电学特性原位 Mg掺杂 β-Ga_2O_3 电流-垂直器件的阻挡层

Sudipto Saha[1,a)], Lingyu Meng[2], A F M Anhar Uddin Bhuiyan[2], Ankit Sharma[1],Chinmoy

美国 *14260*

[2]俄亥俄州立大学电气与计算机工程系，美国俄亥俄州哥伦布 *43016*

[3]材料科学与工程系，俄亥俄州立大学，美国俄亥俄州哥伦布，*43016*

缺乏 p 型掺杂阻碍了垂直氧化镓（Ga_2O_3）器件的发展。采用注入深能级受主的电流阻挡

a) 电子邮件：sudiptos@buffalo.edu，电话：701-793-7192b) 电子邮件：uttamsin@buffalo.edu，电话：716-645-1536

近年来，随着硅基技术逐渐接近其性能极限，开发用于先进电力电子应用的超宽禁带（UWBG）半导体材料已成为日益明显的趋势[1–3]。单斜晶系β-Ga_2O_3具有较高的带隙、Johnson 优值（JFOM）和 Baliga 优值（BFOM），有望在开关效率和功率转换密度方面优于其他宽禁带器件[4–10]。这些特性使 Ga_2O_3 成为高压和大功率开关器件的理想选择，这类器件还有望在升高温度下工作。此外，用于制造高质量、大面积 Ga_2O_3 晶圆的成熟熔体生长技术，以及在较大范围内控制 n 型掺杂的能力，使其有别于其他 UWBG 材料[11–20]。多年来，研究人员已对各种高性能横向 Ga_2O_3 MOSFET进行了研究，这些器件具有较高的击穿电压和功率器件优值[21–26]。

然而，对于高电压和高功率应用而言，垂直器件优于横向结构，因为峰值电场被埋藏在体材料内部，从而避免了表面效应[20,27]。此外，垂直 Ga_2O_3 金属氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET）的击穿电压可通过漂移层厚度进行调节，即在不牺牲芯片面积的情况下实现更高的阻挡电压[20]。由于 Ga_2O_3, 缺乏浅受主型掺杂剂，垂直 Ga_2O_3 器件的性能仍然落后。传统掺杂物种较大的有效空穴质量和较高的激活能导致了 Ga_2O_3[28–33]中的这种 p 型导电性问题。研究人员已采用离子注入电流阻挡层（CBL）展示了垂直器件[20,34–36]。CBL 层采用深能级受主物种[36,37]形成绝缘层，用于调控垂直 MOSFET 中的电场。它在源极和漏极之间形成势垒，并允许电流通过漂移层中预定的孔径流动。

通过原位外延实现电荷补偿，相较于异位离子注入工艺具有多项优势。高能离子注入以及随后在高温下（对于 Ga_2O_3超过 1000° C）进行的热退火过程会在晶格中造成位移损伤，并引起掺杂剂和点缺陷的热扩散 [38–41]。原位外延绝缘层可以灵活生长，避免了高温下 Ga_2O_3 中受主的高扩散性与异位离子注入后晶体恢复和掺杂剂激活所需的高温之间的矛盾。在 Ga_2O_3, 的各种受主中，Mg 和 N杂质通常因其在 Ga_2O_3 [40,42]中的深受主特性而被采用。Mg 掺杂是一种颇具吸引力的选择，因为与其他阳离子位受主相比，根据 DFT计算，其具有相对较浅的受主能级以及最低的形成能和激活能之一 [43,44]。近期的电子顺磁共振（EPR）测量确定，镁的受主跃迁能级位于价带以上 0.65 eV 处，而不是理论预测的更高数值 >1 eV [45–49]。近期实验研究还表明，Mg 受主在 Ga_2O_3中具有半绝缘特性，因为在原位 Mg 掺杂 Ga_2O_3 薄膜中，Mg 可有效俘获来自衬底/外延层生长界面的电子，从而降低 n 型 Ga_2O_3 的导电性 [39]。然而，目前仍缺乏对原位Ga_2O_3 外延中 Mg掺入及其电学性质的深入研究。

在本研究中，我们研究了用于未来垂直器件的原位Mg掺杂Ga_2O_3 CBL的电学性质。所设计结构采用金属有机化学气相沉积（MOCVD）生长。我们系统研究了原位Mg掺杂Ga_2O_3CBL的电学性质。我们详细研究了Ga_2O_3 薄膜中电学行为对Mg掺杂浓度的依赖性，包括室温下以及随升高温度变化的情况。Ga_2O_3 中原位Mg受主掺杂将为设计和制造高性能垂直Ga_2O_3 功率器件提供灵活性。

三个Ga_2O_3薄膜通过MOCVD生长在商业Sn掺杂的（010）取向Ga_2O_3 衬底上，采用三种不同的Mg掺杂浓度，分别标记为S1、S2和S3。在装载到生长系统之前，首先使用丙酮、异丙醇和去离子水清洁衬底表面。UID层和Mg 原位掺杂层使用 三甲基镓（TMGa）作为 Ga 前驱体，使用高纯度O_2 气体进行氧化，并以氩气（Ar）作为载气。Si掺杂n+ 层和Mg尾层（UID）按照先前确立的生长条件生长，使用三乙基镓（TEGa）作为镓前驱体[50]。通过使用双（环戊二烯基）镁（Cp_2Mg）作为前驱体引入Mg掺杂。使用TMGa的层的生长温度设定为880 ¨ ¬TEGa的层的生长温度设定为700°C，生长压力固定为60 Torr。通过改变Mg前驱体的摩尔流量来调节Mg掺杂浓度（S1：106.6nmol/min，S2：25.6nmol/min和S3：6.4 nmol/min）。在这些条件下，S1、S2和S3分别获得了7.15×10^{18}、8.25×10^{17}和$2\times10^{17}cm^{-3}$ 的平均浓度（图1(b)）。如图1(a)所示，在多层堆叠结构上采用定量二次离子质谱（SIMS），以定量探测Mg及其他杂质元素的杂质分布。该堆叠结构生长在Fe掺杂衬底上，并保持与S1、S2和S3样品相同的生长条件。图1(b)显示了该样品层堆叠结构中包括Mg、H和C在内的选定元素的SIMS深度剖面。随着Mg流量降低，每个子层中的Mg浓度单调下降。图1(a)中三个层所达到的峰值Mg浓度（从上到下）分别为1.5×10^{19}、1.75×10^{18}和3×10^{17} cm^{-3}。在880 °C的生长温度下，从SIMS深度剖面中观察到明显的Mg扩散。在设计器件结构时考虑了扩散的影响，并在其中确定了Mg尾层。

用于电学测试的器件结构示意剖面图如图2所示。三个器件的外延结构均生长在 (010) β-Ga_2O_3 衬底上，由下至上依次为：~0.4 μm Si掺杂 n^+ β-Ga_2O_3 层（4.0×10^{19} cm^{-3}）、~0.25 μm UID层、~0.25 μm 原位Mg掺杂 β-Ga_2O_3 层、~0.15 μm Mg尾层，以及~0.5 μm Si掺杂 n^+β-Ga_2O_3 层（1×10^{20} cm^{-3}）。制备的三个样品之间唯一的差异是Mg掺杂浓度。S1、S2和S3的平均Mg浓度分别为7.15×10^{18} cm^{-3}、8.25×10^{17} cm^{-3}和2×10^{17} cm^{-}。制程首先采用BCl_3进行背面反应离子刻蚀（RIE）；此步骤共刻蚀了1 μm厚的Ga_2O_3 。随后通过电子束蒸发沉积Ti/Au欧姆金属叠层，并在N_2 气氛中于470 0C快速热退火（RTA）1分钟。接着通过电子束光刻定义顶部Ti/Au/Ni欧姆接触，然后在N_2 气氛中于470 0C快速热退火1分钟。采用BCl_3/Ar进行自对准RIE，以刻蚀~1.2 μm Ga_2O_3 直至到达底部n^+ 层，并以顶部Ni作为刻蚀掩膜。最后，在n^+ 层上沉积底部Ti/Au欧姆金属叠层，然后在N_2 气氛中于470 0C快速热退火1分钟。器件制备完成后，使用HP 4155B半导体参数分析仪进行电流密度-电压（J-V）测量。采用顶部和背面金属接触进行双探针测量，如图2(a)所示，并分别称为垂直测量和准垂直测量。测试前，已验证底部接触与背面接触之间具有欧姆特性。本文讨论的垂直测量和准垂直测量所得J-V结果呈现相似趋势。采用Auriga AU-5高压脉冲电流-电压（I-V）测试系统进行脉冲电流-电压测量，以研究Mg掺杂电流阻挡层的动态行为；该系统的上升和下降时间均为20 ns，且占空比较低。脉冲宽度从1 ms变化至10 μs。测量器件前，系统已在室温下完成校准。为研究电流

阻挡层中的载流子补偿效应，进行了标准反向偏置电容-电压（C-V）测量

使用 Agilent 4294A 精密阻抗分析仪进行测量。如图 3(a) 所示，所有电流阻挡层结构均表现出电流阻挡行为。然而，如图 3(b) 所示，电流阻挡能力随 Mg掺杂浓度线性变化。S1 的 Mg掺杂浓度最高（7.15×10^{18} cm^{-3}），其电流阻挡能力出色，最大正向电流阻挡电压 F_{bl} 为 19 V，最大反向电流阻挡电压 R_{bl} 为 22.37 V。Mg 掺杂浓度最低的 S3 （ 2×10^{17} cm^{-3}）仅能阻挡 -0.83 V 至 +2.18 V。因此，实验结果表明，电流阻挡层中较高的 Mg 掺杂浓度会带来更强的阻挡能力，这有利于功率器件的制备。图 4 展示了 S1、S2 和 S3 电流阻挡层结构的电流密度（J）与电压（V）特性的温度依赖性。三个电流阻挡层样品的 J-V 曲线均表明，随着温度升高，正向阻挡能力逐渐向较低偏置侧移动，这意味着电子输运的热贡献增加。温度升高时，三个电流阻挡层的反向电流密度也几乎都单调增加。这是因为在升高温度下，电子获得更高能量以克服能垒， 从而导致电流阻挡电压降低。因此，电流阻挡层结构的温度升高时，阻挡电压范围也相应缩小。图 5 展示了三个电流阻挡层器件 S1、S2 和 S3 的直流和脉冲 J-V 测量结果，未观察到明显的色散。所有结构在脉冲条件下均能够阻挡电流，这排除了在原位原位掺杂过程中引入电活性陷阱的可能性。

图 6(a) 展示了三个受测电流阻挡层的 C-V 曲线。所有器件的电流阻挡部分均呈现近乎平坦的 C-V 特性，这支持了以下观点：器件中的电流

不同镁掺杂浓度器件的阻断区已得到完全补偿，且自由电荷浓度非常低。为观察击穿，在两个样品中各选取少数器件施加反向偏置。S1 样品中的器件在 45 V 至 59 V 发生破坏性击穿。同样，S2 样品中的器件在 28 V 至 83 V 之间发生破坏性击穿。图 6(b) 和图 6(c) 分别展示了 S1 和 S2 电流阻挡层的反向电流密度-电压特性。S1 的最大破坏性击穿对应击穿电压 (V_{br}) 为 -59 V，而 S2 的最大破坏性击穿对应 V_{br} = 为 -83 V，平均场强分别为 2.4 MV/cm 和 3.4 MV/cm。

开展了 ATLAS SILVACO仿真以了解阻断特性。仿真中使用的材料参数列于表 I。仿真中采用了 SRH复合模型、俄歇复合模型和Lombardi模型。β-Ga_2O_3 的碰撞电离参数取自一项详细的第一性原理理论研究[51]。首先，调整镁掺杂层的掺杂浓度，使三种结构的仿真电流阻挡区与实验电流阻挡能力相匹配，如图 8所示。Mg掺杂浓度为$1.35 \times 10^{17} cm^{-3}$ 的技术计算机辅助设计仿真S1结构与制备器件S1的电流阻挡特性相匹配，后者的平均镁掺杂浓度为$7.15 \times 10^{18} cm^{-3}$，由此引出了有效掺杂的概念。有效掺杂仅为镁掺杂层目标掺杂浓度的 1.88%。S2 和S3 也呈现出类似趋势。S3的有效掺杂最高（11.25%），并且随着镁掺杂浓度的增加，有效掺杂率逐渐降低（表II）。对有效掺杂的理解还需要更加仔细的研究。较高 Mg掺杂浓度下有效掺杂的急剧下降可能是由于补偿施主缺陷的形成 [28] 以及 Mg 掺入间隙位所致。

图7(a)中三个电流阻挡层样品的导带图表明，S1的势垒高度高于S2和S3样品。由于具有最高的镁掺杂浓度，S1的费米能级比S2和S3更接近价带；当n^+和镁掺杂层的费米能级匹配时，这会导致平衡态下更大的能带弯曲。如图2所示，由于Ga_2O_3中的镁扩散率较高，顶部n^+与镁掺杂区之间存在一个150nm的镁拖尾区。TCAD器件结构还考虑了一个150nm的梯度镁掺杂区。如图7(b)所示，在零偏压条件下，n^+与镁掺杂结处的能带弯曲更为明显；与镁掺杂层的中心区域相比，界面处的镁激活程度高得多，而中心区域的能带基本平坦。在全部三个电流阻挡层结构中均发现了这一趋势。制备的S1样品在室温下阻挡−22.37 V至19 V，其平均镁掺杂浓度为$7.15 \times 10^{18}\ cm^{-3}$。随着Mg浓度降低，阻挡范围也随之减小（图8）；这可以由以下事实解释：在零偏压下，随着掺杂密度降低，n^+与镁掺杂区之间的导带势垒减小，如图6(b)所示，其中红色、蓝色和绿色曲线分别代表7.15×10^{18}、8.25×10^{17}和$2\times10^{17}\ cm^{-3}$。

总之，本研究首次成功地通过在不同浓度下进行原位Mg掺杂，为垂直氧化镓（Ga_2O_3）器件制备了电流阻挡层（CBLs）。研究探讨了器件的电学行为，并讨论了电流-电压特性对温度和Mg掺杂浓度的依赖关系。结果明确表明，Mg掺杂浓度对电流阻挡范围起着至关重要的作用，较高的掺杂浓度可增强电流阻挡能力。研究还进行了TCAD SILVACO仿真，以优化镁掺杂浓度，使仿真的电流-电压特性与实验结果相符，

并提出了有效掺杂的概念。随着目标镁掺杂浓度的增加，施主型缺陷的影响变得更加显著，有效掺杂随之降低。这些发现表明，采用原位Mg掺杂方法制备电流阻挡层，是实现高性能Ga_2O_3 垂直器件的可行途径，也将有助于推动Ga_2O_3器件的研发。通过优化生长条件以减少缺陷形成，还可以进一步提升性能。本研究对电力电子领域作出了重要贡献，相信会引起研究人员和从业者的广泛兴趣。

致谢

我们感谢 AFOSR（空军科学研究办公室）通过项目编号 FA9550-18-1-0479（项目经理：Ali Sayir）提供的支持，感谢 NSF 通过项目编号 ECCS 2019749 提供的支持，以及 II-VI基金会整批赠款计划的支持。本研究使用了通过 NSF MRI奖项 ECCS 1919798 购置的电子束光刻系统。

数据可用性声明

本研究结果所依据的数据可根据合理请求向通讯作者获取。

参考文献

[1] A.Q. Huang，“面向智能电网和可再生能源系统的功率半导体器件”，《可再生能源系统与智能电网中的电力电子：技术与应用》，85–152（2019年）。[2] Y. Zhang 和 T. Palacios，“（超）宽禁带垂直功率 FinFET”，IEEE Trans Electron Devices**67**(10)，3960–3971（2020年）。

[3] A.Q. Huang，“面向智能电网和可再生能源系统的功率半导体器件”，《可再生能源系统与智能电网中的电力电子：技术与应用》，85–152（2019年）。[4] H. Amano、Y. Baines、E. Beam、M. Borga、T. Bouchet、P.R. Chalker、M. Charles、K.J. Chen、N. Chowdhury 和 R. Chu，“2018年氮化镓电力电子路线图”，《物理学杂志D：应用物理》**51**(16)，163001（2018年）。[5] M. Higashiwaki、A. Kuramata、H. Murakami 和 Y. Kumagai，“氧化镓功率器件的先进技术”，《物理学杂志D：应用物理》**50**(33)，333002（2017年）。

[6] Z. Hu、H. Zhou、Q. Feng、J. Zhang、C. Zhang、K. Dang、Y. Cai、Z. Feng、Y. Gao 和 X. Kang，“采用场板结构的横向 $\beta $-Ga 2 O 3 肖特基势垒二极管，具有超过 3 kV 的高反向阻断电压和 500 MW/cm 2 的高直流功率品质因数”，IEEE电子器件快报 **39**(10)，1564–1567（2018年）。

[7] J.Y. Tsao、S. Chowdhury、M.A. Hollis、D. Jena、N.M. Johnson、K.A. Jones、R.J. Kaplar、S. Rajan、C.G. van de Walle 和 E. Bellotti，“超宽禁带半导体：研究机遇与挑战”，《先进电子材料》**4**(1)，1600501（2018年）。

[8] J. Yang、C. Fares、R. Elhassani、M. Xian、F. Ren、S.J. Pearton、M. Tadjer 和 A. Kuramata，“大面积、场板结构的垂直 β-Ga2O3 整流器中的反向击穿”，《ECS固态科学与技术杂志》**8**(7)，Q3159（2019年）。

[9] A.Q. Huang，“面向智能电网和可再生能源系统的功率半导体器件”，《可再生能源系统与智能电网中的电力电子：技术与应用》，85–152（2019年）。[10] X. She、A.Q. Huang、O. Lucia 和 B. Ozpineci，“ 碳化硅功率器件及其应用综述 ”，《 IEEE 工业电子学汇刊》 **64**(10)，8193–8205（2017年）。

[11] T. Onuma、S. Saito、K. Sasaki、T. Masui、T. Yamaguchi、T. Honda 和 M. Higashiwaki，“通过偏振透射与反射光谱学研究β-Ga2O3中的价带排序”，日本应用物理学杂志**54**(11)，112601（2015年）。

[12] M. Higashiwaki 和 G.H. Jessen，“客座社论：氧化镓微电子学的黎明”，Appl Phys Lett **112**(6)，060401（2008年）。

[13] E.G. Víllora、K. Shimamura、Y. Yoshikawa、K. Aoki 和 N. Ichinose，“大尺寸 β-Ga2O3 单晶和晶圆”，晶体生长杂志 **270**(3–4)，420–426（2004年）。

[14] A. Kuramata、K. Koshi、S. Watanabe、Y. Yamaoka、T. Masui 和 S. Yamakoshi，“通过边缘限定薄膜供料生长法生长的高质量 β-Ga2O3 单晶”，日本应用物理学杂志 **55**(12)，1202A2（2016年）。

[15] H. Aida、K. Nishiguchi、H. Takeda、N. Aota、K. Sunakawa 和 Y. Yaguchi，“通过边缘限定薄膜供料生长法生长 β-Ga2O3 单晶”，日本应用物理学杂志 **47**(11R)，8506（2008年）。

[16]W.Li、Z.Hu、K. Nomoto、Z. Zhang、J.-Y. Hsu、Q.T. Thieu、K. Sasaki、A. Kuramata、D.Jena 和H.G.Xing，“具有< 1 μ A/cm2超低漏电流的1230 V β-Ga2O3沟槽肖特基势垒二极管”，Appl Phys Lett **113**(20)，202101（2018年）。

[17] Y. Yao、R.F.Davis和 L.M. Porter，“不同金属作为 β-Ga2O3 欧姆接触的研究：电学行为、形貌及其他物理性质的比较与分析”，电子材料杂志**46**(4)，2053–2060（2017年）。

[18] M. Higashiwaki, K. Sasaki, T. Kamimura,M.H.Wong,and D. Krishnamurthy,“在 β-Ga2O3 (010)衬底上及其器件特性的温度依赖性,” Appl PhysLett **103**, 123511 (2013年)。

[19] M.H. Wong、K. Sasaki、A. Kuramata、S. Yamakoshi 和 M. Higashiwaki，“击穿电压超过 750 V 的场板式 Ga2O3 MOSFET”，IEEE电子器件快报 **37**(2)，212–215（2015年）。

[20] M.H. Wong、K. Goto、Y. Morikawa、A. Kuramata、S. Yamakoshi、H. Murakami、Y. Kumagai 和 M. Higashiwaki，“采用 Mg 掺杂阻挡层的全离子注入平面栅电流孔径垂直式 Ga2O3 MOSFET”，Applied Physics Express **11**(6)，064102（2018年）。

[21] S. Sharma、K. Zeng、S.Saha 和 U.Singisetti，“采用聚合物钝化和 8.03 kV 击穿电压的场板横向 Ga 2 O 3 MOSFET”，IEEE电子器件快报**41**(6)，836–839（2020年）。

[22]Y.Lv, H. Liu, X. Zhou, Y. Wang, X. Song, Y. Cai, Q. Yan,C. Wang, S. Liang,andJ.Zhang,“具有 277 MW/cm 2高功率优值的横向β-Ga 2 O 3MOSFET，” IEEE电子器件快报 **41**(4), 537– 540 (2020年)。

[23] C. Wang、H. Zhou、J. Zhang、W. Mu、J. Wei、Z. Jia、X. Zheng、X. Luo、X. Tao 和 Y. Hao，“具有 0.74/0.28 GW/cm2 的 BV2/Ron, sp 的无迟滞及 μs 开关 D/E 模式 Ga2O3 异质结 FET”，Appl Phys Lett **120**(11), 112101（2022年）。

[24] Y. Lv、X. Zhou、S. Long、X. Song、Y. Wang、S. Liang、Z. He、T. Han、X. Tan 和 Z. Feng，“源极场板 β-Ga2O3 MOSFET，功率优值创纪录，达到 50.4 MW/cm 2”，IEEE电子器件快报 **40**(1), 83–86（2018年）。

[25] H. Zhou、K. Maize、G. Qiu、A. Shakouri 和 P.D. Ye，“β-Ga2O3 绝缘体上场效应晶体管，漏极电流超过 1.5 A/mm 及其自热效应”，Appl Phys Lett **111**(9), 092102（2017年）。[26] K. Zeng、A. Vaidya 和 U. Singisetti，“横向场板 Ga 2 O 3 MOSFET 的击穿电压达到 1.85 kV”，IEEE电子器件快报 **39**(9), 1385–1388（2018年）。

[27] S. Saha、L. Meng、Z. Feng、A.F.M. Anhar Uddin Bhuiyan、H. Zhao 和 U. Singisetti，“在 (010) 和 (001) Ga2O3 衬底上高速生长 LPCVD β-Ga2O3薄膜的肖特基二极管特性”，Appl Phys Lett **120**(12), 122106 (2022年)。

[28] H. Peelaers、J.L. Lyons、J.B. Varley 和 C.G. van de Walle，“Ga2O3 中的深受主及其扩散”，APL Mater **7**(2), 022519（2019年）。

[29] T. Gake、Y. Kumagai 和 F. Oba，“Ga 2 O 3 多晶型中自陷空穴和受主杂质的第一性原理研究”，Phys Rev Mater **3**(4), 044603 (2019年)。

[30] H. He、R. Orlando、M.A. Blanco、R. Pandey、E. Amzallag、I. Baraille 和 M. Rérat，“单斜相和六方相 Ga 2 O 3 的结构、电子结构和光学性质的第一性原理研究”，Phys Rev B **74**(19), 195123 (2006)。

[31] A. Kyrtsos、M. Matsubara 和 E. Bellotti，“p 型 Ga2O3 的可行性”，Appl Phys Lett **112**(3), 032108 (2018年)。

[32] K. Yamaguchi，“β-Ga2O3 电子结构的第一性原理研究”，Solid State Commun**131**(12), 739–744 (2004年)。

[33] J.L. Lyons，“受主掺杂剂在β-Ga2O3中的综述”，Semicond Sci Technol **33**(5)，05LT02（2018年）。

[34] M.H. Wong、K. Goto、A. Kuramata、S. Yamakoshi、H. Murakami、Y. Kumagai 和 M. Higashiwaki，载于*2017*年第*75*届年度器件研究会议（*DRC*）（IEEE，2017年），第1–2页。

[35] M.H. Wong、H. Murakami、Y. Kumagai 和 M. Higashiwaki，“带有N离子注入阻挡层的增强型$\beta $-Ga 2 O 3电流孔径垂直MOSFET”，IEEE电子器件快报**41**(2)，296–299（2019年）。

[36] M.H. Wong, K. Goto, H. Murakami, Y. Kumagai, and M. Higashiwaki，《通过N和Si离子注入掺杂制备的电流孔径垂直$\beta $-Ga 2 O 3 MOSFET》，IEEE电子器件快报**40**(3), 431–434（2018年）。

[37] K. Tetzner、A. Thies、E. Bahat Treidel、F. Brunner、G. Wagner 和 J. Würfl，《利用多能量氮离子注入对β-Ga2O3进行选择性区域隔离》，Appl Phys Lett **113**(17), 172104 (2018年)。
[38] M.H. Wong、H. Murakami、Y. Kumagai 和 M. Higashiwaki，《离子注入电流孔径垂直型β-Ga2O3 MOSFET 中的孔径限制导电及其可能机制》，Appl Phys Lett**118**(1), 012102 (2021)。

[39] Z. Feng, A.F.M.A.U. Bhuiyan, N.K. Kalarickal, S. Rajan 和 H. Zhao，“MOCVD 生长的（010）β-Ga2O3 中的 Mg 受主掺杂”，Appl Phys Lett **117**(22), 222106（2020年）。

[40] M.H. Wong, C.-H. Lin, A. Kuramata, S. Yamakoshi, H. Murakami, Y. Kumagai 和 M. Higashiwaki，“通过 Mg 和 N 离子注入对 β-Ga2O3 进行受主掺杂”，Appl Phys Lett **113**(10), 102103（2018年）。

[41] K. Tetzner, E.B. Treidel, O. Hilt, A. Popp, S. bin Anooz, G. Wagner, A. Thies, K. Ickert, H. Gargouri 和 J. Würfl，“具有 155 MW/cm 2 功率优值的横向 1.8 kV $\beta $-Ga 2 O 3 MOSFET”，IEEE电子器件快报 **40**(9), 1503–1506（2019年）。

[42] A.T. Neal, S. Mou, S. Rafique, H. Zhao, E. Ahmadi, J.S. Speck, K.T. Stevens, J.D. Blevins, D.B. Thomson, and N. Moser, “β-Ga2O3中的施主和深受主”，Appl Phys Lett **113**(6), 062101（2018年）。

[43] J.L. Lyons, “β-Ga2O3受主掺杂剂综述”，Semicond Sci Technol **33**(5), 05LT02（2018年）。

[44] K. Zeng, R. Soman, Z. Bian, S. Jeong, and S. Chowdhury, “具有镁扩散电流阻挡层的垂直Ga2O3 MOSFET”，IEEE电子器件快报 **43**(9), 1527–1530（2022年）。

[45] C.A. Lenyk、T.D. Gustafson、S.A. Basun、L.E. Halliburton 和 N.C. Giles，“实验测定β-Ga2O3晶体中 Mg 受主的 (0/–) 能级”，Appl Phys Lett **116**(14), 142101（2020年）。

[46] B.E. Kananen、L.E. Halliburton、E.M. Scherrer、K.T. Stevens、G.K. Foundos、K.B. Chang 和 N.C. Giles，“对β-Ga2O3晶体中中性 Mg 受主的电子顺磁共振研究”，Appl Phys Lett**111**(7), 072102（2017年）。

[47] H. Peelaers, J.L. Lyons, J.B. Varley, andC.G.van de Walle, “深受主及其在 Ga2O3中的扩散，” APL Mater **7**(2), 022519 (2019年)。

[48] T. Gake、Y. Kumagai 和 F. Oba，“Ga 2 O 3 多晶型中自陷空穴和受主杂质的第一性原理研究”，Phys Rev Mater **3**(4)，044603（2019年）。

[49] B.E. Kananen,L.E.Halliburton, E.M. Scherrer,K.T. Stevens, G.K. Foundos,K.B.Chang,and N.C. Giles, “β-Ga2O3 晶体中中性 Mg 受主的电子顺磁共振研究，” Appl Phys Lett**111**(7), 072102 (2017年)。

[50] Z. Feng,A.F.M.Anhar Uddin Bhuiyan, M.R.Karim,and H.Zhao,“MOCVDSi掺杂（010）β-Ga2O3薄膜的同质外延及其优异的输运特性，” Appl Phys Lett **114**(25), 250601（2019年）。
[51]K. Ghosh, andU. Singisetti, “β-Ga2O3中的碰撞电离，” J ApplPhys **124**(8), 085707（2018年）。

[52] K. Ghosh 和 U. Singisetti，“单斜 β-Ga2O3 晶体中电子—声子耦合的从头计算”，Appl Phys Lett **109**(7), 072102（2016年）。

[53] K.Ghosh、U. Singisetti，“单斜β-Ga2O3中的电子迁移率——等离激元-声子耦合、各向异性和限域的影响”，材料研究杂志 **32**(22)，4142–4152（2017年）。

图注：

图1。（a）具有在不同Mg流量下生长的多层结构的Mg掺杂同质外延样品示意图；（b）样品层叠结构的SIMS杂质剖面。生长温度恒定为880 °C。

图2. 在 MOCVD (010) Ga_2O_3 上制备的电流阻挡层结构示意剖面图

图3. (a) S1、S2 和 S3 电流阻挡层结构在室温下的电流密度 (J)-电压 (V) 特性；(b) S1、S2 和 S3 结构的正向和反向电流阻挡能力

图4. 不同温度下的电流密度 (J)-电压 (V) 特性，显示温度对电流阻挡范围的影响：(a) S1；(b) S2；(c) S3

图5. 脉冲电流 (I)-电压 (V) 特性，显示 (a) S1、(b) S2 和 (c) S3 均无直流-射频色散

图6. (a) 室温下的电容-电压测量；(b) S1 样品不同器件的反向 J-V 特性，其中观察到的最大破坏性击穿发生在 V_{br} = -59 V。(c) S2 样品不同器件的反向 J-V 特性，其中观察到的最大破坏性击穿发生在 V_{br} = -83 V。

图 7。（a）零偏置下的能带图（插图为零偏置下的导带图），以及（b）S1、S2 和 S3 在零偏置下的电离受主浓度

图 8。实验电流密度-电压特性与技术计算机辅助设计 SILVACO 的比较

(a) S1、(b) S2 和 (c) S3 的模拟特性

表格题注：

表 I. SILVACO 技术计算机辅助设计仿真中的设计参数

表II.制备的电流阻挡层的Mg掺杂浓度以及用于匹配S1、S2和S3制备器件电流-电压特性的模拟Mg浓度

图：

图 1：

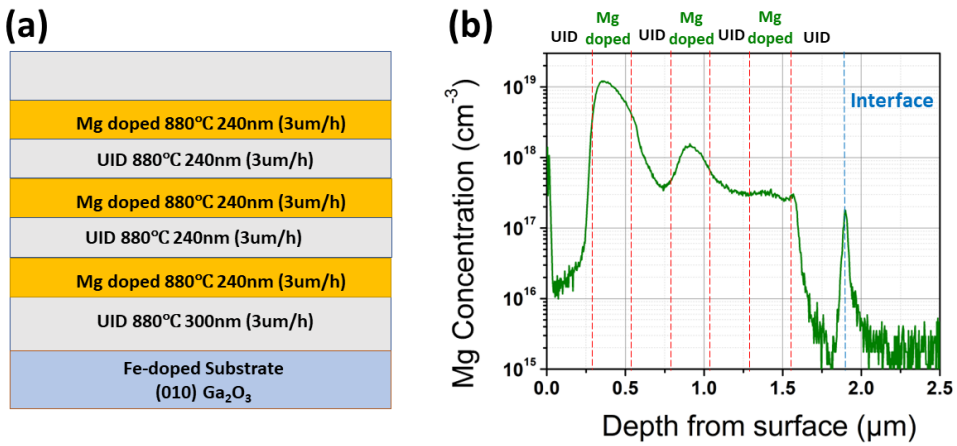

图2：

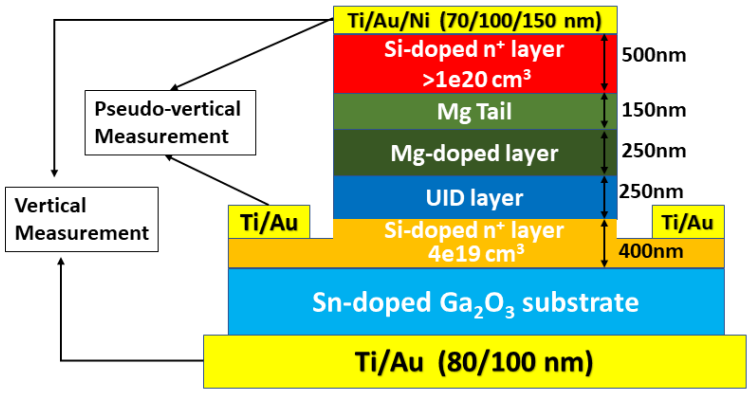
Ti/Au/Ni (70/100/150 nm)
Si-doped n+ layer
>1e20 cm3
500nm
Mg Tail
150nm
Mg-doped layer
250nm
UID layer
250nm
Pseudo-vertical
Measurement
Vertical
Measurement
Ti/Au
Ti/Au
Si-doped n+ layer
4e19 cm3
400nm
Sn-doped Ga2O3 substrate
Ti/Au (80/100 nm)

图 3:

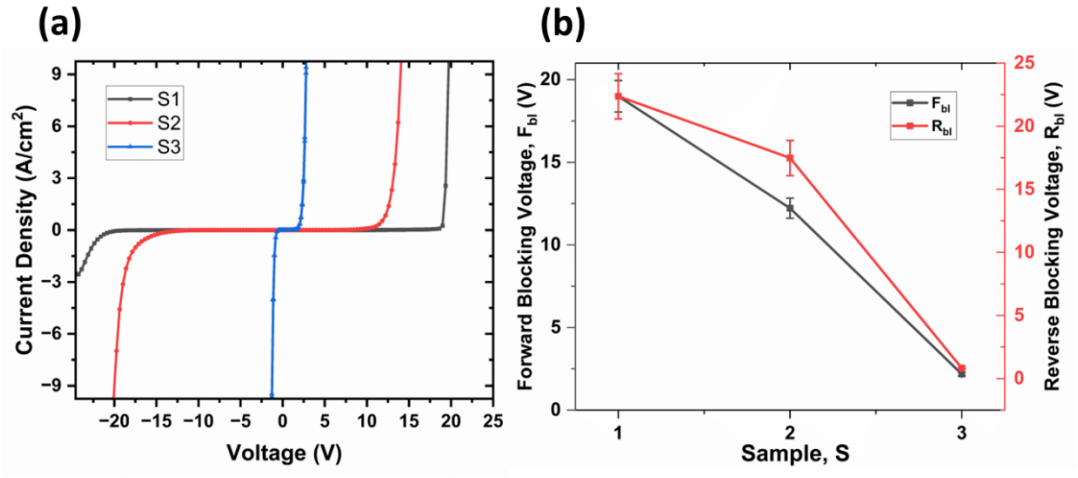
(a)
(b)
S1
S2
S3
Current Density (A/cm2)
Voltage (V)
Forward Blocking Voltage, Fbl (V)
Reverse Blocking Voltage, Rbl (V)
Fbl
Rbl
Sample, S

图 4:

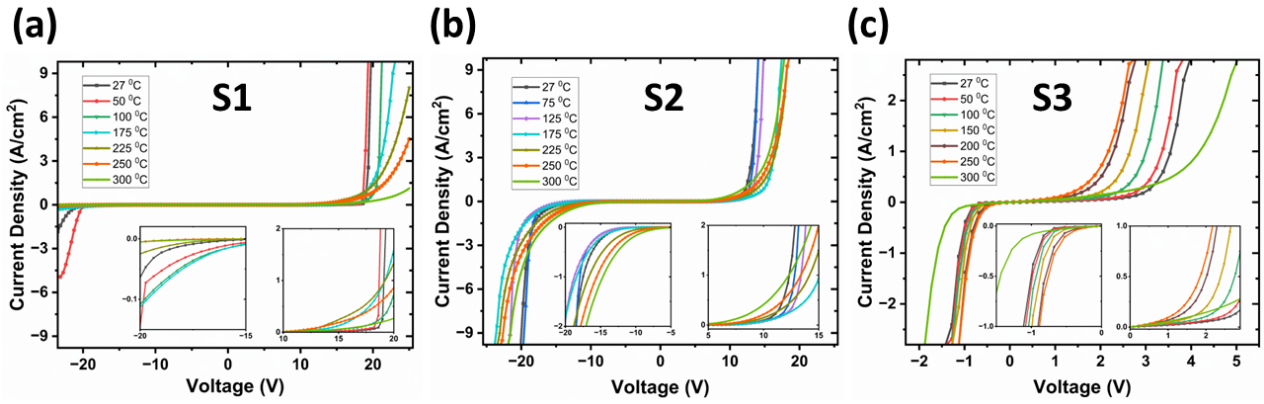
(a)
(b)
(c)
S1
S2
S3
27 °C
50 °C
75 °C
100 °C
125 °C
150 °C
175 °C
200 °C
225 °C
250 °C
300 °C
Current Density (A/cm2)
Voltage (V)

图 5:

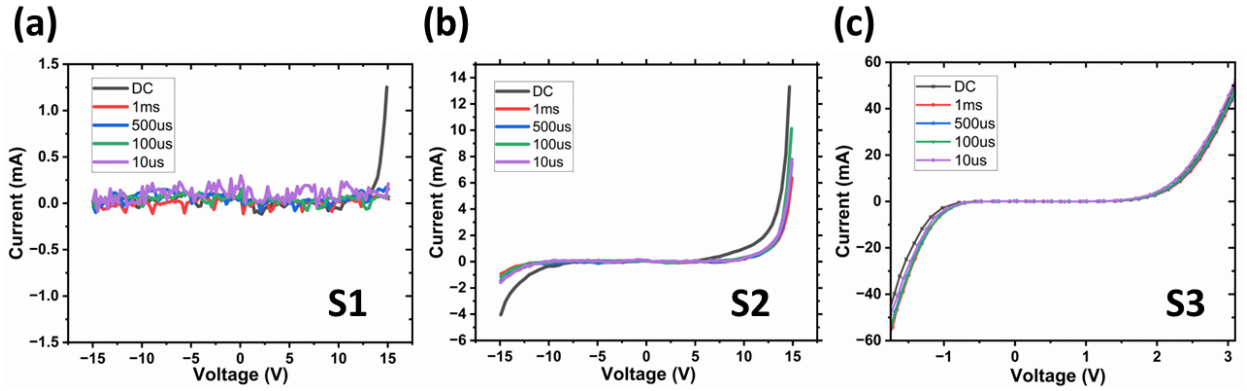
(a)
(b)
(c)
DC
1ms
500us
100us
10us
Current (mA)
Voltage (V)
S1
S2
S3

图6:

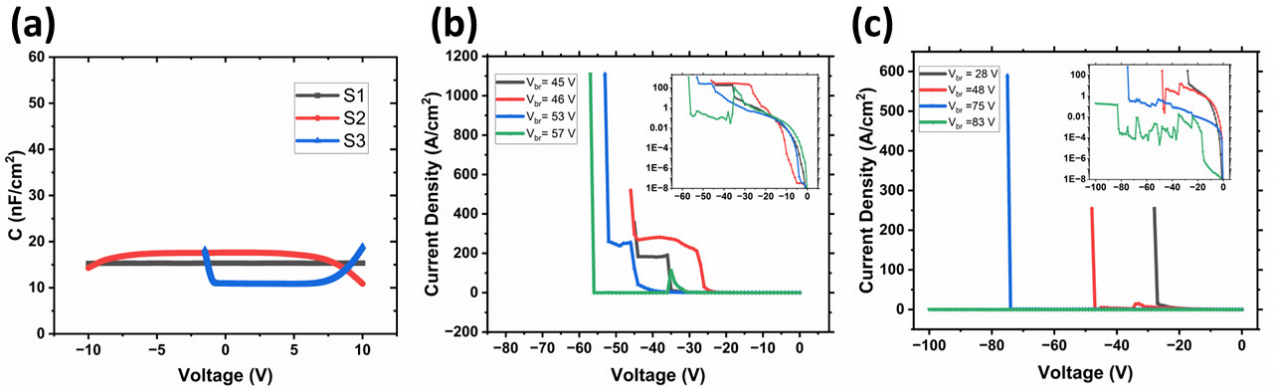
(a)
(b)
(c)
S1
S2
S3
C (nF/cm²)
Voltage (V)
Current Density (A/cm²)
V_br= 45 V
V_br= 46 V
V_br= 53 V
V_br= 57 V
V_br = 28 V
V_br =48 V
V_br =75 V
V_br =83 V

图7:

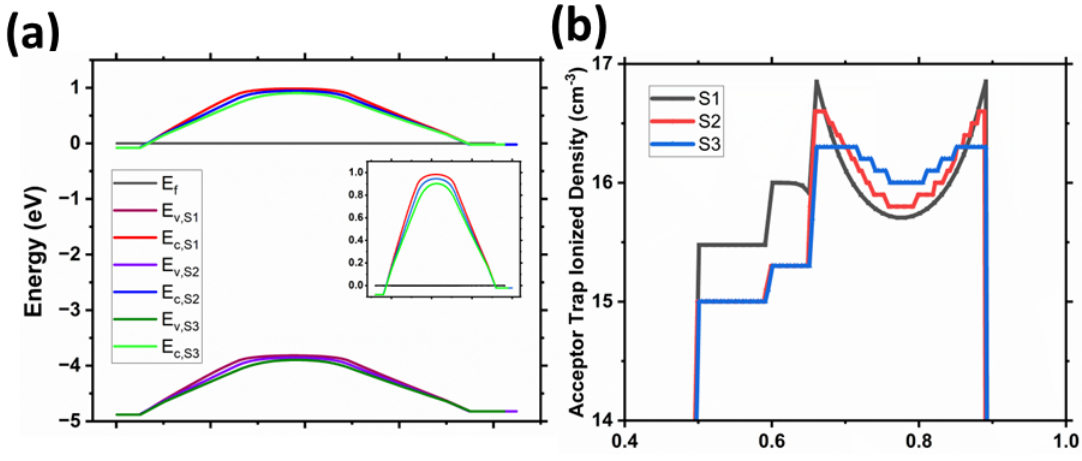
(a)
(b)
Energy (eV)
E_f
E_v,S1
E_c,S1
E_v,S2
E_c,S2
E_v,S3
E_c,S3
Acceptor Trap Ionized Density (cm⁻³)
S1
S2
S3

图 8:

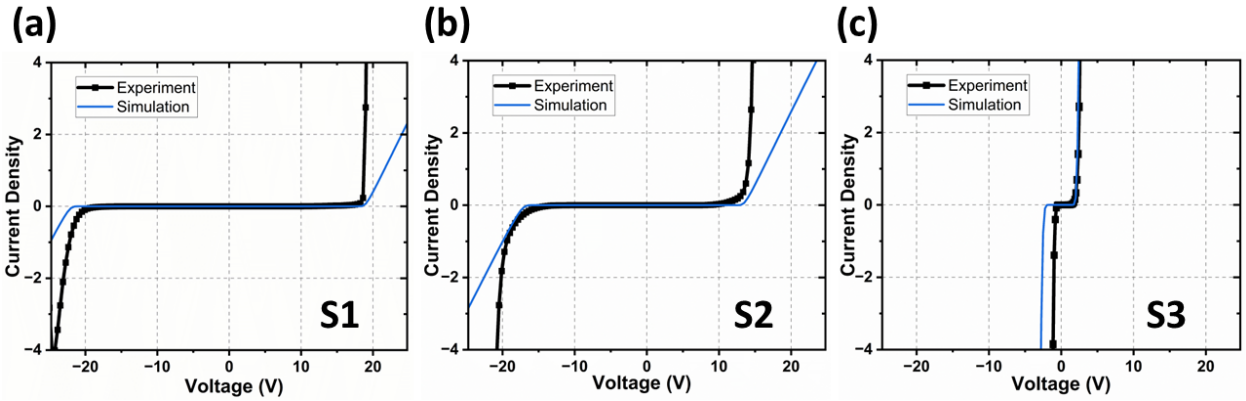

表:

表 I:

设计参数	值
能带隙隙宽$_2$氧$_3$	4.8
介电常数Ga_2O_3	10.0
模型采用d	SRH 模型，auger，cvt
碰撞电离参数	a=0.79×10^6，b=2.92×10^7

表 II:

样品编号	实验平均掺杂浓度 (cm^{-3})	模拟掺杂浓度 (cm^{-3})	有效掺杂浓度 (%)
S1	7.15 × 10^{18}	1.35 × 10^{17}	1.89
S2	8.25 × 10^{17}	9.0 × 10^{16}	10.91
S3	2.0× 10^{17}	2.25 × 10^{16}	11.25