

引用格式: HAN Yishuai, SUN Tianyu, JIA Huimin, et al. Critical Coupling Condition and Preparation Technology of Aluminum Nitride Microring Resonator[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5):0514003

韩毅帅, 孙天玉, 贾慧民, 等. 氮化铝微环谐振腔临界耦合条件及制备工艺研究[J]. 光子学报, 2021, 50(5):0514003

氮化铝微环谐振腔临界耦合条件及制备工艺研究

韩毅帅^{1,2}, 孙天玉², 贾慧民¹, 唐吉龙¹, 房丹¹, 王登魁¹, 王晓华¹, 张宝顺²,
魏志鹏¹

(1 长春理工大学 理学院 高功率半导体激光国家重点实验室, 长春 130022)

(2 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215123)

摘要: 针对氮化铝微环谐振腔实现临界耦合条件困难的问题, 设计并制备了氮化铝弯曲耦合微环谐振腔。分析了微环谐振腔耦合系数公式, 分别阐述了多种提高耦合强度方案的优势和劣势, 最终选用弯曲耦合结构来增强耦合强度, 得到了在宽耦合间隙下, 实现临界耦合条件的解决方案。在蓝宝石衬底上生长了高质量的氮化铝单晶薄膜, 选用导电胶克服材料的不导电性, 并利用电子束曝光系统将弯曲角度为 40°、耦合间隙 0.19 μm、波导宽度 0.41 μm 的微环谐振腔图形化, 分析优化多项氮化铝刻蚀参数, 最终将图形转移至氮化铝层, 得到了耦合间隙均匀、侧壁平整的弯曲耦合氮化铝微环谐振腔。该研究为氮化铝微环谐振腔实现临界耦合条件提供了选择参考。

关键词: 氮化铝; 微环谐振腔; 临界耦合; 弯曲耦合; 电子束曝光

中图分类号: TN256; TN252

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215005.0514003

Critical Coupling Condition and Preparation Technology of Aluminum Nitride Microring Resonator

HAN Yishuai^{1,2}, SUN Tianyu², JIA Huimin¹, TANG Jilong¹, FANG Dan¹, WANG Dengkui¹,
WANG Xiaohua¹, ZHANG Baoshun², WEI Zhipeng¹

(1 State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Suzhou Institute of Nano-tech and Nano-bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215123, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of achieving critical coupling conditions for aluminum nitride microring resonators, an aluminum nitride bending-coupled microring resonator is designed and prepared. Through the analysis of the coupling coefficient formula of the microring resonator, the advantages and disadvantages of various solutions to improve the coupling strength are respectively explained. Finally, a curved coupling zone structure is selected to enhance the coupling strength, and a solution to achieve critical coupling conditions under a wide coupling gap is obtained. A high-quality aluminum nitride single crystal film is grown on a sapphire substrate. Conductive glue is used to overcome the non-conductivity of the material. The electron beam exposure system is used to make the bending angle of 40°, the coupling gap of 0.190 μm, and the waveguide width of 0.41 μm. The microring resonant cavity is patterned, a

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No.61674021)

第一作者: 韩毅帅(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电子器件及工艺研究。Email: 470543729@qq.com

导师(通讯作者): 王晓华(1967—), 女, 研究员, 博士, 主要研究方向为半导体器件物理与半导体激光技术研究。Email: biewang2001@126.com

收稿日期: 2020-11-23; 录用日期: 2021-01-05

<http://www.photon.ac.cn>

number of aluminum nitride etching parameters are analyzed and optimized, and the pattern is finally transferred to the aluminum nitride layer to obtain a curved coupled aluminum nitride microring resonant cavity with uniform coupling gap and flat sidewalls. This research provides a reference for the selection of critical coupling conditions for aluminum nitride microring resonators.

Key words: Aluminum nitride; Microring cavity; Critical coupling; Bending coupling; Electron beam exposure

OCIS Codes: 140.3945; 130.3130; 070.5753; 220.4241

0 引言

氮化铝(AIN)是一种重要的III-V族化合物薄膜材料,具有稳定的纤锌矿结构,相比于其它材料,AIN具备已知半导体最大带隙宽度(6.2 eV),与常见衬底材料兼容性好,同时AIN在室温下具有较高的折射率($n=2.1$),对200 nm波段以上的光表现为光学透明,对400 nm以上波段的光无双光子吸收效应,兼具二阶、三阶非线性光学特性,是一种很好的光学材料。以AIN晶体制备光波导时,具有光损耗低、波导色散小等优点,其传输波段从紫外延伸至红外(0.2~13.6 μm),较大的二阶非线性系数($\sim 4.7 \text{ pm/V}$)使光波导器件波长变换更加容易,以氧化硅($n=1.46$)为覆盖层时,小的折射率差使波导色散更易于调控,对于非线性光学应用如:波长变换、光参量放大、光频梳的产生等具有重要意义,因此AIN已经成为集成光子学的一种新颖的多功能平台^[1]。光学微环谐振腔是一种将光束束缚于微小环形空间的光子学器件,特定波长的光束在耦合区以消逝波的形式耦合进入微环,耦合光沿微环传输一周后其光程恰好等于波长整数倍,相位相差 2π 的整数倍,并与后续耦合光发生谐振,形成稳定的光场分布,具有光子寿命长、模式体积小等特点。超高Q值微环谐振腔可束缚光子在微环中循环传输,使微环谐振腔中的光子拥有更长的寿命,显著增强了光与谐振腔材料之间的相互作用,其有效腔长不再由谐振腔自身物理长度决定,而是由微环谐振腔的本征品质因子决定,使得高品质微环谐振腔具备极高的集成度。可以看出,微环谐振腔中的光模式场具有很高的能量密度与量子化场分布,这使得材料的非线性效应更容易被激发,同时AIN本身具有较高的二阶、三阶非线性系数,使AIN微环谐振腔在非线性光学、集成光学、半导体外腔激光器等领域具有广阔的应用前景^[2-4]。

随着AIN微环谐振腔被广泛关注,AIN微环的制备精度显著提高,微环的本质品质因子(Q值)不断提高。例如在通信波段处:2012年Yale大学的XIONG Chi等^[5]在氧化硅缓冲层上制备了半径为80 μm 的AIN微环,采用多种耦合间隙设计,得到接近临界耦合的洛伦兹峰值,其本征Q值为 6×10^5 。2013年美国Yale大学的JUNG H等^[6]通过优化波导宽度得到了接近零色散波导,在波导宽度分别为2.5、3.5 μm ,微环半径为60 μm 时得到接近临界耦合,其本征Q值分别为 8×10^5 、 6×10^5 。2014年美国Yale大学的JUNG H等^[7]利用1 000°高温退火30小时,在氧化硅缓冲层上得到了高质量的AIN薄膜,标准CMOS工艺制备了四级联微环谐振腔,本征Q值可以达到 5×10^5 。2016年清华大学LIU Xianwen等^[8]利用金属有机化合物气相沉积(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)在蓝宝石衬底上制备了高品质的AIN薄膜,采用浅刻蚀的方法,增加耦合区光场重叠程度,在700 nm耦合间隙下,得到微环谐振腔本征Q值分别为 3.2×10^6 、 1.2×10^6 。2018年Yale大学的SURYA J B等^[10]利用AIN/Si₃N₄薄层相结合的方法,减少晶格失配度的同时,通过退火降低材料的散射与吸收损耗,制备的微环谐振腔本征Q值达到了 4×10^5 。而在近红光波段(630~730 nm)处,美国Yale大学的XIONG Chi等^[5]以及美国Massachusetts大学的LU T J等^[9]分别在氧化硅缓冲层、蓝宝石衬底上制备了氮化铝微环谐振腔,其本征Q值分别为 1.2×10^4 、 1.7×10^5 。在蓝光波段处(430~470 nm),2018年美国Yale大学的LIU Xianwen等^[11]通过单晶AIN并联双微环谐振腔本征Q值可以达到 3.98×10^5 。同时,还在相同的微环谐振腔下测量了其在紫外波段(365~410 nm)的本征Q值为 2.1×10^5 ,2018年美国Massachusetts大学的LU T J等^[9]在蓝宝石上生长AIN薄膜,利用电子束光刻制备了单通微环谐振腔,测量微环谐振腔的本征Q因子处超过 2.4×10^4 。

可以看到,对AIN微环谐振腔的研究主要集中在提高本征Q值,而对于降低耦合Q值的研究报道较少,在实际的应用中,降低耦合Q值,使微环谐振腔达到临界耦合状态(耦合Q值与本征Q值相等),对微环谐振腔在非线性应用以及半导体外腔激光器应用具有重要意义。本文采用波导环绕微环的弯曲波导作为AIN微环谐振腔的耦合区域,满足相位匹配的条件下,直接增加光场相互作用长度,可有效降低耦合Q值的

大小,有利于在宽耦合间隙下实现临界耦合,这样的微环谐振腔结构具有结构简单、不引进额外光损耗等优点。

1 微环谐振腔临界耦合理论

1.1 微环谐振腔透射图谱研究

利用传输矩阵法对微环谐振腔的传输图谱进行分析,假设微环光传输分别经过两个区域:微环耦合区与微环传输区,得到微环输出端的光强度与各参数之间的关系^[12-15]为

$$I_{\text{out}} = |b_1|^2 = \left| \frac{t - t \cdot \alpha \cdot \exp(2 \cdot j\theta)}{1 - \alpha \cdot t^2 \exp(2 \cdot j\theta)} \right|^2 \quad (1)$$

式中, t 表示输出端振幅透射系数,用来表征耦合区透射振幅在输入端总振幅的占比, α 表示微环传输一周的损耗因子, θ 表示光绕微环传输一周的相位变化,其中透射系数 t 与耦合系数 κ 之间的关系为 $|t|^2 + |\kappa|^2 = 1$,耦合系数 κ 用来表征耦合光振幅在输入端总振幅的占比,为了表征微环耦合的三种状态,分别计算了损耗因子与耦合系数大小不同的三种情况,得到了微环透射端的频谱如图1所示。

可以看到其线型均为洛伦兹线型,根据微环谐振腔损耗因子 α 与振幅耦合系数 κ 的大小关系,三种耦合状态分别为:欠耦合、临界耦合、过耦合,分别表示耦合进入微环的能量与微环自身损耗的三种关系,临界耦合是一种特殊的情况,产生原因是耦合进入微环的光恰好等于微环自身的损耗,其透过率为零。在临界耦合状态下,微环反馈光的线宽最小,腔内的光强度将得到最大程度谐振增强,其光强远高于输入光强,因此利用环形谐振腔实现非线性效应激发变得更加容易,同时实现临界耦合,对于微环谐振腔作为激光器的外腔反馈结构也具有重要意义^[16-17]。

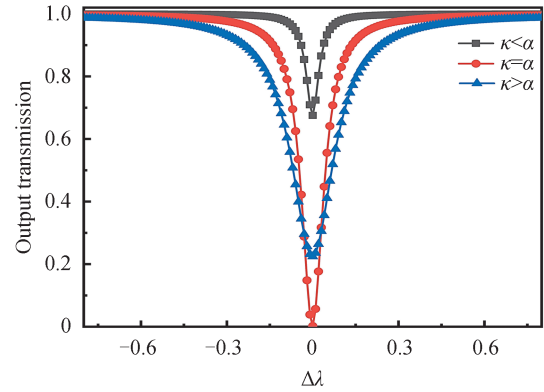


图1 微环谐振腔输出特性
Fig. 1 Microring characteristics map

1.2 微环谐振腔耦合强度研究

高Q值微环谐振腔具有极低的光损耗,常见的直波导耦合微环谐振腔中,损耗因子与耦合系数的大小存在一定的差异,为了实现临界耦合,使耦合系数与损耗因子相等,需要进一步提高耦合系数。根据耦合模式理论及其一阶近似得出了振幅耦合系数 κ 的表达式^[18],并将其简化为

$$\kappa = \frac{j\omega_0 \int dz dA \Delta(n^2) e_r^* e_w e^{j(m\phi - \beta z)}}{2 \sqrt{n_r^2 n_w^2} \sqrt{v_g V_m A_m}} \quad (2)$$

式中, $e_{r/w}$ 表示 $\frac{E_{r/w}}{|E|_{\text{max}, r/w}}$,起到简化公式的作用,其中, $E_{r/w}$ 表示为微环与直波导中的扰动电场, ω_0 表示微环的共振频率, β 表示波导的传输常数, v_g 表示波导模式的群速度, Z 表示沿波导的传输方向, V_m 表示波导中的模式体积, A_m 表示波导截面的模式面积,而 m 与 ϕ 分别表示共振模式的方位谐波数与方位相位, n_r 与 n_w 分别表示谐振腔与波导芯层的折射率。从式(2)可以直接看出,振幅耦合系数与模式体积 V_m 相关,小的模式体积可以得到更强的耦合,但模式面积 A_m 并不具有相同的影响,这是由于式(2)分子中含有对模式面积的积分,分子中的积分(波导沿其传播方向的横截面)也是影响耦合强度的关键因素,其数值大小主要受到三个方面影响:1)波导与微环之间耦合区相互作用长度;2)波导中的光场与微环中光场的重叠程度;3)波导模式与微环模式的相位失配程度。

首先,耦合区相互作用长度通过体积积分来表征,而光场的重叠程度主要由波导外消逝波决定,其强度随距离呈指数型衰减,另外,相位失配程度由公式中 $(m\phi - \beta z)$ 项决定,积分的值随相位失配程度呈sinc函数变化,如果耦合两端相位失配较大,那么即使光场重叠或耦合区相互作用长度很大,耦合强度仍然会变得很

小。当相位失配程度为0时,该函数存在极大值,即:耦合强度存在极大值点,在该点的基础上增加耦合区相互作用长度、光场重叠程度更容易实现临界耦合条件,见图2。

从以上分析可以看出,要提高耦合强度最简单的方法是直接减少耦合间隙,直接提高耦合区光场重叠程度的同时,无需考虑相位失配的问题,但过窄的耦合间隙对半导体微纳加工技术提出了更高的挑战,同时窄耦合间隙对粗糙度引起的干扰更加敏感,不利于波导器件精确耦合。另外,在满足相位匹配的基础上,利用浅刻蚀波导技术,在下方未刻蚀部分增加光场重叠程度,以此来达到提高耦合效率的目的,但这样的结构会导致微环谐振腔对光的限制降低,间接降低其本征Q值上限。因此本文基于相位匹配的基础上,采用了弯曲耦合型微环谐振腔,直接增加波导与微环之间耦合区相互作用长度,提高耦合强度,更有利于临界耦合的实现。本文选取的微环半径为 $30\ \mu\text{m}$,为了满足相位匹配条件,波导截面及耦合间隙分别为 $0.41\ \mu\text{m}\times 0.5\ \mu\text{m}$ 、 $0.19\ \mu\text{m}$,波导环绕微环角度为 40° ,其结构如图3所示。

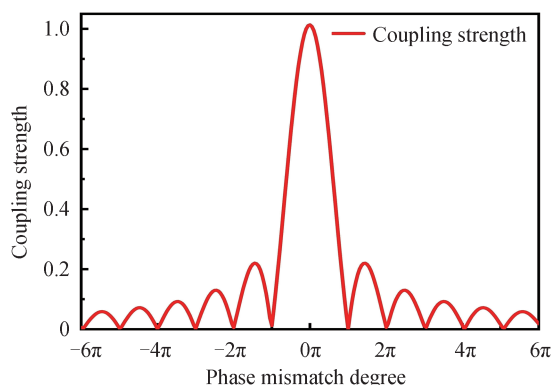


图2 耦合强度与相位失配关系

Fig. 2 Relationship between coupling strength and phase mismatch

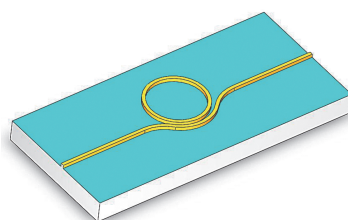


图3 弯曲耦合微环谐振腔

Fig. 3 Bend-coupled microring resonator

2 AIN微环谐振腔制备研究

实验所用的单晶AIN芯层材料,以蓝宝石为衬底,采用金属有机化合物化学气相沉淀(Metal-Organic Chemical Vapour Deposition, MOCVD)方法生长,通过X射线衍射(X-Ray Diffraction, XRD)表征其摇摆曲线半峰宽,如图4所示,通过曲线拟合得到其半峰宽值为 0.02° ,证明其晶体质量较好,满足高Q值微环谐振腔的制备要求^[19]。

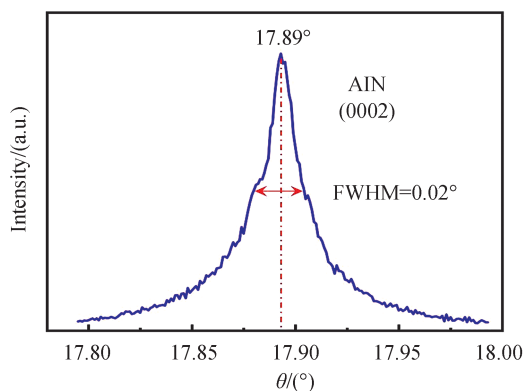


图4 AIN单晶薄膜XRD测试图

Fig. 4 XRD test chart of AlN single crystal film

AIN微环谐振腔整体制作实验过程如图5所示。利用等离子体增强化学气相沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)的方法,在单晶AIN层上镀 SiO_2 薄膜作为第二层硬掩模,之后旋涂PMMA型电子束光刻胶作为第一层掩模,并旋涂导电胶作为导电层,图形的制作选用直写式电子束光刻系统,

利用磁中性环路放电(Neutral Loop Discharge, NLD)刻蚀法以及电感耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma, ICP)刻蚀法分别对SiO₂掩模层及AlN层进行刻蚀,最终将图形转移至AlN层。

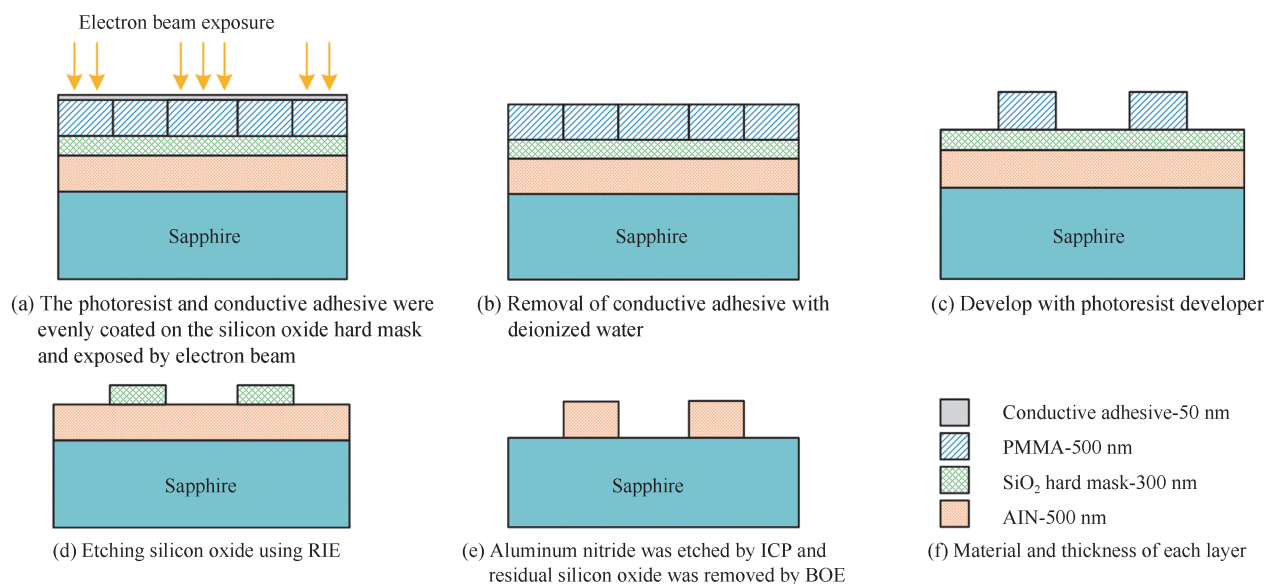


图5 微环结构制备流程

Fig. 5 Flow chart of preparation of microring structure

2.1 AlN绝缘材料电子束光刻研究

考虑到弯曲耦合区域的耦合间隙较小,精度要求高,因此采用电子束曝光系统将图形转移至光刻胶上,电子射线的波长极短,当加速电压为15~20 kV时,波长约为0.01~0.007 nm,经过电磁聚焦后的电子束束斑直径可以达到2 nm,打破了传统光刻技术受到光源波长的限制,有利于制备各种纳米尺度的超精细波导结构。对于电子束光刻来说,理想的样品材料应当具有一定的导电性,随着微纳加工技术、半导体技术的不断发展,大量高介电、宽禁带绝缘体材料由于其独有的特性也被选用作为器件基片材料,例如石英、碳化硅、氮化铝、氮化硅、蓝宝石等,高能电子束在绝缘材料上曝光时在曝光时,光刻胶会对电子束产生散射效应,之后大部分电子会透过光刻胶进入绝缘体内部,在衬底材料上会形成大范围的积累电荷,与半导体材料、导电衬底或者带有金属膜的材料不同,这些电子不能被及时导出,大量积累的电子对光刻胶进行多次曝光,还会对后续的电子束产生排斥效果,导致电子束偏移,产生纳米级别的误差,引起邻近效应与拼接效应,甚至达到放电击穿的效果,这些都是绝缘材料带来的不利影响,电荷积累效应已经成为阻碍绝缘材料作为小尺寸微纳器件的关键问题^[20-22]。

从图6红色框中可以看出,对于导电性差的材料,在进行电子束光刻时,会产生一定程度的偏差,图6(a)可以看到由于拼接效应导致波导呈现锯齿状,而图6(b)是在曝光过程中,由于电子不能及时从样品导出,而

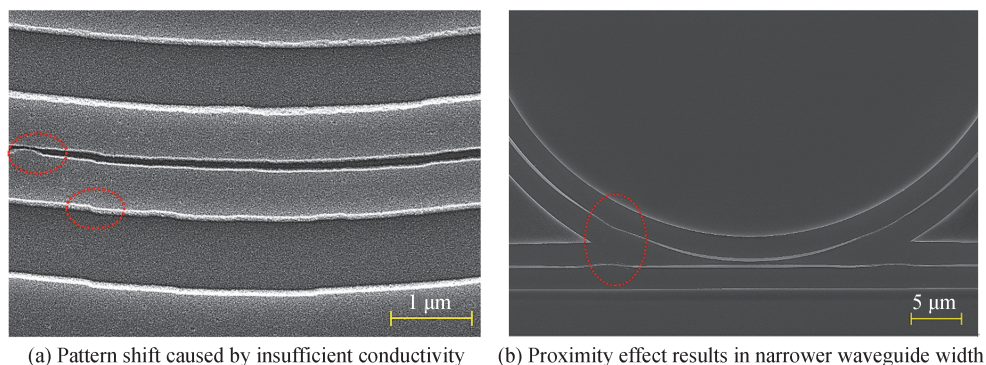


图6 绝缘基片材料电子束光刻时产生的图形失真

Fig. 6 Pattern distortion caused by electron beam lithography of insulating substrate material

产生了严重的邻近效应,导致部分波导宽度变窄。就目前而言,解决材料不导电的常用方法分为两种:第一种是旋涂导电胶;第二种是利用磁控溅射法镀金属导电层。SX AR-PC5000/90.1是一种专门用于电子束曝光工艺的导电胶,其成分由聚噻吩类、聚苯乙烯磺酸盐、表面活性剂和有机溶剂组成,在4 000 r/min条件下厚度为50 nm,易溶于水,对电子束光刻胶无影响,因此成为绝缘体材料电子束光刻的首选。磁控溅射^[23]是在真空环境中通入溅射气体(通常为Ar气),原子在电场中电离,在磁场与电场共同作用下加速,轰击靶材料,使金属靶材表面物质脱离束缚,溅射在衬底材料上,沉积成金属薄膜。本文分别尝试了上述两种不同的导电层方法,并利用电子束光刻来制备微环谐振腔耦合区,结果如图7所示。

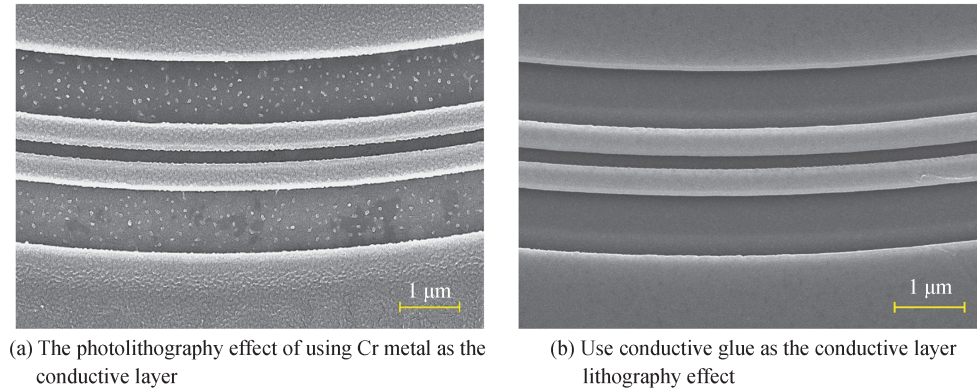


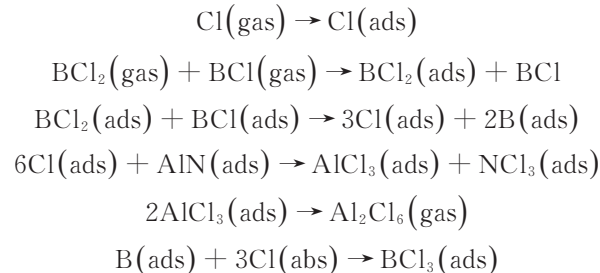
图7 两种导电层耦合区电子束光刻效果

Fig. 7 The effect of electron beam lithography in the coupling area of two conductive layers

对比图7可以看出,增加了导电层后,光刻效果有了显著的提升,比较而言,导电胶的光刻效果更好,Cr导电层的光刻效果出现了明显的“草坪化现象”,同时光刻胶表面粗糙不平,分析其原因:1)由于Cr层金属较薄(10 nm)且电导率较低,导致导电性不足,有效曝光剂量过小,显影不完全所致;2)表面粗糙不平可能是由于Cr的溅射及腐蚀导致。与金属导电层不同的是,导电胶作为导电层时,去离子水作为显影液对下层电子束光刻胶无任何影响,同时导电胶在4 000 r/min时,厚度为50 nm,满足对导电性的需求,因此本文选择利用导电胶来弥补材料不导电的缺点,其光刻效果良好,无拼接现象产生,临近效应几乎可以忽略不计。

2.2 AlN微环谐振腔刻蚀研究

对AlN进行刻蚀时,由于AlN原子间键能较高(11.52 eV),因此使用具有双射频电源的反应离子刻蚀(Inductively Coupled Plasma, ICP)技术,与传统的反应离子(Reactive Ion Etching, RIE)刻蚀相比可以实现更高的刻蚀速率、各项异性、选择比等。ICP刻蚀采用的双射频电源分别控制腔室的等离子体密度与等离子体的能量,在对AlN进行刻蚀时,刻蚀气体主要为氯基气体(Cl_2 、 BCl_3),在射频电场的作用下解离成为带有吸附性质的活性粒子,如: Cl^+ 、 Cl^- 、 Cl 、 BCl_2 、 BCl 、 B^+ 等,在刻蚀AlN的过程中可能发生的反应有^[24-25]



通过以上反应可以看出,氯离子为主要化学刻蚀离子,气态生成物及时排出腔室,防止其阻碍反应的进一步发生,而B粒子主要作用为物理轰击,旨在增加刻蚀速率以及减少对掩模的消耗。为了探究刻蚀最佳参数,设计了三组不同刻蚀参数进行实验,利用SEM对侧壁陡直度、表面粗糙度进行观察,设计三组实验参数如表1所示。

在图8中,刻蚀结果分别对应了表1中的四个不同刻蚀参数实验组,第一组实验以标准的刻蚀程序进行,通过SEM观察刻蚀后的结果,发现波导侧壁倾斜角度大,同时由于刻蚀消耗掩模速度过快,导致AlN表

表 1 AIN 刻蚀参数
Table 1 Etching parameters of AIN

Group	Vacuum	P_B	P_{RF}	Flux(Cl_2)	Flux(BCl_3)	Time
# 1	5 mT	200 W	650 W	60 sccm	30 sccm	70 s
# 2	5 mT	200 W	500 W	60 sccm	30 sccm	60 s
# 3	5 mT	200 W	500 W	60 sccm	10 sccm	60 s
# 4	5 mT	200 W	500 W	60 sccm	10 sccm	50 s

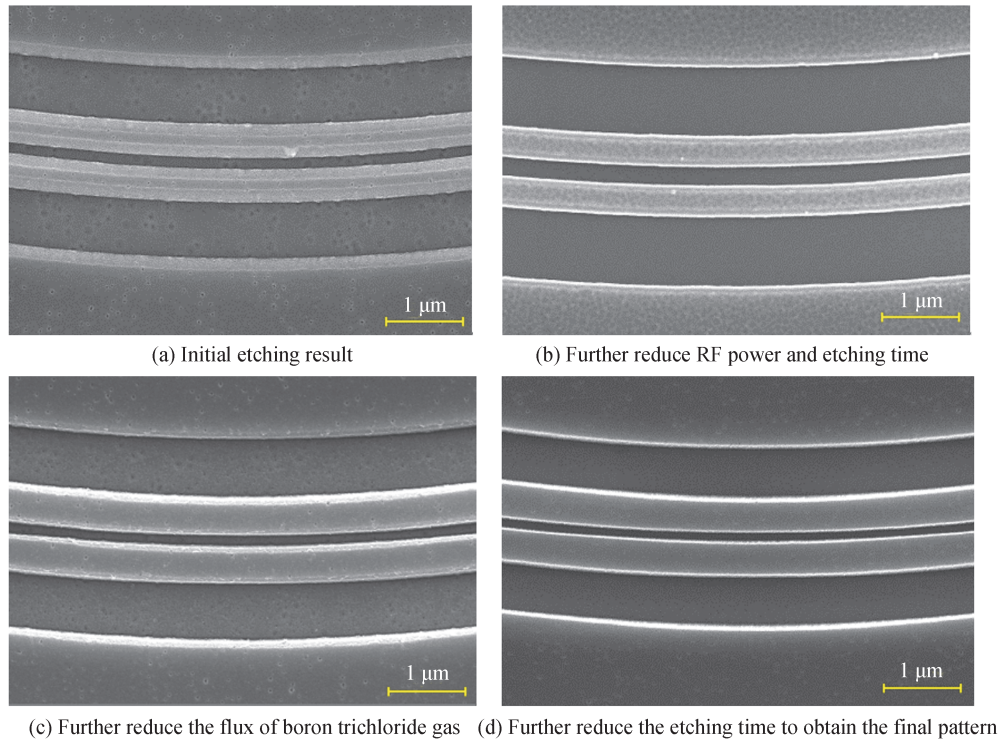


图 8 四组不同参数刻蚀结果 SEM 图
Fig.8 SEM image of four groups of etching results with different parameters

面也受到粒子的轰击,表面变得粗糙不平,刻蚀结果具有明显的刻蚀速率快、刻蚀时间长的特点。在此基础上,第二组实验减少了射频功率与刻蚀时间,观察发现刻蚀 AIN 表面粗糙度仍然很大,说明物理轰击的速率过快,因此第三组实验减少了 BCl_3 气体的通量,观察发现刻蚀 AIN 表面粗糙度有很大的改善,但刻蚀侧壁仍有一定的倾斜角,说明刻蚀时间过长,刻蚀粒子对侧壁产生了一定的侵蚀效果,因此第四组实验继续减少了刻蚀时间,观察发现刻蚀效果良好,侧壁陡直且刻蚀 AIN 表面光滑。

通过探究刻蚀过程中不同参数对刻蚀结果的影响,优化气体通量、射频功率以及刻蚀时间,最终得到了良好的 AIN 微环谐振腔刻蚀结果,其整体结构如图 9 所示。可以看到,经过 ICP 刻蚀后的 AIN 微环谐振腔侧

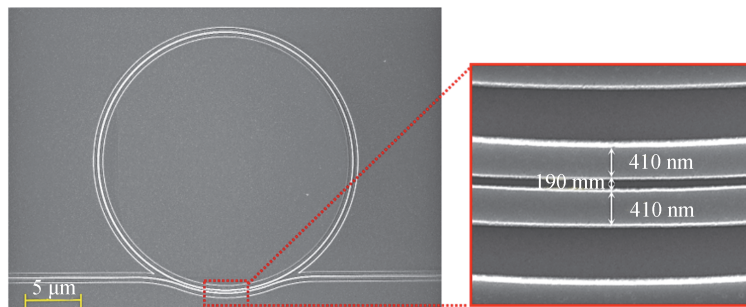


图 9 弯曲耦合微环 SEM 图
Fig. 9 SEM image of bending coupling microring

壁陡直,弯曲耦合部分无突出,AlN表面平整光滑,说明硬掩模的厚度是充足的,蓝宝石衬底表面光滑,说明无硬掩模处AlN材料完全刻蚀,样品表面均匀性良好,满足高性能器件制备的需求。

3 结论

本文分析了AlN微环谐振腔耦合强度表达式,采用弯曲波导耦合的方式,直接增加波导与微环之间耦合区相互作用长度,显著提高耦合系数、降低耦合品质因子,有利于临界耦合的实现。利用MOCVD在蓝宝石衬底上制备了高质量的AlN单晶薄膜,对比了两种绝缘材料电子束光刻的方法,并利用导电胶得到了良好的光刻效果。分析了刻蚀过程中各参数对AlN刻蚀结果的影响,实验优化了各项刻蚀参数,最终将图形转移至AlN层,制备了耦合间隙均匀、侧壁光滑的弯曲耦合AlN微环谐振腔。该研究解决了利用微环谐振腔作为反馈腔时,需增强耦合强度从而实现临界耦合的问题,弯曲耦合方式具有易制备、光损耗低的特点,为宽耦合间隙下实现临界耦合奠定基础。

参考文献

- [1] LI Dabing, JIANG Ke, SUN Xiaojuan, et al. AlGaIn photonics: recent advances in materials and ultraviolet devices[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2018, 10(1): 43-110.
- [2] BOGAERTS W, PETER D H, VAERENBERGH V T, et al. Silicon microring resonators[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(1): 47-73.
- [3] ZHU Yeyu, ZHU Lin. Narrow-linewidth, tunable external cavity dual-band diode lasers through InP/GaAs-Si₃N₄ hybrid integration[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2354-2362.
- [4] KONDRATIEV N M, LOBANOV V E, CHERENKOV A V, et al. Self-injection locking of a laser diode to a high-Q WGM microresonator[J]. *Optics Express*, 2017, 25(23): 28167-28178.
- [5] XIONG Chi, PERNICE W H P, TANG H X. Low-loss, silicon integrated, aluminum nitride photonic circuits and their use for electro-optic signal processing[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(7): 3562-3568.
- [6] JUNG H, XIONG Chi, FONG K Y, et al. Optical frequency comb generation from aluminum nitride microring resonator[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(15): 2810-2813.
- [7] JUNG H, FONG K Y, XIONG Chi, et al. Electrical tuning and switching of an optical frequency comb generated in aluminum nitride microring resonators[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 84-87.
- [8] LIU Xianwen, SUN Changzheng, XIONG Bing, et al. Broadband tunable microwave photonic phase shifter with low RF power variation in a high-Q AlN microring[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(15): 3599-3602.
- [9] LU T J, FANTO M, CHOI H, et al. Aluminum nitride integrated photonics platform for the ultraviolet to visible spectrum[J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 11147-11160.
- [10] SURYA J B, GUO Xiang, ZOU Changling, et al. Efficient third-harmonic generation in composite aluminum nitride/silicon nitride microrings[J]. *Optica*, 2018, 5(2): 103-108.
- [11] LIU Xianwen, BRUCH A W, ZHENG Gong, et al. Ultra-high-Q UV microring resonators based on a single-crystalline AlN platform[J]. *Optica*, 2018, 5(10): 1279-1282.
- [12] BOGAERTS W, DUMON P, THOURHOUT D V, et al. Compact wavelength-selective functions in silicon-on-insulator photonic wires[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 12(6): 1394-1401.
- [13] HEEBNER J, GROVER R, IBRAHIM T. *Optical microresonators*[M]. Springer New York, 2008.
- [14] SCHWELB O. Transmission, group delay, and dispersion in single-ring optical resonators and add/drop filters—a tutorial overview[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(5): 1380-1394.
- [15] BOGAERTS W, HEYN P D, VAERENBERGH T V, et al. Silicon microring resonators[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(1): 47-73.
- [16] BALLESTEROS G C, MATRES J, MARTÍ J, et al. Characterizing and modeling backscattering in silicon microring resonators[J]. *Optics Express*, 2011, 19(25): 24980-24985.
- [17] YARIV A. Critical coupling and its control in optical waveguide-ring resonator systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(4): 483-485.
- [18] SOLTANI M. Novel integrated silicon nanophotonic structures using ultra-high Q resonators[D]. Georgia Institute of Technology, 2009.
- [19] SUN C J, KUNG P, SAXLER A W, et al. A crystallographic model of (001) aluminum nitride epitaxial thin film growth on (001) sapphire substrate[J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 75(8): 3964-3967.
- [20] CHEN Yifang. Nanofabrication by electron beam lithography and its applications: A review[J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 135: 57-72.
- [21] VIEU C, CARCENAC F, PEPIN A, et al. Electron beam lithography: resolution limits and applications[J]. *Applied*

- Surface Science, 2000, 164(1-4): 111-117.
- [22] JOO J, CHOW B Y, JACOBSON J M. Nanoscale patterning on insulating substrates by critical energy electron beam lithography[J]. Nano Letters, 2006, 6(9): 2021-2025.
- [23] KELLY P J, ARNELL R D. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications[J]. Vacuum, 2000, 56(3): 159-172.
- [24] YANG Jian, SI Chaowei, HAN Guowei, et al. Researching the aluminum nitride etching process for application in MEMS resonators[J]. Micromachines, 2015, 6(2): 281-290.
- [25] LIU X, SUN C, XIONG B, et al. Smooth etching of epitaxially grown AlN film by Cl₂/BCl₃/Ar-based inductively coupled plasma[J]. Vacuum, 2015, 116: 158-162.