光电器件

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20250617001

# 基于慢波电极薄膜铌酸锂电光调制器的超短光脉冲产生

刘佳旭[1],周桥玲[1],周敬杰[1],郑少南[1],赵兴岩[1],邱　阳[1],
董　渊[1],钟其泽[1],胡　挺[1,2]*
(上海大学 1. 微电子学院; 2. 上海市汽车智能网联交互芯片与系统重点实验室,上海 201800)

**摘　要:** 超短光脉冲源可以提高数据传输速率和非线性作用效率,在光通信、超快光谱学和光学计算等领域具有重要研究意义。相比于微环谐振器激发光频梳或锁模激光器产生光脉冲的方法,由级联电光调制器和色散补偿单元组成的时间透镜系统具有明显优势,兼具出色的系统相干性以及片上集成的兼容性。文章提出一种基于慢波电极薄膜铌酸锂的级联电光调制器时间透镜系统,用于产生超短光脉冲。所设计的马赫-曾德尔强度调制器在无需移除或替换衬底的情况下,实现了2.46 V·cm的调制效率和超过100 GHz的调制带宽。通过级联强度调制器、相位调制器和单模光纤,完成了不同频率下的时间透镜系统仿真。在10 GHz,30 GHz和45 GHz频率下,系统可分别产生21,17和17条平坦度小于3 dB的梳齿,经由单模光纤压缩后的光脉冲宽度分别为3.45,1.5和1 ps。仿真结果验证了该时间透镜系统作为超短光脉冲源的有效性。

**关键词:** 薄膜铌酸锂; 慢波电极; 相位调制器; 时间透镜; 脉冲压缩
**中图分类号:** TN253　**文章编号:** 1001－5868(2025)04－0608－08

## Ultrashort Optical Pulse Generation Based on Thin-Film Lithium Niobate Electro-Optic Modulators with Slow-Wave Electrode

LIU Jiaxu[1], ZHOU Qiaoling[1], ZHOU Jingjie[1], ZHENG Shaonan[1], ZHAO Xingyan[1], QIU Yang[1], DONG Yuan[1], ZHONG Qize[1], HU Ting[1,2]
(1. School of Microelectronics; 2. Shanghai Key Laboratory of Intelligent Connected Vehicle Interaction Chip and System, Shanghai University, Shanghai 201800, CHN)

**Abstract:** Ultrashort optical pulse sources enhance data transmission rates and nonlinear interaction efficiency and play a critical role in fields such as optical communications, ultrafast spectroscopy, and optical computing. Compared to methods that employ microresonator optical frequency combs or mode-locked lasers for optical pulse generation, temporal lens systems—comprising cascaded electro-optic modulators and dispersion compensation units—offer distinct advantages, including excellent system coherence and compatibility with on-chip integration. This paper proposes a temporal lens system based on a cascaded electro-optic modulator featuring thin-film lithium niobate slow-wave electrodes to generate ultrashort optical pulses. The designed Mach－Zehnder intensity modulator achieves a modulation efficiency of 2.46 V·cm and a modulation

收稿日期:2025－06－16.
基金项目:国家自然科学基金项目(U23A20356,62204149,62205193);红外探测国家重点实验室开放课题项目(IRDT-23-08);上海市科学与工程计算专业技术服务平台.
*通信作者:胡　挺

bandwidth exceeding 100 GHz, without requiring substrate removal or replacement. Simulations of the temporal lens system driven by microwave signals at various frequencies were conducted. The results show that the system generates 21, 17, and 17 comb lines with a flatness of less than 3 dB at 10, 30, and 45 GHz, respectively. After compression by a single-mode fiber, the generated optical pulses exhibit pulse widths of 3.45, 1.5, and 1 ps, confirming the effectiveness of this temporal lens system as an ultrafast optical pulse source.

**Key words**: thin-film lithium niobate; slow-wave electrode; phase modulator; time-lens system; pulse compression

## 0　引言

片上超短光脉冲在光通信[1-3]、精密光谱学[4-6]、光计算[7]、光学原子钟[8]和非线性光学[9]等方面具有重要的应用价值，一直是光子学领域的研究热点。通过锁模激光器[10-11]和微环谐振器光频梳等方法产生的超短光脉冲，面临着光脉冲能量和宽度的限制。微环谐振器通过谐振腔中的克尔非线性和色散补偿产生密集的相干频率梳，形成耗散克尔孤子或暗孤子等状态，是超相干多波长输出的理想方法[12-14]。然而，实现稳定的孤子形成需要精确控制群速度色散（Group Velocity Dispersion, GVD）和非线性系数，例如纳米级制造精度的复杂波导设计。从泵浦光到梳齿的转换效率受到微环谐振器中的非线性模式匹配和能量损失的限制，这需要高功率泵浦源和复杂的热调谐。时间透镜系统采用电光频率梳[15-20]，对光信号进行正交相位调制，模拟时间聚焦或离焦效果，其特点是能够在低功耗下实现实时信号处理和波形变换。该系统由级联的强度调制器（Intensity Modulator, IM）和相位调制器（Phase Modulator, PM），以及单模光纤（Single Mode Fiber, SMF）或者集成波导等色散介质组成。数值模拟和实验研究表明，梳齿数量和平坦度直接决定脉冲特性：更多的梳齿数量可减小脉冲时域宽度，而平坦度优化能抑制旁瓣并提升峰值能量集中度[21]。因此，对时间透镜系统中使用的电光调制器的射频半波电压和射频驱动功率提出了严格要求，同时也需要进一步优化集成调制器和色散单元的损耗控制、制造公差及热稳定性。

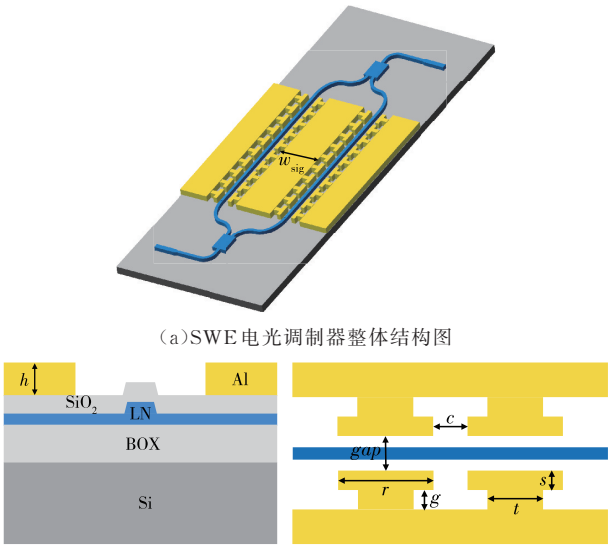
薄膜铌酸锂（Thin-film Lithium Niobate, TFLN）是一种高性能的光子集成材料，因其独特的性能，近来在高速电光调制器领域备受关注[22-23]。TFLN具有三大优势：（1）二阶非线性系数高（$\chi=30$ pm/V），能够实现高效的电光调制；（2）低传输损耗（小于0.1 dB/cm[24]）和宽透明窗口（涵盖可见光至中红外波长），支持宽带光信号处理；（3）薄膜制造工艺可将光场限制在微米级波导内，显著增强光与电场的空间重叠（即电光重叠因子$\Gamma$），从而降低了半波电压（$V_\pi$）。这些特性使TFLN成为片上电光调制器的理想平台。慢波电极（Slow-wave Electrode, SWE）已被广泛用于解决调制效率（$V_\pi\cdot L$）和电光带宽之间的平衡问题[25-28]。然而，SWE会大幅降低射频信号的相速度，造成其与光群速度不匹配，从而限制器件的实际带宽。目前主要的解决方案是采用低介电常数衬底（如石英）或对硅衬底进行局部刻蚀以降低有效介电常数来实现速度匹配，这些方法涉及复杂工艺，会增加制造成本，并阻碍TFLN器件的规模化生产。

本文通过仿真设计SWE，得到具有2.46 V·cm出色调制效率和超过100 GHz电光带宽的马赫-曾德尔调制器（Mach-Zehnder Modulator, MZM）。在此基础上，设计了基于SWE级联电光调制器和单模光纤的时间透镜系统。仿真结果表明，该时间透镜系统在被分别施加10，30和45 GHz的射频调制信号下，能够生成21，17和17条平坦度小于3 dB的梳齿。经过单模光纤色散补偿后，光脉冲宽度分别压缩至3.45，1.5和1 ps，并严格同步于微波频率。

## 1　薄膜铌酸锂电光调制器的设计与仿真

图1（a）展示了所设计的MZM的三维视图。所有无源器件仿真均基于600 nm铌酸锂薄膜、3 μm $SiO_2$下包层和750 μm硅衬底的TFLN晶圆。光栅耦合器用于片外的光耦合，1×2多模干涉耦合器用于光信号的分束和合束。T型结构SWE则用于加载高速射频信号，推挽式电极配置在实现差分调制的同时保持系统的相位对称性。图1（b）展示了调

制区域的横截面，脊波导的厚度为400 nm。为减少金属电极造成的光吸收损耗，波导顶部的$SiO_2$上包层厚度设置为400 nm，铝金属电极厚度为800 nm。图1(c)展示了SWE的结构参数。




(a)SWE电光调制器整体结构图

(b)调制区域横截面图 (c)调制区域俯视图

图1 SWE电光调制器结构图

采用有限元法仿真调制区域内的电场分布以及波导的光学模式特性，从而系统评估不同几何参数下器件的性能。仿真重点在于优化两个关键指标：调制效率和波导的光吸收损耗。图2展示了TFLN波导内的电场和光学模式分布。

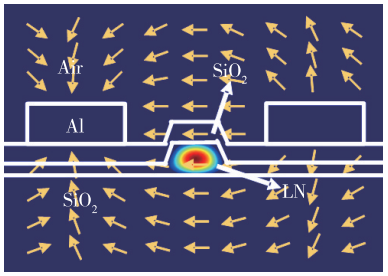
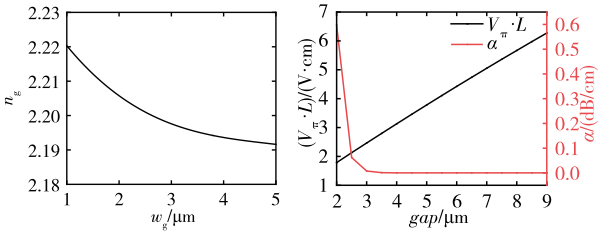



图2 波导TE模式光场和静电场的分布

通过对调制区域电场进行积分计算可得到重叠积分$\Gamma$[29]：

$$\Gamma=\frac{gap}{V}\frac{\iint E_{RF}\cdot|E_{opt}|^2\mathrm{d}A}{\iint|E_{opt}|^2\mathrm{d}A} \tag{1}$$

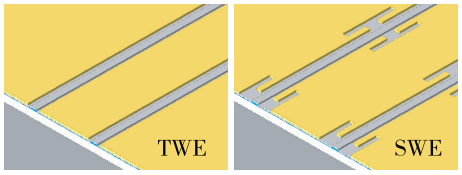
式中，$E_{RF}$为静电场强度，$E_{opt}$为TE模式电场强度。$V$和$gap$分别为施加的调制电压和电极间距，更高的$\Gamma$对应更优的调制效率。为确保调制带宽内微波与光信号的速度匹配，使用有限差分法分析波导的群折射率($n_g$)。通过扫描单模条件下的波导宽度，可得到在1 μm波导宽度下的群折射率为2.22，如图3(a)所示。图3(b)进一步展示了调制效率与光吸收损耗随电极间距(2～9 μm)的变化关系。较大的间距减少了光模场与静电场的重叠，从而降低调制效率，而较窄的间距则会增加由金属电极引起的光吸收损耗。因此，选择3 μm的电极间距，在保证2.46 V·cm高调制效率的情况下，1 550 nm波长下的吸收损耗为0.007 dB/cm。



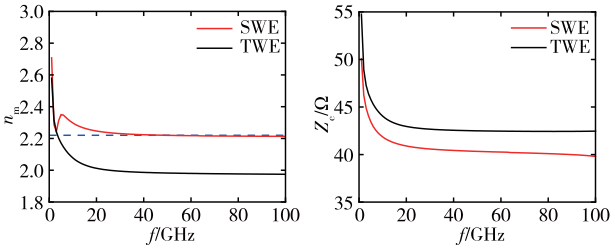

(a)群折射率随波导宽度的变化关系 (b)调制效率和吸收损耗随电极间距的变化关系

图3 调制区域光学特性与调制效率仿真

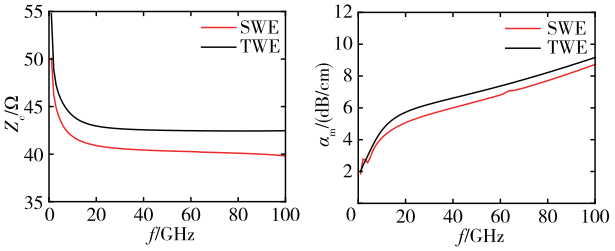
本文对SWE的优化不需要对硅衬底进行额外的工艺处理。图4(a)对比展示了SWE与传统行波电极(Traveling-Wave Electrode，TWE)结构。为了减轻SWE对调制效率的影响并保持高微波截止频率，设置$r$和$c$分别为45 μm和5 μm(占空比为90%)。




(a)TWE和SWE调制器的三维结构视图




(b)微波折射率 (c)特征阻抗



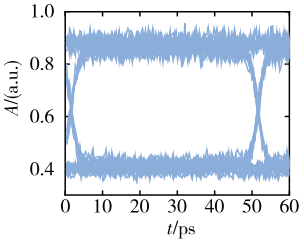

(d)微波传输损耗 (e)电光响应

图4 TWE和SWE电光调制器的结构与高频特性比较

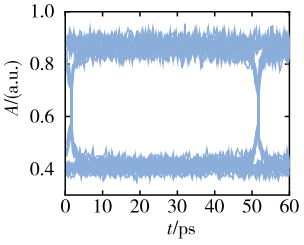
为优化阻抗匹配，信号电极宽度 $w_{sig}$ 和电极间距 $gap$ 分别设置为 20 μm 和 3 μm。仿真结果表明，随着 $t$ 从 5 μm 增加到 40 μm，微波折射率 $n_m$ 从 2.48 逐渐减小到 2.16。此外，增加参数 $g$ 可以减少微波传输损耗，但也会导致微波折射率增大。因此，优化后的参数 $t$，$g$ 和 $s$ 分别为 35 μm，2 μm 和 2 μm。图 4(b)～(d)分别展示了 $n_m$、特征阻抗($Z_c$)和微波传输损耗($\alpha_m$)随频率的变化关系。SWE 调制器的微波折射率为 2.21，特性阻抗为 40 Ω，在 60 GHz 时微波传输损耗为 6.78 dB/cm。在保持相同电极间距(以确保等效调制效率)的情况下，比较 TWE 和 SWE 调制器的高频电光响应，如图 4(e)所示。前者的 3 dB 电光带宽为 63 GHz，而后者在 100 GHz 时的衰减为 2.2 dB，表明 SWE 结构可有效增加调制带宽。

通过系统级光电联合仿真，对用于高速光互连的 TWE 和 SWE 电光调制器进行了严格的对比分析。脉冲发生器产生由伪随机位序列编码的电压幅度为 1 V 的非归零(Non-Return-to-Zero，NRZ)脉冲序列。光电探测器将通过调制器调制后的光信号转换为电信号，由射频放大器进行信号放大。最后，使用示波器观察和分析 20，60 和 100 Gbit/s 等不同数据传输速率下的眼图图案，如图 5 所示。

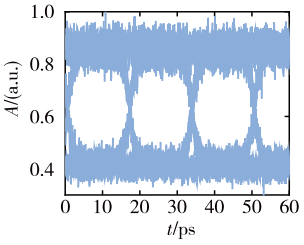
随着数据速率的增加，眼图质量显著下降。在 100 Gbit/s 的数据传输速率下，SWE 调制器的上升时间为 1.77 ps，而 TWE 调制器的上升时间为 2.36 ps。SWE 调制器的下降时间为 4.21 ps，而 TWE 调制器的下降时间为 6.93 ps，仿真结果表明 SWE 调制器可以提供更好的信号完整性。



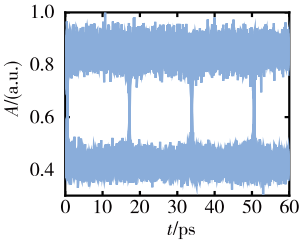

(a)20 Gbit/s NRZ 信号下 TWE 调制器眼图



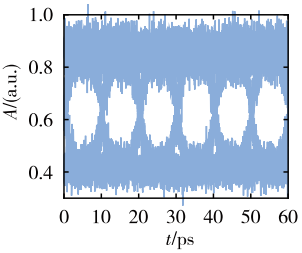

(b)20 Gbit/s NRZ 信号下 SWE 调制器眼图



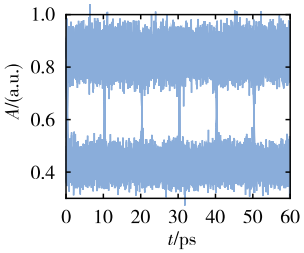

(c)60 Gbit/s NRZ 信号下 TWE 调制器眼图




(d)60 Gbit/s NRZ 信号下 SWE 调制器眼图




(e)100 Gbit/s NRZ 信号下 TWE 调制器眼图



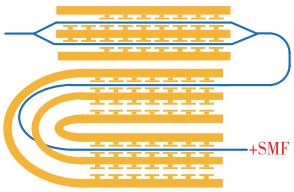

(f)100 Gbit/s NRZ 信号下 SWE 调制器眼图

图 5　TWE 调制器和 SWE 调制器在不同数据传输速率 NRZ 信号下的仿真眼图

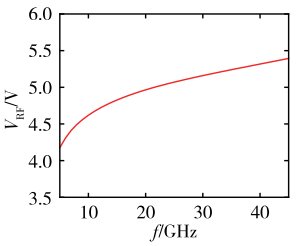
## 2　时间透镜系统

### 2.1　工作原理

所提出的用于超短光脉冲产生的时间透镜系统示意图如图 6(a)所示，由采用 SWE 结构的 IM 和 PM 组成，并通过 SMF 进行时域脉冲压缩。IM 可将连续波(Continuous Wave，CW)信号转化为初始平顶脉冲，而 PM 则对输入光信号施加二次相位调制，进一步展宽 IM 的光谱以形成平坦光频梳。SMF 在频域中引入群延迟色散，将周期性波形压缩为超短脉冲。在 1 550 nm 光通信窗口内，SMF 作为成熟的色散介质，具有低传播损耗、可忽略的高阶色散和可抑制的非线性效应。




(a)时间透镜系统示意图




(b)PM 的射频半波电压随频率的变化关系

图 6　时间透镜系统组成和 PM 的射频半波电压仿真

IM 的光传输方程可表示为：

$$\frac{E_{out}(t)}{A_{in}\cos(\omega_c t)}=\cos(\varepsilon)\left[J_0(m_{IM})+2\sum_{n=1}^{\infty}J_{2n}(m_{IM})\cos(2n\omega_{RF}t)\right]-2\sin(\varepsilon)\sum_{n=1}^{\infty}J_{2n-1}(m_{IM})\sin\left[(2n-1)\omega_{RF}t\right] \quad (2)$$

式中，$A_{in}$ 为光载波振幅，$\omega_c$ 为光载波角频率，$\omega_{RF}$ 为射频信号角频率，$\varepsilon=\pi V_{bias}/V_{\pi_DC}$ 是由直流偏置电压引起的相移，$m_{IM}=\pi V_{RF1}/V_{\pi_IM}$ 是 IM 的调制指数，

$V_{\pi_DC}$和$V_{\pi_IM}$分别为IM的直流半波电压和射频半波电压，$V_{bias}$和$V_{RF1}$是施加到IM的直流偏置和射频信号的电压振幅，$J_n(\cdot)$是第一类$n$阶贝塞尔函数。

PM的光传输方程可表示为：

$$\frac{E_{out}(t)}{A_{in}}=\cos(\omega_c t)J_0(m_{PM})+2\cos(\omega_c t)\sum_{n=1}^{\infty}J_{2n}(m_{PM})\cos(2n\omega_{RF}t)-2\sin(\omega_c t)\sum_{n=1}^{\infty}J_{2n-1}(m_{PM})\sin\left[(2n-1)\omega_{RF}t\right] \tag{3}$$

式中，$m_{PM}=V_{RF2}/V_{\pi_PM}$是PM的调制指数，$V_{RF2}$和$V_{\pi_PM}$分别是施加到PM的射频信号电压振幅和PM的半波电压。

光脉冲在光纤中的传播受到色散和非线性效应的共同影响，可以通过以下非线性薛定谔方程（NLSE）进行描述[30]：

$$i\frac{\partial A}{\partial z}=-\frac{i\alpha}{2}A+\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial T^2}-\gamma|A|^2A \tag{4}$$

式中，$A$是复脉冲包络，$\alpha$是光纤衰减系数，$\beta_2$是群速度色散，$\gamma$是非线性系数，$T=t-z/v_g$是随脉冲以群速度移动为参照系的时间度量，$v_g$为群速度。

将驱动PM的正弦信号进行三角函数级数展开，相位调制可表示为：

$$\varphi(t)=\frac{\pi V_{RF2}\sin(\omega_{RF}t)}{V_{\pi_PM}}\approx\frac{-\pi V_{RF2}}{V_{\pi_PM}}\left[1-\frac{1}{2}\left(\omega_{RF}t+\frac{\pi}{2}\right)^2\right] \tag{5}$$

PM引入的啁啾$C$的大小可近似为：

$$|C|=\frac{\pi V_{RF2}\omega_{RF}^2T_0^2}{V_{\pi_PM}} \tag{6}$$

对于$C>0$，脉冲从前沿到后沿的瞬时频率线性增加，称为正啁啾；反之则为负啁啾。通常SMF的群速度色散（GVD）约为$-22\ ps^2/km$，满足线性正啁啾的条件（$C\cdot\beta_2<0$）。脉冲在通过SMF色散补偿后可以变为无啁啾，其宽度被压缩至可达到的最小持续时间。

时间透镜系统中的一个关键参数是可达到的最小脉冲宽度，这主要与PM的射频半波电压、微波驱动峰值电压以及微波频率有关。因此，为了实现更小的脉冲宽度，PM需要更高的调制效率。前文设计的SWE结构可有效满足高速电光调制器对高调制效率和大调制带宽的要求。将相同的电极尺寸应用于PM，其调制效率增加至4.92 V·cm。射频半波电压由低频半波电压$V_\pi$和电光响应$M$确定[31]，即：

$$V_{RF}(f)=V_\pi\cdot10^{-\frac{M}{20}} \tag{7}$$

如图6(b)所示，在5～45 GHz的频率范围内，当PM的调制长度为1.5 cm时，$V_{RF}$从4.18 V缓慢增加到5.47 V。$V_{RF}$的值在宽频率范围内相对平坦，表明PM可在更高的频率下被驱动，并且伴随着较小的调制指数变化。

## 2.2 系统仿真

时间透镜系统的仿真架构如图7所示[32]。可调谐激光器作为初始信号源，产生连续波信号。来自微波源的正弦信号分为两路：一路驱动IM，另一路驱动PM，两者共同作用生成平坦的光谱梳。调制后的光信号通过光谱分析仪（Optical Spectrum Analyzer, OSA）进行监测，该分析仪通过对时域光信号实施快速傅里叶变换来生成光谱图像。光频梳生成后，SMF会对光信号进行脉冲压缩，其反常色散特性（$GVD<0$）抵消了由PM引入的线性啁啾。示波器（Oscilloscope, OSC）获得的曲线进一步说明了时域动态特性。

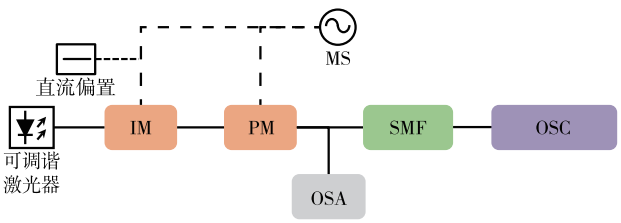
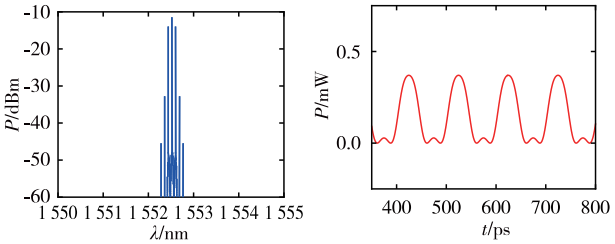
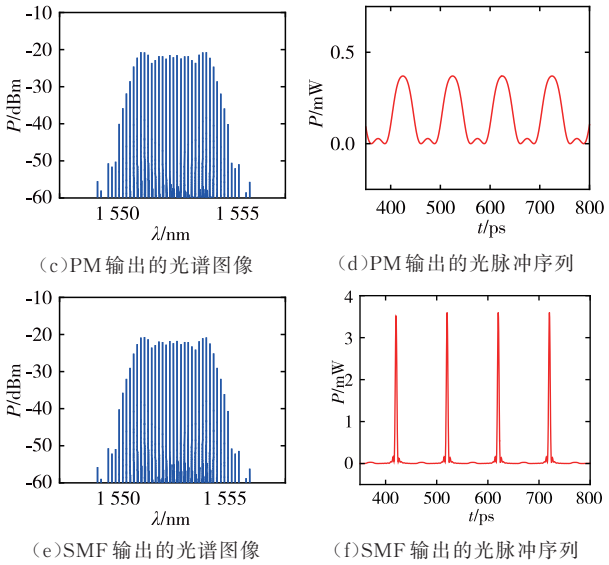



图7 时间透镜系统的仿真架构

图8(a)～(c)系统比较了在10 GHz射频信号下通过IM，PM和SMF输出的光谱图像和光脉冲序列。IM在10 GHz频率下生成的光脉冲序列具有100 ps的周期性，脉冲宽度为50 ps。与IM相比，PM产生了显著的光谱展宽。经由SMF传输后，脉冲成功实现压缩，同时伴随光脉冲峰值功率的增强。




(a)IM输出的光谱图像 (b)IM输出的光脉冲序列



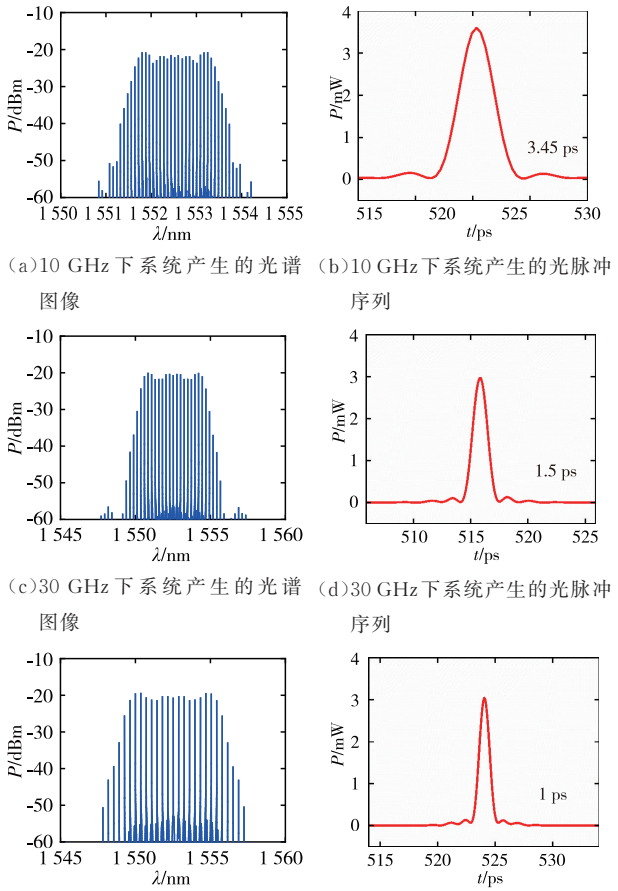

（c）PM 输出的光谱图像　（d）PM 输出的光脉冲序列

（e）SMF 输出的光谱图像　（f）SMF 输出的光脉冲序列

图 8　在 10 GHz 下，IM，PM 和 SMF 输出的光谱图像和光脉冲序列

为使光频梳平坦化，需精细调节 IM 的偏置点和调制指数。通过调整直流偏压，将 IM 的偏置点稳定在 0.35π，同时调节微波信号源峰值电压，以在不同频率下保持 0.5π 的调制指数。在 10 GHz 频率下，系统可产生 21 条平坦度小于 3 dB 的梳齿，对应于 15 V 的峰值电压和 3.26π 的调制指数，如图 9（a）所示。用于脉冲压缩的光纤长度为 1.2 km，最终产生的脉冲宽度为 3.45 ps，如图 9（b）所示。在 30 GHz 下，该系统产生 17 条平坦度小于 3 dB 的梳齿，对应 PM 的峰值电压为 13 V，调制指数为 2.52π，如图 9（c）所示。用于脉冲压缩的光纤长度为 200 m，最终产生的脉冲宽度为 1.5 ps，如图 9（d）所示。在 45 GHz 下该系统产生 17 条平坦度小于 3 dB 的梳齿，对应 PM 的峰值电压为 13 V，调制指数为 2.42π，如图 9（e）所示。用于脉冲压缩的光纤长度为 80 m，最终产生的脉冲宽度为 1 ps，如图 9（f）所示。仿真结果表明，时间透镜系统的性能依赖于微波频率与调制指数的匹配：低频段（如 10 GHz）提供更宽的光谱相位操控能力，支持多波长光源生成；而高频段（如 45 GHz）通过更强的二次相位调制增强时域聚焦效应，使时间透镜系统成为超短光脉冲生成的理想选择。

图 10 的对比仿真揭示了高频场景下 SWE 调制器的显著优势。在 30 GHz 射频信号驱动下，基于 TWE 的时间透镜系统需要采用 250 m 的 SMF 将光脉冲压缩至 1.8 ps，而基于 SWE 的系统仅需 200 m 的 SMF 即可实现 1.5 ps 脉宽，脉冲宽度相较于前者

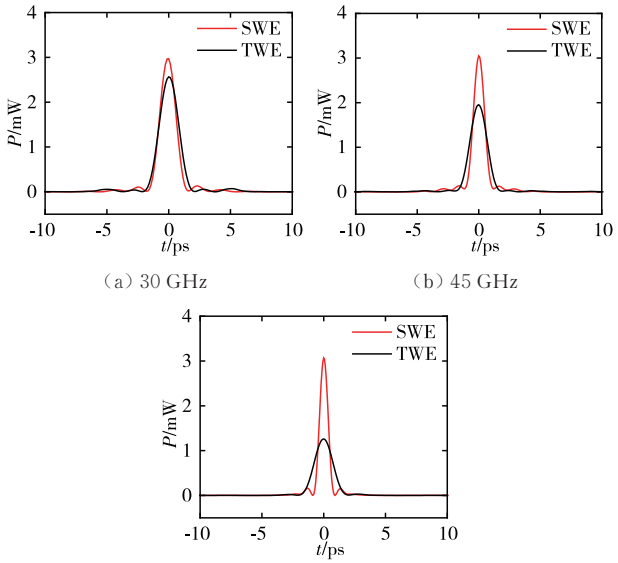



（a）10 GHz 下系统产生的光谱图像　（b）10 GHz 下系统产生的光脉冲序列

（c）30 GHz 下系统产生的光谱图像　（d）30 GHz 下系统产生的光脉冲序列

（e）45 GHz 下系统产生的光谱图像　（f）45 GHz 下系统产生的光脉冲序列

图 9　时间透镜系统在不同微波频率下产生的光谱图像和光脉冲序列




（a）30 GHz　（b）45 GHz

（c）60 GHz

图 10　基于 TWE 和 SWE 电光调制器的时间透镜系统在不同频率下产生的光脉冲

缩减0.3 ps,性能提升16.7%。当频率提升至45 GHz时,采用SWE的系统通过80 m的SMF可实现仅有1 ps的脉冲宽度,相较于TWE系统减少0.6 ps,提升幅度达37.5%。在60 GHz的极高频条件下,基于SWE的系统仅需50 m的SMF即可实现0.8 ps超短脉冲,相较于TWE系统脉宽减少0.9 ps,性能提升达52.9%。在多频率区间内,采用SWE调制器的时间透镜系统持续优于传统TWE,既实现了更短的脉冲宽度,又降低了光纤长度需求,为先进光信号处理应用提供了解决方案。

## 3 结论

本文采用SWE结构仿真设计基于TFLN平台的MZM,实现了2.46 V·cm的调制效率和超过100 GHz的电光带宽,并且无需硅衬底去除或异质石英键合等复杂工艺。通过级联电光调制器和单模光纤组成时间透镜系统,用于产生超短光脉冲。系统级仿真结果表明,该系统可在10,30和45 GHz射频信号驱动下生成21,17和17条平坦度小于3 dB的梳齿,对应脉冲宽度压缩至3.45,1.5和1 ps。仿真结果验证了TFLN电光调制器在超快集成光子系统中的高性能潜力,并为光通信、光神经网络和超快传感等应用提供了低复杂度、高可靠性的片上脉冲源解决方案。

**参考文献:**


[1] Lundberg L, Mazur M, Mirani A, et al. Phase-coherent lightwave communications with frequency combs[J]. Nature Communications, 2020, 11: 201.

[2] Marin-Palomo P, Kemal J N, Karpov M, et al. Microresonator-based solitons for massively parallel coherent optical communications [J]. Nature, 2017, 546 (7657): 274-279.

[3] Torres-Company V, Schröder J, Fülöp A, et al. Laser frequency combs for coherent optical communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(7): 1663-1670.

[4] Picqué N, Hänsch T W. Frequency comb spectroscopy[J]. Nature Photonics, 2019, 13(3): 146-157.

[5] Ideguchi T, Holzner S, Bernhardt B, et al. Coherent Raman spectro-imaging with laser frequency combs [J]. Nature, 2013, 502(7471): 355-358.

[6] Udem T, Holzwarth R, Hänsch T W. Optical frequency metrology[J]. Nature, 2002, 416(6877): 233-237.

[7] McMahon P L, Marandi A, Haribara Y, et al. A fully programmable 100-spin coherent Ising machine with all-to-all connections[J]. Science, 2016, 354(6312): 614-617.

[8] Newman Z L, Maurice V, Drake T, et al. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock[J]. Optica, 2019, 6(5): 680-685.

[9] Obrzud E, Lecomte S, Herr T. Temporal solitons in microresonators driven by optical pulses[J]. Nature Photonics, 2017, 11(9): 600-607.

[10] Kim J, Song Y. Ultralow-noise mode-locked fiber lasers and frequency combs: principles, status, and applications [J]. Advances in Optics and Photonics, 2016, 8(3): 465-540.

[11] Van Gasse K, Uvin S, Moskalenko V, et al. Recent advances in the photonic integration of mode-locked laser diodes[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31 (23): 1870-1873.

[12] Gaeta A L, Lipson M, Kippenberg T J. Photonic-chip-based frequency combs [J]. Nature Photonics, 2019, 13 (3): 158-169.

[13] Zhang X, Wang C, Cheng Z, et al. Advances in resonator-based Kerr frequency combs with high conversion efficiencies [J]. NPJ Nanophotonics, 2024, 1: 26.

[14] Zhang Y, Tao C, Luo S, et al. Ultra-fast optical time-domain transformation techniques [J]. Nature Reviews Methods Primers, 2025, 5: 11.

[15] Carlson D R, Hickstein D D, Zhang W, et al. Ultrafast electro-optic light with subcycle control[J]. Science, 2018, 361(6409): 1358-1363.

[16] Wang X, Li Z, Chen J, et al. Integrated thin-film lithium niobate electro-optic frequency comb for picosecond optical pulse train generation[J]. Applied Physics Letters, 2024, 124 (20): 201101.

[17] Yu M, Barton III D, Cheng R, et al. Integrated femtosecond pulse generator on thin-film lithium niobate [J]. Nature, 2022, 612(7939): 252-258.

[18] Zhang X, Zhang J, Yin K, et al. Sub-100 fs all-fiber broadband electro-optic optical frequency comb at 1.5 μm[J]. Optics Express, 2020, 28(23): 34761-34771.

[19] Sekhar P, Fredrick C, Carlson D R, et al. 20 GHz fiber-integrated femtosecond pulse and supercontinuum generation with a resonant electro-optic frequency comb [J]. APL Photonics, 2023, 8(11): 116111.

[20] Jang Y S, Park J, Jin J. Comb-mode resolved spectral domain interferometer enabled by a broadband electro-optic frequency comb [J]. Photonics Research, 2023, 11 (1): 72-80.

[21] Torres-Company V, Weiner A M. Optical frequency comb technology for ultra-broadband radio-frequency photonics[J]. Laser & Photonics Reviews, 2014, 8(3): 368-393.

[22] Chen G, Li N, Da Ng J, et al. Advances in lithium niobate photonics: development status and perspectives [J]. Advanced Photonics, 2022, 4(3): 034003.

[23] Pan B, Liu H, Huang Y, et al. Perspective on lithium-niobate-on-insulator photonics utilizing the electro-optic and

acousto-optic effects[J]. ACS Photonics, 2023, 10(7): 2078-2090.

[24] Zhang M, Wang C, Cheng R, et al. Monolithic ultra-high-Q lithium niobate microring resonator[J]. Optica, 2017, 4(12): 1536-1537.

[25] Valdez F, Mere V, Wang X, et al. Integrated O- and C-band silicon-lithium niobate Mach-Zehnder modulators with 100 GHz bandwidth, low voltage, and low loss[J]. Optics Express, 2023, 31(4): 5273-5289.

[26] Chen G, Chen K, Gan R, et al. High performance thin-film lithium niobate modulator on a silicon substrate using periodic capacitively loaded traveling-wave electrode [J]. APL Photonics, 2022, 7(2): 026103.

[27] Kharel P, Reimer C, Luke K, et al. Breaking voltage–bandwidth limits in integrated lithium niobate modulators using micro-structured electrodes[J]. Optica, 2021, 8(3): 357-363.

[28] Wang Z, Chen G, Ruan Z, et al. Silicon–lithium niobate hybrid intensity and coherent modulators using a periodic capacitively loaded traveling-wave electrode [J]. ACS Photonics, 2022, 9(8): 2668-2675.

[29] Liu X, Xiong B, Sun C, et al. Wideband thin-film lithium niobate modulator with low half-wave-voltage length product [J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(6): 060016.

[30] Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics[M]. Berlin: Springer, 2007.

[31] Zhang Y, Shao L, Yang J, et al. Systematic investigation of millimeter-wave optic modulation performance in thin-film lithium niobate [J]. Photonics Research, 2022, 10(11): 2380-2387.

[32] Zhang Y, Wang X, Li Z, et al. Flat optical frequency comb generation based on monolithic integrated LNOI intensity and phase modulator[J]. Photonics, 2022, 9(7): 495.

## 作者简介：

**刘佳旭**(1999—)，男，湖南省邵东市人，硕士研究生，主要研究方向为薄膜铌酸锂电光调制器；

**胡　挺**(1983—)，男，博士，教授，主要研究方向为集成光电子器件与芯片制造工艺。