在标准 300 mm 硅衬底上外延生长的一维光子晶体纳米脊表面发射激光器

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41323.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！

在标准 300 mm 硅衬底上外延生长的一维光子晶体纳米脊表面发射激光器。 导读

垂直腔面发射激光器（VCSEL）虽在数据通信、消费电子等领域大规模商用，但却因分布式布拉格反射镜工艺复杂、波长固定且难与硅兼容等问题，成为硅光电异质集成的瓶颈之一。近日，比利时根特大学与imec微电子研究中心联合团队首次在 300 mm
标准硅晶圆上制备出了纳米脊表面发射激光器（NRSEL）。

研究团队基于纵横比捕获（ART）与纳米脊工程（NRE）技术，首次提出并实现纳米脊表面发射激光器（NRSEL）。器件由纳米脊阵列构成面内谐振腔，既能实现激光振荡，又能垂直耦合出光。经过系统设计，可在 300 mm 标准硅衬底上成功验证光泵浦 NRSEL
的激光行为：利用光子晶体带边模式及对称保护连续谱束缚态（BIC）实现 984 nm
单模激射，并详细表征了远场辐射特性。该成果为高密度、低成本、CMOS
兼容的垂直发射激光器奠定技术基础（图1）。

该研究成果近日发表于国际顶级学术期刊《Light: Science Applications》，题为One-Dimensional Photonic Crystal Nano-Ridge Surface Emitting Lasers Epitaxially Grown on a Standard 300 mm Silicon Wafer，比利时根特大学 imec 光子学研究组的Eslam M. B. Fahmy为论文第一作者，Dries Van Thourhout为论文的通讯作者。

研究背景

垂直腔面发射激光器（VCSEL）是目前应用最广泛的光电子器件之一，已用于数据通信、光学鼠标、智能手机面部识别及测距等场景。然而，VCSEL
仍存在一系列固有局限：其一，外延结构需要 10 – 40
对不同折射率的分布式布拉格反射镜（DBR），生长工艺复杂；其二，由于 DBR
带宽限制，可实用波长主要集中在 850 nm 和 980 nm，向 1300 nm、1550 nm
或中红外等波段扩展极为困难；其三，同一片晶圆上难以实现多波长 VCSEL
阵列，因为发射波长由外延层厚度决定，无法在晶圆层面进行空间调控；此外，VCSEL
与硅基光子、电子器件的单片集成难度高且工艺兼容性差。

纵横比陷阱（ART）和纳米脊工程（NRE）技术可在 300 mm 硅衬底上直接外延生长高质量 InGaAs/GaAs 纳米脊，无需厚缓冲层，且位错密度低于 $6\times104\ cm^{-2}$

的。此前，该团队已基于该技术实现了光泵浦 DFB 激光器和 PIN 探测器；近期，基于该技术的室温连续电注入激光器亦已见报道。该技术的核心特征在于：活性材料并非以均匀薄膜形式生长，而是构成纳米脊阵列，这些阵列可视为高折射率对比度的一维光子晶体，能支持多种光学模式。因此，纳米脊技术为在硅上实现激光源提供了全新平台。

此工作利用纳米脊阵列的带边慢光模式与对称保护连续谱束缚态（BIC）态，首次在 300 mm 硅晶圆上展示了光泵浦表面发射纳米脊激光器（NRSEL），为研发高密度、低成本、CMOS 兼容的垂直发射激光器提供新平台。

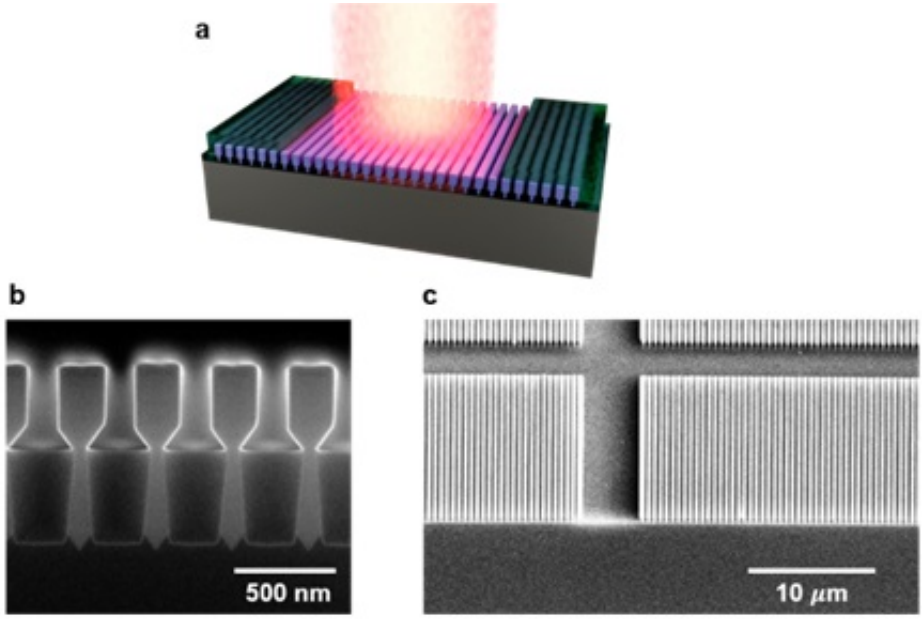


图1：所提出的纳米脊表面发射激光器（NRSEL）示意图

创新研究

首先，确认纳米脊阵列的带边模式与垂直辐射机制（图2）。原文将平行排列的 InGaAs/GaAs 纳米脊视为一维光子晶体，在 Γ 点得到慢光 TE21L
模式；该模式电场呈反对称分布，被结构镜像对称保护，形成连续谱束缚态（BIC），理论上 Q因子可无限高。即使采用 40 根脊的有限阵列，即便存在侧边泄漏，仍能使 Q 保持约 26000，足以提供稳定的面内反馈并实现光的垂直耦合输出。

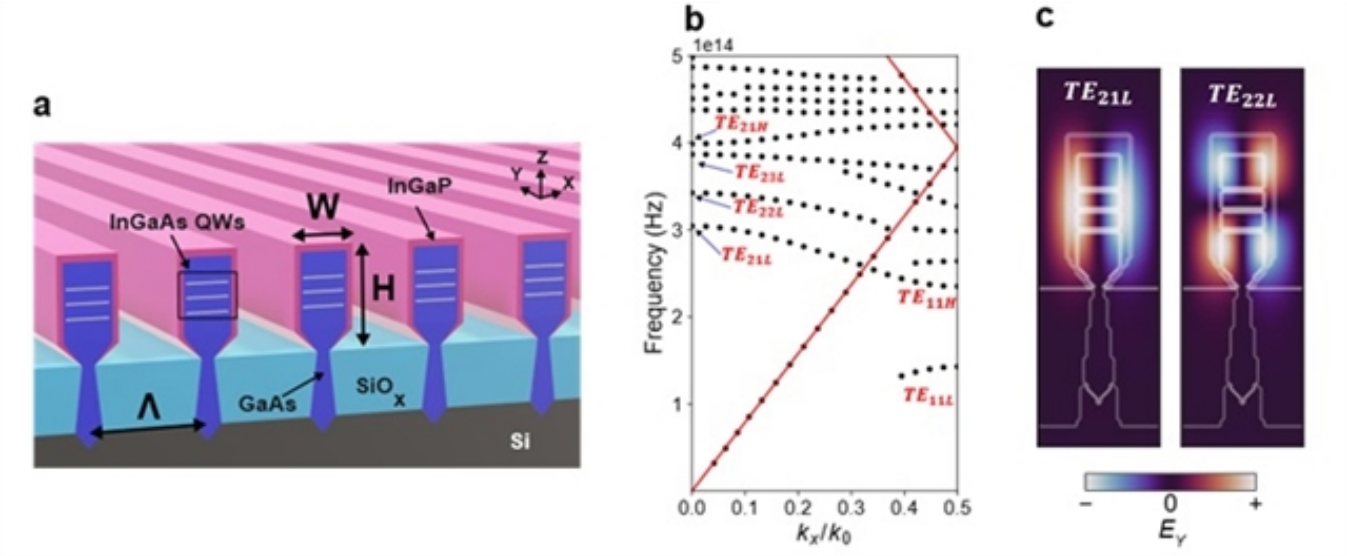


图2：纳米脊一维光子晶体

其次，通过系统扫描几何参数确定发射波长（图3）。2D-FDTD
计算表明，在影响共振频率的参数中，纳米脊阵列周期对共振频率影响最大，脊宽
W（占空比）次之，脊高 H 影响最小，仅能起到微调作用；当固定周期为 380 nm 时，仅改变 W
与 H，即可在 980 – 1060 nm
量子阱增益窗口内灵活设定目标波长。基于这一可覆盖增益区间的关键特性，380 nm
周期被确定为后续实验的固定参数。

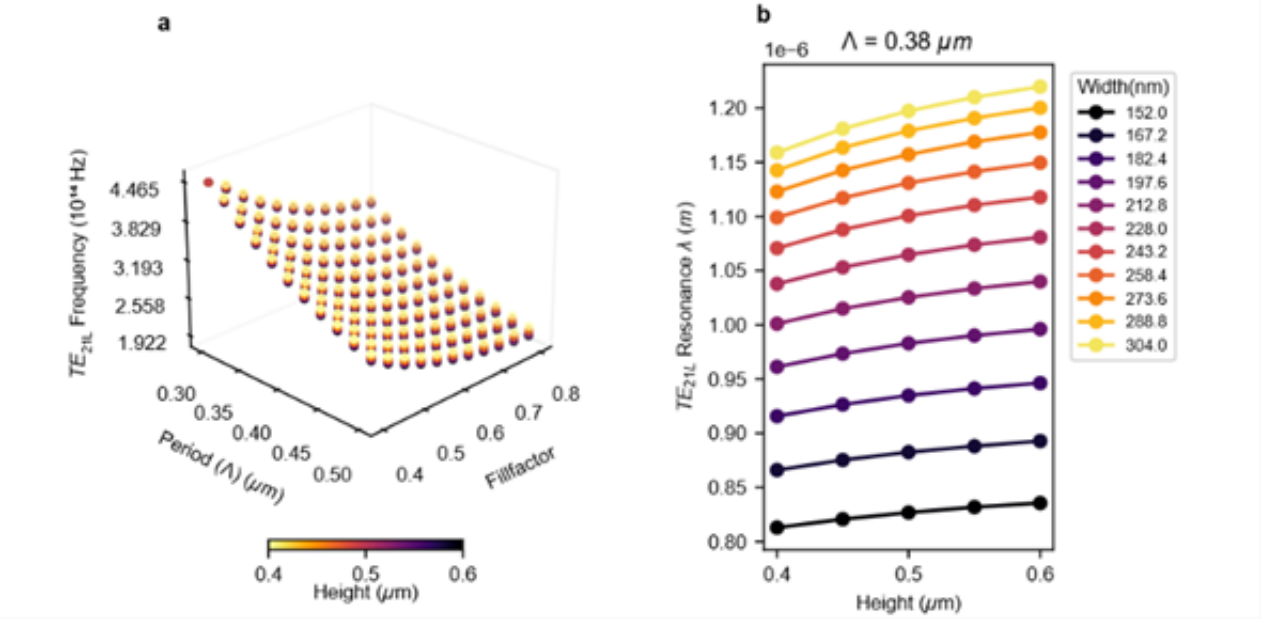


图3：纳米脊尺寸对共振波长的依赖

然后，为抑制有限腔的面内损耗，在器件两侧引入光刻胶埋覆的低折射率侧边镜（图4）：当纳米脊阵列缩减至 40 根脊时，面内泄漏使 Q 降至 15000；在两侧各加 15 根被光刻胶埋覆的纳米脊作为镜区，镜区因光刻胶填充使光子晶体带隙偏移，对中心腔模式形成反射屏障，使 Q 回升至

26000，垂直出光比例由 14.3 % 提至 20.7 %。

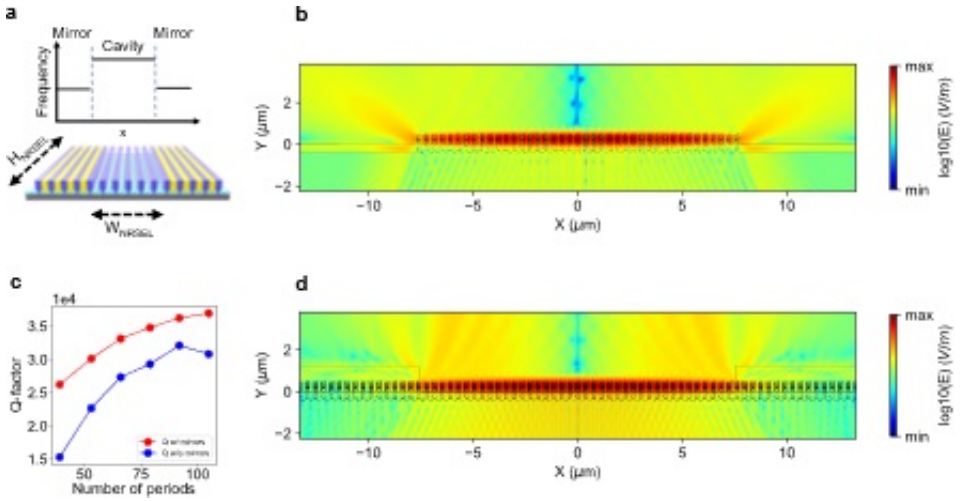


图4：有限 NRSEL 腔的侧向镜设计

接着，通过室温光泵浦实验，验证了器件的激射性能及阈值对腔宽的依赖关系（图5，原文图6）。20 μm 腔宽的器件可实现 984 nm 单峰激射，光泵浦阈值为 10.8 kW cm- ^{2} ，最小线宽达 0.9 nm；对31 个不同宽度器件统计分析发现，当腔宽从 15增加到 35 μm时，阈值下降 63 %；腔宽超过 35 μm
后，阈值呈现饱和，并因工艺串扰影响略微回升。这一变化趋势与模拟得到的 Q 值变化规律一致，进而证实 35 μm 为当前工艺下最优腔宽。

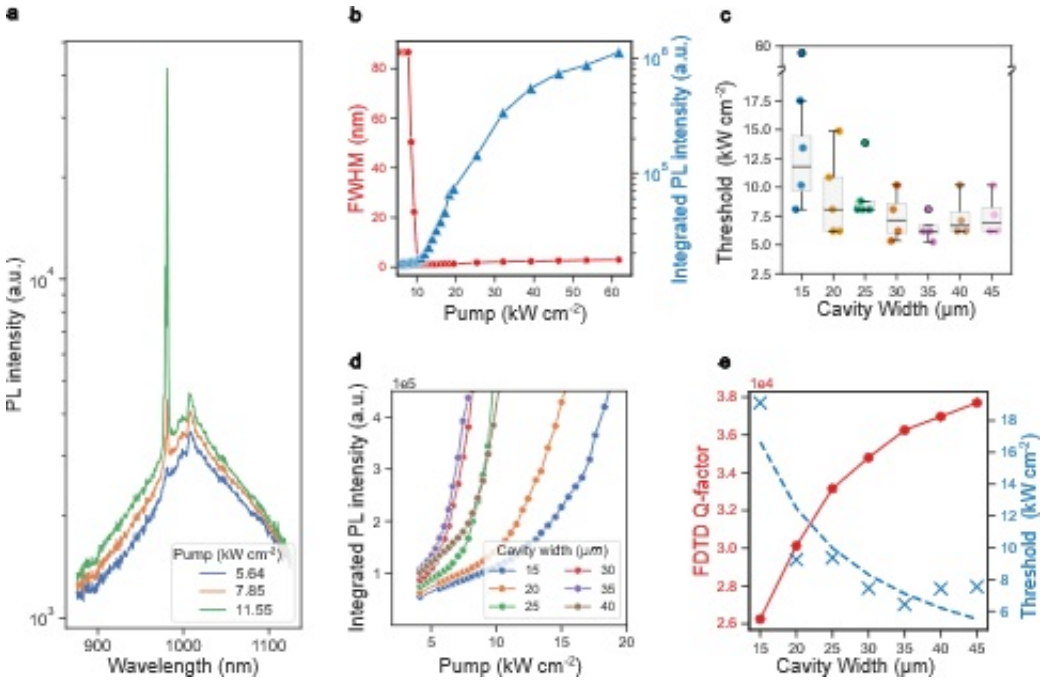


图5：室温光学特性表征

最后，通过远场表征与模式识别，进一步确认激光品质。背焦面成像显示，器件远场发散角 < 10 °，呈星形辐射斑，与 Γ 点等频线分布对应；通过可见区 CCD 同时捕获985 nm、1010 nm 与

890 nm 三个峰，分别对应无/有光刻胶区域的 TE21L 与更高阶 TE21L 模式，实验-模拟偏差小于 5 nm，进一步验证设计与实测的一致性。

总结展望

本研究首次在 300 mm 硅晶圆上，实现了无需 DBR、可垂直出光的纳米脊表面发射激光器（NRSEL）。光泵浦实验显示，该器件最低激射阈值达 5 kW cm-^{2}，单模线宽 0.9 nm，充分验证了带边 BIC 模式和侧边氧化物镜方案的可行性。

在波长调控与拓展方面，通过改变纳米脊周期、宽度，或后期沉积 SiOx、AlOx、HfOx 等薄膜，可在同片晶圆上实现多波长阵列；此前已证明将 In 组分提高到In0.45Ga0.55As 即可把发光波长移到 1.3 μm，未来引入 GaSb 等材料可进一步覆盖 1.5 μm 及更长波段。

展望未来，由于器件直接与标准 CMOS 产线兼容，且具备高密度、低成本、多波长可调的核心潜力，作者认为， NRSEL 有望在数据通信、激光雷达、环境传感及光谱学等领域中，替代或补充现有 VCSEL，成为硅基光子学的新一代表面发射光源。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-025-02061-z

作者：Dries Van Thourhout 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转发