

第三代半导体产业技术创新战略联盟技术报告

GaN HEMT 电力电子器件测试分析报告

版本：V01.00

2018 年 06 月发布

第三代半导体产业技术创新战略联盟 发布

目录

前言	I
一、 背景简介	2
1.1 GaN 增强型 HEMT 器件结构及工作原理	2
1.2 GaN HEMT 器件的发展现状优势及前景	4
1.3 市场行业发展现状	5
1.4 技术发展现状	8
1.5 GaN HEMT 市场前景	10
二、 样品基本信息	12
三、 静态参数测试分析	12
(一) 转移特性	13
(二) 输出特性	14
(三) 导通电阻	15
四、 动态参数测试分析	17
(一) 开关特性	18
(二) 电容电压特性	19
(三) 安全工作区	20
五、 性能优值	21
六、 芯片结构和测试应用建议	22
(一) 芯片结构	22
(二) 芯片装配流程	23
(三) eGaN HEMT 测试方法标准制定建议	25
附录 A 参考文献	27

前言

现在 GaN HEMT 器件在高频功率应用方面有巨大的潜力，与同样先进的 Si 基功率 MOSFET 相比，GaN HEMT 具有低导通电阻，体积比相同电阻的硅器件更小，并且具有卓越许多倍的开关性能等优势。但是在可靠性和稳定性等方面也会存在很多问题，目前很多家公司虽然都很重视关于 HEMT 器件可靠性和稳定性的测试研究，但是都没有统一的标准，因此制定统一的应用测试标准变得尤为重要。

本报告分析了 GaN HEMT 器件发展现状和市场前景，针对现有一款典型的 GaN HEMT 器件型号和目前性能先进且指标相似的 Si 基 MOSFET 器件型号，通过对样品数据的对比与分析，以达到对 GaN HEMT 发展状况有较为全面的了解。

本报告不特意针对任何被测产品的制造商或品牌单位，测试结果不作为评价样品生产商或者品牌单位市场地位的任何依据。

本报告对器件静态参数、动态参数、芯片外形结构等方面开展测试与评估，对测试结果的判定有独立分析，相关内容也可以为产品生产设计、质量改善、企业战略规划和标准规范制定等方面提供参考，为制定 GaN HEMT 相关标准提供奠定基础，作抛砖引玉之用。

一、背景简介

1.1 GaN 增强型 HEMT 器件结构及工作原理

HEMT 是高电子迁移率晶体管 (High-Electron-Mobility-Transistor) 的简称，如图 1 所示为典型 AlGaN/GaN HEMT 器件的基本结构。最底层是衬底层，一般为 SiC 或 Si 材料，然后外延生长 n 型 GaN 缓冲层，外延生长的 n 型 AlGaN 势垒层，形成 AlGaN/GaN 异质结。最后，在 AlGaN 层上淀积形成肖特基接触的栅极(G)，欧姆接触的源极(S)和漏极(D)。

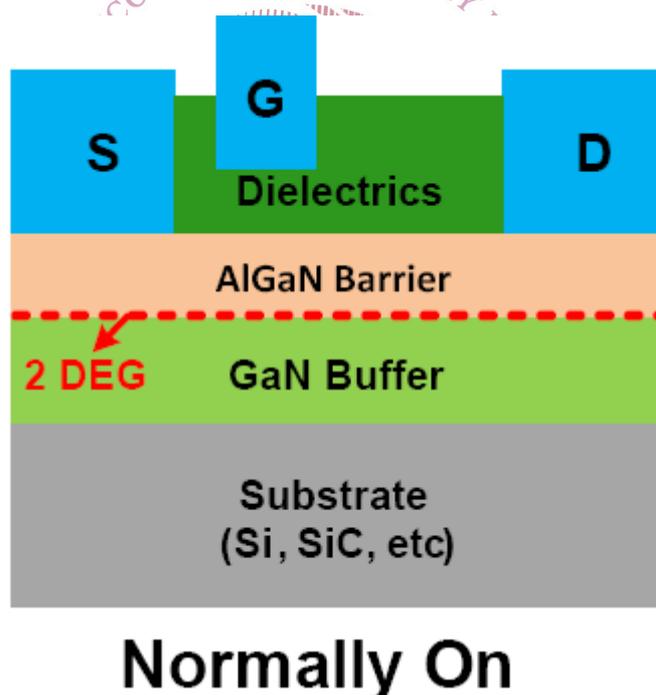


图 1 AlGaN/GaN HEMT 器件的基本结构

AlGaN/GaN HEMT 为异质结结构器件，通过在 GaN 层上气相淀积或分子束外延生长 AlGaN 层，形成 AlGaN/GaN 异质结。在氮化镓半导体材料的晶体结构中，纤锌矿与闪锌矿结构，为主要存在的两种非中心对称的晶体结构。在这两种结构中，纤锌矿

结构具有更低的对称性，当没有外加应力条件时，GaN 晶体内的正负电荷中心发生分离，在沿极轴的方向上产生极化现象，这种现象称为 GaN 的自发极化效应，在外加应力下，由于晶体受到应力产生晶格形变，使得内部正负电荷发生分离，在晶体内部形成电场，导致晶体表面感应出极化电荷，发生压电效应，由于压电极化和自发极化电场方向相同，在电场作用下使得异质结界面交界处感应出极化电荷，由于 AlGa_{0.3}N 材料具有比 GaN 材料更宽的带隙，在到达平衡时，异质结界面交界处能带发生弯曲，造成导带和价带的不连续，在异质结界面形成一个三角形的势阱。从图 2 中可以看到，在 GaN 一侧，导带底 E_C 已经低于费米能级 E_F ，所以会有大量的电子积聚在三角形势阱中。同时宽带隙 AlGa_{0.3}N 一侧的高势垒，使得电子很难逾越至势阱外，电子被限制横向运动于界面的薄层中，这个薄层被称之为二维电子气（2DEG）。

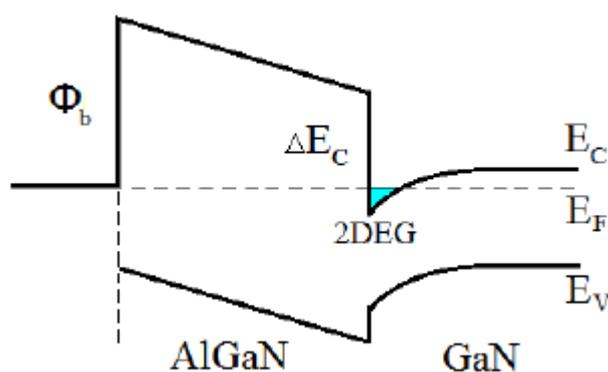


图 2 AlGa_{0.3}N/GaN HEMT 器件能带图

如图 3 为 AlGa_{0.3}N/GaN HEMT 器件结构示意图。从图中可以看到，SiC 材料作为器件衬底，其上依次为 GaN 缓冲层、AlGa_{0.3}N

势垒层，源漏电极进行高浓度掺杂并与沟道中的二维电子气相连形成欧姆接触。漏极上的漏源电压 V_{ds} 使得沟道内产生横向电场，在横向电场作用下，二维电子气沿异质结界面进行输运形成漏极输出电流 I_{ds} 。栅电极与 AlGa_N 势垒层进行肖特基接触，通过栅电压 V_{gs} 控制 AlGa_N/Ga_N 异质结中势阱的深度，改变沟道中二维电子气面密度的大小，从而控制沟道内的漏极输出电流。

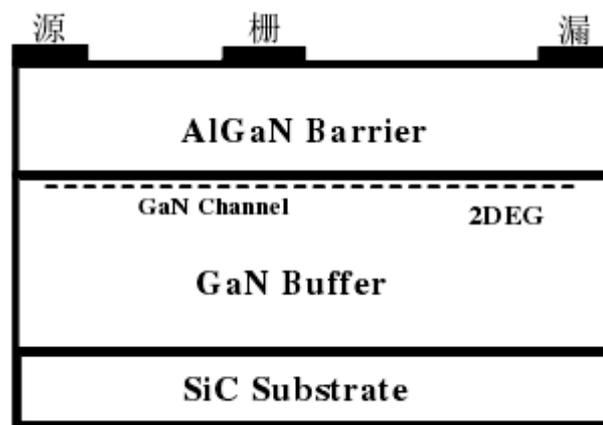


图 3 AlGa_N/Ga_N HEMT 器件结构示意图

1.2 Ga_N HEMT 器件的发展现状优势及前景

第三代半导体产业技术创新战略联盟

GaN 材料是继硅以来最重要的发明之一，它的优势主要表现在以下三个方面（如表 1 所示）：1) 临界击穿电场是硅的 10 倍，因此，同样电压的器件的导通电阻是硅的千分之一，大大降低了电源的导通损耗；2) 电子渡越时间是硅的十分之一，饱和速度比硅高 2 倍，器件的工作频率可以比硅器件提升 20 倍以上，能明显减少电源的开关损耗，且能大幅减小储能元件如电容、电感的体积，从而成倍地减小电源体积；3) 禁带宽度是硅的三倍，本征电子浓度极低，电子很难被激发，因此理论上 Ga_N 器件可

以在 800°C 以上的高温工作，并具有天然的抗总剂量辐照的能力。

	硅 (Si)	氮化镓 (GaN)	影响的器件参数
禁带宽度 [eV]	1.1	3.4	最高工作温度 (T _J) 额定工作电压 (BVDSS)
临界电场强度 [MV/cm]	0.3	3.0	额定工作电压 (BVDSS) 通态电阻 (R _{ds(on)})
载流子浓度 ×10 ¹² [cm ⁻²]	1	10	电流密度 (ID)
载流子迁移率 [cm ² /V·s]	1300	1500	工作频率 (f _s)
电子饱和速度 ×10 ⁷ [cm/s]	1.0	2.7	

1.3 市场行业发展现状

GaN 材料原先被用为如蓝色 LED 等 LED 类产品的主要原料，但是由于 GaN 具有高硬度与高能隙的特性，并且 GaN 功率元件可以在硅基质 (Silicon substrates) 上成长，在面积与整体成本考量上，也具有比碳化硅元件更划算的可能性，因此也被运用在高功率半导体元件中。

随着 GaN 材料在光电器件领域的广泛应用，加速了 GaN 材料的发展，特别是大直径硅衬底 GaN 外延生长技术的进步以及逐步商业化，使得 GaN 具有更低廉的成本价格，有力地促进了 GaN 功率半导体器件的发展。预计到 2020 年，Si 基 GaN 元件售价会和 Si 基 MOSFET 以及 Si 基 IGBT 售价相当。

基于 GaN 器件的优异性能，众多国际厂商如 Infineon、ST、NXP(已被高通收购)等近年来竞相追逐此领域市场，虽然从目前来看，GaN 器件成本相对于 Si、SiC 仍然较高，但得益于 GaN 材料在其他领域的普及应用，使得成本下降成为必然趋势，GaN 产品未来长期前景看好。目前基于 GaN 的功率开关器件主要包括 AlGaN/GaN HEMT、GaN 基 MOSFET 和 MIS-HEMT 等结构。其中，AlGaN/GaN HEMT 具有工艺简单、技术成熟、优良的正向导通特性和高的工作频率等优点，成为 GaN 功率开关器件中最受关注的结构。目前基于 6 英寸硅基 GaN 平台，IR 公司和 EPC 公司分别推出了 30V 和 100V/200V 的 GaN 场效应电力电子器件，600V-900VGaN 器件在近期也将推向市场。以欧洲微电子研究中心为代表的研发机构正开展 8 英寸硅基 GaN 电力电子器件研究。



图 4 GaN 功率器件领域主要厂商

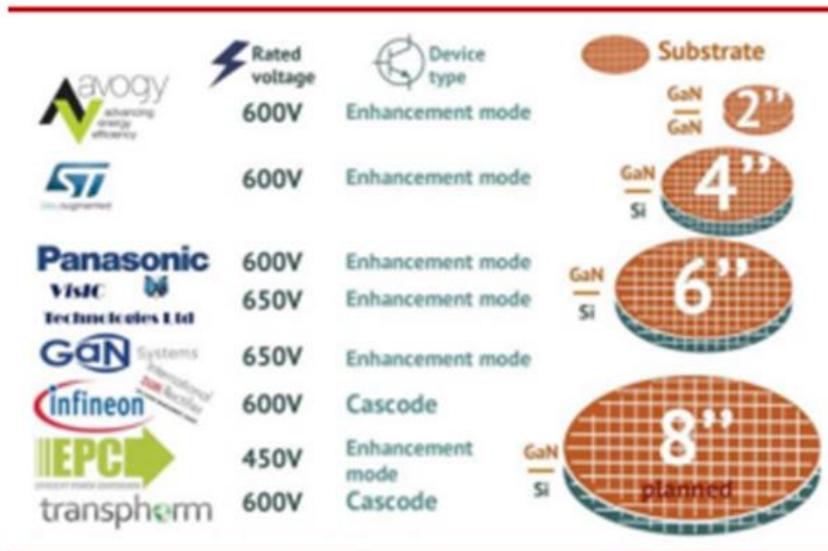


图 5 各厂商 GaN 器件不同类型及工艺

市场规模方面，2020 年 GaN 器件市场整体规模有可能达到约 6 亿美元。届时，一块 6 英寸晶圆可加工出大约 58 万个 GaN。按照 EV 和 HEV 从 2018 年或 2019 年开始采用 GaN 的设想来看，GaN 器件的数量将从 2018 年开始显著增加，一直到 2020 年都将以 80% 的年均增长率（CAGR）增长。

从最近的报道来看，GaN 行业正随着合并、收购及授权协议的敲定而逐渐形成。包括古河电气工业与美国 Transphorm 公司签订知识产权组合排他性授权协议，以及美国 Transphorm 公司与富士通最近签订的协议，都表明 GaN 技术正在向整个价值链扩展。这将强化主要企业在市场上的地位，也会淘汰最没有竞争力的企业。因此，日本企业现在正在与德国英飞凌科技、美国国际整流器公司（IR）及美国宜普电源转换公司（EPC）等功率器件厂商竞争，全力进军该领域。

1.4 技术发展现状

1.4.1 提高击穿电压

理论上在相同击穿电压下，GaN 功率器件比 Si 和 SiC 功率器件的导通电阻更低，但是目前其性能远未达到理论值。研究发现主要原因是器件源漏间通过纵向贯通 GaN 缓冲层，沿 Si 衬底与 GaN 缓冲层界面形成了漏电。因此当前提高器件击穿电压的方案主要集中在以下三个方向：(1)改进衬底结构;(2)改进缓冲层结构;(3)改进器件结构。

1.4.2 实现增强型(常关型)器件

基于 AlGaIn/GaN 结构的器件是耗尽型(常开型)器件，而具有正阈值电压的增强型(常关型)功率器件能够确保功率电子系统的安全性、降低系统成本和复杂性等，是功率系统中的首选器件。因此，对于 GaN 功率器件而言，增强型器件实现也是研究者们极其关注的问题。目前国际上多采用凹槽栅、p-GaN 栅和氟离子注入等方法直接实现增强型，另外，使用 Cascode 级连技术间接实现常关型。

1.4.3 抑制电流崩塌效应

抑制电流崩塌的方法主要有以下几种：(1)表面钝化，表面钝化的问题是钝化工艺比较复杂，重复性较低，并不能完全消除电

流崩塌效应，对器件的栅极漏电流和截止频率有影响，增加了器件的散热问题。(2)场板，2015年，美国HRL用三场板结构结合SiN钝化，实现了高耐压低动态电阻的Si基GaN功率器件，开关速度5us测试状态下，器件350V时动态与静态Ron之比1.2，600V时两者之比1.6。(3)生长冒层，如使用p型GaN冒层来离化的受主杂质形成负空间电荷层，屏蔽表面势的波动对沟道电子的影响。该方法材料生长过程相对简单，易控制，但是增加了工艺难度，如栅极制作过程比较复杂。(4)势垒层掺杂，该方法增加了沟道电子浓度，或者减少了势垒层表面态密度，一般此种器件都生长了一薄层未掺杂的GaN或AlGaN冒层。

1.4.4 可靠性

随着各项器件技术的不断进步，GaN HEMT器件已逐渐从实验室向工业界转移，可靠性已成为各界普遍关心的问题。相对于硅功率器件技术，GaN HEMT功率器件的可靠性和稳定性研究还相对滞后，器件退化规律、失效机制与模式、增强可靠性方法等虽有一些研究报告，但远不能满足器件走向大规模实际应用阶段的需要。

影响GaN功率器件可靠性的原因比较复杂，包括材料质量、器件结构和器件工艺等多个方面，根据功率器件的工作模式特点和工作环境，GaN HEMT功率器件的可靠性研究重点主要包括

以下几点：(1)栅泄漏电流与表面状态;(2)栅金属退化;(3)高电场和高温下热电子/热声子效应;(4)材料质量。

1.5 GaN HEMT 市场前景

功率电子器件的全球市场份额，常用的估计数字是在 150 亿美元（不含潜在的新能源汽车功率电子市场）上下，区间较大。第 3 代半导体（GaN 和 SiC）器件可望替代其中至少 1/3 的高端市场份额。作为在散热较差的硅基底上的水平结构功率器件，GaN 器件被认为更适合小功率等级，强度高、小型化，主要应用于通讯、个人信息设备的移动电源和小型电源等，如图 6 所示。



图 6 各种类型的电源

硅基 GaN HEMT 主要市场目标是依靠高频性能取代现在的硅 MOSFET。这一领域并没有 SiC 器件的竞争。相对二极管来说，GaN HEMT 面临的电环境不那么严酷。而且其目标市场领域（个人电子产品）对可靠性的要求不如工业应用市场，目前的器件水平已经可以适应。而且由于其市场特征，可以期望通过市场营销以及消费者体验认可（紧凑、小巧）推广产品，与 SiC 器

件面临的完全以成本与可靠性为导向的理性冷血工业客户市场不同。目前活跃在这一领域的公司有 EPC、GaNSystems、以及 PanasonicQuovo 等。另外 GaN 的高频特征使之成为一些重要的潜在领域的首要甚至是必要选择,例如无线充电系统、植入系统、成像、和人造器官等。由于这个原因,尽管目前硅基 GaN 功率器件的全球市场规模估计(最低值 1000 万美元)远远低于 SiC 器件的市场规模(1.4 亿美元),相关市场预测机构(Yole,IMS)仍然给出了远高于 SiC 器件的年度增长率(GaN80%,SiC38%)。到 2020 年将形成 6 亿~10 亿美元的市场规模。需要指出的是这一数字是基于新能源汽车将大量采用硅基 GaN 器件的假定。尽管目前对于 2 种技术路线以及相关标准的支持者势均力敌,由于前述 SiC 器件商业化进展,GaN 器件在这一领域的前景并不明朗。

除了众所周知的“电流崩塌”等可靠性问题,目前 GaN 功率器件市场扩张的一个明显的技术障碍是驱动。HEMT 器件结构本身适合作为一个所谓的常开型器件,就是在失去栅极电压控制的情况下,源极和漏极是导通的。这在功率器件应用中被认为是不利的特征。系统应用者宁肯使用可靠性尚不成熟的 SiC-MOSFET 器件,也不情愿开发适用于常开器件的驱动型式,这是市场的现实。为常开型器件设计的所谓硅级联(Cascade)驱动,在应用中就带来一些限制,首先就是这个硅级联金属-氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)本身需要具有与宽禁带器件

同样的温度指标。在某些应用中还有其他系统层面的问题。需要在系统应用和设计层面积累认识和经验。**HEMT** 也可以在结构设计上做一些调整，成为常关型器件。但是这会增加材料和工艺的复杂性和难度，在其他电性指标，以及良品率、可靠性上做出相应的牺牲。这一点也与 **SiC-JFET** 类似。为了使 **GaN HEMT** 大功率器件有更高的频率应用范围，更适用于当前市场需求，需要不断改善，所以在此之前，对于分立器件的测试就显得至关重要。

二、样品基本信息

本次分析测试选取了国际知名半导体器件制造商 **EPC** 出品的 **EPC2001C** 无铅且符合 **RoHS**(有害物质限制条例)要求的增强型氮化镓 (**eGaN**) **FET** 并将其与 **Infineon** 生产的 **Si** 基 **IPB35N10S3L** 作对比。

EPC2001 FET 是一种 **100 V_{DS}** 器件，导通电阻 **R_{DS(ON)}** 最大值是 **7mΩ**，导通电流为 **36A**，晶片尺寸为 **6.56mm²**。

Si MOSFET IPB35N10S3L 也是一种 **100 V_{DS}** 器件，导通电阻 **R_{DS(ON)}** 最大值是 **26.3mΩ**，导通电流为 **35A**，晶片尺寸为 **8.56mm²**。

三、静态参数测试分析

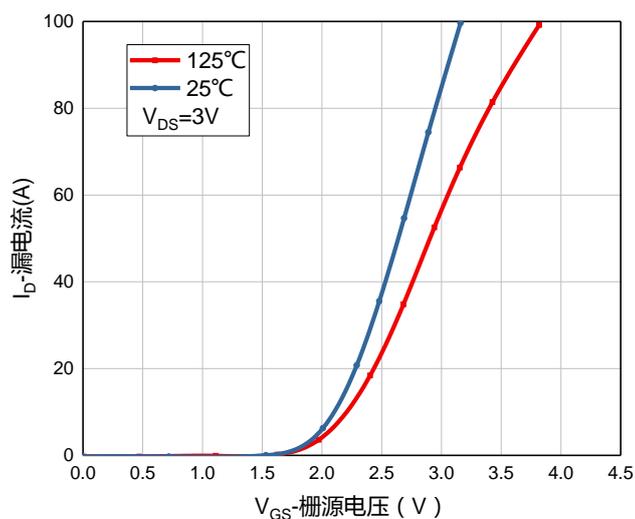
器件的静态参数是指器件在开启或关断稳定状态下的电学特性参数，包括阈值电压、转移特性、输出特性、通态电阻。本

次静态参数测试的 eGaN HEMT EPC2001C 门限电压为-4V 到 6V，说明 EPC2001C 门限电压波动范围较小，需要精确控制栅极驱动电压，而 Si MOSFET IPB35N10S3L 门限电压为 $\pm 20V$ ，测试时栅压达到 40V 仍然没有损坏，说明 Si MOSFET 在栅控方面有很大的优势。同时为了了解器件的高温特性，我们同样在 125°C 高温下提取了器件的特性参数。器件静态参数主要通过我们实验室器件测试仪器 370，371。（实验仪器如图所示）

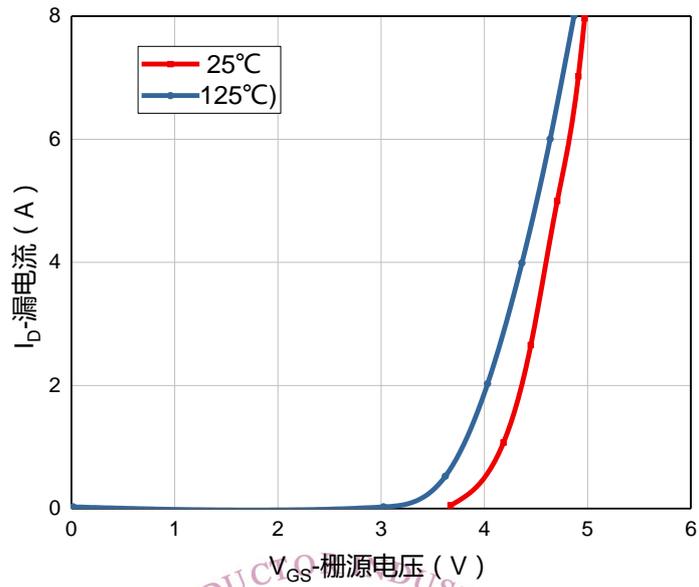


(一) 转移特性

第三代半导体产业技术创新战略联盟

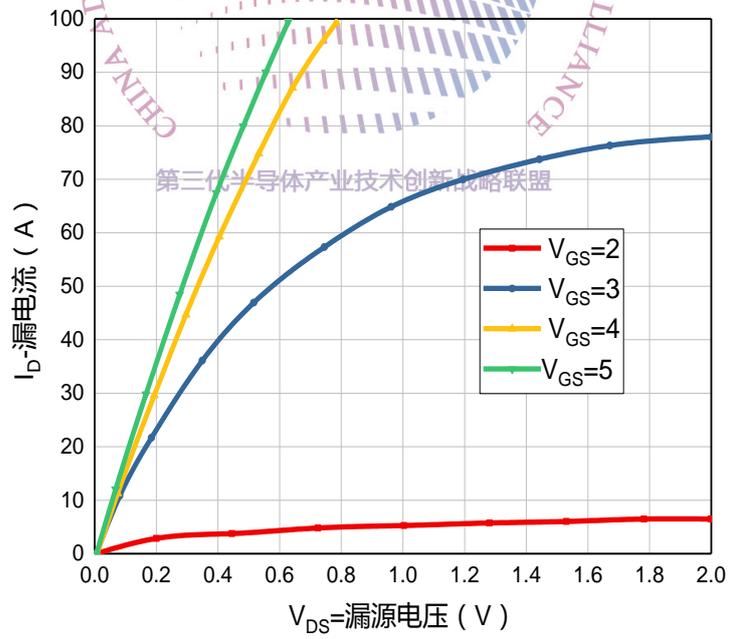


eGaN HEMT EPC2001 转移特性曲线

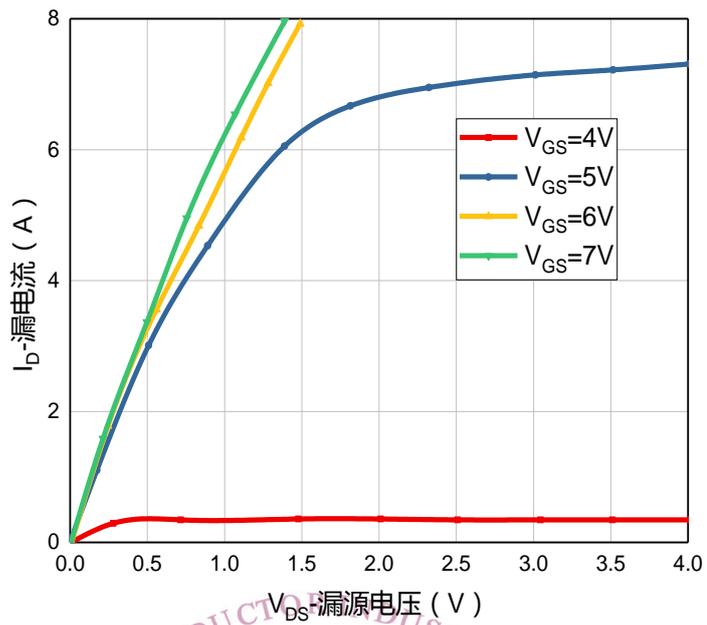


Si MOSFET IPB35N10S3L 转移特性曲线

(二) 输出特性

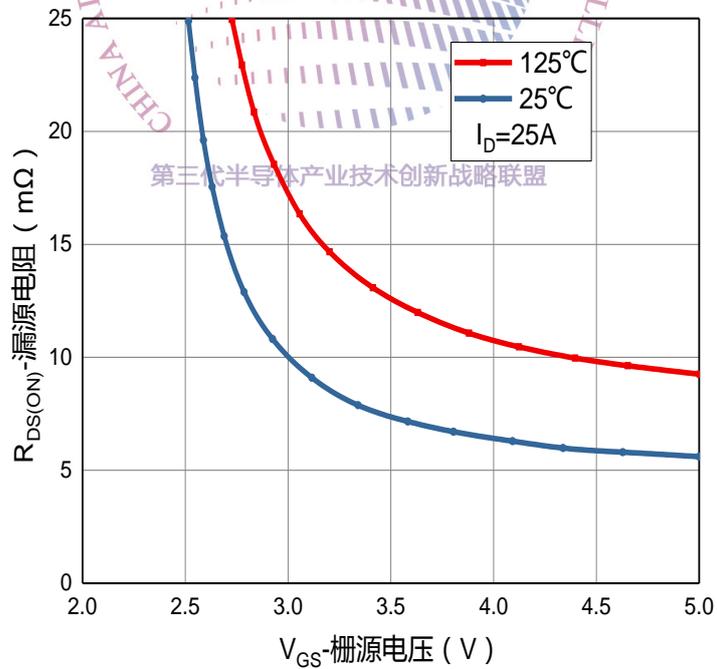


eGaN HEMT EPC2001 输出特性曲线

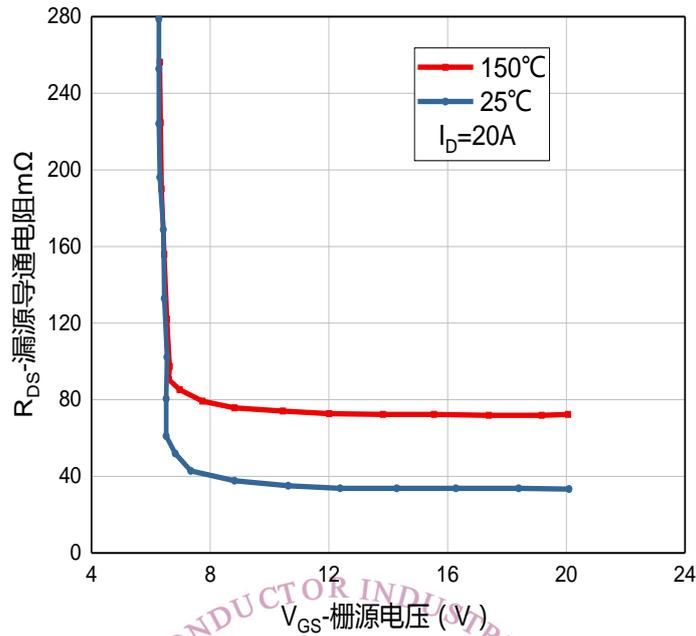


Si MOSFET IPB35N10S3L 输出特性曲线

(三) 导通电阻



eGaN HEMT EPC2001 导通电阻



Si MOSFET IPB35N10S3L 导通电阻

就测试的这 2 种器件来讲，通过对比它们的静态参数可以发现 eGaN HEMT EPC2001 与 Si MOSFET IPB35N10S3L 的一些区别，具体如下：

1、从转移特性曲线可以看出，IPB35N10S3L 阈值电压约为 3.5V，而 EPC2001 的阈值电压仅仅为 1.7V，过低的阈值电压对栅极驱动电路的稳定性要求较高，否则有可能因为栅极电压波动而发生误开启。

2、从转移特性曲线和输出特性曲线可以看出，EPC2001 的输出电流能力比 IPB35N10S3L 大将近 2~3 个数量级。说明前者更适合在大电流的环境下工作。

3、相比于 IPB35N10S3L，EPC2001 在高温下（125°C）转移特性曲线较平缓，不及 Si MOSFET 陡直，说明 EPC2001 在高

温环境下劣化程度更严重，这是 eGaN HEMT 器件以后在应用方面所面临的一大难点。

4、从导通电阻曲线可以看出，这 2 种器件的通态电阻 $R_{DS(ON)}$ 随 V_G 的变化曲线明显存在一个拐点，在这之前，器件的导通电阻随栅压的增加而迅速降低；在这之后，器件的导通电阻随栅压趋于饱和。从器件的应用角度考虑，功率器件的主要功能为开关功能，由于处理的电压电流等级比较高，所以要求导通时电阻尽量小而关断时电阻尽量大，否则器件很容易因为自身发热而被烧毁。而在阈值电压与拐点电压之间，一是器件导通电阻大，二是导通电阻随栅压的变化较敏感，实际上并不适合器件的正常导通工作，而拐点之后才是合理的工作区间。

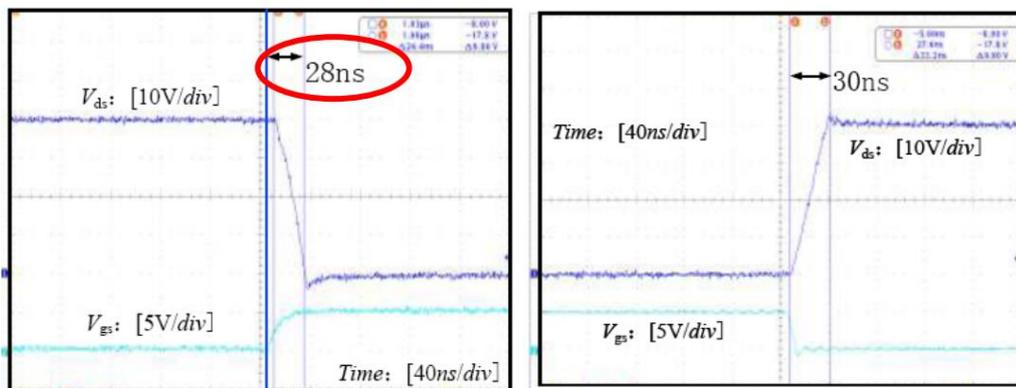
EPC2001 25°C 时拐点大概在 3.5V 左右，但是导通电阻在其工作栅压 4V~5V 范围内仍然变化较大变化幅度约为 12%。125°C 时拐点电压大概在 4.5V，变化幅度约为 23%，IPB35N10S3L 拐点约在 6.5V 左右，在其正常工作栅压大于 13V 情况下，导通电阻基本不变，由此可知，EPC2001 导通电阻受 V_{GS} 和温度影响较大，劣化程度较为严重。

四、动态参数测试分析

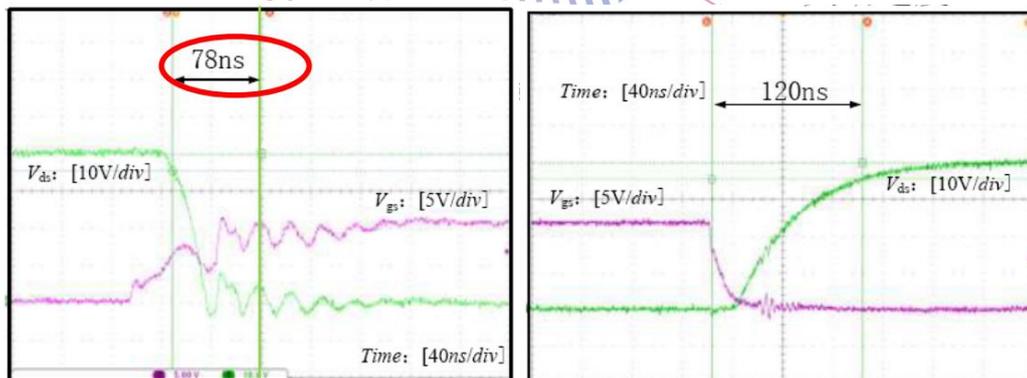
eGaN HEMT 以及功率 MOSFET 在电路中通常作为功率开关用于能源转换及管理应用，随着开关频率的不断增加，器件的开关损耗超过静态损耗成为主要功耗来源，器件的动态参数也成

为评估器件性能的重要参数。相对于器件的静态参数，动态参数主要表征的是器件在开启或关断瞬间的电学特性参数。动态参数主要包括开关特性、电容电压特性、安全工作区。器件的动态参数提取设备主要是电源 Tektronix TPS2024 和示波器 KEITHLEY, 以及粘片所需要的设备等。

(一) 开关特性



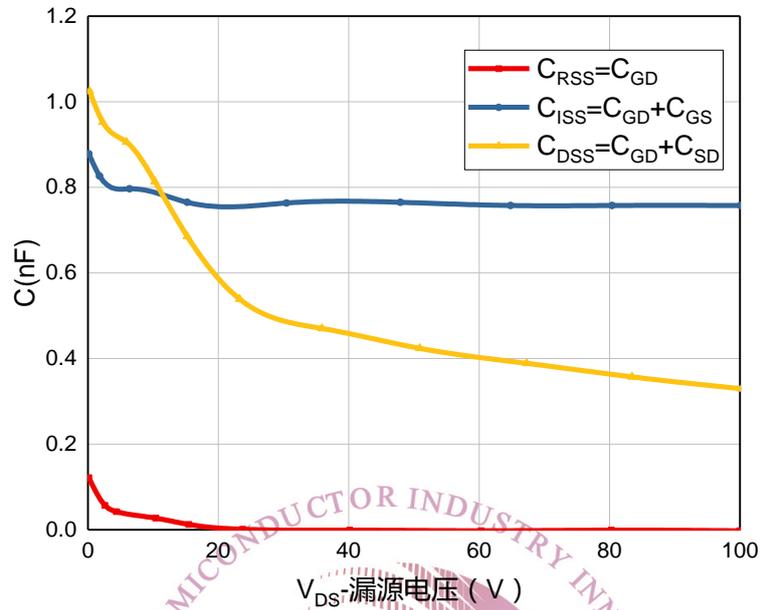
EPC2001 开通速度 EPC2001 关断速度



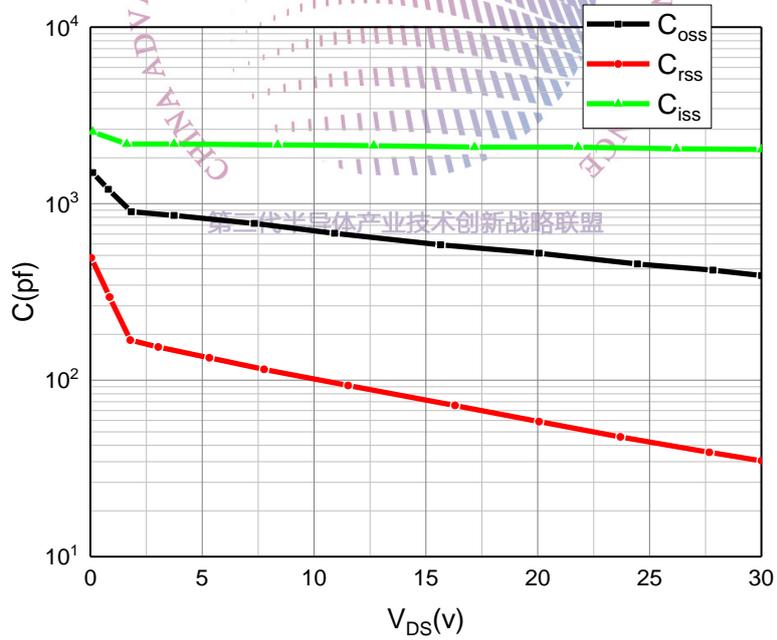
IPB35N10S3L 开通速度

IPB35N10S3L 关断速度

(二) 电容电压特性

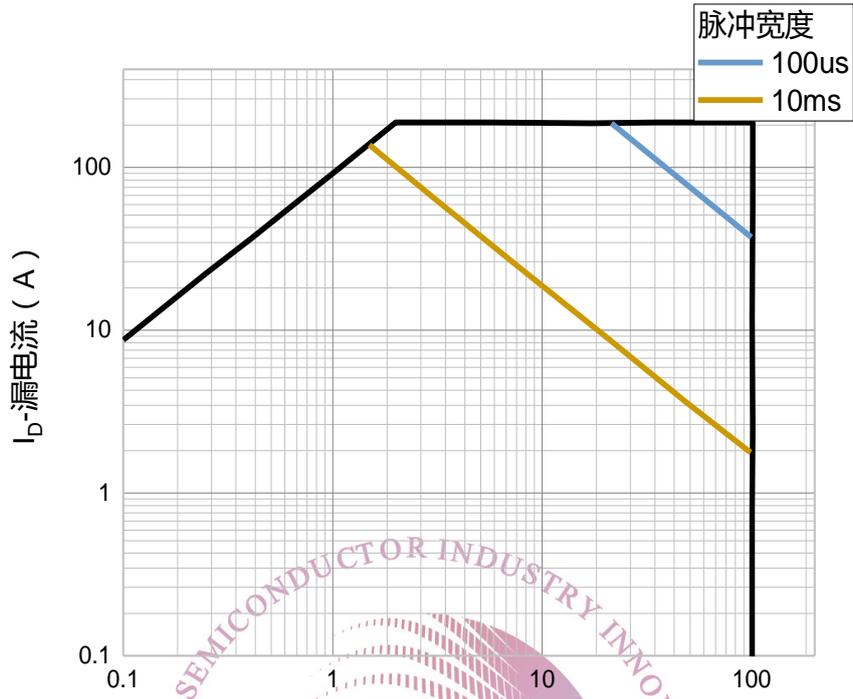


eGaN HEMT EPC2001 电容电压特性

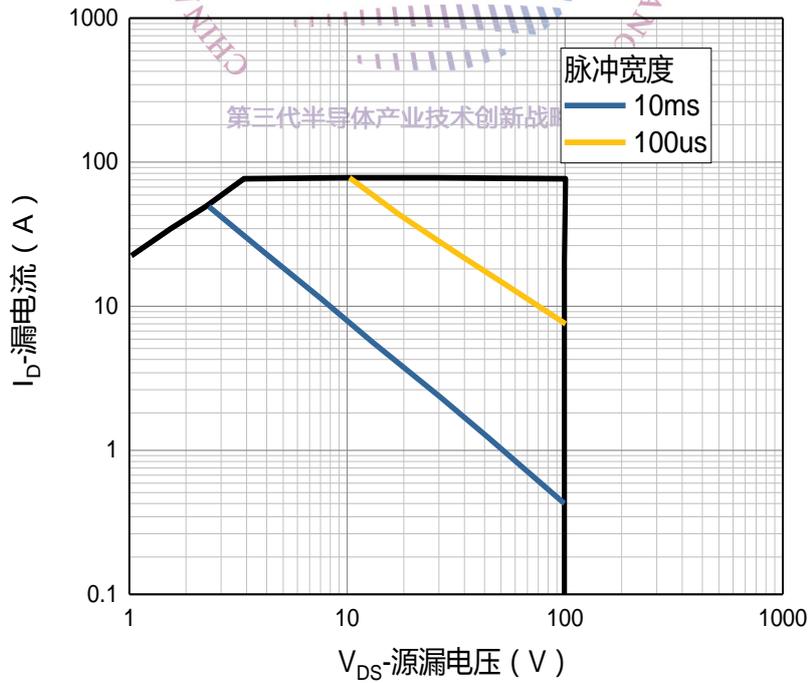


Si MOSFET IPB35N10S3L 电容电压特性

(三) 安全工作区



eGaN HEMT EPC2001 安全工作区



MOSFET IPB35N10S3L 安全工作区

Si

就测试的这 2 种器件来讲，通过对比它们的动态参数可以发现 eGaN HEMT EPC2001 与 Si MOSFET IPB35N10S3L 的一些区别，具体如下：

1、从开关特性可以看出 Si MOSFET IPB35N10S3L 器件开通时间 78ns，而 eGaN HEMT EPC2001 器件开通时间为 28ns 约为 IPB35N10S3L 开通时间的 36%，并且 EPC2001 器件关断时间为 30ns 仅为 IPB35N10S3L 器件关断时间 120ns 的 1/4，由此可以看出 eGaN HEMT EPC2001 在高频率开关方面有巨大的优势。

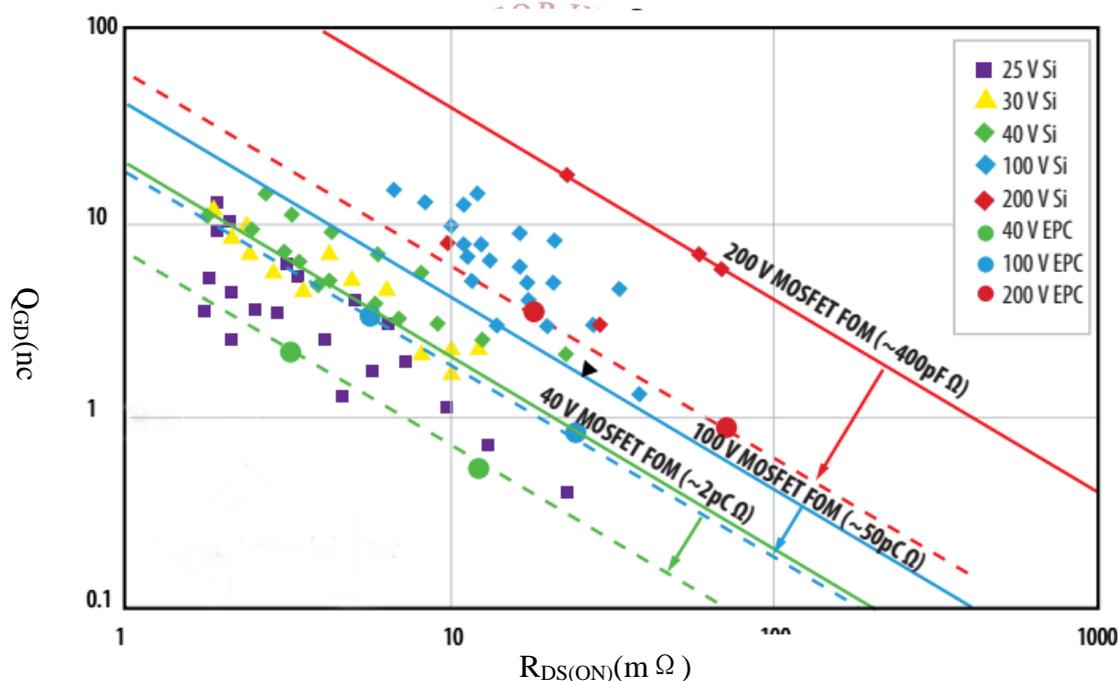
2、从电容电压特性可以看出，相比于 Si 基 MOSFET IPB35N10S3L，eGaN HEMT EPC2001 器件的电容较小，反向恢复时间较小，说明 eGaN HEMT EPC2001 器件可以实现更高的开关频率，开关损耗更小。

3、在安全工作区方面，分别对两种型号的器件加 100us 和 10ms 的电流脉冲，得出以上安全工作区曲线图。从图中可以看出，eGaN HEMT EPC2001 较 IPB35N10S3L 安全工作区明显更大，说明 EPC2001 的安全工作范围更大，应用范围更广，可靠性更高。

五、性能优值

FOM(Figure of merit)是衡量功率器件设计优劣的重要标准，计算公式为 $R_{DS(ON)}*Q_G$ ，FOM 越小表明器件的性能越佳。在实际测试过程中，为了更好更全面的比对 Si MOSFET 和 eGaN HEMT

器件的特性，同时测试了不同型号的 Si 基 MOSFET 和 eGaN HEMT，包括 25V, 30V, 40V, 100V, 200V 的 Infineon 出品的 MOSFET 和 40V, 100V, 200V EPC 出品的 HEMT 器件，得出如下性能优值坐标图，从中可以看出 40V、100V 的 EPC 分别相比于 40V、100V 的 Si 有更小的性能优值。说明 eGaN HEMT 器件与 Si MOSFET 相比有更卓越的性能优势，具有更低的导通电阻，体积比相同电阻的硅器件更小，并且具有卓越许多倍的开关性能。

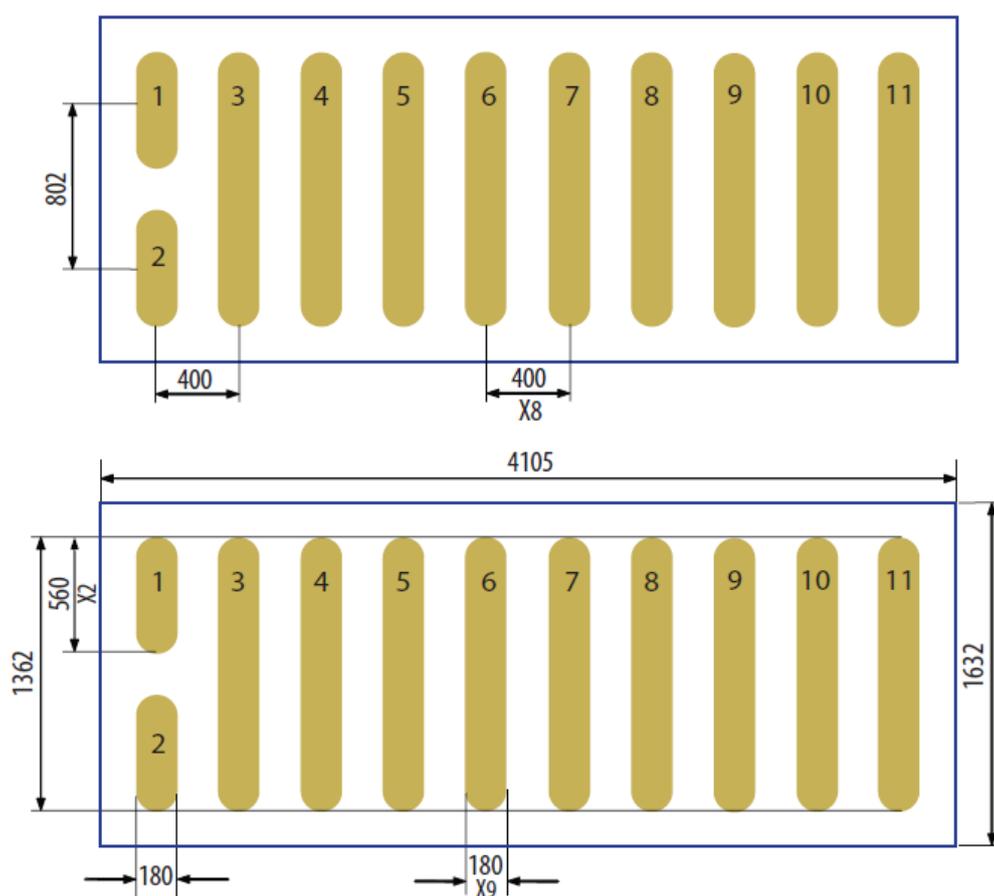
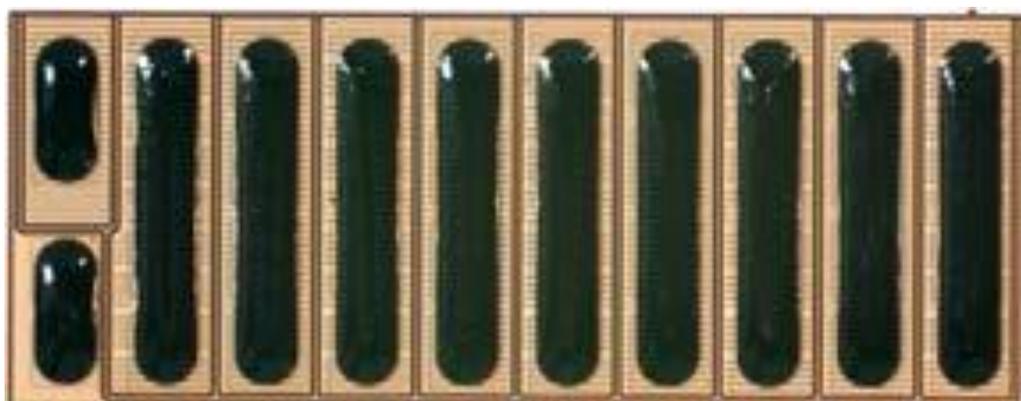


六、芯片结构和测试应用建议

(一) 芯片结构

为了更好的了解 GaN HEMT 行业现状，我们对器件结构进行了解剖分析，具体结构示意图如下所示。如图所示标记 1 部分

为栅极，2为衬底，3、5、7、9、11为漏极，4、6、8、10为源极。



EPC2001 器件结构示意图

(二) 芯片装配流程

步骤 1: 准备测试平台, 包括电源, 示波器, 测试板, 显微镜以及热气枪等



步骤 2: 做防静电 ESD 测试

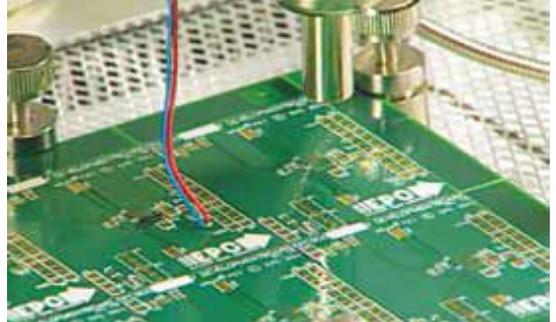
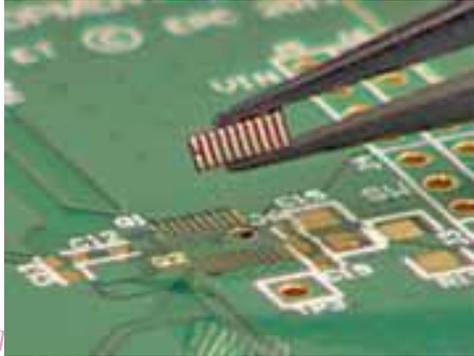
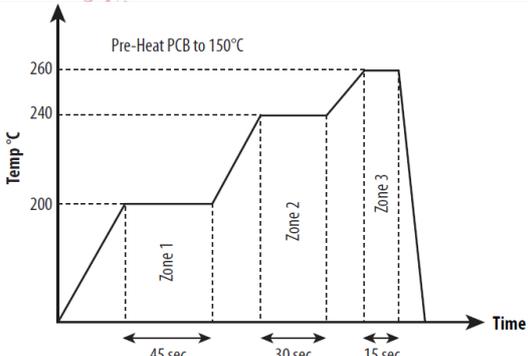


步骤 3: 将 PCB 测试板放在热平台上面



步骤 4: 擦拭多余的焊料



<p>步骤 5: 用热空气枪加热 PCB 板</p>	
<p>步骤 6: 将 HEMT 器件与 PCB 板的焊盘对准，检查对齐方式，确保正确的连接</p>	
<p>步骤 7: 用热空气枪加热装配完成的 PCB 焊盘，使器件与焊盘的接触的锡焊料融化，右图为热空气枪加热温度与时间变化关系图</p>	
<p>步骤 8: 移除热空气枪，关掉加热板，让 PCB 冷却到室温，拆卸板并检查，然后做电学测试。</p>	

(三) eGaN HEMT 测试方法标准制定建议

基于此测试报告的对比结果，选取的 EPC2001 器件存在阈值电压较小，导通电阻受工作栅压与温度变化影响较大造成工作

电压不稳定等缺点，根据导通电阻随栅压的变化曲线可知，eGaN HEMT 的导通电阻随着栅压的不断增加，明显存在一个拐点，在拐点之前，导通电阻偏高，并且随栅压的变化非常敏感，并不适合器件的长时间工作；而在拐点之后，才是器件长期工作的合理区间。因此，仅仅知道器件的阈值电压可能无法确保器件的正常运行，有必要将拐点电压作为保证器件正常工作的临界点，而器件正常工作时的栅压需要在这之上。同时测量器件的导通电阻随栅压的变化曲线，伴随拐点位置的确定，也成为了一项必不可少的器件性能评估依据。



附录 A 参考文献

- 1、于国浩, 张志利, 郝荣晖, 等. GaN HEMT 电力电子器件的关键技术[J]. 电力电子技术, 2017(8):61-64.
- 2、马荣晶. 600V 增强型 GaN HEMT 器件研究及设计[D]. 东南大学, 2016.
- 3、高竹. GaN 基增强型 HEMT 器件及 E/D 模电路研究[D]. 西安电子科技大学, 2015.
- 4、Mahajan A, Arafa M, Fay P, et al. High performance enhancement mode high electron mobility transistors (E-HEMTs) lattice matched to InP[J]. Electron Devices IEEE Transactions on, 1998, 45(12):2422-2429.
- 5、Shen Y, Wang H, Shen Z, et al. An analytical turn-on power loss model for 650-V GaN eHEMTs[C]// IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. IEEE, 2018:913-918.
- 6、李汝冠, 廖雪阳, 尧彬, 等. GaN 基 HEMTs 器件热测试技术与应用进展[J]. 电子元件与材料, 2017, 36(9):1-9.
- 7、武玫. GaN HEMTs 器件结温测试与变温特性的研究[D]. 西安电子科技大学, 2014.
- 8、崔晓英. 微波功率晶体管的发展和应用前景[C]// 中国电子学会青年学术年会. 2008.



第三代半导体产业技术创新战略联盟