI A, PSALTIS D. Non-volatile holographic storage in doubly doped lithium niobate crystals [J]. *Nature*, 1998, **393**(6686): 665 - 668.

(上接 568 页)