

纳米银浆低温烧结工艺及可靠性分析

吴迪* 方健 季子路 崔洪波 徐伟

(南京电子器件研究所, 南京, 211100)

2023-08-01收稿, 2023-12-04收改稿

摘要: 对纳米银浆烧结前后的微观组织形貌进行分析, 研究了不同烧结温度、烧结时间和升温速率对纳米银浆烧结样件剪切强度的影响, 并对比分析了 Au80Sn20 和纳米银浆两种不同连接材料对 GaN 芯片散热性能的影响。结果表明: GaN 芯片通过纳米银浆烧结到管壳后, 银层与金层之间存在一个明显的互扩散层, 实现了芯片和壳体之间优异互连。在烧结温度 200°C、时间 90 min、升温速率 5°C/min 的烧结条件下, 样件剪切强度可达 47.2 MPa。纳米银浆与 Au80Sn20 装配的芯片温度分布基本一致, 但纳米银浆散热性能优于 Au80Sn20。在经历温度冲击、扫频振动、温度循环及射频老炼试验后, 纳米银浆烧结的芯片热阻波动不明显, 剪切力性能略微提升。

关键词: 纳米银浆; 大功率器件; 剪切力; 热阻; 可靠性

中图分类号: TB383 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3819(2024)03-0269-06

Low-temperature Sintering Process and Reliability Analysis of Nano Silver Paste

WU Di FANG Jian JI Zilu CUI Hongbo XU Wei

(Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing, 211100, CHN)

Abstract: The microstructure morphology of nano silver slurry before and after sintering was analyzed, and the effects of different sintering temperatures, sintering times, and heating rates on the shear strength of nano silver slurry sintered samples were studied. The effects of two different connecting materials, Au80Sn20 and nano silver slurry, on the heat dissipation performance of GaN chips were compared and analyzed. The results indicate that after sintering the GaN chip into the shell through nano silver slurry, there is a clear interdiffusion layer between the silver layer and the gold layer, achieving excellent interconnection between the chip and the shell. Under sintering conditions of 200°C, 90 min, and 5°C/min, the shear strength of the sample can reach 47.2 MPa. The temperature distribution of the chips assembled with nano silver slurry and Au80Sn20 is basically the same, but the heat dissipation performance of nano silver slurry is better than that of Au80Sn20. After undergoing temperature shock, vibration, temperature cycling, and RF aging tests, the thermal resistance of the chip sintered with nano silver paste did not fluctuate significantly, and the shear performance slightly improved.

Key words: nano silver paste; high-power devices; shear force; thermal resistance; reliability

* 联系作者: E-mail: 2113197909@qq.com

引言

现代电子装备和通讯系统,正向着高功率、高密度和高集成度的方向发展,功率器件的散热和多温度梯度微组装问题日益突出。GaN 芯片作为功率器件中的核心部件,其贴装方式以共晶烧结及导电胶粘结^[1]为主。共晶烧结主要使用耐高温的金基焊料(Au80Sn20、Au98Si2),由于其抗氧化及剪切性能好,可保证烧结的可靠性,但其成本较高,自动化程度较低,且生产效率与手动烧结差异不明显。导电胶粘结中采用的导电胶主要是由预聚体、固化剂、增塑剂、稀释剂及导电材料构成,常用的导电胶有 MD140、H20E 等。由于导电胶的单位价格较低(约为 Au80Sn20 的 1/11),且可通过自动设备实现芯片自动化贴装,生产效率约为共晶烧结的 3 倍,但是缺点是导热性较差[导热率在 $2\sim 8\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$],无法满足高功率芯片的散热需求^[2-3]。近五年来,纳米银浆作为新型高导热连接材料^[4],开始应用于半导体领域。纳米银浆的导热率为 $200\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,约为 Au80Sn20 的 3.5 倍^[5],在某些场合可用于替代金基焊料。纳米银浆与常规导电胶使用方法相同,可通过自动化设备实现全自动贴装。此外,烧结后的银层熔点约为 960°C ,远远超过器件工作时的极限温度,可以防止因器件温度过高导致器件下方焊料熔融的风险。纳米银浆烧结可为功率模块、组件的多温度梯度焊接提供可能^[6]。

本文探究了纳米银浆烧结工艺,并将其应用在某功耗密度 $5.5\text{ W}/\text{mm}$ 的 GaN 功率管上,通过纳米银浆的微观组织分析、工艺参数研究以及芯片热阻、剪切力等可靠性试验,并与金锡烧结样品进行对比,以验证纳米银浆烧结的高可靠性。

1 实验

1.1 材料介绍

纳米银浆属于银基材料,主要成分为纳米级银颗粒、微米级银颗粒与有机材料(包括分散剂、粘结剂、封端剂等)混合物^[7]。图 1 为本文选用的日本京瓷生产的纳米银浆电子扫描照片。

为了避免纳米银浆颗粒常温下团聚在一起,需要在纳米银浆颗粒表面包覆一层分散剂。在固化过程中,随着温度的升高,有机包覆层分解挥发,纳

米银浆颗粒相互团聚形成颈连,颗粒之间的孔隙率逐渐减小,最终形成与块状银性质相似的连接材料,具体工艺过程如图 2 所示。

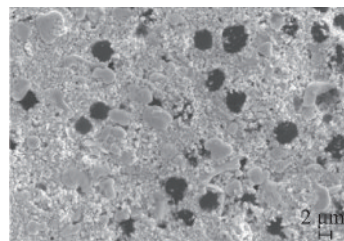


图 1 纳米银浆颗粒

Fig.1 Nano silver particles

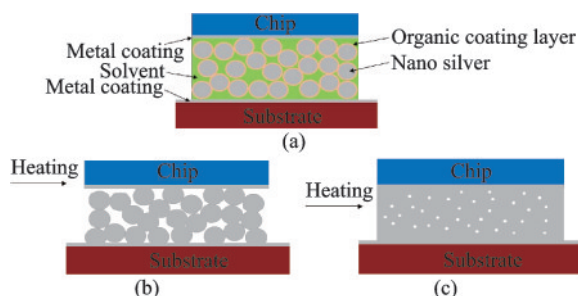


图 2 纳米银浆烧结互连示意图:(a)固化前;(b)固化中;(c)固化后

Fig.2 Schematic diagrams of nano silver paste sintering interconnection: (a) Before curing; (b) Curing; (c) After curing

1.2 实验方案

分别采用 Au80Sn20 焊料、纳米银浆将 GaN 芯片贴装到管壳上。将贴装后的芯片分成两组,其中一组直接进行剪切力测试;另外一组首先进行金丝键合,之后进行热阻测试、可靠性试验^[8-9],最后再次对热阻、芯片剪切力进行复测。

2 实验结果与分析

2.1 微观组织分析

图 3(a)所示为扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)得到的烧结前纳米银浆的组织形貌,可以看出未烧结纳米银浆呈现出片状结构,含聚集的微米级和纳米级块状凝聚体,分布相对均匀。图 3(b)为烧结后的纳米银浆形貌,可以观察到纳米银浆颗粒烧结长大的情况,相邻颗粒之间逐渐形成紧密连接,因有机包覆层的热分解会产生一定的烧结孔隙。

图 4 为纳米银浆烧结后的 X 射线衍射分析测试

结果。可以看出,烧结后主要成分为银,说明烧结过程银并没有发生氧化,有机物分解较为完全。

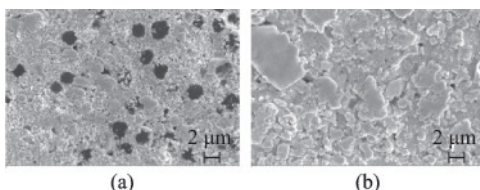


图3 纳米银浆烧结前后的SEM图:(a)烧结前;(b)烧结后
Fig.3 SEM images of silver nanoparticles before and after sintering: (a) Before sintering; (b) After sintering

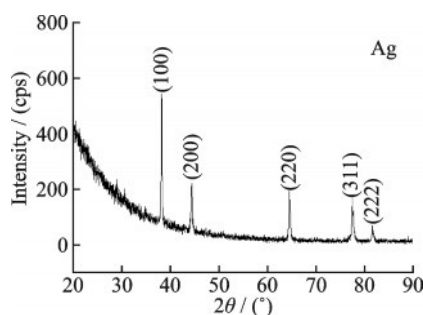


图4 烧结后样品的X射线衍射测试结果
Fig.4 X-ray diffraction test results of samples after sintering

为了研究纳米银浆固化后所形成连接接头的微观组织形貌,将Ga₂N管芯用纳米银浆烧结到铜钼铜管壳上,样品制作如图5所示。图6为烧结后样品的截面背散射电子扫描照片,可以看到,互接头中纳米银浆烧结层较为致密。此外,烧结的银层与两侧的金镀层之间界面结合优良,没有裂纹、孔洞等明显缺陷产生。

为了进一步研究连接界面的结合机制,对界面处的组织采用扫描电镜配备的能谱仪进行元素线扫描分析,结果如图7所示。由图可见,纳米银浆烧结层与金镀层之间存在一个明显的互扩散层,厚度约为1 μm。



图5 烧结样件示意图

Fig.5 Schematic diagram of sintered sample

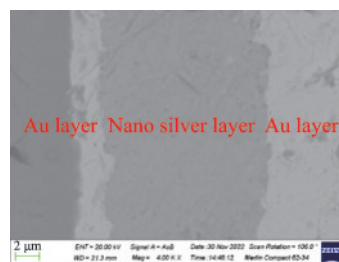


图6 截面微观电子扫描照片

Fig.6 Cross-sectional microscopic electron scanning photo

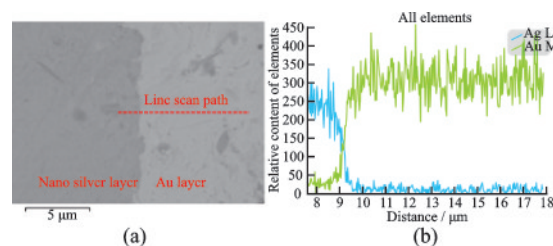


图7 纳米银浆烧结层与镀金层连接界面的元素线扫描照片:
(a)连接界面的电子扫描照片;(b)界面元素扫描结果

Fig.7 Elemental line scan photo of the connection interface between the nano-silver sintered layer and the gold-plated layer: (a) Electron scanning photo of the connection interface; (b) Element scanning results of the interface

2.2 工艺参数研究

为了研究纳米银浆烧结工艺参数对接头剪切强度的影响,采用热风烧结炉(空气氛围)在不同烧结温度、烧结时间和升温速率条件下进行纳米银浆烧结,其余变量均保持一致。采用Dage 4000拉力剪切力测试仪对烧结后的样件进行剪切强度测试,结果如图8所示。

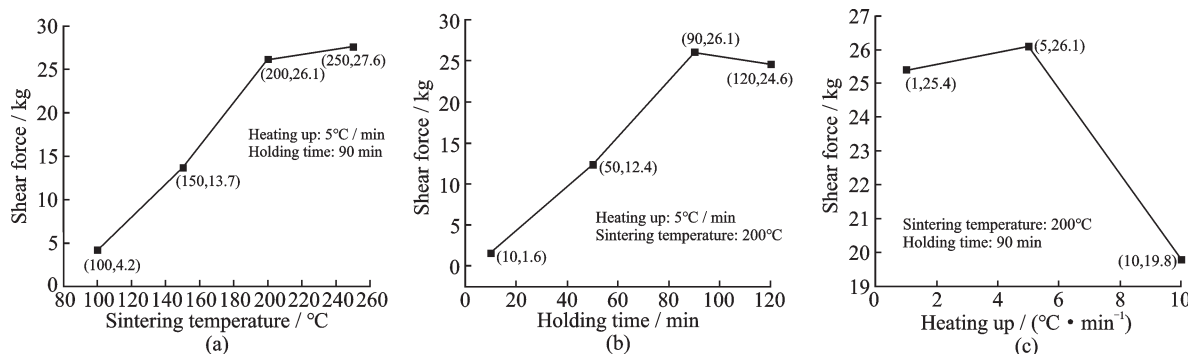


图8 不同工艺参数对剪切力的影响:(a)烧结温度;(b)烧结时间;(c)升温速率

Fig.8 Effect of different process parameters on shear force: (a) Sintering temperature; (b) Sintering time; (c) Heating rate

由图8可见,烧结温度、烧结时间以及升温速率对剪切强度均有影响,其中烧结温度和烧结时间影响较大,升温速率影响较小。随着烧结温度增加,剪切强度呈上升趋势,但是当烧结温度达到200℃以上时,升高幅度相对较小。随着烧结时间增加,剪切强度则是出现先上升而后略有下降的趋势。升温速率为5℃/min时剪切强度最大,升温速率继续增大,剪切强度降低。

图9为随机抽取的两只纳米银浆烧结样品45倍下的宏观剪切形貌。可以看出,在200℃、90 min、5℃/min固化条件下,芯片剪切力的失效模式为银层内部断裂,断裂层表面比较光滑。

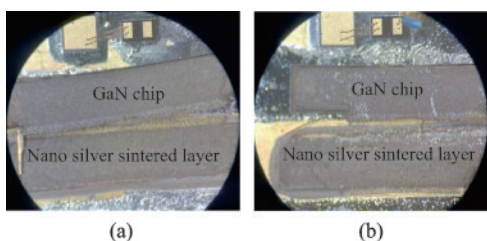


图9 200℃、5℃/min、90 min条件纳米银浆烧结样品的剪切形貌: (a) 样品1; (b) 样品2

Fig.9 Shear morphology of nanosilver paste sintered samples under conditions of 200℃, 5℃/min, 90 min: (a) Sample 1; (b) Sample 2

图10为纳米银浆烧结样品的微观剪切形貌,从图中可以看出,剪切失效模式为银层内部断裂,且为韧性断裂,断面处存在有机物挥发后残留的点状孔隙,说明纳米银浆与管壳底座发生了相互扩散,接合良好。

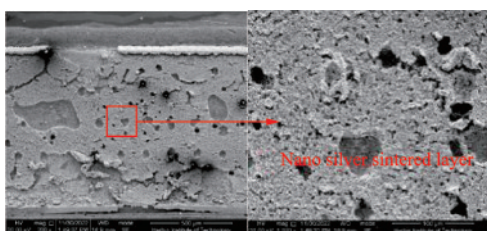


图10 200℃、5℃/min、90 min条件下烧结样品的剪切测试后断面图

Fig.10 Sectional view after shear test of sintered sample at 200℃, 5℃/min, 90 min

综上,从烧结后的形貌可看出,200℃、90 min、5℃/min固化条件下,纳米银浆层内部已形成有效的互连结构形貌,纳米银浆烧结完全且孔隙较少,组织致密化较高,会形成有效的三维网络互连结构,这些将显著提高烧结样品的剪切强度。

2.3 热阻测试

为验证纳米银浆烧结下芯片的散热性能,对样品进行热成像试验,其中管芯的总栅宽为110 mm,功耗密度为5.5 W/mm。观察纳米银浆管芯温度分布,并与金锡烧结管芯温度分布进行对比。图11为实验中使用的样品装配图。

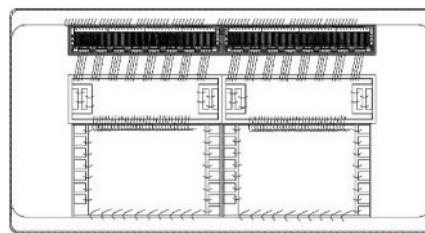


图11 某大功率GaN功率管装配图

Fig.11 Assembly drawing of a high-power GaN power tube

图12为金锡烧结样品与纳米银浆烧结样品的温度分布。从图中可以看出,两种样品的最高温度均出现在功率芯片内侧,功率芯片边缘位置温度略低,两种样品的温度分布基本吻合,管芯温度分布均较为均匀,管芯上未出现热斑。

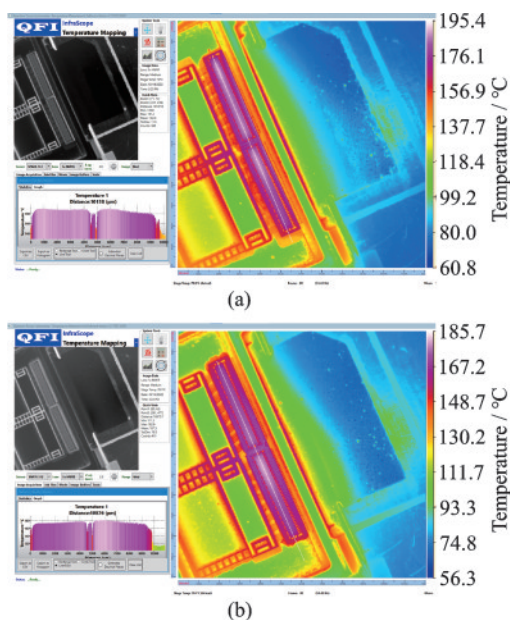


图12 (a) Au80Sn20样品温度; (b) 纳米银浆样品温度

Fig.12 (a) Au80Sn20 sample temperature; (b) Nano silver paste sample temperature

试验后通过STM6型金相显微镜分别测量芯片下方Au80Sn20焊料、纳米银浆层厚度,最后计算两种样品的热阻,结果见表1所示。由表可见,纳米银浆烧结样品的芯片热阻降低了10%~14%左右。

表1 纳米银浆粘结样品与金锡烧结样品的热阻对比

Tab.1 Thermal resistance comparison of bonded and sintered samples

Solder	Serial number	Junction temperature/℃	Shell temperature/℃	Thermal resistance/(℃·W ⁻¹)	Solder thickness/μm	Total thermal resistance corresponding to unit thickness of solder/(℃·W ⁻¹)
Au80Sn20	1	184.6	103.4	0.634	14	0.0450
	2	180.3	96.5	0.654	15	0.0440
	3	183.8	100.6	0.650	15	0.0433
Nano silver	1	167.5	92.1	0.588	26	0.0226
	2	173.7	101.4	0.564	24	0.0235
	3	168.0	93.4	0.582	27	0.0216

2.4 可靠性验证

对热阻测试后的纳米银浆样品按表2条件进行可靠性试验,其中 P_{in} 为输入功率, P_{out} 为输出功率, t_c 为壳温。可靠性试验后再对样品进行热成像试验,并根据热测试结果计算可靠性试验后的纳米银浆样品热阻。

表2 可靠性试验条件

Tab.2 Reliability test conditions

Experiment	Test condition
Sweep vibration	GJB548A—96 method 1011A condition B
Temperature shock	GJB548B—2005 method 1011.1 condition A, 20 times
Temperature cycle	GJB 548B—2005 Method 1010.1 Conditions: -65-175℃, keep warm for 15 min, cycle for 300 times
RF aging	Frequency: 1.3 GHz, P_{in} =43 W, P_{out} =58 W, period: 2.3 ms, pulse width: 350 μs, t_c =70℃, 240 h
Shear strength	GJB548B—2005 method 2019.2

表3为3只纳米银浆烧结样品可靠性试验后的平均热阻结果,图13为纳米银浆样品分别在温度冲击、扫频振动、温度循环及射频老炼后的典型热阻温度分布图。纳米银浆烧结样品可靠性试验前后热阻未出现明显变化,且热阻优于金锡烧结。可靠性试验后纳米银浆烧结管芯温度分布较均匀,未出现热斑情况。可见纳米银浆的导热性可满足大功率器件的散热要求,且具有良好的可靠性。

表3 可靠性试验后样品热阻(℃/W)

Tab.3 Sample thermal resistance after reliability test (℃/W)

Before the test	Sweep vibration	Temperature shock	Temperature cycle	RF aging
0.578	0.574	0.556	0.618	0.628

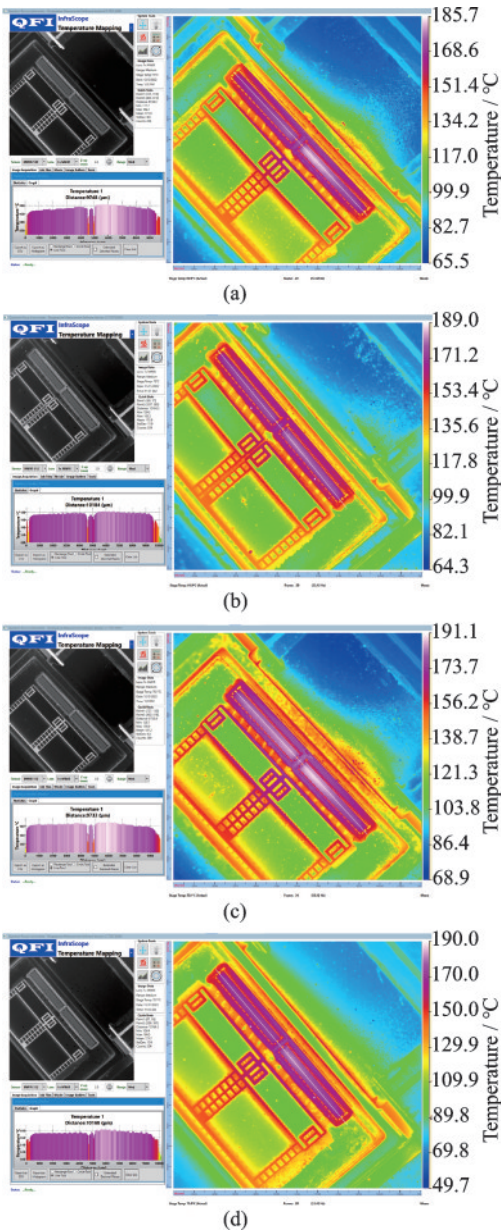


图13 可靠性试验后样品温度分布云图:(a)扫频振动;(b)温度冲击;(c)温度循环;(d)射频老炼

Fig.13 Cloud images of sample temperature distributions after reliability test: (a) Frequency sweep vibration; (b) Temperature shock; (c) Temperature cycle; (d) Radio frequency aging

2.5 可靠性试验后剪切力试验

对可靠性试验后的所有样品按照 GJB548B—2005 方法 2019.2 进行芯片剪切强度测试,纳米银浆粘接的芯片剪切强度均值为 47.6 MPa,而可靠性试验前的均值为 47.2 MPa。可靠性试验后芯片剪切强度变化不明显,甚至略微增加,其原因在于纳米银浆材料烧结后与两侧金层之间实现了原子间的相互扩散,由于金、银具有相近的化学性质和晶格参数,可以在原子之间建立强化学键,形成牢固连接,且固化后的连接材料银含量达 99% 以上,在一系列温度应力作用下仍能保持较高的强度。

3 结 论

本文对纳米银浆烧结样品进行了微观组织分析、工艺参数研究及可靠性分析,并将纳米银浆烧结样品与 Au80Sn20 烧结样品的热测试结果进行了对比,结果表明纳米银浆具有可靠的连接强度、良好的导热性,推广应用价值较大。可将此纳米银浆烧结工艺应用到大功率器件上。

参 考 文 献

- [1] 李可为. 集成电路芯片封装技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 23-26.
- [2] 曾理, 陈文媛, 谢诗文, 等. 集成电路封装高密度化与散热问题[J]. 电子与封装, 2006, 6(9): 15-21.

- [3] 吴海平, 吴希俊. 电子元件封装用导电胶的研究进展[J]. 材料导报, 2004, 18(6): 83-85.
- [4] Rane S, Puri V, Amalnerkar D. A study on sintering and microstructure development of fitless silver thick film conductors[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2000, 11: 667-674.
- [5] 徐达, 常青松, 杨彦峰. 高热导率纳米银胶的可靠性研究[J]. 电子元件与材料, 2017, 36(2): 82-84.
- [6] 胡永芳, 孙毅鹏. 3D-MCM 高集成微波模块的热设计研究和应用[J]. 电子机械工程, 2019, 35(2): 25-29.
- [7] 洪求龙, 付兴昌, 冀乃一, 等. 高热导率纳米银胶在大功率器件上的应用[J]. 微纳电子技术, 2018, 55(5): 315-319.
- [8] Sasaki K, Mizumura N. Development of low temperature sintered nano silver pastes using MO technology and resin resin-forcing technology [C]. 2014 IEEE International Conference on Electronics Packaging (ICEP). Dalian: IEEE, 2013: 1066-1070.
- [9] 陈裕焜, 贾新章, 张德胜, 等. GJB548B—2005 微电子器件试验方法和程序[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2007: 113-229.



吴 迪(WU Di) 男, 1995 年出生于安徽合肥, 2020 年毕业于哈尔滨工业大学, 获硕士学位, 现在从事新工艺的开发设计工作。

(上接第 268 页)

- [9] Shul R J, Vawter G A, Willson C G, et al. Comparison of plasma etch techniques for III-V nitrides[J]. Solid-State Electronics, 1998, 42(12): 2259-2267.
- [10] Baborowski J, Muralt P, Ledermann N, et al. Etching of RuO₂ and Pt thin films with ECR/RF reactor [J]. Vacuum, 2000, 56(1): 51-56.
- [11] Kima H W, Jub B S, Kangb C J, et al. Investigation into the patterning of a concave-type Pt electrode capacitor using the reactive ion etching method [J]. Microelectron Eng, 2003, 65(4): 489-497.
- [12] Kwon K H, Kang S Y, Kim S I, et al. Etch characteristics of Pt by using BCl₃/Cl₂-gas mixtures[J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2002, 13(4): 187-191.
- [13] Malyshev M V, Donnelly V M, Kornblit A, et al. Percent dissociation of Cl₂ in inductively coupled, chlorine-containing plasmas [J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84(1): 137-146.
- [14] Eddy C R, Dobisz E A, Meyer J R, et al. Electron cyclotron resonance reactive ion etching of fine features in

Hg_xCd_{1-x}Te using CH₄/H₂ plasmas[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 1993, 11(4): 1763-1767.

- [15] Conrad J R. Plasma source ion-implantation technique for surface modification of materials[J]. Journal of Applied Physics, 1987, 62(11): 4591-4596.
- [16] Berger R L, Valoe E J. The frequency and damping of ion acoustic waves in collisional and collisionless two-species plasma[J]. Physics of Plasmas, 2005, 12(3): 032104.
- [17] Craciun G, Blauw M A, Drift E, et al. Temperature influence on etching deep holes with SF₆/O₂ cryogenic plasma[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2002, 12(4): 390-394.



宋 琳(SONG Lin) 男, 1987 年生, 爱发科(苏州)技术研究开发有限公司电子本部研究员, 大连理工大学硕士研究生, 现从事半导体材料、金属、压电材料等干法刻蚀工艺的研究。