

有色金属行业

金属新材料系列之五：5G 时代的 GaAs 衬底机会

分析师： 巨国贤



SAC 执证号: S0260512050006

SFC CE.no: BNW287



0755-82535901



juguoqian@gf.com.cn

分析师： 李莎



SAC 执证号: S0260513080002

SFC CE.no: BNV167



020-66335140



lisha@gf.com.cn

分析师： 刘洋



SAC 执证号: S0260519060002



021-87570852



gzly@gf.com.cn

请注意，刘洋并非香港证券及期货事务监察委员会的注册持牌人，不可在香港从事受监管活动。

核心观点：

● 5G 时代的 GaAs 衬底机会

根据周春锋等于 2015 年发表于《天津科技》期刊的论文《砷化镓材料技术发展及需求》，5G 时代射频器件的高频、高功率对半导体衬底材料提出更高的要求，GaAs 衬底成为主流趋势。考虑到 GaAs 两种生长工艺的不同，直拉法生长的 GaAs 能够满足 5G 高频、高功率的需求。从自主可控的角度看，拥有直拉 GaAs 产能的公司将在此过程中受益。

● PA 器件及衬底：5G 基站、终端对 PA 需求大增、GaAs 衬底或迎来更大市场空间

根据周春锋等于 2015 年发表于《天津科技》期刊的论文《砷化镓材料技术发展及需求》，5G 网络高频、高速的特性要求前端射频组件具备在高频、高功率下更好的性能表现，从而对其半导体材料电子迁移率和禁带宽度等物理性能提出了更高的要求；同时，5G 宏基站大规模 MIMO 技术的普及、以及 5G 终端支持频段的增加，都将使前端射频组件以及半导体材料需求提升。基于上述两个方面，GaAs 以及 GaN 在 5G 时代或将逐步取代 Si-LDMOS，成为终端设备以及基站设备前端射频器件的核心用半导体材料，迎来更大市场空间。

● GaAs 长晶工艺：制备高纯单晶为组件制造首要环节、直拉法占据 90% 市场份额

半导体高纯单晶生长是制备各类半导体器件的核心技术。从生产工艺看，水平布里奇曼法（HB）已经不适用于生产低位错密度、高品质 GaAs 单晶，而 VGF/VB 法、LEC 法等直拉工艺已成为全球主流长晶技术。根据 Pioneer Reports 发布的《Global Gallium Market Growth 2019-2024》报告，VGF/VB 法、LEC 法全球市场份额合计达 90%。

● GaAs 市场格局：海外厂商垄断 PA 和 GaAs 衬底市场，国产替代空间广阔

根据 Yole 数据，从全球前端射频功率放大器市场看，Skyworks、Qorvo、博通 Avago 等市占率合计高达 93%，而半绝缘 GaAs 单晶衬底也均被日本住友电气、德国费里博格以及美国 AXT 等少数厂商垄断，全球市场 CR3 高达 95%。而目前国内 GaAs 单晶厂商仍以 LED 芯片用低阻抛光片为主，射频元器件用大尺寸、半绝缘 GaAs 衬底尚未规模生产，国产替代空间广阔。

● 投资建议：5G 来临助 GaAs 迎更大市场空间，国产化替代空间广阔

我们认为，5G 时代将带来以 GaAs 为代表的第二、第三代半导体材料的需求显著提升，但目前大规格、高品质半绝缘 GaAs 单晶衬底基本为海外厂商垄断，国产化替代空间广阔。关注相关上市公司：云南锗业（根据公司 2018 年年报，公司是集锗矿开采、精深加工和研发为一体的高新技术企业，目前具备砷化镓单晶片产能 80 万片/年（以 4 吋计），2018 年公司非锗半导体产品营收为 1065 万元，占其总营收的 2.3%，2018 年营收占比较低）、有研新材（根据公司 2018 年年报，公司主要从事微电子光电子用薄膜材料、超高纯金属及稀贵金属新材料的研发与制备。2018 年公司高纯/超高纯金属材料及稀土材料营收占比分别为 52.1%、38.1%，是公司主要产品领域，GaAs 单晶营收占比较低）。

● 风险提示

国内及海外 5G 推广进程不及预期；GaAs 主流生产工艺发生重大变化；半导体材料技术进步，GaAs 被其他材料快速替代。

重点公司估值和财务分析表

股票简称	股票代码	货币	最新 收盘价	最近 报告日期	评级	合理价值 (元/股)	EPS(元)		PE(x)		EV/EBITDA(x)		ROE(%)	
							2019E	2020E	2019E	2020E	2019E	2020E	2019E	2020E
中金岭南	000060.SZ	CNY	4.29	2019/9/1	买入	6.50	0.27	0.27	15.89	15.89	10.14	10.05	8.20	7.70
宝钛股份	600456.SH	CNY	27.15	2019/8/21	买入	31.00	0.65	0.85	41.77	31.94	20.14	17.34	7.30	8.70
天齐锂业	002466.SZ	CNY	23.80	2019/8/23	买入	28.00	0.44	1.08	54.09	22.04	19.28	15.93	4.40	9.70
东阳光	600673.SH	CNY	7.78	2019/8/21	买入	12.00	0.43	0.58	18.09	13.41	10.64	8.27	16.10	17.90
银泰资源	000975.SZ	CNY	16.90	2019/8/20	买入	17.10	0.57	0.61	29.65	27.70	15.18	14.41	11.90	11.30
威华股份	002240.SZ	CNY	7.84	2019/7/25	买入	8.44	0.34	0.45	23.06	17.42	15.42	12.42	7.70	9.40
金钼股份	601958.SH	CNY	7.05	2019/8/27	买入	8.80	0.22	0.43	32.05	16.40	15.33	9.24	5.10	9.10
华钰矿业	601020.SH	CNY	9.85	2019/8/28	买入	11.98	0.23	0.64	42.83	15.39	37.67	11.15	5.80	13.80
西部超导	688122.SH	CNY	49.97	2019/7/7			0.37	0.46	135.05	108.63	76.75	58.77	5.60	6.60

数据来源: Wind、广发证券发展研究中心

备注: 表中估值指标按照最新收盘价计算

目录索引

一、PA 器件及衬底：5G 基站、终端对 PA 需求大增、GaAs 衬底或迎来更大市场空间	5
（一）PA 器件：17-23 年 5G 基站、终端 PA 需求 CAGR 或达 7%，性能要求提升	5
（二）PA 衬底：迁移率和禁带宽度要求更高、GaAs 等或挤占 Si 基衬底市场份额	7
二、GaAs 长晶工艺：制备高纯单晶为组件制造首要环节、直拉法占据 90% 市场份额	10
（一）从晶体到组件：制备高纯半导体单晶为组件制造的首要环节	10
（二）GaAs 长晶工艺：直拉法占据 90% 市场份额	10
三、GaAs 市场格局：海外厂商垄断 PA 和 GaAs 衬底市场，国产替代空间广阔	15
（一）全球：PA 及 GaAs 单晶衬底均被少数厂商垄断，CR3 分别为 93% 和 95%	15
（二）国内：射频器件用半绝缘 GaAs 衬底尚未规模化、国产替代空间广阔	16
四、投资建议：5G 时代 GaAs 衬底需求提升、国产化替代空间广阔	18
五、风险提示	19

图表索引

图 1: 5G 高频、高速特质驱动 PA 等射频组件性能提升、数量倍增.....	6
图 2: 2018~2023 年, 全球射频前端市场规模预计将以年复合增长率 16%持续高速增长.....	7
图 3: 预计 2017-2023 年全球射频前端 PA 市场容量将由 50 亿美元增加至 70 亿美元, CAGR 达 7%左右.....	7
图 4: Si-LDMOS 制程的功率器件无法满足超过 3.5GHz 以上高频段的工作要求.....	8
图 5: 面向 5G 应用, GaAs、GaN 基器件未来将逐步挤占 Si 基器件的市场份额.....	8
图 6: 制备高纯半导体单晶为组件制造的首要环节.....	10
图 7: 水平布里奇曼法 (HB) 装置示意图.....	12
图 8: 液封切克劳斯基法 (LEC) 装置示意图.....	12
图 9: 蒸气压控制切克劳斯基法 (VCZ) 装置示意图.....	13
图 10: 垂直布里奇曼法/梯度冷凝 (VGF/VB) 示意图.....	13
图 11: VGF 法生长 GaAs 单晶的市场份额达 63%, 是当前主流 GaAs 单晶生长工艺.....	14
图 12: 美国 Skyworks、Qorvo 和博通 (Avago) 在 PA 领域的市场份额分别达 43%、25%和 25%.....	15
图 13: 日本住友电气、德国费里伯格和美国 AXT 占据了 95%以上的 GaAs 单晶衬底市场份额.....	15
表 1: 第一代、第二代、第三代半导体物理性能参数对比.....	7
表 2: Si-LDMOS、GaAs 和 GaN 半导体材料性能及应用场景差异.....	9
表 3: GaAs 晶体生长技术对比.....	13
表 4: 全球 GaAs 单晶衬底龙头均以 VGF/VB/LEC 工艺为主, 水平布里奇曼法 (HB) 已被淘汰.....	16

一、PA 器件及衬底：5G 基站、终端对 PA 需求大增、GaAs 衬底或迎来更大市场空间

（一）PA 器件：17-23 年 5G 基站、终端 PA 需求 CAGR 或达 7%，性能要求提升

基带和射频模块是完成 3/4/5G 蜂窝通讯功能的核心部件。典型射频模块（RF FEM）主要包括功率放大器（PA）、天线开关（Switch）、滤波器（SAW）等器件构成，其中功率放大器 PA 占据着射频前端芯片较大的市场份额。5G 时代渐行渐近，其高频、高速、高功率特点将驱动功率放大器以及其半导体材料的性能较 4G 时代进一步提升。

1、性能：5G 高频、高速特质驱动 PA 高频和功率等性能提升

3GPP (Third Generation Partnership Project, 第三代合作伙伴计划) 将 5G 的总体频谱资源划分为两个频段，即 FR1 和 FR2。FR1 为 450MHz~6GHz，因此也被称为 Sub6G 频段，是 5G 主频段；FR2 为 24GHz~52GHz，又被成为毫米波频段，是 5G 扩展频段。相较于主要频段分布于 3GHz 以下的 2G、3G 和 4G，5G 频谱向频谱资源更为丰富的高频段延伸，这也就要求功率放大器等射频组件在高频下具有较高的工作性能和效率。

3GPP 将 5G 网络特点归纳为极高的速率（eMBB 场景）、极大的容量（mMTC 场景）以及极低的延时（URLLC 场景）。以速率为例，5G 将实现 1Gbps 以上的速率，为 4G LTE Advanced 的 10 倍以上。同时，从通信原理来看，无线通信最大信号带宽约在载波频率的 5% 左右，即载波频率越高，其可实现的信号带宽也就越大。5G 的 Sub6G 频段常用载波带宽为 100Mhz、多载波聚合时可达 200Mhz；而毫米波频段常用载波带宽是 400Mhz、多载波聚合时可到 800Mhz。因此，5G 高峰值速率以及宽频带等特点要求功率放大器等射频组件具有更高的功率表现和工作效率。

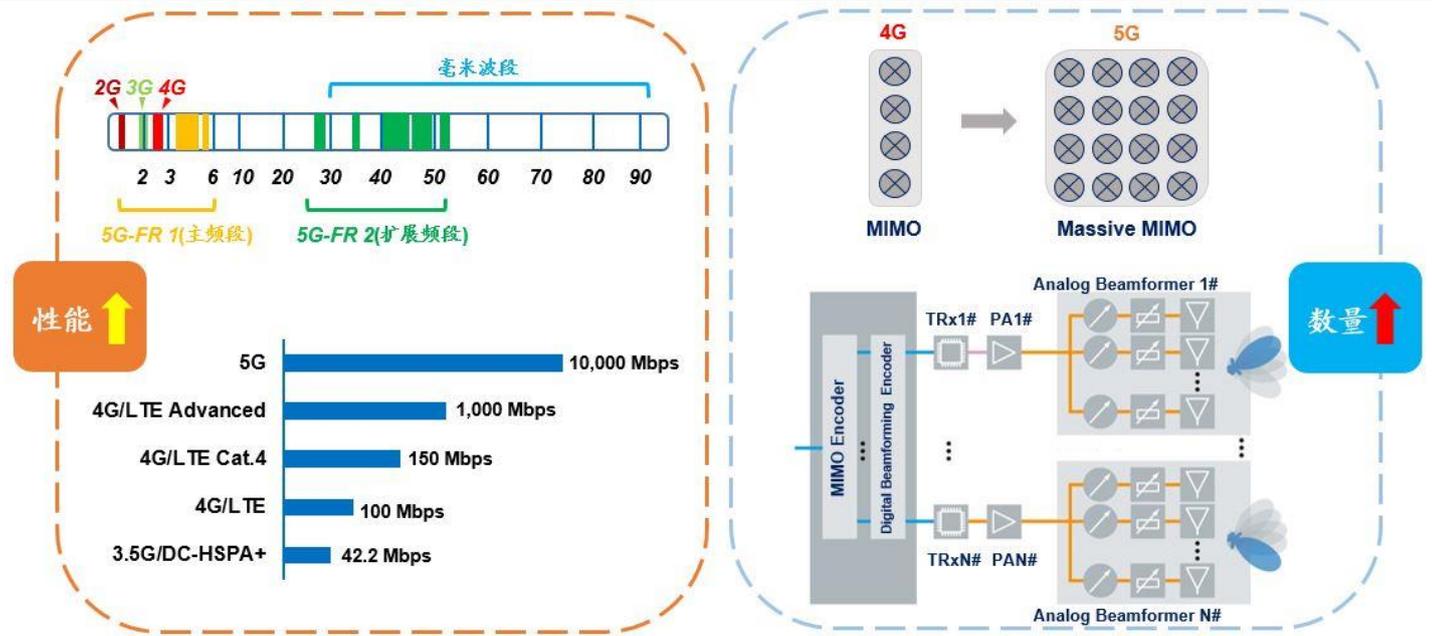
2、数量：5G 基站、终端对 PA 需求大增、17-23 年 CAGR 或达 7%

宏基站：（1）规模方面，5G 宏基站的数量较 4G 时代将大幅增加。5G 通信频谱分布在高频段，信号衰减更快，覆盖能力大幅减弱。相比于 4G，通信信号覆盖相同的区域，5G 基站的数量将大幅增加。于黎明等于 2017 年发表于《移动通信》期刊的论文《中国联通 5G 无线网演进策略研究》中对 3.5GHz 及 1.8GHz 在密集城区和普通城区覆盖能力的模拟测算，密集城区中 3.5GHz 频段上行需要的基站数量是 1.8GHz 的 1.86 倍，普通城区中 3.5GHz 频段上行需要的基站数量则是 1.8GHz 的 1.82 倍；（2）技术方面，大规模 MIMO 技术应用导致单基站所需功率放大器等射频组件数量大幅增加。根据毛建军等于 2015 年发表于《现代雷达》期刊的论文《一种用于 5G 的大规模 MIMO 天线阵设计》，单用户 MIMO、多用户 MIMO 分别是 3G、4G 时代常用的天线技术，而 5G 将引入大规模 MIMO（Massive MIMO）来应对更高的数据速率要求。大规模 MIMO 技术使用大型天线阵列（通常包括 64 个双极化、至少 16 个阵列元素）来实现空间复用，大大提升了特定空间区域内的数据流吞吐量。以 5G 宏基站采用的

64T64R天线为例，相对于4G常用的4T4R天线，单个5G宏基站天线对射频器件需求量将是4G宏基站的16倍。

终端：5G终端支持频段增多将直接带动射频前端用量和单机价值量的增长。根据Skyworks数据，通信频段数量从2G时代的4个增加至4G时代的41个，而5G将新增50个频段，总频段数量将达到91个，由此将直接带动射频前端芯片的用量与单机价值的提升。根据Skyworks预测，射频前端单机价值量将从4G的18美金上升至25美金。

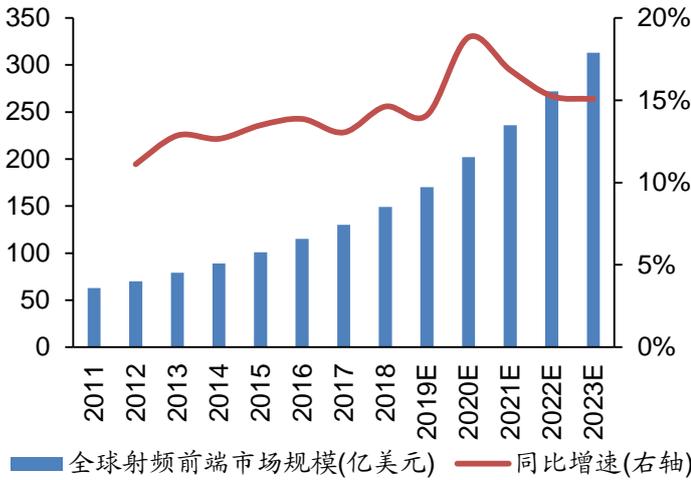
图1：5G高频、高速特质驱动PA等射频组件性能提升、数量倍增



数据来源：3GPP、毛建军等于2015年发表于《现代雷达》期刊的论文《一种用于5G的大规模MIMO天线阵设计》、广发证券发展研究中心

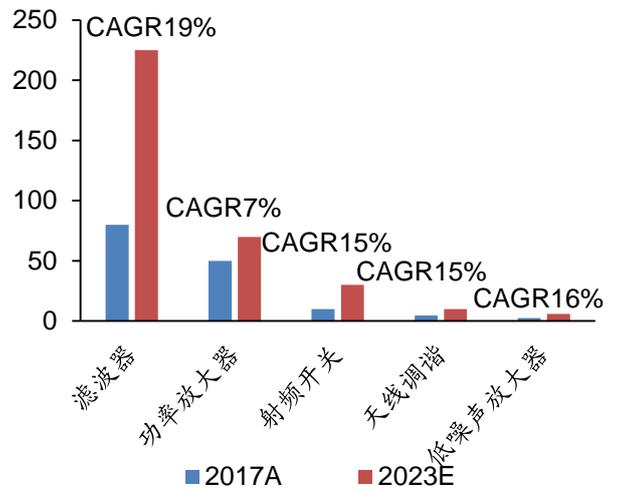
5G宏基站的总量、单基站PA需求量以及5G终端单机射频前端用量相较4G时代将明显提升。根据QYR Electronics Research Center的预测，2018年至2023年全球射频前端市场规模预计将以年复合增长率16%持续高速增长，2023年接近313.1亿美元。单就功率放大器看，Yole预计2017-2023年全球功率放大器市场将由50亿美元增加至70亿美元，CAGR达7%左右。

图2: 2018~2023年, 全球射频前端市场规模预计将以年复合增长率16%持续高速增长



数据来源: QYR Electronics Research Center、广发证券发展研究中心

图3: 预计2017-2023年全球射频前端PA市场容量将由50亿美元增加至70亿美元, CAGR达7%左右



数据来源: Yole、广发证券发展研究中心

(二) PA 衬底: 迁移率和禁带宽度要求更高、GaAs 等或挤占 Si 基衬底市场份额

根据前文所述, 5G高频、高速、高功率的特点对功率放大器(PA)的高频、高速以及功率性能要求进一步提升, 也对制备PA器件的半导体材料的性能要求更为严格。常见的半导体材料以物理性能区分可划分为三代, 其中第一代半导体以Si、Ge为代表, 第二代半导体以GaAs、InP为代表, 第三代半导体以GaN、SiC为代表。

高工作频段要求半导体材料具备更高的饱和速度和电子迁移率。载流子饱和速度和电子迁移率越高, 半导体器件工作速度则越快。因此5G高工作频段对半导体材料的饱和速度和电子迁移率要求更高。由下表可见, 第二代半导体GaAs和InP的电子迁移率分别是Si的5倍和4倍左右, 而第二代、第三代半导体的饱和速度均为Si的2倍以上, 更为适合于5G射频器件应用。

高功率要求则要求半导体材料具备更高的禁带宽度和击穿电场。禁带宽度和击穿电场强度越大, 半导体材料的耐高电压和高温性能越好, 即可以满足更高功率器件的要求。由下表可见, 第二代半导体材料GaAs的禁带宽度约为Si的1.3倍, 而第三代半导体材料GaN的禁带宽度则是Si的3倍。因此, GaAs和GaN等第二代、第三代半导体相对于Si更适合于制备高功率器件。

表1: 第一代、第二代、第三代半导体物理性能参数对比

物理参数	第一代半导体		第二代半导体		第三代半导体	
	Si	Ge	GaAs	InP	GaN	SiC
禁带宽度 (eV)(<5K)	1.12	0.7	1.4	1.3	3.39	3.26
能带跃迁类型	间接	间接	直接	直接	直接	直接

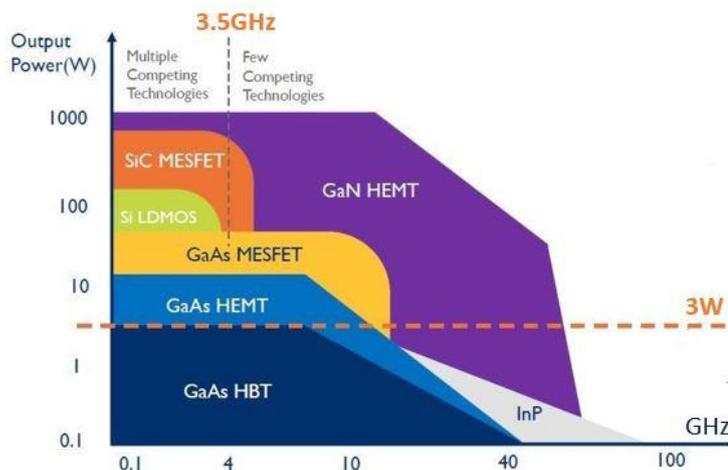
击穿电场 (MV/cm)	0.3	-	0.4	0.5	3.3	3
截止频率 (GHz)	20	-	150	300	150	20
本征载流子浓度 ni (cm ⁻³)	1×10 ⁷	1×10 ¹³	1.5×10 ¹⁰	1×10 ¹⁴	1.9×10 ¹⁰	8.2×10 ⁹
饱和速度 (10 ⁶ cm/s)	10	6	20	22	22	20
电子迁移率 (cm ² /V·s)	1200	3800	6500	4600	1250	800
空穴迁移率 (cm ² /V·s)	420	1400	320	150	250	115
介电常数	11.8	16	12.8	10.8	9	10
热导率 (W/cm·K)	1.5	0.6	0.5	/	1.3	4.9

数据来源：周春锋等于 2015 年发表于《天津科技》期刊的论文《砷化镓材料技术发展及需求》、广发证券发展研究中心

备注：表中 SiC 指的是 4H-SiC 结构的相关参数

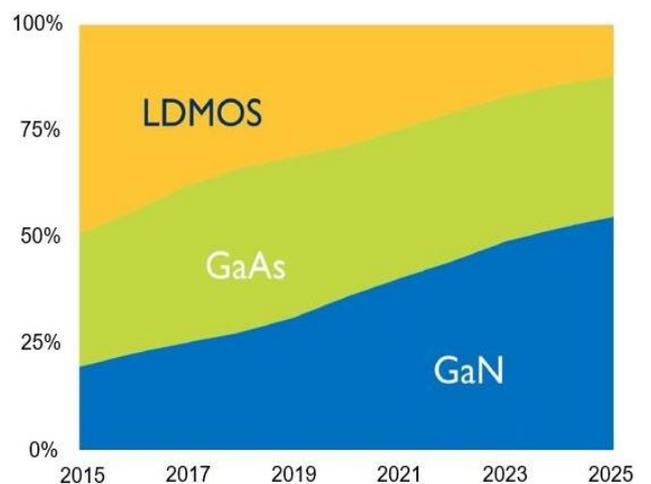
面向5G高频、高功率要求，GaAs、GaN基器件将逐步挤占Si基器件的市场份额。根据前文所述，相较于主要频段分布于3GHz以下的2G、3G和4G，5G频谱向频谱资源更为丰富的高频段延伸，这也使得Si-LDMOS制程的功率器件无法满足超过3.5GHz以上高频段的工作要求；同时，对于输出功率在3W以上的器件，HBT制程的GaAs也无法胜任。因此，对于工作在较高频段、输出功率要求相对较低的功率器件，MESFET和HEMT制程的GaAs将逐步替代传统的Si-LDMOS；而对于工作频段更高、输出功率要求更高的器件，HEMT制程的GaN材料将是最优选择。因此从趋势上看，面向5G高频、高功率要求，GaAs、GaN基器件将逐步挤占Si基器件的市场份额。根据Yole统计数据，2017年全球PA器件用半导体材料约40%采用Si-LDMOS，35%采用GaAs，而25%采用GaN。Yole预计到2025年，Si-LDMOS市场份额将萎缩至15%，而GaN市场份额将达50%，GaAs市场份额则基本稳定。

图4: Si-LDMOS制程的功率器件无法满足超过3.5GHz以上高频段的工作要求



数据来源：Yole、广发证券发展研究中心

图5: 面向5G应用，GaAs、GaN基器件未来将逐步挤占Si基器件的市场份额



数据来源：Yole、广发证券发展研究中心

综合前文论述，我们可以初步得到5G时代Si-LDMOS、GaAs以及GaN半导体材料及器件的应用范围。由于Si-LDMOS不再适合于5G高频段，因此GaN将逐步取代Si-LDMOS应用于5G宏基站以及小基站中；GaAs由于其制造成本和规格尺寸中等，且输出功率较小，因此将广泛应用于终端设备前端射频器件的制备。在下文中，我们将首先就GaAs半导体材料的制备工艺以及市场竞争格局进行分析。

表2: Si-LDMOS、GaAs和GaN半导体材料性能及应用场景差异

性能指标	Si-LDMOS	GaAs	GaN
工作频率	3.5GHz 以下	~40GHz 以下	~60GHz 以下
输出功率	100W 以下	50W 以下	1000W 以下
制造成本	低	中	高
规格尺寸	较大	中等	较小
适用设备	2/3/4G 基站	终端设备前端射频器件	5G 宏基站、小基站

数据来源: Yole、广发证券发展研究中心

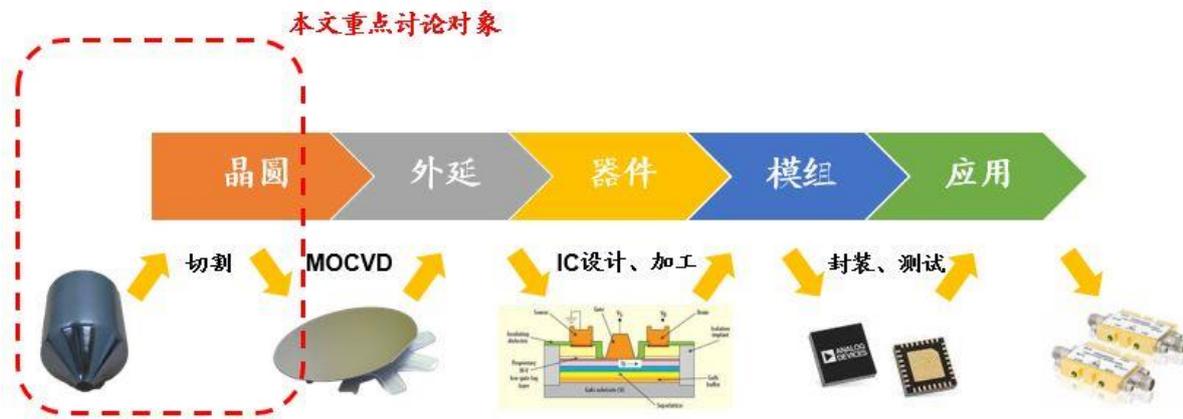
二、GaAs 长晶工艺：制备高纯单晶为组件制造首要环节、直拉法占据 90%市场份额

（一）从晶体到组件：制备高纯半导体单晶为组件制造的首要环节

晶胞重复的单晶半导体材料能够提供芯片制作工艺和器件特性所要求的电学和机械性质，而缺陷较多的多晶半导体材料则对芯片制备不利，因此制备高纯的单晶半导体材料是芯片等器件制造的首要环节。单晶生长的基本工艺原理是，待多晶原料经加热熔化、温度合适后，经过将籽晶浸入、熔接、引晶、放肩、转肩、等径、收尾等步骤，完成一根单晶锭的控制。

单晶锭经过裁切、外径研磨、切割、刻蚀、抛光、清洗等流程后成为晶圆片，之后进入芯片生产加工流程。芯片制造过程可概分为晶圆处理工序（Wafer Fabrication）、晶圆针测工序（Wafer Probe）、封装工序（Packaging）、测试工序（Initial Test and Final Test）等几个步骤。其中晶圆处理工序和晶圆针测工序为前道（Front End）工序，而封装工序和测试工序为后道（Back End）工序。下文将主要就GaAs单晶生长工艺进行讨论。

图6：制备高纯半导体单晶为组件制造的首要环节



数据来源：周铁军等于 2018 年发表于《科技风》期刊的论文《VGF 法 Si-GaAs 单晶生长过程中产生位错的因素》、广发证券发展研究中心

（二）GaAs 长晶工艺：直拉法占据 90%市场份额

GaAs为典型的人工晶体，单晶生长较为困难。根据周春锋等于2015年发表于《天津科技》期刊的论文《砷化镓材料技术发展及需求》，GaAs晶体属于典型的人工晶体，由于GaAs热导率较硅更低而热膨胀系数较硅更高，造成GaAs成晶较硅更为困难。同时，由于GaAs位错临近切变应力比硅位错临近切变应力小，造成GaAs单晶生长中不易降低位错密度；另外，由于GaAs堆积层错能较硅更小，造成GaAs

单晶容易生产孪晶。综上所述，GaAs单晶生长较为困难。

随着机械制造和电气控制的逐步发展，GaAs单晶生长工艺也经历了多次迭代和发展。总体看可分为水平布里奇曼法（Horizontal Bridgman, HB）、液封切克劳斯基法（Liquid Encapsulating Czochralski, LEC）、蒸气压控制切克劳斯基法（Vaporpressure Controlled Czochralski, VCZ）、垂直布里奇曼法（Vertical Bridgman, VB）或垂直梯度冷凝（Vertical Gradient Freeze, VGF）等。

1、水平布里奇曼法（Horizontal Bridgman, HB）

根据R.T.Chen等于1983年发表于《Journal of Crystal Growth》期刊上的论文《Dislocation studies in 3-inch diameter liquid encapsulated czochralski GaAs》，HB工艺时最早用于GaAs单晶生产的技术工艺，早在20世纪60年代已实现产业化。如图5所示，HB法中GaAs单晶的生长可通过水平移动装料安培瓶或加热炉体来实现，其装置和操作均较为简单，因此优点和缺点也较为鲜明：

（1）优点：HB单晶炉制作简单、成本低，熔体化学计量比控制较好；晶体生长温度梯度小、晶体位错少、应力小；引晶和晶体生长可观察，有利于提高晶体成晶率；采用石英管和石英舟，有利于生长掺Si低阻砷化镓单晶；

（2）缺点：晶体截面为D形，如加工为圆形则将造成浪费；存在Si沾污，不易生长半绝缘砷化镓单晶。

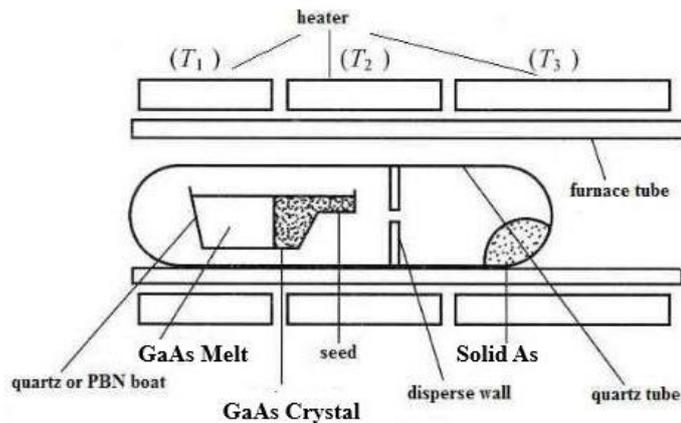
2、液封切克劳斯基法（Liquid Encapsulating Czochralski, LEC）

LEC法是生长用于制备高频、高速器件和电路的准非掺杂半绝缘砷化镓（SI GaAs）单晶的主要工艺之一。LEC法采用多加热器生长炉以及可重复使用的PBN坩埚，在2MPa氩气气氛下进行晶体生长。该方法的主要优缺点是：

（1）优点：可靠性高、适合规模生产；晶体引晶和生长均可见，成晶情况可控；晶体碳含量可控，适合生长半绝缘砷化镓单晶；能较好控制晶体轴向电阻率的不均匀性；

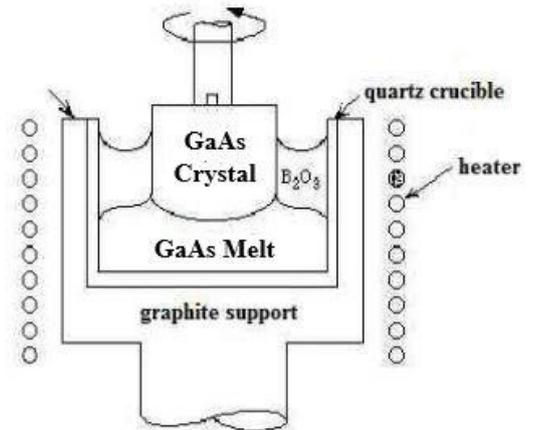
（2）缺点：晶体温度梯度大，生长晶体的位错密度高、残留应力高；晶体等径控制和化学计量比控制较差；单晶炉制造成本高。

图7: 水平布里奇曼法 (HB) 装置示意图



数据来源: 周春锋等于 2015 年发表于《天津科技》期刊的论文《砷化镓材料技术发展及需求》、广发证券发展研究中心

图8: 液封切克劳斯基法 (LEC) 装置示意图



数据来源: 周春锋等于 2015 年发表于《天津科技》期刊的论文《砷化镓材料技术发展及需求》、广发证券发展研究中心

3、蒸汽压控制切克劳斯基法 (Vaporpressure Controlled Czochralski, VCZ)

VCZ单晶生长工艺为LEC法的改进工艺。相比于LEC法, VCZ法降低了温度场非线性, 减少了位错产生的几率, 并增加了晶体轴向和径向位错分布的均匀性。根据邓志杰等于2000年发表于《有色金属》期刊的论文《GaAs单晶材料发展现状和展望》, VCZ法由日本古河电气公司于1983年申请专利, 并由日本住友电气公司于1984年用于生长低位错密度的GaAs单晶。该方法的主要优缺点是:

(1) **优点:** 位错密度和残留应力较LEC法低; 砷蒸汽压保护, 晶体的化学计量比可控;

(2) **缺点:** 单晶炉构造复杂, 制造成本高; 工艺操作难度大、运行费用高; 晶体碳含量不可控; 晶体长度短, 不适合规模化生产。

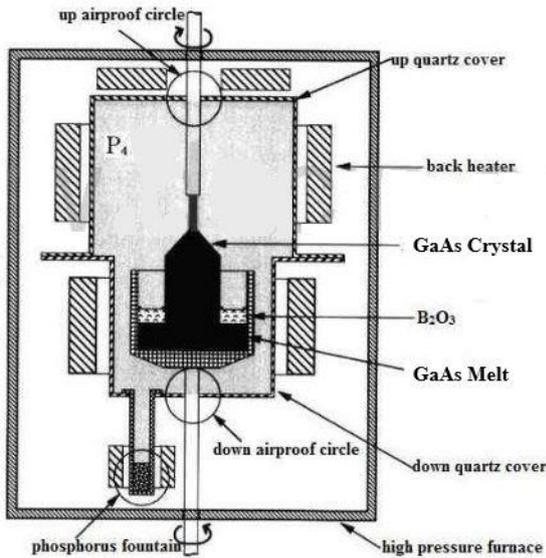
4、垂直布里奇曼法 (Vertical Bridgman, VB) 或垂直梯度冷凝 (Vertical Gradient Freeze, VGF)

根据蒋荣华等于2003年发表于《材料科学与技术》期刊的论文《GaAs单晶生长工艺的发展状况》, VGF/VB法是20世纪80年代末开发并逐步发展起来的、能生长大直径、低位错、低热应力、高质量砷化镓等III-V族半导体单晶的生长方法。其生长原理是将砷化镓多晶、B₂O₃及籽晶真空封入石英管中, 炉体和装料的石英管垂直放置, 熔融砷化镓接触位于下方的籽晶后, 缓慢冷却, 按<100>方向进行单晶生长。该方法的主要优缺点是:

(1) **优点:** 位错密度和残留应力较LEC法低; 晶体等径好、材料利用率高; 减少了籽晶杆升降和转动装置, 单晶炉制造成本低; 既易于生长掺硅、磷的砷化镓单晶材料, 也易于生长半绝缘砷化镓单晶材料; 对操作人员要求低, 适合规模生产。

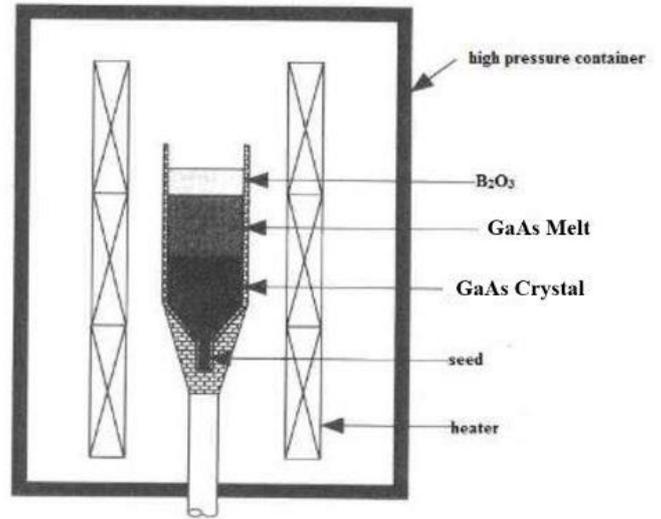
(2) **缺点:** 易产生双晶和花晶; 晶体生长不可见, 依赖于单晶生长系统的一致性和稳定性; 晶体尾部易被液封的氧化硼粘裂。

图9: 蒸汽压控制切克劳斯基法 (VCZ) 装置示意图



数据来源: 蒋荣华等于 2003 年发表于《材料科学与技术》期刊的论文《GaAs 单晶生长工艺的发展状况》、广发证券发展研究中心

图10: 垂直布里奇曼法/梯度冷凝 (VGF/VB) 示意图



数据来源: 蒋荣华等于 2003 年发表于《材料科学与技术》期刊的论文《GaAs 单晶生长工艺的发展状况》、广发证券发展研究中心

上文我们就HB、LEC、VCZ和VGF/VB法等典型的GaAs单晶生长工艺进行了简要介绍。总结起来，HB法由于晶体直径和晶圆形状受到限制、且很难生长半绝缘的GaAs单晶，因此已经不适用于制备用于高频、高速功率器件的单晶衬底；VCZ法尽管位错密度低、晶体直径扩展性好，但由于晶体长度受限制、叠加工艺成本较高，因此也不适合于规模生产。VGF/VB法则既规避了LEC和VCZ等工艺的缺点，又能够实现高质量GaAs单晶生长，因此发展前景较好。

表3: GaAs晶体生长技术对比

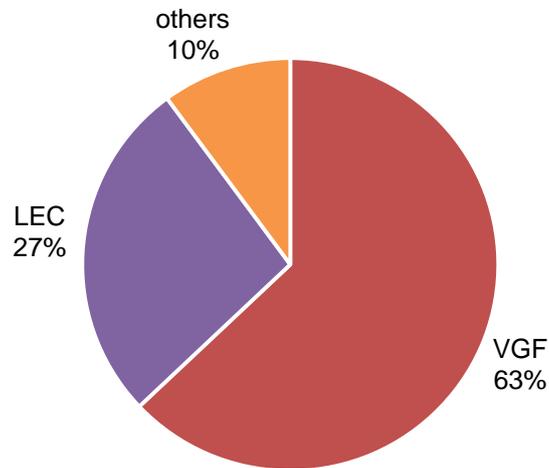
晶体生长技术	VCZ	VGF/VB	LEC	HB
位错密度/cm ²	10 ³	10 ³	10 ⁵	10 ³
A/B 蚀坑/cm ²	< 10 ²	< 10 ²	10 ⁵	< 10 ²
位错分布均匀性	好	好	一般	好
化学计量比控制	好	好	较好	好
热应力	极低	极低	高	低
机械强度	高	高	低	高
片均匀性	良	良	一般	差
亚晶粒结构网格尺寸	大	很大	小	很大
晶体直径扩展性	大直径	大直径	大直径	受限制

晶体长度扩展性	受限制	长单晶	长单晶	长单晶
晶体剖面形状	圆形	圆形	圆形	D形
易于生长的 GaAs 种类	半绝缘	低阻/半绝缘	半绝缘	低阻

数据来源：周春锋等于 2015 年发表于《天津科技》期刊的论文《砷化镓材料技术发展及需求》、蒋荣华等于 2003 年发表于《材料科学与技术》期刊的论文《GaAs 单晶生长工艺的发展状况》、广发证券发展研究中心

VGF法生长GaAs单晶的市场份额达63%，是当前主流的GaAs单晶生长工艺。根据Pioneer Reports2018年发布的《Global Gallium Market Growth 2019-2024》报告，截止至2016年，VGF法生长GaAs单晶的市场份额达63%，LEC法生长GaAs单晶的市场份额为27%。可见VGF法是当前主流的GaAs单晶生长工艺。

图11: VGF法生长GaAs单晶的市场份额达63%，是当前主流GaAs单晶生长工艺



数据来源：Pioneer Reports 发布的《Global Gallium Market Growth 2019-2024》报告、广发证券发展研究中心

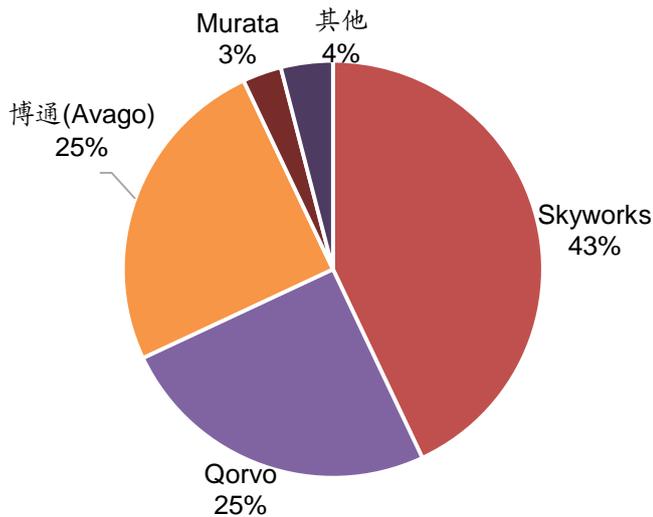
三、GaAs 市场格局：海外厂商垄断 PA 和 GaAs 衬底市场，国产替代空间广阔

(一) 全球：PA 及 GaAs 单晶衬底均被少数厂商垄断，CR3 分别为 93% 和 95%

全球功率放大器 (PA) 市场方面，根据 Yole 和 ittbank 数据，截止至 2018 年底，全球功率放大器 (PA) 市场集中度较高，美国 Skyworks、Qorvo 和博通 (Avago) 市场份额分别达 43%、25% 和 25%，CR3 达 93%。

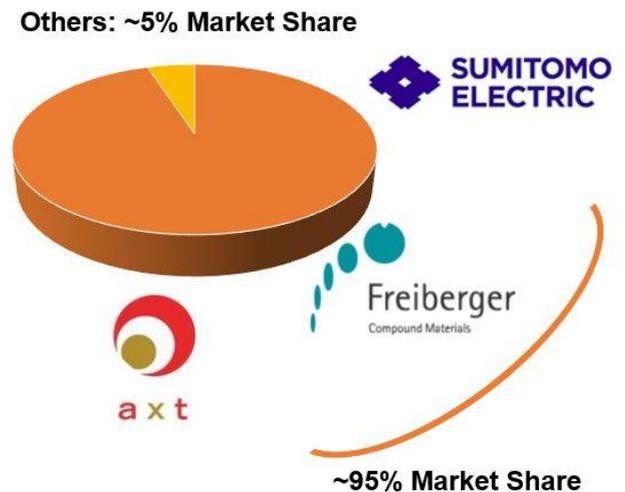
全球半绝缘 GaAs 单晶衬底市场方面，根据 Semiconductor TODAY 数据，目前全球半绝缘单晶 GaAs 衬底市场集中度 CR3 高达 95%，日本的住友电气 (Sumitomo Electric)、德国费里伯格 (Freiberger Compound Materials) 以及美国的 AXT 公司占据了 95% 以上的市场份额。

图 12: 美国 Skyworks、Qorvo 和博通 (Avago) 在 PA 领域的市场份额分别达 43%、25% 和 25%



数据来源: Yole、ittbank、广发证券发展研究中心

图 13: 日本住友电气、德国费里伯格和美国 AXT 占据了 95% 以上的 GaAs 单晶衬底市场份额



数据来源: Semiconductor TODAY Compounds & Advanced Silicon • Vol. 13 • Issue 5 • 2018、广发证券发展研究中心

全球 GaAs 单晶衬底龙头均以 VGF/VB/LEC 工艺为主，水平布里奇曼法 (HB) 已被淘汰。根据住友电气、费里博格和 AXT 官网及公司财报，日本住友电气 GaAs 单晶生产以 VB 法和 LEC 法为主，德国费里博格以 VGF 和 LEC 法为主，而美国 AXT 则以 VGF 法为主。由此可见，水平布里奇曼法 (HB) 已被全球 GaAs 单晶衬底龙头淘汰。

表4: 全球GaAs单晶衬底龙头均以VGF/VB/LEC工艺为主, 水平布里奇曼法(HB)已被淘汰

国际 GaAs 单晶生产企业	VGF	VB	LEC	HB
住友电气(日本)		●	●	
费里伯格(德国)	●		●	
AXT(美国)	●			

数据来源: Yole、公司官网、广发证券发展研究中心

(二) 国内: 射频器件用半绝缘 GaAs 衬底尚未规模化、国产替代空间广阔

1、行业: 国内GaAs单晶片年产量117万片(以4吋计)、以LED芯片用低阻抛光片为主, 半绝缘GaAs衬底国产替代空间较大

总量: 目前国内砷化镓单晶片年产量约为117万片(以4吋计)。根据忻州市委宣传部官网2018年11月8日发布的《全球最大的半导体新材料单晶片加工车间落户忻州》一文, 落户忻州的砷化镓项目建成后, 砷化镓单晶片年产量将达200万片(以4吋计, 下同), 在国内将占有80%份额(目前中科晶电集团下辖的厂区总供货量已占国内46%份额)。以此计算, 目前国内砷化镓单晶片年产量约为117万片, 其中中科晶电砷化镓单晶片年产量约为54万片。

备注: 估算方法为: 假设目前中科晶电砷化镓单晶片年产量为A万片, 则目前国内砷化镓单晶片年产量为 $A \div 46%$ (万片)。则在忻州砷化镓项目建成后, 中科晶电砷化镓单晶片年产量将达 $A + 200$ (万片), 进而可列出等式:

$$A + 200 = 80\% \times (A \div 46\% + 200)$$

求解可得到目前中科晶电砷化镓单晶片年产量为54万片, 国内砷化镓单晶片年产量为117万片(均以4吋计)。

结构: 仍以LED芯片用低阻抛光片为主, 射频元器件用半绝缘GaAs衬底国产替代空间较大。国内GaAs单晶衬底产品以低阻GaAs抛光片为主, 主要用于LED芯片的制造, 而用于射频元器件的半绝缘GaAs衬底尚未形成规模。因此在5G时代, 用于射频元器件的半绝缘GaAs单晶衬底国产替代空间较大。

2、公司: 中科晶电、云南锗业等为国内砷化镓单晶衬底龙头供应商

根据 Pioneer Reports2018年发布的《Global Gallium Market Growth 2019-2024》报告, 国内主要GaAs单晶衬底生产厂商有中科晶电、云南锗业、有研新材、神舟晶体以及美国AXT全资子公司北京通美等。

中科晶电: 根据公司官网, 中科晶电成立于2004年, 定位于砷化镓衬底综合供应商, 产品基地分布于北京市、江苏张家港和山西运城。公司采用VGF法生产2-6英寸的GaAs单晶衬底。根据前文所述, 目前公司砷化镓单晶片年产量约为54万片, 占国内46%的市场份额。

云南锗业 (002428.SZ)：根据公司官网及2018年年报，云南锗业是集锗矿开采、精深加工和研发为一体的、锗产业链较为完整的高新技术企业，其非锗半导体材料级产品主要为砷化镓单晶片，目前具备砷化镓单晶片产能80万片/年(以4吋计)，2018年生产砷化镓单晶片26.52万片(以2吋计)即6.63万片(以4吋计)。分业务看，根据其2018年年报，公司非锗半导体产品营收为1065万元，占其总营收的2.3%，2018年营收占比较低。

有研新材 (600206.SH)：根据公司官网及2018年年报，公司主要从事微电子光电子用薄膜材料、超高纯金属及稀贵金属材料、高端稀土功能材料、红外光学及光纤材料、生物医用材料等新材料的研发与制备。其中，在先进半导体材料和红外光学材料领域，拥有红外锗单晶、水平GaAs单晶、CVD硫化锌生产线。分业务看，根据其2018年年报，公司高纯/超高纯金属材料 and 稀土材料营收占比分别为52.1%、38.1%，是公司主要产品领域，2018年GaAs单晶营收占比较低。

新乡神舟晶体：根据公司官网，公司成立于2005年，由军工企业改制而成，主要以生产水平砷化镓单晶材料产品为主，大量用于军事领域和民用市场。

北京通美：根据公司官网及公司《2018年年度监测报告》，北京通美创建于1998年，是美国AXT集团全资子公司，产品99%以上出口。目前公司晶片年加工能力为186万片(以4吋计)，2018年砷化镓单晶片加工量为56万片(以4吋计)。

四、投资建议：5G 时代 GaAs 衬底需求提升、国产化替代空间广阔

我们在本文中详细分析了5G对前端射频组件和用于其制备的半导体材料的需求，并讨论了GaAs单晶衬底的制备工艺和全球市场竞争格局。我们得出以下结论：

1、5G网络高频、高速的特性要求前端射频组件具备在高频、高功率下更好的性能表现，从而对其半导体材料电子迁移率和禁带宽度等物理性能提出了更高的要求；同时，5G时代大规模MIMO技术的普及，将使得5G基站以及终端前端射频组件以及半导体材料需求量提升。基于上述两个方面，我们认为，GaAs以及GaN在5G时代将逐步取代Si-LDMOS，成为终端设备以及基站设备前端射频器件的核心用半导体材料，迎来更大市场空间。

2、半导体高纯单晶生长是制备各类半导体器件的最核心技术。从生产工艺看，水平布里奇曼法（HB）已经不适用于生产低位错密度、高品质GaAs单晶，VGF和VB法已成为全球主流长晶技术，市场份额达63%左右。

3、全球功率放大器及半绝缘GaAs单晶衬底均被海外少数厂商垄断，全球市场CR3分别为93%和95%。国内GaAs单晶厂商仍以LED芯片用低阻抛光片为主，射频元器件用大尺寸、半绝缘GaAs衬底尚未规模生产，国产替代空间广阔。

综上所述，5G时代将带来以GaAs为代表的第二、第三代半导体材料的需求倍增，但目前大规格、高品质半绝缘GaAs单晶衬底基本为海外厂商垄断，国产化替代空间广阔。关注前端射频器件和芯片国产化替代背景下、国内具备半绝缘GaAs单晶衬底生产技术相关上市公司的投资机会，以及相关上市公司云南锗业、有研新材等：

云南锗业（002428.SZ）：根据公司2018年年报，公司是集锗矿开采、精深加工和研发为一体的、锗产业链较为完整的高新技术企业。根据公司2018年年报，公司非锗半导体材料级产品主要为砷化镓单晶片，目前具备砷化镓单晶片产能80万片/年（以4吋计）。分业务看，根据其2018年年报，公司非锗半导体产品营收为1065万元，占其总营收的2.3%，2018年营收占比较低。

有研新材（600206.SH）：根据公司2018年年报，公司主要从事微电子光电子用薄膜材料、超高纯金属及稀贵金属材料、高端稀土功能材料、红外光学及光纤材料、生物医用材料等新材料的研发与制备。其中，在先进半导体材料和红外光学材料领域，拥有红外锗单晶、水平GaAs单晶、CVD硫化锌生产线。分业务看，根据其2018年年报，公司高纯/超高纯金属材料 and 稀土材料营收占比分别为52.1%、38.1%，是公司主要产品领域，2018年GaAs单晶营收占比较低。

五、风险提示

1. 国内及海外5G推广进程不及预期;
2. GaAs主流生产工艺发生重大变化;
3. 半导体材料技术进步, GaAs被其他材料快速替代。

广发有色行业研究小组

- 巨国贤**：首席分析师，材料学硕士，21年有色金属及新材料产业、上市公司研究经验，带领有色金属研究团队荣获四届（2013年、2014年、2016年、2017年）新财富最佳分析师第一名、水晶球第一名、金牛第一名、最受保险信赖分析师评选第一名。
- 赵鑫**：联席首席分析师，CFA，上海交通大学材料学硕士，2年国际铜业公司工作经验，7年证券从业经历，2015年加入广发证券发展研究中心。2016年、2017年新财富最佳分析师第一名、水晶球第一名、金牛第一名、最受保险信赖分析师评选第一名。
- 娄永刚**：资深分析师，中南大学冶金学硕士，8年行业管理协调工作经验，2016年加入广发证券发展研究中心。2016年、2017年新财富最佳分析师第一名、水晶球第一名、金牛第一名、最受保险信赖分析师评选第一名团队成员。
- 宫帅**：资深分析师，对外经济贸易大学金融学硕士，4年有色金属行业工作经验，2016年加入广发证券发展研究中心。2016年、2017年新财富最佳分析师第一名、水晶球第一名、金牛第一名、最受保险信赖分析师评选第一名团队成员。
- 黄礼恒**：高级分析师，中国地质大学（北京）地质学硕士，2017年加入广发证券发展研究中心。2017年新财富最佳分析师第一名、水晶球第一名、金牛第一名、最受保险信赖分析师评选第一名团队成员。

广发钢铁行业研究小组

- 李莎**：首席分析师，清华大学材料科学与工程硕士，2011年进入广发证券发展研究中心。2018年保险资管 IAMAC 第三名，2017年新财富钢铁行业入围、金牛奖钢铁行业第三名，2016年新财富钢铁行业入围、金牛奖钢铁行业第二名，2014年新财富钢铁行业第二名（团队），2013年新财富钢铁行业第三名（团队），2012年新财富钢铁行业第三名（团队），2011年新财富钢铁行业第四名（团队）。
- 陈潇**：资深分析师，中山大学数量经济学硕士，2016年进入广发证券发展研究中心。2018年保险资管 IAMAC 第三名（团队），2017年新财富钢铁行业入围（团队）、金牛奖钢铁行业第三名（团队），2016年新财富钢铁行业入围（团队）、金牛奖钢铁行业第二名（团队）。
- 刘洋**：高级分析师，清华大学材料科学与工程硕士，2017年进入广发证券发展研究中心。2018年保险资管 IAMAC 第三名（团队），2017年新财富钢铁行业入围（团队）、金牛奖钢铁行业第三名（团队）。

广发证券—行业投资评级说明

- 买入**：预期未来12个月内，股价表现强于大盘10%以上。
- 持有**：预期未来12个月内，股价相对大盘的变动幅度介于-10%~+10%。
- 卖出**：预期未来12个月内，股价表现弱于大盘10%以上。

广发证券—公司投资评级说明

- 买入**：预期未来12个月内，股价表现强于大盘15%以上。
- 增持**：预期未来12个月内，股价表现强于大盘5%-15%。
- 持有**：预期未来12个月内，股价相对大盘的变动幅度介于-5%~+5%。
- 卖出**：预期未来12个月内，股价表现弱于大盘5%以上。

联系我们

	广州市	深圳市	北京市	上海市	香港
地址	广州市天河区马场路 26号广发证券大厦35楼	深圳市福田区益田路 6001号太平金融大厦 31层	北京市西城区月坛北 街2号月坛大厦18层	上海市浦东新区世纪 大道8号国金中心一 期16楼	香港中环干诺道中 111号永安中心14楼 1401-1410室
邮政编码	510627	518026	100045	200120	
客服邮箱	gfyf@gf.com.cn				

法律主体声明

本报告由广发证券股份有限公司或其关联机构制作，广发证券股份有限公司及其关联机构以下统称为“广发证券”。本报告的分销依据不同国家、地区的法律、法规和监管要求由广发证券于该国家或地区的具有相关合法合规经营资质的子公司/经营机构完成。

广发证券股份有限公司具备中国证监会批复的证券投资咨询业务资格，接受中国证监会监管，负责本报告于中国（港澳台地区除外）的分销。广发证券（香港）经纪有限公司具备香港证监会批复的就证券提供意见（4号牌照）的牌照，接受香港证监会监管，负责本报告于中国香港地区的分销。

本报告署名研究人员所持中国证券业协会注册分析师资质信息和香港证监会批复的牌照信息已于署名研究人员姓名处披露。

重要声明

广发证券股份有限公司及其关联机构可能与本报告中提及的公司寻求或正在建立业务关系，因此，投资者应当考虑广发证券股份有限公司及其关联机构因可能存在的潜在利益冲突而对本报告的独立性产生影响。投资者不应仅依据本报告内容作出任何投资决策。

本报告署名研究人员、联系人（以下均简称“研究人员”）针对本报告中相关公司或证券的研究分析内容，在此声明：（1）本报告的全部分析结论、研究观点均精确反映研究人员于本报告发出当日的关于相关公司或证券的所有个人观点，并不代表广发证券的立场；（2）研究人员的部分或全部的报酬无论在过去、现在还是将来均不会与本报告所述特定分析结论、研究观点具有直接或间接的联系。

研究人员制作本报告的报酬标准依据研究质量、客户评价、工作量等多种因素确定，其影响因素亦包括广发证券的整体经营收入，该等经营收入部分来源于广发证券的投资银行类业务。

本报告仅面向经广发证券授权使用的客户/特定合作机构发送，不对外公开发布，只有接收人才可以使用，且对于接收人而言具有保密义务。广发证券并不因相关人员通过其他途径收到或阅读本报告而视其为广发证券的客户。在特定国家或地区传播或者发布本报告可能违反当地法律，广发证券并未采取任何行动以允许于该等国家或地区传播或者分销本报告。

本报告所提及证券可能不被允许在某些国家或地区内出售。请注意，投资涉及风险，证券价格可能会波动，因此投资回报可能会有所变化，过去的业绩并不保证未来的表现。本报告的内容、观点或建议并未考虑任何个别客户的具体投资目标、财务状况和特殊需求，不应被视为对特定客户关于特定证券或金融工具的投资建议。本报告发送给某客户是基于该客户被认为有能力独立评估投资风险、独立行使投资决策并独立承担相应风险。

本报告所载资料的来源及观点的出处皆被广发证券认为可靠，但广发证券不对其准确性、完整性做出任何保证。报告内容仅供参考，报告中的信息或所表达观点不构成所涉证券买卖的出价或询价。广发证券不对因使用本报告的内容而引致的损失承担任何责任，除非法律法规有明确规定。客户不应以本报告取代其独立判断或仅根据本报告做出决策，如有需要，应先咨询专业意见。

广发证券可发出其它与本报告所载信息不一致及有不同结论的报告。本报告反映研究人员的不同观点、见解及分析方法，并不代表广发证券的立场。广发证券的销售人员、交易员或其他专业人士可能以书面或口头形式，向其客户或自营交易部门提供与本报告观点相反的市场评论或交易策略，广发证券的自营交易部门亦可能会有与本报告观点不一致，甚至相反的投资策略。报告所载资料、意见及推测仅反映研究人员于发出本报告当日的判断，可随时更改且无需另行通告。广发证券或其证券研究报告业务的相关董事、高级职员、分析师和员工可能拥有本报告所提及证券的权益。在阅读本报告时，收件人应了解相关的权益披露（若有）。

本研究报告可能包括和/或描述/呈列期货合约价格的事实历史信息（“信息”）。请注意此信息仅供用作组成我们的研究方法/分析中的部分论点/依据/证据，以支持我们对所述相关行业/公司的观点的结论。在任何情况下，它并不（明示或暗示）与香港证监会第5类受规管活动（就期货合约提供意见）有关联或构成此活动。

权益披露

(1) 广发证券（香港）跟本研究报告所述公司在过去12个月内并没有任何投资银行业务的关系。

版权声明

未经广发证券事先书面许可，任何机构或个人不得以任何形式翻版、复制、刊登、转载和引用，否则由此造成的一切不良后果及法律责任由私自翻版、复制、刊登、转载和引用者承担。