材料、结构及工艺

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20260419002

磁控溅射氮化硅薄膜及微环谐振器的超高真空退火

李永彬，闫文韬，杨槟榔，曹芳成，郑少南，邱　阳，
赵兴岩，钟其泽，董　渊*，胡　挺
（上海大学 微电子学院，上海 201800）

摘　要： 室温磁控溅射制备的氮化硅（SiN）薄膜具有低氢含量和低温工艺兼容性等优势，但仍需通过后退火处理降低由结构缺陷引起的光散射损耗。文章系统研究了超高真空（UHV）退火对室温溅射SiN薄膜及微环谐振器性能的影响。采用X射线光电子能谱、傅里叶变换红外光谱、原子力显微镜、椭圆偏振光谱仪及透射谱测试表征400℃，600℃，800℃退火后薄膜成分、化学键合状态、表面形貌、折射率以及器件本征品质因子（Q_i）与传播损耗。结果表明：400℃退火后器件性能最佳，Q_i由2.9×10^4提升至3.4×10^4，传播损耗由9.6 dB/cm降至8.1 dB/cm；继续升高退火温度，器件性能明显下降，800℃时虽有所恢复，但仍低于未退火水平。该研究表明，适度UHV退火可有效改善室温溅射SiN微环谐振器性能，而过高温退火则导致性能退化。

关键词： 氮化硅薄膜；反应磁控溅射；超高真空退火；微环谐振器
中图分类号： TN256　**文章编号：** 1001－5868(2026)05－0938－07

Ultra-High Vacuum Annealing of Magnetron-Sputtered Silicon Nitride Films and Microresonators

LI Yongbin, YAN Wentao, YANG Binglang, CAO Fangcheng, ZHENG Shaonan, QIU Yang,
ZHAO Xingyan, ZHONG Qize, DONG Yuan, HU Ting
(**School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 201800, CHN**)

Abstract: Silicon nitride (SiN) films deposited by room-temperature magnetron sputtering offer low hydrogen content and compatibility with low-temperature processing; however, post-annealing is still required to reduce the optical scattering loss caused by structural defects. Here, we systematically investigate the effects of ultra-high vacuum (UHV) annealing on room-temperature sputtered SiN films and microresonators. The material properties, including film composition, bonding configuration, surface morphology, and refractive index were characterized using X-ray photoelectron spectroscopy, Fourier transform infrared spectroscopy, atomic force microscopy, and ellipsometry after annealing at 400℃, 600℃, and 800℃. Optical transmission measurements quantified the device's intrinsic quality factor (Q_i) and propagation loss. The results indicated that the device performance peaked after 400℃ annealing, with Q_i increasing from 2.9×10^4 to 3.4×10^4 and propagation loss dropping from 9.6 to 8.1 dB/cm. Higher annealing temperatures degraded performance significantly; despite partial recovery at 800℃, it remained inferior to the as-deposited device. These results indicate that moderate UHV annealing can effectively improve the performance of room-temperature-sputtered SiN microring resonators, whereas annealing at excessively high temperatures leads to performance degradation.

收稿日期：2026－04－19.
基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFA1209100）；国家自然科学基金项目（62575166）；传感器技术全国重点实验室基金项目（SKT2510）；上海市科研计划项目（25TS1410400，24JD1401800）；上海市汽车智能网联交互芯片与系统重点实验室项目.
* **通信作者：**董　渊

Key words：silicon nitride films；reactive magnetron sputtering；ultra-high vacuum annealing；microresonators

0　引言

氮化硅（SiN）具有可见光至中红外的宽透明窗口、较高热稳定性以及与CMOS工艺良好的兼容性等优势，是集成光子学的重要材料平台[1-3]。其折射率介于二氧化硅（SiO_2）和硅（Si）之间，可在紧凑结构中实现强光场约束与低传播损耗的平衡，被广泛应用于低损耗波导和高品质因数微环谐振器等器件[4-5]。

目前，SiN薄膜的常用制备方法包括低压化学气相沉积（LPCVD）[6-7]、等离子体增强化学气相沉积（PECVD）[8-9]和感应耦合等离子体化学气相沉积（ICP-CVD）[10]。其中，LPCVD可在800℃以上获得高质量、接近化学计量比的薄膜[11]，并可结合高温长时间退火实现超低损耗。但其热预算高、薄膜拉伸应力大，不利于与温度敏感衬底进行单片集成[12-15]。PECVD和ICP-CVD虽可在400℃以下沉积低应力薄膜，但薄膜中的Si—H和N—H键会在1 550 nm波段引入额外吸收损耗，典型波导损耗约为2 dB/cm[16-17]。相比之下，反应磁控溅射属于物理气相沉积工艺，在抑制氢相关杂质引入方面具有优势[12]，且可在室温条件下沉积[13]，因而兼具低损耗潜力和低温兼容性，在集成光子平台中具有广阔的应用前景。

热退火是优化薄膜微结构、释放残余应力并降低散射损耗的重要手段[18]。传统常压氮气退火易引入氧、碳等背景杂质，导致表面氧化或界面污染，削弱优化效果[19]。超高真空（UHV）退火在10^{-5} Pa量级真空下进行，可有效抑制环境杂质的干扰，从而更有利于分析材料本征结构演变及其对器件性能的影响[20]。尽管UHV退火具有较大潜力，但针对磁控溅射SiN薄膜及其光子器件热演变规律的系统研究仍显匮乏。

为系统揭示UHV退火对该类薄膜及器件性能的影响规律，本文采用反应磁控溅射技术在室温下沉积SiN薄膜，并结合ICP-CVD生长SiO_2上包层，制备了微环谐振器。综合利用多种表征手段，系统研究了不同温度下UHV退火对SiN及SiO_2薄膜微观结构、表面形貌和光学特性的影响规律。结合器件透射谱分析，揭示了材料微观演变与微环谐振器本征品质因子（Q_i）及传播损耗之间的关系，为低温溅射光子器件的工艺优化提供了实验依据。

1　实验细节

本研究在室温条件下，采用反应磁控溅射沉积厚度约100 nm的SiN薄膜。为满足不同测试需求，用于X射线光电子能谱（XPS）、傅里叶变换红外光谱（FTIR）、原子力显微镜（AFM）和椭圆偏振光谱仪测试的薄膜样品沉积在单面抛光的裸硅衬底上，而用于制备微环谐振器的SiN薄膜则沉积在以8 μm厚热氧化硅为下包层的硅衬底上。溅射靶材为高纯硅（99.999%），工作气体为高纯氩气（30 sccm）和氮气（2 sccm）的混合气，射频功率为135 W，工作压强为0.3 Pa。整个沉积过程未施加额外热源，衬底温度仅由等离子体轰击引起的自然温升决定。

以沉积在二氧化硅衬底上的SiN薄膜为基础，采用标准光刻和感应耦合等离子体刻蚀（ICP）工艺制备微环谐振器。具体而言，先采用正性光刻胶与步进式光刻工艺完成器件的图形化定义，再采用四氟化碳、三氟甲烷和氩气（CF_4/CHF_3/Ar）混合气体进行ICP刻蚀，以获得较平滑且近垂直的波导侧壁。刻蚀完成后，经氧等离子体灰化和食人鱼溶液去除残留光刻胶，最后采用ICP-CVD沉积2.5 μm厚的SiO_2作为上包层，反应气源为硅烷（SiH_4）和一氧化二氮（N_2O）。

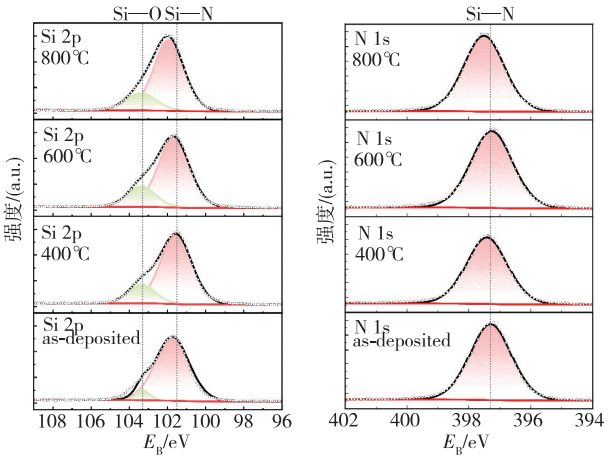
将上述硅基SiN薄膜、采用ICP-CVD工艺单独沉积在裸硅衬底上的SiO_2薄膜以及微环谐振器样品置于UHV退火炉中进行退火处理，腔室本底真空度维持在1×10^{-5} Pa。样品分别在400℃（30 min）、600℃（30 min）和800℃（8 h）条件下进行退火，其中800℃采用较长退火时间，以确保残余应力和微结构均得到充分释放与弛豫，退火结束后均在真空环境中自然冷却至室温。

薄膜的元素组成及化学键合状态通过XPS进行表征，所有谱线均以表面污染碳的C 1s峰（284.8 eV）进行荷电校正。采用FTIR分析退火前后化学键的演变，重点关注Si—O键及含氢基团。表面形貌及均方根粗糙度（R_q）通过AFM在10 μm×10 μm扫描范围内测得。薄膜光学常数（折射率）可以通过椭圆偏振光谱仪测量。

2 结果与讨论

2.1 退火对薄膜材料性质的影响

采用XPS技术对不同退火条件下薄膜的元素组成与化学键合状态进行了系统分析。XPS结果表明，SiN薄膜在退火前后均表现为富硅特征。由图1(a)可见，Si 2p光谱揭示了Si—N键(结合能约101.5 eV)以及Si—O键(约103.3 eV)两种化学键构型，且未检测到明显的Si—Si键和Si—N—O键信号。随着退火温度的升高，Si—O键的相对含量逐渐增加，这表明薄膜在高温退火过程中发生了一定程度的氧化。这可能是薄膜内部结构缺陷为氧扩散提供了通道[21]，并促使残余氧在高温下发生热激活的取代反应。



(a) 不同退火温度的Si 2p峰值 (b) 不同退火温度的N 1s峰值

图1 氮化硅的XPS特征峰

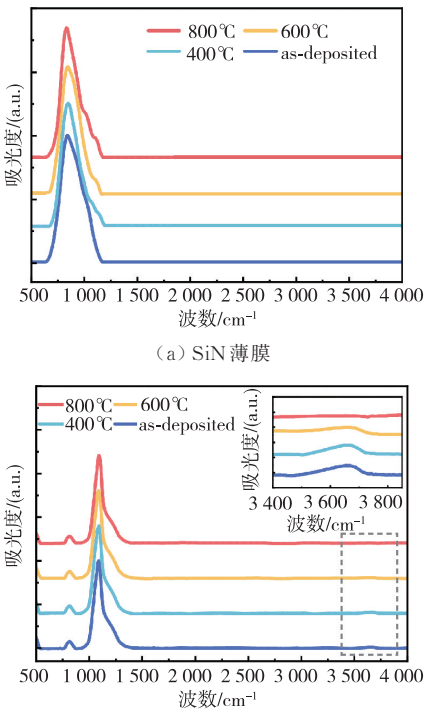
表1给出了不同退火温度下Si—N键的结合能(BE)和半高全宽(FWHM)变化。未退火样品中，Si 2p谱的Si—N键结合能为101.75 eV，经400℃和600℃退火后，峰位分别降至101.55 eV和101.67 eV，表明薄膜残余应力得到一定程度的释放。退火温度升至800℃后，结合能增至101.93 eV，高于未退火样品，表明峰位变化同时受到应力释放和化学环境改变的共同影响[18]。结合XPS与FTIR结果可知，在800℃退火条件下，Si—O键含量进一步增加。由于氧的电负性(3.44)显著高于氮(3.04)，氧的引入降低了相邻硅原子的电子云密度，增强了原子核对外层电子的束缚作用，从而导致结合能升高[22]。另一方面，所有退火样品的Si—N峰的半高全宽均较未退火样品变窄，表明退火有利于减少结构缺陷、提高短程有序度，使Si—N键合网络更加均匀[23]。N 1s谱的FWHM变化趋势与Si 2p的结果基本一致，进一步印证了上述分析。

表1 不同退火温度下氮化硅薄膜中Si 2p和N 1s的E_B及*FWHM*

样品	Si 2p (Si—N)		N 1s (N—Si)	
	E_B/eV	*FWHM*/eV	E_B/eV	*FWHM*/eV
未退火	101.75	2.08	397.42	1.55
400℃	101.55	1.94	397.26	1.59
600℃	101.67	1.93	397.3	1.57
800℃	101.93	1.87	397.51	1.55

SiO_2薄膜的XPS分析表明，其Si 2p谱中仅检测到Si—O键信号。随着退火温度的升高，SiO_2特征峰的结合能逐渐增大，且FWHM持续变窄，表明包层薄膜在退火过程中发生了结构弛豫和致密化，这与后续FTIR分析结果一致。

FTIR结果进一步揭示了薄膜内部化学键合状态及特征基团的演变规律。如图2(a)所示，磁控溅射生长的SiN薄膜在整个测试波段内均未检测到Si—H键(约2 100～2 200 cm^{-1})和N—H键(约3 300～3 400 cm^{-1})的特征吸收峰[24]，这表明该工艺在抑制氢杂质引入方面具有较明显优势。退火后，薄膜在1 100 cm^{-1}附近归属于Si—O键的吸收峰强度明显增强，这一结果与上述XPS观测到的薄膜内部氧含量增加的趋势基本一致。



(a) SiN薄膜

(b) SiO_2薄膜

图2 薄膜的FTIR光谱分析

值得注意的是，Si—N 键的主吸收峰从未退火时的 882 cm^{-1} 分别移动至 400℃，600℃和 800℃退火后的 867，870 和 864 cm^{-1}，该变化主要与退火引起的结构弛豫和残余应力释放有关[25]。在磁控溅射沉积过程中，高能粒子轰击使薄膜处于非平衡压应力状态，导致 Si—N 键长缩短、键角发生畸变[26]。退火可以促进原子向更稳定构型重排，使 Si—N 键长略有增加、键力常数减小，从而表现为吸收峰向低波数方向移动[18]。此外，氧原子的引入也通过改变局域振动环境对峰位变化产生一定影响[25]。与此同时，Si—N 吸收峰 FWHM 明显变窄，表明薄膜短程有序性提高，这与 XPS 峰宽变窄的结果一致。

对于 ICP-CVD 沉积的 SiO_2 薄膜，其 FTIR 光谱如图 2(b)所示，其中插图为 3 650 cm^{-1} 附近 Si—OH 伸缩振动峰的局部放大图。未退火的 SiO_2 薄膜在 3 650 cm^{-1} 附近存在 Si—OH 基团的伸缩振动峰[27]。随着退火温度的升高，该吸收峰逐渐减弱并最终消失，表明 UHV 退火能够有效去除包层中的残余羟基（—OH）。由于—OH 基团会在 1 550 nm 通信波段引入吸收损耗，其含量的降低可有效减小包层吸收损耗，从而为微环谐振器 Q_i 值的提升创造有利条件。

表面粗糙度是影响集成光子波导散射损耗的关键因素。图 3 给出了不同退火温度下 SiN 薄膜表面形貌的 AFM 图像。未退火 SiN 薄膜的 R_q 为 1.13 nm，400℃退火后基本保持不变（1.14 nm），当退火温度升至 600℃和 800℃时，R_q 分别增至 1.29 nm 和 1.28 nm，说明中高温退火会导致 SiN 薄膜表面粗糙化，该粗糙度的升高可能归因于表面原子迁移引起的局部结构重组[28]以及轻微氧化诱导的 SiO_x 富氧区不均匀分布。表面形貌恶化将增强波导界面散射，为高温退火后器件光学损耗的增加提供了重要依据。相比之下，SiO_2 薄膜表现出较好的表面热稳定性，其未退火时 R_q 为 0.87 nm，退火后分别降至 0.80 nm，0.70 nm 和 0.78 nm，整体呈轻微下降趋势。

图 4 展示了不同退火温度下 SiN 和 SiO_2 薄膜在 400～1 700 nm 波段的折射率色散曲线。随着退火温度的升高，SiN 薄膜在 632.8 nm 处的折射率从未退火时的 2.01 逐渐降至 1.98，1.96 和 1.95，呈现出单调下降的趋势。结合 XPS 和 FTIR 结果可知，这主要与退火过程中氧原子逐步引入并形成 Si—O 键有关，而 SiO_2 的本征折射率（$n\approx1.46$）显著低于 SiN（$n\approx2.0$），因此薄膜富氧化会造成整体折射率下降。与此同时，SiO_2 薄膜在 632.8 nm 处的折射率也由 1.467 微降至 1.466，1.461 和 1.459，这主要归因于高温退火去除了薄膜中的—OH 基团，并促进了网络结构的弛豫，从而使其光学特性更接近高质量热氧化 SiO_2 的本征状态。

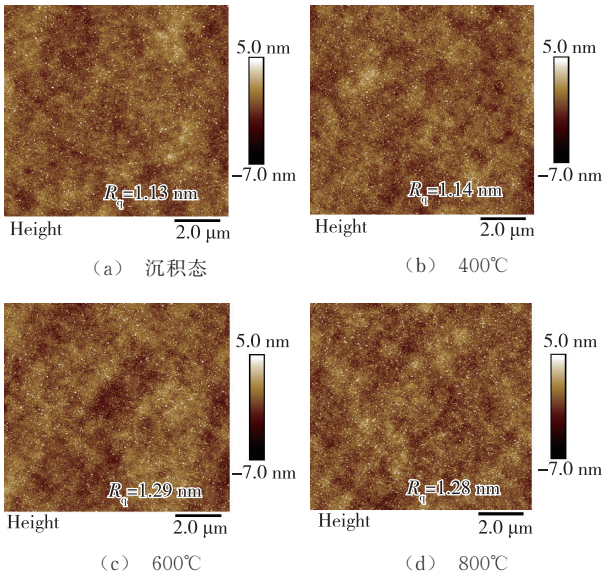


图 3　不同退火温度 SiN 薄膜的粗糙度

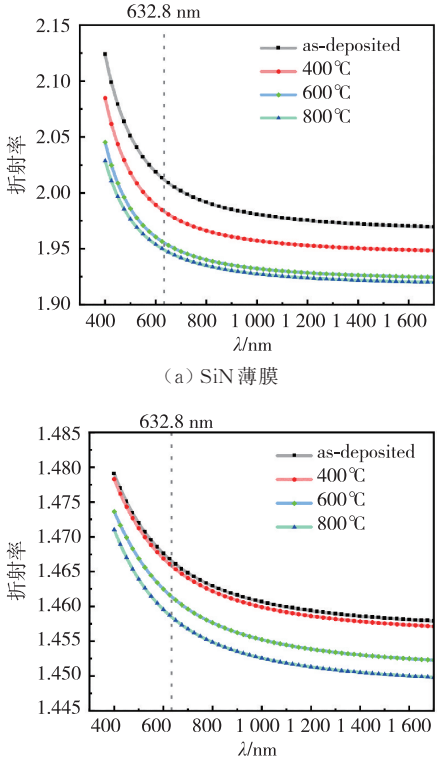
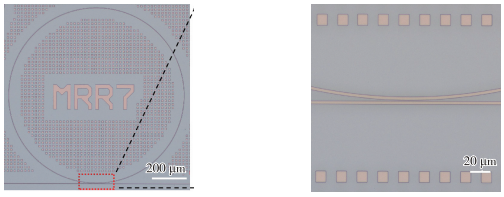


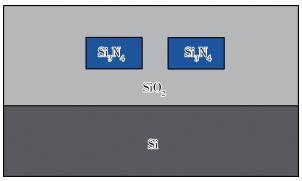
图 4　不同退火温度下薄膜折射率色散曲线

2.2 退火对微环谐振器性能的影响

为探究UHV退火对器件宏观光学性能的影响，本文对微环谐振器进行了透射谱测试。图5(a)和(b)分别展示了微环谐振器及其耦合区的光学显微镜图像，图5(c)为耦合区截面示意图。器件波导截面设计为2.8 μm(宽)×100 nm(高)，微环半径为500 μm。测试时，横电(TE)偏振光由可调谐激光器输出，经透镜光纤耦合至芯片端面的倒锥形边缘耦合器输入波导，输出信号由光电探测器接收。通过对谐振峰进行洛伦兹拟合，提取其3 dB带宽和自由光谱范围(FSR)，并据此计算器件本征品质因子和波导传播损耗(α)，其中$\alpha=\lambda_0/(Q_i\times R\times FSR)$，$\lambda_0$为谐振波长，$R$为微环半径[12]。



(a) 微环谐振器的光学显微镜 (b) 直波导与微环耦合区的放大图像(耦合间隙为700 nm)

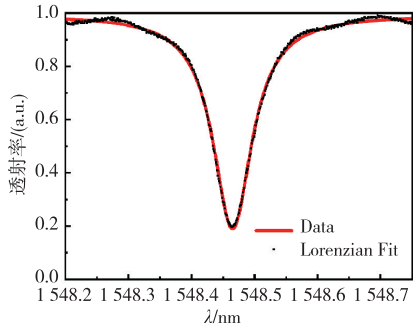


(c) 微环耦合区截面示意图

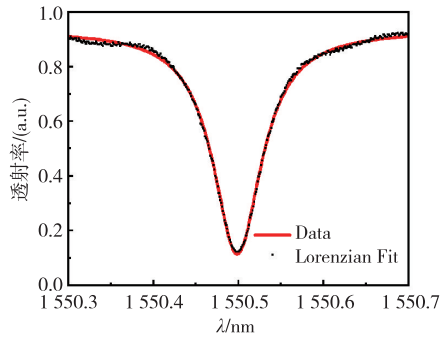
图5 透射谱测试结果图

图6给出了不同退火温度下微环谐振器在1 550 nm附近的透射谱。未退火器件的Q_i为2.9×10^4，对应的传播损耗为9.6 dB/cm。经400℃退火，Q_i提升至3.4×10^4，传播损耗降至8.1 dB/cm，器件性能达到最优。当退火温度升至600℃时，Q_i降至1.2×10^4，传播损耗增至22.8 dB/cm，器件性能明显劣化。800℃退火后，Q_i回升至1.5×10^4，传播损耗降至17.4 dB/cm，但仍低于未退火水平。上述结果表明，在本研究条件下，器件性能随退火温度变化呈现出明显的非单调特征。

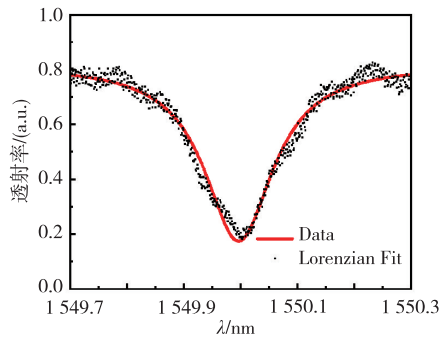
值得注意的是，本研究所提取的传播损耗值基于欠耦合状态，为相对保守的估计结果。器件工作于TE偏振模式，弯曲波导中的光场会向外侧偏移，从而增强模场与外侧壁的重叠积分[5]，因此器件性能对薄膜表面和侧壁粗糙度十分敏感。结合XPS，FTIR，AFM和折射率测试结果可以看出，Q_i值的非单调变化反映了多种机制的共同作用：一方面，适度退火有利于修复缺陷并降低吸收损耗；另一方面，过高温度会导致薄膜氧化、折射率下降和表面粗糙度增大，从而增加散射损耗并削弱光场约束。



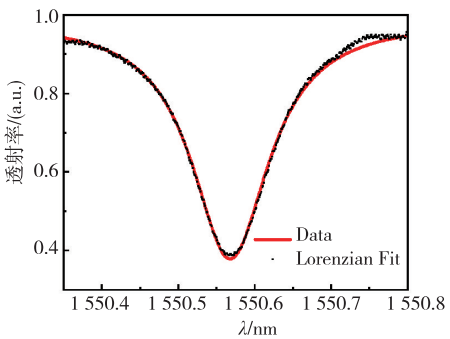
(a) 未退火，$Q_i=2.9\times10^4$，$FWHM=0.075$ nm



(b) 400℃退火，$Q_i=3.4\times10^4$，$FWHM=0.069$ nm



(c) 600℃退火，$Q_i=1.2\times10^4$，$FWHM=0.147$ nm



(d) 800℃退火，$Q_i=1.5\times10^4$，$FWHM=0.123$ nm

图6 微环谐振器在1 550 nm附近的归一化透射光谱

对于400℃退火样品，SiN薄膜发生结构弛豫，残余应力得到释放，内部缺陷被部分消除，同时表面粗糙度基本保持稳定，氧原子的引入也相对有限。因此，此时吸收损耗的降低占主导地位，器件总传播损耗下降，Q_i达到最高。

当退火温度升至600℃时，SiN薄膜表面粗糙度增至1.29 nm，同时折射率由2.01降至1.96，削弱了芯层与包层之间的折射率对比度。由此推测，器件光场约束减弱、模场向包层扩展，并进一步增强了模场与粗糙界面的相互作用。综合来看，散射损耗和吸收损耗同时增加，共同导致总光学损耗上升，这是器件性能急剧下降的主要原因。

在800℃退火条件下，SiO_2包层中的—OH基团进一步减少，有效抑制了1 550 nm波段的吸收损耗[29]；同时，芯层短程有序度也有所提高，因此器件性能较600℃时有所恢复。但由于Si—O键含量仍较高，且SiN薄膜表面粗糙度仍高于未退火样品，散射损耗依然占主导地位，其整体性能仍不及400℃退火样品。

3　结论

本文系统研究了UHV退火对磁控溅射SiN薄膜微观结构以及微环谐振器光学性能的影响。结果表明，在本研究条件下，400℃是该体系的最优退火条件，薄膜残余应力得到释放，结构缺陷被部分修复，器件本征品质因子Q_i提升至3.4×10^4，传播损耗降至8.1 dB/cm。当退火温度升至600℃时，器件性能有所下降，Q_i降至1.2×10^4。在800℃退火后，随着包层—OH基团进一步减少和芯层短程有序度提高，器件性能虽较600℃有所恢复，但仍低于未退火水平。研究证实，UHV退火过程中缺陷修复、薄膜氧化和表面粗糙化等因素相互竞争并共同决定器件的光学损耗。本文结果可为低温溅射SiN光子器件后处理工艺的优化提供实验依据。

参考文献：

[1] Blumenthal D J, Heideman R, Geuzebroek D, et al. Silicon nitride in silicon photonics [J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(12): 2209-2231.

[2] Liu J, Huang G, Wang R N, et al. High-yield, wafer-scale fabrication of ultralow-loss, dispersion-engineered silicon nitride photonic circuits [J]. Nature Communications, 2021, 12: 2236.

[3] Ye Z, Jia H, Huang Z, et al. Foundry manufacturing of tight-confinement, dispersion-engineered, ultralow-loss silicon nitride photonic integrated circuits [J]. Photonics Research, 2023, 11(4): 558.

[4] 范智斌，陈泽茗，周　鑫，等. 氮化硅光子器件与应用研究进展[J]. 中国光学，2021，14(4)：998-1018.
Fan Zhibin, Chen Zeming, Zhou Xin, et al. Recent advances in silicon nitride-based photonic devices and applications [J]. Chinese Journal of Optics, 2021, 14(4): 998-1018.

[5] El Dirani H, Youssef L, Petit-Etienne C, et al. Ultralow-loss tightly confining Si_3N_4 waveguides and high-Q microresonators [J]. Optics Express, 2019, 27(21): 30726-30740.

[6] Luke K, Dutt A, Poitras C B, et al. Overcoming Si_3N_4 film stress limitations for high quality factor ring resonators [J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22829-22833.

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

[8] Huang Y, Song J, Luo X, et al. CMOS compatible monolithic multi-layer Si_3N_4-on-SOI platform for low-loss high performance silicon photonics dense integration [J]. Optics Express, 2014, 22(18): 21859-21865.

[9] Sacher W D, Huang Y, Lo G Q, et al. Multilayer silicon nitride-on-silicon integrated photonic platforms and devices [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(4): 901-910.

[10] Kshirsagar A, Nyaupane P, Bodas D, et al. Deposition and characterization of low temperature silicon nitride films deposited by inductively coupled plasma CVD [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(11): 5052-5058.

[11] Ji X, Roberts S, Corato-Zanarella M, et al. Methods to achieve ultra-high quality factor silicon nitride resonators [J]. APL Photonics, 2021, 6(7): 071101.

[12] Frigg A, Boes A, Ren G, et al. Low loss CMOS-compatible silicon nitride photonics utilizing reactive sputtered thin films [J]. Optics Express, 2019, 27(26): 37795-37805.

[13] Hiraki T, Aihara T, Nishi H, et al. Deuterated SiN/SiON waveguides on Si platform and their application to C-band WDM filters [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(5): 2500207.

[14] Chiles J, Nader N, Hickstein D D, et al. Deuterated silicon nitride photonic devices for broadband optical frequency comb generation [J]. Optics Letters, 2018, 43(7): 1527-1530.

[15] Lee Y H D, Lipson M. Back-end deposited silicon photonics for monolithic integration on CMOS [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(2): 8200207.

[16] Douglas E A, Mahony P, Starbuck A, et al. Effect of precursors on propagation loss for plasma-enhanced chemical vapor deposition of SiN_x: H waveguides [J]. Optical Materials Express, 2016, 6(9): 2892-2903.

[17] Mao S C, Tao S H, Xu Y L, et al. Low propagation loss SiN optical waveguide prepared by optimal low-hydrogen

module[J]. Optics Express, 2008, 16(25): 20809-20816.

[18] Parkhomenko I, Vlasukova L, Komarov F, et al. Effect of rapid thermal annealing on Si-based dielectric films grown by ICP-CVD[J]. ACS Omega, 2023, 8(33): 30768-30775.

[19] You D, Jiang Y, Li W, et al. Annealing-induced defects and optical degradation in sputter-deposited silicon nitride: implications for photonic applications [J]. Ceramics International, 2024, 50(13): 22553-22564.

[20] Chen W S, Lin K Y, Lin Y G, et al. Ultrahigh vacuum annealing of atomic-layer-deposited Y_2O_3/GaAs in perfecting heterostructural chemical bonding for effective passivation[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2023, 5(7): 3809-3816.

[21] Kim J H, Chung K W. Microstructure and properties of silicon nitride thin films deposited by reactive bias magnetron sputtering[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 83(11): 5831-5839.

[22] Gao K, Seyller T, Ley L. How the solid state matrix affects the chemical shift of core-level binding energies: a novel method to take the induction effect into account[J]. Solid State Communications, 2006, 139(7): 370-375.

[23] Song D, Cho E C, Conibeer G, et al. Fabrication and characterization of Si nanocrystals in SiC matrix produced by magnetron cosputtering[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 2007, 25(4): 1327-1335.

[24] 柳 聪, 蒋亚东, 黎威志. 真空退火对低频PECVD氮化硅薄膜性能的影响[J]. 半导体光电, 2012, 33(1): 74-78.
Liu Cong, Jiang Yadong, Li Weizhi. Influences of vacuum annealing on properties of silicon nitride films prepared by low-frequeny PECVD technology [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(1): 74-78.

[25] Scardera G, Puzzer T, Conibeer G, et al. Fourier transform infrared spectroscopy of annealed silicon-rich silicon nitride thin films[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 104(10): 104310.

[26] Bhatt V, Chandra S. Silicon nitride films deposited by RF sputtering for microstructure fabrication in MEMS[J]. Journal of Electronic Materials, 2009, 38(9): 1979-1989.

[27] Hiller D, Zierold R, Bachmann J, et al. Low temperature silicon dioxide by thermal atomic layer deposition: investigation of material properties[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(6): 064314.

[28] Hu J, Wu R, Huang J, et al. Optimization of the refractive index of silicon nitride films in magnetron sputtering and annealing control for low-roughness[J]. Optical Materials, 2026, 171: 117764.

[29] Wang L, Xie W, Van Thourhout D, et al. Nonlinear silicon nitride waveguides based on a PECVD deposition platform[J]. Optics Express, 2018, 26(8): 9645-9655.

作者简介：

李永彬(2001—),男,硕士研究生,主要研究方向为磁控溅射制备氮化硅薄膜及其退火工艺;

董 渊(1990—),男,博士,教授,主要研究方向为应用于光通信、光传感、光计算的集成光电子器件设计与制造工艺。