

属 Au 增加了 Al 和 Au 合金中 Au 的比例,在高温下与源端电极中的 Al 与 Au 达到一定的比例,形成合金导致熔点降低,在高温下源端或者空气桥桥墩处塌陷,从而造成器件的失效。

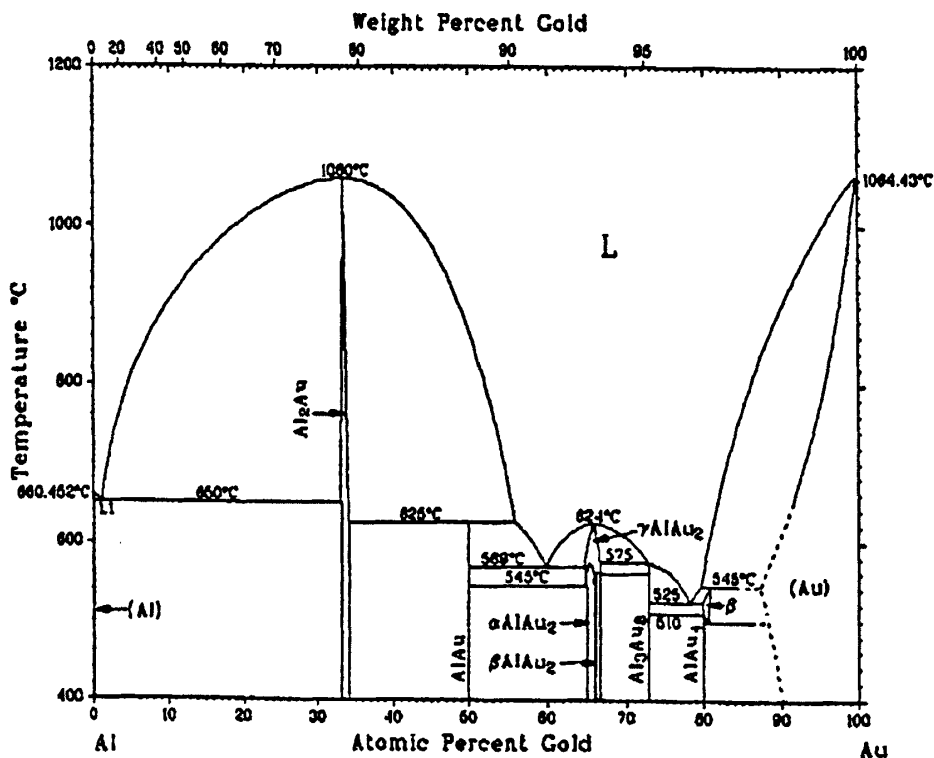


图 4.8 Al 和 Au 合金相图 (引自 Ling Zhou 博士论文^[4.7])

§4.4 本章小结

本章结合了前一章的介绍的空气桥制造技术,给出 AlGaIn/GaN HEMT 多栅器件的工艺流程,并制造备多栅器件。

利用自己制备的多栅器件,测试其转移特性,跨导,反向击穿电压,以及频率特性,其中的击穿电压和小信号特性较差,可能跟器件的没有钝化、未引入场板技术有关。

最后,给出了空气桥的退化实验,得出采用该方法制作的空气桥,其最高运用温度约为 500°C,当器件应用在更高的温度下是,器件在源端或源端的桥墩位置,因为电镀加厚的 Au 增加了 Al 和 Au 的合金中 Au 的比例,当合金中的 Au 达到较高的一定范围内时,其合金熔点温度变低而熔化塌陷,导致器件的失效。

第五章 结束语

GaN 为代表的 III 族氮化物以及他们的合金材料, 以他们优异的电性能处理能力, 在第三代的半导体中占有极高的地位。随着 AlGaN/GaN HEMT 器件向着大功率、高频、以及高功率密度的方向发展, 空气桥在器件中的地位也逐渐提高, 逐渐成为限制高频特性、高功率附加增益的等等的颈瓶, 也直接关系到器件的制造成品率和可靠性问题。本文针对空气桥的结构复杂度、制造难度, 以及在实际应用中引入的可靠性问题等等, 提出了结构强度更高的空气桥结构, 并采用复合胶的方法实现该结构的空气桥的制备。最后, 本文给出了基于本空气桥结构的多栅器件特性, 并重点探讨了空气桥在高温下的退化情况。

主要工作和成果如下:

1、对空气桥的理论进行比较系统的研究。从多栅器件的频率特性与器件的寄生电容关系入手, 说明提出的空气桥结构跨接的理由, 对比分析两种结构的空气桥的受力情况, 分析得出拱形结构空气桥在器件跨接上的优势。

2、高质量的拱形结构空气桥研制。利用不同性质的光刻胶组成复合胶结构, 上层光刻胶软烘温度低, 下层剥离胶软烘温度高, 通过低温烘烤, 很方便的制出比所旋涂胶层厚出约 60% 的拱形牺牲层, 有利于制造作高桥面的空气桥。采用复合胶结构, 烘烤温度低于下层的软烘温度, 能防止牺牲层在烘烤过程中的收缩, 保证桥的跨度不变, 且加强牺牲层对栅金属以及非电镀区域金属的保护, 提高空气桥的成品率。采用无毒电镀液进行电镀 Au, 摸索出电镀高质量金属的经验公式, 并分析出电镀金属的质量、均匀性与电镀速率、电镀单位面积电流的关系。根据器件设计所需要的质量, 利用经验公式能很方便的计算所需的电镀电流密度和电镀时间。最后, 采用泛曝光去除电镀掩膜层光刻胶, 再旋涂起镀层掩膜光刻胶, 曝光, 腐蚀起镀层。该方法可以更好的保护牺牲层下的金属, 不被起镀层的腐蚀液腐蚀, 从而提高器件的成品率。

3、成功制作出多栅 AlGaN/GaN HEMT 器件, 并进行测试分析, 重点分析空气桥的耐高温可靠性。发现了空气桥最高应用的温度约为 500℃。研究还发现, 空气桥连接的源端由 Ti/Al/Ni/Au(30nm/120nm/50nm/40nm)组成的, 其中金的比例比较低, 当电镀 Au 加厚源端金属时, 在源端以及桥墩处的金属中的 Au 比例有极大的增加, 这时 Al 和 Au 合金中的比例有很大的增加, 当 Al 和 Au 的合金达到一定的比例以后, 其熔点温度降低, 这时在温度高于合金的熔点下, 金属熔化在表面的张力作用下形成塌陷, 导致器件的失效。

总之, 本文从理论、制造技术、测试分析的角度比较系统地研究了 AlGaN/GaN

HEMT 的空气桥。下面有待进一步的研究问题为：

- 1、系统研究空气桥技术、钝化、场板等工艺对器件各种特性的影响；
- 2、采用更合理的方法，来比较准确的计算空气桥对器件频率特性的影响。
- 3、采用何种材料或者结构来提高空气桥的耐高温能力。

需要指出的是：空气桥仅仅是 AlGaIn/GaN HEMT 微波大功率器件制作过程的一个步骤，要想器件在高频，大功率方面有着更大的发展，就必须从材料生长，器件的制备技术等等各个方面进行全面的深入研究，高性能的器件才能实现。

致 谢

衷心感谢我的导师郝跃教授！在几年的课题研究中，郝老师教导我们搞科研要有科学的氛围、民主的气氛、科学的精神和创新的欲望；教导我们看准了的事情就下狠心去做，做事要十分果断；教导我们要么不干，要做就要做最好，反对一哄而上，不要赶“时髦”；教导我们目标要远大，做事要灵活，要有吃苦耐劳艰苦奋斗的精神。所有这些，对我的工作以及学习帮助很大，也必将会在以后的人生道路上起到积极而深远的影响，是受用一生的财富。

感谢微电子学院的诸位老师。特别感谢冯倩副教授、王冲博士的悉心指导，这两年的科研中，他们在器件制造、测试方面给了莫大的帮助。

感谢这两年来一直给我提供异质结材料的张进城副教授、李培咸副教授、倪金玉博士、周小伟博士。平时他们的讨论给了我理论和实验上很多的启迪，尤其是张进城副教授，理论知识深厚、思维开阔、平易近人，对我论文的完成工作帮助很大；还要感谢马晓华博士在测试方面极大帮助；感谢超净室的李亚琴老师在器件制备上给与的大力支持；感谢李跃进教授、张玉明教授、刘红霞教授、马佩军副教授、李康老师、史江一老师、张金凤老师、还有郝都存师傅提供的帮助与支持。

感谢已经毕业的杨燕博士、龚欣博士、郭亮良硕士、刘杰硕士、陆珏硕士、马香柏硕士，在工作中提供支持和帮助。尤其是郭亮良和马香柏在他们毕业后，给我介绍下许多宝贵的就业经验。

感谢并肩作战的 GaN 组成员：魏巍硕士、吕玲硕士、王欣娟硕士、杨凌博士、段焕涛博士，毛维老师提供的帮助和支持。

感谢郝老师课题组的所有成员，以及大学校的同学、好友的关心和支持。与他们在一起的轻松愉快的学习和工作时光，将给我留下美好的回忆。

感谢的爷爷、父母、亲人，正是他们多年来的关怀和支持才使我能够顺利完成硕士学业。

参考文献

第一章

- [1.1] 袁明文, 潘静, 氮化镓微波电子学的进展, 半导体情报, 1999, 36(3): 1
- [1.2] 李彦平, 关兴国, III-V 族氮化物半导体的进展, 半导体情报, 1999, 33(5): 1
- [1.3] Baliga. A. J., Power semiconductor device figure of merit for high frequency applications, *IEEE Electron Device Lett*, 1989, 10:455.
- [1.4] Johnson. E. O., Physical limitations on frequency and power parameters of transistors, *RCA Rev*, 1965, p163.
- [1.5] Ambacher. O., Growth and applications of group III-nitrides. *J. Phys. D. Appl. Phys*, 1998, 31:2653
- [1.6] Bernardini F., Fiorentini V., Vanderbilt D., Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III—V nitrides, *phys. Rev. B*, 1997, 56(16):10024
- [1.7] Gaska R., Yang J. W., Osinky A., et al electron transport in AlGaIn/GaN heterostructures grown on 6H-SiC substrates, *Appl. Phys. Lett.*, 1998 72(6):707
- [1.8] Moore K. E., Weitzel C. E., Nordquist K. J., et al 4H-SiC MESFETs with 65.7% power added efficiency at 850MHz, *IEEE Elec. Dev. Lett.* 1997, 18(2):69
- [1.9] Sadler R. A., Allen S. T., Alcorn T. S., et al SiC MESFET with output power of 50 watts CW at S-band, 56th Device Research Conference, 1998
- [1.10] Khan M. A., Kuznia J. N., Bhattarai A. R., et al Metal semiconductor field transistor based on single crystal GaN, *Appl. Phys. Lett.* 1993, 62(15):1786
- [1.11] Khan. M. A., Kuznia J. N., Bhattarai A. R., et al AlGaIn/GaN Heterostructure Deposition by Low Pressure MOCVD for MISFET Devices, *Material Research Society Proceedings*, 1993, 281: 69
- [1.12] Khan M. A., Kuznia J. N., Van J. M., et al Observation of a two-dimensional electron gas in low pressure metalorganic chemical vapor deposited GaN/Al_xGa_{1-x}N heterojunctions, *Applied Physics Letters*, 1992, 60(24):3027
- [1.13] Khan M. A., Chen Q., Sun C. J., et al Gated photodetector based on GaN/AlGaIn heterostructure field effect transistor, *Appl. Phys. Lett.* 1995, 67:1429
- [1.14] Redwing J. M., Tischler M. A., Flynn J. S., et al Two-dimensional electron gas properties of AlGaIn/GaN heterostructures grown on 6H-SiC and sapphire substrates, *Appl. Phys. Lett.* 1996, 69(7):963

- [1.15] Wang T., Ohno Y., Electron mobility exceeding $104 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ in an AlGaIn/GaN heterostructure grown on a sapphire substrate, Appl. Phys. Lett., 1999, 74(23):3531
- [1.16] Gaska R., Shur M. S., Bykhovski A. D., et al Electron mobility in modulation-doped AlGaIn-GaN heterostructures, Appl. Phys. Lett. 1999, 74:287
- [1.17] Sze S. M., semiconductor devices: physics and technology (2nd Edition), John Wiley & Sons, Inc, 2002
- [1.18] Zolper J. C., Wide bandgap semiconductor microwave technologies: From promise to practice, IEDM Tech. Dig., 1999:389
- [1.19] Kumar V., Adesida I., AlGaIn/GaN HEMTs on sapphire, Fourth IEEE International Caracas Conference On Devices, Circuits and Systems, 2002, D048: 1
- [1.20] Chen C. H., Keller S., Parish G., et al High transconductance self aligned AlGaIn/GaN modulation ohmic contacts, Applied Physics Letters, 1998, 73(21):3147
- [1.21] Wu Y. F., Keller B. P., Fini P., et al Short Channel $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{GaN}$ MODFETs with power density $>3\text{W}/\text{mm}$ at 18GHz, Electronics Letters, 1997, 33(20):1742
- [1.22] Chen Q., Yang J. W., Khan M. A., et al High transconductance AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors on SiC substrate, Electronics Letters, 1997, 33(16):1413
- [1.23] Khan M. A., Adesida I., Kumar V., et al AlGaIn/GaN HEMTs on SiC with f_T over 120GHz, IEEE Electron Device Letters, 2002, 23(8):455
- [1.24] Khan M. A., Kumar V., Lu W., et al High performance $0.25\mu\text{m}$ gate-length AlGaIn/GaN HEMTs on sapphire with transconductance of over $400\text{ms}/\text{mm}$, Electronics Letter, 2002, 8(5):252
- [1.25] Vescan A., Dietrich R., Wieszt A., et al MODFETs on semi-insulating SiC with $3\text{W}/\text{mm}$ at 20GHz, Electronics Letters, 2000, 36(14):1234
- [1.26] Sheppard S. T., Doverspike K., Pribble W. L., et al High power microwave AlGaIn/GaN HEMTs on semi-insulating silicon carbide substrate, IEEE Electron Device Letters, 1999, 20(4):161
- [1.27] Maekawa A., Yamamoto T., Mitani E.; et al 500W push-pull AlGaIn/GaN HEMT amplifier for L-band high power application, 2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2006, p722
- [1.28] Eizo M., Makoto A., Arata M., et al An 800W AlGaIn/GaN HEMT for S-band High-Power Application, CS MANTECH Conference, 2007, Austin, P213

- [1.29] Tkikkawa T., Highly reliable 250W GaN high electron mobility transistor power amplifier, Japanese Journal of Applied Physics, 2005, 44 (7) :4896
- [1.30] Boutros K. S.; Luo W. B., Vertically-scaled 100nm T-gate AlGaIn/GaN HEMTs with 125GHz f_T and 174GHz f_{MAX} , 63rd Device Research Conference Digest, 2005, p183
- [1.31] Koudymov A., Wang C. X., Adivarahan V., et al Power stability of AlGaIn/GaN HFETs at 20W/mm in the pinched-off operation mode, IEEE Electron Devices Letters, 2007, 28(1):5
- [1.32] Vetury R., Wei Y.; Green D. S.; et al High power, high efficiency, AlGaIn/GaN HEMT technology for wireless base station applications, 2005 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005, p487
- [1.33] Wu Y. F., Saxler A., Moore M., et al 30-W/mm GaN HEMTs by Field Plate Optimization, IEEE Electron Device Letters, 2004, 25(3):117
- [1.34] 张锦文, 闫桂珍, 张太平等, Au-AlGaIn/GaN HFET研制与器件特性, 半导体学报, 2003, 23(4):424
- [1.35] 孙殿照, 胡国新, 王晓亮等, RF-MBE生长AlGaIn/GaN极化感应二维电子气材料, 半导体学报, 2003, 22(11):1425.
- [1.36] 罗卫军, 陈晓娟, 李成瞻等, 高性能 1mm SiC 基 AlGaIn/GaN 功率 HEMT 研制, 半导体学报, 2006, 27(11): 1981

第二章

- [2.1] Zheng Y. K., Liu G. G., He Z. I., et al 0.25 μ m gate-length AlGaIn/GaN power HEMTs on sapphire with f_T of 77 GHz, Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(6):963
- [2.2] 吴百诗 大学物理 北京: 科学出版社, 2002, P334
- [2.3] Vasilache D., Iordanescu S., Avramescu V., et al Air bridge and planar inductors for MMICs, IEEE, 1998:609
- [2.4] 廖承恩, 《微波技术基础》, 西安电子科技大学出版社
- [2.5] 张屏英等, 《晶体管原理》, 上海科技出版社

第三章

- [3.1] Tan W S. AlGaIn/GaN based heterostructure field-effect transistors, IEEE MITS International Microwave Symposium, 2005, 2005:507
- [3.2] 刘道广, 郝跃, 徐世六等, 基于自对准和空气桥工艺的SiGe HBT研究, 西安电子科技大学学报, 2005, 32(3):432

- [3.3] 石瑞英, 孙海锋, 刘训春等, 100nm InGaP/GaAs HBT及相关电路关键工艺, 半导体学报, 2005, 26(1):106
- [3.4] Borzenko T., Lehmann F., Schmidt G., et al Metallic air-bridges on non-planar transport structures, Microelectronic Engineering, 2003, 67:720
- [3.5] Borzenko T., Gould C., Schmidt G., Metallic air-bridges fabricated by multiple acceleration voltage electron beam lithography, Microelectronic Engineering, 2004, 75:210
- [3.6] Garidel S., Vilcot J. P., Zaknounge M., et al Versatile bondpad report process for non-planar compound semiconductor devices, Microelectronic Engineering 2004 71:358
- [3.7] Wright J. I., Follion R., Meryer L., et al Packaging of devices for topside cooling by replacing air-bridges with Su-8 polymer bridges, 9th int'l symposium on Advanced Packaging Materials, 2004, 4:63
- [3.8] Cabacungan J., Investigation and development of air-bridges, 22nd Annual Microelectronic Engineering Conference, 2004 p71
- [3.9] 刘玉玲, 檀柏梅, 张楷亮, 微电子技术工程, 北京, 电子工业出版社, 2004年, 第一版
- [3.10] 王冲, AlGaIn/GaN异质结高电子迁移率晶体管的研制与特性分析, 西安电子科技大学博士论文, 2006: 79

第四章

- [4.1] Mohammad S. N., Salvador A. A., Morkoc. H., Emerging gallium nitride based devices, Proceedings of the IEEE, 1995, 83(10):1306
- [4.2] Rumyantsev S. L., Pala N., Shur M. S., et al Effect of gate leakage current on noise properties of AlGaIn/GaN field effect transistors, Journal of applied physics, 2000, 11(88):6726
- [4.3] Tan W. S., Houston P. A., Parbrook P. J., et al Gate leakage effects and breakdown voltage in metalorganic vapor phase epitaxy AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistors, Applied physics letter, 2002, 3 (80):3207
- [4.4] 万辉、郝跃、王充等, n-AlGaIn/GaN 上 Ni/Au 肖特基接触性能研究, 西安电子科技大学研究生学术年会, 2005.11
- [4.5] Liu Q. Z., Lau S. S., Review of the metal-GaN contact technology, Solid-State Electronics, 1998, 42(5):677
- [4.6] Koudymov A., Adivarahan V., Yang J., et al Mechanism of Current Collapse Removal in Field-Plated Nitride HFETs, IEEE Trans on electron devices, 2005,

26(10):704

- [4.7] Zhou L., Development and characterization of ohmic and schottky contacts for GaN and AlGaN devices, UMI number 3070495, 2002, p183

第五章

- [5.1] Johnson E. O., Physical limitations on frequency and power parameters of transistors. RCA Rev., 1965:1

作者攻读硕士期间的研究成果和参加的科研项目

一、专利申请

1. 郝跃, 林若兵, 冯倩, 王冲, 化合物半导体微波大功率器件中的空气桥制造方法, 申请日期: 2007 年 6 月 28 日, 申请号: 200710018147.3 (以受理)

二、科研论文

1. 林若兵, 魏巍, 冯倩, 王冲, 郝跃, 微波和高温器件的一种空气桥互连方法, 半导体学报, 已录用。
2. 林若兵, 王欣娟, 冯倩, 王冲, 张进城, 郝跃, AlGa_N/Ga_N 高电子迁移率晶体管肖特基高温退火机理研究, 物理学报, 已录用。
3. 魏巍, 林若兵, 冯倩, 郝跃, 场板结构 AlGa_N/Ga_N HEMT 的电流崩塌机理, 物理学报, 已录用。

三、获奖情况

1. 2007 年获得校二等奖学金, 获得学院“优秀硕士生”称号。

四、参加科研项目

1. AlGa_N/Ga_N微波功率器件及关键技术的研究, 国家预先研究项目。2006年1月-2008年12月。
2. 高性能宽禁带半导体微波功率器件, 国家基础预研项目, 2006 年 12 月-2008 年 12 月