



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Laser Micro/Nano-Manufacturing—Article

基于遗传算法的硅超表面实时可编程非线性波前整形

Ze Zheng^a, Gabriel Sanderson^{ab}, Soheil Sotoodeh^c, Chris Clifton^c, Cuifeng Ying^a,
Mohsen Rahmani^{a,*}, Lei Xu^{a,*}

^a Advanced Optics and Photonics Laboratory, Department of Engineering, School of Science & Technology, Nottingham Trent University, Nottingham NG11 8NS, UK

^b Faculty of Engineering, University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, UK

^c Sony Europe B.V., Basingstoke, Hampshire RG22 4SB, UK

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 November 2024

Revised 6 March 2025

Accepted 3 April 2025

Available online 2 May 2025

关键词

非线性超表面

遗传算法

波前整形

摘要

非线性波前整形对于推动光学技术进步至关重要,可实现光学计算、信息处理和成像等应用。然而,一个显著挑战在于超表面:超表面一旦制备完成,其产生的非线性波前便固定不变,缺乏灵活性。这一限制导致通常需要为不同的目标波前分别制备专用的超表面,过程既耗时又低效。为解决此问题,我们将进化算法与空间光调制器(SLM)相结合,利用单个超表面动态控制波前,减少了多次制备的需求,并能生成任意非线性波前图案,且无需复杂的光学对准。为演示该方法,我们利用遗传算法(GA)在硅超表面上通过三次谐波产生(THG),将近红外光转换为可见光并对其波前进行动态操控。硅超表面支持多极Mie共振,可强烈增强光-物质相互作用,从而显著提升共振位置的THG发射。此外,THG发射与红外输入之间的三次方关系降低了SLM产生的衍射图案中的噪声。这使得在更少对准约束下,能够对非线性发射图案进行精确的实验设计。本研究提出的方法为自优化非线性波前整形铺平了道路,推动了光学计算和信息处理技术的发展。

© 2025 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. 引言

非线性超表面由纳米原子阵列构成,已被公认为实现非线性生成过程的超紧凑、多功能平台,其涵盖范围包括二次谐波产生(SHG)、三次谐波产生(THG)、和频产生(SFG)、四波混频效应(FWM)以及高次谐波产生等过程[1–11]。在多极共振与等离激元模态的激发下,光可被强烈约束在非线性超表面内,从而显著提升非线性生成效率[12–13]。尤其是,通过精确设计非线性超表面的几何参数,可以有针对性地调控并优化其谐振性质,实现对

非线性发射的振幅、相位与偏振的灵活控制[14]。因此,非线性超表面已被广泛应用于非线性成像[11,15–16]、量子光源[17–20]、超灵敏传感[21–22]以及光学计算[23]等领域。然而,如何实现由超表面产生的非线性波前的可调与自动化工程仍是一项重要挑战,持续受到该领域内的广泛关注[24–25]。

遗传算法(GA)是一种计算机科学中受自然选择过程启发的元启发式优化算法[26]。通过利用生物学启发的算子(如变异、交叉与选择),GA能够在可计算系统中结合代价函数或适应度函数,对解或参数进行自动化搜索

* Corresponding authors.

E-mail addresses: mohsen.rahmani@ntu.ac.uk (M. Rahmani), lei.xu@ntu.ac.uk (L. Xu).

2095-8099/© 2025 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2025, 49(6): 90–95

引用本文: Ze Zheng, Gabriel Sanderson, Soheil Sotoodeh, Chris Clifton, Cuifeng Ying, Mohsen Rahmani, Lei Xu. Real-Time Programmable Nonlinear Wavefront Shaping with Si Metasurface Driven by Genetic Algorithm. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.04.023>

与优化。得益于上述能力，GA已被广泛用于传统与集成光学器件（包括透镜[27]、滤波器[28–29]、波导[30–32]以及超表面[33]）的设计。GA在光学中的另一项关键应用是与多像素振幅或相位调制器件[如空间光调制器（SLM）与数字微镜器件（DMD）]相结合，用于全息成像和散射介质多点聚焦等应用的波前整形[34–37]。然而，多像素器件固有的衍射效应会在信号采集中引入误差与噪声。为解决这一问题，通常需要借助空间滤波器或先进行去噪技术来抑制衍射影响。

近年来，光学数据处理作为一种创新方法日益受到重视。与传统电子信号处理相比，它具有响应速度更快、能耗更低及占地面积更小等优势[23,38–42]。与此同时，得益于其紧凑性和多功能性，超表面已成为光学计算领域备受瞩目的平台[23,38,41–42]。通过精心设计其共振特性，超表面能够实现自由空间中空间振幅与相位的精确控制，并在动量空间产生独特的相互作用。此外，非线性超表面突破了线性光学的局限，为将二阶、三阶乃至更高阶非线性响应配置为数据处理中的算子开辟了新途径。这些非线性响应还可进一步在动量空间中进行设计，使超表面能够在不同图像处理应用中实现多样化功能[23]。

在此，我们搭建并验证了一套实验光学系统，结合SLM、GA与硅（Si）超表面，实现对自由空间中非线性波前的操控。GA用于优化SLM的相位分布，使非线性波前可按输入的参考图像进行整形。依托多极共振，THG发射显著提升，从而实现高效的非线性转换。此外，Si超表面中THG的立方关系起到低信号滤波器的作用，有效抑制SLM产生的衍射信号，发挥去噪算子的作用。所提出的系统无须将SLM严格置于傅里叶平面，对光路对准误差更具容忍度，为下一代光学数据处理与自对准器件提供了有前景的范例。

2. 结果

我们通过图1（a）来阐释从红外输入激光束到预期非线性波前的转换过程。首先，激光光斑经SLM衍射后转化为线性信号，该信号保持与输入的线性关系且不改变频率分量。随后，Si超表面通过非线性光学过程对该线性信号进行转换与去噪，生成非线性信号。与线性信号不同，非线性信号包含与超表面相互作用产生的频移分量。我们的方法能够生成清晰的非线性信号双点图案，这与输入图形高度吻合。具体而言，图1（a）中的两个箭头代表光学系统中的两个重要流程。第一个标注为“SLM与GA”的箭头，表示利用反射式SLM操控激光束的相位分

布。该相位分布由GA根据输入图形（即预期非线性发射图案）进行优化。GA基于电荷耦合器件（CCD）照相机采集的非线性发射信号进行迭代演化，从而在GA中建立实时反馈机制。从图1（a）可见，经SLM处理后，激光光斑被调制为中心具有两个大光斑的线性信号以匹配输入图形。然而，SLM的衍射可能产生微小、杂散光斑，从而形成噪声。所幸的是，第二个过程（如图中另一箭头所示）不仅将红外信号转换为可见光，而且还能够基于THG过程滤除那些干扰性的杂散光斑，如图1（a）所示。线性与非线性信号间的立方响应，使Si超表面可作为线性信号的去噪光学处理器。对于二阶非线性效应等其他非线性效应，我们认为去噪功能仍可通过非线性关系实现。但是，二阶非线性材料的晶体取向可能会在去噪过程中引入偏振依赖性，而非仅仅依赖于强度的滤波机制。此外，请注意，基于GA的非线性波前优化过程是一个动态过程。用户可在演化过程中重置输入图形，使波前通过逐代优化逼近新目标。但是，形成更复杂的波前需要更长的演化时间。

图1（b）给出了用于非线性波前整形的光学实验装置。中心波长为1510 nm的飞秒激光束首先由反射镜1反射至加载实时优化相位分布的SLM。激光束入射方向与SLM法线方向之间的夹角约为10°。经SLM调制后的光束被调制并反射至反射镜2，并由透镜汇聚聚焦到Si超表面上。来自硅超表面的非线性转换信号由物镜收集，并用可见光照相机成像。为单独观测转换后的THG信号，在成像路径中设置了600 nm短波通滤光片。照相机与计算机相连，使得实时波前信息能够回传给GA。随后，GA依据照相机采集的图像调整SLM的相位分布。各实验器件的详细规格见附录A中的第S1节。

在该流程中，SLM和照相机均与计算机相连。我们采用的GA优化方法是一种基于随机全局搜索的迭代数值优化方法，其流程如图2所示。该算法通过MATLAB（The MathWorks Inc, 美国）实现。以CCD照相机通过实验方式测得的非线性发射强度分布作为算法的输入，目标是使其与预设目标图案（输入图像）相匹配。为简化操作，群体规模设置为50。首先，GA随机生成50组SLM相位分布，并相应地从CCD获取50组实验测得的非线性发射强度分布作为初始群体。随后，通过损失函数 L 对每个实测非线性发射图案进行评估。该损失函数定义为 $L = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n (a_{ik}^{LN} - a_{ik}^{input})$ ，其中 a_{ik}^{LN} 和 a_{ik}^{input} 分别代表采集图像与输入图像第 i 行第 k 列的像素值； m 和 n 分别为CCD照相机所选像素阵列的行数与列数； $m \times n$ 对应于采集的2D强度分布的总像素数。损失函数是评估输入图案与生成图案差

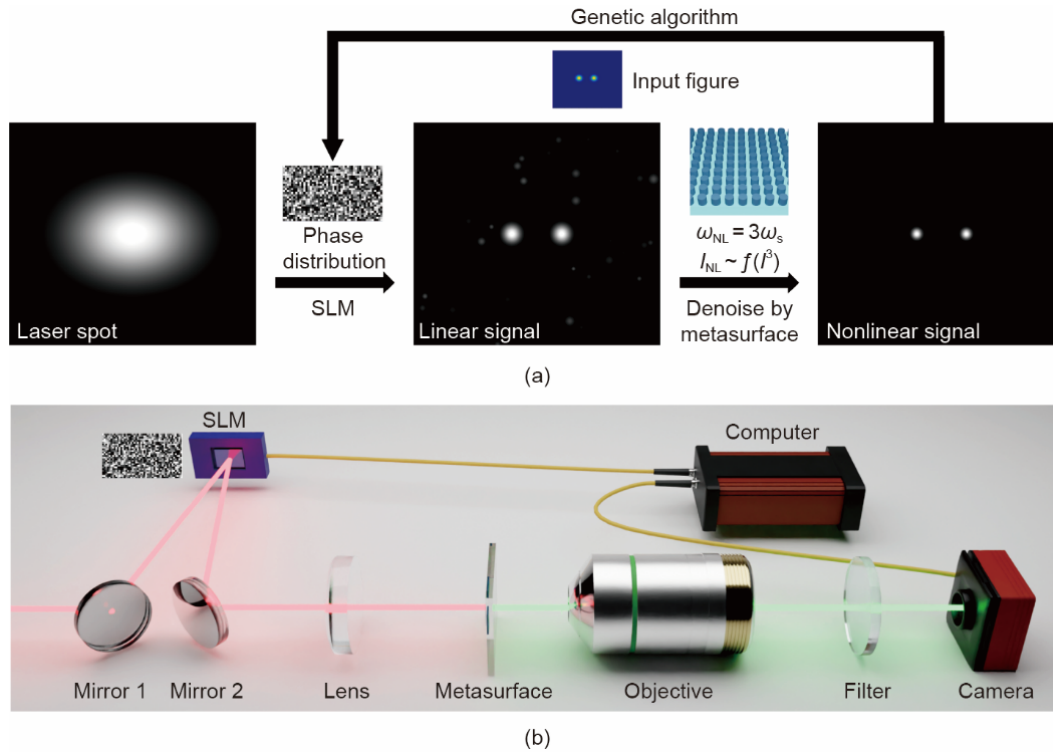


图1. (a) 所提出信号调制过程的示意图。左图：与SLM和Si超表面相互作用前的初始输入激光光斑示意图；中图：经SLM衍射的线性信号图像的示意图；右图：Si超表面生成的非线性信号图像的示意图。 ω_{NL} 为非线性波长（三次谐波波长）； ω_s 为信号波长； I_{NL} 为照相机检测到的非线性发射的光强分布；函数 $f(I^3)$ 表示Si超表面的非线性共振响应，表现为依赖于信号光束输入强度分布的三次方。(b) 所提光学系统的实验装置示意图。

异的关键指标。此处，我们将采集图像的像素值进行线性归一化处理，最高像素值取255。在预设变异率为0.15的条件下，算法选取最优的25组图案进行变异和配对，以生成SLM所需的下一代相位分布。当达到目标损失函数标准（ L_{minimum} ）时，GA程序停止运行。我们的GA优化方法可实现生成图案的实时自校正。即使光学元件出现失准或位移，GA仍能驱动相位分布持续演化直至获得新的稳定分布。然而，这种进化过程对高度复杂图案变化的实时适应能力存在局限性。神经网络被认为是一种先进算法，在经过充分训练后可显著提升处理速度[43]。我们相信，将神经网络与本光学系统相结合将能大幅缩短处理时间。

接下来，我们表征Si超表面的特性（图3）。该超表面由置于 SiO_2 基底上的Si纳米圆盘按方阵排布组成，如图3（a）所示。纳米圆盘的高度 $H = 1000 \text{ nm}$ ，半径 $r_0 = 400 \text{ nm}$ 。超表面在 x 和 y 方向的周期均为 1400 nm 。我们模拟了该超表面的线性和非线性光学特性，其中Si和 SiO_2 的折射率分别设为3.4和1.5。通过计算Si超表面的能带结构，获得了 k 空间中的共振色散关系[图3（b）]。可以看到，该结构呈现平带特性，预示着其在 k 空间中的共振偏移极小。所选共振的动量色散会影响图像转换过程中对空间频率的滤波行为。对于本文所采用的共振（红色圆

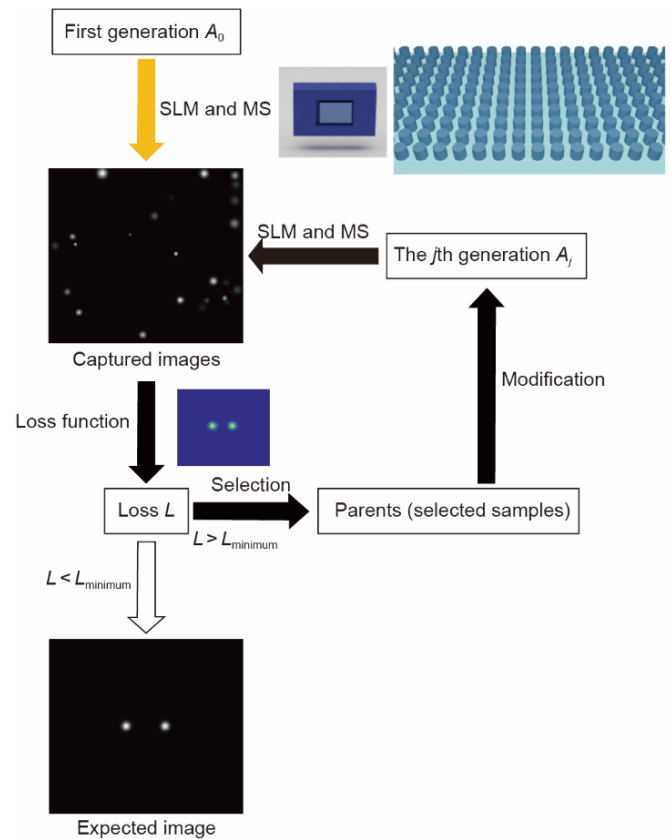


图2. 超表面（MS）光学系统中采用的遗传算法（GA）流程图。 A_0 和 A_j 分别表示初始种群和第 j 代进化种群，每个种群包含50个用于评估过程的SLM相位分布。 L 为损失函数； L_{minimum} 为目标损失函数判据。

圈标记), 其平带结构相对平坦, 意味着在非线性产生过程中能够较好地保留大部分空间频率。通过设计具有不同类型共振(如多极Mic共振、环形偶极共振以及导模共振)的超表面, 可获得具有不同特性的能带结构。据此, 通过精心设计的超表面, 可以对图像空间频率的特定响应进行处理。本文着重检测位于预期位置且具有较大振幅的非线性光点, 并滤除弱信号光点, 从而使平带结构有助于超表面对经SLM调制后的图像空间频率保持较低灵敏度。

多极模态分析表明, 约1520 nm处的共振主要由磁偶极(MD)主导, 相关证明见附录A中的第S2节[44–46]。图3(d)给出了实测与模拟透射光谱, 两者具有良好一致性。这里, 我们利用约1520 nm处的MD共振进一步增强Si超表面的THG发射。模拟(1520 nm)与实测(1510 nm)共振位置的偏差源于制造工艺的误差。电场分布如图3(c)所示。Si纳米圆盘内部形成显著的场增强, 进而依据频率关系 $\omega_{\text{THG}} = 3\omega_{\text{signal}}$ 显著提升THG发射, 其中 ω_{THG} 与 ω_{signal} 分别为非线性发射波长与输入信号波长。由此, 在约507 nm处获得THG发射[图3(e)], 其对应的场分布见图3(f)[47–50]。关于Si超表面内非线性相互作用的更多细节见附录A中的第S3节; 电位移的场分布见附录A中的第S4节; 正向THG转换效率的测量结果见附录A中的第S5节。总体而言, 非线性过程的效率通常低于线性过程的效率。但是, 我们相信该技术为在图像处理与光学计算中实现非线性算子提供了新的可能性。

图4展示了本研究提出的光学系统的实验结果。

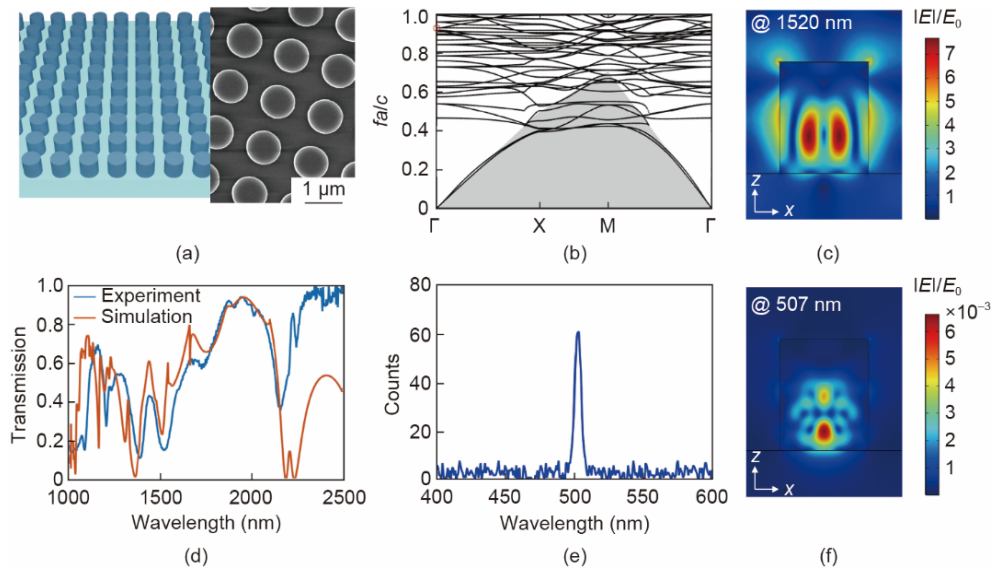


图3. (a) 左图: Si超表面的示意图; 右图: 制备的Si超表面的扫描电子显微镜 (SEM) 图像。(b) Si超表面的计算能带结构。频率归一化为 fa/c , 其中 f 表示光频率, a 为超表面周期, c 为真空中的光速。X、M和 Γ 为能带结构布里渊区的高对称点。(c) 1520 nm共振位置的模拟电场分布。归一化电场强度 $|E|/E_0$ 用于评估超表面内的局域场增强。其中, E_0 定义为入射平面波的振幅。(d) Si超表面在正入射下的模拟和测量透射光谱。(e) 1510 nm飞秒激光照射下Si超表面的测量三次谐波产生 (THG) 发射光谱。(f) 507 nm左右生成的非线性发射的模拟场分布。

图4(b)展示了具有平坦相位分布的SLM后的非线性发射, 其中SLM仅起到反射镜的作用, 对波前没有任何调制效果。随后, 将不同图案的参考图像输入GA, 根据CCD照相机采集的非线性图案, 逐代实时优化SLM的相位分布, 如图1和图2所示。对于单点聚焦情形[图4(c)和(d)], GA进化约100代后(耗时约1 h)即可在预期位置观察到清晰的聚焦点。当输入图形具有复杂的图案时, 基于GA的进化代数与耗时随之增加。对于双点聚焦的情形[图4(e)和(f)], 出现清晰双点聚焦图案约需200代的进化(耗时约2 h)。对于三点聚焦的情形[图4(g)和(h)], 进化代数可达约400代(耗时约4 h)。由于GA的优化过程具有随机性, 不同图案所需的代数为基于不同实验配置进行的估计。生成图案与输入图案的差异受损失函数标准选择的影响。我们认为, 通过优化损失函数、延长进化时间、采用更高填充因子和分辨率的SLM, 可进一步提升生成图案的保真度。综上所述, 我们实现了对不同聚焦图案非线性波前的实时调制, 能够精确控制聚焦点数量与各点位置。我们认为, 本方法在单像素成像等领域具有广泛的实验应用潜力。单像素成像是一种利用单个像素光电探测器重建图像的成像技术[51], 这一过程依赖于一系列结构化波前对物体的照射。本研究的非线性波前整形系统与单像素成像高度契合, 可实现非线性且具有自校正功能的成像方法。

有关数值模拟[52]、超表面制备及实验的材料与方法的详细信息, 请参阅第S1节。

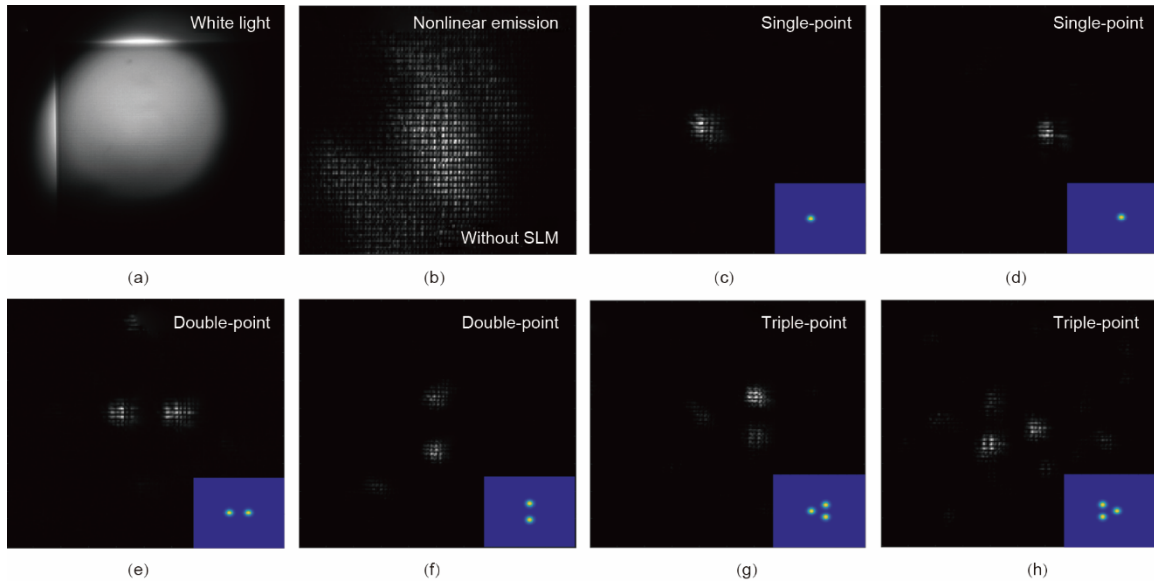


图4. (a) 白光光源照射下Si超表面的测量图像；(b) SLM平坦相位分布（无SLM调制）时的非线性发射图案；(c) ~ (h) 基于底部所示输入图形通过GA调制的非线性发射图案，展示了左侧 (c) 和右侧 (d) 的单焦点、水平排列 (e) 和垂直排列 (f) 的双焦点以及向左 (g) 和向右 (h) 箭头图案的三焦点。

3. 讨论与总结

本文通过GA连接SLM与CCD照相机，成功实现了基于Si超表面的实时可编程非线性波前整形。GA能够根据实时采集的非线性图像逐代优化SLM的相位分布，直至非线性图案与输入图像相匹配。通过设计1510 nm处的共振模式，Si超表面实现了高效的THG转换，使得经SLM调制后的红外光束可转换为可见光。THG的立方响应使Si超表面对波前执行去噪操作，从而滤除不期望的弱噪声。本研究的结果为基于超表面的实时非线性波前整形技术的发展提供了有力支撑，并有望拓展其在光学计算、信息处理与成像等领域的应用。

CRedit authorship contribution statement

Ze Zheng: Writing-review & editing, Writing-original draft, Validation, Software, Methodology, Investigation, Conceptualization. **Gabriel Sanderson:** Writing-review & editing, Investigation. **Soheil Sotoodeh:** Writing-review & editing, Resources. **Chris Clifton:** Writing-review & editing, Resources. **Cuifeng Ying:** Writing-review & editing, Supervision, Investigation. **Mohsen Rahmani:** Writing-review & editing, Validation, Supervision, Resources, Conceptualization. **Lei Xu:** Supervision, Project administration, Conceptualization.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

Ze Zheng acknowledges the support from the Royal Society scholarship. Gabriel Sanderson acknowledges support from the Biotechnology and Biological Council Doctoral Training Programme (BBSRC DTP). Mohsen Rahmani appreciates the support from the Royal Society and Wolfson Foundation (RSWF\FT\191022). The authors acknowledge the use of NTU High-Performance Computing cluster Avicenna.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.04.023>.

References

- [1] Celebrano M, Rocco D, Gandolfi M, Zilli A, Rusconi F, Tognazzi A, et al. Optical tuning of dielectric nanoantennas for thermo-optically reconfigurable

- nonlinear metasurfaces. *Opt Lett* 2021;46(10):2453–6.
- [2] Carletti L, Zilli A, Moia F, Toma A, Finazzi M, De Angelis C, et al. Steering and encoding the polarization of the second harmonic in the visible with a monolithic LiNbO₃ metasurface. *ACS Photonics* 2021;8(3):731–7.
 - [3] Löchner FJ, Fedotova AN, Liu S, Keeler GA, Peake GM, Saravi S, et al. Polarization-dependent second harmonic diffraction from resonant GaAs metasurfaces. *ACS Photonics* 2018;5(5):1786–93.
 - [4] Vabishchevich PP, Liu S, Sinclair MB, Keeler GA, Peake GM, Brener I. Enhanced second-harmonic generation using broken symmetry III–V semiconductor Fano metasurfaces. *ACS Photonics* 2018;5(5):1685–90.
 - [5] Liu S, Sinclair MB, Saravi S, Keeler GA, Yang Y, Reno J, et al. Resonantly enhanced second-harmonic generation using III–V semiconductor all-dielectric metasurfaces. *Nano Lett* 2016;16(9):5426–32.
 - [6] Okhlopov KI, Zilli A, Tognazzi A, Rocco D, Fagiani L, Mafakheri E, et al. Tailoring third-harmonic diffraction efficiency by hybrid modes in high- Q metasurfaces. *Nano Lett* 2021;21(24):10438–45.
 - [7] Gandolfi M, Tognazzi A, Rocco D, De Angelis C, Carletti L. Near-unity third-harmonic circular dichroism driven by a quasibound state in the continuum in asymmetric silicon metasurfaces. *Phys Rev A* 2021;104(2):023524.
 - [8] Xu L, Smirnova DA, Camacho-Morales R, Aoni RA, Kamali KZ, Cai M, et al. Enhanced four-wave mixing from multi-resonant silicon dimer-hole membrane metasurfaces. *New J Phys* 2022;24(3):035002.
 - [9] Carletti L, Kruk SS, Bogdanov AA, De Angelis C, Kivshar Y. High-harmonic generation at the nanoscale boosted by bound states in the continuum. *Phys Rev Res* 2019;1(2):023016.
 - [10] Zograf G, Koshelev K, Zalogina A, Korolev V, Hollinger R, Choi DY, et al. High-harmonic generation from resonant dielectric metasurfaces empowered by bound states in the continuum. *ACS Photonics* 2022;9(2):567–74.
 - [11] Zheng Z, Xu L, Huang L, Smirnova D, Kamali KZ, Yousefi A, et al. Third-harmonic generation and imaging with resonant Si membrane metasurface. *Opto-Electron Adv* 2023;6(8):220174.
 - [12] Neshev DN, Miroshnichenko AE. Enabling smart vision with metasurfaces. *Nat Photonics* 2023;17(1):26–35.
 - [13] Babicheva VE, Evlyukhin AB. Mie-resonant metaphotonics. *Adv Opt Photonics* 2024;16(3):539–658.
 - [14] Reineke B, Sain B, Zhao R, Carletti L, Liu B, Huang L, et al. Silicon metasurfaces for third harmonic geometric phase manipulation and multiplexed holography. *Nano Lett* 2019;19(9):6585–91.
 - [15] Camacho-Morales R, Rocco D, Xu L, Gili VF, Dimitrov N, Stoyanov L, et al. Infrared upconversion imaging in nonlinear metasurfaces. *Adv Photonics* 2021;3(3):036002.
 - [16] Zhou J, Zhao J, Wu Q, Chen CF, Lei M, Chen G, et al. Nonlinear computational edge detection metalens. *Adv Funct Mater* 2022;32(34):2204734.
 - [17] Marino G, Solntsev AS, Xu L, Gili VF, Carletti L, Poddubny AN, et al. Spontaneous photon-pair generation from a dielectric nanoantenna. *Optica* 2019;6(11):1416–22.
 - [18] Zhang J, Ma J, Parry M, Cai M, Camacho-Morales R, Xu L, et al. Spatially entangled photon pairs from lithium niobate nonlocal metasurfaces. *Sci Adv* 2022;8(30):eabq4240.
 - [19] Santiago-Cruz T, Gennaro SD, Mitrofanov O, Addamane S, Reno J, Brener I, et al. Resonant metasurfaces for generating complex quantum states. *Science* 2022;377(6609):991–5.
 - [20] Weissflog MA, Ma J, Zhang J, Fan T, Lung S, Pertsch T, et al. Directionally tunable co- and counterpropagating photon pairs from a nonlinear metasurface. *Nanophotonics* 2024;13(18):3563–73.
 - [21] Mesch M, Metzger B, Hentschel M, Giessen H. Nonlinear plasmonic sensing. *Nano Lett* 2016;16(5):3155–9.
 - [22] Verma MS, Chandra M. Nonlinear plasmonic sensing for label-free and selective detection of mercury at picomolar level. *ACS Sens* 2020;5(3):645–9.
 - [23] de Ceglia D, Alù A, Neshev DN, De Angelis C. Analog image processing with nonlinear nonlocal flat optics. *Opt Mater Express* 2024;14(1):92–100.
 - [24] Ding F, Meng C, Bozhevolnyi SI. Electrically tunable optical metasurfaces. *Photonics Insights* 2024;3(3):R07.
 - [25] Park S, Yu J, Boehm G, Belkin MA, Lee J. Electrically tunable third-harmonic generation using intersubband polaritonic metasurfaces. *Light Sci Appl* 2024;13(1):169.
 - [26] Katoch S, Chauhan SS, Kumar V. A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimed Tools Appl* 2021;80(5):8091–126.
 - [27] Höschel K, Lakshminarayanan V. Genetic algorithms for lens design: a review. *J Opt* 2019;48(1):134–44.
 - [28] Suckley D. Genetic algorithm in the design of FIR filters. *IEE Proc G (Circuits Devices Syst)* 1991;138(2):234–8.
 - [29] Chen YM. Passive filter design using genetic algorithms. *IEEE Trans Ind Electron* 2003;50(1):202–7.
 - [30] Sanchis L, Håkansson A, López-Zanón D, Bravo-Abad J, Sánchez-Dehesa J. Integrated optical devices design by genetic algorithm. *Appl Phys Lett* 2004;84(22):4460–2.
 - [31] Plaum B, Wagner D, Kasperek W, Thumm M. Optimization of oversized waveguide components using a genetic algorithm. *Fusion Eng Des* 2001;53(1–4):499–503.
 - [32] Ghorbaninejad H, Heydarian R. New design of waveguide directional coupler using genetic algorithm. *IEEE Microw Wirel Compon Lett* 2016;26(2):86–8.
 - [33] Jafar-Zanjani S, Inampudi S, Mosallaei H. Adaptive genetic algorithm for optical metasurfaces design. *Sci Rep* 2018;8(1):11040.
 - [34] Zhai Z, Li Q, He X, Lv Q, Feng W, Zeng Z, et al. Multiplane holographic imaging using the spatial light modulator. *Photonics* 2023;10(9):977.
 - [35] Zhang Z, Kosareva O, Zhang N, Lin L, Liu W. Genetic algorithm for the location control of femtosecond laser filament. *Sci Rep* 2020;10(1):12878.
 - [36] Feng Q, Yang F, Xu X, Zhang B, Ding Y, Liu Q. Multi-objective optimization genetic algorithm for multi-point light focusing in wavefront shaping. *Opt Express* 2019;27(25):36459–73.
 - [37] Mahlab U, Shamir J, Caulfield HJ. Genetic algorithm for optical pattern recognition. *Opt Lett* 1991;16(9):648–50.
 - [38] Pors A, Nielsen MG, Bozhevolnyi SI. Analog computing using reflective plasmonic metasurfaces. *Nano Lett* 2015;15(1):791–7.
 - [39] Golovastikov NV, Bykov DA, Doskolovich LL, Bezus EA. Spatial optical integrator based on phase-shifted Bragg gratings. *Opt Commun* 2015;338:457–60.
 - [40] Zhou Y, Zheng H, Kravchenko II, Valentine J. Flat optics for image differentiation. *Nat Photonics* 2020;14(5):316–23.
 - [41] Chizari A, Abdollahramezani S, Jamali MV, Salehi JA. Analog optical computing based on a dielectric meta-reflect array. *Opt Lett* 2016;41(15):3451–4.
 - [42] Cotrufo M, Arora A, Singh S, Alù A. Dispersion engineered metasurfaces for broadband, high-NA, high-efficiency, dual-polarization analog image processing. *Nat Commun* 2023;14(1):7078.
 - [43] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning. *Nature* 2015;521(7553):436–44.
 - [44] He Y, Guo G, Feng T, Xu Y, Miroshnichenko AE. Toroidal dipole bound states in the continuum. *Phys Rev B* 2018;98(16):161112.
 - [45] Gurvitz EA, Ladutenko KS, Dergachev PA, Evlyukhin AB, Miroshnichenko AE, Shalin AS. The high-order toroidal moments and anapole states in all-dielectric photonics. *Laser Photonics Rev* 2019;13(5):1800266.
 - [46] Grahm P, Shevchenko A, Kaivola M. Electromagnetic multipole theory for optical nanomaterials. *New J Phys* 2012;14(9):093033.
 - [47] Carletti L, Locatelli A, Stepanenko O, Leo G, De Angelis C. Enhanced second-harmonic generation from magnetic resonance in AlGaAs nanoantennas. *Opt Express* 2015;23(20):26544–50.
 - [48] Smirnova DA, Khanikaev AB, Smirnov LA, Kivshar YS. Multipolar third-harmonic generation driven by optically induced magnetic resonances. *ACS Photonics* 2016;3(8):1468–76.
 - [49] Moss D, Ghahramani E, Sipe J, Van Driel H. Band-structure calculation of dispersion and anisotropy in $\chi^{(3)}$ for third-harmonic generation in Si, Ge, and GaAs. *Phys Rev B* 1990;41(3):1542–60.
 - [50] Dulkeith E, Vlasov YA, Chen X, Panoiu NC, Osgood RM. Self-phase-modulation in submicron silicon-on-insulator photonic wires. *Opt Express* 2006;14(12):5524–34.
 - [51] Edgar MP, Gibson GM, Padgett MJ. Principles and prospects for single-pixel imaging. *Nat Photonics* 2019;13(1):13–20.
 - [52] Johnson SG, Joannopoulos JD. Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis. *Opt Express* 2001;8(3):173–90.