
单脉冲超快激光各向异性非晶化光刻

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41343.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

导读

在透明基质中实现高效光调制对于三维集成光子学的发展至关重要。然而，目前微纳光子平台主要基于片上二维结构，无法满足高折射率介电环境下三维光学设计需求。近日，浙江大学光电科学与工程学院邱建荣教授、张博副研究员等提出一种单脉冲激光按需构筑各向异性三维光子结构方法，通过单脉冲超快激光诱导的各向异性热沉积在多种透明介电晶体内部快速创建高规则度、高纯度、高可控性的各向异性非晶化相变单元，为在透明材料内部全介电三维微纳光子结构的设计制造提供了便捷的通用化解决方案。相关研究成果以Single-pulse lithography of amorphous photonic architectures inside all-inorganic dielectric crystals，为题发表于《Light: Science Applications》。浙江大学博士后王卓和博士生马榕泽为论文共同第一作者，张博副研究员、邱建荣教授为论文共同通讯作者。澳大利亚皇家墨尔本理工大学贾宝华教授团队、西安交通大学陈烽教授团队也为该工作做出了重要贡献。

研究背景

相变是光与物质相互作用中普遍存在的现象，其应用范围十分广泛，涵盖材料设计到微纳加工等领域。最典型的例子之一就是光刻技术，其利用紫外光诱导光敏介质发生精确可控的化学相变，能够在硅衬底上制造各种纳米级电路。与电子工程不同，光波的传输和调控高度依赖于无机透明介电材料，例如各种玻璃和晶体。然而，作为先进光学信息技术的关键材料，非线性介电晶体高度稳定的离子键或共价键，及其非常有限的线性光吸收使得无法通过传统光刻技术在其内部制造嵌入式人工微纳光子结构。

理论上，几乎所有介电晶体都存在相应的非晶相。晶相与非晶相在折射率、吸收率、非线性光学系数等方面存在显著差异，这使得在高折射率晶体基质中，可以通过局部非晶化相变实现显著且非易失的光学性质调控。因此，精准构筑的非晶相结构被认为是开发多功能片内三维集成光子器件极具潜力的方法。然而，传统非晶化技术（如快速淬火、气相沉积等）空间选择性低且分辨率有限，无法满足三维复杂微纳光子结构的制造要求。在无机介电晶体中按需引发并精确调控高纯度非晶化相变，并以此构建微纳光子学应用所需的高分辨率精细几何形状，仍面临巨大挑战。超快激光与透明电介质相互作用可在微尺度上产生局部高温高压，理论上具备在介电晶体中诱导高精度相变的能力。然而，超快激光的多脉冲加工过程极易引发不同非线性光学效应相互竞争，导致非均匀材料改性和杂相引入，严重阻碍了三维光子结构的精准构筑以及高效光学调制功能的实现。

研究亮点

本研究提出了一种超快激光驱动的单脉冲各向异性非晶化光刻（Single-pulse Anisotropic Amorphization Lithography, SAAL）技术。该方案利用单发超快激光脉冲，在介电晶体的三维自由空间内高效创制高度规则、高纯度的各向异性非晶相变单元，并实现了对其几何特征的多维精准调控，从而能够按需构建多功能微纳光子结构（图1）。

图1：单脉冲超快激光驱动各向异性非晶化光刻示意图

SAAL主要通过超快激光在介电晶体内部诱导的各向异性热沉积实现，该过程由强场与物质非线性相互作用激发的自由电子主导，对电子密度表现出强相关性。当激光参数超过高密度自由电子激发阈值时，即使用各向同性的高斯光束也会诱导出各向异性材料改性。在此基础上，通过主动调整高密自由电子激发区的空间轮廓，可以灵活操控SAAL过程，从而诱导出具有任意取向的各向异性非晶化相变，最终实现介电晶体内部自由空间中的三维微纳光子结构按需构筑（图2）。

图2：单脉冲超快激光驱动各向异性非晶化光刻原理

得益于单脉冲修饰机制，SAAL制备的非晶化单元具有极佳的结构规整性和相变纯度，从而在光学性质上与晶体基质形成了显著的对比度。通过操控超快激光的各向异性光场，还可以调节非晶单元的结构特征，为构建复杂的三维光子结构提供额外的自由度。这里，我们实现了长宽比达190:1的各向异性非晶单元的一步制造。值得注意的是，由于超快激光的非线性光学改性机制，SAAL展现出优异的跨材料普适性，能够广泛应用于多种介电晶体，例如石英晶体、钽酸锂晶体、钒酸钪晶体和磷酸钛氧钾晶体（图3）。

图3：SAAL的优势性能

SAAL能够直接在全无机晶体介质中高速制造介电光子器件。以钽酸锂晶体为例，我们基于SAAL技术设计并制备了高效三维非线性光子结构，利用高纯度非晶化相变单元精准擦除晶体的二阶非线性系数，实现了高效率的准相位匹配，非线性光调制效率高达1.7%。在此基础上，通过构建叉形光栅，能够同时转换光频和偏振态。值得注意的是，这些非晶态光子结构具有优异的稳定性，即使在1000°C高温下热处理20分钟后，转换效率仍保持在1.13%，凸显了SAAL在构建非易失性光子器件方面的巨大潜力（图4）。

SAAL优异的普适性使其能够拓展至多种介电晶体，从而最大限度地发挥不同基质材料的优异光学性能。例如，虽然传统铁电畴工程无法用于在石英晶体内实现非线性光调制，但几乎所有介电晶体都可以非晶化。理论上，通过SAAL技术直接在石英晶体内部构建非晶态非线性光子结构，利用石英晶体的高透明性，依然可以实现高效的非线性光学调制。本研究通过在石英晶体中构建多层级联叉形光栅，实现了二次谐波与三次谐波涡旋光束的高效产生与同时输出。其中，二次谐波转换效率达到3%，三次谐波转换效率达到0.1%。得益于石英晶体中非晶化光子结构较小的光散射损耗，其非线性转换效率甚至超过铁电畴工程。在此基础上，本研究进一步利用SAAL的灵活性，制备并演示了更复杂的三维光子器件。这些结果为在更多优秀光学平台上集成高效非线性光功能奠定了基础（图5）。

图5：石英晶体中基于SAAL的非线性光束调制

总结与展望

本研究基于强场激发高密度自由电子主导的各项异性热沉积开发了单脉冲超快激光各向异性非晶化光刻加工策略，实现了透明介质晶体内部高纯度、高规整性、高效率的三维微纳光子结构灵活构建，为无机透明介质内部多功能微纳光子器件制造提供了全新路径。未来，该技术有望与先进光场调控、拓扑光子学及超材料设计相结合，在非线性频率转换、光束整形以及三维集成光子系统开发等方面释放更大潜力。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-026-02253-1> 特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：张博等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发