材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.03.014

衬底表面处理对原子层沉积法生长 GaN 薄膜的影响

李　佳，王文樑，季小红*

（华南理工大学 材料科学与工程学院，广州 510641）

摘　要： 采用等离子增强原子层沉积技术于蓝宝石衬底上生长 GaN 薄膜，研究氮等离子体预处理衬底对薄膜结晶性能的影响。利用 X 射线衍射仪、扫描电子显微镜、原子力显微镜、X 射线光电子能谱仪等手段对薄膜的晶体结构、表面形貌及薄膜成分进行表征和分析。结果表明，经预处理的蓝宝石衬底上生长的 GaN 薄膜晶体质量明显提高，沿 c 轴高度择优取向生长；光学带隙约为 3.48 eV；薄膜呈 n 型导电特性，电阻率为 2.551×10^{-2} Ω·cm，载流子浓度高达 1.876×10^{19} cm^{-3}，迁移率为 13.04 $cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}$；薄膜中 Ga 元素主要与 N 元素以 Ga－N 键生成 GaN。

关键词： GaN；等离子增强原子层沉积；外延膜；衬底预处理

中图分类号： TN304　**文章编号：** 1001－5868(2021)03－0375－05

Effect of Substrate Pretreatment on the Growth of GaN Films Prepared by Atomic Layer Deposition

LI Jia，WANG Wenliang，JI Xiaohong

（School of Materials Science and Engineering，South China University of Technology，Guangzhou 510641，CHN）

Abstract： High-quality GaN heteroepitaxy films were realized by using nitrogen plasma pretreatment of the sapphire substrate prior to the plasma-enhanced atomic layer deposition (PEALD) at 320 ℃. The crystal structures，surface morphology，elemental composition of the deposited GaN films were characterized by XRD，SEM，AFM and XPS. The results show that GaN films grown on the pretreated substrate exhibit improved crystalline quality with highly-preferred (002) growth direction. The as-grown GaN films are n-type with a carrier concentration up to 1.876×10^{19} cm^{-3}，resistivity of 2.551×10^{-2} Ω·cm and the hole mobility of 13.04 $cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}$. Most Ga elements form GaN with Ga－N bonds.

Key words： GaN；PEALD；epitaxy；substrate pretreatment

0　引言

氮化镓(GaN)因其优异的光电特性在发光二极管(LED)、紫外光电探测器(PD)、蓝紫光激光器、高电子迁移率晶体管(HEMT)、5G 射频器件等光电领域有着广泛的应用[1-2]。GaN 外延膜的常用制备技术包括金属有机化学气相沉积(MOCVD)[3-4]、氢化物气相外延(HVPE)[5]或分子束外延(MBE)[6-7]等，这些薄膜在生长过程中通常需要较高的温度(大于 800 ℃)。过高的生长温度一方面会增加由 GaN 薄膜与衬底(如硅[8]、蓝宝石[9-10]等)间较大的晶格及热失配而产生的应力和缺陷，进而极大地影响 GaN 基器件的性能；另一方面，高温生长与高温耐受性较差的衬底(如聚合物衬底等[11])不兼容，限制了 GaN 在柔性光电器件领域的应用。因此，有必要寻求一种低温生长高质量 GaN 薄膜的方法。

等离子增强原子层沉积(PEALD)是一种新型低温沉积技术[12]。它具有独特的自限制反应、厚度可控、逐层生长的特点，并且等离子能够增强反应气体源活性，有助于降低沉积所需温度[13]。2009 年 Kim 等[14]使用热型 ALD，分别以 $GaCl_3$ 和 NH_3 为 Ga 源和 N 源，在 500 ℃下于 Si(100)衬底上制备出 GaN 薄膜，通过调控 $GaCl_3$ 脉冲时间可将 Cl 杂质

收稿日期：2021－04－04.

基金项目：国家自然科学基金项目(51572092).

* 通信作者：季小红

的原子百分含量降低至1.1%。2014年Ozgit等[15]使用空心阴极等离子体活化氮源，分别以三甲基镓(TMG)和N_2/H_2为Ga源和N源，在200 ℃的低温下制备出具有纤锌矿晶体结构的多晶GaN薄膜，C,O杂质的原子百分含量均小于8.0%。2018年Lee等[16]在300 ℃下对PEALD的每一个循环前引入原位He/Ar等离子体处理，大幅度增强了GaN薄膜的晶体质量。

本文采用PEALD技术，使用氮等离子体对蓝宝石衬底进行预处理，成功制备出高结晶质量的GaN薄膜，分析了薄膜的晶体结构、元素成分以及光电性能，探讨了氮等离子体预处理对薄膜生长的影响机理。

1 实验

采用PEALD设备(PEALD-100R，嘉兴科民电子设备技术有限公司)进行GaN薄膜的生长。沉积前，依次使用异丙醇、丙酮、乙醇、去离子水超声清洗蓝宝石衬底(c-Al_2O_3)，再将衬底用高纯N_2(99.999%)吹干，并放入PEALD沉积腔室的衬底盘上。将衬底加热至预处理温度(360 ℃)并保温30 min以使衬底温度分布均匀，再使用N_2/H_2(4∶1)混合等离子体进行预处理，混合气体流量为30 cm^3/min，气压为20 Pa，等离子体发生器功率为250 W，预处理时间为60 s。预处理结束后，将腔室温度降低至320 ℃并保温30 min，然后开始制备GaN。GaN的制备：以高纯三乙基镓(TEG，99.999%)为镓的前驱体，N_2/H_2(4∶1)混合气体为氮源，气体流量为30 cm^3/min，等离子体发生器功率为180 W，吹扫气体为Ar气，流量为15 cm^3/min。PEALD单位循环：TEG脉冲时间为0.03 s，反应时间为5 s，吹扫时间为40 s，N_2/H_2混合等离子体脉冲时间为30 s，反应时间为5 s，吹扫时间为40 s。循环圈数为1 600圈。图1为衬底预处理及PEALD沉积GaN薄膜的单循环示意图。为了对比研究，在未经预处理的蓝宝石衬底上以同样条件生长了GaN薄膜。

PEALD沉积系统内Ga源与N源的反应可用下列三个化学反应式表示，其中，反应式(1)和(2)为半反应，式(3)为全反应，上角*表示该物质在衬底表面：

$$Ga(C_2H_5)_3 + H^* \longrightarrow Ga(C_2H_5)_2^* + C_2H_6 \quad (1)$$

$$Ga(C_2H_5)_2^* + \frac{1}{2}N_{2(plasma)} + H_{2(plasma)} \longrightarrow GaN + 2C_2H_6 \quad (2)$$

$$Ga(C_2H_5)_3 + H^* + \frac{1}{2}N_{2(plasma)} + H_{2(plasma)} \longrightarrow GaN + 3C_2H_6 \quad (3)$$

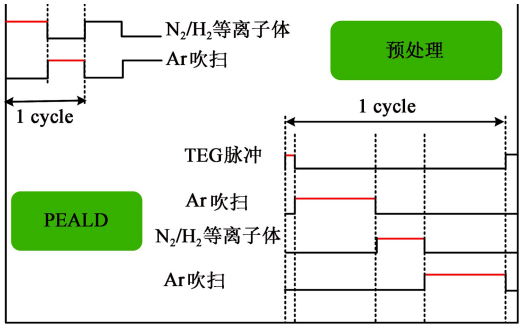


图1 预处理及PEALD沉积GaN薄膜的单循环示意图

利用薄膜测厚仪(SGC-10)测试GaN薄膜的厚度。通过X射线衍射仪(XRD，PANalytical Aeris)、场发射扫描电子显微镜(FESEM，Nova NANOSEM 430，Netherlands FEI)和原子力显微镜(AFM，Multimode 8，Brooke)对薄膜样品的晶体结构、表面形貌进行表征。使用X射线光电子能谱仪(XPS，Thermo Fisher Scientific K-Alpha)表征薄膜的元素组成、原子百分比及对应价态。使用紫外-可见分光光度计(Shimadzu UV-2600)测试薄膜在200～800 nm范围内的吸光度，并根据Tauc公式

$$(\alpha h\nu)^2 = K(h\nu - E_g) \quad (4)$$

推导薄膜样品的光学带隙。其中，α为吸光指数，$h\nu$为光子能量，K为常数，E_g为半导体禁带宽度。薄膜的导电类型及载流子浓度由霍尔效应测试仪(Hall8800-Ⅱ，Swin)确定。

2 结果与分析

测试结果表明，在未经处理与经预处理衬底上生长的GaN薄膜的厚度分别为126和140 nm，对应的GaN薄膜平均生长速率分别为0.078 8和0.087 5 nm/cycle。相比较，衬底经预处理后GaN薄膜生长速率稍高。这是因为，预处理后的衬底表面存在大量化学反应活性位点，如－N，－H，－NHx基团，大量N原子取代衬底表面的O原子

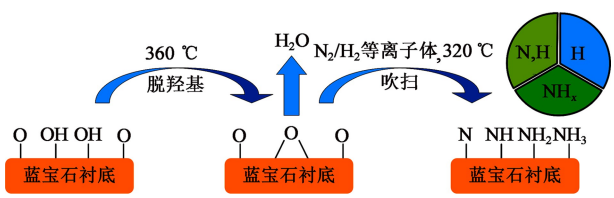


图2 等离子体处理衬底表面前后的表面基团示意图

形成 Al—N 键，有利于发生化学吸附，成核生长。等离子体处理蓝宝石衬底表面前后的表面基团示意图如图 2 所示。

图 3 为未处理和预处理后 GaN 薄膜的 XRD 图。将所得 XRD 数据与 JXPDS 标准卡片数据对照，确定薄膜的结晶性能。由图可见，衬底未处理的样品中，XRD 衍射峰分别对应于六方晶系 GaN 的(100)，(002)，(101)晶面，说明薄膜呈多晶态。衬底预处理后的样品仅有对应于(002)和(004)的晶面衍射，表明 GaN 薄膜沿 c 轴高度择优取向生长。等离子体处理后样品的(002)晶面衍射峰的半峰宽由 0.928°减小至 0.410°，根据谢乐公式可计算平均晶粒尺寸：

$$D=\frac{K\lambda}{\beta\cos\theta} \tag{5}$$

其中，K 为常数，λ 为入射波长，β 为衍射峰半高宽，平均晶粒尺寸由 9.4 nm 相应增加到 20.9 nm。这种现象主要归因于蓝宝石衬底表面经处理后，表面—O 基团被等离子发生器产生的—N，—H，—NH_x 自由基取代，有利于 Ga，N 原子迁移到能量最低的晶面进行有序排列，且界面处的非晶层 GaN 厚度减少，形成以(002)晶面为主要取向的高结晶质量薄膜。

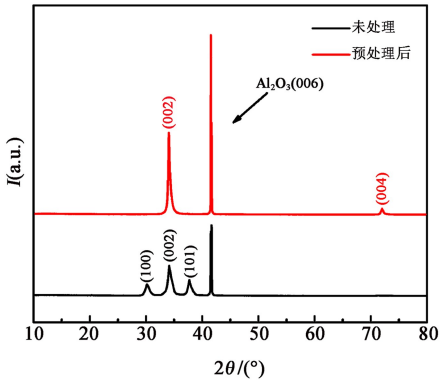
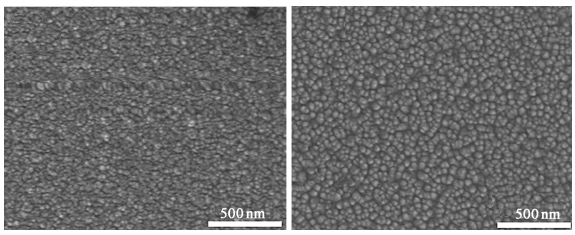


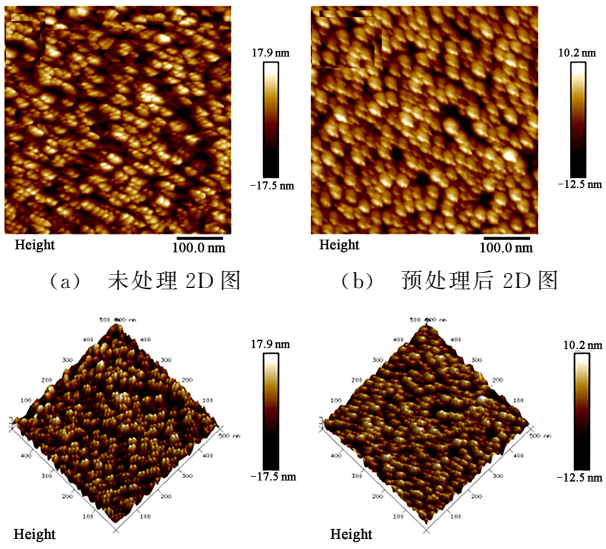
图 3　未处理与预处理后 GaN 薄膜 XRD 图

图 4 为未处理和预处理后 GaN 薄膜的 SEM 表面形貌图。从图中可以看出 GaN 薄膜由大小均匀的晶粒组成，处理过的衬底上生长的 GaN 的晶界更明显，晶粒更大。图 5 为未处理和预处理后 GaN 薄膜的 AFM 图(500 nm×500 nm)。可以看出，经预处理后，GaN 晶粒尺寸变大，薄膜平整度更高，表面粗糙度均方根(RMS)由 5.48 nm 降低至 2.88 nm。这说明等离子体预处理有助于 GaN 薄膜的均匀形核生长。



(a)　未处理　　(b)　预处理后

图 4　未处理与预处理后 GaN 薄膜 SEM 图



(a)　未处理 2D 图　　(b)　预处理后 2D 图

(c)　未处理 3D 图　　(d)　预处理后 3D 图

图 5　未处理与预处理后 GaN 薄膜 AFM 图

图 6～7 为 GaN 薄膜样品的 XPS 图。所有数据均参照 C 1s 峰(284.8 eV)进行校正。由图 6 所示图谱可知，薄膜样品中存在的主要元素为 Ga，N，C，O。本实验中的 C，O 杂质分别源于有机源 TEG 中的乙基基团残留中的碳和薄膜表面的空气吸附氧或等离子石英管本体[17-18]。

图 7(a)和(b)对比了未处理与预处理后 GaN 的 C 1s 和 O 1s XPS 谱。可以看出，经过预处理的样品的 XPS 峰强明显下降，表明样品中 C 及 O 含量的减少。由于 N 1s 特征峰受到 A-Ga(Ga 元素俄歇峰)的影响，本文对 Ga 3d 和 N 1s 特征峰进行了分峰拟合处理。图 7(c)和(d)分别是未处理与预处理后 GaN 的 Ga 3d XPS 谱。可以看出，经 XPS 分峰处理，未处理和预处理的样品均包含 Ga—Ga，Ga—N，Ga—O 键。衬底预处理后的样品中，大部分 Ga 元素以 Ga—N 键的形式存在，Ga—Ga 和 Ga—O 键少量存在。其中，Ga—Ga 键的存为主要源于样品在 XPS 测试前 Ar 离子蚀刻过程中 Ga 元素的积聚，与薄膜本身无关[19]；Ga—O 键表明样品中含有微量 O 杂质，衬底预处理后的样品中的 O 含量明

显减少。另外，Ga－N 结合能从 19.2 eV 增加到 19.5 eV，说明衬底经等离子体轰击后，生长的薄膜的致密度提高[16]。图 7(e)和(f)为未处理与预处理 GaN 的 N 1s XPS 谱。根据 XPS 分峰处理，三个亚峰分别对应 A－Ga(Ga 俄歇峰)、A－Ga 和 N－Ga 键，说明薄膜样品中所有 N 元素均与 Ga 元素形成了 GaN 薄膜。

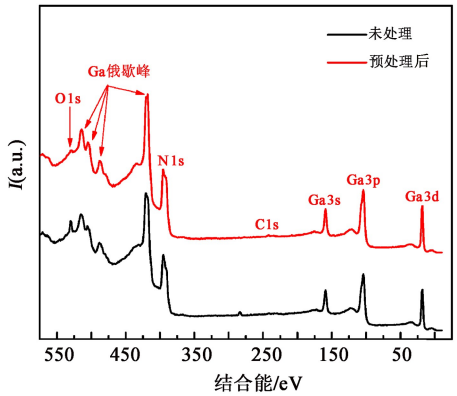
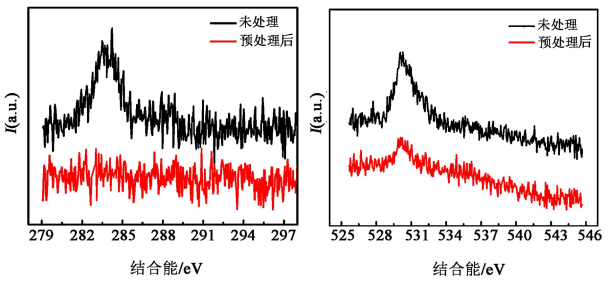
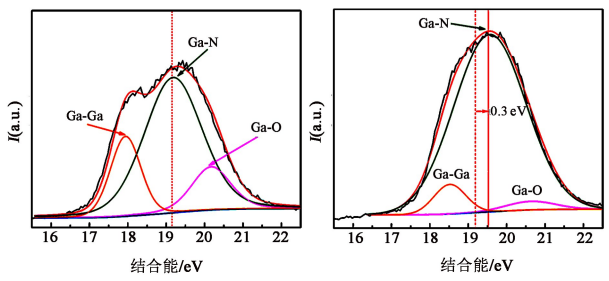


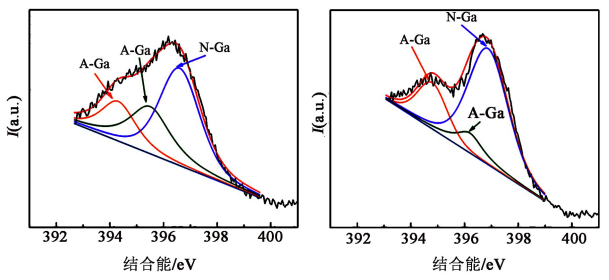
图 6 未处理与预处理后 GaN 薄膜 XPS 宽扫谱图



(a) C 1s 谱图 (b) O 1s 谱图



(c) 未处理 Ga 3d 谱图 (d) 预处理后 Ga 3d 谱图



(e) 未处理 N 1s 谱图 (f) 预处理后 N 1s 谱图

图 7 未处理和预处理后 GaN 薄膜的 XPS 谱图

表 1 列出了未处理与预处理后生长 GaN 薄膜中各元素的原子百分比。衬底经预处理后，GaN 中的杂质含量明显降低，C，O 杂质的原子百分含量分别由 5.2%，12.7%降低至 1.4%，3.8%。C 含量的下降说明 N_2/H_2 等离子体处理有助于消除 C 污染，即 TEG 前驱体中的乙基基团。O 含量的下降说明衬底表面的含氧基团被等离子体产生的 $-NH_x$ 基团所取代。另外，经衬底预处理后，Ga∶N 原子比从 1.19∶1 降低至 1.05∶1，更接近等化学计量比。而使用 PEALD 生长的 GaN 薄膜常存在杂质含量高、Ga∶N 原子比非化学计量比的问题[15]。该结果说明使用衬底预处理的方式有助于获得元素比例更优、杂质含量更低的 GaN 薄膜。

表 1 GaN 薄膜中的各元素原子百分比

元素	Ga	N	C	O
未处理	44.6%	37.5%	5.2%	12.7%
预处理后	48.6%	46.2%	1.4%	3.8%

图 8 为未处理及预处理后 GaN 薄膜的吸收谱图，插图为光学带隙拟合图。根据式(4)，未处理生长 GaN 薄膜带隙为 3.55 eV，预处理后生长 GaN 薄膜带隙为 3.48 eV，更接近本征 GaN 带隙值(3.40 eV)。后者带隙的下降可能是由于预处理后薄膜的晶体质量更高、杂质含量更少所致。

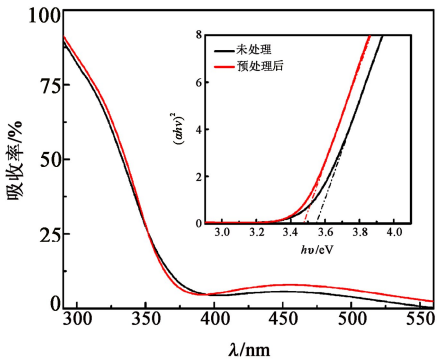


图 8 未处理及预处理后 GaN 薄膜的吸收率和拟合带隙图

使用室温霍尔效应测试仪对样品的电学性能进行表征及分析，结果如表 2 所示。测试结果表明两种样品均为 n 型导电。当对衬底进行氮等离子体预处理后，生长得到的 GaN 薄膜的电阻率由 $1.835\times10^{-1}\ \Omega\cdot cm$ 降低至 $2.560\times10^{-2}\ \Omega\cdot cm$，载流子浓度由 $5.180\times10^{19}\ cm^{-3}$ 降低至 $1.876\times10^{19}\ cm^{-3}$，迁移率由 $2.88\ cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}$ 增大到 $13.04\ cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}$。通常情况下，N 空位和 O 杂质导致 GaN 内部存在浅施主能级，从而使得非故意掺杂态 GaN 呈 n 型导

电，电子浓度在 $10^{17}\sim10^{19}$ cm^{-3}[20]，高的电子浓度与薄膜中存在的 C，O 两种杂质有关[21]，离子杂质的扩散会限制 GaN 薄膜的霍尔迁移率[22]。因此，载流子浓度的降低及迁移率的增大与 O 杂质、N 空位缺陷的减少有关，与 XPS 结果一致。

表 2　未处理与预处理后 GaN 薄膜的电学参数

样品	电阻率/(Ω·cm)	载流子浓度/cm^{-3}	载流子迁移率/($cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}$)
未处理	1.835×10^{-1}	5.180×10^{19}	2.88
预处理后	2.560×10^{-2}	1.876×10^{19}	13.04

3　结论

采用 PEALD 沉积法，在蓝宝石衬底上生长了 GaN 薄膜。对薄膜样品的结构、形貌、成分及电学性能分析结果表明，对蓝宝石衬底进行氮等离子预处理后生长的 GaN 薄膜沿(002)晶面高度取向生长，Ga∶N 原子比接近化学计量比，且薄膜的光电性能得到明显提升。本工作结果说明，采用 PEALD 沉积法制备 GaN 薄膜时，通过对蓝宝石衬底进行氮等离子体预处理，可以实现高质量 GaN 薄膜的低温异质外延。

参考文献：

[1] Chen Fei, Ji Xiaohong, Lau Shuping. Recent progress in group Ⅲ-nitride nanostructures: from materials to applications [J]. Materials Science & Engineering R: Reports, 2020, 142: 100578.

[2] Li Guoqiang, Wang Wenliang, Yang Weijia, et al. GaN-based light-emitting diodes on various substrates: a critical review [J]. Reports on Progress in Phys., 2016, 79(5): 056501.

[3] Tang Liu, Tang Bo, Zhang Hong, et al. Review-Review of research on AlGaN MOCVD growth[J]. ECS J. of Solid State Science and Technol., 2020, 9(2): 024009.

[4] Li Yuan, Wang Wenliang, Li Xiaochan, et al. Stress and dislocation control of GaN epitaxial films grown on Si substrates and their application in high-performance light-emitting diodes[J]. J. of Alloys and Compounds, 2019, 771: 1000-1008.

[5] Zhang Lei, Yu Jiaoxian, Hao Xiaopeng, et al. Influence of stress in GaN crystals grown by HVPE on MOCVD-GaN/6H-SiC substrate[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 4179.

[6] Wu Yaozheng, Liu Bin, Li Zhenhua, et al. Homo-epitaxial growth of high crystal quality GaN thin films by plasma assisted-molecular beam epitaxy[J]. J. of Crystal Growth, 2019, 506: 30-35.

[7] Dewan S, Tomar M, Tandon R P, et al. In-situ and post deposition analysis of laser MBE deposited GaN films at varying nitrogen gas flow[J]. Vacuum, 2019, 164: 72-76.

[8] Zhu D, Wallis D J, Humphreys C J. Prospects of Ⅲ-nitride optoelectronics grown on Si[J]. Reports on Progress in Phys., 2013, 76(10): 106501.

[9] 刘一兵，黄新民，刘国华. GaN 基材料及其外延生长技术研究[J]. 微纳电子技术，2008，45(3)：153-157.
Liu Yibing, Huang Xinmin, Liu Guohua. Research for GaN-based materials and epitaxy growth technologies [J]. Micronanoelectronic Technol., 2008, 45(3): 153-157.

[10] Liu L, Edgar J H. Substrates for gallium nitride epitaxy[J]. Materials Science & Engineering R: Reports, 2002, 37(3): 61-127.

[11] Schwartz G, Tee B C K, Mei J G, et al. Flexible polymer transistors with high pressure sensitivity for application in electronic skin and health monitoring [J]. Nature Communications, 2013, 4: 1859.

[12] Biyikli N, Haider A. Atomic layer deposition: an enabling technology for the growth of functional nanoscale semiconductors[J]. Semiconductor Science and Technol., 2017, 32(9): 093002.

[13] 冯嘉恒，唐立丹，刘邦武，等. 等离子增强原子层沉积低温生长 AlN 薄膜[J]. 物理学报，2013，62(11)：446-451.
Feng Jiaheng, Tang Lidan, Liu Bangwu, et al. Low-temperature growth of AlN thin films by plasma-enhanced atomic layer deposition[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(11): 446-451.

[14] Kim O H, Kim D, Anderson T. Atomic layer deposition of GaN using $GaCl_3$ and NH_3[J]. J. of Vacuum Science & Technol. A, 2009, 27(4): 923-928.

[15] Ozgit-Akgun C, Goldenberg E, Okyay A K, et al. Hollow cathode plasma-assisted atomic layer deposition of crystalline AlN, GaN and $Al_xGa_{1-x}N$ thin films at low temperatures [J]. J. of Materials Chemistry C, 2014, 2(12): 2123-2136.

[16] Lee Weihao, Yin Yutung, Cheng Pohsien, et al. Nanoscale GaN epilayer grown by atomic layer annealing and epitaxy at low temperature [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(1): 487-495.

[17] Lyons J L, Janotti A, Van de Walle C G. Carbon impurities and the yellow luminescence in GaN[J]. Appl. Phys. Lett., 2010, 97(15): 152108.

[18] 汤文辉，刘邦武，张柏诚，等. 等离子增强原子层沉积低温生长 GaN 薄膜[J]. 物理学报，2017，66(9)：338-343.
Tang Wenhui, Liu Bangwu, Zhang Bocheng, et al. Low temperature depositions of GaN thin films by plasma-enhanced atomic layer deposition[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(9): 338-343.

[19] Butcher K S A, Afifuddin, Tansley T L, et al. Gallium and oxygen accumulations on gallium nitride surfaces following argon ion milling in ultra-high vacuum conditions[J]. Appl. Surface Science, 2004, 230(1/4): 18-23.

(下转第 417 页)

[17] Wakin M B, Laska J N, Duarte M F, et al. Compressive imaging for video representation and coding[C]// Proc. of the Picture Coding Symposium, 2006.

[18] Romberg J. Imaging via compressive sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 14-20.

[19] Kim J, Lee J K, Lee K M. Accurate image super-resolution using very deep convolutional networks[C]// Proc. 2016 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 1646-1654.

[20] Kim J, Lee J K, Lee K M. Deeply-recursive convolutional network for image super-resolution [C]// Proc. IEEE Confer. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016.

[21] Ledig C, Theis L, Huszar F, et al. Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network [C]//Proc. IEEE Confer. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017.

[22] Shi W, Caballero J, Huszar F, et al. Real-time single image and video super-resolution using an efficient sub-pixel convolutional neural network[C]//Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 1874-1883.

[23] Ledig C, Wang Z, Shi W, et al. Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network[C]// Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 105-114.

[24] Zhang R, Isola P, Efros A A, et al. The unreasonable effectiveness of deep features as a perceptual metric[C]//Proc. IEEE/CVF Conf. on Computer Vision & Pattern Recognition, 2018.

[25] Chao D, Chen C L, He K, et al. Learning a deep convolutional network for image super-resolution[C]//Proc. European Conf. on Computer Vision, 2014: 184-199.

[26] He K, Zhang X, Ren S, et al. Deep residual learning for image recognition [C]//Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 770-778.

[27] Szegedy C, Ioffe S, Vanhoucke V, et al. Inceptionv4, inception-resnet and the impact of residual connections on learning[C]// IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016.

[28] Gan L. Block compressed sensing of natural images[C]// Proc. of the Inter. Conf. on Digital Signal Processing, 2007: 403-406.

[29] Fowler J E. Block-based compressed sensing of images and video[J]. Foundations and Trends in Signal Processing, 2012, 4(4): 297-416.

[30] Paszke A, Gross S, Chintala S, et al. Automatic differentiation in PyTorch [C]// NIPS 2017 Autodiff Workshop: The Future of Gradient-based Machine Learning Software and Techniques, 2017.

[31] Zhao H, Gallo O, Frosio I, et al. Loss functions for neural networks for image processing[J]. Computer Science, 2015: 1511.08861.

作者简介：

魏子然(1994—)，男，博士研究生，研究方向为信号压缩与恢复、压缩感知信号处理与图像重建技术，以及单像素成像技术。

(上接第 370 页)

[29] Bejan A. Designed porous media: maximal heat transfer density at decreasing length scales[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2004, 47(14-16): 3073-3083.

[30] Azoumah Y, Neveu P, Mazet N. Constructal design combined with entropy generation minimization for solid-gas reactors[J]. Int. J. Therm. Sci., 2006, 45(7): 716-728.

[31] Lorente S, Bejan A. Heterogeneous porous media as multiscale structures for maximum flow access[J]. J. Appl. Phys., 2006, 100(11): 114909.

[32] Zhou S B, Chen L G, Sun F R. Constructal entropy generation minimization for heat and mass transfer in a solid-gas reactor based on triangular element[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2007, 40(11): 3545-3550.

作者简介：

李文龙(1992—)，男，硕士研究生，研究方向为电子器件热管理与热设计；

谢志辉(1977—)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为现代热力学、先进热管理理论与技术。

(上接第 379 页)

[20] Look D C, Molnar R J. Degenerate layer at GaN/sapphire interface: influence on Hall-effect measurements[J]. Appl. Phys. Lett., 1997, 70(25): 3377-3379.

[21] Van de Walle C G, Neugebauer J. First-principles calculations for defects and impurities: applications to Ⅲ-nitrides[J]. J. of Appl. Phys., 2004, 95(8): 3851-3879.

[22] Li G, Chua S J, Wang W. The Hall mobility and its relationship to the persistent photoconductivity of undoped GaN[J]. Solid State Communications, 1999, 111(11): 659-663.

作者简介：

李　佳(1995—)，男，湖北钟祥人，硕士研究生，主要从事 GaN 宽禁带半导体薄膜材料的制备及性能研究；

季小红(1972—)，女，江苏南通人，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为光电材料的制备、性能和应用研究。