光子和光电子集成专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022030701

X-切薄膜铌酸锂高效率光栅耦合器的设计

罗砚浓[1]，蔡鑫伦[2*]

（1. 广西医科大学 生命科学研究院 生物医学光子学研究中心，南宁 530021；
2. 中山大学 电子与信息工程学院 光电材料与技术国家重点实验室，广州 510006）

摘　要： 基于*X*-切绝缘体上薄膜铌酸锂平台，提出并设计了一种高耦合效率的切趾一维光栅耦合器。采用非晶硅覆盖层材料，结合亚波长光子晶体等效方案和遗传算法增强光栅耦合效率。在中心波长1 550 nm处，光栅的峰值耦合效率为－1.08 dB，通过引入底部金属反射镜可进一步提高至－0.53 dB，其1 dB带宽约为61 nm。

关键词： 铌酸锂；光栅耦合器；非晶硅；高耦合效率

中图分类号： O436　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0280－06

Design of High Efficiency Grating Coupler on *X*-Cut Thin-Film Lithium Niobate

LUO Yannong[1], CAI Xinlun[2]

(1. Laboratory of Biomedical Photonics & Engin., Life Science Institute, Guangxi Medical University, Nanning 530021, CHN; 2. State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, CHN)

Abstract: Proposed and designed is a high coupling efficiency apodized one-dimensional grating coupler based on *X*-cut lithium niobate insulator platform. The overlay amorphous silicon is employed to enhance the coupling efficiency by combing subwavelength photonic crystal design and genetic algorithm. The optimized grating coupler exhibits a peak coupling efficiency of －1.08 dB, which can be further improved up to －0.53 dB by introducing a bottom metal mirror, with a 1 dB bandwidth of 61 nm at central wavelength of 1 550 nm.

Key words: lithium niobate; grating coupler; amorphous silicon; high coupling efficiency

0　引言

铌酸锂($LiNbO_3$，LN)具有优良的电光、声光、压电和非线性特性。随着铌酸锂中的刻蚀工艺、直接键合技术以及离子切割技术的快速发展，绝缘体上薄膜铌酸锂(Lithium Niobate On Insulator，LNOI)已经在光通信、微波光子学、传感器和量子光学等领域展现出广阔的应用前景[1-2]。基于此平台，各类单元部件和功能性器件已被验证，包括低损耗波导[3]、高品质因子(Q)微环谐振腔[4]、高速电光调制器[5-6]和光频梳[7]等。然而，高效的光纤-芯片耦合仍然是LNOI平台所面临的主要挑战之一和长期性问题。通常采用两种主要的解决方案，即端面水平耦合[8-10]和片上垂直耦合。与水平耦合相比，基于光栅耦合器的垂直耦合方式具有晶圆尺度测试的灵活性，无需解理和对准容差大等技术性优势，并已在硅-绝缘体(Silicon-On-Insulator，SOI)平台[11]得到了充分论证和广泛应用。

目前，基于LNOI平台的光栅耦合器已有诸多报道，研究侧重于提高光栅耦合效率[12-20]和实现偏振复用功能[21-22]等。借鉴SOI平台的成熟经验，众多器件设计方案和工艺制备流程已被成功移植到

收稿日期：2022－03－07.

基金项目：国家自然科学基金项目(11906041，11690031，11761131001)；国家重点研发项目(2019YFB1803900，2019YFA0705000)；广东省珠江人才计划项目(2017BT01X121)；广东省重点研发项目(2019B121204003，2018B030329001).

* **通信作者：**蔡鑫伦　**E-mail：**caixlun@mail.sysu.edu.cn

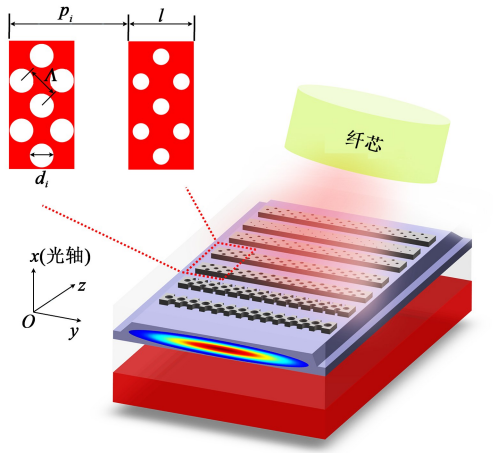
LNOI 平台。然而在实验中，大多数报道的耦合效率仍低于－3 dB。其主要原因在于铌酸锂与环境材料 SiO_2 的折射率对比度相对较小（～0.7），且刻蚀形成的非垂直侧壁角度（60°～65°）导致光栅强度相对较弱，因此在 LNOI 平台实现高耦合效率的光栅耦合器有一定挑战性。最近，研究者在 Z-切 LNOI 平台上证实了一种高效率的一维光栅耦合器，实验测得其峰值耦合效率为 72.0%[19]。该方案通过粒子群算法优化光栅的非周期性结构，并在光栅底部引入金属反射镜结构来进一步提高耦合效率。

在理论层面，光栅耦合器的耦合效率由两个因素决定，即模式重叠积分和定向辐射性。模式重叠积分反映了光纤模式与光栅辐射模之间的模式匹配程度，采用亚波长光子晶体结构[23-24]、逆向设计法[25]等多种优化设计手段可有效提高模式匹配度。定向辐射性则反映了光栅单方向的面外辐射能力，为了增强光栅定向性，可在光栅的底部或顶部沉积反射式光栅[26]，引入金属反射镜[27-29]，或采用双层光栅设计方案[30]等。为了打破垂直对称辐射，也可直接在光栅顶部沉积特殊的覆盖层材料，如非晶硅[31]、氮化硅[32]或金属薄层[18]等。

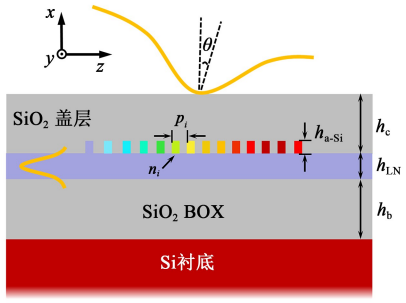
本文利用时域有限差分法（Finite-Difference Time-Domain，FDTD），基于 X-切 LNOI 平台设计了一种高耦合效率的切趾一维光栅耦合器。通过非晶硅覆盖层材料，采用光子晶体等效折射率裁剪方案并结合遗传算法，实现了光栅强度的精确调制。优化所得光栅耦合器在没有金反射镜的条件下，耦合效率为－1.08 dB。通过引入底部金反射镜，耦合效率可进一步提高到－0.53 dB，其 1 dB 带宽约为 61 nm。该设计方案具有一定通用性，适用于折射率对比度较小或有一定加工复杂性的材料平台。

1　光栅耦合器的结构

图 1(a)所示为高效率铌酸锂光栅耦合器的三维结构示意图，可在 X-切铌酸锂薄膜上加工制备，其光轴垂直于光栅表面，y 指向最强电光系数方向（γ_{33}＝31 pm/V）。在 LN 薄膜顶部覆盖非晶硅材料层，采用亚波长三角晶格光子晶体结构调制覆盖层的等效折射率和光栅强度。光栅的纵向周期为 p_i，对于每个散射单元，非晶硅宽度 w 和三角晶格周期 Λ 均为固定值，分别取为 345 和 230 nm，通过调控光子晶体圆孔的直径 d_i，对应产生等效折射率 n_i。图 1（b）所示为器件的横截面示意图，直径为 10.4 μm 的高斯光斑以入射角 θ＝15°入射到光栅表面。铌酸锂薄膜厚度 h_{LN}、非晶硅覆盖层厚度 $h_{a\text{-}Si}$ 和埋氧层厚度 h_b 分别为 600 nm，263 nm 和 2.5 μm。



（a）　高效率光栅耦合器的三维结构示意图



（b）　横截面示意图

图 1　高效率光栅耦合器的三维结构示意图与横截面示意图

2　光栅耦合器的设计

首先利用二维 FDTD 模型计算并构建切趾光栅每个散射单元的等效折射率 n_i 和周期 p_i，为排除光栅衍射场与硅衬底反射场之间的干涉效应，模型暂不考虑包层厚度。为了确保在目标衍射角条件下得到呈高斯分布的辐射场 $G(z)$，光栅辐射强度需满足如下关系[33]：

$$2\alpha(z)=\frac{G^2(z)}{\left[1-\int_0^z G^2(z)\mathrm{d}z\right]} \tag{1}$$

且同时满足如下相位匹配条件：

$$\lambda=p_i(n_{\mathrm{eff},i}-n_{\mathrm{up}}\sin\theta) \tag{2}$$

式中，$n_{\mathrm{eff},i}$ 为第 i 个散射单元的等效折射率，n_{up} 为包层材料 SiO_2 的折射率。图 2 展示了满足相位匹配条件下，散射单元一系列可能的参数组合（n_i，

p_i)，以及对应的光栅强度 $2\alpha_i$。结合光栅强度的分布规律 $2\alpha(z)$，对各散射单元的 p_i 和 n_i 进行联合优化，得到光栅耦合效率为－2.18 dB，模式重叠积分为 90.4%。

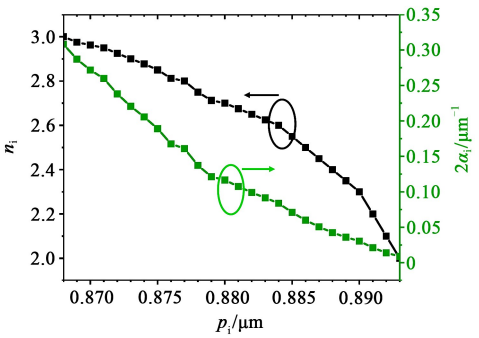


图 2 满足相位匹配条件下，散射单元的结构参数组合(n_i 和 p_i)及对应的光栅强度

采用遗传算法，以第一步得到的参数组合(p_i 和 n_i)作为初始值，对其进行微调，进一步提高光栅耦合效率。优化只针对目标波长 1 550 nm，p_i 和 n_i 的连续可调步长取为1 nm和0.01，n_i的阈值范围设为 1.78 和 3.38，对应圆孔直径为 22 和 220 nm。对于每一代，当耦合效率提高时，结构参数(p_i 和 n_i)记为当代的最优参数组合且被保留，否则保持原值。如图 3(a)所示，经过 36 代，耦合效率逐渐收敛至－1.46 dB，效率提高约 0.7 dB。图 3(b)所示为最终优化所得的切趾光栅耦合器的周期和等效折射率分布。可以发现，散射单元的等效折射率从 1.78 递增到 3.38，且在光栅末端略有下降。散射单元周期 p_i 总体上呈减小趋势，但规律不明显。光栅衍射场与硅衬底反射场之间存在干涉效应，因而埋氧层厚度会对耦合效率产生显著影响。如图 3(c)所示，耦合效率与埋氧层厚度存在周期性规律，当 h_b 为 1.91，2.46 和 3 μm 时，耦合效率达到极大值－0.6 dB。对于埋氧层厚度为 2.5 μm 的铌酸锂晶圆结构，耦合效率约为－0.64 dB。如图 3(d)所示为波长为 1 550 nm 处光栅耦合器的衍射场分布，模式重叠积分 99.1%，h_b＝2.5 μm，h_c＝1.36 μm。观察到高斯光束以 15°角朝光栅上方辐射，且能量辐射主要发生在光栅的中间位置。

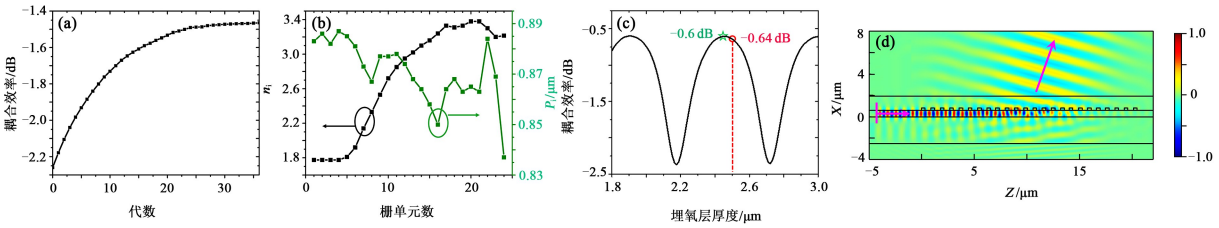


图 3 光栅耦合器结构优化结果(a) 耦合效率迭代曲线；(b) 切趾光栅的等效折射率和周期分布；(c) 光栅耦合效率与埋氧层厚度的关系(无金属反射层)；(d) 切趾光栅的辐射场分布 E_y

最后一步是设计光栅散射单元的圆孔直径。如图 4(a)所示为三角晶格光子晶体的等频线图，考虑圆孔周期 Λ＝230 nm，圆孔直径 d＝101 nm。可见，当归一化频率小于 0.148(Λ/λ)时，等频线的轮廓近似为一个圆形，即可等效为均匀介质材料，因此通过调控圆孔直径可实现对材料等效折射率的裁剪。如图 4(b)所示为设计所得光栅散射单元的圆孔直径分布。利用优化所得 p_i，n_i 和 d_i，采用 3D-FDTD 方法进一步验证切趾光栅耦合器的工作性能，并且考虑非晶硅的材料色散和光学损耗。如图 4(c)所示，在波长 1 550 nm 处光栅的峰值耦合效率为－1.08 dB，通过引入底部金反射镜，耦合效率可提高至－0.53 dB，其 1 dB 带宽约为 61 nm，h_b＝2.5 μm。需要指出，与二维仿真结果相比，光栅的峰值耦合效率约下降 0.4 dB，这是由于不完美的折射率等效所导致的，特别是在光栅前端部分，孔径较

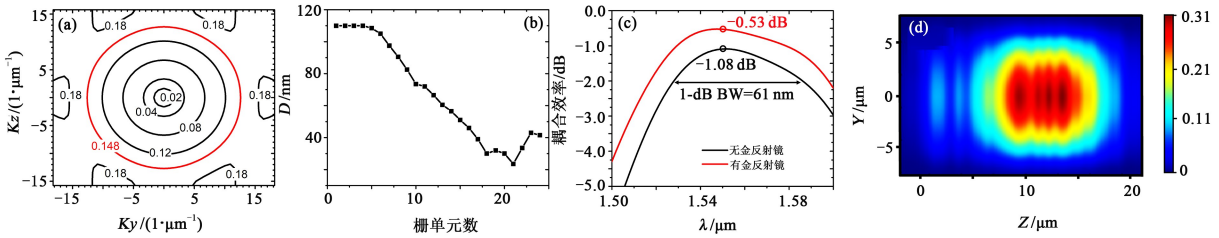


图 4 散射单元圆孔直径设计(a) 三角晶格光子晶体第一能带的等频线图；(b) 切趾光栅散射单元的圆孔直径分布；(c) 3D-FDTD 计算所得的光栅耦合谱线；(d) 切趾光栅的近场强度场分布

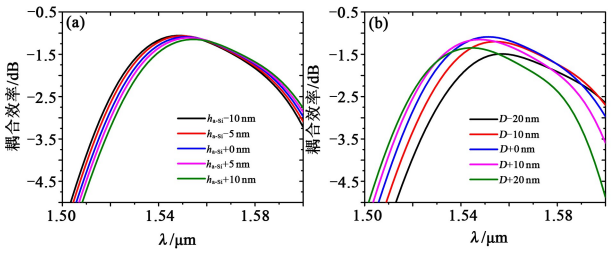


图 5　光栅耦合器工艺容差分析。(a) 非晶硅厚度 $h_{a\text{-}Si}$ 对耦合谱线的影响；(b) 圆孔直径 D 对耦合谱线的影响

大引起散射单元部分残缺，导致折射率裁剪功能部分失效。图 4(d)所示为波长 1 550 nm 处光栅的近场辐射强度图，可见，它的轮廓分布与高斯光斑相似，计算所得模式重叠积分为 95.4%。

进一步探究器件的工艺制作容差，重点考察非晶硅厚度和圆孔直径对光栅耦合器性能的影响。如图 5(a)所示，非晶硅厚度对耦合光谱的影响较小，在波长 1 550 nm 处的耦合效率波动约为 0.1 dB。如图 5(b)所示，孔径尺寸对光谱的影响较大，发现 ±20 nm 圆孔直径变化可导致约∓5 nm 的峰值波长漂移和约 0.4 dB 的峰值耦合效率改变，因此光栅耦合器的性能对圆孔尺寸较敏感。

LNOI 平台一维光栅耦合器的性能比较如表 1 所示，可以看出，在不含金属反射镜的条件下，本设计可显著提高光栅的峰值耦合效率，这是由于非晶硅覆盖层不仅有较好的强度调制效果，也在一定程度上增强了光栅的定向辐射能力。在引入金属反射镜的条件下，本设计的峰值耦合效率与文献[19]结果相当。

表 1　LNOI 平台一维光栅耦合器的性能比较

器件结构	峰值耦合效率/dB		
	模拟值	实验值	参考文献
500 nm，切趾光栅，浅刻蚀 LN	−1.8	−3.6	[20]
500 nm，切趾光栅，浅刻蚀 LN*	−0.51*	−1.43*	[19]
400 nm，均匀光栅，覆盖氮化硅	−4.57	−5.82	[16]
600 nm，均匀光栅，覆盖非晶硅	−2.7	−3.06	[31]
400 nm，均匀光栅，覆盖金薄膜	−2.98	−3.58	[18]
600 nm，切趾光栅，覆盖非晶硅	−1.08 −0.53*	NA	本文

* 表示光栅底部引入金属反射镜

3　结论

综上所述，我们在 X 切 LNOI 平台上利用非晶硅覆盖层材料，结合亚波长光子晶体等效方案和遗传算法，提出并设计了一种高耦合效率的一维光栅耦合器。优化所得器件在没有金反射镜的情况下，耦合效率为−1.08 dB。通过引入底部金反射镜，耦合效率可进一步提高到−0.53 dB，其 1 dB 带宽约为 61 nm。该工作有利于 LNOI 集成器件的基础研究和实际应用，设计方案适用于折射率对比度较小或有一定加工复杂性的材料平台。

参考文献：

[1] Boes A, Corcoran B, Chang L, et al. Status and potential of lithium niobate on insulator (LNOI) for photonic integrated circuits[J]. Laser Photonics Rev., 2018, 12(4): 1700256.

[2] Lin J, Bo F, Cheng Y, et al. Advances in on-chip photonic devices based on lithium niobate on insulator[J]. Photonics Res., 2020, 8(12): 1910-1936.

[3] Cai L, Mahmoud A, Piazza G. Low-loss waveguides on Y-cut thin film lithium niobate: towards acousto-optic applications [J]. Opt. Express, 2019, 27(7): 9794-9802.

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

[5] Xu M, He M, Zhang H, et al. High-performance coherent optical modulators based on thin-film lithium niobate platform [J]. Nat. Commun., 2020, 11(1): 1-7.

[6] He M, Xu M, Ren Y, et al. High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gbit · s^{-1} and beyond[J]. Nat. Photonics, 2019, 13(5): 359-364.

[7] Zhang M, Buscaino B, Wang C, et al. Broadband electro-optic frequency comb generation in a lithium niobate microring resonator[J]. Nature, 2019, 568(7752): 373-377.

[8] He L, Zhang M, Shams-Ansari A, et al. Low-loss fiber-to-chip interface for lithium niobate photonic integrated circuits [J]. Opt. Lett., 2019, 44(9): 2314-2317.

[9] Krasnokutska I, Tambasco J-L J, Peruzzo A, et al. Nanostructuring of LNOI for efficient edge coupling[J]. Opt. Express, 2019, 27(12): 16578-16585.

[10] Yao N, Zhou J, Gao R, et al. Efficient light coupling between an ultra-low loss lithium niobate waveguide and an adiabatically tapered single mode optical fiber[J]. Opt. Express, 2020, 28(8): 12416-12423.

[11] Marchetti R, Lacava C, Carroll L, et al. Coupling strategies for silicon photonics integrated chips[J]. Photonics Res., 2019, 7(2): 201-239.

[12] Chen Z, Wang Y, Jiang Y, et al. Grating coupler on single-crystal lithium niobate thin film[J]. Opt. Mater., 2017, 72: 136-139.

[13] Kar A, Bahadori M, Gong S, et al. Realization of alignment-tolerant grating couplers for z-cut thin-film lithium niobate [J]. Opt. Express, 2019, 27(11): 15856-15867.

[14] Kores C C, Fokine M, Laurell F, et al. UV-written grating couplers on thin-film lithium niobate ridge waveguides[J]. Opt. Express, 2020, 28(19): 27839-27849.

[15] Krasnokutska I, Chapman R J, Tambasco J-L J, et al. High

coupling efficiency grating couplers on lithium niobate on insulator[J]. Opt. Express, 2019, 27(13): 17681-17685.

[16] Liu Y, Huang X, Li Z, et al. Efficient grating couplers on a thin film lithium niobate-silicon rich nitride hybrid platform [J]. Opt. Lett., 2020, 45(24): 6847-6850.

[17] Nisar M S, Zhao X, Pan A, et al. Grating coupler for an on-chip lithium niobate ridge waveguide[J]. IEEE Photon. J., 2016, 9(1): 1-8.

[18] Ruan Z, Hu J, Xue Y, et al. Metal based grating coupler on a thin-film lithium niobate waveguide[J]. Opt. Express, 2020, 28(24): 35615-35621.

[19] Shuting K, Zhang R, Hao Z, et al. High-efficiency chirped grating couplers on lithium niobate on insulator[J]. Opt. Lett., 2020, 45(24): 6651-6654.

[20] Cai L, Piazza G. Low-loss chirped grating for vertical light coupling in lithium niobate on insulator[J]. J. Opt., 2019, 21(6): 065801.

[21] Ma X, Zhuang C, Zeng R, et al. Polarization-independent one-dimensional grating coupler design on hybrid silicon/LNOI platform[J]. Opt. Express, 2020, 28(11): 17113-17121.

[22] Chen B, Ruan Z, Hu J, et al. Two-dimensional grating coupler on an X-cut lithium niobate thin-film[J]. Opt. Express, 2021, 29(2): 1289-1295.

[23] Liu L, Pu M, Yvind K, et al. High-efficiency, large-bandwidth silicon-on-insulator grating coupler based on a fully-etched photonic crystal structure[J]. Appl. Phys. Lett., 2010, 96(5): 051126.

[24] Benedikovic D, Cheben P, Schmid J H, et al. Subwavelength index engineered surface grating coupler with sub-decibel efficiency for 220 nm silicon-on-insulator waveguides[J]. Opt. Express, 2015, 23(17): 22628-22635.

[25] Michaels A, Yablonovitch E. Inverse design of near unity efficiency perfectly vertical grating couplers[J]. Opt. Express, 2018, 26(4): 4766-4779.

[26] Vermeulen D, Selvaraja S, Verheyen P, et al. High-efficiency fiber-to-chip grating couplers realized using an advanced CMOS-compatible silicon-on-insulator platform[J]. Opt. Express, 2010, 18(17): 18278-18283.

[27] Zaoui W S, Rosa M F, Vogel W, et al. Cost-effective CMOS-compatible grating couplers with backside metal mirror and 69% coupling efficiency[J]. Opt. Express, 2012, 20(26): B238-B243.

[28] Ding Y, Peucheret C, Ou H, et al. Fully etched apodized grating coupler on the SOI platform with −0.58 dB coupling efficiency[J]. Opt. Lett., 2014, 39(18): 5348-5350.

[29] Zhang H, Li C, Tu X, et al. Efficient silicon nitride grating coupler with distributed Bragg reflectors[J]. Opt. Express, 2014, 22(18): 21800-21805.

[30] Chen X, Thomson D J, Crudginton L, et al. Dual-etch apodised grating couplers for efficient fibre-chip coupling near 1 310 nm wavelength[J]. Opt. Express, 2017, 25(15): 17864-17871.

[31] Jian J, Xu P, Chen H, et al. High-efficiency hybrid amorphous silicon grating couplers for sub-micron-sized lithium niobate waveguides[J]. Opt. Express, 2018, 26(23): 29651-29658.

[32] Chen H Y, Yang K C. Design of a high-efficiency grating coupler based on a silicon nitride overlay for silicon-on-insulator waveguides[J]. Appl. Opt., 2010, 49(33): 6455-6462.

[33] Ding Y, Ou H, Peucheret C. Ultrahigh-efficiency apodized grating coupler using fully etched photonic crystals[J]. Opt. Lett., 2013, 38(15): 2732-2734.

作者简介：

罗砚浓(1987—)，男，博士，助理研究员，主要研究方向为集成光电子器件及其在光通信和生物传感领域的应用；

蔡鑫伦(1982—)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事Ⅲ-Ⅴ族和硅基光子集成器件的研究。