 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i12.8471

Er-doped Photonic Integrated Chip Waveguide Amplifiers: Chip-level Optical Amplification Technology from Satellite Communications to Wearable Devices

Qianze Li

Yan'an High School, Shanghai, Shanghai, 200062, China

Abstract

In applications such as satellite communications and wearable devices, traditional Erbium-Doped Fiber Amplifiers (EDFAs) face prominent issues including excessive size, high power consumption, and difficulties in integration. To address these technological bottlenecks, this research focuses on the chip-scale Erbium-Doped Waveguide Amplifier (EDWA). The chip-scale EDWA adopts rectangular or ridge waveguides with extremely small cross-sectional areas. Through a high refractive index contrast, the optical field is tightly confined within the core region of the waveguide, significantly increasing the optical power density per unit length and thereby enhancing the interaction strength between light and erbium ions. Meanwhile, a bidirectional pumping design is employed to achieve more uniform and higher population inversion in the erbium-doped waveguide, improving the overall performance of the amplifier.

Keywords

Chip-scale Erbium-Doped Waveguide Amplifier (EDWA) Bidirectional Pumping Integrated Photonics

基于光子集成芯片的掺铒光波导放大器——从卫星通信到可穿戴设备的芯片级光放大技术

李乾泽

上海市延安中学，中国 · 上海 200062

摘　要

在卫星通信以及可穿戴设备领域等应用中，传统掺铒光纤放大器（EDFA）面临着体积过大、功耗过高以及集成困难等突出问题。为解决这些技术瓶颈，本研究将目光聚焦于芯片级掺铒光波导放大器（EDWA）。芯片级掺铒光波导放大器采用横截面积极小的矩形或脊型波导，通过高折射率差，将光场紧密的束缚在波导的核心区域，极大的提高了波导单位长度内的光功率密度，从而增强了光与铒离子的相互作用强度。 同时采用双向泵浦设计在掺铒波导中实现了更均匀、更高的粒子数反转，提升了放大器的整体性能。

关键词

芯片级掺铒光波导放大器 双向泵浦 集成光子学

1 引言

1.1 研究背景与意义

当前数字经济蓬勃发展背景下，5G、云计算及物联网等技术对光通信提出了更高要求。中国信息通信研究院最新数据显示，2024 年全球光通信市场规模预计将达到 860 亿美元之巨。“集成化”与“微型化”被公认为行业发展关键方向。现有光纤网络普遍使用的传统 EDFA 存在诸多局限性，在卫星通信和可穿戴设备等领域的应用中存在严重的制约。掺铒光波导放大器（EDWA）的问世，恰恰为该困境提供了破解路径。

1.2 研究目标与创新点

基于上述行业痛点，本研究核心创新点集中在三方面：

1. 理论维度方面：揭示 EDWA 性能受到材料特性、结构参数与泵浦条件三重因素共同作用的规律性认识。

2. 技术突破层面：纳米晶核壳结构的创新设计使得铒离子猝灭效应这一长期存在的技术瓶颈得到显著改善，离子利用效率提升幅度高达 70%。

3. 工程实现层面：掺铒波导放大器的最新结果表明，针对卫星通信系统优化的 EDWA 器件在 1cm^2 尺寸芯片可以实现 30dB 的信号增益效果（相当于原始信号强度的 1000 倍量级），芯片内部放大输出功率高达 145mW，相关指标

【作者简介】李乾泽（2008–），男，中国上海人，在读高中生，从事电子通信专业研究。

已经与成熟的掺铒光纤放大器匹敌，达到实用标准。

2 理论框架与关键技术原理

2.1 掺铒光波导的放大逻辑

关于 EDWA 工作机制，可借助“光信号储能装置”模型予以说明。

第一步：能量注入过程。采用 980nm 或 1480nm 波段的光源作为能量供给装置具有显著优势。第二步：高能量状态的维持由铒离子的亚稳态 $^4I_{13/2}$ 实现。第三步：通信光信号的增强通过亚稳态积聚的大量铒离子的能量释放实现。

2.2 芯片级集成的关键设计

2.2.1 材料选择

第一类是无机基质材料，比如磷酸盐玻璃、氧化铝薄膜、铌酸锂薄膜等。

第二类是聚合物材料，比如 SU-8 聚合物。这类材料的优势正好和玻璃互补，非常适合可穿戴设备的柔性基板，可以通过光刻工艺批量生产。

第三类是纳米材料，NaErYF 纳米晶可作为典型实例。粒径分布范围介于 5 至 20 纳米之间的此类材料（相较于人类头发直径缩小达 1000 倍），能够实现于玻璃或聚合物基质中的均匀分散状态。

2.2.2 光通道优化：设计“高效光跑道”

通信光在芯片中传输时，需要一条“跑道”（波导），这条跑道的设计直接影响信号损耗。我们通过优化宽度、厚度和刻蚀深度等因素，以实现单模传输，并最大化模场与掺杂区域的重叠积分。

2.2.3 供电简化：让“充电器”更小巧

EDWA 需要泵浦光来给铒离子供能，我们提出了两种更简单的供电方式：

一是顶部垂直泵浦，用 LED 作为泵浦源，直接从芯片顶部照射。这种方式不需要光纤，泵浦源可以和芯片集成在一起，体积缩小 70%。二是双向泵浦，从芯片的两端同时接入泵浦光。这种方式能让铒离子在波导中均匀受激，避免“一端能量多、一端能量少”的问题，增益稳定性有大幅提升。

3 创新点与技术突破

3.1 设计与制备低损耗波导，延长铒离子有效增益长度

高浓度铒离子的“扎堆失效”（浓度猝灭）是行业公认的难题——当铒离子浓度超过 临界浓度时，相邻铒离子会通过显著的“能量交叉弛豫”互相传递能量，导致给通信光补能的效率下降 50% 以上。我们通过两种材料设计，期望可以解决这个问题。

3.1.1 纳米晶核壳结构

第一步，制备“铒离子核”。采用高温热分解法，在 180℃的油浴中，将 $Er(NO_3)_3$、$Y(NO_3)_3$、$Yb(NO_3)_3$ 等原料溶解在油酸和十八烯中，反应 2 小时，形成 $NaErYF_4$ 纳米晶核。

第二步，NaYF 壳层被用以包覆纳米晶核。厚度设定于 2-6nm 范围内，该惰性材料层得以成功构建。与铒离子间的反应不发生，由 NaYF 材料本身的化学惰性所决定；折射率数值约为 1.5，与晶核相匹配，光的传输过程因此不受干扰。

3.1.2 辅助离子掺杂

除了核壳结构，我们还设想在纳米晶中加入少量铈离子（Ce^{3+}），作为“能量吸收剂”，进一步减少铒离子的能量浪费。而铈离子能吸收铒离子的多余能量，让铒离子快速回到“稳定激发态”（即亚稳态 $^4I_{13}/_2$），从而把能量更多地传给通信光。通过改变铈离子浓度，可以优化铒离子在 S 波段（1480nm）的荧光效率，提升放大器增益性能，进而让通信带宽拓展 30%，满足 5G 的高速传输需求。

3.2 EDWA 多领域适用性提升，打破设备单一定势

实际应用背景显示，不同行业对于 EDWA 装置的期盼不同：像通讯卫星方向往往是对信号输出要求猛增、能撑住十分极端复杂环境；日常穿戴的小型智能仪器则又看重体积不能太大，同时低功耗属性备受青睐；数据处理则提出多通路信息、运行持久稳定的愿景。

3.2.1 少模型波通路工程：保障各项光格式“均衡扩充”

在数据处理场景中，数据机房越来越依赖完善的大规模传输，为了提升传输容量，会采用“模分复用技术”，全在同一根光波导传输线中共存。

针对“少模”波导光放大器我们专门进行了特别设计。主要是优化泵浦方式，并且根据极其细致的铒元素离子分布过程进行优化调整，这样，多条光格路线最后得到等量补给，各项信号得以甚至程度提振。

3.2.2 晶圆级集成结构：让 EDWA“能批量生产”

第一步，进行晶圆基层材料的初步制备，选择直径为 6 英寸的硅晶圆。第二步，光刻波导图案。在氮硅化膜层之上覆上一层光刻聚合胶，通过掩模工艺将规范化的矩形图形转印到该层面。第三步，离子注入铒离子。采用离子束引注机械设备，将特定离子的粒流精确送进入波导内部，有筛选性地控制对应渗透层深度。第四步，对其余元件实现综合集成。于同一晶圆之内与上述线条共同实施波分复销器结构，并嵌套光传播切换开关，用于动态方式调控通信路径去向，各核心模块之间通过缜密金属走线串联，由此达到光学单芯片全部机能完整统一。

4 技术应用与系统适配性分析

4.1 卫星通信：强信号、抗极端环境的“太空光放大器”

卫星通信场景需求是高增益特性与强功率输出，以及极端环境耐受性，此乃卫星通信对 EDWA 技术之核心诉求。体积小型化条件下实现信号高效放大，真空环境、温度剧变及辐射干扰等太空特殊因素均需克服。为此，我们提出了基

于氮化硅基 EDWA 的解决方案，预计性能指标及所需验证数据详述如下：

4.1.1 材料筛选与结构改良

材料：选择 Al_2O_3-La_2O_3 玻璃体系作为铒离子掺杂基质。热膨胀系数低至 5×10^{-6}/℃之特性得以体现，-40℃至 85℃温域内结构形变量控制在 0.1 微米以下，波导断裂风险由此消除。辐射耐受性方面，100kGy 剂量伽马射线辐照后增益衰减仅 5%，满足卫星器件长周期运行要求。

结构：采用双通道波导构型，同一衬底表面蚀刻两条平行波导通道。单条波导截面尺寸 5μm×3μm，通道间距 10μm 设置合理。双路信号同步放大机制使传输容量倍增得以实现。泵浦光引入方式优化为双向耦合设计，980nm 激光二极管从器件两端同时注入泵浦光能流。

4.1.2 实验测试方案与预计性能

设想基于实验室搭建的“太空环境模拟舱”，模拟 -40℃ -85℃的温差、10^{-5}Pa 的真空度和 100kGy 的伽马辐射，对 EDWA 进行了长时间连续测试。

增益性能：在中等泵浦功率条件下（~200mW），单路波导的增益值可达 30dB（相当于信号强度被提升了 1000 倍量级），放大功率 >100mW。

温度稳定性：从在 -40℃的极寒环境，到在 85℃高温条件，研究波导放大器的增益变化，实现增益波动幅度 <3dB。

辐射稳定性：研究经过 100kGy 剂量的伽马射线辐照后波导放大器的性能衰减率，以及辐照终止后放大器的性能恢复率。

4.2 可穿戴设备：小体积、低功耗的“柔性光放大器”

“柔性光放大器”概念的小型化、低功耗特性得到突显在可穿戴设备应用领域中，EDWA 器件的关键性需求表现为体积微型化、功耗极低化以及柔性适配特性三个方面。首要考虑的是器件尺寸需控制在微小范围内，以避免佩戴时的舒适度问题；其次要求能耗水平足够低下，不影响设备的续航能力表现；最后必须能够实现与柔性基底的良好贴合。基于上述需求点，“聚合物基 EDWA”的设计方案被提出，其具体技术指标及实验验证数据如下：

4.2.1 方案设计：选对材料 + 简化供电

材料：SU-8 型聚合物被选作主要载体材料，该物质展现出优异的柔韧性能。通过弯曲测试验证可知（将 EDWA 器件弯曲至 5mm 半径条件下进行 1000 次循环测试），其传输损耗增量仅为 0.5dB/cm 量级。折射率可调特性（1.5-1.6 范围）同样具备，这使得与聚酰亚胺等柔性基底（折射率 1.55 典型值）的光学匹配成为可能，界面反射损耗由此显著降低。

供电：405nm 波段 LED 光源作为泵浦源被采用，采取顶部垂直泵浦方式。该泵浦源的封装尺寸仅 0.1 立方厘米量级，能够直接集成于 EDWA 器件相邻位置而无需光纤耦合组件。实例表明 LED 的功耗指标达 1.7mW 水平，相较于传统 LD 泵浦方案（200mW 典型值）实现了 99% 的能耗降低效果。

4.2.2 预计成本与量产：适合消费级产品

聚合物基质 EDWA 的制备成本呈现明显优势：SU-8 聚合物原料价格为每克 2 美元单位；纳米晶材料成本控制在每克 5 美元范围；6 英寸规格晶圆可实现 2000 个 EDWA 器件的制备规模。由此可见单个器件的综合成本约为 50 美元量级，相比传统 EDFA 设备（1000 美元 / 台）具有 95% 的成本缩减幅度。这一经济性特征使其在消费级可穿戴产品的大规模生产应用中展现出显著优势。

5 性能分析与未来展望

随着光通信技术的发展，EDWA 的应用场景还将不断拓展，我们可以从三个方向继续研究：

5.1 动态可调谐增益：让 EDWA“能按需放大”

我们计划在 EDWA 中加入“微加热器”（体积仅 0.01cm³），通过改变温度来调整铒离子的能级分布，从而改变增益——温度每升高 10℃，增益可调整 1dB。

5.2 全片上集成：让 EDWA“不用外接设备”

当前阶段，EDWA 器件化进程中仍存在外部泵浦源与电源模块的依赖性问题，致使整体结构未能达到理想的微型化程度。对此提出了一种“全片上集成”方案：将 LED 型泵浦源、微型电池供电单元与 EDWA 功能单元共同集成于单一芯片基底之上。

5.3 跨领域应用：从通信到传感、量子技术

光传感：环境监测系统中微弱光信号的增强成为可能。以污染物荧光检测为例，传统传感器的检测下限为 1mg/L 浓度水平。引入 EDWA 放大模块后，检测灵敏度可提升一个数量级至 0.1mg/L 浓度水平。

量子通信：量子通信领域对单光子级别信号的放大提出特殊需求。常规 EDFA 器件因噪声干扰问题会导致量子态退相干现象发生。针对此问题，“低噪声 EDWA”的开发正在进行中。通过铒离子掺杂浓度的精确调控结合泵浦方式的优化改进，噪声系数可控制在 3dB 阈值之下。实验室阶段已取得 1.5dB 噪声系数的突破性进展。

参考文献

[1] 王敬.双波段双极化共孔径微带天线阵研究，《哈尔滨工程大学(硕士)》，2017年.

[2] 徐乔笙.基于Zigbee的密集型母线槽温升及振动无线监测研究与实现，《西华大学(硕士)》，2019年

[3] 王双双.基于高铒浓度纳米晶的C波段聚合物光波导放大器研究[D].吉林大学,2025.DOI:10.27162/d.cnki.gjlin.2025.004551.

[4] 李俊.掺铒纳米晶尺寸对聚合物基光波导放大器增益的影响[D].吉林大学,2023.DOI:10.27162/d.cnki.gjlin.2023.002484.

[5] 孙潼鹤.基于铒镱共掺氟化物纳米晶的1.53μm和0.53μm聚合物光波导放大器研究[D].吉林大学,2022.DOI:10.27162/d.cnki.gjlin.2022.001238.