

电极图案及其连接设计对 KTP 晶体周期极化的调控研究

谭婷婷¹, 宋旭东^{2,3,4}, 赵炜迪^{2,3,4}, 覃 祺¹, 何小玲^{2,3,4}, 张昌龙^{1,2,3,4}

(1. 桂林电子科技大学 材料科学与工程学院, 桂林 541000; 2. 桂林百锐光电技术有限公司, 桂林 541000; 3. 广西超硬材料重点实验室, 桂林 541000; 4. 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 桂林 541000)

摘 要: 基于磷酸钛氧钾晶体铁电畴结构设计获得的周期极化 KTP(PPKTP)晶体, 凭借其产生的纠缠光子源具有低功耗、小体积、高纠缠品质等优越性能, 逐渐成为了量子光学中产生纠缠量子光源的核心元器件。在用电场极化法制备 PPKTP 晶体时, 非均匀电场会导致不规则的畴结构, 进而对非线性光学性能产生不利影响, 因此电场的均匀性是极化过程的核心控制要素。为提升 PPKTP 晶体极化过程中电场的均匀性, 本研究通过优化电极图案与电极连接结构, 开展了系统的仿真与实验验证。基于有限元分析, 对不同电极图案结构的电场分布进行了模拟, 提出了一种双边圆角电极图案以减轻边缘电场集中; 同时, 提出了一种并联多触点电极连接方式, 以进一步优化电场分布的均匀性。并用金相显微镜对极化晶体的畴结构进行了表征, 通过对晶体铁电畴形貌的实验验证发现双边圆角结构的电极图案能够有效减轻尖端效应, 而并联式多触点电极连接方式能够明显提升电场的均匀性, 从而为获得高质量的反转畴提供了关键条件, 最终得到了畴壁平直, 周期为 $46\text{ }\mu\text{m}$ 占空比约为 $(50\pm 1)\%$ 的水热法 PPKTP 晶体。本工作为 PPKTP 制备过程中的电场均匀化设计提供了一种简便、高效且结构合理的设计方案。

关 键 词: 磷酸钛氧钾; 周期极化磷酸钛氧钾; 有限元分析; 电场分布

中图分类号: TQ174

文献标识码: A

Regulation of Periodic Poling in KTP Crystals *via* Electrode Pattern and Connection Design

TAN Tingting¹, SONG Xudong^{2,3,4}, ZHAO Weidi^{2,3,4}, QIN Qi¹, HE Xiaoling^{2,3,4}, ZHANG Changlong^{1,2,3,4}

(1. School of Materials Science and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541000, China; 2. Guilin Bairay Photoelectric Technology Co., Ltd., Guilin 541000, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Superhard Materials, Guilin 541000, China; 4. China Nonferrous Metal (Guilin) Geology and Mining Co., Ltd., Guilin 541000, China)

Abstract: Periodically poled potassium titanyl phosphate (PPKTP) crystals, engineered based on the ferroelectric domain structure of KTP, have emerged as a core component for generating entangled quantum light sources in quantum optics. This is attributed to the entangled photon sources they produce, which exhibit superior performance such as low power consumption, compact size, and high entanglement quality. During the preparation of PPKTP crystals *via* the electric field poling method, inhomogeneous electric fields can lead to irregular domain structures, adversely affecting their nonlinear optical properties. Therefore, electric field uniformity is a critical control factor in the poling process. To improve the electric field homogeneity during the polarization of PPKTP crystals, this study systematically optimized both the electrode pattern and the electrode connection structure through simulation and experimental validation. Using finite element analysis, the spatial electric field distributions of different electrode patterns were simulated. A double-sided rounded electrode pattern was proposed to mitigate edge electric field concentration, while a parallel multi-contact electrode connection method was introduced to further enhance the uniformity of the electric field distribution. The

收稿日期: 2025-09-29; 收到修改稿日期: 2025-10-23

基金项目: 广西科技计划项目(2023AB10008; 2023AB01273); 中国有色矿业集团科技计划项目(2023KJZX007) Science and Technology Program of Guangxi Province (2023AB10008; 2023AB01273); Science Technology Project of China Nonferrous Metal Mining Group (2023KJZX007)

作者简介: 谭婷婷(2000-), 女, 硕士研究生. E-mail: 1441232713@qq.com

TAN Tingting (2000-), male, Master candidate. E-mail: 1441232713@qq.com

通信作者: 张昌龙, 教授. E-mail: 573370768@qq.com; 何小玲, 教授. E-mail: hxlpl@hotmail.com

ZHANG Changlong, professor. E-mail: 573370768@qq.com; HE Xiaoling, professor. E-mail: hxlpl@hotmail.com

domain structures of the poled crystals were characterized using metallographic microscopy. Experimental results from the ferroelectric domain morphology analysis confirmed that the double-sided rounded electrode pattern effectively alleviates the tip effect, and the parallel multi-contact connection method significantly improves electric field uniformity, thereby providing key conditions for high-quality domain inversion. Ultimately, hydrothermally grown PPKTP crystals were obtained with straight domain walls, a period of 46 μm , and a duty cycle of approximately $(50 \pm 1)\%$. This work offers a simple, efficient, and structurally rational design solution for achieving uniform electric field distribution in the preparation of PPKTP crystals.

Key words: KTiOPO₄; PPKTP; finite element analysis; electric field spatial distribution

激光系统的波长输出能力受限于增益介质固有能级跃迁机制,难以满足多场景应用对特定波长的精准需求。通过非线性光学变频技术可将泵浦激光波长转换至基频光源无法直接发射的波段,同时在激光的窄线宽、高光束质量等核心要素方面不引起大的改变^[1-2]。该技术的物理实现依赖于双折射相位匹配条件的精准调控——即通过介质的双折射特性补偿基频光与倍频光之间的波矢失配,确保非线性极化波在传播过程中持续相干叠加^[3-4]。KTP 晶体凭借其抗激光损伤能力强、非线性系数高、以及优异的化学稳定性等综合优势,成为频率转换领域不可或缺的关键材料^[5-6],但是其对波长短于 1000 nm 的激光无法实现相位匹配。经过周期极化处理的 KTP 晶体基于准相位匹配技术,系统性地补偿相位失配,不仅突破了晶体本征色散限制,还能达到全光谱范围内的高效频率转换^[7-9]。PPKTP 晶体表现出显著提升的非线性转换效率以及可灵活设计的周期结构等一系列优异特性^[10-12]。这些特性使其在量子光源制备、量子密钥分发以及高性能非线性频率转换等领域中,展现出关键性应用价值^[13-14]。

在外加电场作用下进行周期极化制备 PPKTP 时,受限于 KTP 晶体较高的本征电导率、铁电畴反转过程实时监控精度有限以及极化电场在空间分布上的非均匀性等因素,难以获得完全理想的周期畴结构。针对上述问题,研究者们^[15-16]一直在探索采用各种方法获得高质量 PPKTP 晶体,包括降低晶体电导率、优化铁电畴反转实时监控装置等手段,例如 Rosenman 等^[17-18]利用低温(-100 °C)将 KTP 晶体内部 K⁺冻结以降低电导率,再对其进行高压电场极化反转获得 PPKTP 晶体。Karlsson 等^[19]是先通过 Rb⁺、K⁺离子交换法降低 KTP 晶体的电导率,再在室温下进行高压电场极化反转以获得 PPKTP 晶体。Zhang 等^[15,20]研究发现水热法生长的 KTP 晶体具有高电阻率(可达 10-11 个数量级)、高光学均匀性、单畴特性及抗空间辐射能力等独特优势^[21];基于此,他们选择水热法生长的 KTP 晶体作为基质晶体,并进一步对其进行极化反转得到水热法 PPKTP 晶体。

Andrius 等^[22]则采用二次谐波(SHG)和电光偏振监测技术的深度结合的方式,使其可以更好地控制极化过程。另外,热释电电流测量也被推荐作为一种实时监测极化过程的方法^[23]。这些方法对实现高质量 PPKTP 晶体的制备具有重要促进意义。电极所产生的空间电场分布不均,易引起铁电畴反转程度不一致,造成畴壁位置偏移与占空比偏离理想值,最终降低 PPKTP 的光学性能与实际应用效果。而关于电场分布不均匀,Shur 等^[24]通过模拟计算发现在周期极化阵列电极的边缘区域,会形成明显的场强集中现象,这一特征也被定义为边缘效应^[25]。

极化空间电场是驱动铁电畴成核与生长的关键物理因素,其分布形态不仅直接影响成核的位置与密度,还决定了畴结构的生长路径与最终形貌。因此,本研究通过 COMSOL Multiphysics 多物理场有限元分析,对不同电极图案的电场分布进行分析,发现双边圆角结构的电极图案能够有效削弱电场的边缘效应,基于此提出了一种并联式多触点电极连接方式来进行电压的加载,以此来均匀化分布极化空间内部的极化电场,并对其空间电场分布进行了定量分析和定性分析。最后通过对极化后晶体铁电畴形貌的观测,验证了并联式多触点电极连接设计对于提高电场分布均匀性的作用,为获得高均匀性的 PPKTP 器件提供了设计思路。

1 实验方法

1.1 模型的建立

本研究利用多物理场耦合仿真软件(COMSOL Multiphysics)对 KTP 晶体极化过程的电场空间分布进行三维模拟,通过电场强度分布特征探究铁电畴极化反转特性。鉴于实际周期极化器件的电极阵列规模庞大,直接构建全尺寸模型将导致计算量呈指数级增长,普通图形工作站难以实现高效运算。为此,本次研究采用模型简化策略,选用几十支电极作为模拟单元,既保持电场分布趋势的可信度,又显著降低运算复杂度。模型建立在三维空间维度下,

通过静电模块(AC/DC Module)构建稳态电场。电极材料选用铝,并用铜作为电压施加端的连接材料。铝、铜、绝缘油及 KTiOPO_4 晶体的材料参数均依据 COMSOL 内置材料库进行设定。仿真中使用的主要参数详见表 1。

表 1 仿真建模所用到的主要参数

Table 1 Key parameters used in simulation modeling

Parameter	Numerical value
Polarization period	46 μm
Electrode width	12 μm
Crystal thickness	1 mm
Electrode thickness	0.3 μm
Relative dielectric constant of potassium titanium phosphate	13
Voltage connection end radius	130 μm
Polarization voltage	3 kV

1.2 晶体生长及电极制作

采用高纯 TiO_2 、 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 和 KH_2PO_3 为原料,按化学计量比称量,经玛瑙研钵研磨混合均匀后,转入铂金坩锅中,按预设程序进行固相反应。反应产物经破碎、清洗与除杂,获得 KTP 碎晶原料。将所得 KTP 碎晶装入黄金衬套管,并以 71% 填充度注入矿化剂溶液 (2 mol/L K_2HPO_4 + 0.1 mol/L KH_2PO_4 + 1% H_2O_2 (质量比))。固定加工好的籽晶于籽晶架内安装至衬套管随后密封。再将封装好的衬套管置入高压釜,测定反应腔自由体积后取出并擦干外壁;清除反应腔内残余蒸馏水并擦拭内壁。重新装入衬套管后,依据填充系数与反应腔体积精确注入蒸馏水,密封高压釜。将其平稳置于温差井式电阻炉中,使用炉盖与硅酸铝纤维棉密封炉膛。启动温控系统,按预设程序升温至目标温度并恒温维持。在此过程中,衬套管内温度与压力同步上升并达到稳态,实现 KTP 晶体生长。反应结束后取出衬套管,收集已生成的 KTP 晶体。

将 KTP 晶体根据实验要求切割为若干特定尺寸的晶片,长约 12 mm、宽 10 mm、厚 1 mm。在使用光刻工艺分别在其 $-z$ 面镀上框型电极以及经圆角化设计的单边圆角框型电极和双边圆角框型电极,框架内均匀排列若干长方体铝电极,电极厚度、周期及宽度分别为 300 nm、46 μm 和 12 μm 。晶片 $+z$ 面则覆盖一层厚度为 300 nm 的均匀铝电极。随后把实验晶片放在极化电路中进行极化,极化过程采用 d_{33} 对 PPKTP 晶体极化过程进行检测,并用光学显微镜对 PPKTP 晶体畴结构进行表征。

2. 结果和讨论

2.1 电极图案的空间电场分析

极化区域分布不均制约 PPKTP 晶体质量的关键问题,而电场分布均匀性是影响该现象的核心因素之一。在基于金属电极的极化工艺中,框型电极(图 1(a))在高电压极化条件下,电极间相互作用显著,尤其表现为突出的尖端效应,易引起横截面上畴结构分布不均,从而影响畴的一致性周期性。为削弱尖端效应,在前期的研究中常常采用单边圆角电极图案(图 1(b)),然而在研究中发现受限于尖端效应及电场分布不均匀的影响,反转畴质量仍未达到预期。基于此,本研究提出一种双边圆角电极图案(图 1(c))以显著降低边缘电场强度,进一步抑制尖端效应。

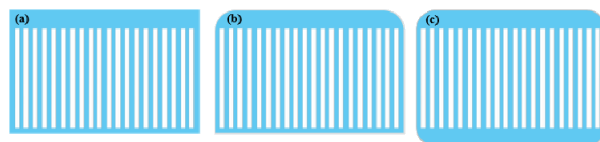


图 1 不同电极图案结构

Fig. 1 Different electrode patterns

(a) Rectangular electrode; (b) Rectangular electrode with rounded corners on one side; (c) Rectangular electrode with rounded corners on both sides

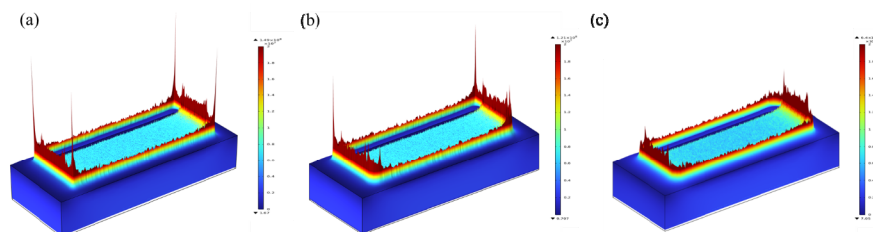


图 2 不同电极图案的空间电场分布

Fig. 2 Spatial Electric Field Distribution for Different Electrode Patterns

(a) Electric field distributions of the frame-shaped electrode; (b) Electric field distribution of the single-sided rounded-corner electrode; (c) Electric field distribution of the double-sided rounded-corner electrode

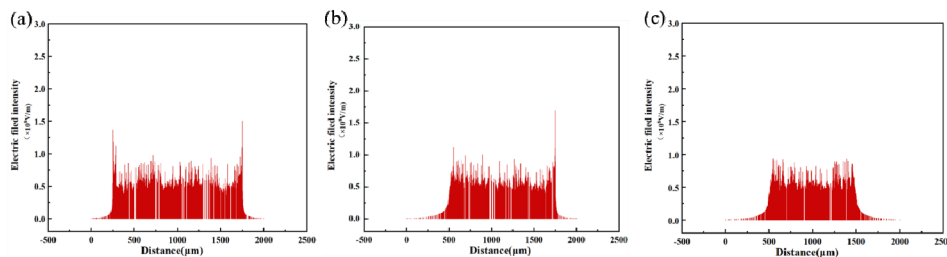


图3 不同电极图案的边缘电场分布

Fig. 3 Edge Electric Field Distribution for Different Electrode Patterns

(a) Edge electric field distribution of the frame-shaped electrode; (b) Edge electric field distribution of the single-sided rounded-corner electrode; (c) Edge electric field distribution of the double-sided rounded-corner electrode

为系统对比不同电极图案的边缘电场调控效果, 本工作采用 COMSOL 多物理场有限元分析软件, 对传统框型电极、单边圆角电极及本研究提出的双边圆角电极的极化电场空间分布特征展开了模拟电场分析。不同图案电极结构的电场整体分布模拟结果如图 2 所示, 而其相应的边缘电场分布则如图 3 所示。对于框型电极结构, 边缘电场最大值达到了 1.50×10^8 V/m(图 3(a)), 其电极图形四周的尖角处存在显著的尖端效应, 表现为局部电场强度急剧升高(图 2(a)); 采用单边圆角电极结构(图 2(b))时, 带有圆角的电极部分, 尖端效应得到明显削弱, 但未设置圆角的另一端, 仍存在较强的边缘电场(图 3(b)); 而双边圆角电极结构(图 2(c)), 电极图案四周的边缘电场均被显著削弱其边缘电场最大值降至 8.4×10^7 V/m, 相比框型电极降低了一个数量级(图 3(c))。模拟结果表明, 双边圆角电极结构能够有效减弱边缘电场过高的电场强度, 优化极化空间的电

场分布状态。

为验证模拟仿真结果, 本工作将刻有不同电极图案的晶片置于相同极化电路中进行极化。在极化过程中, 对样品施加三角波脉冲电场, 其电场强度为 3 kV/mm, 脉冲宽度为 4.8 ms。实验结果表明, 采用框型电极的样品(图 4(a))在极化过程中因强烈的尖端效应, 造成边缘电场过高, 导致晶片出现裂痕。而对于单边圆角电极样品(图 4(b)), 其反转畴占空比呈现明显不均性, 这主要源于其仅单侧电极经过圆角化处理, 而未经处理的一侧因尖端效应造成该侧边缘电场集中, 从而引起整体电场分布不对称。相比之下, 双边圆角电极样品(图 4(c))则获得了畴壁平直、占空比均匀的反转畴结构。综上所述, 双边圆角宽电极结构可有效削弱尖端效应, 有助于提高畴反转质量。

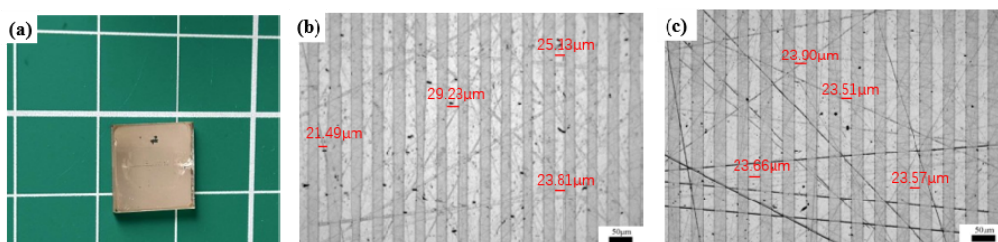


图4 极化后的样品图

Fig. 4 Image of the polarized sample

(a) Cracked crystal after polarization of the frame-shaped electrode; (b) Crystal domain morphology after polarization of a single-sided rounded corner electrode; (c) Crystal domain morphology after polarization of a double-sided rounded corner wide electrode

2.2 电极连接方式的空间电场分析

为进一步优化电场的均匀性, 基于先前设计的双边圆角电极图案, 随后开发了一种并联式多触点电极连接方式(图 5(b)), 以施加极化电压。与传统双边接线的电极连接方式(图 5(a))相比, 该结构可显著改善晶体内部电场分布的均匀性。同时, 通过使用 COMSOL Multiphysics 多物理场耦合仿真软件, 对不同电极连接方式下的极化电场空间分布进行了模

拟, 图 6 展示了双边接线的电极连接设计和不同触点数量的并联式电极连接方式所对应的电场分布仿真结果。其中, 图 6(a, d)为双边接线的电极连接方式在外加电场条件下的空间电场模拟分布图, 可见晶体表面电场分布严重不均, 电场呈现由金属电极向周围扩散的趋势, 且晶体两侧电场强度显著低于中间区域。图 6(b, e)为并联式 4 触点电极连接方式的仿真结果, 电场分布在晶体表面得到明显改善,

均匀性有所提高。图 6(c, f)则为并联式 8 触点电极连接结构在电压加载下的模拟情况, 从结果可知, 该电极连接构型实现了对晶体表面电极图形的全面且较为均匀的电场覆盖, 表现出优良的电场分布一致性。

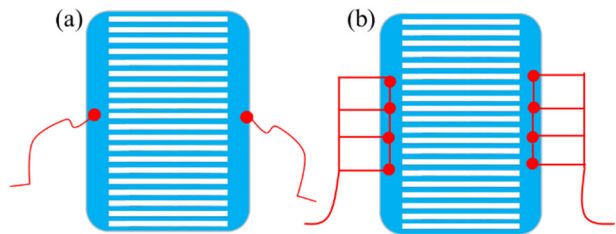


图 5 不同电极连接方式示意图

Fig. 5 Schematic Diagram of Different Electrode Connection Methods

(a) Bilateral wiring electrode connection method; (b) Parallel multi-contact electrode connection schematic

为了更直观分析晶体内部电场分布, 本研究在垂直于电极平面的方向上选取了不同电极连接方式下晶体内部的截面, 其空间电场分布如图 7(a)~(c)所示; 同时图 8(a)~(c)展示了不同电极连接方式下晶体外侧 x - z 面的电场分布情况。模拟结果表明, 电场从金属电极下方向周围空间扩散。随着模拟金属触点数量的增加, 电场在晶体内部呈现更集中、更均匀分布特征, 有助于提升整体电场的空间均匀性。

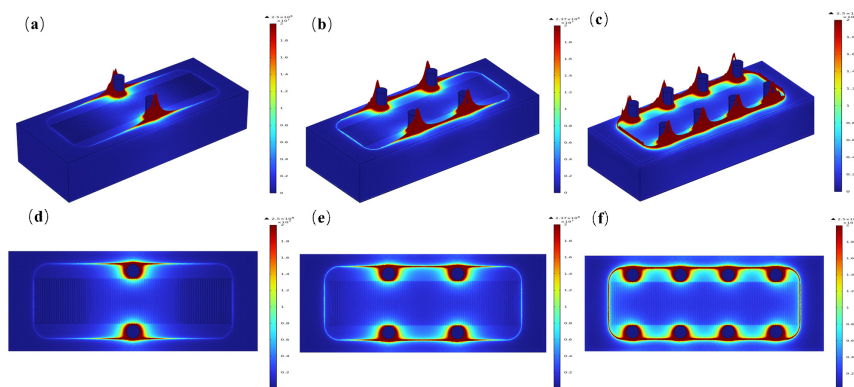


图 6 不同电极连接结构的内部空间电场分布图

Fig. 6 Spatial electric field distribution diagrams for different electrode connection configurations

(a, d) Overall simulation results and surface simulation results for the bilateral connection structure, respectively; (b, e) Overall simulation results and surface simulation results for a parallel 4-contact connection structure; (c, f) Overall simulation results and surface simulation results for the parallel 8-contact connection structure

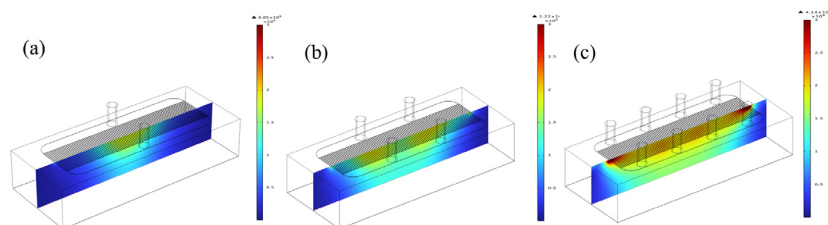


图 7 不同电极连接结构所选内切面的内部空间电场分布图

Fig. 7 Spatial electric field distribution on selected internal cross-sections for different electrode connection structures

(a) Spatial electric field distribution diagram of the inner surface for the bilateral electrode connection method; (b) Spatial electric field distribution diagram of the inner surface for the parallel 4-contact electrode connection method; (c) Spatial electric field distribution diagram of the inner surface for the parallel 8-contact electrode connection method

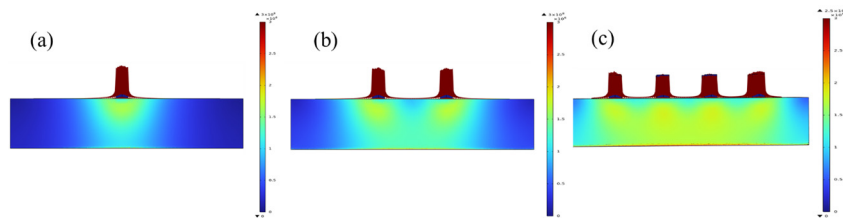


图 8 不同电极连接结构下晶体外侧 x - z 面的内部空间电场分布图

Fig. 8 Internal spatial electric field distribution on the x - z plane of the crystal exterior under different electrode connection configurations

(a) Internal electric field distribution map on the outer x - z plane of the crystal for the bilateral wiring electrode connection method; (b) Internal electric field distribution map on the outer x - z plane of the crystal for the parallel 4-contact electrode connection method; (c) Internal electric field distribution map on the outer x - z plane of the crystal for the parallel 8-contact electrode connection method

此外,为进一步定量分析空间电场分布特征,在上述已选定的分析切面中,沿垂直于电极的方向选取晶体表面的特征直线作为数据提取路径,通过采集该路径上的电场强度数据,以分析晶体表面电场的分布规律与均匀性。相关模拟结果如图 9 所示。其中图 9(a, c, e)分别对应所选特征直线的电场强度整体分布曲线,图 9(b, d, f) 则为各曲线关键区域的局部放大图,用于清晰观察电场细节变化。对于双边接线电极连接方式(图 9(b)),其电场强度分布存在显著峰值,整体电场分布分散性强;数据显示,该电极接触结连接结构下电场强度最大值 3.27×10^6 V/m,最小值仅为 3.21×10^5 V/m,最大电场强度为

最小电场强度的 10 倍,电场梯度差异显著。采用并联式 4 触点的电极连接结构时(图 9(d)),电场强度分布中仍存在明显峰值,但电场均匀性已得到改善;此时最大电场强度为 3.18×10^6 V/m,最小电场强度提升至 9.45×10^5 V/m,最大与最小电场强度的比值降至 3 倍,电场强度的落差显著缩小。而采用均匀的并联式 8 触点电极连接设计进行电压加载时(图 9(f)),电场分布呈现出显著的集中性特征:电场强度最小值为 1.35×10^6 V/m,最大值为 3.91×10^6 V/m,最大与最小电场强度的比值仅为 2 倍,且整个分布曲线中无明显突出的电场峰值,电场均匀性得到大幅提升。

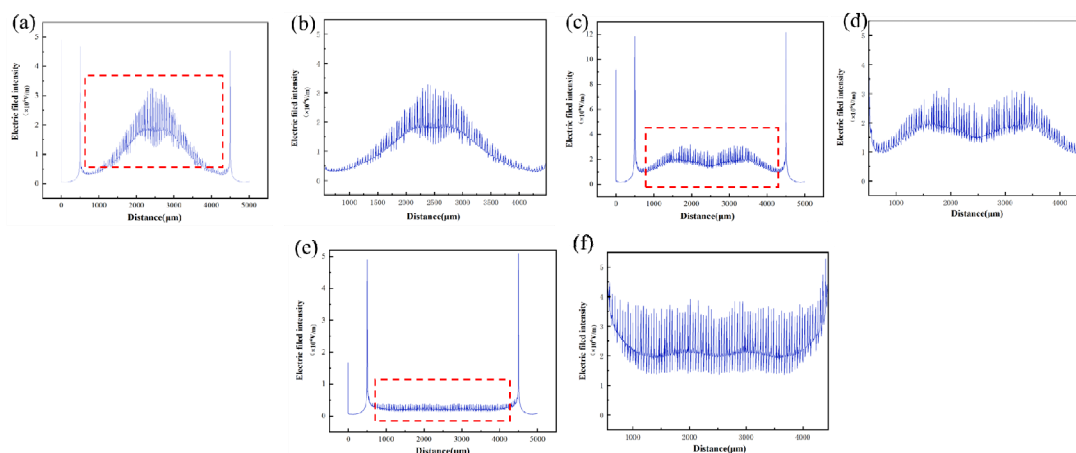


图 9 晶体表面所选直线上的电场强度分布图

Fig. 9 Electric field distribution map along the selected line on the crystal surface

(a, b) Overall distribution and local magnification of the electric field strength along a selected straight line on the crystal surface for the bilateral wiring electrode connection method, respectively; (c, d) Overall distribution and local magnification of the electric field strength along a selected straight line on the crystal surface for the parallel 4-contact electrode configuration; (e, f) Overall distribution and local magnification of the electric field strength along a selected straight line on the crystal surface for the parallel 8-contact electrode configuration

本工作基于前文 1.2 节所述的晶体切割尺寸与电极图案规格,设计了 3 组实验,分别采用双边接线的电极连接、并联式 4 触点连接与并联式 8 触点连接,各组触点间间隔统一设置为 2.54 mm(对应 0.1 英寸,为常用进口单位,便于金属触点的标准化加工)。极化过程中,使触点均匀并排分布于电极区域内,确保实验的对比性。实验结果如图 10 所示。其中,图 10(a, b, c)分别为不同电极连接方式下晶体畴结构的 100 倍显微图像,图 10(d, e, f)为对应区域的 200 倍放大图像;在各放大图像的上半部分与下半部分分别选取特征直线 T 与 d(黄色箭头指示畴反转区域的计数起始位置,黑色箭头指计数终止位置,计数方式为从左至右),提取的畴结构参数数据如图 11 所示。分析结果表明,使用双边接线电极连接方式进行极化的样品(图 10(a, d))出现畴壁弯曲明显、占空比分布不均的现象,且上部畴壁宽度普遍大于

下部,最大反转畴周期为 $30.88 \mu\text{m}$,最小周期为 $20.17 \mu\text{m}$ (图 11(a))。采用并联式 4 触点电极连接方式进行极化的样品(图 10(b, e)),畴结构质量较前者有所改善,畴壁整体平直性及占空比均匀性均有提升,但仍存在问题,从数据分布(图 11(b))可见,中间区域的反转畴宽度整体略大于两侧区域,均匀性仍需优化。而采用并联式 8 触点电极连接方式极化后的样品(图 10(c, f)),最终得到了畴壁平直,周期为 $46 \mu\text{m}$ 占空比约为 $(50 \pm 1)\%$ 的水热法 PPKTP 晶体(图 11(c)),极化电场均匀性得到极大改善。

实验证明,本工作通过优化现有的框型电极图案,采用双边圆角结构以减弱尖端效应,并改进电极连接方式以并联式多触点连接替代原有双边粘线的电极连接方式,此种方式相较于原有的电极连接方式,不仅操作简便、高效且可行性强,还能显著改善电场分布的均匀性。但需注意,在实际应用中

需依据电极图案的尺寸灵活配置触点数量,若触点分布过于密集,易引发压力过载,增加晶片碎裂的

风险。接触点数量可通过电极图案宽度/(接触点间距+接触点直径)计算得出。

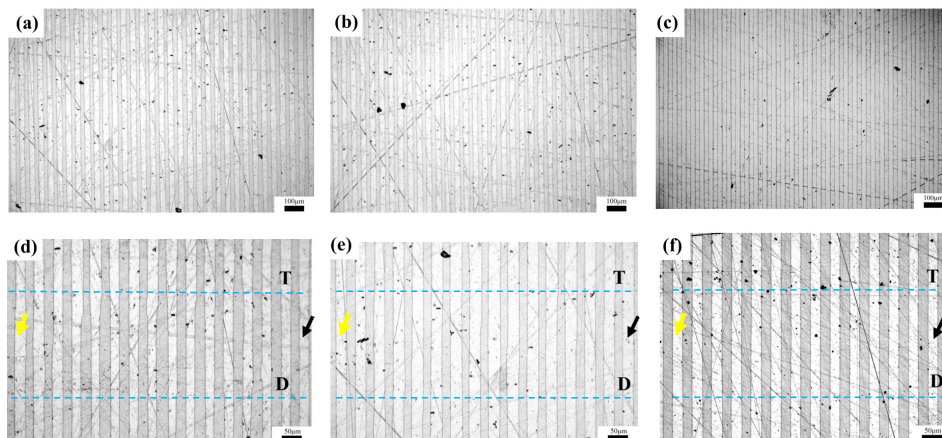


图 10 不同电极连接方式下极化后 KTP 晶体+z 面的畴壁形貌

Fig. 10 Domain wall morphology of polarized KTP crystal along the +z plane under different electrode connection configurations

(a, d) Domain wall morphologies under 100 $\times$ and 200 $\times$ magnification for the bilateral electrode connection method, respectively; (b, c) Domain wall morphologies under 100 $\times$ and 200 $\times$ magnification for the parallel 4-contact electrode connection method, respectively; (e, f) Domain wall morphologies under 100 $\times$ and 200 $\times$ magnification, respectively, for the parallel 8-contact electrode configuration

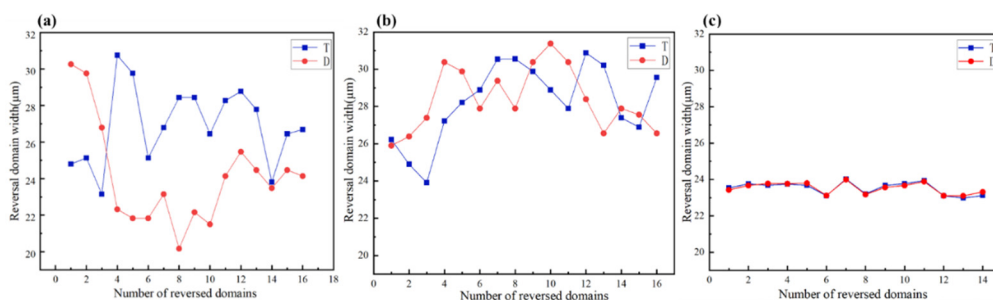


图 11 不同电极连接方式下其所特征直线上的反转畴宽度

Fig. 11 The width of the reversed domain on the characteristic straight line under different electrode connection methods

(a) Width of the reversed domain on the selected characteristic line under the bilateral wiring electrode connection mode; (b) Width of the reversed domain on the selected characteristic line under the parallel 4-contact electrode connection mode; (c) Width of the reversed domain on the selected characteristic line under the parallel 8-contact electrode connection mode

3. 结论

本工作优化了制备周期极化 KTP 晶体过程中电极图案及电极连接方式的方法。该方案通过采用双边圆角电极图案,有效地削弱了尖端效应。此外,并联式多触点的电极连接方式改善了晶体表面的电场分布。实验结果表明:根据晶体尺寸适当采用该方案可显著提高晶体内部极化电场的均匀性,从而为获得高质量的反转畴提供了关键条件,最终得到了畴壁平直,周期为 46 μm 占空比约为(50 $\pm$ 1)%的水热法 PPKTP 晶体。该方案为 PPKTP 晶体的制备提供了一种简便、高效且结构合理的改善电场均匀化的方法。

参考文献:

- [1] BOES A, CHANG L, LANGROCK C, *et al.* Lithium niobate photonics: Unlocking the electromagnetic spectrum. *Science*, 2023, **379**(6627): eabj4396.
- [2] FENG J, WANG P, CHENG X, *et al.* A high efficient dual-wavelength mid-infrared optical parametric oscillator pumped by the raman fiber oscillator. *IEEE Photonics Journal*, 2020, **12**: 1502908.
- [3] MÜLLER J S, MORANDI A, GRANGE R, *et al.* Modeling of random quasi-phase-matching in birefringent disordered media. *Physical Review Applied*, 2021, **15**(6): 064070..
- [4] NI R, DU L, WU Y, *et al.* Nonlinear Cherenkov difference-frequency generation exploiting birefringence of KTP. *Applied Physics Letters*, 2016, **108**: 031104.
- [5] SHUR V Y, PELEGOVA E, AKHMAT-KHANOV A, *et al.* Periodically poled crystals of KTP family: a review. *Ferroelectrics*, 2016, **496**(1): 49.
- [6] VERESHCHAGIN K A, VERESHCHAGIN A K, MOROZOV V B, *et al.* Combined parametric down and up-

- conversion noncollinear processes under picosecond pumping in KTP, controlled by injection seeding. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2021, **52(9)**: 1651.
- [7] ZHAO Y, XU T, WANG Y, *et al.* All optical poling of KTP crystal for phase matched second harmonic generation. *Applied Physics Letters*, 2025, **126(10)**: 102902.
- [8] KORES C C, CANALIAS C, LAURELL F. Quasi-phase matching waveguides on lithium niobate and KTP for nonlinear frequency conversion: a comparison. *APL Photonics*, 2021, **6(9)**: 091102.
- [9] WANG J, LIN H. The single-cycle biphotons generated by SPDC in chirped QPM PPKTP crystal. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 2024, **34(5)**: 2450006.
- [10] LEE C S, ZUKAUSKAS A, CANALIAS C. Large-aperture periodically poled Rb-doped KTP with a short-period via coercive field engineering. *Optical Materials Express*, 2023, **13(8)**: 2203.
- [11] NIU S-J, YANG C, LI Y, *et al.* Cavity-enhanced frequency doubling with a third-order quasi-phase-matched PPKTP crystal. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, **38(9)**: 2775.
- [12] VENKATARAMAN V, GHOSH J. Bright source of narrowband polarization-entangled photons from a thick type-II ppKTP crystal. *Optics Express*, 2024, **32(3)**: 3470.
- [13] NIU S, ZHOU Z, CHENG J, *et al.* Multi-color laser generation in periodically poled KTP crystal with single period. *Chinese Optics Letters*, 2023, **21(2)**: 021901.
- [14] GUO S, SHANG K. High-flux, high-visibility entangled photon source obtained with a non-collinear type-II PPKTP crystal pumped by a broadband continuous-wave diode laser. *Optics Communications*, 2023, **545**: 129586.
- [15] SONG X, HE X, SONG H, *et al.* Fabrication of hydrothermal PPKTP and its spontaneous parametric down-conversion characteristics. *Journal of Crystal Growth*, 2025, **650**: 127968.
- [16] LIU Q, SONG Y, WANG F, *et al.* Ferroelectric domain reversal dynamics in LiNbO₃ optical superlattice investigated with a real-time monitoring system. *Small*, 2022, **18(32)**: 2202761.
- [17] ROSENMAN G, URENSKI P, ARIE A, *et al.* Polarization reversal and domain grating in flux-grown KTiOPO₄ crystals with variable potassium stoichiometry. *Applied Physics Letters*, 2000, **76(25)**: 3798.
- [18] URENSKI P, ROSENMAN G, MOLOTSKII M. Polarization reversal and domain anisotropy in flux-grown KTiOPO₄ and isomorphic crystals. *Journal of Materials Research*, 2001, **16(5)**: 1493.
- [19] KARLSSON H, LAURELL F. Electric field poling of flux grown KTiOPO₄. *Applied Physics Letters*, 1997, **71(24)**: 3474.
- [20] ZHOU H, HE X, WU W, *et al.* Hydrothermal growth of KTiOPO₄ crystal for electro-optical application. *Light: Science & Applications*, 2023, **12(1)**: 23.
- [21] LV H, ZHANG C, ZHANG J, *et al.* Properties of rubidium-doped potassium titanyl phosphate (Rb: KTP) grown by hydrothermal method. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, **2679**: 012025.
- [22] KIANIRAD H, ZUKAUSKAS A, FRISK T, *et al.* Contact poling of Rb: KTiOPO₄ using a micro-structured silicon electrode. *Optics -Express*, 2015, **23(2)**: 636.
- [23] URENSKI P, ROSENMAN G. Pyroelectric effect in KTiOPO₄ and family crystals with monodomain and domain patterned structures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2000, **33(16)**: 2069.
- [24] SHUR V Y, RUMYANTSEV E, NIKOLAEVA E, *et al.* Regular ferroelectric domain array in lithium niobate crystals for nonlinear optic applications. *Ferroelectrics*, 2000, **236(1)**: 129.
- [25] SHUR V Y, AKHMATKHANOV A, BATURIN I. Micro and nano domain engineering in lithium niobate. *Applied Physics Reviews*, 2015, **2(4)**: 040604.