

GaN——第三代半导体的曙光

梁春广 张冀

(电子工业部第十三研究所 石家庄 050051)

摘要 自从蓝色 GaN/GaInN LEDs 研制成功之后,氮化物逐渐成为化合物半导体领域中一颗耀眼的新星。简要介绍了 GaN 的基本特性,探讨了材料的生长技术,包括衬底的选择和外延方法。最后给出了 GaN 基器件,如 LEDs, LDs, FETs 和探测器等的发展现状,同时描绘了氮化物器件的应用领域和未来的发展前景。

PACC: 7200, 7280

1 引言

在半导体产业的发展中,一般将 Si、Ge 称为第一代电子材料;而将 GaAs、InP、GaP、InAs、AlAs 及其合金等称为第二代电子材料;宽禁带 ($E_g > 2.3\text{eV}$) 半导体材料近年来发展十分迅速,成为第三代电子材料,主要包括 SiC、ZnSe、金刚石和 GaN 等。同第一、二代电子材料相比(表 1),宽禁带半导体材料具有禁带宽度大,电子漂移饱和速度高,介电常数小,导热性能好等特点,非常适合于制作抗辐射、高频、大功率和高密度集成的电子器件;而利用其特有的禁带宽度,还可以制作蓝、绿光和紫外光的发光器件和光探测器。

表 1 Si、GaAs 和宽禁带半导体材料的特性对比

材料	带隙类型	禁带宽度 /eV	熔点/	热导率 / $(\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	电子迁移率 / $(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	介电常数	饱和速率 / $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
(1) Si 和 GaAs							
Si	间接	1.119	1420	1.40	1350	11.9	1×10^7
GaAs	直接	1.428	1238	0.54	8000	13.18	2×10^7
(2) 宽禁带半导体材料							
SiC	间接	2.994	2830	4.9	1000	9.7	2×10^7
金刚石	间接	5.5	4000	20	2200	5.5	2.7×10^7
ZnSe	直接	2.58	1500	—	100	8.1	—
GaN	直接	3.36	1700	1.5	900	8.9	2.5×10^7

在宽禁带半导体材料中, SiC 和 ZnSe 在相当长的一段时间内一直是研究和开发的重点,尽管 SiC 为间接带隙材料,其蓝色 LEDs 的发光亮度很低,但 SiC 蓝色 LEDs 在 GaN 蓝光 LEDs 实现商品化之前仍是唯一的商品化的蓝光 LEDs 产品;而 ZnSe 材料由于实现蓝光 LDs (寿命约为几个小时),更是成为世界各大公司和研究机构的掌上明珠。GaN 材料由于受到没有合适的单晶衬底材料(蓝宝石衬底与 GaN 的晶格失配高达 14%)、位错密度太大(约为 ZnSe 材料的 10^7 倍)、n-型本底浓度太高 ($> 10^{18}/\text{cm}^3$) 和无法实现 p-

型掺杂等问题的困扰,曾被认为是一种没有希望的材料,因而发展十分缓慢.进入 90 年代之后,随着材料生长和器件工艺水平的不断发展和完善, GaN 基器件的发展十分迅速,目前已经成为宽带隙半导体材料中一颗十分耀眼的新星.

首先是在蓝、绿光发光器件领域取得重大突破.1989 年 Nichia 公司每年投入三百多万美元用于开发 GaN 基蓝光 LEDs,并很快结出硕果,1991 年 Nichia 公司的 Nakamura 等人首先以蓝宝石为衬底,研制成掺 Mg 的 GaN 同质结蓝光 LEDs,1993 年将蓝光发光亮度提高到 1cd,1995 年达到 2cd,并于同年实现绿光 LEDs 的商品化,其亮度达到 6cd.1995 年 11 月,在由材料研究会(MRS)主办的第一届 GaN 及其相关材料国际学术会议上, Nakamura 展示了用于交通信号灯的 LEDs,引起全世界的重视.英国《新科学家》周刊以“东京的车辆将在明亮的灯光照耀下行驶”的醒目标题对此加以报道.在 1997 年, Nichia 公司研制成功连续波工作寿命超过 10,000 小时的蓝光 LEDs,更引起了全世界的关注.

在电子器件领域,UCSB 大学研制的 GaN MODFET 的施主层厚度仅有 20nm,减小了器件的输入电容,使得 0.2 μ m 栅长器件的 f_T 达到 50GHz,在 10GHz 工作下的功率密度为 1.7W/mm²,器件性能超过用其它材料制作的 HEMT.南卡罗来纳州立大学等以 SiC 为衬底研制的 HFET 的跨导为 142mS/mm,室温下的功率耗散为 0.6MW/cm²,比以蓝宝石为衬底同类器件高 3 倍.

APA 光学公司在 1998 年初推出了世界上第一个商品化的 GaN 基 UV 探测器系列,同传统的 Si 探测器相比, GaN 探测器在可见光范围内的工作要有效得多,而且可以在 300 $^{\circ}$ C 的高温环境中工作.

随着蓝、绿光 LEDs 实现商品化,目前开发 GaN 器件的焦点更多的集中在实现蓝光 LEDs 的商品化上,目前世界各大公司和研究机构都投入巨资加入到 GaN 蓝光 LEDs 的开发中,力争在最迟到 2000 年实现蓝光 LEDs 商品化.

2 GaN 的基本性质

III 族氮化物,主要包括 GaN、AlN、InN ($E_g < 2.3V$)、AlGaIn、GaInN、AlInN 和 AlGaInN 等,其禁带宽度覆盖了红、黄、绿、蓝、紫和紫外光谱范围.在通常条件下,它们以六方对称性的铅锌矿结构存在,但在一定条件下也能以立方对称性的闪锌矿结构存在.两种结构的主要差别在于原子层的堆积次序不同,因而电学性质也有显著差别.表 2 给出了两种结构的 AlN、GaN 和 InN 在 300K 时的带隙宽度和晶格常数.

表 2 两种结构 AlN、GaN、InN 的带隙宽度和晶格常数 (300K)

	AlN	GaN	InN
纤锌矿结构			
带隙宽度/eV	6.2	3.39	1.89
晶格常数 a/nm	0.3112	0.3189	0.3548
晶格常数 c/nm	0.4982	0.5185	0.5760
闪锌矿结构			
带隙宽度/eV	5.11	3.2~3.3	2.2
晶格常数/nm	0.438	0.452	0.498

GaN 是 III 族氮化物中的基本材料,也是目前研究最多的 III 族氮化物材料. GaN 材料非常坚硬,其化学性质非常稳定,在室温下不溶于水、酸和碱,其熔点较高,约为 1700 $^{\circ}$ C. GaN 的电学性质是决定器件性能的主要因素.电子室温迁移率目前可以达 900cm²/(V \cdot s).在蓝宝石衬底上生长的非故意掺杂的 GaN 样品存在较高 ($> 10^{18}/\text{cm}^3$) 的 n 型本底载流子浓度,现在较好的 GaN 样品的本底 n 型载流子浓度可以降到 10¹⁶/cm³ 左右.由于 n 型本底载流子浓度较高,制备 p 型 GaN 样品的技术难题曾经一度限制了 GaN 器件的发展.1988 年 Akasaki 等人首先通过低能电子束辐照 (IEEBI),实现掺 Mg 的 GaN 样品表面 p-型化,随后 Nakamura 采用热退火处理技术,更好更方便地实现了掺 Mg 的 GaN 样品的 p-型化,目前已经可以制备载流子浓度在 10¹¹~10²⁰/cm³ 的 p-型 GaN 材料.

在 GaN 材料体系中, GaInN 的使用最为广泛 这是因为 GaInN 为直接带隙材料, 通过改变 In 组分, 可以调整发光波长, 发光范围基本可以覆盖整个可见光光谱; 另外 GaInN 的电子迁移率较高, 适合制作高频电子器件 但是在 In 组分较大时, GaInN 同 GaN 或 AlN 的晶格失配较大, 材料生长较为困难

3 GaN 材料的制备

制备高质量的 GaN 体单晶材料和薄膜单晶材料, 是研究开发 III 族氮化物发光器件、电子器件以及保证器件性能和可靠性的前提条件 因为 GaN 的熔点高, 所以很难采用熔融的液体 GaN 制备体单晶材料, 即使采用了高温、高压技术, 也只能制备出针状或小尺寸的片状 GaN 晶体 目前仍在开展生长大尺寸 GaN 体单晶材料的研究工作

随着异质外延技术的不断进步, 现在已经可以在一些特定的衬底材料上外延生长得到质量较好的 GaN 外延层, 这使得 GaN 材料体系的应用得到了迅速的发展

3.1 异质外延 GaN 衬底材料的选择

衬底材料的选择对于异质外延 GaN 的晶体质量影响很大, 由此对器件的性能和可靠性产生重要的影响 缺乏与 GaN 晶格匹配而且热兼容的合适的衬底材料是影响 GaN 器件成熟的主要困难之一. 在选择衬底材料时通常考虑的因素如下:

- (1) 尽量采用同一系统的材料作为衬底;
- (2) 晶格失配度越小越好;
- (3) 材料的热膨胀系数相近;
- (4) 用于微波器件时, 最好选取微波介质性质良好的半绝缘材料;
- (5) 材料的尺寸、价格等因素

下面简单介绍一些衬底材料的情况(表 3).

表 3 GaN 的部分衬底材料特性

分子式	晶体结构	晶格常数/mm	失配度 ($\Delta a/a$)	熔点/	热膨胀系数/ $(10^{-6} \cdot K^{-1})$	尺寸/mm	晶向
Al ₂ O ₃	六方	$a = 0.4758$ $c = 1.2991$	14%	2030	7.5 3.17	$\Phi 50 \times 0.5$	0001
MgO	立方	$a = 0.4216$	13%	2800	12.8	$10 \times 10 \times 0.5$	001
MgAl ₂ O ₄	立方	$a = 0.8083$	9%	2130	7.45	$\Phi 82 \times 0.5$	111
ZnO	六方	$a = 0.3252$ $c = 0.5313$	2.2%	1975	2.9 4.75	$10 \times 10 \times 0.3$	0001
6H-SiC	六方	$a = 0.308$ $c = 1.512$	3.5%	2700	10.3	$10 \times 10 \times 0.3$	0001
LiAlO ₂	四方	$a = 0.517$ $c = 0.626$	1.4%	1700		$\Phi 80 \times 0.5$	100
LiGaO ₂	四方		0.2%	1600		$\Phi 80 \times 0.5$	100
Si	四方	$a = 0.5430$			3.59	$\Phi 300$	
GaAs	四方	$a = 0.5653$			6	$\Phi 100$	
AlN	六方	$a = 0.3112$ $c = 0.4982$	2%		4.2 3.17		
GaN	六方	$a = 0.3189$ $c = 0.5185$	0	1700	5.59 3.17	$\Phi 5$	

(1) 蓝宝石 (Al₂O₃): 是目前使用最为普遍的一种衬底材料 它具有与纤锌矿 III 族氮化物相同的六方对称性, 也是微电子研究中非常重要和经常使用的一种衬底材料, 其制备工艺成熟, 价格较低, 易于清洗和处理, 而且在高温下具有很好的稳定性, 可以大尺寸稳定生产 但是蓝宝石衬底本身不导电, 不能制作电极, 其解理较为困难, 晶格常数与 GaN 相差 15%, 而且同 GaN 材料的热膨胀系数存在较大的差异 目前以蓝宝石为衬底的 GaN/GaInN 蓝、绿光 LEDs 已经实现商品化, 而蓝光 LEDs 也已经实现室温条件下的连续波工作

(2) SiC: SiC 是另一类非常重要的衬底材料。同蓝宝石相比, SiC 本身即具有蓝光发光特性, 且为低阻材料, 可以制作电极, 其晶格常数和材料的热膨胀系数与 GaN 材料更为接近, 并且易于解理。但是 SiC 材料价格昂贵, 除少数几家公司将其用于 GaN 蓝光 LDs 的研究开发中以外, 其在 GaN 蓝、绿光 LED 领域的市场尚待开发。目前 Cree 公司正努力降低以其 2 英寸 SiC 为衬底的 GaN 蓝光 LEDs 的价格, 采用其最新的导电缓冲层 (conductive buffer) 技术, 使注入电流垂直流过发光层, 不仅降低了 GaN 蓝光 LEDs 的生产成本, 而且可以使亮度提高 50%。最近 Siemens 公司已经决定采用 Cree 的技术生产销售 GaN/SiC 蓝光 LEDs 器件。

(3) GaN: 是最为理想的衬底材料, 但目前所能获得的单晶尺寸太小。



图 1 AN 单晶

(4) AlN: 其与 GaN 属于同一材料体系, 晶格失配只有 2%, 热膨胀系数相近, 是 GaN 之外的最为理想的衬底材料, 目前已经可以制备一定尺寸的 AlN 单晶材料 (图 1), 并在其上外延生长了高质量的 GaN 外延层。

(5) 氧化物材料: 如 MgO、ZnO、MgAl₂O₄、LiAlO₂ 等, 氧化物材料与 GaN 的晶格失配小, 有些还能制备低阻材料, 其中以 ZnO 最有前途。

(6) 其它材料: Si 和 GaAs 的价格便宜, 易于解理, 容易获得大尺寸材料, 可以制作电极, 并有可能实现 GaN 器件与 Si 和 GaAs 电路的混合集成, 是一类极具发展潜力的衬底材料。利用目前 Cornell 大学研究开发的万能衬底 (universal substrate) 技术, 已经能够在

GaAs 衬底上生长晶格失配达到 15% 的高质量的厚外延层 (GaInP、InSb), 若该技术适用于 III 族氮化物的外延生长, 它将彻底解决衬底的晶格失配问题。金属钪 (Sc) 晶格常数和热膨胀系数与 GaN 相近, 而且为导体。

3.2 GaN 外延材料的生长

目前可以采用 MOVPE、MBE 和 HVPE 等外延技术实现 GaN 的异质外延生长。

(1) HVPE: 卤化物气相外延 (HVPE) 技术, 以 GaCl₃ 为 Ga 源, NH₃ 为 N 源, 在 1000 °C 左右在蓝宝石衬底上可以快速生长质量较好的 GaN 材料, 生长速度可以达到每小时几百微米。HVPE 的缺点是很难精确控制膜厚, 反应气体对设备具有腐蚀性, 影响 GaN 材料纯度的提高。HVPE 主要用于改进 MOVPE 生长的 LEDs 结构, 以提高取光效率, 或改进 MBE 生长的 LDs 结构, 使其具有较低的串联电阻和较好解理。

(2) MBE: 分子束外延技术, 直接以 Ga 或 Al 的分子束作为 III 族源, 以 NH₃ 为 N 源, 在衬底表面反应生成 III 族氮化物。该方法可以在较低的温度下实现 GaN 的生长, 有可能减少 N 的挥发, 从而降低本底 n 型载流子浓度。但在低温下, NH₃ 与 III 族金属的反应速率很慢, 生成物分子的可动性差, 为了进一步提高晶体质量, 正在研究以等离子体辅助增强技术激发 N₂, 替代 NH₃ 作为 N 源。反应分子束外延生长 III 族氮化物的速度较慢, 可以精确控制膜厚, 但对于外延层较厚的器件 (如 LEDs、LDs) 的生长时间过长, 不能满足大规模生产的要求。

(3) MOVPE: 金属有机物气相外延 (MOVPE) 技术, 以 III 族金属有机物为 III 族源, 以 NH₃ 为 N 源, 在高温下 (通常 > 1000 °C) 进行 III 族氮化物的生长。MOVPE 的生长速率适中, 可以比较精确的控制膜厚, 特别适合于 LEDs 和 LDs 的大规模工业生产, 目前 EMCORE 和 AXTRON 公司都已开发出用于工业化生产的 III 族氮化物 MOVPE 设备。由于使用了难于裂解并易于发生杂散反应的 NH₃ 作为 N 源, 需要严格控制生长条件, 并改进生长设备。Nakamura 等人在 1990 年开发了双束流 (TF-MOVPE) 生长技术 (图 2), 并采用该技术于 1991 年生长得到了高质量的 p 型 GaN 晶体。MOVPE 技术是目前使用最多, 材料和器件质量最高的生长方法。

(4) 两步生长工艺: 由于 GaN 同蓝宝石的晶格失配太大, 为了获得晶体质量较好的 GaN 外延层, 必须采用两步生长工艺。即首先在较低的温度下 (500~ 600 °C) 生长很薄的一层 GaN 或 AlN 作为缓冲层 (buffer)。

layer), 再将温度调整到较高的温度生长 GaN. A kasaki 首先以 AlN 为缓冲层生长得到了高质量的 GaN 晶体, 随后 Nakamura 发现以 GaN 为缓冲层可以得到更高质量的 GaN 晶体

(5) ELO: 外延横向过生长技术 (Epitaxial Lateral Overgrowth: ELO or ELOG) 可以进一步减小位错密度, 改善 GaN 外延层的晶体质量 首先在蓝宝石衬底上淀积一层多晶态的 SiO_2 或 SiN_x ; 然后利用光刻和刻蚀技术, 形成蓝宝石窗口和 SiO_2 条 在随后的 MOVPE 生长过程中, GaN 首先在蓝宝石窗口上生长, 然后再横向生长于 SiO_2 条上 试验结果表明, 生长于 SiO_2 条上 GaN 的位错密度比生长于蓝宝石窗口的小几个数量级 目前 ELO 技术已经应用于蓝光 LDs, 并获得了满意的结果

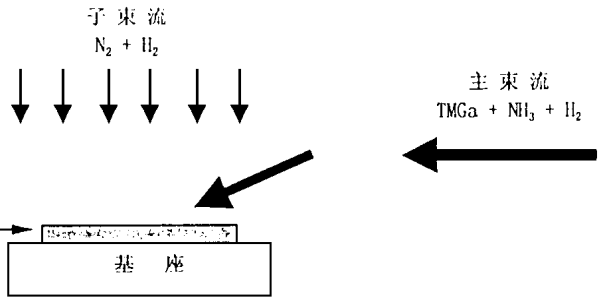


图 2 双束流MOVPE 生长示意图

4 GaN 基器件

利用 GaN 材料体系, 可以制备蓝、绿光 LEDs, 蓝紫、紫外光 LDs, 以及高频、大功率电子器件以及紫外 (UV) 光探测器

4.1 GaN 蓝、绿光 LEDs

在成功解决 III 族氮化物的材料成长和 p 型化问题之后, III 族氮化物 LED 得到了迅速发展 1991 年 Nichia 公司的 Nakamura 等人成功研制成掺 Mg 的同质结 GaN 蓝光 LEDs (图 3), 其峰值波长为 430nm, 光谱半峰宽为 55nm, 光输出功率达到 $70\mu W$ ($I = 20mA$), 约为 SiC 蓝光 LED 的十倍, 外量子效率约为 0.18%.

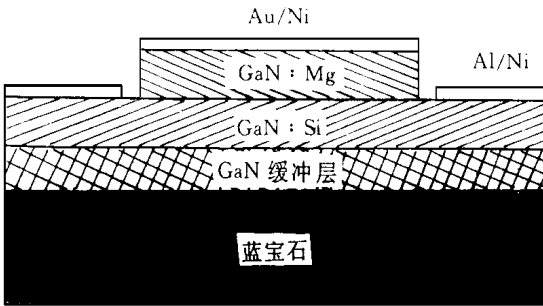


图 3 GaN 同质结蓝光 LED

此后在 Nakamura 小组的研究工作不断取得突破性进展, 使得 Nichia 公司的在 III 族氮化物 LED、LD 领域始终保持领先地位 1993 年, Nichia 公司首先研制成发光亮度超过 1cd 的高亮度 GaInN/AlInGa 异质结蓝光 LED, 使用掺 Zn 的 GaInN 作为有

源层, 以 Zn 杂质为发光中心, 输出光功率达到 1.5mW, 外量子效率达到 2.7%, 峰值波长 450nm, 并实现产品的商品化 在 1994 年, 蓝光 LED 的光输出功率提高到 3.0mW, 半峰宽为 30nm, 发光亮度达到 2cd 1995 年, Nichia 公司推出了光输出功率为 2.0mW, 亮度为 6cd 的商品化 GaN 绿光 LED 产品, 其峰值波长为 525nm, 半峰宽为 40nm.

最近, Nichia 公司利用其蓝光 LED 和磷光技术, 又推出了白光固体发光器件产品 (图 4 和表 4), 其色温为 6500K, 效率达每瓦 7.5 流明

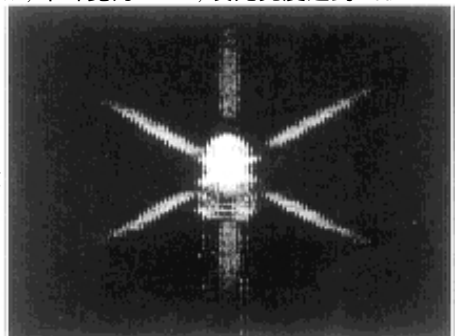


图 4 白光 LED

表 4 Nichia 公司白色LED 的光电特性 ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

参数	最小值	典型值	最大值	测试条件
正向压降: V_F/V	-	3.6	4.0	$I_F = 20\text{mA}$
反向电流: $I_R/\mu\text{A}$	-	-	50	$V_R = 5\text{V}$
发光强度: I_V/cd	0.3	0.6	-	$I_F = 20\text{mA}$

除 Nichia 公司以外, HP, Cree 等公司也相继推出了各自的高亮度蓝光 LED 产品。HP 公司在 1997 年推出的亮度为 1.1cd 的高亮度 GaInN 蓝光 LED 产品, 峰值波长为 475nm, 10000~ 24999 支的当年报价为 \$ 1.4/支

4.2 GaN 蓝光 LDs

由于蓝光 LD 在光探测和信息的高密度光存储等领域具有广阔的应用前景, 在成功开发 III 族氮化物蓝、绿光 LED 之后, 研究的重点开始转向 III 族氮化物蓝光 LD 器件的开发。1996 年初, Nichia 公司首先实现了室温条件下电注入 GaN 蓝光 LD 脉冲工作, 随后在 1996 年底, 又实现了 GaN 蓝光 LD 室温条件下的连续工作, 目前 Nichia 公司在 GaN 蓝光 LD 领域居世界领先地位, 其 GaN 蓝光 LD 室温下 2mW 连续工作的寿命突破 10000 小时(图 5)。

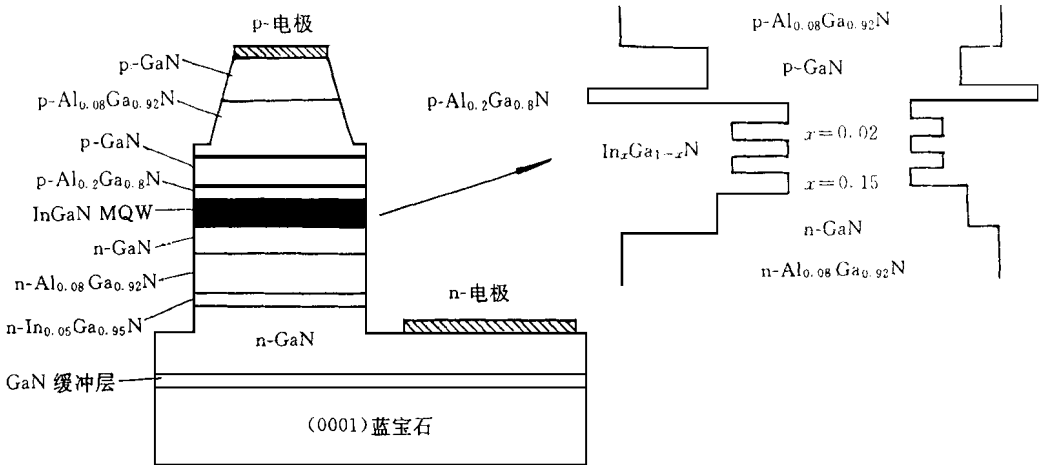


图 5 GaN/InGaN MQW LD 结构

由于蓝光 LD 的市场潜力极大, 许多大公司和研究机构都纷纷加入到开发 III 族氮化物蓝光 LDs 的行列之中。HP 公司以蓝宝石为衬底, 业已研制成功脊波导折射率导引的 GaInN/AlGaIn 多量子阱蓝光 LDs, 其脉冲功率达到 80mW, 但寿命只有几个小时。SDL 公司在 1998 年初宣布研制成功 GaN 蓝光 LDs, 该器件采用蓝宝石作为衬底材料, 增益导引, 脉冲工作, 典型的阈值电流密度为 $8.5 \sim 12\text{kA}/\text{cm}^2$, 峰值波长为 395 ~ 408nm, 其输出功率与 Nichia 公司的最好水平相当, 达到每面 150mW。

Fujitsu 公司和 Cree 公司则采用 SiC 作为衬底材料, 开发 III 族氮化物蓝光 LD。Fujitsu 公司 GaN 器件的输出功率约为 20mW, 波长为 414nm。Cree 公司在 1997 年推出 2 英寸 SiC 衬底, 为实现以 SiC 为衬底的 GaN 蓝光 LDs 的大规模生产铺平了道路, 目前该公司的 GaN 蓝光 LDs 器件也已实现室温连续激光。

尽管如此, GaN 蓝光 LD 产品距室温连续输出功率达到 20mW, 寿命超过 10000 小时的商品化目标仍有较大的距离, 主要阻碍在于输出光功率不足和器件寿命太短。目前各大公司和研究机构正在努力提高器

件的输出功率和寿命, 力争最迟到 2000 年实现蓝光 LDs 器件的商品化(功率 20mW 寿命 100, 000 小时)。目前各大公司的研究水平如表 5

表 5 各公司蓝光 LDs 研究水平对比 (截止到 1997. 12)

公司	衬底激光器结构	MOVPE 生长方法	阈值 J_{th}, V_{th}	波长 /nm	端面工艺	寿命
Nichia	c-sapphire mesa	> 1 atm ELOG	1.5kA/cm ² , 4.6V	390~440	dry etched coated	104 hours @ 2mW CW (est)
Toshiba	c-sapphire mesa, inner stripe	atm pressure; N ₂ ambient	10.6kA/cm ² , 18V	412~417	cleaved uncoated	1usec pulsed 10% duty cycle
Cree	6H-SiC vertical	no details provided	11kA/cm ² , 23V	404~435	cleaved coated	CW, < 1min
Fujitsu	6H-SiC vertical	low pressure (1.33 × 10 ⁴ Pa)	12kA/cm ² , 15V	405~427	cleaved T ₂ O or SiO ₂ coated	Pulsed 1% duty cycle
UCSB	a-sapphire mesa	atom & low pressure	15kA/cm ² , 50~90V	410~420	cleaved uncoated	50nsec pulsed 5kHz
Xerox	c-sapphire mesa	no details provided	25kA/cm ² , 18V	422~432	CA BE etching uncoated	Pulsed
Sony	c-sapphire mesa	9.33 × 10 ⁴ Pa	9.5kA/cm ² , 18V	417	cleaved	5 hours pulsed 1kHz
HP	c-sapphire ridge-waveguide	no details provided	30kA/cm ² , 22V	—	cleaved	—

4.3 GaN 基的电子器件

GaN 材料体系在微波器件领域有着广泛应用的潜力, 这主要是由 III 族氮化物半导体材料的优良特性决定的。首先这个材料体系可以制备出优质的半导体微结构材料; 其次 GaN 的电子饱和漂移速率高达 2.5×10^7 cm/s, 介电常数不大, 适合微波器件的制作; 另外衬底的绝缘性能和散热性能良好, GaN 的击穿电场为 2.0×10^6 V/cm, 比 GaAs (4×10^5 V/cm) 和 Si (3×10^5 V/cm) 大得多, 其热导率远大于 GaAs 而略大于 Si, 有利于器件在高温、大功率下工作。目前已经成功的开发出 GaN 基 MESFET、HEMT、HBT 和 MODFET 等器件。图 6 给出了 GaN 基电子器件和 GaAs、SiC 基 MESFET 的比较, 这充分说明了 GaN 基电子器件在未来大功率微波领域的巨大应用潜力。

Binari 等人制作的 GaN MESFET 器件结构

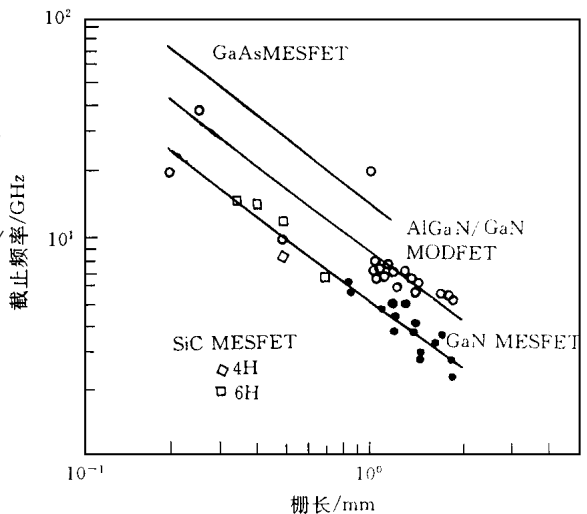


图 6 GaN 基电子器件与 GaAs、SiC 器件的性能比较

如图 7(a) 所示, 他们利用 LP-MOVPE 在高阻 GaN 层上生长沟道厚度为 250nm 的掺 Si 的 GaN MESFET. 其有源沟道的电子迁移率和浓度分别为 $400\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 和 $2.7 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$. 该 GaN MESFET 的源-漏间距

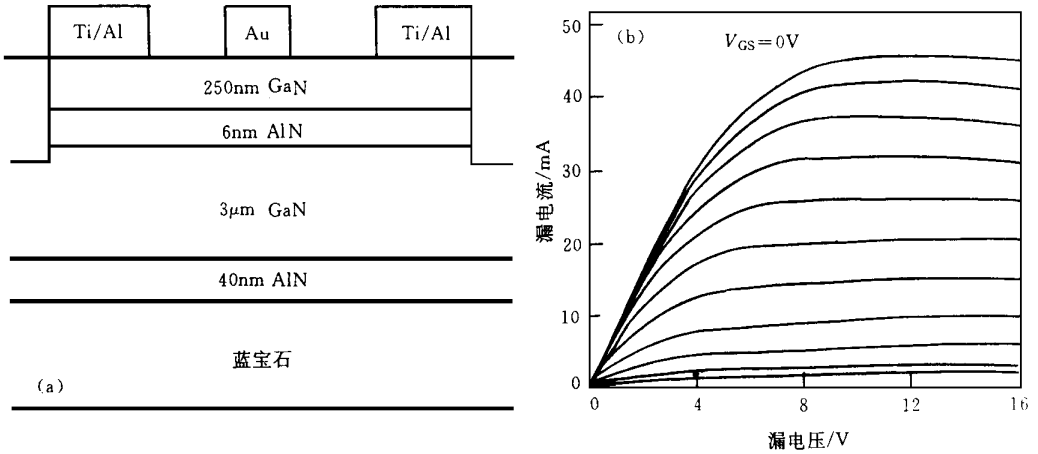


图 7 (a) GaN MESFET 器件结构示意图; (b) DC 漏特性(栅长 $1.4\mu\text{m}$, 栅宽 $150\mu\text{m}$)

为 $5\mu\text{m}$, 栅宽 $150\mu\text{m}$, 栅长 $1.4\mu\text{m}$ 器件的 DC 漏特性如图 7(b) 所示; 栅-源二极管反偏压为 35V 时, 栅-漏电流为 $100\mu\text{A}$; 其最大跨导为 20mS/mm , 这种器件的 f_T 和 f_{max} 分别为 8 和 17GHz; 400 时器件仍具有良好的夹断特性. 就频率特性而言, 其初步结果与 SiC MESFET 相比, 已经颇有竞争力. 若进一步减小栅长, 改进沟道掺杂和欧姆接触工艺, GaN MESFET 的 f_T 可以达到 20~40GHz.

Khan 等人报道了短沟道 AlGaIn/GaN HFET 的室温和高温特性, 栅长为 $0.23\mu\text{m}$, 栅宽为 $100\mu\text{m}$ 器件在 25 时的 f_T 和 f_{max} 分别为 22GHz 和 70GHz, 在 300 时的 f_T 和 f_{max} 分别为 5GHz 和 4GHz.

Ozgur 等人制备了 GaN 基高跨导常断 MODFET, 其栅长 $3\mu\text{m}$, 栅宽 $40\mu\text{m}$, 沟道长度 $5\mu\text{m}$ 器件室温时的本征跨导为 170mS/mm . 另外以 GaN 为发射极, 以 SiC 为基极和集电极的 GaN/SiC HBT 的在 260 下工作的电流增益可以超过 1600, 预计最高工作温度可以达到 400.

目前 Cornell University (CU), UCSB, APA 和 University of South Carolina (USC) 以及 HRL 等研究机构对 GaN 基电子器件的研究居于领先地位, 最新的 HEMTs 器件水平对比参见表 6.

表 6 GaN 基 HEMTs 器件特性对比 (截止到 1997 年底)

	生长方法	器件特性
CU	MOVPE	Al _{0.3} Ga _{0.7} N/GaN/sapphire; $f_T = 67\text{GHz}$, $f_{\text{max}} = 140\text{GHz}$ with $0.15\mu\text{m}$ gate; 12.8dB gain, 1.4W/mm power and 74% power-added efficiency with $0.3\mu\text{m}$ gate at 3GHz; $V_B = 70\text{V}$ for drain-source with $0.33\mu\text{m}$ gate
UCSB	MOVPE	2W/mm, 33% power-added efficiency at 6GHz; 2.57W/mm, 31% power-added efficiency, 5.1dB gain at 10GHz with $0.7\mu\text{m}$ gate; 3W/mm at 18GHz with $0.25\mu\text{m}$ gate; $V_B = 225\text{V}$ for drain-source with $1\mu\text{m}$ gate
APA & USC	MOVPE	doped channel and barrier Al _{0.25} Ga _{0.75} N/GaN/SiC; $1400\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ electron mobility with sheet density of $1.5 \times 10^{13}/\text{cm}^2$; $f_T = 37.5\text{GHz}$, $f_{\text{max}} = 80\text{GHz}$ with $2.5\mu\text{m}$ gate; 2.8W/mm, 17% power-added efficiency with $0.7\mu\text{m}$ gate at 10GHz
HRL	MBE	Al _{0.15} Ga _{0.85} N/GaN; $1000\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ electron mobility; 0.5W/mm , 55% power-added efficiency at 4GHz

4 4 紫外光(UV)探测器

由于 GaN 材料在 365nm (紫外光) 波段具有很锐的截止响应特性, 因此降低了对滤波器的要求, 这使得 GaN 基的光探测器能够在不受长波长辐射的影响下, 在紫外光波段监测太阳盲区 (Solar Blind) 的特性目前 APA 光学公司已经在 1998 年 1 月底推出了第一批 GaN 基探测器

5 GaN 基器件的应用和市场前景

GaN 基器件在高亮度蓝、绿光 LED s 和蓝光 LD s 以及抗辐射、高温大功率微波器件等领域有着广阔的应用潜力和良好的市场前景 尽管直到 1995 年 GaN 基器件才第一次实现商品化, 但到 1997 年时市场销售额已经达到 1.43 亿美元, 约占当年化合物半导体市场的 2%。根据 Strategies Unlimited 的预测, GaN 基器件的市场年增长率将高达 44%, 到 2006 年市场销售额将达到 30 亿美元, 约占化合物半导体市场的 20% (如图 8)。

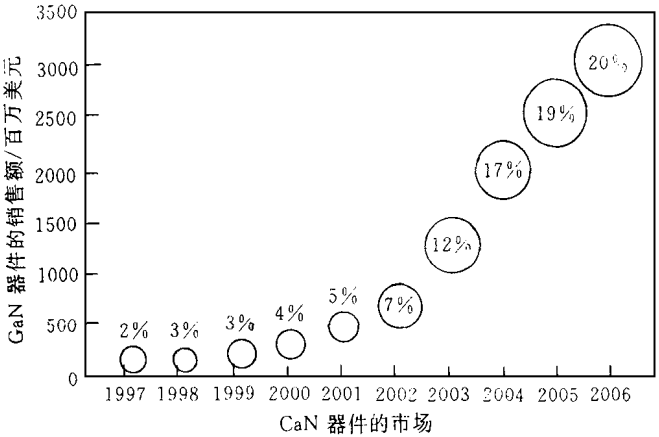


图 8 对 GaN 器件的销售额及其所占化合物半导体市场销售额的百分比预测

5 1 GaN 基发光器件的应用

随着高亮度 AlGaInP 红光 LED 和 GaInN 蓝、绿光 LED 的商品化, 可见光 LED 的应用领域已经由室内扩展到室外, 由单色显示发展为彩色显示, 将在全色动态信息平板显示、固体照明光源、信号指示灯和背光照明等领域获得广泛应用 而蓝、绿光 LD 在增大信息的光存储密度, 深海通信, 材料加工, 激光打印, 大气污染监控等方面有广泛的用途

(1) 高亮度蓝光 LED 的商品化使动态信息显示平板实现全色显示

全色动态信息显示平板 (图 9) 可以广泛的应用于体育场馆、车站、机场、工商业等行业的大型和超大型全色显示屏, 而蓝光 LED 是实现全色平板显示的关键器件, 是全色显示器件中价格最贵的器件。目前仅国内广告业、机场、车站需要的大型显示屏的年成交额达数亿元人民币, 而且该市场仍在以每年约 4 倍的增长速度迅速发展

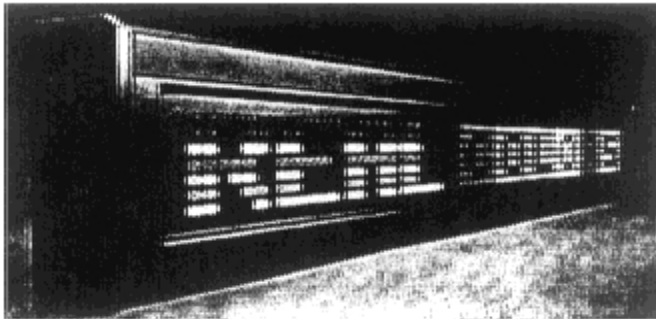


图 9 LED 全色显示平板

(2) 照明光源实现固体器件化——半导体灯

全色超高亮度 LED 的商品化带来了照明技术的一场革命 利用高亮度红、绿、蓝色 LED s 的组合, 可以发出波长连续可调的各种色光, 构成全色光源 目前利用超高亮度 LED 已可以制成最大亮度达到 500cd/m² 的白色平板光源, 成为新一代

的照明光源, 其耗电量仅相当于相同亮度白炽灯 (寿命约为 6~12 月) 的 10%~20%, 而其寿命约为 5~10 年 这种体积小、重量轻、方向性好、节能、长寿明、耐各种恶劣条件的新型固体光源对传统的光源市场造成冲击 目前普遍采用 LUCOLED (Luminous CO nversion LED) 技术制造白光 LED (图 10), 即在封装材料中添加某种荧光物质 (如磷光物质或某种荧光染料物质), 该荧光物质可以在蓝光 LED 的激励下发射橙黄光, 利用蓝光和橙黄光的混合 (如图 11) 得到白光

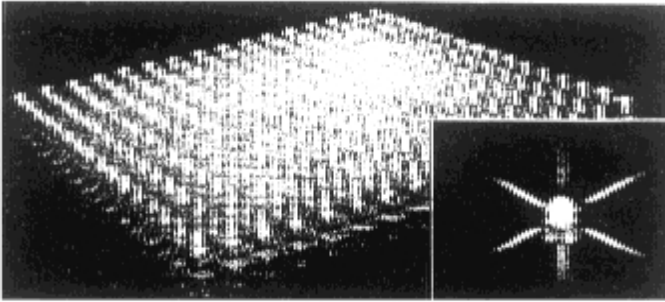


图 10 白光 LED s 阵列
采用蓝光 LED 和磷光技术

(3) 以高亮度 LED 取代传统的信号指示灯

传统的公路、铁路的交通信号灯、警示灯、标志灯和各类汽车的指示灯,采用白炽灯加滤光片的方法实现各色指示或显示,对光能的利用率很低(最高为 50%),而采用高亮度 LED 不仅响应速度快,寿命长,抗震、耐冲击,而且高效节能(表 7)。目前日本采用高亮度红黄蓝 LED 像素灯作为交通信号灯(图 12),其耗电量仅为原来的 12%。

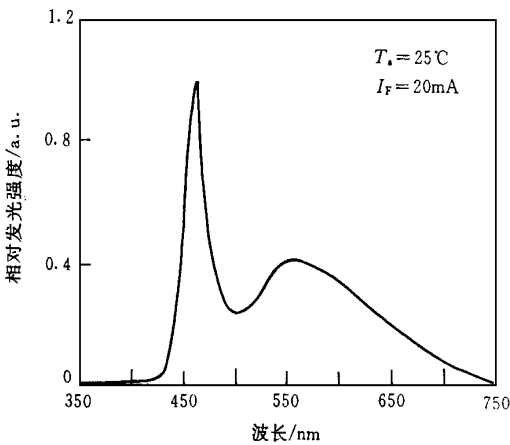


图 11 白色 LED 的光谱图



图 12 LED 交通灯

表 7 交通信号灯中应用白炽灯和高亮度 LED 的性能比较

白炽灯		LED s	
功耗			
Red:	70W	Red:	10W
Yellow:	70W	Yellow:	20W
Green:	70W	Blue-Green:	35W
使用期限			
6~ 12 months		5~ 10 years	
失效模式			
Sudden total failure		Gradual intensity decrease	
可见能力			
Uses color filter, reflects sunlight		Direct	

(4) 应用蓝光 LD 可以大幅度增加信息的光存储密度

目前采用 780nm 的近红外激光,单面 CD-ROM 的信息纪录量约为 650MB,而采用 635nm 或 650nm 的红色激光,单面 DVD-ROM 的信息记录量可以达到 4.7GB,Hitachi 公司准备利用蓝色激光在 2001 年将单面 DVD-ROM 的信息记录量提高到 14GB,同时信息的寻道时间将缩短到 20~ 40ms,而目前 CD-ROM 的寻道时间通常为 100~ 150ms

(5) 蓝、绿光对潜通信

光在海水(或纯水)中传播时,存在一个波长为 470nm ~ 540nm 的低损耗窗口,在水下 100 米传播时的损耗要比其它波长低 100 倍(20dB),蓝、绿光在海水中的穿透能力达 600 米

5.2 GaN 基电子器件的应用

GaN 基电子器件的应用领域也极为广泛,有望在航空航天、高温辐射环境、石油勘探、自动化、雷达与通信、汽车电子化等方面发挥重用作用

在航空航天领域,高性能的军事飞行装备、喷气式飞机和民用飞机都需要能够在高温下工作的传感器、电子控制系统、功率电子器件等,以提高飞行的可靠性。下一代涡轮控制系统将要采用可以在 350 的高温环境下工作的电子装备,GaN 基电子器件将大有用武之地,同时由于 GaN 基电子器件在高温工作时无需制冷器,可以简化电子系统,减轻飞行重量

高温辐射环境包括核反应堆、制备氙系统装置、核废物存储装置等这些环境温度常常达到几百度,并受到 R 射线和中子辐照,因此需要耐高温、耐辐射的电子监控系统

大功率相控阵雷达主要受热耗散的限制,采用高温、高功率密度的 GaN 基电子器件可望改善整个系统的性能,并可以去掉冷却装置,大大减小系统体积。另外汽车电子化中对发动机的监控,重型设备制动器、耐高温传感器、蜂窝地面站和卫星通信等方面都有着很大的应用市场

5.3 GaN 基光探测器

GaN 基光探测器的潜在应用主要包括火焰传感、臭氧监测、污染监测、血液分析、水银灯消毒监控、激光探测器和其它要求具有太阳盲区特性方面的应用。目前 A PA 光学公司已经向市场推出商品化的 GaN 基 UV 探测器系列,并借助于其在 GaN 基 FETs 器件领域的领先技术,正在开发探测器/FET 混合器件,以用于工作温度高达 200~ 300 的火焰传感器

6 结论

以 GaN 为代表的 III 族氮化物半导体材料,具有优良的特性,诱人的应用前景和巨大的市场潜力,引来激烈的竞争。因此,它既是科学家争先抢占的高技术领域的制高点,又是企业家等获得巨大利润的战场

GaN——Dawn of 3rd-Generation-Semiconductors

Liang Chunguang, Zhang Ji

(13th Institute of Ministry of Electronic Industry, Shijiazhuang 050051)

Received 8 September 1997

Abstract Since successfully fabricating blue GaN/GaInN LEDs, III-V nitrides probably become the shiniest star in compound semiconductors research. This paper briefly introduces the basic properties of the nitrides. Then, it discusses the material growth techniques including the choice of substrate and epitaxial methods. Finally, it presents the development of the GaN-based devices, such as LEDs, LDs, FETs and detectors, also gives the application and the future prospect of the nitride devices.

PACC: 7220, 7280