

# 打破硅基BTO薄膜制造壁垒，攻克下一代AI光互联超级基座

作者：writer 来源：科学网

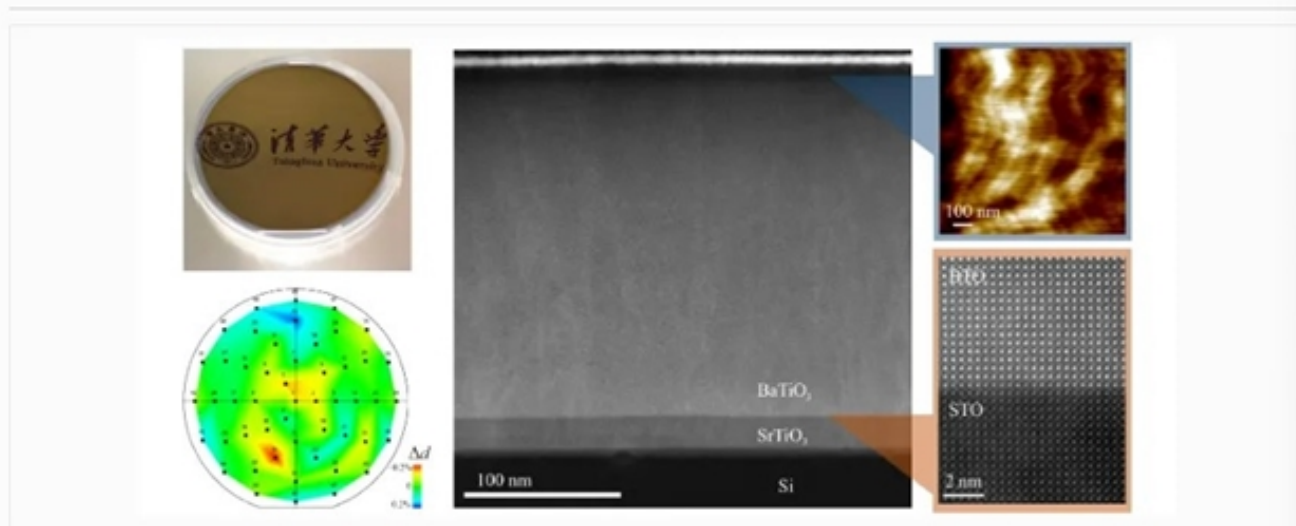
本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/42727.html>

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！

**打破硅基BTO薄膜制造壁垒，攻克下一代AI光互联超级基座。**在AI算力集群中，数据搬运传输正在吞噬惊人的电量。当硅光技术被视为降低功耗的终极解法时，纯硅材料在电光调制上的天然缺陷却成了最大的绊脚石。

近日，清华大学材料学院李千教授团队在硅基电光材料的工业化量产上取得重大突破：利用全混合分子束外延（hMBE）技术，在4英寸标准硅晶圆上成功实现了钛酸钡（BTO）薄膜的快速、高质量外延生长，打破了BTO薄膜的制造壁垒，以高薄膜质量和高电光系数，为下一代1.6T/3.2T光模块芯片、共封装光学（CPO）、光交换（OCS）芯片以及光量子计算铺平了底层材料之路。

## Graphical abstract



## Keywords

Barium titanate / Electro-optic effect / Epitaxy on silicon / Hybrid molecular beam epitaxy

公众号 · 变革性材料

算力狂飙下的危机

在算力竞争的AI时代，数据中心正面临一场空前的能源危机。在现代大规模 GPU 算力集群中，

相当比例的功耗并没有用于核心计算，而是被消耗在了节点与节点之间的数据传输上。随着网络架构向1.6T 甚至更高演进，传统的铜线电互连因严重的信号衰减和热效应，已经触及物理极限。光进铜退不仅是趋势，更是关乎算力中心生存的刚需。

然而，硅基光电子（Silicon Photonics）技术却有一个致命的阿喀琉斯之踵：硅作为一种极好的波导材料，是一个极其低效的光调制器。纯硅缺乏线性电光效应（Pockels效应），只能依赖载流子色散机制来调制光信号。这种妥协带来了难以克服的光吸收损耗、有限的带宽以及高昂的驱动电压。

要在下一代网络中真正释放光互连的潜力，寻找能与标准硅平台完美融合的电光材料，已成为决定硅光产业下一阶段胜负的破局关键。当前备受关注的薄膜铌酸锂（LNOI），其有效电光系数（约 30 pm/V）在应对未来极致微缩和超低功耗的需求时，也逐渐显露天花板。

如何破局？钛酸钡（BTO）拥有比铌酸锂高出一个数量级以上的线性电光系数，还具有低功耗、小体积的优势，有望成为重塑未来高速光互连格局的关键钥匙。

### 海外巨头竞逐硅基BTO量产高地

在硅光集成先进材料的商业化赛道上，国际前沿企业不仅率先抢跑，更试图建立起坚固的技术与生态壁垒。

- 欧洲创新先锋Lumiphase：利用其BTO-硅光子集成平台在业界掀起风暴，致力于为数据中心提供高速、紧凑的电光调制器，正试图在未来的高速光收发器市场中确立属于欧洲的技术标准。
- 光量子独角兽PsiQuantum：持续投入大尺寸晶圆级BTO硅光制造与先进的异质键合工艺，并和硅光制造的顶尖标杆格芯实现深度绑定，将 BTO 这样既具备超高电光响应，又能在大尺寸硅晶圆上实现高质量外延生长的新型材料，视为是未来光量子计算跨越硬件鸿沟的核心基石。
- 顶级研发机构IMEC主导量产进程：2026年初，全球半导体制造工艺的隐形标准制定者 IMEC（比利时微电子研究中心）与设备巨头Veeco宣布双方已成功开发出晶圆量产标准的混合分子束外延（hMBE）硅基BTO工艺产线。由IMEC主导、Veeco 提供硬件支持的这项12英寸量产突破释放了一个重要信号，BTO技术正在跨越实验室阶段，实质性地进入主流晶圆厂的标准化量产评估路线图中。

从初创独角兽的战略押注，到顶级微电子智库与设备巨头的实质性推进，产业界正在形成一个极其清晰的共识：BTO走向晶圆厂规模化量产的进程正在全面加速。在下一代光电集成材料的激烈角逐中，谁能率先掌握面向工业的硅基BTO外延生长工艺，谁就能在未来超高带宽、超低功耗的光芯片以及光量子计算市场格局中，抢占一块至关重要的战略高地，并为整个产业链提供一张极具颠覆性的王牌。

### 国产里程碑式突破

BTO硅基外延技术高度依赖氧化物分子束外延（Oxide MBE），而这一技术被工业界贴上极其昂贵且极其缓慢的标签。虽然其生长的薄膜质量极高，但生长速率通常低于20 nm/h，导致BTO的规模化量产成本居高不下。当前市场上存在巨大的晶圆供应空白，成为许多硅光设计公司进入的限制门槛。

针对这一看似难以逾越的产业技术空白，清华大学材料学院李千教授团队精准击破了高产率与高质量难以兼顾的难题，填补了国内外产业空白，采用自主开发的全混合分子束外延（hMBE）工艺，引入金属有机源前驱体，成功在4英寸标准硅晶圆上实现了核心指标的跃升。

- 打破限速，直击量产痛点：采用金属有机前驱体打破了传统MBE金属通量匹配的限制，使BTO的生长速度提高至100 nm/h 以上，消除了传统MBE生长过于缓慢的产能瓶颈，使高质量的BTO前端集成能够顺畅地融入标准的大规模硅光工艺流。

- 晶圆级高度均一：4英寸晶圆实物图展现出极佳的光学均匀性，无任何明显的厚度干涉色环。

晶圆级高分辨X射线衍射（XRD）Mapping

扫描证实，整片4英寸晶圆的晶格常数偏差被严密控制在±0.2%的极窄窗口内。对于高度敏感的硅光器件而言，这种全片薄膜结构与应力的均匀一致性，是未来晶圆器件生产实现高良率的物理基础。

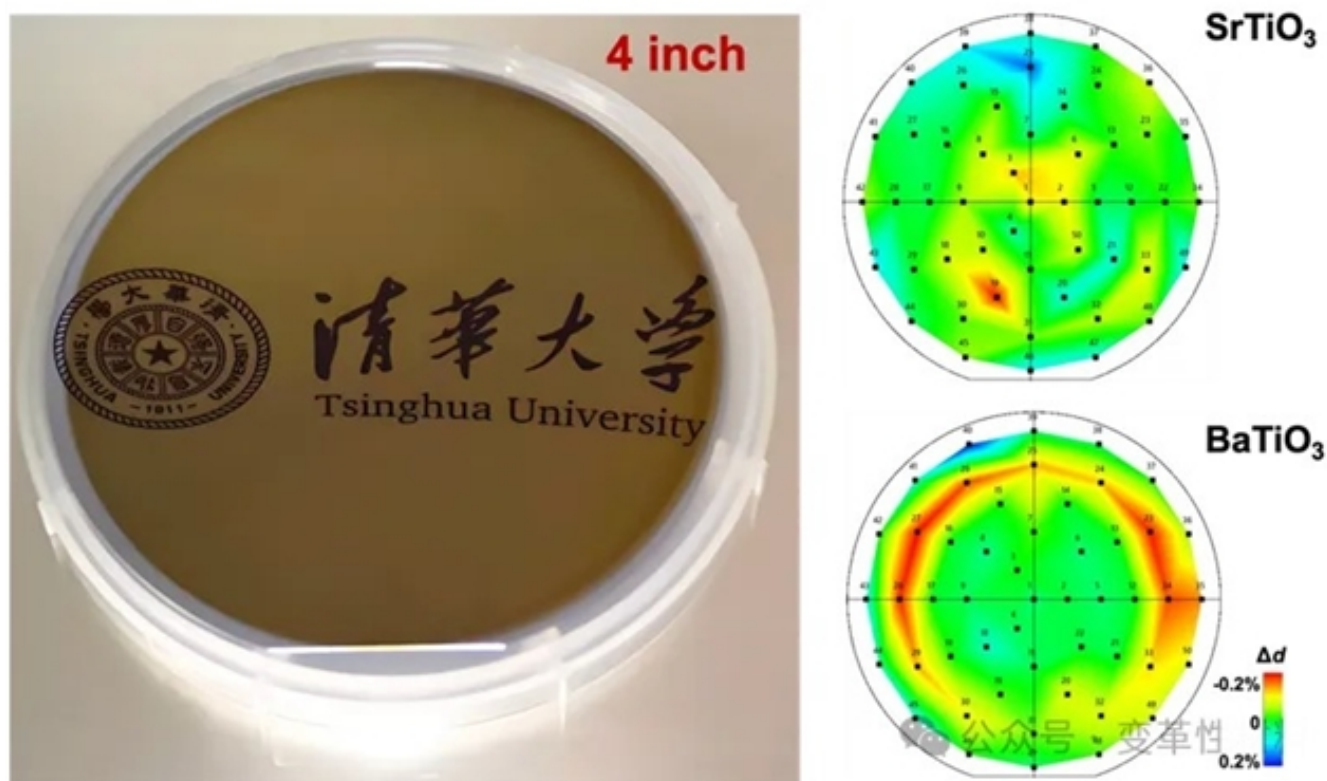


图1.晶圆级薄膜BTO高外延质量。左侧为4英寸硅基外延晶圆实物照片；右侧对应XRD Mapping扫描数据揭示了全片晶格常数的分布情况，上图为STO缓冲层，下图为BTO外延层，全片晶格常数偏差严格控制在±0.2%以内。

原子级锐利的共格界面：扫描透射电子显微镜（STEM）的整体截面图像证实BTO薄膜展现出极高的结构均匀性，未见明显的缺陷和贯穿性位错。而高分辨STEM图像更是清晰地显现出原子级锐利的共格异质结界面以及极佳的晶格周期性排布。薄膜具有原子级起伏表面，这种极高质量的外延晶格连续性，有效抑制了界面处失配位错与缺陷态的积聚，为最终器件的极低漏电流与超高稳定性的提供保障。

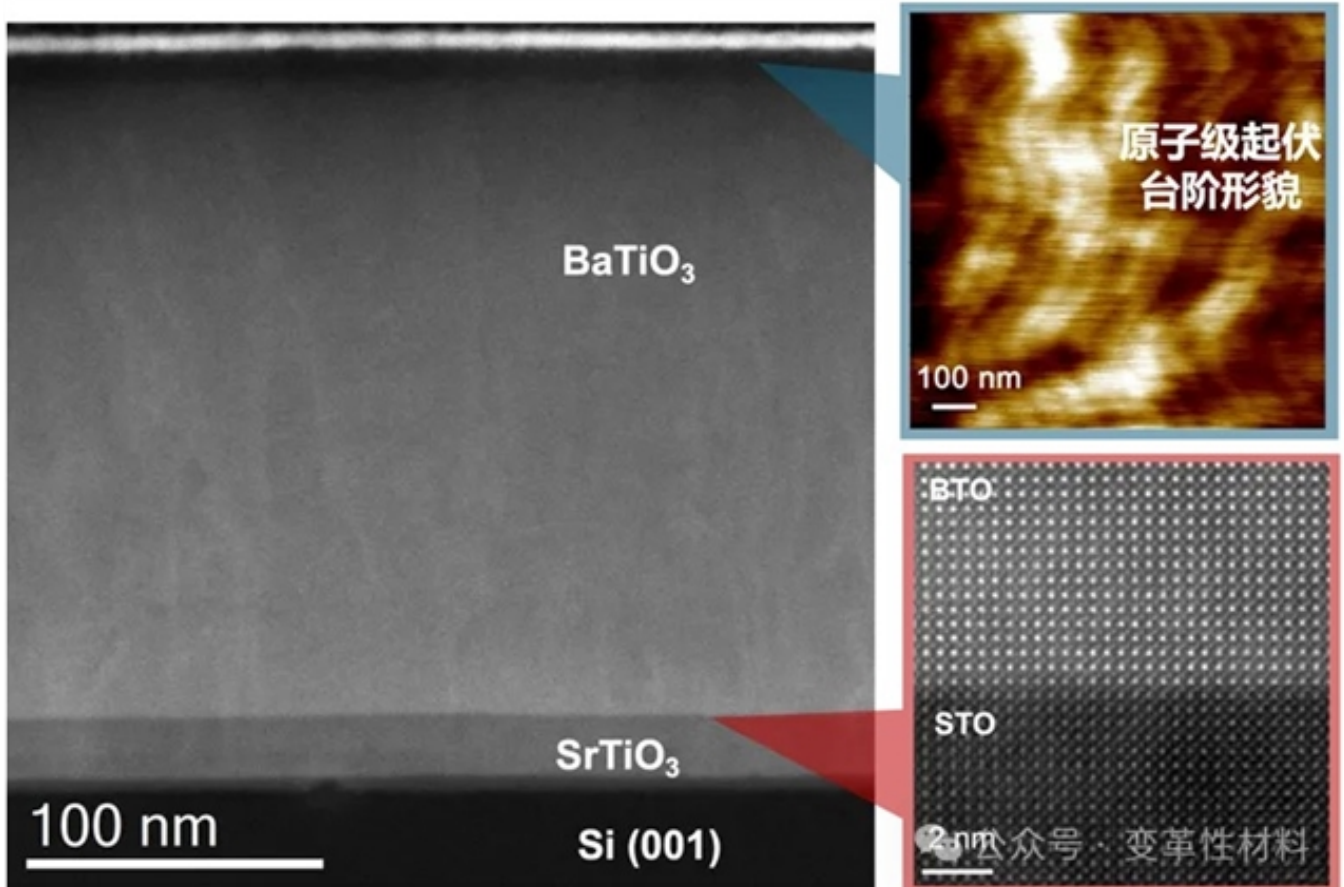


图2.原子级界面到表面台阶形貌的高质量生长。主图展示BTO/STO/Si异质结构的截面STEM 全景图，清晰显示薄膜高度均匀且无贯穿性位错；右下高分辨图像显示了原子级锐利的共格界面和晶格完美周期性排列；右上AFM插图显示清晰的原子级台阶形貌，证实了薄膜处于理想的二维逐层生长模式。

## 性能跃迁

在硅上集成BTO，通常离不开一层极其关键的STO（钛酸锶）缓冲层。过去，由于传统MBE生长BTO过于缓慢，为了兼顾产能，先用MBE在硅上精密生长STO缓冲层，随后将晶圆转移至脉冲激光沉积（PLD）或射频磁控溅射设备中，快速沉积较厚的BTO薄膜。然而，这种非原位的物理沉积过程，往往难以保障材料体系生长质量和性能指标。

电光特性评估显示，PLD 生长的 BTO 薄膜虽然也能达到较高的响应（如对比样品的 220 pm/V），但其高响应在很大程度上依赖于薄膜内部不可控的缺陷诱导效应。这种充满随机性的物理机制，难以确保同批次器件性能稳定性。

全hMBE工艺不仅实现了从STO缓冲层到BTO薄膜的连续、高质量原位外延，更完美保留了MBE标志性的原子级逐层可控生长模式。在此均一的工艺下，硅基 BTO 薄膜展现出了高达248 pm/V的稳健电光系数，大幅超越了目前商用薄膜铌酸锂的性能基准，证明了该工艺成功摆脱了对随机缺陷的依赖，实现了对底层物理规律的掌控。

除了性能指标，热稳定性一直是新型电光材料走向工业应用的关键命门。传统块体 BTO

的居里温度（TC）仅为约 120 °C，这限制了其在高温环境及复杂封装环境下的可靠性。该团队利用二阶谐波（SHG）技术对薄膜进行测试。实验发现在 200 °C 的温度下该硅基BTO薄膜的铁电信号不仅没有衰减，甚至表现出比室温环境下更强的响应。这意味着通过hMBE这种可控应变传递，可以打破BTO材料的本征物理限制，实现了居里温度的大幅提升，不仅能有效兼容光模块后道封装的高温流程，更能满足数据中心高温运行的严苛需求，具备在工业环境下长期工作的能力。

可以想象，未来完全可以通过精确调节缓冲层厚度等手段，进一步优化薄膜的应变传递，从底层持续逼近这一超级材料的物理性能极限。

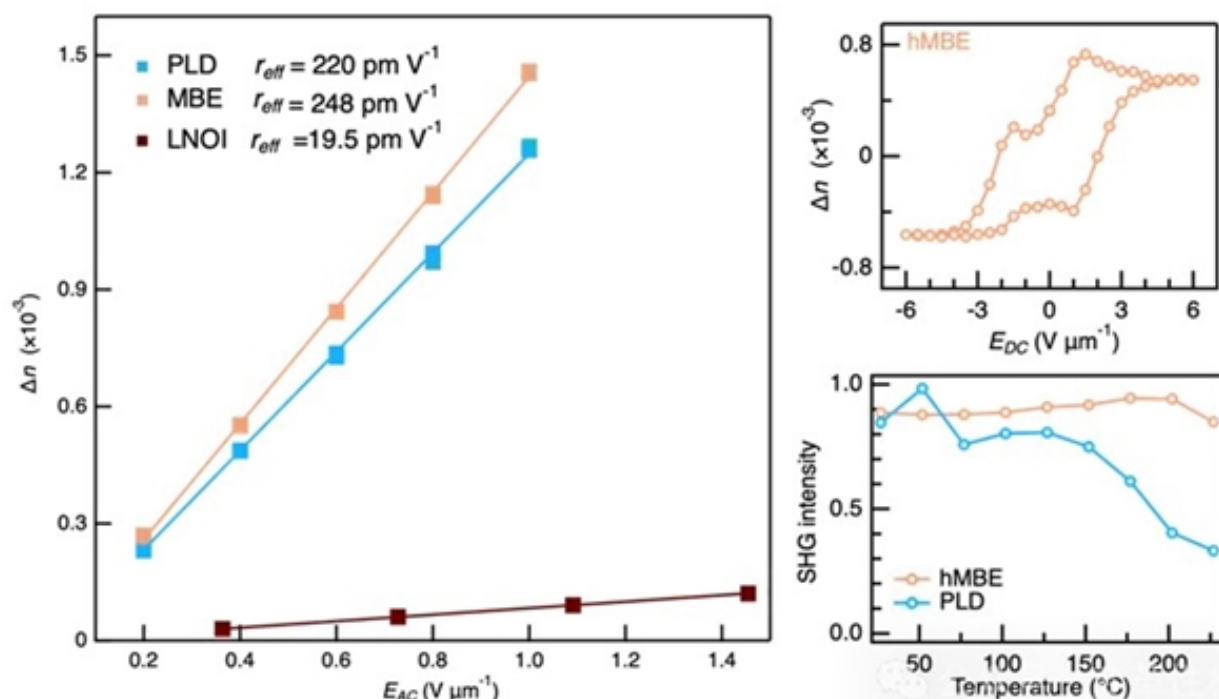


图3.电光性能与可靠性综合评估。左图显示有效电光系数（ $r_{eff}$ ）对比表征，通过对折射率变化随交流电场（EAC）变化的线性拟合，测得hMBE工艺制备的BTO薄膜有效电光系数达到248 pm/V，高于PLD工艺制备的BTO薄膜（220 pm/V），二者均远高于薄膜铌酸锂（LNOI）校准样品；右上图为hMBE制备的BTO薄膜畴翻转电光滞回曲线，折射率变化（ $\Delta n$ ）随直流电场（EDC）变化的滞回环形态完整且对称；右下图证实BTO薄膜在200 °C高温下，仍维持高的铁电极化SHG响应。

在 AI 算力与量子科技全球竞逐的浪潮下，底层核心材料的战略价值愈发凸显。这项成果不仅有力填补了国内在高质量、晶圆级硅基BTO量产工艺上的空白，更为光电集成产业提供了从材料源头实现自主突破的可能性。

随着该工艺向 8 英寸甚至 12 英寸硅片的持续推进，这一属于本土产业集群的光子基座，必将为未来超高速光互连与光量子计算的爆发，构筑起稳健的底层支撑。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：<https://journal.hep.com.cn/etm/EN/10.2738/ENGTm.2026.0010>

作者：李千等 来源：《工程·变革性材料》

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