

NBT-BNT 陶瓷的光致形变性能

董正明^{1,2}, 李修^{2,3}, 陈晨², 曹明贺¹, 易志国²

(1. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 武汉 430070; 2. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 高性能陶瓷和超微结构国家重点实验室, 上海 200050; 3. 华中师范大学 物理科学与技术学院, 武汉 430079)

摘要: 光致形变材料在光致驱动器和传感器等光机电领域有重要的应用前景。本研究采用放电等离子体烧结法制备了 Ni 掺杂 $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-BaTiO}_3$ (NBT-BT) 陶瓷材料 $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-Ba}(\text{Ti}_{0.5}\text{Ni}_{0.5})\text{O}_3$ (NBT-BNT)。进一步研究发现样品在 405、520 及 655 nm 波长激光照射下均表现出 10^{-3} 数量级的光致形变响应, 其光致形变系数达到 $10^{-11} \text{ m}^3/\text{W}$ 。通过研究 NBT-BNT 陶瓷在外加光源照射下的原位 X 射线衍射图谱, 发现所有衍射峰在可见光照射下均发生小角度的偏移, 说明光照引起的材料晶格畸变是 NBT-BNT 材料光致形变效应的主要原因。

关键词: 铁电材料; 光致形变; 可见光响应; 钙钛矿

中图分类号: TQ174 文献标识码: A

Photostriction of NBT-BNT Ceramics

DONG Zhengming^{1,2}, LI Xiu^{2,3}, CHEN Chen², CAO Minghe¹, YI Zhiguo²

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. State Key Laboratory of High Performance Ceramics and Superfine Microstructure, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 3. College of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Photostrictive materials exhibit great potential in the light-driven microactuators/sensors, light-controlled microrobots, and other optomechanical applications. In this study, we present the photostrictive performance of Ni-modified $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-BaTiO}_3$ (NBT-BT) ceramics prepared by using spark plasma sintering. Under visible light illumination (405, 520 and 655 nm, respectively), the $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-Ba}(\text{Ti}_{0.5}\text{Ni}_{0.5})\text{O}_3$ (NBT-BNT) ceramics exhibits large photostriction of the order of 10^{-3} and photostriction coefficient around $10^{-11} \text{ m}^3/\text{W}$. The XRD peaks of the sample under external illumination show low angle shift, indicating the light-induced lattice distortion, which contributes to the large photostrictive response of NBT-BNT ceramics.

Key words: ferroelectric material; photostriction; visible light response; perovskite

光致形变材料在特定的光照条件下能够产生不同程度的机械形变。这种效应能够将光能直接转化为机械能^[1-6], 在光电功能领域具有潜在的应用前景。

上世纪六十年代, Figielski^[1]首次在 SbSI 铁电单晶中观察到光致形变现象。1985 年, Uchino 等^[2,7]进一步在锆钛酸铅(PLZT)铁电材料中发现稳定的光

收稿日期: 2020-05-13; 收到修改稿日期: 2020-09-04; 网络出版日期: 2020-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(51872311, 51902331); 中国科学院前沿科学重点研究计划项目(QYZDB-SSW-JSC027); 上海市自然科学基金(19ZR1464900)

National Natural Science Foundation of China (51872311, 51902331); Frontier Science Key Project of the Chinese Academy of Sciences (QYZDB-SSW-JSC027); Natural Science Foundation of Shanghai (19ZR1464900)

作者简介: 董正明(1996-), 男, 硕士研究生. E-mail: dongzhengming_yzu@163.com

DONG Zhengming(1996-), male, Master candidate. E-mail: dongzhengming_yzu@163.com

通信作者: 陈晨, 助理研究员. E-mail: chen.chen@mail.sic.ac.cn; 曹明贺, 教授. E-mail: caominghe@whut.edu.cn

CHEN Chen, assistant professor. E-mail: chen.chen@mail.sic.ac.cn;

CAO Minghe, professor. E-mail: caominghe@whut.edu.cn

致形变, 并对该体系的光致形变效应进行了系统研究。之后, 研究人员相继在一系列铁电材料^[8-9]、半导体材料^[10-14]及有机材料^[15-18]中观察到光致形变现象, 并初步尝试将性能良好的光致形变材料应用于光机电领域。相较当前微机电系统常用的电致应变/逆压电效应, 光致形变效应有望实现器件的小型化及无线化^[19-24]。

研究人员通常认为铁电材料的光致形变效应是由反常光伏效应和逆压电效应叠加导致的: 铁电材料在一定光照条件下能够产生显著超过其带隙的光电压, 进而通过逆压电效应引起机械应变^[2,7,25]。具有较大光致形变效应的 PLZT 体系是目前最有希望实现应用的一种铁电材料, 但由于其较大的光学带隙, 仅在紫外光范围内具有光致形变响应, 严重限制了其实际应用范围。此外该体系含有铅元素, 对环境与人体具有一定的危害^[21-22,26-27]。因此, 开发在可见光范围内具有良好光致形变性能的新型无铅材料具有十分重要的意义。

$\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-BaTiO}_3$ (NBT-BT)钙钛矿铁电材料因其良好的综合性能而受到广泛研究。据文献^[28]报道, 在 NBT-BT 固溶体的 B 位掺杂 Ni 元素能有效减小其光学带隙, 进而提升其对可见光的吸收。因此, 本研究通过在 NBT-BT 体系 B 位掺杂 Ni 元素形成 $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-Ba}(\text{Ti}_{0.5}\text{Ni}_{0.5})\text{O}_3$ (NBT-BNT)固溶体, 采用传统固相法结合放电等离子体烧结法制备高质量 NBT-BNT 陶瓷, 并进一步研究该体系在可见光范围内的光致形变性能。

1 实验方法

1.1 NBT-BNT 粉体及陶瓷的制备

采用 Na_2CO_3 (纯度 99.9%), Bi_2O_3 (纯度 99.9%), BaCO_3 (纯度 99.9%), NiO (纯度 99.9%)和 TiO_2 (纯度 99.8%)高纯粉体为原料, 按 $0.94\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}0.06\text{Ba}(\text{Ti}_{0.5}\text{Ni}_{0.5})\text{O}_3$ (NBT-BNT)化学计量比称量。采用乙醇作为湿磨介质以 400 r/min 的速度球磨 12 h。干燥后的粉体在 850 °C 预烧 10 h 制备 NBT-BNT 粉体。将粉体装入直径 10 mm 的石墨模具中进行放电等离子体烧结(SPS)烧结, 烧结温度 880 °C, 压力 40 MPa, 保温时间 5 min。将烧结的陶瓷样品打磨至 0.5 mm 后, 放入坩埚在空气环境下退火处理, 退火温度 800 °C, 保温 10 h。采用同样的工艺制备对照样品 $0.94\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}0.06\text{BaTiO}_3$ (NBT-BT)。将 NBT-BNT 陶瓷进一步加工为 $7\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$ 长条并沿长度方向极化(极化条件: 60 °C 硅油, 50 kV/cm 直流

电场), 用于光致形变性能的测试。极化后 NBT-BNT 陶瓷样品的 d_{33} 约为 70 pC/N。

1.2 NBT-BNT 材料形貌及性能测试

采用德国 Bruker D8 Advance X 射线衍射仪(CuK α)表征所制粉体及陶瓷样品的物相结构; 采用荷兰飞纳公司 Phenom Pro 扫描电子显微镜(SEM)表征陶瓷断面显微形貌; 利用美国 PerkinElmer Lambda 900 UV/VIS/NIR 分光光度计采集样品的紫外-可见吸收光谱; 采用电容膨胀计测试样品在不同光照条件下的光致形变性能^[3,29]; 并利用美国福禄克公司 Ti400+热像仪监测样品在光致形变测试过程中的温度变化; 采用美国吉时利公司 6517B 微电流计测试样品的光电性能。实验过程中所用光源为 405、520 和 655 nm 激光。

2 结果与讨论

2.1 物相及显微结构

NBT-BNT 与 NBT-BT 预烧粉体及陶瓷样品的 XRD 图谱如图 1(a)所示, 所有样品的衍射峰均与钙钛矿结构的 $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ 标准卡片相符合, 且无明显杂质峰。相比 $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ 标准衍射峰, NBT-BNT 与 NBT-BT 样品的衍射峰存在明显左移(图 1(b)), 由此表明 $\text{Ba}(\text{Ti}_{0.5}\text{Ni}_{0.5})\text{O}_3$ 及 BaTiO_3 的掺杂引起晶格膨

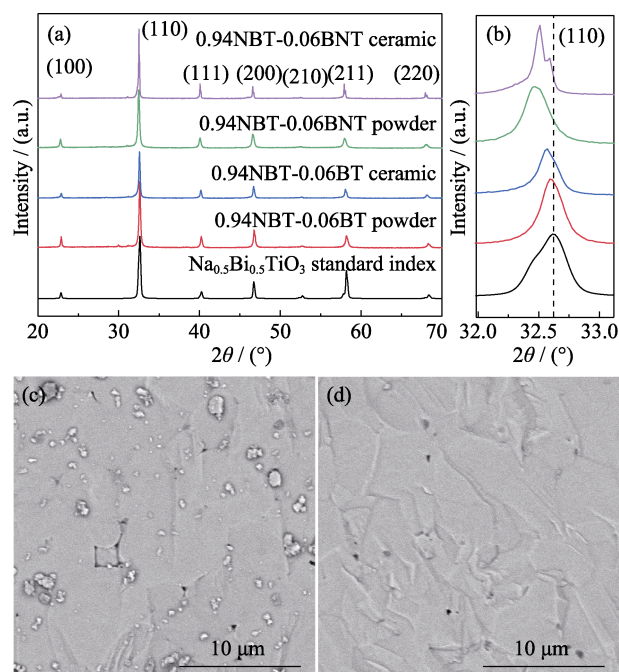


图 1 NBT-BNT 与 NBT-BT 样品的 XRD 图谱(a~b)和 NBT-BNT(c)和 NBT-BT(d)陶瓷断面的 SEM 照片

Fig. 1 XRD patterns (a-b) of NBT-BNT and NBT-BT samples, cross sectional SEM images of NBT-BNT (c) and NBT-BT (d) ceramic

胀。NBT-BNT 与 NBT-BT 陶瓷样品的断面 SEM 照片如图 1(c-d)所示, 两种组分陶瓷均具有致密的微观结构, 平均晶粒大小约为 5 μm 。

2.2 光吸收性能

图 2(a)为 NBT-BNT 与 NBT-BT 样品的紫外-可见吸收光谱。相比 NBT-BT 样品, NBT-BNT 样品具有明显的可见光吸收, 表明 B 位 Ni 掺杂能有效提升 NBT-BT 在可见光范围内的光吸收。计算表明(图 2(b)), NBT-BNT 样品的光学带隙(2.19 eV)较 NBT-BT (3.21 eV)显著减小。

2.3 光致形变性能

由于 NBT-BNT 样品具有显著的可见光吸收, 光

致形变测试光源分别选取波长 405 nm(紫色), 520 nm(绿色)和 655 nm(红色)的激光。图 3(a)为 NBT-BNT 样品在不同光照条件下的光致形变性能($\Delta L/L$), 表明样品在三种波长光源照射下均有明显的光致形变响应, 并且随着激光强度的增大, 光致形变量也明显增加。当光强为 25 kW/m^2 , 样品在 405、520 和 655 nm 光照下的 $\Delta L/L$ 分别为 0.21%, 0.13%和 0.11%, 均达到 10^{-3} 数量级。此外, 进一步研究样品在 5 kW/m^2 (图 3(b))和 15 kW/m^2 (图 3(c))激光照射下光致形变性能的重现性与稳定性, 结果表明 NBT-BNT 陶瓷的光致形变性能在不同光强下均具有良好的重现性和稳定性, 以及快速响应能力。

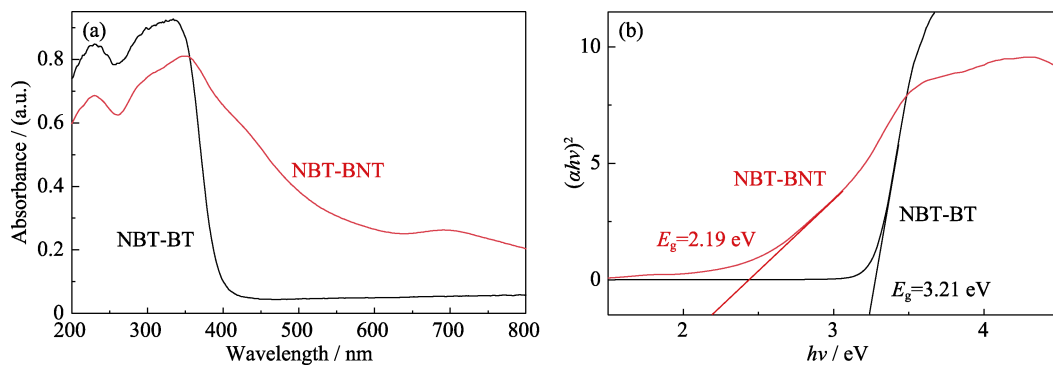


图 2 NBT-BNT 与 NBT-BT 样品的吸收光谱(a)及带隙大小(b)
Fig. 2 Absorption spectra (a) and bandgaps (b) of NBT-BNT and NBT-BT samples

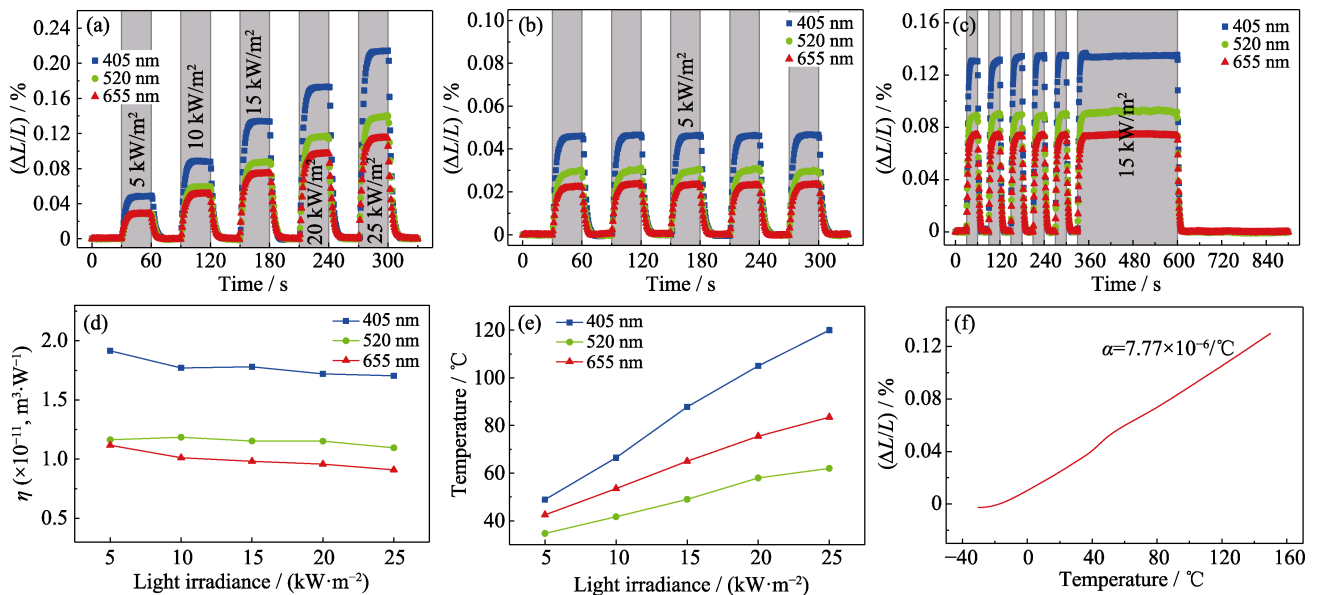


图 3 NBT-BNT 样品在不同光照条件下的光致形变性能(阴影部代表光照区间)(a), NBT-BNT 样品分别在 5 kW/cm^2 (b)和 15 kW/cm^2 (c)光强下的光致形变稳定性, NBT-BNT 样品在不同光照条件下的光致形变系数(d), NBT-BNT 样品在不同光照条件下(与(a)图相对应)的温度变化(e)和 NBT-BNT 样品的热膨胀曲线(f)

Fig. 3 Photostrictive performance of the NBT-BNT sample under different light conditions (shaded part indicates laser on state) (a), Stability of the photostrictive properties of the NBT-BNT sample under 5 kW/cm^2 (b) and 15 kW/cm^2 (c), photostriction coefficient of NBT-BNT sample under different light conditions (d), temperature change of the NBT-BNT sample (e) corresponding to Fig.(a), and thermal expansion curve of the NBT-BNT sample (f)

由于光致形变性能受样品厚度与光源光强的影响, Kundys^[4]引入光致形变效率 η 来评价不同材料的光致形变性能: $\eta = \lambda/I$, 其中 t 是沿光照方向的样品厚度, λ 是光致形变量 $\Delta L/L$, I 为光照强度。

NBT-BNT 陶瓷样品在不同光照条件下的 η 如图 3(d)所示。与部分已报道材料的光致形变性能相比(表 1), NBT-BNT 陶瓷的 η 优于大多数光致形变材料。虽然 PLZT 材料的 η 更大($10^{-10} \text{ m}^3/\text{W}$), 但其光致形变测试采用 365 nm 的紫外光源。而本工作制备的 NBT-BNT 陶瓷样品在三种可见光光源下 η 均为 $10^{-11} \text{ m}^3/\text{W}$ 数量级, 在可见光范围具有明显优势。

NBT-BNT 样品在不同光照条件下照射区域温度变化如图 3(e)所示, 结果表明样品在 520 nm 光照下的温度升高低于样品在 655 nm 光照下的温度变化。而在光致形变测试中(图 3(a)), 样品在 520 nm 光照下的光致形变量均高于样品在 655 nm 光照下的结果, 此结果表明光照引起的 NBT-BNT 样品形变并非主要由光热效应引起。

通过测量样品的热膨胀系数, 可以进一步确定光照引起的温度升高对样品整体形变量的影响。NBT-BNT 样品的热膨胀曲线如图 3(f)所示。样品在 $25 \text{ kW}/\text{m}^2$ 光强 405 nm 波长光照下, 照射区域温度升高至 $120 \text{ }^\circ\text{C}$, 此温度对应热膨胀约为 0.07%。由此可见, 热膨胀引起的形变量约为光照引起的总体形变量(0.21%)的三分之一。

2.4 光电性能

图 4(a~b)分别为 NBT-BNT 陶瓷样品在极化前后的光电性能(I - V 曲线), 结果表明极化前样品在不同波长光照下均未发现明显光伏效应, 无开路电压及短路电流。而极化后的 NBT-BNT 样品在不同波长光照下均观察到开路电压(2~4 V)。但其光电压较小, 无法引起逆压电效应并进一步引起样品形变。因此, 可推断 NBT-BNT 陶瓷样品的光致形变并非来自于光伏效应与逆压电效应的共同作用。

2.5 光致形变机理研究

图 5 为 NBT-BNT 陶瓷样品在外加光源照射下

表 1 部分光致形变材料的性能对比

Table 1 Comparison of the photostrictive performances of the materials in literature and this work

Compounds	Sample thickness	Illumination wavelength/nm	Light irradiance	$\lambda_{\text{max}}/\%$	$\eta/(\text{m}^3 \cdot \text{W}^{-1})$
PLZT ceramics ^[26]	0.5 mm	365	$150 \text{ W}/\text{m}^2$	0.01	3.3×10^{-10}
BiFeO ₃ crystal ^[9]	90 μm	365	$326 \text{ W}/\text{m}^2$	0.003	8.2×10^{-12}
BiFeO ₃ film ^[8]	35 nm	400	$2 \text{ mJ}/\text{cm}^2$	0.46	4×10^{-25}
Silicon crystal ^[11]	0.5 mm	248	$127 \text{ mJ}/\text{cm}^2$	-6.4×10^{-4}	-3.7×10^{-20}
Nematic elastomers ^[30]	—	365	—	20	—
SrRuO ₃ film ^[6]	40 nm	532	$62.5 \text{ W}/\text{cm}^2$	1.12	7×10^{-16}
CH ₃ NH ₃ PbBr ₃ crystal ^[5]	2.7 mm	532	$60 \text{ W}/\text{cm}^2$	-1.25	-5.6×10^{-11}
NBT-BNT	0.2 mm	405	$25 \text{ kW}/\text{m}^2$	0.21	1.68×10^{-11}
	0.2 mm	520	$25 \text{ kW}/\text{m}^2$	0.13	1.10×10^{-11}
	0.2 mm	655	$25 \text{ kW}/\text{m}^2$	0.11	9.12×10^{-12}

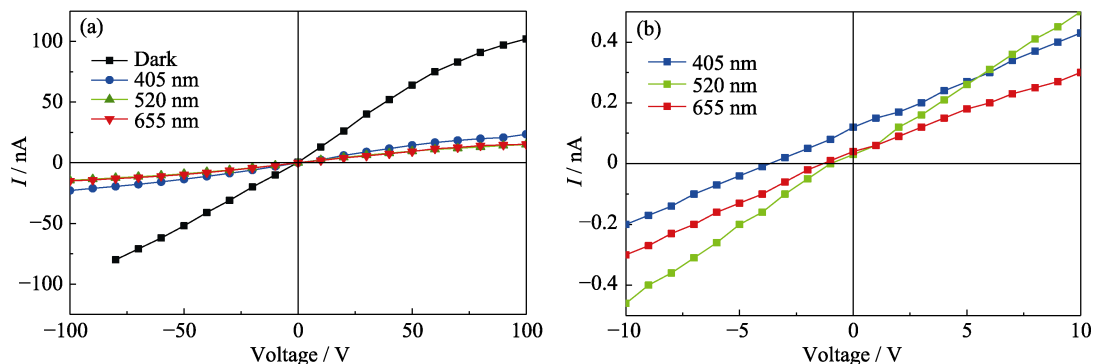


图 4 NBT-BNT 样品极化前(a)后(b)的 I - V 曲线

Fig. 4 I - V curves of the NBT-BNT sample before (a) and after (b) electric polarization

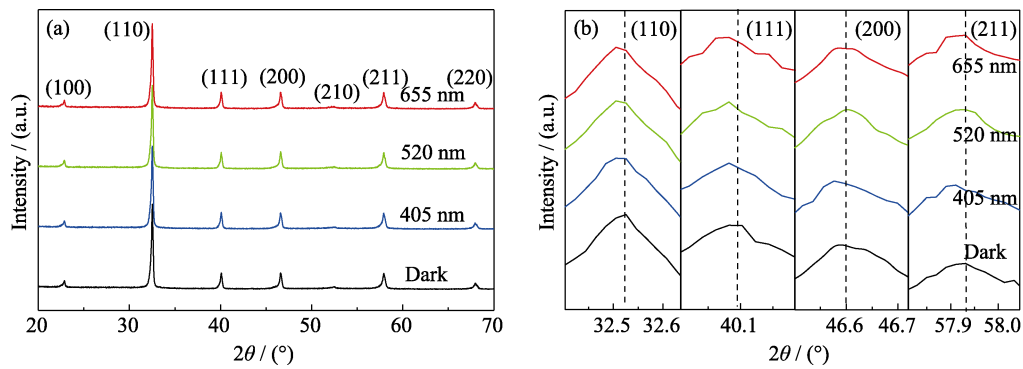


图 5 NBT-BNT 陶瓷样品在不同波长外加光源照射下的 XRD 图谱(a)和部分衍射峰局部放大图(b)

Fig. 5 XRD patterns of NBT-BNT sample under different external laser irradiations (a) and enlarged images of partial diffraction peaks (b)

的 XRD 结果。从图 5(b)XRD 衍射峰的局部放大图中可以看出, 所有衍射峰在三种波长光源照射下均向低角度偏移, 表明光照引起的晶格膨胀。表 2 给出不同峰位对应晶面间距 d 的变化, $\Delta d/d$ 结果表明各晶面间距在不同波长光照下的平均膨胀值在 10^{-4} 数量级, 与弱光强下观察到的光致形变值相一致(图 3(b))。此外, 在 405、520 和 655 nm 外部光源照射下进行 XRD 扫描时, NBT-BNT 样品的温度升高分别为 2.1、2.3 和 3.1 $^{\circ}\text{C}$, 热效应可以忽略不计。

图 6 为 NBT-BNT 样品的变温 XRD 图谱, 根据图 3(e)样品在不同光照条件下的温度变化范围, 变温

XRD 测试温度分别取 27(室温)、50、100 和 150 $^{\circ}\text{C}$ 。相比室温 XRD 结果, 高温下的 XRD 衍射峰对应晶面位移 $\Delta d/d$ 如表 3 所示, 样品在 150 $^{\circ}\text{C}$ 的各衍射峰对应晶面间距相较室温增量均在 0.0005 与 0.0011 之间, 与图 3(f)对应的热膨胀结果相对一致。此外, 样品在 50 $^{\circ}\text{C}$ 时 $\Delta d/d$ 小于表 2 外部光源照射下 $\Delta d/d$ 的变化(此时温度变化可忽略不计), 进一步表明样品的光致形变效应并非来源于光热效应导致的晶格膨胀。

目前, 研究人员对各类材料光致形变效应的产生机理尚未形成共识^[4]。极性半导体及铁电材料的光致形变可能源自反常光伏效应引起的逆压电响应^[3], 而非极性材料的光致应变可能由光生载流子与晶格自由度的相互耦合引起^[5-6]。最新研究发现未极化的 PLZT 铁电陶瓷也存在明显的光致应变效应^[31]。本研究结果表明, NBT-BNT 陶瓷极化后的反常光伏电压很小, 不足以引起逆压电效应。因此, 铁电陶瓷的光致形变机理也可能同电子与声子或晶格自由度的强耦合相关: 光生载流子引起强烈的晶格运动, 并进一步导致晶体结构的畸变, 进而引起宏观光致形变。

表 2 激光照射下 NBT-BNT 的样品 XRD 衍射面位移 $\Delta d/d$

Table 2 The displacement $\Delta d/d$ of crystal planes of NBT-BNT samples under laser irradiation

Wavelength /nm	$\Delta d/d$					
	(100)	(110)	(111)	(200)	(211)	(220)
405	0.0008	0.0003	0.0001	0.0003	0.0001	0.0005
520	0.0015	0.0005	0.0002	0.0002	0.0001	0.0003
655	0.0016	0.0004	0.0003	0.0002	0.0002	0.0003

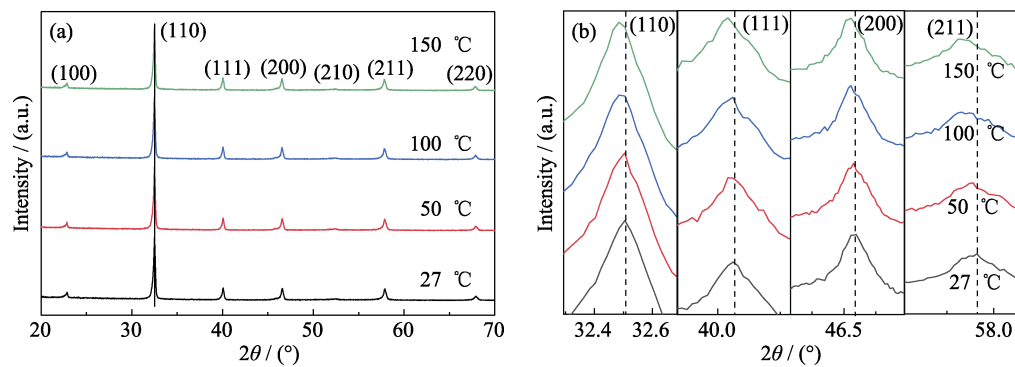


图 6 NBT-BNT 样品的变温 XRD 图谱(a)及局部放大图(b)

Fig. 6 XRD patterns (a) and enlarged patterns of partial peaks (b) of NBT-BNT sample at different temperatures

表 3 不同温度下 NBT-BNT 样品晶面位移 $\Delta d/d$ Table 3 The displacement $\Delta d/d$ of crystal planes of NBT-BNT samples at different temperatures

Temperature /°C	$\Delta d/d$					
	(100)	(110)	(111)	(200)	(211)	(220)
50	0.0004	0.0001	0.0003	0.0001	0.0005	0.0009
100	0.0008	0.0004	0.0004	0.0004	0.001	0.0008
150	0.0009	0.0006	0.0006	0.0005	0.0012	0.0011

3 结论

采用放电等离子体烧结法制备的 NBT-BNT 铁电陶瓷具有明显的可见光吸收。在 405、520 和 655 nm 激光照射下, 样品具有显著的光致形变效应, 其光致形变系数达到 $10^{-11} \text{ m}^3/\text{W}$ 。样品在光照下的温度变化及热膨胀结果表明, 光热效应对 NBT-BNT 陶瓷光致形变的贡献不大。极化 NBT-BNT 样品的光电性表明, 其微弱的反常光伏电压不足以引起逆压电效应并导致较大应变。外加光源原位 XRD 结果表明, 光照下 NBT-BNT 样品的晶格畸变是其光致形变的主要来源。

参考文献:

- [1] FIGIELSKI T. Photostriction effect in germanium. *Physica Status Solidi (b)*, 1961, **1(4)**: 306–316.
- [2] UCHINO K, AIZAWA M. Photostrictive actuator using PLZT ceramics. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1985, **24(S3)**: 139.
- [3] KUNDYS B, VIRET M, COLSON D, *et al.* Light-induced size changes in BiFeO₃ crystals. *Nature Materials*, 2010, **9**: 803.
- [4] KUNDYS B. Photostrictive materials. *Applied Physics Reviews*, 2015, **2(1)**: 011301.
- [5] WEI T C, WANG H P, LI T Y, *et al.* Photostriction of CH₃NH₃PbBr₃ perovskite crystals. *Advanced Materials*, 2017, **29(35)**: 1701789.
- [6] WEI T C, WANG H P, LIU H J, *et al.* Photostriction of strontium ruthenate. *Nature Communications*, 2017, **8**: 15018.
- [7] UCHINO K, AIZAWA M, NOMURA L S. Photostrictive effect in (Pb, La)(Zr, Ti)O₃. *Ferroelectrics*, 1985, **64(1)**: 199–208.
- [8] SCHICK D, HERZOG M, WEN H, *et al.* Localized excited charge carriers generate ultrafast inhomogeneous strain in the multiferroic BiFeO₃. *Physical Review Letters*, 2014, **112(9)**: 097602.
- [9] KUNDYS B, VIRET M, MENY C, *et al.* Wavelength dependence of photoinduced deformation in BiFeO₃. *Physical Review B*, 2012, **85(9)**: 092301.
- [10] LAGOWSKI J, GATOS H C. Photomechanical effect in noncentrosymmetric semiconductors-CdS. *Applied Physics Letters*, 1972, **20(1)**: 14–16.
- [11] BUSCHERT J R, COLELLA R. Photostriction effect in silicon observed by time-resolved X-ray diffraction. *Solid State Communications*, 1991, **80(6)**: 419–422.
- [12] GAYATHRI S, SRIDEVI S, SINGH G, *et al.* Investigation of fast and sizeable photostriction effect in tellurium thin films using fiber Bragg grating sensors. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2018, **279**: 688–693.
- [13] YANG J C, LIOU Y D, TZENG W Y, *et al.* Ultrafast giant photostriction of epitaxial strontium iridate film with superior endurance. *Nano Letters*, 2018, **18(12)**: 7742–7748.
- [14] PAILLARD C, XU B, DKHIL B, *et al.* Photostriction in ferroelectrics from density functional theory. *Physical Review Letters*, 2016, **116(24)**: 247401.
- [15] YU Y, NAKANO M, IKEDA T. Directed bending of a polymer film by light. *Nature*, 2003, **425(6954)**: 145–145.
- [16] WHITE T J, BROER D J. Programmable and adaptive mechanics with liquid crystal polymer networks and elastomers. *Nature Materials*, 2015, **14**: 1087.
- [17] YU Y. A light-fuelled wave machine. *Nature*, 2017, **546**: 604.
- [18] ZHANG Z, REMSING R C, CHAKRABORTY H, *et al.* Light-induced dilation in nanosheets of charge-transfer complexes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, **115(15)**: 3776.
- [19] MIRVAKILI S M, HUNTER I W. Artificial muscles: mechanisms, applications, and challenges. *Advanced Materials*, 2018, **30(6)**: 1704407.
- [20] TZOU H S, CHOU C S. Nonlinear opto-electromechanics and photodeformation of optical actuators. *Smart Materials and Structures*, 1996, **5(2)**: 230–235.
- [21] UCHINO K. New applications of photostrictive ferroics. *Materials Research Innovations*, 1997, **1(3)**: 163–168.
- [22] POOSANAAS P, TONOOKA K, UCHINO K. Photostrictive actuators. *Mechatronics*, 2000, **10(4)**: 467–487.
- [23] ZENG H, WASYLCZYK P, WIERSMA D S, *et al.* Light robots: bridging the gap between microrobotics and photomechanics in soft materials. *Advanced Materials*, 2018, **30(24)**: 1703554.
- [24] WANG Z, LI K, HE Q, *et al.* A light-powered ultralight tensegrity robot with high deformability and load capacity. *Advanced Materials*, 2019, **31(7)**: 1806849.
- [25] MENG Z Y, KUMAR U, CROSS L E. Electrostriction in lead lanthanum zirconate-titanate ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 1985, **68(8)**: 459–462.
- [26] TAKAGI K, KIKUCHI S, LI J F, *et al.* Ferroelectric and photostrictive properties of fine-grained PLZT ceramics derived from mechanical alloying. *Journal of the American Ceramic Society*, 2004, **87(8)**: 1477–1482.
- [27] MATZEN S, GUILLEMOT L, MAROUTIAN T, *et al.* Tuning ultrafast photoinduced strain in ferroelectric-based devices. *Advanced Electronic Materials*, 2019, **5(6)**: 1800709.
- [28] XIAO H, DONG W, GUO Y, *et al.* Design for highly piezoelectric and visible/near-infrared photoresponsive perovskite oxides. *Advanced Materials*, 2019, **31(4)**: 1805802.
- [29] KUNDYS B, BUKHANTSEV Y, VASILIEV S, *et al.* Three terminal capacitance technique for magnetostriction and thermal expansion measurements. *Review of Scientific Instruments*, 2004, **75(6)**: 2192–2196.
- [30] FINKELMANN H, NISHIKAWA E, PEREIRA G G, *et al.* A new opto-mechanical effect in solids. *Physical Review Letters*, 2001, **87(1)**: 015501.
- [31] CHEN C, LI X, LU T, *et al.* Reinvestigation of the photostrictive effect in lanthanum-modified lead zirconate titanate ferroelectrics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2020, **103(8)**: 4074–4082.