

引用格式:郭兴龙,张玲玲,王九山. 硅基氮化镓微机械谐振器研究[J]. 微电子学与计算机,2022,39(3):101-105. [GUO X L, ZHANG L L, WANG J S. Research on the Gallium Nitride Micromechanical Resonators Based on Silicon [J]. Microelectronics & Computer,2022,39(3):101-105.]DOI: 10. 19304/J. ISSN1000-7180. 2021. 0724

硅基氮化镓微机械谐振器研究

郭兴龙,张玲玲,王九山

(南通大学 信息科学技术学院,江苏 南通 226019)

摘 要: GaN 不仅具有与硅媲美的较高声速,而且也有与氮化铝相当(AlN)的大压电系数,所以是制作 MEMS 谐振器的有力备选材料. 研究设计了一款硅基压电氮化镓(GaN)MEMS 谐振器. 利用 GaN 中的二维电子气(2DEG)可作为开关嵌入电极的特性,通过 GaN 压电材料实现由电极、压电薄膜、电极组成薄膜微机械谐振器. 工作时在两个电极之间的压电薄膜内产生厚度剪切振动模式,压电薄膜内部就形成了振荡,通过压电效应的正交应力(σ_x 和 σ_y)能够提供相关的应力场从而增加机电共振. 使用微机电系统技术和平面加工工艺对谐振器进行了制作,GaN 谐振单元物理尺寸 $90\ \mu\text{m}^2$. 采用了无需加载功率对于谐振器无损伤的 XeF₂ 气体释放硅基底(111)形成了 GaN 谐振器,这样能够减少谐振器的粗糙度、较小残余应力,避免杂质和缺陷造成的散射. 测试表明,谐振频率为 12.56 MHz,谐振腔的品质因数为 3 600.

关键词: 氮化镓;MEMS 谐振器;二维电子气

中图分类号: TN385

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2022)03-0101-05

Research on the gallium nitride micromechanical resonators based on silicon

GUO Xinglong, ZHANG Lingling, WANG Jiushan

(School of Information Science and Technology, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: GaN is a strong candidate for making MEMS resonators because of its higher acoustic velocity compared with silicon and higher piezoelectric coefficient compared with aluminum nitride (AlN). A silicon-based piezoelectric GaN MEMS resonator was designed. The two-dimensional electron gas (2DEG) in GaN can be used as a switch embedded electrode characteristic, and a thin-film micromechanical resonator composed of electrodes, piezoelectric films, and electrodes can be realized through GaN piezoelectric materials. During operation, a thickness shear vibration mode is generated in the piezoelectric film between the two electrodes, and oscillation is formed inside the piezoelectric film. The orthogonal stress (σ_x and σ_y) of the piezoelectric effect can provide the relevant stress field to increase Electromechanical resonance. The resonator is fabricated by MEMS technology and planar processing technology. The physical size of GaN resonant unit is $90\ \mu\text{m}^2$. The GaN resonator is formatted by releasing silicon substrate (111) using the XeF₂ gas, which does not damage the resonator without loading power. In this way, the roughness and residual stress of the resonator thin can be reduced, and the scattering caused by impurities and defects can be avoided. The test results show that the resonant frequency is 12.56 MHz and the quality factor of the resonant cavity is 3 600.

Key words: Gallium Nitride (GaN); MEMS Resonators; 2DEG

1 引言

谐振器是构建参考振荡器的最基本组件,机械振荡器和电振荡器是振荡器的两个独立的技术家族.机械振荡器涉及移动机械谐振元件,用电信号驱动或感应.机械谐振器作为频率选择元件,是机械振荡器中最重要的组成部分.近年来,MEMS 谐振器因其体积小、可靠性高、高温稳定性好^[1-2],并且能够与互补金属氧化物半导体(CMOS)标准制造工艺的良好兼容性而显示出取代石英晶体谐振器的巨大潜力^[3-5].利用半导体工艺,MEMS 谐振器显示出比石英晶体谐振器更高的可靠性.此外,MEMS 谐振器具有更小的尺寸,可以很容易地获得更高的固有谐振频率,而无需使用高阶振动模式.随着现代社会对电子设备的依赖和更高要求,传统的硅材料已经越来越难以满足人们的需求.氮化镓作为第三代半导体材料的代表,其优异的力学、热学、电学和光学特性,广泛的应用在能源动力、交通运输、信息技术以及智能制造等现代文明的核心领域.近年来使用越来越多关注的 GaN 基 MEMS 谐振器由于具有 AlN 等压电谐振器所不具备的独特性能受到青睐.氮化镓谐振器可用于固定频率的振荡器,窄频带调制振荡器和无线传感器,同时具有高质量因子,可用于低相位噪声声表面波谐振器、表面声波(SAW)设备,如滤波器、谐振器等. GaN 具有优异的性能光学、电学和声学性能也用于制备单片声表面波器件. GaN 优点之一在于 AlGaN/GaN 界面上由于自发极化和压电极化而形成的 2DEG(二维电子气)层. 2DEG 层具有较大的电荷密度($1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$)和较高的电子迁移率($2\,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$).是制备高电子迁移率晶体管(HEMT)的理想材料.此外, GaN 还具有较高的声速($7\,960 \text{ m/s}$)和相当显著的压电系数($e_{31}=-0.33 \text{ C/m}^2$, $e_{33}=0.65 \text{ C/m}^2$).这些特性使 GaN 成为 MEMS 谐振器的一种很有前途的材料^[6].结合其半导体和压电性能及其 GaN 谐振器在 GaN MMIC 工艺中是一种固有的薄体结构.因此 GaN 适合将机械谐振器与单片微波集成电路(MMIC)集成,这有利于抑制 MEMS 谐振器固有的寄生^[7-8].此外,压电换能器可以在 GaN 谐振器中进行切换,这可以用来减少输入电子器件的电容.根据查阅相关文献,国内鲜有这方面的研究报道;而国外对于 GaN MEMS 谐振器也只是做了一定的研究^[9-14],这些研究有的工艺相对复杂,有的结构复杂等.基于以上分析,文章首次研究设计制作了一款利用 2DEG 底电极压电传感性质的谐振频率工作在 12.56 MHz

GaN 谐振器.

2 谐振器设计及原理

本文根据 GaN 压电材料实现的由电极、压电薄膜、电极组成薄膜微机械谐振器,工作时在两个电极之间的压电薄膜内产生厚度剪切振动模式,压电薄膜内部形成振荡.根据能陷效应,谐振发生在电极之间的压电薄膜中,电极以外的区域振幅以指数快速衰减,因此造成的谐波较少. GaN 能够避免石英和硅等难度较大的工艺键合技术,并且插损较小.根据 COMSOL 模拟仿真优化后设计的谐振器是一个横向尺寸为 $90 \mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$ 的矩形板结构,这种结构相对比较简单,工艺简洁,由 AlGaN(20 nm)、GaN($0.8 \mu\text{m}$)和下面的缓冲层($1.2 \mu\text{m}$)三层组成,总厚度为 $2 \mu\text{m}$,基底为厚度 $625 \mu\text{m}$ 、晶向为 $\langle 111 \rangle$ 的硅.输入和输出金属电极位于谐振器顶部.通过在 AlGaN 层上施加交流电压,反向压电效应产生横向面内应力,提供驱动力激励 GaN 谐振器以特定模式振动.谐振体下面硅基底用 XeF_2 气体刻蚀掉,形成悬空,便于减小损耗,提高 Q 值.

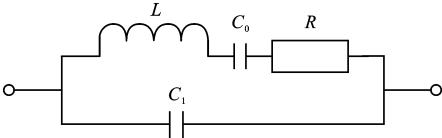


图 1 谐振 RLC 等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of resonant RLC

压电谐振频率可以用如图 1 所示的 RLC 等效电路描述,式中 C_1 表示电极与压电材料构成的静电容,谐振器的质量和弹性分别是 L 和 C_0 , R 代表谐振器的损耗.从等效电路可知,有串联谐振频率和并联两个谐振频率,当极化向量与电场同相位时,RLC 支路发生串联谐振,此时 L 、 C_0 元件上的电压大小相等、方向相反,总电压等于 0,电路的等效阻抗最小,串联谐振频率为式(1).

$$f_R = 1/(2\pi \sqrt{LC_0}) \tag{1}$$

RLC 支路呈感性时,极化向量与电场反相位,与 C_1 产生并联谐振,此时 L 、 C_0 中的电流大小相等,方向相反,总电流等于 0,等效阻抗为无穷大.谐振频率声波损耗最小,谐振频率为式(2).

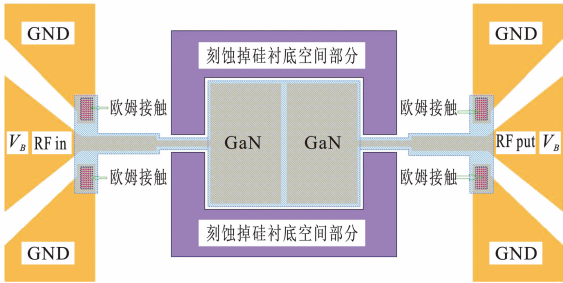
$$f = f_R \sqrt{1 + C_0/C_1} \tag{2}$$

而谐振器的有效机电耦合系数如式(3)所示.

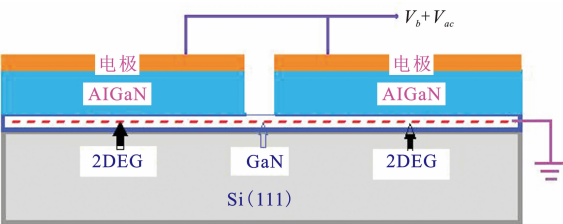
$$K = \frac{2}{\pi} \sqrt{(f - f_R)/f} \tag{3}$$

K 主要由压电薄膜的材料参数决定. 因此, 高质量的谐振薄膜对于其谐振器性能具有一定的影响. 由于声波在传递时不易被吸收, 压电薄膜的表面粗糙度会导致明显的声波散射损耗以及电极损耗, 影响品质因数. 为了减少对品质因数的影响, 压电薄需要具有低残余应力、较少的晶格缺陷和杂质. 因此, 采用了 XeF_2 气体对硅基底进行各向同性刻蚀, 而无需加载功率, 不会对谐振器其他部件损伤, 能够降低晶格缺陷, 因此能够减少谐振器的粗糙度、较小残余应力, 避免杂质和缺陷造成的散射.

图 2 提供了器件的平面示意图(a)和剖面图(b), 图 2(a)中的形成的欧姆接触是形成低的的金属功函数便于和 2DEG 接触. 再进一步参考文献 [15-16] 中的梁式谐振器公式, 谐振器谐振频率在 12.56 MHz. 由于纤锌矿 GaN 中的 d_{31} 和 d_{32} 压电系数具有相同的符号, 正交应力产生的压电电荷将增加, 从而增强机电转换, 从而提高谐振器的性能.



(a) 平面图
(a) Plane figure



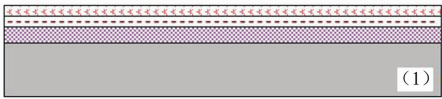
(b) 剖面图
(b) Cross section

图 2 谐振器的示意图

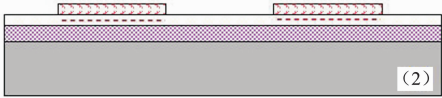
Fig. 2 Schematic of resonator

3 器件制造

如图 3 所示, 制造过程从外延生长在晶向 $\langle 111 \rangle$ 硅衬底上的生长异质结构. 因为 MEMS 器件没有统一的标准工艺流程, 每种器件都有自己的独特工艺, 因此, 谐振器的制作的是比较难并且是比较重要的部分, 这对于器件是否能够具备性能至关重要, 氮



(1) 在 AlGaIn / GaN 界面刻蚀形成 2DEG 层
(1) A 2DEG layer is formed by etching at the AlGaIn / GaN interface



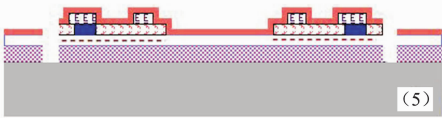
(2) 刻蚀 AlGaIn 层形成下面 2DEG 台面层
(2) Etching the AlGaIn layer to form the lower 2DEG mesa layer



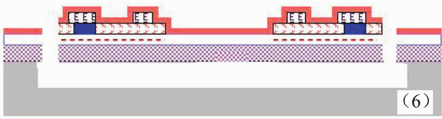
(3) 金属沉积形成欧姆接触
(3) Ohmic contact formed by metal deposition



(4) 金属沉积形成肖特基接触
(4) Schottky contact by metal deposition forms



(5) 用 SiO_2 作掩模刻蚀 GaN 和缓冲层
(5) Etching GaN and buffer layer with SiO_2 as mask



(6) 用 XeF_2 刻蚀 Si<111> 衬底, 形成器件
(6) The Si < 111 > substrate was etched with XeF_2 to form a device

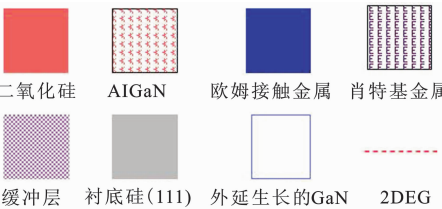


图 3 谐振器制作工艺过程
Fig. 3 Process of resonator

化镓的刻蚀用光刻胶做掩模,由于是干法刻蚀,为避免 GaN 受到损伤使用 Cl_2 ($50\text{ cm}^{-3}/\text{min}^{-1}$)/ BCl_3 ($6\text{ cm}^{-3}/\text{min}^{-1}$)混合气体同时使用氩气作为保护气体,加载射频功率为 90 W,刻蚀速率为 120 nm/min. 首先外延层由 1.2 μm 缓冲层,再外延生长 0.8 μm GaN,然后再生长 20 nm AlGaIn 组,成如图 3(1). 为了确保致动器和探测器之间不存在漏电路径,工艺第一步是用 BCl_3/Cl_2 等离子体对 AlGaIn 层进行浅层刻蚀,以去除 AlGaIn 刻蚀区域的 2DEG 层如图 3(2);极性太大的宽禁带半导体 GaN 难以通过高掺杂来获得较好的金属-半导体的欧姆接触,这是 GaN 器件制造中的一个难点,为了提高器件性能故要制作良好的 GaN 欧姆接触. 通过淀积 Ti/Al/Ni/Au (25nm/130nm/50nm/80nm)金属叠层,然后图案化,在 850℃的 N_2 环境中退火 40 s 如图 3(3). 这导致低功函数金属穿透进入 2DEG 层以形成欧姆接触. 然后,沉积 Ni/Au (50nm/100nm)并光刻图案化以形成肖特基接触,如图 3(4)所示. 下一步工艺是确定谐振器的形状. 这是通过使用 BCl_3/Cl_2 等离子体和热生长的 SiO_2 作为硬掩模蚀刻 GaN 和缓冲层到硅衬底来实现的如图 3(5). 最后工艺刻蚀硅形成谐振器结构,这一工艺是比较重要也是相对较难. 如图 3(6)所示,通过多次实验 XeF_2 刻蚀 $\langle 111 \rangle$ 硅的干法刻蚀,找到了合适的刻蚀条件,得到了通过对硅进行 XeF_2 各向同性干法蚀刻来释放衬底 $\langle 111 \rangle$ 硅,形成悬空谐振器. XeF_2 气体刻蚀硅不需要加载功率,对器件没有损伤,被测 GaN 谐振器的光学照片如图 4 所示,其谐振单元物理尺寸 90 μm^2 .

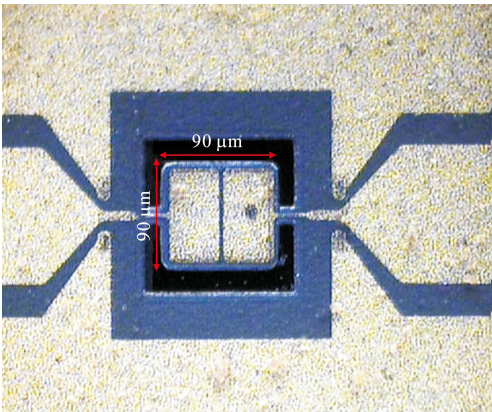


图 4 在硅衬底上制造的 GaN MEMS 谐振器
光学实物图

Fig. 4 Optical Photo diagram of Gan MEMS resonator
fabricated on silicon substrate

4 测试结果

使用网络分析仪(Agilent E5061A)在探针站(Janis Research ST-100)的 10 μ Torr 真空条件下对谐振器进行了性能测试. 在测量设备之前,进行了短、开通(SOT)校准. 所有测量结果均使用 50 Ω 终端阻抗获得. 在肖特基接触形成的谐振器顶部电极上同时施加射频信号和直流偏压(V_b),同时通过欧姆接触探测 2DEG 层. 测试得出了器件在谐振频率、插入损耗和品质因数等方面表现出的性能. 图 5 是在不同电压下测试得出的器件的谐振频点及 S_{21} , 可以看出在施加偏压时谐振器的谐振频率在 12.56 MHz 左右. 当 V_b 从 0 V 到 2.6 V, 谐振峰值随之降低 34 dB. 随偏压变化 2DEG 逐步耗尽,所以 2DEG 内的屏蔽电荷会增加电极到电极的耦合,电流电极布局可以进一步优化,增加谐振效果,并且还有助于谐振器输出电极的电荷吸收. 进一步研究测试了在三种不同电压下谐振器的品质因素,取其平均值为 3 600.

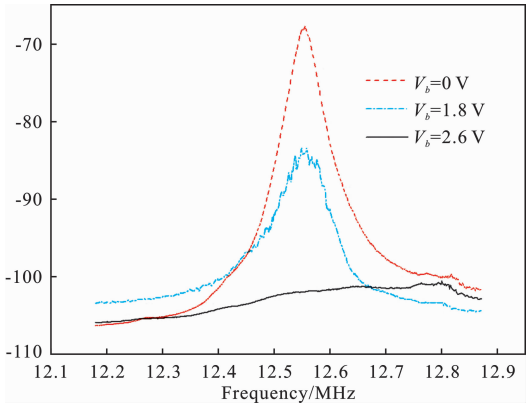


图 5 GaN 谐振器在不同偏压下的测量幅度变化
Fig. 5 Measurement amplitude variation of Gan
resonator under different bias voltages

5 结束语

研究一种硅基压电氮化镓(GaN) MEMS 谐振器,该谐振器采用二维电子气(2DEG)作为可开关嵌入电极,通过压电效应的正交应力(σ_x 和 σ_y)能够提供相关的应力场从而提高了谐振性能,给出了谐振器的制作工艺过程,及对其性能进行了分析. 测试表明谐振频率为 12.56 MHz 左右,谐振腔的品质因数为 3 600.

参考文献:

[1] 代雪梅,张晓青. RF-MEMS 谐振器的性能优化研究

- [J]. 数字技术与应用, 2019, 37(6): 123-124. DOI: 10.19695/j.cnki.cn12-1369.2019.06.70.
- DAI X M, ZHANG X Q. Study on performance optimization of RF-MEMS resonators[J]. Digital Technology & Application, 2019, 37(6): 123-124. DOI: 10.19695/j.cnki.cn12-1369.2019.06.70.
- [2] ORTIZ L C, KWON H K, RODRIGUEZ J, et al. Low-power dual mode MEMS resonators with PPB stability over temperature[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2020, 29(2): 190-201. DOI: 10.1109/JMEMS.2020.2970609.
- [3] KWON H K, VUKASIN G D, BOUSSE N E, et al. Crystal orientation dependent dual frequency ovenized MEMS resonator with temperature stability and shock robustness[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2020, 29(5): 1130-1131. DOI: 10.1109/JMEMS.2020.3012109.
- [4] NAING T L, ROCHELEAU T O, ALON E, et al. Low-power MEMS-based Pierce oscillator using a 61-MHz capacitive-gap disk resonator[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, 67(7): 1377-1391. DOI: 10.1109/TUFFC.2020.2969530.
- [5] CARUNTU D I, BOTELLO M A, REYES C A, et al. Frequency-amplitude response of superharmonic resonance of second order of electrostatically actuated MEMS cantilever resonators[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2021(133): 103719. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2021.103719.
- [6] RAIS-ZADEH M, GOKHALE V J, ANSARI A, et al. Gallium Nitride as an electromechanical material [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2014, 23(6): 1252-1271. DOI: 10.1109/JMEMS.2014.2352617.
- [7] FAUCHER M, CORDIER Y, WERQUIN M, et al. Electromechanical transconductance properties of a GaN MEMS resonator with fully integrated HEMT transducers[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2012, 21(2): 370-378. DOI: 10.1109/JMEMS.2011.2179010.
- [8] ANSARI A, RAIS-ZADEH M. A thickness-mode Al-GaN/GaN resonant body high electron mobility transistor [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(4): 1006-1013. DOI: 10.1109/TED.2014.2302991.
- [9] QAMAR A, RAIS-ZADEH M. Coupled BAW/SAW resonators using AlN/Mo/Si and AlN/Mo/GaN layered structures [J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(2): 321-324. DOI: 10.1109/LED.2018.2890755.
- [10] JI X, DONG W X, ZHANG Y M, et al. Fabrication and characterization of one-port surface acoustic wave resonators on semi-insulating GaN substrates [J]. Chinese Physics B, 2019, 28(6): 067701. DOI: 10.1088/1674-1056/28/6/067701.
- [11] POPA L C, WEINSTEIN D. L-band Lamb mode resonators in Gallium Nitride MMIC technology [C]// 2014 IEEE International Frequency Control Symposium (FCS). Taiwan, China: IEEE, 2014: 1-4. DOI: 10.1109/FCS.2014.6859997.
- [12] SARZAT R P, SPIEWAK P, WASIAK M. Influence of resonator length on performance of nitride VCSEL [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2019, 55(6): 2400509. DOI: 10.1109/JQE.2019.2946386.
- [13] HÖRBERG M, EMANUELSSON T, LIGANDER P, et al. RF-MEMS tuned GaN HEMT based cavity oscillator for X-band [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(1): 46-48. DOI: 10.1109/LMWC.2016.2629973.
- [14] WUNDERER T, JESCHKE J, YANG Z H, et al. Resonator-length dependence of electron-beam-pumped UV-A GaN-based lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(16): 1344-1347. DOI: 10.1109/LPT.2017.2722359.
- [15] REEDER T M, CULLEN D E. Surface-acoustic-wave pressure and temperature sensors [J]. Proceedings of the IEEE, 1976, 64(5): 754-756. DOI: 10.1109/PROC.1976.10205.
- [16] MÜLLER A, KONSTANTINIDIS G, GIANGUI, et al. GaN membrane supported SAW pressure sensors with embedded temperature sensing capability [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(22): 7383-7893. DOI: 10.1109/JSEN.2017.2757770.

作者简介:

郭兴龙 男, (1972-), 博士研究生, 副教授. 研究方向为集成电路设计、微机电可重构系统.

E-mail: xlguo@ntu.edu.cn

张玲玲 女, (2000-). 研究方向为 MEMS 技术.

王九山 男, (1995-), 硕士研究生. 研究方向为模拟集成电路设计、RF MEMS 器件.