

引用本文:范源,于海华,于浩,等.可调散射范围光栅耦合器的设计与分析[J].光通信技术,2025,49(6):15-20.

# 可调散射范围光栅耦合器的设计与分析

范源<sup>1</sup>,于海华<sup>1</sup>,于浩<sup>1\*</sup>,王浩然<sup>2</sup>,左易<sup>2</sup>,彭超<sup>2\*</sup>

(1.北京联控前瞻技术有限公司,北京 100190;2.北京大学 电子学院,北京 100871)

**摘要:**传统光栅耦合器在面对大发散角光源时,动量空间存在模场不匹配问题,导致耦合效率较低。结合时域有限差分(FDTD)算法提出了一种可调散射范围光栅耦合器的设计方法,通过调整光栅单元的散射角,灵活控制耦合器的散射范围,从而优化光源与光栅耦合器之间的模场匹配。仿真结果表明,所设计的无金属反射镜的单刻蚀氮化硅光栅耦合器与850 nm波长垂直腔面发射激光器(VCSEL)的耦合效率达到63%(-2.01 dB),相较传统光栅耦合器可显著降低耦合损耗,且对入射光角度具有较低的敏感性。

**关键词:**可调散射范围;模场匹配;时域有限差分;光栅耦合器;光源异构集成

**中图分类号:**TN91 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)06-0015-06

**DOI:**10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.06.003

## Design and analysis of a tunable scattering range grating coupler

FAN Yuan<sup>1</sup>, YU Haihua<sup>1</sup>, YU Hao<sup>1\*</sup>, WANG Haoran<sup>2</sup>, ZUO Yi<sup>2</sup>, PENG Chao<sup>2\*</sup>

(1. Legend Holdings Research, Beijing 100190, China; 2. School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Traditional grating couplers face the challenge of low coupling efficiency due to momentum-space mode mismatch when dealing with large-divergence-angle light sources. This study proposes a design method for a grating coupler with tunable scattering range by employing the finite-difference time-domain(FDTD) algorithm. By adjusting the scattering angle of the grating units, the scattering range of the coupler can be flexibly controlled, thereby optimizing the mode field matching between the light source and the grating coupler. Simulation results demonstrate that the designed single-etch silicon nitride grating coupler without a metal reflector achieves a coupling efficiency of 63%(-2.01 dB) with an 850 nm vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL), significantly reducing coupling loss compared with conventional grating couplers while exhibiting low sensitivity to the incident light angle.

**Key words:** tunable scattering range, modal-field matching, finite-difference time-domain, grating coupler, light source heterogeneous integration

## 0 引言

光子集成电路(PIC)作为后摩尔时代信息技术的核心发展方向,在光通信、智能传感、量子计算和数据存储等领域<sup>[1-12]</sup>展现出巨大潜力。然而,垂直腔面发射激光器(VCSEL)和分布式反馈(DFB)激光器等面外光

收稿日期:2025-01-15。

基金项目:国家自然科学基金项目(62325501)资助。

作者简介:范源(1998—),男,硕士,现就职于联想控股股份有限公司创新发展中心/前瞻技术研究院,助理研究员,主要从事集成光子芯片和光子信息处理方面的研究工作。

\*通信作者 1:于浩(1971—),男,博士,联想控股股份有限公司首席执行官、前瞻技术研究院院长。

\*通信作者 2:彭超(1981—),男,博士,北京大学电子学院教授,博士生导师,主要研究方向为拓扑光子学与集成光子器件。



源与光芯片的高效耦合始终是制约其性能的关键挑战。当光源发散角较大时,由于传统光栅耦合器在动量空间存在模场失配,会导致耦合效率显著降低。

目前,片上光耦合主要采用边缘耦合<sup>[13]</sup>和光栅耦合<sup>[14]</sup>2种方式。边缘耦合虽具有偏振不敏感和较高的宽带特性,但其苛刻的对准要求和有限的耦合位置限制了应用;而光栅耦合器凭借设计灵活性和支持片上测试等优势成为研究热点。近年来,光栅耦合器的优化研究取得显著进展:在绝缘体上硅(SOI)平台上,MARCHETTI R等人<sup>[15]</sup>通过双层变迹光栅结构优化实现了-0.90 dB耦合效率(1 568 nm)和37.4 nm的1 dB带宽。为抑制因结构对称性导致的衬底辐射损耗,HOPPE N等人<sup>[16]</sup>引入金属反射镜结构,将耦合损耗提

范源,于海华,于浩,等:可调散射范围光栅耦合器的设计与分析

升至 $-0.50$  dB,同时保持 $37.0$  nm的 $1$  dB带宽。WANG H等人<sup>[17]</sup>采用拓扑荷调控策略在不使用金属镜条件下实现 $-0.34$  dB效率。为了降低光栅耦合的偏振相关损耗,冯瑶等人<sup>[18]</sup>设计的类梅花型二维光栅耦合器,将偏振相关损耗降至 $0.18$  dB。此外,研究者们也对绝缘体上的硅氮化物(SNOI)平台和绝缘体上的铌酸锂(LNOI)平台上的光栅耦合进行了系统的设计优化,包括耦合效率<sup>[19-20]</sup>、光学带宽<sup>[21-22]</sup>和偏振敏感性<sup>[23-24]</sup>等方面,旨在提升器件性能并扩展其应用范围。

然而,上述研究均基于小发散角光源(如光纤)的耦合场景,而面向大发散角光源(如VCSEL)时,传统光栅耦合器的散射范围与光源动量分布失配,导致耦合效率急剧下降。例如,JAHE M等人<sup>[25]</sup>在 $850$  nm波段实现了 $-4.08$  dB模拟效率,但“VCSEL-光纤”链路插损达 $21.90$  dB,比“光纤-光纤”链路高 $3.40$  dB。RUAN Z等人<sup>[26]</sup>通过倾斜硅膜光栅实现VCSEL水平集成,在 $1\,310$  nm波长下的耦合效率为 $-5.80$  dB。LU H等人<sup>[27]</sup>采用 $10^\circ$ 倒装键合, $1\,550$  nm“VCSEL-芯片”插损为 $11.80$  dB,比光纤方案高 $5.9$  dB。KAUR K S等人<sup>[28]</sup>利用SU8棱镜实现垂直耦合,但耦合效率仅 $-18.85$  dB。上述文献虽能缓解部分问题,但均以牺牲集成密度或增加工艺难度为代价。

为了更好地解决光栅耦合器动量空间散射范围与光源发散角的匹配问题,本文利用时域有限差分(FDTD)算法,结合相位匹配条件和空间几何关系,提出一种可调散射范围光栅耦合器的设计方法。

## 1 可调散射范围光栅耦合器设计

### 1.1 基本结构

本文结合FDTD算法对可调散射范围光栅耦合器进行建模与分析,其基本结构如图1所示。绝缘衬底向上依此为 $\text{SiO}_2$ 埋氧层、波导层和包层介质,光栅结构包括前半部分刻槽宽度由小逐渐增大的切趾区域和后半部分刻槽宽度固定的均匀区域,实现同时调控辐射场的实空间和动量空间分布。第 $i$ 个光栅单元的刻

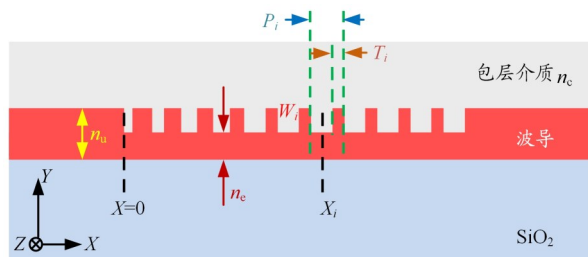


图1 可调散射范围光栅耦合器的基本结构

槽宽度和栅条宽度分别为 $W_i$ 和 $T_i$ ,对应周期 $P_i=W_i+T_i$ ,图中 $n_u$ 和 $n_c$ 分别为未刻蚀区域与刻蚀区域对应厚度下平板波导中 $\text{TE}_0$ 模式的有效折射率, $n_c$ 为包层介质的折射率。

### 1.2 设计方法

为了解决面外光源片上耦合时动量空间的模场失配问题,传统方法通过在光源或耦合器表面增设微透镜结构来调控光束波前强度分布,实现模场整形。然而,这种方案会显著增加器件封装难度并降低光源的异构集成密度。为此,本文提出将光学整形功能直接集成于光栅耦合器结构中,通过精确调控光栅单元的散射特性实现高效的模场匹配。

本文采用理论分析与数值优化相结合的设计方法:首先基于相位匹配条件建立光栅单元周期与散射角的解析关系,结合空间几何关系实现散射角的定向调控,在光源发散角和光栅散射范围之间建立精确对应关系;继而通过FDTD数值仿真进行迭代优化,克服纯几何光学方法忽略波动效应和介质特性的局限。具体而言,光栅散射可分为2种基本模式:1)正向散射,即波导能量保持原传播方向的同向散射;2)反向散射,即波导能量发生传播方向反转的散射。这种混合设计策略的优势在于:空间几何分析提供了初始设计的物理依据和参数关系,而FDTD算法则通过全波仿真精确计入波动光学效应,二者结合可实现高效可靠的光栅耦合器逆向设计。本文以反向散射为例,将具体的设计方法分为以下几个步骤:

步骤1:配置输入参数。

根据通信波长需要,选定目标波长 $\lambda$ ;根据目标面外光源(VCSEL、DFB激光器等)的发散角,设定目标散射范围(光栅耦合器远场条件下散射光束强度降低到最大值 $1/e^2$ 时的目标角度范围 $\alpha_{\text{goal}}$ );给定光栅耦合器上辐射的初始聚焦点坐标 $(U, V)$ 和各光栅单元的刻槽宽度 $W_{\text{initial}}$ 数组(光栅数量固定);通过FDTD计算目标波长 $\lambda$ 下目标波导材质对应的有效折射率 $n_u$ 和 $n_c$ ;选定包层介质折射率 $n_c$ 。

步骤2:基于相位匹配和几何关系,生成光栅耦合器。

根据式(1)中单个光栅单元的相位表达式和式(2)中各光栅单元间的相位匹配条件,可得到式(3)中各光栅单元周期和散射角之间的函数关系<sup>[29]</sup>:

$$\Phi = \frac{2\pi(P - W)n_u}{\lambda} + \frac{2\pi W n_c}{\lambda} \quad (1)$$

$$\Phi = 2\pi + \frac{2\pi P n_c \sin \theta}{\lambda} \quad (2)$$

$$P = \frac{\lambda + W(n_u - n_c)}{n_u - n_c \sin \theta} \quad (3)$$

其中,  $\Phi$  和  $\theta$  分别为各光栅单元的相位和散射角。

取首个光栅刻槽的起始位置为零坐标, 定义光栅刻槽的半宽为该光栅单元的坐标参考点, 则首个光栅单元的横坐标  $X_1 = W/2$ 。由图 2(a) 中各光栅单元与聚焦点的几何关系可得出第  $i$  个光栅单元的散射角  $\theta_i$  和坐标  $(U, V)$  的函数表达式为

$$\theta_i = -\tan^{-1} \left( \left| \frac{X_i - U}{V} \right| \right) \quad (4)$$

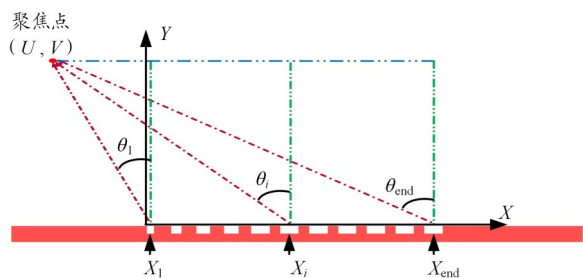
将  $X_1 = W/2$  代入式(4)求得首个光栅单元的散射角  $\theta_1$ , 将该  $\theta_1$  代入式(3)获得首个光栅单元的周期  $P_1$ , 以此递推得出第  $i$  个光栅单元的横坐标  $X_i$ , 据此求出所有光栅单元的散射角和周期, 获得光栅耦合器结构。

步骤3: 通过几何视角获取光栅耦合器几何散射范围与聚焦高度的关系。

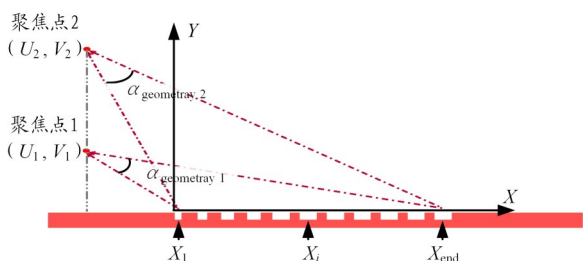
根据图 2(b) 可从几何关系上获得几何散射范围  $\alpha_{\text{geometry}}$  与聚焦点坐标的表达式为

$$\alpha_{\text{geometry}} = f(U, V, X_1, X_{\text{end}}) = \cos^{-1} \left\{ \frac{(X_1 - U)(X_{\text{end}} - U) + V^2}{\sqrt{(V^2 + (X_1 - U)^2) \sqrt{V^2 + (X_{\text{end}} - U)^2}}} \right\} \quad (5)$$

其中,  $U, X$  为给定值,  $V$  为聚焦位置高度, 且光栅总长度  $X_{\text{end}}$  与  $V$  存在函数关系,  $X_{\text{end}} = g(V)$ 。通过 FDTD 执行步骤 2 来获得不同  $V$  下  $X_{\text{end}}$  的取值, 拟合出  $X_{\text{end}}$  关于  $V$  的



(a) 光栅单元散射角示意图



(b) 光栅耦合器几何散射范围示意图

图2 光栅单元散射角和光栅耦合器几何散射范围示意图

函数表达式  $X_{\text{end}} = g(V)$ , 代入式(5)获得几何散射范围  $\alpha_{\text{geometry}}$  关于单一变量  $V$  的函数表达式  $\alpha_{\text{geometry}} = f(V)$ 。

步骤4: 优化光栅单元散射角。

为避免光能量在传播过程中因局部群速度为零而导致散射效率降低, 当部分光栅单元出现  $\theta = 0^\circ$  的完全垂直散射时, 结合图 2(a), 应适度减小  $U$  使各光栅单元以小于零的角度散射(对于正向散射, 则增大  $U$  使各光栅单元以大于零的角度散射)。

步骤5: 匹配光栅耦合器的目标散射范围。

通过 FDTD 查看光栅耦合器的散射范围  $\alpha_{1/e^2}$ , 比较  $\alpha_{1/e^2}$  与目标散射范围  $\alpha_{\text{goal}}$  的差异, 结合几何散射范围  $\alpha_{\text{geometry}} = f(V)$  展现出来的区间单调性, 并采用 FDTD 算法对聚焦高度  $V$  进行优化, 即可使得  $\alpha_{1/e^2}$  逐渐逼近光栅耦合器的目标散射范围  $\alpha_{\text{goal}}$ , 直到  $\alpha_{1/e^2} = \alpha_{\text{goal}}$ , 实现精准调控。

## 2 仿真结果与分析

### 2.1 散射范围调控

在主流光子集成材料平台中, SNOI 因其兼具强非线性效应、高集成密度和宽光谱透明性(覆盖可见光至通信波段), 成为高密度集成光学器件的理想选择。本文基于标准 SNOI 参数(5  $\mu\text{m}$  厚  $\text{SiO}_2$  埋氧层、350 nm 厚 SiN 波导层, 刻槽深度 210 nm), 设计目标波长为 850 nm 的光栅耦合器, 初始聚焦点位于  $(-5 \mu\text{m}, 100 \mu\text{m})$ 。光栅结构采用 70 周期渐变设计, 前 35 个周期刻槽宽度  $W_{\text{initial}}$  从 60 nm 起始, 以 3 nm 步长递增, 后 35 周期固定为 162 nm。通过 FDTD 仿真得到波导未刻蚀区 ( $n_u = 1.8276$ ) 和刻蚀区 ( $n_c = 1.5787$ ) 的有效折射率, 包层介质为空气 ( $n_c = 1$ )。该设计通过调控聚焦位置优化光栅散射特性, 为高集成度光子器件提供可行方案。

基于实际工艺约束, 采用 FDTD 仿真计算聚焦位置高度  $V$  在 5~150  $\mu\text{m}$  区间变化时对应的光栅总长度  $X_{\text{end}}$  值。仿真结果表明: 光栅总长度  $X_{\text{end}}$  随聚焦位置高度  $V$  增加而增长, 其关系可通过双参数指数衰减函数拟合, 获得的  $X_{\text{end}} = g(V)$  表达式为

$$X_{\text{end}} = -6.95e^{(-V/28.5)} - 5.09e^{(-V/135.7)} + V \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)后获得几何散射范围  $\alpha_{\text{geometry}} = f(V)$  的函数关系, 绘制出曲线如图 3 所示。可以看出, 该函数在拐点  $V = 13 \mu\text{m}$  两侧呈现出相反的单调性, 且由所给定的刻槽宽度  $W_{\text{initial}}$  数组所组成的光栅耦合器的几何散射范围极大值为  $44.6^\circ$ 。由此可知, 对于给定的刻槽宽度分布, 其几何散射范围  $\alpha_{\text{geometry}}$  存在确定的

范源,于海华,于浩,等:可调散射范围光栅耦合器的设计与分析

最大值。当调整聚焦位置高度  $V$  也无法进一步增大  $\alpha_{1/e^2}$  时,表明当前光栅结构已达到最大散射角度范围,此时需增加光栅单元数量以扩展调控能力。

针对 VCSEL 和 DFB 激光器的多样化产品特性,本文选取  $19^\circ$ 、 $27^\circ$  和  $35^\circ$  这 3 个典型目标散射范围。基于图 3 函数拐点右侧的单调递减特性,以初始聚焦点  $(-5 \mu\text{m}, 100 \mu\text{m})$  为基准,采用 1.2 节所述设计方法实现散射范围的精准调控,获得的结果如图 4 所示。可以看出,随着聚焦位置的改变,散射光束的空间形态发生了显著变化;散射范围随着聚焦位置高度的降低而逐渐增大,该变化趋势和图 3 中表现出的区间单调性具有一致性。定义角度远场分布图中散射范围半宽处对应的横坐标为中心散射角  $\beta$ ,则可以看出随着散射范围从  $19^\circ$  增大至  $35^\circ$ ,其中心散射角  $\beta$  由  $-12.7^\circ$

逐渐减小至  $-25.5^\circ$ 。

3 种散射范围对应的上辐射效率和远场电场强度如图 5 所示。由图 5(a) 可知,随着散射范围增大,  $850 \text{ nm}$  波长处上辐射效率由  $\alpha_{1/e^2}=19^\circ$  时的 59%,分别提升至  $\alpha_{1/e^2}$  为  $27^\circ$ 、 $35^\circ$  时的 66%、69%,这和图 4(a)~图 4(c) 的电场面分布具有良好的对应性。由图 5(b) 可知,散射范围越大,其远场归一化电场强度在  $X$  方向上的跨度则越小,说明辐射场展现出更小的束腰宽度。

## 2.2 面外光源片上耦合

为验证具备目标散射范围的光栅耦合器的耦合性能,本文依据 Coherent 公司量产的  $850 \text{ nm}$  波长 VCSEL 的产品特性(全宽  $1/e^2=27^\circ$ ),结合 FDTD 算法对高斯光源进行设定,其中发散角半宽为  $13.5^\circ$ ,入射角为  $19.1^\circ$ ,束腰半径为  $2.5 \mu\text{m}$ ,得到光栅强度分布结果如图 6 所示。

从图 6(a) 和图 6(c) 可以看出,本文设计的光栅耦合器与目标光源表现出优异的匹配特性。该结构实现了 63% ( $-2.01 \text{ dB}$ ) 的耦合效率,相较于 JAHED M 等人<sup>[25]</sup> 的研究成果,耦合损耗显著降低了  $2.07 \text{ dB}$ 。从图 6(d) 可以看出,VCSEL 发射的光能量呈现 3 种主要传输路径:1) 有效耦合进入波导(红色箭头);2) 因反射导致的能量损耗(蓝色箭头);3) 通过衬底泄露的能量损失(白色箭头)。

工艺容差是评估光栅耦合器实用性的关键指标,

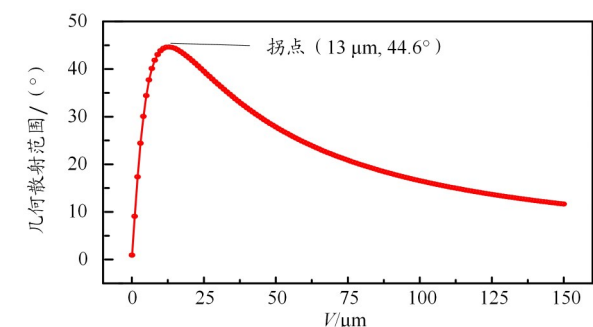


图3 聚焦位置高度与光栅耦合器几何散射范围的函数曲线

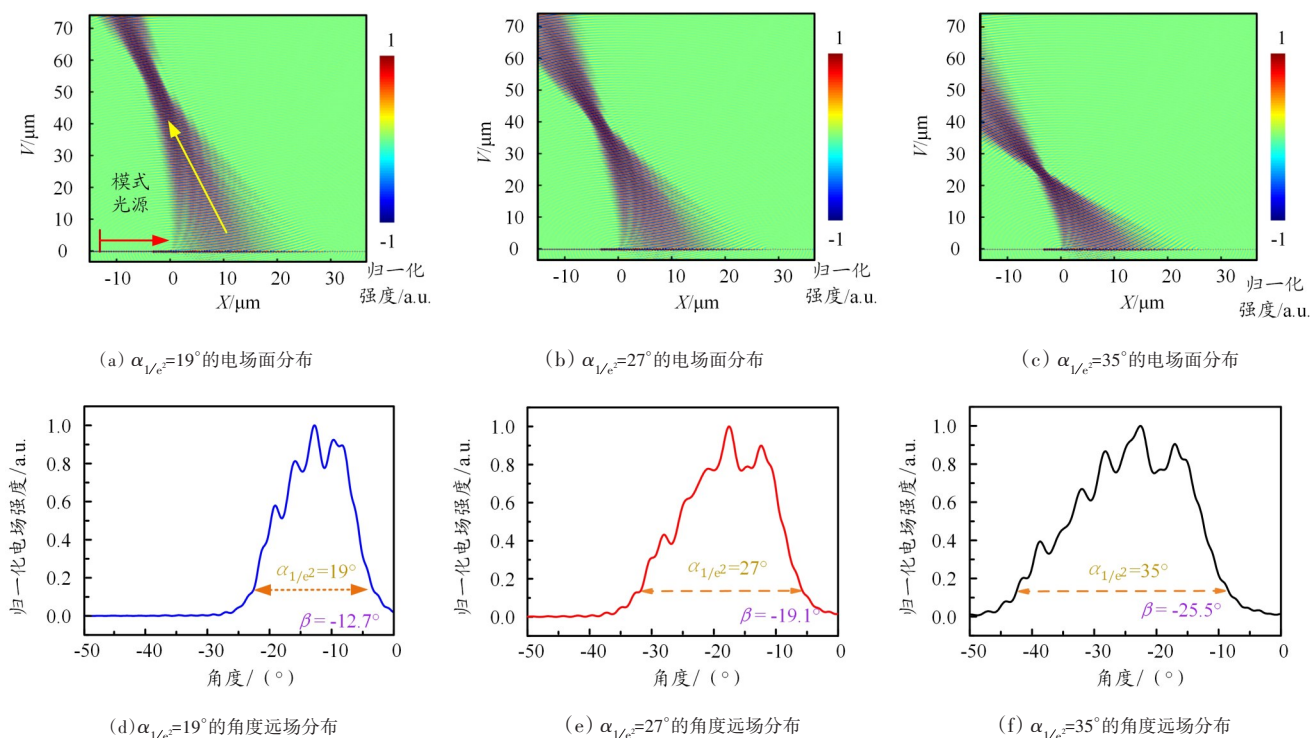
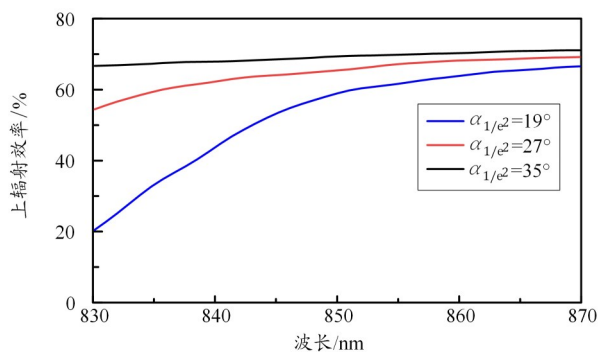
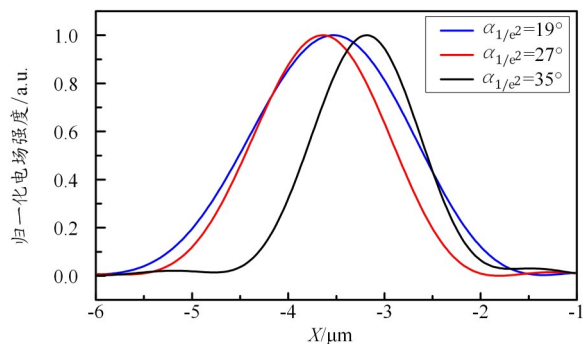


图4 不同散射范围的电场面分布图和散射光束角度远场分布图

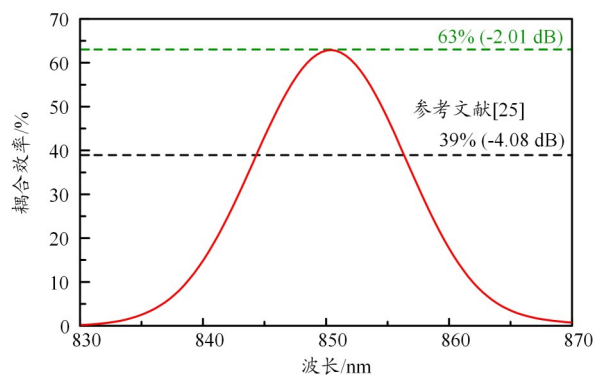


(a) 上辐射效率

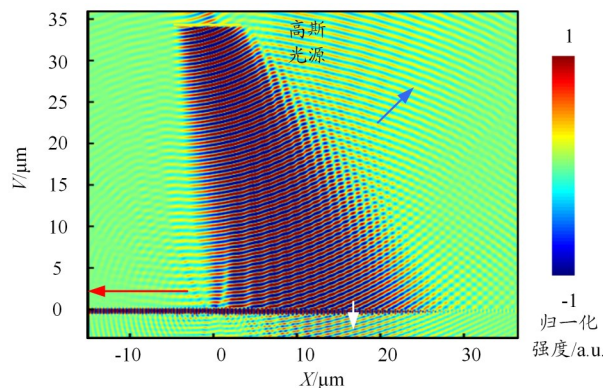


(b) 远场电场分布

图5 不同散射范围对应的上辐射效率远场电场分布

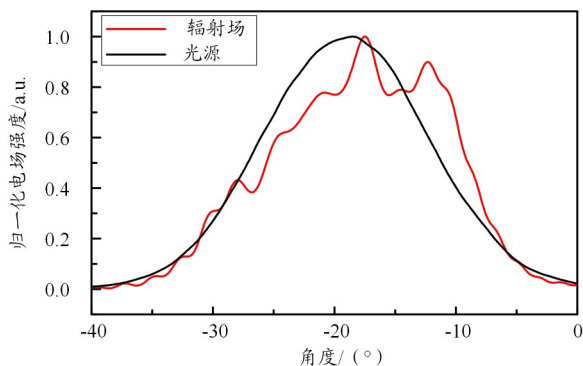


(c) 耦合效率

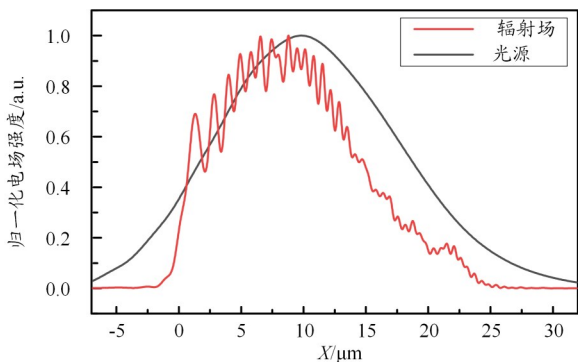


(d) 电场面分布

图6 光栅耦合器和光源电场强度的分布情况



(a) 角度分布



(b) 空间分布

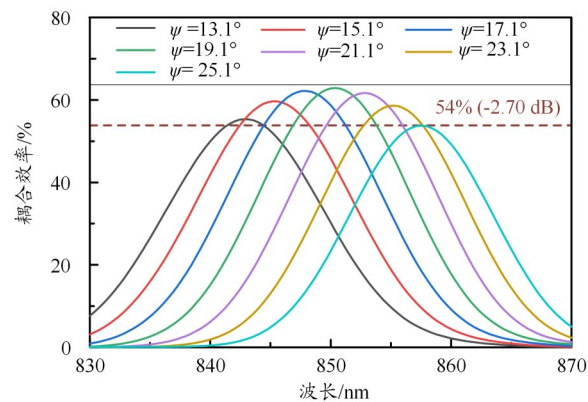


图7 光源入射角对耦合性能的影响

尤其在面外光源的片上耦合应用中,其对入射角度的敏感性直接影响封装对准精度要求。入射角度变化对耦合性能的影响如图7所示。可以看出,当入射角 $\psi$ 在最佳角度 $19.1^\circ$ 的 $\pm 6^\circ$ 范围内变化( $13.1^\circ \sim 25.1^\circ$ )时,系统表现出优异的稳定性,具体表现为:1)中心波长偏移量始终控制在10 nm以内;2)绝对耦合效率的最大波动仅9%(0.69 dB),降低至54%(-2.70 dB)。这一特性表明,本文提出的光栅耦合器设计方法能够实现宽角度不敏感的光场耦合,其大散射范围特性可将封

范源,于海华,于浩,等:可调散射范围光栅耦合器的设计与分析

装过程中的角度对准容差放宽至 $\pm 6^\circ$ ,显著降低了工艺难度。

### 3 结束语

本文提出了一种基于相位匹配和空间几何关系的光栅耦合器设计方法,通过将透镜整形功能集成到光栅结构中,实现了对特定发散角光源的高效耦合。该方法设计了3种散射范围( $19^\circ/27^\circ/35^\circ$ )的光栅耦合器,其上辐射效率分别达到59%、66%、69%。针对850 nm VCSEL光源( $27^\circ$ 发散角)的测试表明,单刻蚀结构在无金属反射镜条件下实现了63%(-2.01 dB)的模拟耦合效率,且在 $\pm 12^\circ$ 入射角偏移时耦合效率最大波动仅9%(0.69 dB),降低至54%(-2.70 dB),展现出优异的工艺容差性。该设计方法具有普适性,可适配不同发散角光源和各类光子集成平台,其光束调控特性在增强现实/虚拟现实(AR/VR)光波导系统中具有降低光损耗、提升显示质量的潜在应用价值。

### 参考文献:

- [1] PITA RUIZ J L, ROCHA L G, YANG J, et al. Efficient integrated tri-modal coupler for few-mode fibers[J]. Optics Express, 2022, 30(2): 2539–2546.
- [2] HANSEN S E, ARREGUI G, BABAR A N, et al. Efficient low-reflection fully etched vertical free-space grating couplers for suspended silicon photonics[J]. Optics Express, 2023, 31(11): 17424–17436.
- [3] KOR?EK R, CHEBEN P, FRASER W, et al. Low-loss grating coupler based on inter-layer mode interference in a hybrid silicon nitride platform[J]. Optics Letters, 2023, 48(15): 4017–4020.
- [4] SYRIOPOULOS G, POULOPOULOS I, ZERVOS C, et al. Photonic integrated circuit based temperature sensor for out-of-autoclave composite parts production monitoring[J]. Sensors, 2023, 23(18): 7765–7780.
- [5] ROSTAMIAN A, MADADI-KANDJANI E, DALIR H, et al. Towards lab-on-chip ultrasensitive ethanol detection using photonic crystal waveguide operating in the mid-infrared[J]. Nanophotonics, 2021, 10(6): 1675–1682.
- [6] ZHENG S, CAI H, XU L, et al. Silicon substrate-integrated hollow wave-guide for miniaturized optical gas sensing[J]. Photonics Research, 2021, 10(1): 261–268.
- [7] MADSEN L S, LAUDENBACH F, ASKARANI M F, et al. Quantum computational advantage with a programmable photonic processor[J]. Nature, 2022, 606(7912): 75–81.
- [8] QIANG X, WANG Y, XUE S, et al. Implementing graph-theoretic quantum algorithms on a silicon photonic quantum walk processor[J]. Science Advances, 2021, 7(9): 8375–8384.
- [9] BAO J, FU Z, PRAMANIK T, et al. Very-large-scale integrated quantum graph photonics[J]. Nature Photonics, 2023, 17(7): 573–581.
- [10] SHAFIEE A, PASRICHA S, NIKDAST M. A survey on optical phase-change memory: the promise and challenges[J]. IEEE Access, 2023, 11: 11781–11803.
- [11] ZHANG G, CHEN Y, ZHENG Z, et al. Thin film ferroelectric photonic-electronic memory[J]. Light: Science & Applications, 2024, 13(1): 206–218.
- [12] TOSSOUN B, LIANG D, CHEUNG S, et al. High-speed and energy-efficient non-volatile silicon photonic memory based on heterogeneously integrated memresonator[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 551–559.
- [13] MU X, WU S, CHENG L, et al. Edge couplers in silicon photonic integrated circuits: a review[J]. Applied Sciences, 2020, 10(4): 1538–1567.
- [14] GUO R, ZHANG S, GAO H, et al. Blazed subwavelength grating coupler[J]. Photonics Research, 2023, 11(2): 189–195.
- [15] MARCHETTI R, LACAVA C, KHOKHAR A, et al. High-efficiency grating-couplers: demonstration of a new design strategy[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 16670–16678.
- [16] HOPPE N, ZAOUI W S, RATHGEBER L, et al. Ultra-efficient silicon-on-insulator grating couplers with backside metal mirrors[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020, 26(2): 1–6.
- [17] WANG H, ZUO Y, YIN X, et al. Ultralow-loss optical interconnect enabled by topological unidirectional guided resonance[J]. Science Advances, 2024, 10(12): 4372–4380.
- [18] 冯瑶,耿敏明,何万才,等. 基于 SOI 的类梅花型二维光栅耦合器[J]. 光通信技术, 2023, 47(4): 1–7.
- [19] 梁宇鑫,李智慧,范诗佳,等. 氮化硅低损耗光栅耦合器的设计与制备[J]. 光通信技术, 2022, 46(4): 68–72.
- [20] KANG S, ZHANG R, HAO Z, et al. High-efficiency chirped grating couplers on lithium niobate on insulator[J]. Optics Letters, 2020, 45(24): 6651–6654.
- [21] 倪屹,林禹,徐银,等. 基于铌酸锂薄膜的高耦合效率、大带宽光栅耦合器[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(11): 1116010–1116016.
- [22] YANG F, FANG H, HAN H, et al. Wide bandwidth silicon nitride strip-loaded grating coupler on lithium niobate thin film[J]. Crystals, 2022, 12(1): 70–79.
- [23] MAK J C C, SACHER W D, YING H, et al. Multi-layer silicon nitride-on-silicon polarization-independent grating couplers[J]. Optics Express, 2018, 26(23): 30623–30633.
- [24] 李坚平,邓冶,王烈,等. 基于改进 PSO 算法设计的 TFLN 平台偏振不敏感光栅耦合器[J]. 光通信技术, 2024, 48(4): 9–14.
- [25] JAHED M, CAUT A, GOYVAERTS J, et al. Angled flip-chip integration of VCSELs on silicon photonic integrated circuits[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(15): 5190–5200.
- [26] RUAN Z, ZHU Y, CHEN P, et al. Efficient Hybrid integration of long-wavelength VCSELs on silicon photonic circuits[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(18): 5100–5106.
- [27] LU H, LEE J S, ZHAO Y, et al. Flip-chip integration of tilted VCSELs onto a silicon photonic integrated circuit[J]. Optics Express, 2016, 24(15): 16258–16266.
- [28] KAUR K S, SUBRAMANIAN A Z, CARDILE P, et al. Flip-chip assembly of VCSELs to silicon grating couplers via laser fabricated SU8 prisms[J]. Optics Express, 2015, 23(22): 28264–28270.
- [29] ZHAO Z, FAN S. Design principles of apodized grating couplers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(16): 4435–4446.