



郝跃,中国科学院院士,国家自然科学基金委员会信息科学部主任,西安电子科技大学教授,主要研究方向为宽禁带半导体器件与材料、微纳半导体新器件与新材料等

宽禁带与超宽禁带半导体器件新进展

郝跃^{1,2}

1. 国家自然科学基金委员会信息科学部, 北京 100084

2. 西安电子科技大学微电子学院, 西安 710126

摘要 宽禁带、超宽禁带半导体器件已经成为国际半导体器件和材料的研究和产业化热点,概述了半导体材料的划代,综述了宽禁带、超宽禁带半导体器件和材料最新进展,并展望了未来的发展方向和前景。

关键词 宽禁带半导体;超宽禁带半导体;金刚石;氧化镓

微电子技术显著推动了信息化社会的发展,以氮化镓和碳化硅为代表的宽禁带半导体与氧化镓和金刚石为代表的超宽禁带半导体是继硅和砷化镓之后的第三代半导体材料。本文主要介绍第三代半导体材料的新进展。

1 摩尔定律:过去50年半导体产业唯一主题

在过去的50年,摩尔定律,几乎成了半导体产业界唯一的主题。

凯文·凯利在其著作《科技想要什么》中对摩尔定律是否能延续进行了两点阐述:“芯片上的晶体管数目已经足以执行人类想要的功能,只是我们不知道怎么

做。”“摩尔定律不变的曲线有助于把金钱和智力集中到一个非常具体的目标上,也就是不违背定律。工业界的每个人都明白,如果跟不上曲线,就会落后,这就是一种自驱动前进。”

关于第一点阐述:按照摩尔定律,单芯片尺寸微缩到5、7 nm,它可以集成300亿个晶体管,目前芯片上的晶体管数目已经足以执行人类所想要的所有功能,人类并不知道有哪些需求需要运用一个单芯片上如此多的晶体管。

第二点的阐述更接近摩尔定律的实质。摩尔定律不变的曲线有助于把资金和智力集中到一个非常具体的目标上,这就是一种产业上的自驱动前进。

集成电路已经走过了60年,如今一方面碰到了很多基础性研究的瓶颈问题,解决起来很困难;另外一方

面,人类对信息技术不断的依赖又使其更加强烈地需要技术和原理的创新来支撑这种需求。

如果摩尔定律不再奏效,或者传统硅技术无法满足某些需求时该怎么办?这就需要在材料上下功夫。实际上学术界和产业界也一直在找寻新的半导体材料。目前硅材料仍旧占据整个半导体材料的绝大部分(90%以上),而第三代宽禁带与超宽禁带半导体越来越得到重视,其中宽禁带半导体商用化程度越来越高,包括氮化镓、碳化硅等,而超宽禁带半导体包括金刚石、氧化镓和氮化铝等研究也有了进展。

2 半导体材料的划代

主要按照推出时间早晚划分,半导体材料目前已经划分到了第三代。第一代是从集成电路发明开始,最先晶体管是锗材料,后面发展成硅材料。

第二代半导体材料是20世纪八九十年代推出的砷化镓和1990年后才开始真正用到了产业上的磷化铟材料。

2000年以后,主要是第三代半导体材料,以氮化镓和碳化硅为主。2005年以后开始出现超宽禁带半导体,图1横轴为材料引入时间,纵轴为材料的禁带宽度,

禁带宽度在4 eV以上的材料称为超宽禁带,包括目前比较典型的氧化镓、金刚石和氮化铝。这些新材料的引入对半导体体系有很大发展和补充。

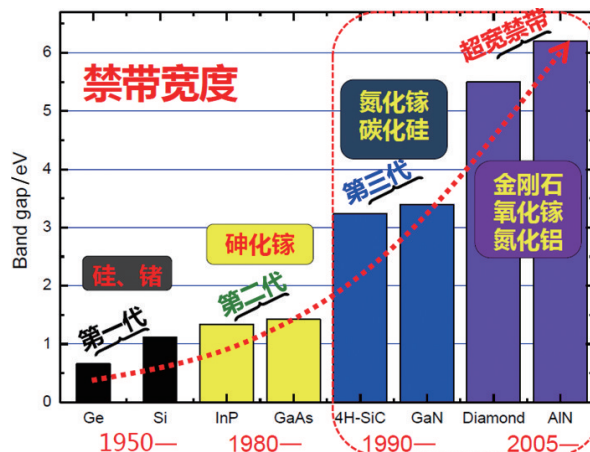


图1 半导体材料的划代

表1列出了各类半导体材料的特性,可以看出,不同的半导体材料其性质相差甚远。例如,功率器件是目前半导体器件的一个方向,材料的功率特性包括电子的饱和和漂移速度、击穿特性、热导率等,还有评价半导体材料用于开关器件潜力的巴利加优值,其值越大,器件功率越大,Si、GaAs、4H-SiC的巴利加优值分别为1.5、340,而金刚石的为24664。

表1 半导体材料的特性

材料	带隙/eV	熔点/℃	电子迁移率/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	电子饱和速度/ ($10^7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	击穿电场/ ($10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$)	介电常数	热导率/ ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	巴利加优值
Si	1.1	1410	1400	1	0.3	11.8	1.5	1
GaAs	1.4	1238	8000	2	0.4	12.9	0.55	5
4H-SiC	3.3	>2700	550	2	2.5	9.7	2.7	340
GaN	3.39	1700	600	2	3.3	9	2.1	870
金刚石	5.5	3800	2200	3	10	5.5	22	24664
氧化镓	4.8~4.9	1740	300	2.42	8	10	0.27	3444
氮化硼	6	>2973	~1500	1.9	~8	7.1	13	12224

图2示出了以GaN和SiC为代表的宽禁带半导体材料与硅材料相比所具有的明显优势。因为这类材料具有宽半导体带隙、高电子饱和漂移速度、高热导率、高击穿强度等特性,特别适合制造工作于高频率、高速度、高温的半导体器件和短波长光电器件,如蓝光到紫外光发光二极管(LED)和光电探测器件。

随着4G/5G移动通信、雷达探测、轨道交通、光伏发电、半导体照明、高压输变电等应用领域的不断发展,宽禁带和超宽禁带半导体器件已成为国际半导体器件

和材料研究及产业化热点,中国目前在宽禁带半导体器件方面开始全面产业化应用(图3),在超宽禁带半导体器件和材料方面取得了很好的基础研究成果,发展态势较好。

以照明为例,由于氮化物半导体的兴起,在半导体照明方面取得了很大的进展。2017年国内半导体照明产业产值已经突破了6500亿元人民币,2018年可能会更高,据预计会超过7000亿元人民币。

同时电子器件方面,尤其是在微波毫米波器件方

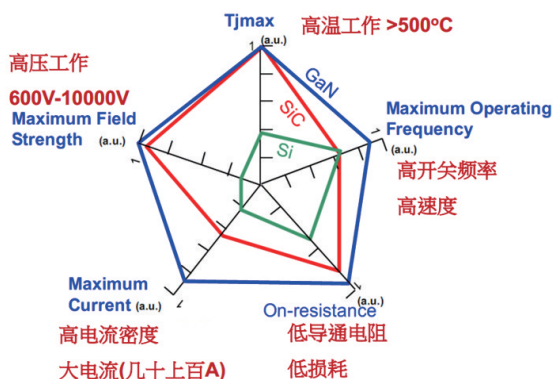


图2 宽禁带半导体电子器件特性优势



图3 宽禁带半导体器件及应用

面已经开始广泛地用于通信、雷达、对抗、卫星等方面,这对硅集成电路来讲是一个很好的补充。

在国家支持下,国内半导体发展呈良好态势,但同时也有一些方面让人困惑和担忧:在一些产业兴起时,容易产生一哄而上的局势,形成一个几乎无约束、无规则的发展趋势。

3 氮化物半导体目前的电子器件研发及产业化的热点

氮化镓电子器件是在衬底材料上外延生长势垒层/沟道层材料,该结构可以实现高密度和高迁移率的二维电子气,这是实现微波和大功率半导体器件的关键,硅和碳化硅衬底是主要材料,目前已经开始进入了氮化镓衬底年代。

与硅相比,氮化物半导体具有以下两个独特优点。

1) 氮化物半导体材料可以形成异质结,也即不同的禁带材料可以叠加在一起,形成不同的具有量子的限域性的异质结,在这个异质结里面工作的电子迁移率比三维的电子快得多。因此在做高频器件时,氮化

物半导体有优势。

2) 电子密度,也即材料中的载流子的密度,不由掺杂决定,而由极化决定。可以用这种性质调节材料各种极化的性能,用材料的禁带宽度来调节载流子的浓度,是非常好的性质,不用去掺各种各样的杂质,只要调节材料的极化特性,就能得到很好的电子浓度。

这两个特性在半导体体系中确实是独特的,而且可以得到很好的应用。

3.1 高频器件及其应用

移动通信需要频率越来越高,需要发射的功率越来越大。2017年中国工业和信息化部正式发布5G通信频率:端对端通信频率为28、39 GHz,未来将会更高,以满足大规模数据传输的需求;端对手机的频率达到3.3~3.6 GHz、4.8~5.0 GHz。为未来化合物半导体的发展,尤其是在移动通信的应用提供了机遇。

目前454 GHz的AlN/GaN HEMT源漏对称器件最高 f_T 为454 GHz,同时 f_{max} 达到了440 GHz,就是说如果该器件正常工作到THz阶段,对于200 GHz的工作频率是有保障的。

再例如,图4所示源漏不对称的氮化镓器件最高 f_T 可达582 GHz, f_{max} 略低,为310 GHz,也可以很好地在高频情况下应用。

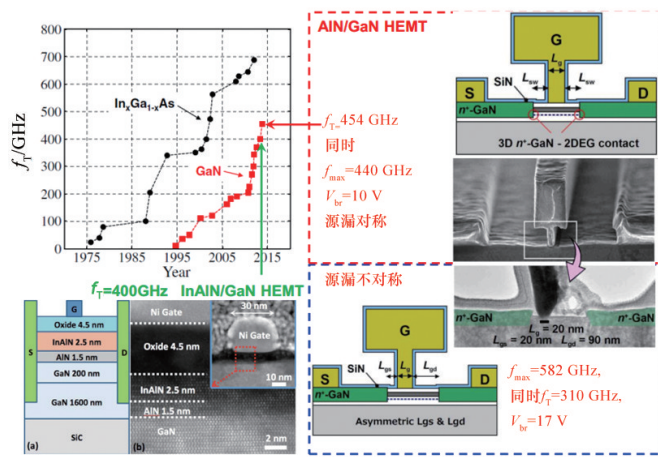


图4 454 GHz @AlN/GaN HEMT示意

在高功率情况下,西安电子科技大学成功研发出320 GHz的毫米波器件,利用高质量的浮空栅技术,实现了器件的 f_{max} 达到了320 GHz;另外,实现了在输出功率密度一定、功率附加效率在30 GHz情况下目前国际GaN基HEMT中最高值。另外,国内已经研究成功了X波段,输出功率可以达3 kW,将继续发展到5 kW,实现其高功率的众多特殊应用。

这些高频、高功率器件下一代通信提供了非常重要的技术保障。另外这种材料的效率高,会大大改进散热和可靠性问题。

3.2 氮化物电力电子器件

由于氮化物具有高耐压及低损耗等特点,已经为电力电子器件领域所关注。

Baliga 曲线(图5)显示了导通电阻和击穿电压的关系,对于一个器件而讲,如果想让器件的击穿电压提升,一定要轻掺杂,但轻掺杂后导通电阻增大。器件的正向导通电阻和反向击穿电压永远是一对矛盾,因此靠材料来解决是一个很重要的方面。不同的材料,包括碳化硅、氮化镓、氧化镓,将采用新的材料掺杂来解决功率器件、导通电阻和击穿电压之间的关系。

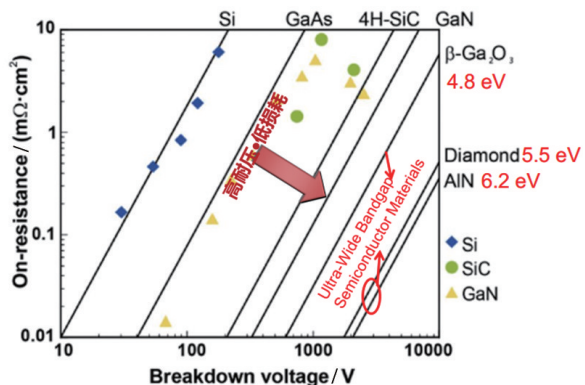


图5 半导体器件Baliga曲线

2018年,西安电子科技大学在氮化物电力电子器件取得的重要进展,研制成功了一个新结构GaN肖特基微波功率二极管,禁带宽度很宽,但开启电压非常低(0.35 V),与硅相近,GaN基势垒二极管(SBD)具有目前最好的 $BV-R_{on}$,更靠近GaN Baliga理论曲线(图6)。

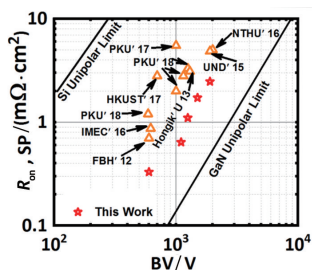


图6 新结构GaN肖特基微波功率二极管Baliga理论曲线

3.3 硅基氮化镓器件

硅基氮化镓兼具硅的低成本效应以及氮化镓的高频高功率特性。在硅基上面做氮化镓是目前重要的研究方向之一,未来可以通过与硅的集成电路高度融合,另外可以用目前的集成电路生产线,以更加低的成本实现功率器件和微波器件等。

4 超宽禁带半导体器件

对于性能更高的诸如金刚石、氧化镓等器件来说,学术界也在进一步研究。

4.1 金刚石器件单晶

金刚石的问题是研究界共同关心的难题。西安电子科技大学通过消除多晶,扩径生长,扩大了单晶外延层面积,在单个衬底上实现尺寸达12 mm×11 mm×1.5 mm的单晶金刚石的稳定生长,生长速率大于20 μm/h。

金刚石由于原子密度大,掺杂和导电比较困难,主要依靠“氢终端表面电导”制备场效应管。但是,金刚石的特性非常好,在氢终端金刚石场效应管的栅极下方引入具有转移掺杂作用的介质MoO₃,正向导通电阻降低到同等栅长金氧半场效应晶体管(MOSFET)器件的1/3,跨导提高约3倍。

4.2 氧化镓器件

过去氧化物半导体的性能一般,最近国内外关于氧化镓电子器件性能的研究发展较快,在技术方面国内与国际差距不大。

图7展示了西安电子科技大学在2018年报道的带场板结构的氧化镓SBD,首次实现了击穿电压3 kV,高开比108~109、SBD势垒高度1.11 eV和理想因子1.25,该器件具有目前最优的 $BV-R_{on}$ 。

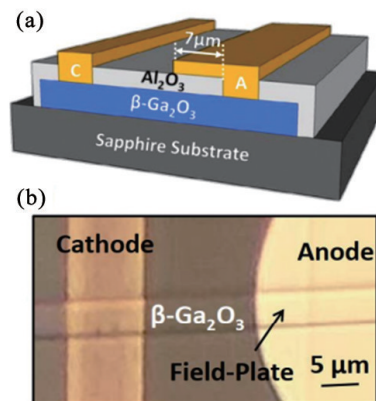


图7 带场板结构的氧化镓SBD

5 结论

中国的微电子技术和产业大有希望。2018年是集成电路发明60周年。岁月如梭,时光如箭,学术界和产业界应抓紧目前发展的良好机遇,不断地努力。

如何高度地进一步将资金和人才智力集中到一个明确的方向上来,是值得共同探讨和努力的。

(责任编辑 刘志远)