

团 体 标 准

T/CASA 002—20XX

宽禁带半导体术语

Wide bandgap semiconductor terminology

版本：V01.00

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

第三代半导体产业技术创新战略联盟 发布

目 录

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
3.1 通用术语	1
3.1.1 基本特性.....	1
3.1.2 典型半导体器件结构.....	5
3.1.3 材料缺陷.....	6
3.2 氮化物半导体	8
3.3.1 材料.....	8
3.3.2 器件.....	14
3.3 碳化硅半导体	25
3.3.1 材料.....	25
3.3.2 器件.....	29
3.4 氧化物半导体	31
3.4.1 材料.....	31
3.4.2 器件.....	35
3.5 金刚石半导体	36
3.5.1 材料.....	36
3.5.2 器件.....	38
3.6 应用	39
3.6.1 LED 器件类.....	39
3.6.2 激光器件类.....	43
3.6.3 紫外探测器件类.....	44
3.6.4 微波射频器件类.....	46
3.6.5 电力电子器件类.....	46
3.6.6 传感器件类.....	54
3.6.7 其它器件类.....	56
参考文献	60

前 言

本标准由第三代半导体产业技术创新战略联盟标准化委员会（CASAS）制定发布，版权归 CASA 所有，未经 CASA 许可不得随意复制；其他机构采用本标准的技术内容制定标准需经 CASA 允许；任何单位或个人引用本标准的内容需指明本标准的标准号。

到本标准正式发布为止，CASAS 未收到任何有关本标准涉及专利的报告。CASAS 不负责确认本标准的某些内容是否还存在涉及专利的可能性。

本标准起草单位：北京大学东莞光电研究院、……。

本标准主要起草人：

宽禁带半导体术语

1 范围

本标准规定了宽禁带半导体术语(第三代半导体)及其定义。

本标准适用于宽禁带半导体材料的制备与应用相关领域的名词术语。宽禁带半导体通常包括：禁带宽度大于或等于 2.3 电子伏特 (eV) 的氮化镓 (GaN)、氮化铝 (AlN)、氧化锌 (ZnO)、氧化镓 (β -Ga₂O₃)、碳化硅 (SiC)、金刚石。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2900.66—2004 电工术语 半导体器件和集成电路

GB/T 4023 半导体器件 分立器件和集成电路 第 2 部分：整流二极管

GB/T 4586—1994 半导体器件 分立器件 第 8 部分：场效应晶体管

GB/T 14264—2009 半导体材料术语

GB/T 37031—2018 半导体照明术语

IEC 60747-2 半导体器件 分立器件和集成电路 第 2 部分：整流二极管 (Semiconductor devices—Discrete devices and integrated circuits—Part 2: Rectifier diodes)

IEC 60747-8 半导体器件 分立器件 第 8 部分：场效应晶体管 (Semiconductor devices—Discrete devices—Part 8: Field-effect transistors)

3 术语和定义

GB/T 14264—2009、GB/T 37031—2018 和 GB/T 2900.66—2004 界定的及下列术语和定义适用于本标准。

3.1 通用术语

3.1.1 基本特性

3.1.1.1

晶体结构 crystal structure

晶体结构即晶体的微观结构，是指晶体中实际质点（原子、离子或分子）的具体排列情况，包括排列的空间几何形状及对称性，间隔距离以及嵌套规律等。

晶体结构是决定固态物质的物理、化学和力学性能的基本因素之一。半导体材料中，按空间排列有序性范围的从大到小划分，分别有单晶半导体，多晶半导体和非晶半导体。其中，日常所见应用最广泛的类别是单晶半导体材料，即单一的空间有序性排列贯穿整块材料，没有中断。

3.1.1.2

能带结构 band structure

在固态物理学中，电子的运动受到固体中原子排列的影响，不再是自由电子式的连续能量状态。固体中用电子能带结构（简称“能带结构”）描述固体内电子运动分布的能量范围。分为可以分布的能量范围（称为“允许能带”，简称“允带”），以及不允许分布的能量范围（称为“禁止能带”，简称“禁带”）。

3.1.1.3

禁带宽度 bandgap energy

E_g

在一个特定材料的能带结构中，跨越或最接近绝对零度下费米能级的那个禁带的最小能量范围，称为该材料的“禁带宽度”。通常代表室温下半导体中的电子从束缚态（价带）跃迁到扩展态（导带）所需要的最小能量。

3.1.1.4

直接带隙半导体 direct bandgap semiconductor

直接带隙半导体材料就是导带最小值（导带底）和价带最大值（价带顶）在动量空间中处于同一波矢位置的半导体。

直接带隙半导体的重要性质：当电子在价带与导带之间发生跃迁时，由于能带极值处于同一波矢，跃迁前后的电子波矢不需要发生改变，这就意味着电子在跃迁过程中，动量可保持不变——满足动量守恒定律。因为光子动量接近于零，所以当直接带隙半导体中电子的跃迁与光子的吸收或发射相关时，这种直接过程可以把能量几乎全部以与光子交换，获得高效率的光电转换，这也就是为什么发光器件多半采用直接带隙半导体来制作的根本原因。典型的宽禁带材料中，氮化物半导体材料都是直接带隙半导体。

3.1.1.5

间接带隙半导体 indirect bandgap semiconductor

间接带隙半导体材料就是导带最小值（导带底）和价带最大值（价带顶）在动量空间中处于不同波矢位置的半导体。

间接带隙半导体的重要性质：当电子在价带与导带之间发生跃迁时，由于能带极值处于不同波矢，跃迁前后的电子波矢必须发生改变，这就意味着电子在跃迁过程中，需要第三方过程才能使动量保持不变——满足动量守恒定律。因为光子动量接近于零，所以当间接带隙半导体中电子的跃迁与光子的吸收或发射相关时，这种过程往往需要声子辅助，很难获得高效率的光电转换。典型的宽禁带材料中，碳化硅半导体材料是间接带隙半导体。

3.1.1.6

化合物半导体 compound semiconductor

该类半导体是由两种或两种以上元素以确定的原子配比形成的化合物。比如 III 族元素（Al, Ga 和

In）与 V 族元素 N 组成的氮化物半导体，由 Zn 元素、Ga 元素与 O 元素组成的氧化物半导体，以及由 Si 元素和 C 元素组成的 SiC 半导体等。

3.1.1.7

宽禁带半导体 wide bandgap semiconductor

第三代半导体 third-generation semiconductor

禁带宽度大于或等于 2.3 电子伏特（eV）的半导体。常用宽禁带半导体室温禁带宽度，GaN 为：3.4 电子伏特（eV），AlN 为 6.2 电子伏特（eV），ZnO 为 3.3 电子伏特（eV）， β -Ga₂O₃ 为 4.85 电子伏特（eV），4H-SiC 为 3.2 电子伏特（eV），金刚石为 5.47 电子伏特（eV）。

3.1.1.8

本征半导体 intrinsic semiconductor

在晶体结构上完整无缺陷和杂质，材料中的电子和空穴仅由材料的本征激发产生且密度相同的半导体。实际上，由于宽禁带半导体材料制备工艺的局限性，往往存在一定数量的各种缺陷和杂质，不能获得完全本征特性的半导体，通常通过补偿掺杂来降低本底载流子浓度获得电学性质近似本征的半导体材料。

3.1.1.9

导电类型 conductivity type

半导体材料中传输电流的载体称为载流子，可以是电子或空穴，多数载流子的性质所决定了半导体的导电特性。多数载流子为电子的半导体称为 n 型半导体，多数载流子为空穴的半导体称为 p 型半导体。由于宽禁带半导体的宽禁带特性，导致一些材料中用于产生空穴的杂质室温离化率极低，很难获得性能良好的 p 型材料，例如 ZnO。

[改写 GB/T 14264—2009，定义 3.39]

3.1.1.10

饱和电子漂移速度 saturated electron drift velocity

在高电场下，电子在特定的半导体材料中能获得最大的漂移速度称为饱和电子漂移速度。宽禁带半导体通常具有比 Si 更高的饱和电子漂移速度，例如 4H-SiC、GaN 和金刚石的饱和电子漂移速度典型值分别是 Si 的 2 倍、2.2 倍和 2.7 倍。

3.1.1.11

临界击穿场强 critical breakdown field

半导体在开始发生雪崩击穿时的电场强度。临界击穿场强通常与半导体的禁带宽度的平方成正比。Si 半导体的临界击穿场强为 300 kV/cm，GaN、4H-SiC 和金刚石的临界击穿场强典型值分别为 4000 kV/cm、3000 kV/cm 和 10000 kV/cm。

3.1.1.12

极性 polarity

当半导体晶胞内部沿着某一晶向正、负电荷中心不重合，存在净的电偶极矩时，认为该半导体材料在该方向上具有极性。例如在 GaN 材料中，(000-1) 晶向为极化方向，存在极化电场，(000-1) 晶向对应的是 GaN 晶胞的 c 面，因此也称 c 面为极性面。

3.1.1.13

非极性 non-polarity

GaN 材料中垂直于 c 方向的净电偶极矩为 0，因此经过 c 轴的平面为非极性面，沿着这些面生长的材料不存在极化电场。

当半导体晶胞内部沿着某一晶向正、负电荷中心完全重合，不存在净的电偶极矩时，认为该半导体材料在该方向上具有非极性。例如在 GaN 材料中，垂直于 (0001) 晶向的方向上净电偶极矩为 0，因此与 c 面垂直的晶面为非极性面，与 c 面垂直的面有 a 面和 m 面，因此也称 a 面和 m 面为非极性面。

3.1.1.14

半极性 semi-polarity

介于极性面和非极性面之间的晶面，与 c 面具有一定的夹角，因此仅具有部分 c 面的极化强度，称这样的晶面是半极性的晶面。

3.1.1.15

极化效应 polarization effect

极化效应是指由极性半导体的极化电场引发的效应，其中半导体的极化包括自发极化和压电极化，对应的效应是自发极化效应和压电极化效应。自发极化是指源于晶体材料本身对称性导致的极化，压电极化则是指材料源于外部应力导致晶格变形导致的极化。很多宽禁带半导体由于晶格的高度不对称性，因而表现出显著的极化特征，产出较强的极化电场，进而引发多种极化效应，典型的效应如在 GaN/AlGaIn 异质结界面处诱导形成高浓度的二维电子气。

3.1.1.16

载流子面密度 carrier sheet density

半导体中单位面积内所具有的载流子数。通常用于表征二维电子气或二维空穴气的载流子浓度，比如 GaN/AlGaIn 异质结形成的二维电子气和金刚石表面形成的二维空穴气。

3.1.1.17

激子 exciton

在半导体中，如果一个电子从价带激发到导带上去，则在价带内产生一个空穴，而在导带内产生一个电子。空穴带正电，电子带负电，它们之间的库仑相互吸引作用在一定的条件下会将电子和空穴在空间上束缚在一起，这样形成的电子-空穴对称为激子。

激子对描述半导体的光学特性有重要意义。激子束缚能的大小决定了激子的稳定性强弱，激子效应对半导体中的光吸收、发光、激射和光学非线性作用等物理过程具有重要影响。与半导体体材料相比，在量子化的低维电子结构中，激子的束缚能要大得多，激子效应增强，导致在较高温度或在电场作用下更稳定。典型的宽禁带半导体中，激子束缚能最大的材料是 ZnO 材料，其激子束缚能可达 60 毫电子伏特（meV），内部的激子在室温下也极其稳定。

3.1.2 典型半导体器件结构

3.1.2.1

异质结构 heterostructure

由两种或两种以上不同材料通过共价键直接结合在一起形成的物质结构。典型的如由两种材料结合形成的双层结构，也可以是由多层材料形成的多量子阱或超晶格等结构等。通常用于能带工程的能带设计，宽禁带半导体形成的异质结构，通常具有较强的应变。

3.1.2.2

异质结 heterojunction

任何两种固态材料之间形成的载流子（如电子）状态不连续的界面。例如结构中存在一个异质界面（单异质结），存在两个异质界面（双异质结）等，界面两侧导电类型可以相同，也可以不同。异质结的最重要参数是界面能带不连续的数值，决定了异质结处的能带台阶高度，通常用于载流子（如电子）分布状态及其输运的调控。宽禁带半导体形成的异质结，通常具有较大的能带台阶。

3.1.2.3

量子阱 quantum well

QW

由带隙宽度不同的两种薄层材料交替生长在一起，而且窄带隙薄层被包夹在宽带隙材料中间的一种微结构。当载流子被限制在一个足够窄的势阱中，电子的能级变成分立的量子化能级，该微结构为量子阱。量子阱是氮化物高效发光器件的基本结构。

3.1.2.4

二维电子气 two-dimensional electron gas

2DEG

当半导体异质结界面处电子的运动在某一个方向（如 z 方向）上受到限制形成量子能级，那么，只能在另外两个方向（ x 、 y 方向）上自由运动时，这种具有两个自由度的自由电子就称为二维电子气（2DEG）。二维电子气通常具有更高的迁移率，是许多场效应器件工作的基础。AlGaIn/GaN 异质结由于极化作用在界面处形成强烈的二维电子气，二维电子气也存在于 ZnO/ZnMgO 异质结、金刚石界面和 MOSFET 界面。

3.1.2.5

二维空穴气 two-dimensional hole gas

2DHG

类似二维电子气，但是其结构中被限制的载流子是空穴。

3.1.3 材料缺陷

3.1.3.1

衬底 substrate

具有一定厚度和特定导电性能的固体材料，可以是半导体材料（如碳化硅、硅），也可以是非半导体材料（如氮化物半导体外延用的蓝宝石），还可以是有机材料（如柔性衬底）等。衬底是作为后续工艺加工操作的基底，支撑后续材料和器件的制备。在宽禁带半导体器件和电路工艺制程中，除了有进行包括同质外延衬底、异质外延衬底等。

[GB/T 14264—2009 定义 3.242]

3.1.3.2

晶格失配 lattice mismatch

异质外延生长时，由于相邻两种材料相接晶面的晶格常数不同而产生的失配现象叫晶格失配。晶格失配通常导致两种结果，当两种材料的相接晶面弹性变形时，会在生长界面附近产生应力；当两种材料的相接晶面弹性形变破缺时，在界面处产生大量缺陷，并有一定几率延伸到外延层深处，影响器件的性能和寿命。

3.1.3.3

热失配 thermal mismatch

由于相邻种材料相接晶面膨胀系数不同，在温度变化时引起的两者晶格大小变化率出现差异的现象叫热失配。温度变化时，热失配导致在两种材料中产生应力，应力可以大到足以使外延片弯曲，应力释放的区域会产生大量缺陷，影响器件的性能和寿命。

3.1.3.4

外延层 epitaxial layer

在衬底上生长有一定掺杂和厚度要求的、与特定结构的单晶薄层。外延层可在导电类型、晶体结构等方面与衬底相同或不同，还可以是包含不同厚度和不同要求的多层单晶。外延层通过多种外延生长方法获得，主要有化学气相沉淀（比如 MOCVD）和分子束外延（比如 MBE）等。

3.1.3.5

同质外延 homoepitaxy

外延层与衬底是同种材料的外延，称为同质外延。宽禁带半导体中，SiC 和金刚石一般采用同质外延生长，几年来一些氮化物器件也采用 GaN 衬底进行 GaN 的同质外延生长。

[GB/T 14264—2009，定义 3.81]

3.1.3.6

异质外延 **heteroepitaxy**

在衬底上进行衬底不同材料的单晶薄膜外延，称为异质外延。由于晶格失配和热失配，异质外延获得的单晶薄膜常常具有大量的缺陷和显著的应力。许多宽禁带半导体材料采用异质外延，因此克服晶格失配和热失配是异质外延中的关键问题。

[GBT 14264—2009，定义 3.81]

3.1.3.7

点缺陷 **pointdefect**

在晶体中格点上或邻近的微观区域内偏离晶体结构的正常排列的一种缺陷。通常是晶格原子发生变化。影响范围在晶体中一个或几个晶格常数范围内，例如空位、间隙原子、杂质原子等。宽禁带半导体中，氮空位、氧空位和碳空位等是常见的点缺陷。

3.1.3.8

位错 **dislocation**

晶体中的一种线型缺陷，是晶体中已滑移与未滑移区之间边界构成的，或是以伯格斯回路（通俗理解为一定微观范围内的原子环路）闭合性破坏来表征的缺陷。主要有刃位错和螺旋位错，实际晶体中还常常是混合型位错，兼有两者的特征。

[GB/T 14264—2009，定义 3.63]

3.1.3.9

刃位错 **edge dislocation**

若一个晶面在晶体内部突然终止于某一条线处，则称这种不规则排列为一个刃位错，例如在原本完整的晶格某处，插入半面晶面，该插入的半面晶面的端线就是刃位错线所在位置。位错线与伯格斯矢量垂直，刃位错可由位错线伯格斯矢量来唯一确定。

3.1.3.10

螺位错 **screw dislocation**

若一族晶面在晶体内部像旋转楼梯一样沿某一中心旋转形变，导致原子回路不闭合，则称这种不规则排列为一个螺位错，旋转的中心是一条线即位错线，与伯格斯矢量平行。实际材料中位错的伯格斯矢量往往既非平行又非垂直于位错线方向，这些位错兼具了刃位错和螺旋位错的特征，称为混合位错。

3.1.3.11

穿透位错 **threading dislocation**

TD

穿透位错是一种从形态上定义的位错，所以不是一种新结构的位错。在异质外延材料中，由于晶格失配和热失配等原因产生的可以延伸穿透整个外延层的位错称为穿透位错，可以是刃位错、螺位错或混合位错。

3.1.3.12

堆垛层错 **stacking fault**

堆垛层错是晶格中常见的一种面缺陷。它是晶体结构层正常的周期性重复堆垛顺序在某二层间出现了偏离，从而导致的沿该层间平面（称为层错面）两侧附近原子的周期性排列被打断。

[GB/T 14264—2009，定义 3.238]

3.1.3.13

位错密度 **dislocation density**

位错密度是表征位错缺陷数目多少的指标。采用单位体积晶体中所含的位错线的总长度（ cm/cm^3 ），或者穿过单位截面积的位错线数目来表征（位错数/平方厘米）（ $\text{个}/\text{cm}^2$ ）。可以通过透射电镜直接观察晶格像计算，也可以通过化学蚀刻法使位错露头处产生腐蚀刻坑，在显微镜下对腐蚀坑进行计数。

[改写 GB/T 14264—2009，定义 3.65]

3.2 氮化物半导体

3.2.1 材料

3.2.1.1 单晶

3.2.1.1.1

氮化镓单晶材料 **GaN bulk crystal**

单晶材料是指整块材料具有相同且连续的唯一原子规则排列（晶体结构），内部没有任何原子排列的边界。氮和镓的化合物，由 Ga 原子和 N 原子以摩尔比 1:1 构成，氮化镓单晶是氮原子、镓原子排列在三维空间中呈现为周期性规律排列的二元化合物，晶体结构有纤锌矿、闪锌矿和岩盐相等，是一种直接带隙的宽禁带半导体材料，典型的禁带宽度约为 3.4 电子伏特（eV）。

由于自然界不存在天然 GaN 晶体，因此 GaN 材料都是经过人工方法制备获得。“GaN 单晶材料”是相对于“GaN 单晶薄膜”而言的概念，是指有较大体积，或厚度较厚，近似于传统晶体材料的 GaN 晶体材料。

3.2.1.1.2

体单晶 **bulk single crystal**

一种晶体物质状态，晶体的整体在三维方向上由相同结构基元构成，结晶体内部的结构基元在三维空间呈有规律地、周期性地排列，且整个晶体中原子在空间的排列为长程有序。

[改写 GB/T 14264—2009，定义 3.222]

3.2.1.1.3

氮化镓单晶薄膜 GaN single crystalline film

在基质衬底上生长的半导体材料单晶薄层，有一定掺杂浓度和结构要求，单晶薄膜是连续的没有晶粒边界，其晶向由衬底决定。由于自然界不存在天然 GaN 晶体，因此 GaN 材料都是经过人工方法制备获得。“GaN 单晶薄膜”是相对于“GaN 单晶材料”而言的概念，是指生长在衬底上的薄层单晶材料，通常厚度较薄，其晶向由衬底决定。如果生长技术不佳，在薄膜内多种晶体取向，则成为 GaN 多晶薄膜。

3.2.1.1.4

氮化铝单晶材料 AlN bulk crystal

氮化铝是氮和铝的化合物，由 Al 原子和 N 原子以摩尔比 1:1 构成，且原子排列在三维空间中呈现为周期性规律排列的二元化合物，氮化铝单晶结构有纤锌矿、类金刚石结构等，是一种直接带隙的宽禁带半导体材料，能带隙约为 6.2 电子伏特（eV）。由于自然界不存在天然 AlN 晶体，因此 AlN 材料都是经过人工方法制备获得。“AlN 单晶材料”是相对于“AlN 单晶薄膜”而言的概念，是指有较大体积，或厚度较厚，近似于传统晶体材料的 AlN 晶体材料。

3.2.1.1.5

氮化铝单晶薄膜 AlN single crystalline film

由于自然界不存在天然 AlN 晶体，因此 AlN 材料都是经过人工方法制备获得。“AlN 单晶薄膜”是相对于“AlN 单晶材料”而言的概念，是指生长在衬底上的薄层单晶材料，通常厚度较薄，其晶向由衬底决定。如果生长技术不佳，多种晶体取向出现在薄膜内，则成为 AlN 多晶薄膜。

3.2.1.2 衬底

3.2.1.2.1

氮化镓衬底 gallium nitride substrate

氮和镓的化合物，是一种直接带隙的宽禁带半导体材料，常见为纤锌矿结构，能带隙为 3.4 电子伏特（eV）。

3.2.1.2.2

氮化铝衬底 aluminum nitride substrate

由 AlN 单晶材料制成的衬底，常见为纤锌矿结构，能带隙为 6.2 电子伏特（eV）。

3.2.1.2.3

图形化衬底 patterned substrate

一种具有特殊形貌的衬底，在外延生长前，采用蚀刻的方法形成一定图案，用于达到后续横向外延生长及其他工艺目的。比如，对于 GaN 基 LED 工艺领域，往往通过 ICP 工艺图形化蓝宝石衬底，从而

实现横向外延生长，降低外延位错密度，兼具通过改变出光路，增加出光效率的目的。

3.2.1.2.4

氮化镓复合衬底 **GaN template**

由氮化镓单晶薄膜材料与其支撑基底构成的复合结构，用于外延沉积、扩散、离子注入等后序工艺操作的氮化镓基片。

[GB/T 37031—2018，定义 2.2.2.8]

3.2.1.2.5

氮化镓自支撑衬底 **free-standing GaN substrate**

由 GaN 单晶材料制成的衬底。一种是利用 GaN 体单晶，经过切割、抛光等工艺获得。另一种是利用 HVPE 等晶体生长技术，在蓝宝石或其它衬底材料上，快速生长成达到通常衬底厚度要求的 GaN 厚膜，然后采用自分离、机械抛光或激光剥离技术剥离掉衬底，形成的 GaN 单晶衬底。

[GB/T 14264—2009，定义 3.243]

3.2.1.2.6

氮化镓半绝缘衬底 **semi-insulator GaN substrate**

通过掺杂工艺使氮化镓半导体材料的费米能级接近导带和价带中间，电阻率大于 $106\ \Omega\cdot\text{cm}$ 的氮化镓衬底片。

3.2.1.2.7

氮化铝自支撑衬底 **free-standing AlN substrate**

由 AlN 单晶材料制成的衬底。一种是利用 AlN 体单晶，经过切割、抛光等工艺获得。另一种是利用 HVPE 等晶体生长技术在蓝宝石或其它衬底材料上，快速生长成达到通常衬底厚度要求的 AlN 厚膜，然后采用自分离、机械抛光或激光剥离技术剥离掉衬底，形成的 AlN 单晶衬底。

3.2.1.2.8

金属有机化学气相沉积 **metalorganic chemical vapor deposition**

MOCVD

一种大规模生产广泛使用的薄膜晶体生长技术。其特征是晶体生长所需的金属元素是来源于金属有机化合物（MO），MO 通过载气输运至生长室内的衬底表面，与非金属气相物质在衬底表面进行化学反应，化学反应过程中通常需要高温分解输运来的各种化合物，并使分解获得的有效原子或分子在衬底生长表面获得足够的迁移能力移动到晶格位置，从而获得单晶外延层的生长。

3.2.1.2.9

分子束外延 **molecular beam epitaxy**

MBE

一种大规模生产广泛使用的薄膜晶体生长技术。其特征是在晶体生长所需的各个元素在高温下气化，在超高真空条件下，以原子束或分子束的形式，定向喷射到加热的衬底表面，在衬底表面经过吸附、迁移等过程而获得单晶外延层的生长。

[改写 GB/T 14264—2009，定义 3.161]

3.2.1.2.10

低温成核层 nucleation layer

对于异质外延中直接生长存在困难的情况下，先在衬底表面生长一层利于晶体结晶的薄层，称之为成核层。通常做法是首先进行低温沉积，其次再经过高温退火，对低温沉积层进行再结晶，形成晶核，从而获得利于后续晶体外延生长的成核层。

3.2.1.2.11

缓冲层 buffer layer

在早期单一材料外延研究中，为正常高温外延所准备的铺垫层称之为缓冲层，等同于上述‘成核层’。在后期进行器件结构外延的研究中，为器件有源层所准备的所有前期铺垫层，都称之为‘缓冲层’，此时多为多层结构，上述‘成核层’仅为该结构的最初一层。

3.2.1.2.12

侧向外延 epitaxial lateral over-growth ELO

也称“横向外延”，指晶体外延方向沿衬底平面方向。通常通过在带有掩模的图形衬底上进行，外延时可以控制生长条件，达到横向生长速度快于纵向生长速度，导致选择窗口区的外延薄膜生长扩展到窗口外并连接相邻窗口区扩展过来的外延薄膜，最终形成连续外延层的方法。由于在通常 c 面蓝宝石衬底上的 GaN 外延中，多数位错沿垂直于衬底的方向延伸，不会延伸到侧向外延扩展的外延层中，因此侧向外延区域位错密度极低，一些 GaN 高效发光器件，如条形激光器，采用此方法。

3.2.1.2.13

氢化物气相外延 hydride vapor phase epitaxy

HVPE

利用氢化物作为输运反应物质的一种气相外延生长技术。在此法外延 GaN 材料中，采用 HCl 与金属 Ga 反应生成 GaCl₃，然后输运到衬底表面与氨气进行反应，实现 GaN 晶体生长。与 MBE 和 MOCVD 生长方法相比，氢化物反应速率更快，其生长 GaN 速率也快 10 倍以上。

3.2.1.2.14

氨热法 ammonothermal method

氨热法是生长 GaN 单晶的方法之一。在 400~600 °C，100~400 MPa 条件下，在超临界和高密度的氨以及在其中的矿物剂中溶解金属镓或多晶氮化镓，再结晶生成单晶 GaN。常用的矿物剂包括锂和

钾等。

3.2.1.2.15

钠流法 **Na-flux method**

一种生长 GaN 晶体的方法。钠流法通过添加 Na 金属作为助溶剂，利用 Na 的还原能力，促进 N₂ 电离，提高 N 在 Ga 熔体中的溶解度，并增强 N 的活性，在较低温度（600~900 °C）和压力（< 10 MPa）条件下液相生长 GaN 单晶的一种方法。

3.2.1.3 外延

3.2.1.3.1

铟镓氮 **indium gallium nitride**

InGaN

在 GaN 为基础的晶体中，部分 Ga 原子被 In 原子替换而形成的三元合金半导体材料，包含替换比例的表达式为 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 。

3.2.1.3.2

铝镓氮 **aluminum gallium nitride**

AlGaN

在 GaN 为基础的晶体中，部分 Ga 原子被 Al 原子替换而形成的三元合金半导体材料，包含替换比例的表达式为 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 。

3.2.1.3.3

铟铝氮 **indium aluminum nitride**

InAlN

在 AlN 为基础的晶体中，部分 Al 原子被 In 原子替换而形成的三元合金半导体材料，包含替换比例的表达式为 $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 。

3.2.1.3.4

铝铟镓氮 **aluminum indium gallium nitride**

AlInGaN

在 GaN 为基础的晶体中，部分 Ga 原子被 In 原子和 Al 替换而形成的四元合金半导体材料，包含替换比例的表达式为 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ 。

3.2.1.3.5

氮化镓同质外延 **GaN homoepitaxy**

在氮化镓衬底上生长的氮化镓薄层单晶，称为氮化镓同质外延。

3.2.1.3.6

氮化镓异质外延 **GaN heteroepitaxy**

氮化镓单晶薄层生长在非氮化镓衬底上，称为氮化镓异质外延。常见非氮化镓衬底包括：蓝宝石、SiC 以及 Si 衬底等。

3.2.1.3.7

硅基氮化镓 gallium nitride on Si

也有人称“硅上氮化镓”。以硅作为衬底通过外延生长的氮化镓器件结构，在电力电子器件方面具有较高的应用潜力。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。一般认为硅基氮化镓的未来有两条路，一条是高功率的模块化产品，一条是系统集成，集成更多被动元件、射频驱动等。

3.2.1.3.8

蓝宝石基氮化镓 gallium nitride on sapphire

也有人称“蓝宝石上氮化镓”。以蓝宝石作为衬底生长的氮化镓材料。在发光器件方面具有较高的应用潜力。蓝宝石基氮化镓外延技术比较成熟，材料质量较高，是目前发光二极管商业化最主要的技术路线。

3.2.1.3.9

碳化硅基氮化镓 gallium nitride on silicon carbide

也有人称“碳化硅上氮化镓”。以碳化硅作为衬底通过外延生长的氮化镓器件结构，在微波器件、电力电子器件方面具有较高的应用潜力。碳化硅基氮化镓兼具碳化硅的高导热效应以及氮化镓的高质量特性。一般认为碳化硅基氮化镓在高功率器件方面优势明显。

3.2.1.3.10

金刚石基氮化镓 GaN-on-Diamond

也有人称“金刚石上氮化镓”。以金刚石作为衬底通过外延生长的氮化镓器件结构，目前处于探索阶段，主要优势是利用金刚石的高导热效应，制备散热优异的氮化镓高功率器件。

3.2.1.3.11

调制掺杂 modulation doping

在量子阱有源区生长过程中在垒层掺入少量 SiH₄，在阱层不掺杂形成阱垒调制掺杂的量子阱；

在高 Al 组分 AlGa_N 材料掺杂的过程中，采用 SiH₄/Cp₂Mg 间歇性通入的方法进行掺杂，以提高掺杂效率。

3.2.1.3.12

应力调控 stress-strain control

在大失配异质外延衬底制备半导体材料过程中，采用应力调控技术制备外延材料。在 Si 衬底外延生长 GaN 材料，采用 AlN 缓冲层以及 Al 组分阶梯式变化的 AlGa_N 应力调控的方法释放 Si 衬底和 GaN

外延层之间的晶格失配应力和热失配应力。

3.2.1.4 杂质与缺陷

3.2.1.4.1

Si 施主杂质 Si donor impurity

用 Si 原子替代氮化物半导体中的Ⅲ族原子，可以离化出一个自由电子，多用于调控材料中的电子浓度。

3.2.1.4.2

Ge 施主杂质 Ge donor impurity

用 Ge 原子替代Ⅲ族氮化物半导体中的Ⅲ族原子，可以离化出一个自由电子，多用于调控材料中的电子浓度。

3.2.1.4.3

Mg 受主杂质 Mg acceptor impurity

用 Mg 原子替代氮化物半导体中的Ⅲ族原子，可以离化出一个自由空穴，多用于调控材料中的空穴浓度。但是，一般离化率较低，只有 1%左右。目前对于氮化物半导体，没有找到更加有效实用的受主杂质。

3.2.1.4.4

点缺陷（氮化物的） point defect (of nitride)

氮化物半导体中原子格点上出现的缺陷，常见的点缺陷有氮空位、镓反位，间隙镓等。

3.2.1.4.5

穿透位错（氮化物的） threading dislocation (of nitride)

穿透位错是一种从形态上定义的位错，不是一种新结构的位错。在氮化物异质外延材料中，常常产生可以延伸穿透整个外延层的位错，可以是刃位错、螺位错或混合位错，对器件性能和可靠性有重要影响。

3.2.2 器件

3.2.2.1 光电器件

3.2.2.1.1 发光器件

3.2.2.1.1.1

发光二极管 light emitting diode

LED

当被电流激发时通过传导电子和空穴的再复合，在 p-n 结处产生自发辐射而发出非相干光的一种半

导体二极管。氮化物发光二极管可以发出高效率的、短波长光，如蓝光，紫外光等。

[改写 GB/T 37031—2018，定义 2.1.3]

3.2.2.1.1.2

微米 LED micro LED

μ LED

发光单元尺寸在微米量级的 LED，一般指 1~50 μm 的 LED。微米 LED 在使用过程中通常剥离外延衬底。将 LED 微缩化和矩阵化，LED 单元一般小于 50 μm 微米 LED。

3.2.2.1.1.3

纳米 LED nano LED

n LED

发光单元尺寸为纳米量级的 LED，一般指 10~1000 纳米间的 LED。纳米光源具有微腔效应、较少的导播模式、耐大电流密度等特性，在照明、通信以及生物医疗方面具有广阔前景。

3.2.2.1.1.4

小尺寸 LED mini Light-Emitting Diode

Mini-LED

晶粒尺寸大约在 100 微米的 LED，外延衬底不剥离。微米 LED 在小间距显示屏应用方面有显著的优势。

3.2.2.1.1.5

大功率 LED high power LED

输入电功率不小于 1000 mW 的 GaN 基-LED。

[改写 GB/T 37031—2018，定义 2.4.4.3]

3.2.2.1.1.6

中功率 LED middle power LED

输入电功率不小于 100mW，但小于 1000mW 的 GaN 基 LED。通常指电功率 300~500 mW 的 LED。

[改写 GB/T 37031—2018，定义 2.2.4.2]

3.2.2.1.1.7

小功率 LED low power LED

输入电功率小于 100 mW 的 GaN 基 LED。通常指电功率 50~70 mW 的 LED。

[改写 GB/T 37031—2018，定义 2.2.4.1]

3.2.2.1.1.8

单色光 LED monochromatic LED

发出单一颜色光的 LED，光谱为单一波峰。氮化物单色光 LED 有黄、绿、青、蓝、紫、紫外等。

[改写 GB/T 37031—2018，定义 2.2.4.4]

3.2.2.1.1.9

高压 LED high-voltage LED

HV LED

把一定面积的 LED 外延层分割成数个独立的芯粒单元，并通过电极互连，至少两个芯粒单元串联而构成的新型 LED。高压 LED 可以有效缓解散热问题，提高驱动电路的效率。

3.2.2.1.1.10

垂直结构 LED vertical structure LED

VSLED

指 p、n 电极分布在外延片上下异侧的结构，使得电流几乎全部垂直流过 LED 外延层，从而克服电流拥挤、散热等问题。

3.2.2.1.1.11

共振腔 LED resonant cavity LED

RCLED

一种新型发光二极管(LED)结构,主要由上布拉格反射镜(DBR)、下 DBR 和包含多量子阱(MQW)的有源区构成,同时具备了传统 LED 和垂直腔面激光器 (VCSEL) 两者的优点。

3.2.2.1.1.12

发光三极管 light emitting triode

LET

由两个距离很近的 pn 结构成的半导体发光元件，两个 PN 结把整块半导体分成三部分，中间部分是基区，两侧部分是发射区和集电区，排列方式有 PNP 和 NPN 两种。氮化物发光三极管可以有效提高发光元件的开关速度。

3.2.2.1.1.13

表面等离子激元增强 LED surface plasmon enhanced LED

SPLED

将表面等离子体激元应用于增强发光的发光二极管。一般地，LED 量子阱有源区要在表面等离子激元近场作用范围内。

3.2.2.1.1.14

激光二极管 laser diode

LD

以直接带隙半导体材料为光增益介质，通过 pn 结注入载流子实现粒子数反转，以法布里-珀罗腔或分布布拉格反射器等制备谐振腔，进行受激发射光的放大，从而发出激光的二极管。

3.2.2.1.1.15

垂直腔表面发光激光器 vertical cavity surface emitting laser

VCSEL

激光发射方向垂直于 pn 结平面而谐振腔面平行于 pn 结平面的半导体激光器。

3.2.2.1.1.16

边发射激光器 edge emitting laser

激光发射方向平行于 pn 结平面而谐振腔面垂直于 pn 结平面的半导体激光器。

3.2.2.1.1.17

GaN 基量子级联激光器 GaN-based quantum cascade lasers

以 GaN 基半导体超晶格材料形成载流子子带跃迁发光的激光器。由于超晶格子带间隙较小，量子级联激光器能够发射光谱在中红外和远红外频段激光。

3.2.2.1.1.18

效率下降 efficiency droop

LED 随着注入电流密度增加，发光效率达到峰值后出现下降的现象。效率骤降在大功率 GaN 基 LED 中比较明显，与俄歇复合、极化效应、载流子泄露等因素有关。

3.2.2.1.1.19

内量子效率 internal quantum efficiency

IQE

有源区产生的光子数与所注入有源区的电子-空穴对数之比。GaN 基蓝光 LED 的 IQE 达到 90%以上，高的 IQE 与有源区的注入载流子局域化相关。

[改写 GB/T 37031—2018，定义 2.5.1]

3.2.2.1.1.20

出光效率 light extraction efficiency

LEE

从发光器件出射到空气中的光子数与器件有源区产生的所有光子数之比。采用图形化衬底及表面粗糙化技术可以有效提高器件的出光效率。

[改写 GB/T 37031—2018，定义 2.5.2]

3.2.2.1.1.21

外量子效率 external quantum efficiency

EQE

逸出器件的光子数与注入器件有源区的电子-空穴对数之比，等于内量子效率与出光效率和注入效率的乘积。GaN 基蓝光 LED 的外量子效率已经达到 80%以上。

[改写 GB/T 37031—2018，定义 2.5.4]

3.2.2.1.1.22

发光效率 luminous efficiency

发光效率是光通量与电功率的比值，即光源每消耗一瓦电能所产生的光通量。发光效率的单位是 lm/W。

[改写 GB/T 37031—2018，定义 2.5.6]

3.2.2.1.1.23

光视效能 luminous efficacy

某一波长的单色光辐射通量可以产生多少相应的单色光通量。

3.2.2.1.1.24

电光转换效率 wall-plug efficiency

WPE

在规定的输入条件下，光源的输出光功率与输入电功率的比值（百分数）。

[改写 GB/T 37031—2018，定义 2.5.5]

3.2.2.1.1.25

量子限制斯塔克效应 quantum-confined Stark effect

QCSE

在电场的作用下，半导体量子阱的能带发生倾斜，电子-空穴对波函数发生空间分离、交叠量减少，引起发光效率下降、发光峰值波长红移的现象。由于有源区的自发极化及压电极化，c 面生长的 GaN 基 LED 的 QCSE 较强。

3.2.2.1.2 探测器件

3.2.2.1.2.1

光电探测器 photodetector

在半导体材料中，利用电子吸收光子发生跃迁的原理，将光信号转换为电信号的器件称之为光电探测器。根据器件对光辐射响应的方式不同，光电探测器可分为光子探测器和热探测器。由于禁带宽度较大，GaN 基材料常用于制备短波长的光电探测器。

3.2.2.1.2.2

紫外探测器 ultraviolet photodetector, UV detector

能够探测波长为 10~400 纳米范围内的紫外线的光电探测器。氮化物和碳化硅等宽禁带半导体材料可用来制备高性能的紫外光电探测器。

3.2.2.1.2.2.1

日盲紫外探测器 **solar-blind UV detector**

指只对波长在 280 纳米以下的紫外光进行探测的电探测器。

因为大气层的吸收，太阳光到达地面时，几乎不含 280 纳米以下的紫外光，所以 280 纳米以下的紫外光为日盲波段。日盲紫外探测器实际上对所有大气层内的太阳光都没有响应，因此可以得到极低的背景噪声。

3.2.2.1.2.2.2

光导型紫外探测器 **photoconductive UV detector**

当照射的光子能量等于或大于半导体的禁带宽度时，光子能够将价带中的电子激发到导带，从而产生导电的电子、空穴对，这就是本征光电导效应，由此增加了半导体的整体电导。在对紫外光有响应的半导体光吸收区两端制备欧姆接触电极，构成光导型紫外探测器。光生载流子改变了吸收区的电导，从而引起电流变化。

3.2.2.1.2.2.3

光伏型紫外探测器 **photovoltaic UV detector**

在宽禁带半导体势垒区进行光吸收的紫外探测器。光生载流子改变了势垒区的自建电场，从而引起探测器电压或者电流的变化。光伏型探测器有肖特基型，金属-半导体-金属（MSM）型，p-i-n 形型探测器等。

3.2.2.1.2.3

雪崩光电探测器 **avalanche photodetector, avalanche photodiode**

APD

一种基于 p-n 结或 p-i-n 型的具有强电场结构的光电二极管，利用光生载流子在强电场下的雪崩倍增效应来放大光电信号以提高检测的灵敏度。工作时加较大的反向偏压，使得其达到雪崩倍增状态。它是一种具有内部高电流增益的光电二极管，适用于微弱光信号的测量。

3.2.2.1.2.4

雪崩增益 **avalanche gain**

雪崩光电二极管雪崩倍增前后的光电流比值。

典型的倍增过程是光生载流子在强电场下运动获得能量，通过碰撞离化产生新的电子-空穴对；新产生的二次电子和空穴在电场的作用下向反方向运动，在运动中又可以产生新的碰撞离化，一连串的碰撞离化造成了载流子数目剧增，即为雪崩倍增。

3.2.2.1.2.5

太赫兹探测器 terahertz detector

探测频率在太赫兹波段(0.1 THz-10 THz)的电磁波。

3.2.2.2 电子器件

3.2.2.2.1 微波射频器件

3.2.2.2.1.1

高电子迁移率晶体管 high electron mobility transistor

HEMT

利用异质结或调制掺杂产生的高迁移率二维电子气特性的场效应晶体管。其特征是异质结，其中宽禁带材料是掺杂的，载流子扩散到不掺杂的窄禁带层，在不掺杂的异质结界面形成沟道，使得位于不掺杂的异质结界面沟道中载流子与掺杂区分离，由于没有杂质散射，可得到很高的迁移率。

3.2.2.2.1.2

异质结双极晶体管 heterojunction bipolar transistor

HBT

异质结双极晶体管与同质结晶体管最显著的区别是宽带隙发射区，指发射区用的半导体能带间隙比基区宽，电子和空穴具有不同的能量势垒，抑制了少数载流子从基区向发射区的注入，提高发射极的注入效率，得到更高的增益。

3.2.2.2.1.3

碳化硅上氮化镓射频晶体管 GaN on-SiC GaN RF Transistor on SiC

在高阻或半绝缘碳化硅衬底上生长氮化镓高迁移率晶体管 HEMT 结构，制作的用于微波射频放大器的 HEMT 晶体管。由于采用 HEMT 结构以及高驱动电压，因此通常具有更高的效率和优异的高频性能。（在 65V 工作电压下输出功率达到 1.8kW,工作频率在 1.0~1.1 GHz，可用于 L 波段航空电子设备和敌我识别(IFF)应用领域）。

3.2.2.2.1.4

GaN MMIC 超低噪声功率放大器 GaN MMIC Ultra-Low Noise Power Amplifier

（工作频率位于S、C和X波段。该功率放大器采用4×4毫米QFN封装。提供高线性度性能的同时提供5W的高输入功率处理，适用于雷达和电子战）

3.2.2.2.1.5

太赫兹光源 terahertz source

太赫兹光源能够产生频率大约在0.1 THz~10 THz（1 THz= 10¹² Hz）波段内的电磁波。

3.2.2.2.1.6

太赫兹探测器 terahertz detector

探测频率在太赫兹波段（0.1 THz = 10¹² Hz）的电磁波。

3.2.2.2.1.7

GaN 基量子级联激光器 GaN-based quantum cascade lasers

以 GaN 为主要半导体材料的半导体量子级联激光器。

3.2.2.2.1.8

GaN 肖特基微波功率二极管 Shottky diode/Shottky barrier diode

由具有整流作用的金属-半导体结组成的半导体二极管，具有目前最好的 $BV_{Ron, sp}$ ，更靠近 GaN Baliga 理论曲线。

3.2.2.2.1.9

截止频率 cut-off frequency

晶体管输出为短路时输出电流与输入电流的绝对值之比为 1 时所对应的频率为晶体管的^{最大工作}频率或截止频率。

3.2.2.2.1.10

最大振荡频率 maximum oscillation frequency

当功率增益降到 0dB 时的频率，是晶体管作为振荡使用的最高频率。

3.2.2.2.1.11

功率密度 power density

功率半导体器件的功率密度为器件输出功率除以芯片面积。

3.2.2.2.1.12

场板 field plate

场板是指能够影响和调节器件内部电场的金属板，主要用于改善电场分布的均匀性，从而提升器件击穿电压。

3.2.2.2.1.13

表面钝化 surface passivation

半导体在界面处周期性突然终止，导致表面缺陷密度大于内部缺陷密度，引起的表面效应会对过剩载流子产生影响。需要在器件表面生长一层钝化膜，以控制半导体表面缺陷，从而稳定半导体表面特性。

3.2.2.2.1.14

单片微波集成电路 MMIC monolithic microwave integrated circuit

单片微波集成电路是在半绝缘衬底上用一系列的半导体工艺方法制造出无源和有源器件，并连接起来构成应用于微波（甚至毫米波）频段的功能电路。

3.2.2.2.1.15

氮化镓基微波脉冲固态功率放大器 SSPA

固态功率放大器为采用固态功放器件与功率合成技术设计、制作的高频功率放大器。通常固态高功放由输入/输出组件、电源组件、功放模块、内置微处理器、风冷系统等构成，可实现射频输入输出区间检测，反射功率监测。SSPA 的主要部件——功放模块则由多个微波器件氮化镓场效应晶体管并联组成，因此成为氮化镓基微波脉冲固态功率放大器。利用氮化镓微波器件的固态功率放大器，相比于传统硅基和砷化镓基固态功率放大器，具有更高的可靠性，线性度，功率密度和能效，尤其在高频领域具有更高的增益和功率。

3.2.2.2.2 电力电子器件

3.2.2.2.2.1

氮化物肖特基势垒二极管（氮化物的） **shottky diode/shottky barrier diode (of nitride)**

SBD

氮化物半导体与特定金属（典型的是镍，金等）可以形成肖特基接触，利用这种接触制成具有单向导通性能的器件称为氮化物肖特基势垒二极管。

轻掺杂半导体上的金属可以与半导体形成整流接触，这种接触称为肖特基势垒二极管。

3.2.2.2.2.2

金属-绝缘体半导体场效应晶体管 **metal-insulator-semiconductor field effect transistor**

MISFET

MISFET 的核心是金属-绝缘体（例如 SiO_2 ， SiN_x ）-半导体结构形成的栅极。通过加在栅极上的电压调节栅下半导体的电导，从而调节漏极和源极之间的电流。这种通过加在半导体表面的垂直电场来调制半导体的电导率的现象为场效应。利用金属-绝缘体-半导体场效应制作的晶体管称为金属-绝缘体半导体场效应晶体管。

金属-氧化物半导体场效应晶体管 **metal-oxide-semiconductor field effect transistor**

MOSFET 的核心是一个称为 MOS 电容的金属-氧化物-半导体结构，通过加在栅极电压调节栅下半导体的电导，从而调节漏极和源极之间的电流。这种通过加在半导体表面的垂直电场来调制半导体的电导率的现象为场效应。

3.2.2.2.2.3

增强型高电子迁移率晶体管 **enhancement mode high electron mobility transistor**

增强型高电子迁移率晶体管，当栅极电压为零时，栅极下方的半导体沟道处于高阻状态，源极和漏极之间不导通。通过施加高于阈值电压的正向栅源电压来获得导通通道，正向栅极电压会在栅极下方诱

导产生具有高载流子浓度的导通通道。

增强型高电子迁移率晶体管在零栅源电压下沟道电导为零，随着栅极电压的增大，沟道电导逐渐增大，器件导通。此类器件也称为常关器件。

3.2.2.2.2.4

耗尽型高电子迁移率晶体管 **depletion high electron mobility transistor**

当此类高电子迁移率晶体管器件栅极偏压为零时，栅极下方存在低电阻率的半导体导电沟道，高电子迁移率晶体管的源漏处于导通状态。较小的工作电压会产生相应的漏极电流。此类器件也称为常开器件。

3.2.2.2.2.5

常开型 GaN 器件 **normally-on GaN FET**

常开型 GaN 器件在当栅极偏压为零时，高电子迁移率晶体管的漏极电流最大，器件处于工作状态。增加反向栅极电压，漏极电流逐渐减少至零。

3.2.2.2.2.6

常关型 GaN 器件 **normally-off GaN FET**

常开关型 GaN 器件在栅极电压为零时，漏极电流为零，器件处于关断状态。增加栅极电压，漏极电流逐渐增大，直至开启。

3.2.2.2.2.7

cascode 结构的 GaN 器件

由一个耗尽型 GaN 晶体管与一个硅 MOSFET 采用共源共栅级联封装，实现器件在零电压下关断的结构。Cascode 器件实际是一种封装形式，能够利用结构简单的耗尽型 GaN 器件与 Si 器件一起实现常关功能，同时利用了 GaN 晶体管的一些优异性能。

3.2.2.2.2.8

结型（P 型）栅结构 **P-GaN GaN FET structure**

GaN 增强型 FET 的一种。利用在栅电极和 AlGaIn 势垒层插入一层 P 型（Al）GaN，来耗尽位于 P 型结构下沟道中的二维电子气来实现器件常关功能的晶体管结构。

3.2.2.2.2.9

凹槽栅结构 **recessed gate**

利用干法刻蚀工艺减薄栅极下方 AlGaIn 势垒层厚度以降低异质结极化作用，从而耗尽沟道中的 2-DEG，实现增强型器件的晶体管结构。

3.2.2.2.2.10

金属绝缘体半导体 GaN MISFET 结构 MISFET 结构

GaN 的 MISFET 结构是基于凹槽栅结构的增强型器件结构。利用刻蚀工艺减薄栅极下方 AlGaIn 势垒层厚度以降低异质结极化作用，从而耗尽沟道中的二维电子气，在栅下势垒层减薄后淀积栅介质的 MIS 栅 FET 结构。对比普通凹槽栅机构，MISFET 结构既可以大幅降低了栅极泄漏电流又大幅增加了栅电压摆幅和栅极可靠性。

3.2.2.2.2.11

氟离子实现的 GaN 增强型器件注入结构

利用氟离子 (F-) 注入到栅下区域，提高肖特基栅的有效势垒高度，从而耗尽栅下的二维电子气，实现器件在零栅电压下关断的 GaN 增强型器件结构。

3.2.2.2.2.12

Si 基 GaN 功率晶体管 Si-based GaN power transistor

以硅晶圆为衬底，在其上外延 GaN/AlGaIn 结构制作的功率晶体管。通常可以实现大尺寸（6,8 寸）硅衬底上的外延生长，其器件工艺可以利用成熟的硅集成电路工艺线来实现。

Si 基 GaN 功率 MOSFET

在半导体 Si 衬底上生长 GaN 及相关氮化物结构来实现的功率晶体管。

功率 MOSFET 电流的处理能力在安培数量级，且漏源间夹断电压可能会在 50~100 V 或更高的范围之内。

3.2.2.2.2.13

阈值电压 threshold voltage

对于常关器件，将电力电子器件栅极下的沟道开通所需的施加在栅极上的最小临界电压。在工作状态下，小于该电压时器件不导通，大于该电压时器件导通。通常将输出电流随输入电压改变而急剧变化转折区的中点对应的输入电压称为阈值电压。

3.2.2.2.2.14

品质因子 figure of merit

电力电子器件中栅电荷与导通电阻的乘积。

3.2.2.2.2.15

动态电阻 dynamic on state resistance

在 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管器件中，由于材料表面和材料内部的缺陷或者陷阱能级对载流子的捕获作用，导致器件在关断状态下被施加较大反偏电压之后，器件在转为开启状态后暂时的电阻值相比于直流状态下有所变化（通常电阻升高），在开启一段时间后电阻值逐渐恢复到直流状态电阻值。

在动态开关状态下，器件开启时，瞬时变化（升高）的电阻值被称为动态电阻。

3.2.2.2.2.16

饱和电流 **satuation current**

晶体管器件达到饱和工作区时的漏极电流。

3.2.2.3 传感器件

3.2.2.3.1

化学传感器 **chemical sensor**

纳米线是一种横向上被限制在 100nm 以下、纵向上没有限制的一维结构。GaN 纳米线是一种以半导体为组成材料的纳米线。纳米线改善载流子限制、高表面积体积比使得它们在特定的化学物质和生物医药敏感，利用肖特基结等异质结构得到 GaN 纳米线的传感器。

3.2.2.3.2

生物传感器 **biosensor**

基于高电子迁移率晶体管的生物传感器。高电子迁移率晶体管是场效应管的一种，它使用两种不同能隙的材料形成异质结，为载流子提供沟道。对 HEMT 的栅电极功能化可以实现不同的传感功能。

3.2.2.4 其它器件

3.2.2.4.1

自旋存储器 **spin-transfer torquemagnetic random access memory**

STT-MRAM

利用自旋转移矩效应工作的磁性随机存取存储器。

3.2.2.4.2

自旋场效应管 **spin field-effect transistor**

Spin-FET

利用电子自旋特性工作的场效应晶体管。

3.3 碳化硅半导体

3.3.1 材料

3.3.1.1 单晶

3.3.1.1.1

碳化硅 **silicon carbide**

SiC

由 Si 原子和 C 原子以摩尔比 1: 1 形成的二元化合物。

（注：可以是无定型也可是单晶）

3.3.1.1.2

碳化硅单晶 single crystal siliconcarbide

由 Si 原子和 C 原子以摩尔比 1:1 构成，且原子排列在三维空间中呈现为周期性规律排列的二元化合物。

3.3.1.1.3

晶型 polytype

由同种化学成分所构成的晶体，当其晶体结构中的结构单位层相同，但结构单位层之间的堆垛顺序或重复方式不同时，而形成的结构上不同的变体。【GB/30656—2014】对于导电型 4H-SiC、6H-SiC、3C-SiC 会呈现不同颜色现象，4H-SiC 呈现褐黄色、6H-SiC 呈现偏绿色、3C-SiC 呈现淡黄色。

当在同一碳化硅衬底内呈现 4H-SiC、6H-SiC、3C-SiC 时，称为相变，往往在多型交界处伴生晶界、微管，甚至相变裂纹等缺陷。

碳化硅晶型：由 Si 原子层和 C 原子层构成的 Si-C 双原子层，以周期性堆垛顺序进行排列，进而形成不同的碳化硅晶体结构，称为碳化硅晶型。SiC 共有 250 多种晶型，三种常见的 SiC 晶型分别是 6H-SiC、4H-SiC 和 3C-SiC，其中具有立方晶型的 3C-SiC 只有一种。

3.3.1.1.4

4H 碳化硅 4H-SiC

由 Si 原子层和 C 原子层构成的基本 Si-C 双原子层作为基本结构层，以：、“ABCBABCB...” 序列进行周期性堆放，由此形成的碳化硅（SiC）晶体称为 4H-SiC。其中数字 4 表示一个周期内 Si-C 双原子层数，“H” 代表六角晶型。

4H 碳化硅：碳化硅晶胞由 4 层 Si-C 双原子层以固定规律排列（ABCB）构成，由此晶胞构成的碳化硅晶体为 4H-SiC 晶型。其中数字 4 表晶胞内 Si-C 双原子层数，“H” 代表六方晶系。

3.3.1.1.5

6H 碳化硅 6H-SiC

由 Si 原子层和 C 原子层构成的基本 Si-C 双原子层作为基本结构层，以：、“ABCACB-ABCACB...” 序列进行周期性堆放，由此形成的碳化硅（SiC）晶体称为 6H-SiC。其中数字 6 表示一个周期内 Si-C 双原子层数，“H” 代表六角晶型。

3.3.1.1.6

3C 碳化硅 3C-SiC

由 Si 原子层和 C 原子层构成的基本 Si-C 双原子层作为基本结构层，以：、“ABC-ABC...” 序列进

行周期性堆放，由此形成的碳化硅（SiC）晶体称为 3C-SiC。其中数字 6 表示一个周期内 Si-C 双原子层数，“H”代表六角晶型。

3.3.1.1.7

液相生长 liquid phase growth

在一定温度和压力下，C 物质溶解在 Si 熔液中，形成应形成 C-SiC-Si 饱和熔液，通过降低温度使 SiC 在熔液中产生过饱和度，在 SiC 同质籽晶上按照籽晶的原子堆垛顺序形核并生长出新的 SiC 单晶。

3.3.1.1.8

物理气相输运生长（碳化硅的） physical vapor transport growth (of SiC)

PVT

4H-SiC 晶体的一种常用生长方法。为了克服 Lely 方法（自发成核的升华法）中存在的问题，1978 年，前苏联科学家 Tairov 和 Tsvetkov 首先提出了通过引入籽晶的升华法来生长 SiC 单晶，缔造了大面积生长 SiC 晶体生长的先驱性工作，后又称该方法为籽晶升华法或改良 Lely 法。

3.3.1.1.9

高温化学气相沉积 high temperature chemical vapor deposition

HT-CVD

高温化学气相沉积（HT-CVD）技术是碳化硅单晶的一种生长方法。HT-CVD 法是在 2000℃ 以上的高温下，通入高纯特气（硅烷、乙烷或丙烷、及氢气等）在生长腔内进行反应，先在温度较高的裂解反应区形成 Si_xC_y 的前驱物，再经载气的带动下，进入较低温的籽晶端前沉积形成单晶。由于 HT-CVD 生长碳化硅过程中，所用的特气纯度高、杂质含量低，因此，HT-CVD 技术尤其适合高纯度高质量半绝缘碳化硅晶体的生长。

3.3.1.1.10

微管 micropipe

碳化硅单晶衬底片中的中空管道，方向平行于 c 轴结晶方向，且径向尺寸在一微米至几十微米范围。

3.3.1.1.11

六方坑洞 planar defect

碳化硅单晶中独立于单晶区域且呈现六角形特征的空洞，空洞具有高的宽高比，表面往往平行于 {0001} 晶面，侧面边缘平行于结晶方向。该空洞周围多伴生微管缺陷。

3.3.1.1.12

碳包裹物 carbon inclusion

4H-SiC 衬底中存在的由碳元素(C)组成的固相原子团簇或小颗粒体。在碳化硅生长过程中,当 SiC 晶体生长前沿气相的 Si/C 比偏离化学计量比时,富余的 C 元素在生长前沿聚集,形成 C 包裹物。不同的 C 包裹体,其形状和大小各异。

3.3.1.2 外延

3.3.1.2.1

化学气相沉积外延生长 **chemical vapor deposition**

CVD

碳化硅化学气相沉积外延生长是在通过控制化学反应,在 SiC 衬底表面生长一层单晶薄膜层的工艺过程。

3.3.1.2.2

台阶流动控制外延生长 **step controlled epitaxy**

4H-SiC 外延材料的一种生长方法,采用偏晶向 4H-SiC 衬底,通过控制表面上的原子台阶流动,来实现 4H-SiC 晶型控制及外延层生长。

3.3.1.3 杂质与缺陷

3.3.1.3.1

n 型掺杂(碳化硅的) **n type doping (of SiC)**

n 型掺杂:通过在碳化硅晶体中掺杂非 Si、C 元素并形成固溶体,实现碳化硅晶体导电且载流子为电子,这种掺杂方式为 n 型掺杂,形成 n 型碳化硅。通常掺杂元素为最外层排布电子数>4 的元素,如 N。

3.3.1.3.2

p 型掺杂(碳化硅的) **p type doping (of SiC)**

p 型掺杂:通过在碳化硅晶体中掺杂非 Si、C 元素并形成固溶体,实现碳化硅晶体导电且载流子为空穴,这种掺杂方式为 p 型掺杂,形成 p 型碳化硅。通常掺杂剂为最外层排布电子数<4 的元素,如 B、Al 等。

3.3.1.3.3

穿透刃位错 **threading edge dislocation**

TED

穿透刃位错: SiC 晶体中位错线平行于[0001],位错线的伯格矢量垂直于[0001],此位错为刃位错,通常使用含有该类位错的籽晶或衬底进行晶体材料生长时,该类位错将在[0001]上贯穿所生长晶体材料。外延层中的刃位错来自于衬底刃位错向外延层的贯穿,以及衬底中 BPD 转化而来的 TED 位错。因 BPD 的转化,外延层中 TED 位错密度略大于衬底中的 TED 位错密度。4H-SiC 中 Burgers 矢量为 $1/3[11-20]$

的贯穿型位错。TED 位错很难直接被观察到，但可用熔融 KOH ($T > 450^\circ$) 腐蚀方法来表征，与 TSD 一样，TED 蚀坑也呈现六角形，TED 位错密度通常在 10^4cm^{-2} 量级。TED 的 Burgers 矢量 $1/3[11-20]$ 小于 TSD 的 $1c$ Burgers 矢量，大约是 $1c$ 矢量的 $1/3$ ，所以 TED 六角形蚀坑尺寸小于 TSD 蚀坑。

3.3.1.3.4

穿透螺位错 threading screw dislocation

TSD

穿透螺位错：SiC 晶体中位错线以及位错线伯格矢量方向均平行于 $[0001]$ ，此位错为螺位错，通常使用含有该类位错的籽晶或衬底进行晶体材料生长时，该类位错将在 $[0001]$ 上贯穿所生长晶体材料。4H-SiC 衬底中 Burgers 矢量为 $1c$ 的贯穿型位错。TSD 位错很难直接被观察到，但可用熔融 KOH ($T > 450^\circ$) 腐蚀方法来表征，其蚀坑呈现六角形形状，即一个锥顶为蚀坑底、且偏向 $\langle 11-20 \rangle$ 方向的不对称倒六面锥体。TSD 位错密度通常在 10^2 - 10^3cm^{-2} 量级。

3.3.1.3.5

基晶面位错 basal plane dislocation

BPD

基平面位错：SiC 晶体中位错线垂直于 $[0001]$ ，位错线的“伯格线”矢量垂直于 $[0001]$ ，此位错为基平面位错。BPD 是 4H-SiC 衬底中位于基晶面内的一种常见一维结晶缺陷。经熔融 KOH 腐蚀后，BPD 位错蚀坑呈现壳形形貌。BPD 位错的 Burgers 矢量为 $1/3[11-20]$ ，与 TED 位错的 Burgers 矢量相同。对于壳形蚀坑，其底部所在的方向与六角形蚀坑底部方向相反，且其底部更接近于蚀坑的边缘。

3.3.1.3.6

生长型层错 in-grown stacking fault

IGSF

堆垛层错：一种二维缺陷，由于晶体内原子的堆垛顺序偏离了某平面处正常堆垛次序所致，通常层错为数个原子层。位于晶面内的一种 2 维结构缺陷，4H-SiC 外延层中大部分 IGSF 成核点位于外延层/衬底界面处，IGSF 从其成核点会一直延伸到外延层表面。该类型层错不可用光学显微镜直接被观察到，可借助 PL 成像手段来观察。

3.3.2 器件

3.3.2.1

碳化硅结势垒肖特基二极管 junction barrier schottky diode

采用肖特基结相结合的二极管器件，具有开关损耗小、反向恢复时间快，反向恢复特性没有温度依赖性以及低正向压降等优势，具有高浪涌电流耐量，从而提高可靠性。

3.3.2.2

碳化硅 PIN 二极管 PIN diode

在 P 型和 N 型碳化硅之间加入低掺杂的本征碳化硅层形成的二极管器件，具有高阻断电压以及高

电流导通密度的特点。

3.3.2.3

势垒肖特基二极管 barrier schottky diode

JBS

JBS 同时具备肖特基二极管(SBD)的低开关损耗、反向恢复特性好和 PiN 二极管的高抗浪涌电流、低反向漏电流的优点。

3.3.2.4

碳化硅结型场效应晶体管 junction field effect transistor

JFET

由 p-n 结作为栅极(G)与源极(S)和漏极(D)构成的完全可控性器件,通过电压改变沟道的导电性来实现对输出电流的控制。最常见到的是耗尽型 JFET (D-JFET),即在 0 栅偏压时沟道是打开的,在电力电子应用中常用增强型 JFET (E-JFET),即在 0 栅偏压时沟道是关闭的。

3.3.2.5

SiC n 通道增强型 MOSFET SiC n-channel enhancement MOSFET

MOSFET

额定电压 1200V, 额定电流 18A, 导通电阻 120 毫欧和额定电压 1200V, 额定电流 14A, 导通电阻 160 毫欧。

3.3.2.6

碳化硅双极结型晶体管 bipolar junction transistor

BJT

将两个 PN 结结合在一起的器件,有 PNP 和 NPN 两种组合结构,具有发射极、基极和集电极三个电极。

3.3.2.7

碳化硅绝缘栅双极型晶体管 insulated gate bipolar transistor

IGBT

由 BJT(双极型三极管)和 MOS(绝缘栅型场效应管)组成的复合全控型电压驱动式功率半导体器件,兼有 MOSFET 的高输入阻抗和 GTR 的低导通压降两方面的优点,驱动功率小而饱和压降低。

3.3.2.8

碳化硅晶闸管 thyristorsilicon carbide thyristor

具有四个交替变化的 p-型 SiC 和 n-型 SiC 层,可作为双向开关器件使用。当栅极接收到触发电流后导通,当器件两端的电压被反转或者被去除后关闭。

3.4 氧化物半导体

3.4.1 材料

3.4.1.1 单晶

3.4.1.1.1

氧化镓单晶材料 gallium oxide single crystal

Ga_2O_3

氧化镓单晶：由 Ga 原子和 O 原子以摩尔比 2: 3 形成的二元化合物，且原子排列在三维空间中呈现为周期性规律排列的二元化合物。具有 α 、 β 、 γ 、 δ 、 ϵ 五种相，其中 β 相是最稳定相，为单斜晶系， ϵ 相是亚稳相，具有六方对称性，不同相的氧化镓禁带宽度在 4.8~5.2 电子伏特（eV）之间氧化镓单晶材料一般为 β 相。

3.4.1.1.2

氧化锌单晶材料 zinc oxide single crystal

ZnO

锌和氧以摩尔比 1:1 形成的二元化合物，具有闪锌矿和纤锌矿两种结构，其中纤锌矿氧化锌是稳定相，具有直接带隙，室温禁带宽度为 3.3 电子伏特（eV）。

3.4.1.1.3

熔体生长法 melt growth method

从熔体中凝固形成单晶的方法。熔体生长法具体包括导模法、浮区法、提拉法等，氧化镓单晶正是采用这些方法，在约 1900℃ 的高温进行生长。

3.4.1.1.4

水热法 hydrothermal method/hydrothermal synthesis

在密封、高温、高压的水溶液中，使（粉体）物质溶解并重结晶的技术。氧化锌单晶通常采用这种方法进行制备。

3.4.1.2 外延

3.4.1.2.1

氧化镓同质外延 Ga_2O_3 homoepitaxy

在氧化镓单晶衬底上生长氧化镓的外延方法。可采用的衬底晶向包括 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 010 \rangle$ 、 $\langle -201 \rangle$ 等；且由于 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的各向异性，一般采用 $\langle 010 \rangle$ 晶向的衬底生长，相比其他晶向普遍具有更高的生长速率。可采用的方法包括分子束外延（MBE）、金属有机化学气相沉积（MOCVD）、卤化物气相外延（HVPE）等，后两者可实现 $>1\mu\text{m/h}$ 的生长速率。

3.4.1.2.2

氧化镓异质外延 **Ga₂O₃ heteroepitaxy**

在非氧化镓衬底上生长氧化镓的外延方法。氧化镓具有五种相，异质外延主要用于非稳相氧化镓的生长。 ϵ -Ga₂O₃ 具有六方对称性，可以采用蓝宝石、GaN 等作为衬底进行异质外延； α -Ga₂O₃ 和蓝宝石均为刚玉结构，因此 α -Ga₂O₃ 普遍采用蓝宝石衬底进行异质外延。

3.4.1.2.3

氧化锌同质外延 **ZnO homoepitaxy**

在氧化锌单晶衬底上生长氧化锌的外延方法。普遍采用的单晶衬底晶向是<001>，外延生长的方法主要是分子束外延（MBE）、金属有机化学气相沉积（MOCVD）等。

3.4.1.2.4

氧化锌异质外延 **ZnO heteroepitaxy**

在非氧化锌单晶衬底上生长氧化锌的外延方法。主要的衬底是 c 面蓝宝石，且由于晶格失配问题，金属有机化学气相沉积方法主要采用低温氧化锌缓冲层，而分子束外延主要采用氧化镁或者镁锌氧作为缓冲层。

3.4.1.2.5

调制掺杂（氧化镓的） **modulation doping (of gallium oxide)**

一种对半导体进行掺杂的手段，一般用于异质结中可形成载流子在界面处的高浓度二维分布，其典型特征是自由载流子和与其对应的掺杂原子在空间上的相互分离。在氧化镓中，通过采用 (AlGa)₂O₃/Ga₂O₃ 异质结构，并对 (AlGa)₂O₃ 层进行 n 型掺杂，则可以在界面处形成 $\sim 10^{12}/\text{cm}^2$ 量级的二维电子气。

3.4.1.2.6

铝镓氧 **aluminum gallium oxide**

由氧化镓和氧化铟组成的三元合金半导体材料，分子式为 (Al_xGa_{1-x})₂O₃。和氧化镓相对应，目前铝镓氧合金有 α 、 β 、 ϵ 三种相，其中 β -Ga₂O₃ 和 β -(Al_xGa_{1-x})₂O₃ 形成的异质结可用于实现调制掺杂；而 ϵ -Ga₂O₃ 具有极化效应， ϵ -Ga₂O₃ 和 ϵ -(Al_xGa_{1-x})₂O₃ 形成的异质结可用于实现极化效应二维电子气。由于氧化铝的稳定结构为刚玉结构 (α -Al₂O₃)，因此生长 β -(Al_xGa_{1-x})₂O₃ 和 ϵ -(Al_xGa_{1-x})₂O₃ 过程中容易出现相分离。

3.4.1.2.7

镁锌氧 **magnesiumzinc oxide**

MgZnO

由氧化锌和氧化镁组成的三元合金半导体材料，分子式为 Mg_xGa_{1-x}O。由于氧化镁的稳定相是立方相，因此，低镁组分的镁锌氧其稳定结构是六方相，高镁组分的镁锌氧其稳定结构是立方相。利用氧化锌体系材料的极化效应，可在 MgZnO/ZnO 异质结界面形成高迁移率的二维电子气。

3.4.1.2.8

镉锌氧 **cadmium zinc oxide**

CdZnO

由氧化锌和氧化镉组成的三元合金半导体材料，分子式为 $\text{Cd}_x\text{Ga}_{1-x}\text{O}$ 。由于氧化镉的稳定相是立方相，因此，低镉组分的镉锌氧其稳定结构是六方相，高镉组分的镉锌氧其稳定结构是立方相。

3.4.1.2.9

金属有机化学气相沉积（氧化物的） **metalorganic chemical vapor deposition (of oxide)**

MOCVD

一种大规模生产广泛使用的薄膜晶体生长技术。其特征是晶体生长所需的金属元素是来源于金属有机化合物（MO），MO 通过载气输运至生长室内的衬底表面，与非金属气相物质在衬底表面进行化学反应，化学反应过程中通常需要高温分解输运来的各种化合物，并使分解获得的有效原子或分子在衬底生长表面获得足够的迁移能力移动到晶格位置，从而获得单晶外延层的生长。

3.4.1.2.10

分子束外延（氧化物的） **molecular beam epitaxy**

MBE

在超高真空条件下，一种或多种组元的原子束或分子束以一定速度喷射到加热的衬底表面，进行吸附、迁移和反应而沉积薄膜单晶。采用分子束外延可以生长高质量的氧化物薄膜和异质结，如 MgZnO/ZnO 、 $(\text{AlGa})\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ 等，但普遍面临生长速率低（ $10^1 \sim 10^2 \text{ nm/h}$ ）的问题。

3.4.1.2.11

喷雾化学气相沉积（氧化镓的） **mist chemical vapor deposition (of gallium oxide)**

Mist CVD

一种主要用于制备 α 相氧化镓薄膜及相应三元合金的外延技术，具体是将含有反应物的溶液以雾状喷入高温反应腔中，雾状溶液在腔体内受热蒸发，反应物在衬底上发生反应并沉积。Mist CVD 技术通常用于 α 相氧化镓薄膜及相应三元合金的生长，首款商用氧化镓功率器件即采用 Mist CVD 方法生长。 α 相氧化镓薄膜通常采用该技术进行生长。

3.4.1.2.12

卤化物气相外延（氧化镓的） **halide vapor phase epitaxy (of oxide)**

HVPE

利用卤化物输运反应物质的一种气相外延生长技术。氧化镓薄膜的 HVPE 生长一般采用氯化镓和氧气作为反应源，其相比 MBE 和 MOCVD 生长速率更快，可达 $100 \mu\text{m/h}$ 以上。

3.4.1.3 杂质与缺陷

3.4.1.3.1

n 型掺杂（氧化物的） **n-type doping (of oxide)**

在氧化物半导体中掺入杂质原子实现电子导电的掺杂方法。**n**型掺杂在宽禁带氧化物中较易实现，氧化锌的**n**型掺杂主要采用镓和铝，氧化镓的**n**型掺杂主要采用硅和锡。且多数本征氧化物半导体，由于缺陷或非故意掺杂的存在，会呈现**n**型。

3.4.1.3.2

p 型掺杂（氧化物的） p-type doping (of oxide)

在氧化物半导体中掺入杂质原子实现空穴导电的掺杂方法。由于氧化物**p**型掺杂形成能高、稳定性差、空穴有效质量大等原因，常见的宽禁带氧化物半导体中，**p**型掺杂的实现难度大。氧化锌可通过掺 N、Li 实现**p**型导电，但稳定性差。

3.4.1.3.3

共掺杂（氧化物的） co-doping (of oxide)

采用两种或两种以上的元素对氧化物半导体进行掺杂，通常其中一种元素是主要掺杂剂，另外的元素是辅助掺杂剂，其作用是提升主要掺杂元素的固溶度和稳定性。由于氧化物**p**型掺杂难度大，因此一般需要采用共掺杂技术，比如氧化锌可通过 Be、N 共掺杂，利用 Be 来提升 N 原子的稳定性。

3.4.1.3.4

点缺陷（氧化物的） point defect (of oxide)

氧化物中最常见的点缺陷是氧空位（符号为 VO），氧空位是指氧化物晶格中的氧原子脱离了原来格点的位置而形成的空位型缺陷，就电学特性而言是一种施主型缺陷。由于氧化物中氧空位普遍存在，导致氧化物半导体呈本征**n**型，同时导致**p**型氧化物半导体难以制备。

3.4.1.3.5

孪晶（氧化物的） twin (of oxide)

孪晶是指两个晶体（或一个晶体的两部分）沿一个公共晶面（即特定取向关系）构成镜面对称的位向关系，这两个晶体就称为“孪晶”，此公共晶面就称孪晶面。 β 相氧化镓晶格结构具有明显各向异性，其 $\langle 010 \rangle$ 晶向键能强而 $\langle 100 \rangle$ 晶向键能弱，因此容易在氧化镓单晶中容易产生以 $\langle 100 \rangle$ 面为镜面的孪晶，在晶体中引入孪晶界、层错等缺陷。

3.4.1.3.6

位错（氧化镓的） dislocation (of gallium oxide)

氧化镓中存在螺位错和刃位错，密度一般在 $10^3/\text{cm}^2$ - $10^7/\text{cm}^2$ ，螺位错其位错线和博格斯矢量沿 $\langle 010 \rangle$ 方向，刃位错其位错线沿 $\langle -201 \rangle$ 而博格斯矢量沿 $\langle 010 \rangle$ 或 $\langle 102 \rangle$ 。氧化镓中的一些刃位错会以阵列的形式，产生在小角度晶界处。

3.4.1.3.7

纳米管缺陷（氧化镓的） nanope (of gallium oxide)

氧化镓中纳米管缺陷的密度一般在 $10^2/\text{cm}^2$ 以上，直径为百纳米量级，长度可达 10 微米以上，纳米管一般沿<010>方向。

3.4.1.3.8

空坑（氧化镓的） **void (of gallium oxide)**

氧化镓单晶表面存在多种具有不同几何形状的空坑，比如 V 型槽坑、线型槽坑、片状坑等，其对应的形成机理也可能各不相同。因此，空坑缺陷实际上是几种不同缺陷的统称，其密度一般在 $10^2\sim 10^4/\text{cm}^2$ ，尺寸从亚微米到几十微米。

3.4.2 器件

3.4.2.1 光电子器件

3.4.2.1.1

可见光盲探测器 **visible-blind detector**

能对紫外光辐射进行探测和接收而对可见光辐射不灵敏的紫外探测器。氧化锌或低镉组分的镉锌氧合金可用于制备该器件。

3.4.2.1.2

日盲探测器 **solar-blind detector**

对波长小于 280nm 的紫外辐射进行探测和接受，而对波长大于 280nm 的辐射不灵敏的半导体探测器。镉镓氧合金或镁锌氧合金可用于制备该器件。

3.4.2.2 电子器件

3.4.2.2.1

场效应晶体管 **field-effect transistor**

FET

在栅极引出端和源极引出端之间加上电压而产生电场，由该电场控制通过导电沟道的电流的一种晶体管。氧化镓场效应晶体管主要为金属-氧化物-半导体场效应晶体管（MOSFET）结构，采用氧化铝或氧化硅作为栅介质；在研究的早期阶段，氧化镓场效应晶体管多为常开型器件，而为实现器件的关断，也可以采用鳍型场效应晶体管（Fin-FET）结构。

3.4.2.2.2

金属-氧化物-半导体场效应晶体管（氧化镓的） **metal-oxide-semiconductor field effect transistor (of gallium oxide)**

MOSFET

是由金属、氧化物及半导体三种材料制成的场效应晶体管。氧化镓 MOSFET 中一般采用氧化铝、氧化硅作为栅介质；现阶段氧化镓 MOSFET 器件主要为常开型，迁移率 $50\sim 150\text{cm}^2/\text{Vs}$ 范围。

3.4.2.2.3

肖特基势垒二极管/肖特基二极管（氧化镓的） **schottkybarrierdiode/schottkydiode (of gallium oxide)**

SBD

由具有整流作用的金属-半导体结组成的半导体二极管。氧化镓的常用肖特基金属包括 Ni、Au、Pt，势垒高度一般为 0.9~1.1eV，理想因子一般为 1~1.1。

3.5 金刚石半导体

3.5.1 材料

3.5.1.1 单晶

3.5.1.1.1

金刚石单晶 **single crystal diamond**

一种由碳元素组成的矿物，属于元素半导体。其常见晶体结构为面心立方结构，点阵常数为 3.567 Å，碳碳键长度为 1.54 Å，键角为 109°28′，碳原子密度为 $1.77 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ 是原子排量最紧密的物质。室温下禁带宽度为 5.47 电子伏特（eV）。此外，还有六方结构的金刚石，但比较少见。天然金刚石为单晶结构，人工直接获得金刚石单晶的方法只有高温高压（HTHP）技术，但可以通过化学气相沉积（CVD）技术，在已有的金刚石单晶基础上同质外延生长尺寸更大的金刚石单晶。

3.5.1.1.2

高温高压技术 **high temperature and high pressure technique**
HTHP technique

采用两面或六面顶压机产生高温（2000° C 以上）和高压（数千至数万大气压），并在适当催化剂的共同作用下，将石墨、金刚石颗粒（粉末）等原料转变为金刚石单晶。

3.5.1.2 衬底

3.5.1.2.1

（金刚石单晶）籽晶/晶种 **seeds (of single crystal diamond)**

同质外延生长金刚石单晶的衬底，一般采用 HTHP 合成的金刚石单晶片（也可以采用天然金刚石单晶和 CVD 金刚石单晶），其生长区域严格要求籽晶的取向为（100）。目前，HTHP 籽晶的最大尺寸为 8 mm × 8 mm，通过侧向生长技术可以将 CVD 金刚石单晶的尺寸极限提高到 12.5 mm × 12.5 mm。目前，更大尺寸的金刚石单晶生长，主要通过马赛克法（Mosaic method）将多个取向相近的籽晶组合成“拼接衬底”来实现的。

3.5.1.3 外延

3.5.1.3.1

微波等离子化学气衬底·相沉积 **microwave plasma enhanced chemical vapor deposition**
MPCVD

通过微波源产生的交变电场击穿低压气体形成等离子体后，氢气和甲烷受到等离子体的激发，形成具有化学活性很高的基团，这些活性基团在扩散至合适的衬底表面后，将会沉积为金刚石膜。

3.5.1.3.2

热丝化学气相沉积 **hot filament chemical vapour deposition**

HFCVD

氢和碳氢化合物气体按照一定比例混合后导入腔体，流进电加热至高温状态的热丝，在其表面和附近分解成原子态氢和多种碳氢化合物基团（ CH_3 、 C_2H_2 、 C_2H_4 等），这些基团在原子氢的作用下，在适当温度的衬底表面发生复杂的吸附和解吸附反应，在衬底表面形核、生长，形成金刚石膜。

3.5.1.3.3

直流电弧等离子体喷射化学气相沉积 **direct current arc plasma jet chemical vapor deposition**

DC Arc Plasma Jet CVD

在棒状阴极和环绕阴极的圆筒形阳极所组成的等离子体炬之间，施加直流电压，通过放电击穿流经阴阳极之间的反应气体点燃电弧，形成从高温、高速（ $1\sim 10\text{ km/s}$ ）的等离子体射流，喷射到水冷衬底表面沉积为金刚石膜。

3.5.1.3.4

电子辅助化学汽相淀积 **electron assisted chemical vapor deposition**

EACVD

在热丝化学气相沉积（HFCVD）的基础上，在热丝丝和衬底之间施加直流电压，热丝发射的热电子，在电场的作用下激励混合反应气体，在热丝与衬底表面之间形成等离子体，构成了热丝与直流等离子体复合的金刚石沉积方法。

3.5.1.3.5

燃烧火焰沉积 **combustion flame deposition**

采用氧-乙炔火焰的内焰产生的 $2000\sim 3550\text{ K}$ 高温，使反应气体发生化学激发，沉积金刚石膜。

3.5.1.3.6

辉光放电沉积 **glow discharge deposition**

通过直流辉光放电来分解碳氢气，从而激发成等离子体。等离子体与基体表面发生相互作用，形成金刚石膜的技术。

3.5.1.4 缺陷与杂质

3.5.1.4.1

点缺陷（金刚石的） **point defect (of diamond)**

金刚石中点缺陷主要有：1、氮（N）、硼（B）、氢（H）、镍（Ni）和钴（Co）等杂质原子；2、被辐照后出现的空位；3、氮原子置换金刚石晶格中碳原子后所形成的色心等。

3.5.1.4.2

位错（金刚石的） **dislocation (of diamond)**

在 CVD 金刚石膜中，线缺陷通常为<110>全位错，位错密度达 10^{12} cm^{-2} 。

3.5.1.4.3

孪晶（金刚石的） **twinning (of diamond)**

金刚石最常见的晶体缺陷是孪晶，属于面缺陷。金刚石晶的一系列孪晶晶界包括： $\Sigma 3$ 、 $\Sigma 9$ 、 $\Sigma 27$ 和 $\Sigma 81$ ，分别对应的晶格转角为 70.529° 、 38.942° 、 31.586° 和 77.885° 。

3.5.1.4.4

氮空位色心 **nitrogen vacancy center**

NV色心

金刚石晶体中的碳原子被一个氮原子取代，导致临近位出现一个空穴，此点缺陷部位对 490~640 nm 的可见光产生选择性吸收，被称为氮空位色心（NV 色心）。

3.5.1.4.5

p型掺杂（金刚石半导体的） **p-type doping (of diamond)**

在本征金刚石中掺入硼（B）元素或其它杂质元素，使其实现 p 型导电性的半导体。天然含有杂质的金刚石通常具有 p 型导电性。另外，利用氢等离子对天然金刚石单晶表面进行处理后，金刚石表面的电阻会显著变小，电阻率由约 $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 减少至约 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ ，表现出 p 型导电型。

3.5.1.4.6

n型掺杂（金刚石半导体的） **n-type doping (of diamond)**

通过单元素的掺杂和多元素的共掺杂获得 n 型金刚石薄膜，单元素的掺杂使用的施主元素主要有 V 族元素(N, P)和 VI 族元素(O, S)等，多元素共掺杂主要有 B-S、B-P 和 B-O 共掺等。

3.5.1.4.7

元素共掺杂 **element codoping**

金刚石中元素的共掺杂是指将两种或两种以上的杂质元素按照一定的比例同时掺入到金刚石中。目前共掺杂的研究是在金刚石薄膜上进行的，主要有硼(B)-硫(S)、硼(B)-磷(P)和硼(B)-氧(O)共掺等。元素共掺杂主要是为了解决单一施主杂质无法实现 n 型金刚石足够浅的能级的问题。

3.5.2 器件

3.5.2.1 电子器件

3.5.2.1.1

氢终端金刚石场效应管 **H-terminated diamond field effect transistors**

对金刚石表面进行氢等离子体处理，形成氢终端结构，其 C-H 键中的氢原子吸附空气中的带电子等，最终让金刚石表面产生一层二维空穴气，从而在表面下 0~10 nm 处形成 p 型导电沟道，电导率在 10^{-4} 到 $10^{-5} \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ ，空穴面密度可达到 $10 \sim 13 \text{ cm}^{-2}$ ，霍尔迁移率在 $10 \sim 150 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。基于此原理制备的氢终端金刚石场效应管，其导电性能易受温度、湿度、酸碱度等环境因素所影响，在其栅极下方引入具有转移掺杂作用的 MoO_3 ，能实现导通电阻 R_{ON} 降低到同等栅长 MOSFET 器件的 1/3，跨导提高约 3 倍。

3.5.2.1.2

金刚石功率二极管 **diamond based diode**

由 p 型部分单晶金刚石和 n 型部分掺杂氮的超纳米晶金刚石（ultra-nano crystalline diamond, UNCD，晶粒尺寸小于 10 nm）所组成的金刚石异质结二极管，其结构依次为晶面（100）1b 型单晶金刚石衬底、高掺杂硼的（p⁺）金刚石接触层、低掺杂硼（p⁻）金刚石有源层和掺杂氮（n⁺）UNCD 薄膜。这是一种高效的整流二极管，室温下，整流效果（±10 V）提高 8 个数量级，并在真空下 1050℃ 保持良好的热稳定性。

3.5.2.2 探测器件

3.5.2.2.1

金刚石紫外探测器 **diamond detector for ultraviolet radiation**

金刚石的禁带宽度为 5.5 电子伏特（eV），截止波长为 225 nm，使用金刚石制备的紫外探测器无需滤光片或介电层涂膜即可实现具有日盲区特性（日盲区指波长小于 291nm 的中紫外光），多晶金刚石薄膜在外探测器的紫外/可见光的分辨率高到 10^7 数量级。

3.6 应用

3.6.1 LED 器件类

3.6.1.1

白光 LED **white LED**

发光颜色为白光的 LED，一般可采用单色芯片加荧光粉或多色芯片组合合成。白光 LED 已经成为通用照明应用的主要光源。

[改写 GB/T 37031—2018，定义 2.2.4.5]

3.6.1.2

主波长 **dominant wavelength**

λ_d

25℃ 环境温度下一单色刺激的波长，该单色刺激与规定的非彩色刺激按适当比例相加混合，以与所考虑的色刺激相匹配。

对于 LED，参考色刺激应为色坐标 $X_E=0.3333$ ， $Y_E=0.3333$ 的光源 E。

注1：只给出彩色 LED 的主波长值，对于白光 LED，主波长没有意义。

注2：CIE 127:1997 图 7.2 表示了 LED 的颜色轨迹 C 与主波长值 D 的关系。N 为色刺激 E 的轨迹。

注3：偏离峰值发射波长，主波长决定视觉印象。

[改写 GB/T 2900.65—2004，定义 845-03-44]

[GB/T 24826—2009，定义 2.7]

3.6.1.3

（相关）色温 **correlative colour temperature**
CCT

其辐射的色品与给定色刺激的色品相同时的普朗克辐射体的温度。

[GB/T 20146—2006，定义 3.6]

3.6.1.4

色品坐标（色度坐标） **chromaticity coordinates**

用来表征光源颜色或物体颜色的一组参数称为色品坐标。CIE 1931XYZ 测色系规定用如下方法计算色品坐标。

首先测定光源的光谱功率分布或物体的光谱反射率因数 $\rho(\lambda)$ （可称为颜色刺激函数）。

然后计算颜色的 X、Y、Z 三刺激值：

$$\begin{aligned} X &= k \int \lambda \rho(\lambda) \bar{X}(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int \lambda \rho(\lambda) \bar{Y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int \lambda \rho(\lambda) \bar{Z}(\lambda) d\lambda \end{aligned}$$

式中： $\bar{X}(\lambda)$ 、 $\bar{Y}(\lambda)$ 和 $\bar{Z}(\lambda)$ 为 CIE 1931 标准色度观察者光谱三刺激值，k 为调整因数。颜色的色品坐标 x、y、z 则有下列式计算：

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z &= \frac{Z}{X+Y+Z} \end{aligned}$$

[GB/T 15676—1995，定义 6.15]

3.6.1.5

显色指数 **color-rendering index**

光源的显色指数是待测光源下物体的颜色与参照光源下物体颜色相符程度的度量。CIE（国际照明委员会）规定用普朗克辐射体或标准照明体 D 作为参照光源，并将其显色指数定为 100，同时 CIE 还规定了 15 块孟塞尔(Munsell)颜色样品。以这些样品在参照光源(3 000 K 普朗克辐射体)下和另一个 3

000 k 标准荧光灯的颜色变化量为尺度，约定标准荧光灯的显色指数为 50，然后根据在参照光源（其色温接近于待测光源的色温）下和待测光源下颜色样品的色差 ΔE ，按下述公式计算待测光源对某一颜色样品的特殊显色指数：

$$R_i=100-4.6\Delta E_i \quad (i=1\sim 15)$$

光源对 1~8 的 8 个颜色样品的平均色指数，称为一般显色指数，常用 R_a 表示。

CIE 显色指数不包括色位移的方向的度量，即两个具有相同 R_i 的光源，如颜色样品 i 的色位移方向不同，这一样品在此两光源下的颜色在视觉上也不相同。

[GB/T 15676—1995，定义 6.32)

3.6.1.6

色质指数 color quality scale
CQS

待测光源下物体的颜色与参照光源下物体颜色相符程度的一种度量。与显色指数的区别在于使用 15 块饱和色样品，取 15 个样品色差的均方根值得到结果。同时修正了 2000K 一下和 20000K 以上的标准光源的色还原性。相比显色指数，色质指数对色彩还原性的评价更加全面准确，是显色指数的重要补充。

3.6.1.7

生物节律作用因子 circadian action factor
CAF

光源对褪黑素抑制作用强弱与光源照度的比值，反映了相同照度下光源非视觉效应的强弱。计算方法：

$$CAF = \frac{\int_{380}^{780} P(\lambda)C(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} P(\lambda)V(\lambda)d\lambda}$$

其中， $P(\lambda)$ 是光源的光谱功率分布， $C(\lambda)$ 是根据实验拟合出的生物节律作用函数，反映不同波长光对褪黑素抑制作用的强弱； $V(\lambda)$ 是明视觉函数，反映了人眼对不同波长光的视觉敏感性。

3.6.1.8

像素分辨率 pixel resolution

亦称图像分辨率，是指显示屏单位尺寸内像素单元的数量，单位为 PPI。显示屏大小固定时，像素分辨率越高图像越清晰。

3.6.1.9

面板亮度 panel luminance

面板表面发光强弱的物理量，单位为 Cd/m^2 或 nit。

3.6.1.10

植物有效辐射能 effective irradiative energy for plant

也称光合有效辐射能，指能被植物光合作用利用的太阳辐射能。

3.6.1.11

光遗传学 optogenetics

将遗传学技术和光控技术结合，将光感基因（如 ChR2，eBR，NaHR3.0，Arch 或 OptoXR 等）转入到神经系统中特定类型的细胞中进行特殊离子通道或 GPCR 的表达。通常使用微纳米 LED 光源激发特定的细胞。

3.6.1.12

**可见光通讯 visible light communication
VLC**

利用可见光作为信息载体实现信息传输的技术。可见光通信包括自由空间的光通讯和光纤光通讯。利用 LED 的可见光通信可实现照明和通信的复用的功能。

3.6.1.13

可见光室内定位 visible light indoor positioning

通过对 LED 灯编码，并发射各自的位置信号，接收器获得这些 LED 的位置信号，经过处理从而得到接收器的位置信息实现高精度的室内定位。

3.6.1.14

光视效能 luminous efficacy

某一波长的单色光辐射通量可以产生多少相应的单色光通量。

3.6.1.15

**电光转换效率 wall-plug efficiency
WPE**

在规定的输入条件下，光源的输出光功率与输入电功率的比值（百分数）。

[改写 GB/T 37031—2018，定义 2.5.5]

3.6.1.16

蓝光损伤 blue light hazard

蓝光波段的(400~480 nm)电磁辐射引发的视网膜光化学损伤以及热损伤。蓝光损伤一般与光源中的蓝光成分比例相关。蓝光激发荧光粉的白光 LED 技术需要考虑蓝光损伤问题。

3.6.1.17

**紫外固化 ultra-violet curing
UV curing**

用紫外线照射液态“UV 照射可硬化的材料”，从而使它硬化的过程。

3.6.1.18

3dB 带宽 3dB bandwidth

功率谱密度的最高点下降到 1/2 时界定的频率范围。

3.6.1.19

数据传输速率 data transfer rate

每秒钟传输构成数据代码的比特数。

3.6.2 激光器件类

3.6.2.1

阈值电流密度 threshold current density

器件处于临界导通状态时，通过器件的电流密度。如半导体激光器的阈值电流密度指开始激射时的电流密度。

3.6.2.2

阈值电流（激光二极管的）(I_{TH}) threshold current (of LD)

在激光二极管辐射功率 Φ_e 对正向电流 I_F 的二阶导数曲线上，第一个极大值处所对应的 I_F （见图 1）。

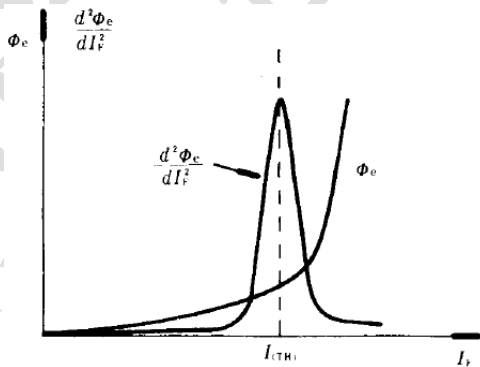


图 1 激光二极管的阈值电流

[改写 GB/T 15651—1995，定义 4.2.4)

3.6.2.3 激光显示 laser display

3.6.2.3.1

色域 color gamut

色域是对一种颜色进行编码的方法，也指一个技术系统能够产生的颜色的总和。激光显示相比传统显示技术具有更光的色域。

3.6.2.3.2

亮度 **luminance**

亮度是指发光体(反光体)表面发光(反光)强弱的物理量。激光显示相比传统显示技术具有更高的亮度。

3.6.2.4

激光照明 **laser illumination**

用蓝色激光二极管激发荧光粉合成白光作为照明的光源。相比白光LED，激光照明在高效率、大功率、方向性方面具有优势。

3.6.2.5

激光通讯 **laser communication**

激光通讯技术为无线通讯的一种，它以光信号作为传输信息的载体，在大气或海洋中直接传输。激光通讯技术由于其单色性好、方向性强、光功率集中、难以窃听、价格低、安装快等特点，而引起人们的高度重视。

3.6.2.6

塑料光纤 **plastic optical fiber**

POF

是由高透明聚合物如聚苯乙烯（PS）、聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）、聚碳酸酯（PC）作为芯层材料，PMMA、氟塑料等作为皮层材料的一类光纤（光导纤维）。不同的材料具有不同的光衰减性能和温度应用范围。塑料光纤不但可用于接入网的最后100~1000米，也可以用于各种汽车、飞机、等运载工具上，是优异的短距离数据传输介质。

3.6.2.7

光纤激光器 **fiber laser**

光纤激光器是指用掺稀土元素玻璃光纤作为增益介质的激光器，光纤激光器可在光纤放大器的基础上开发出来：在泵浦光的作用下光纤内极易形成高功率密度，造成激光工作物质的激光能级“粒子数反转”，当适当加入正反馈回路（构成谐振腔）便可形成激光振荡输出。

3.6.2.8

光互连 **optical interconnection**

光互连是一种光通讯的方式，是用光纤或其他光传输介质来在计算机内的各元件或子系统中交换数据。光纤的带宽比一般导线高很多，从10 Gbit/s到100 Gbit/s。

3.6.3 紫外探测器件类

3.6.3.1

可见光探测器 visible (light) detector

对可见光敏感、能将可见光辐射能转换为与之有一定关系的量值的传感器。

3.6.3.2

双色探测器 double-color detector

将两个在不同波段响应的探测器制备成夹层结构,能同时连续探测两个波段辐射的光电探测器。在超晶格结构中,子带跃迁被用来作为长波长波段的探测,禁带内跃迁被作为短波长波段的探测,而构成双色探测器。

3.6.3.3

响应度 responsivity

探测器对光辐射能量的敏感程度,常表示为单位入射光功率所产生的光电流。

3.6.3.4

**噪声等效功率 noise equivalent power
NEP**

探测器内部噪声的总功率等效为在1Hz的带宽内信噪比为1时所需要的均方根入射光功率。

3.6.3.5

探测率 detectivity

探测率为最小可探测光功率,与波长、调制频率及带宽相关,反映了探测器探测弱光的能力。

3.6.3.6

**光子探测效率 photon detection efficiency
PDE**

指一个入射光子数被雪崩光电二极管吸收并引发雪崩的概率。它与雪崩几率及所加反向偏压有关。

3.6.3.7

截止波长 cutoff wavelength

光电探测器开始对光线不产生响应或响应很小时所对应的长限或短限波长为截止波长。

3.6.3.8

雪崩增益 avalanche gain

雪崩光电二极管雪崩倍增前后的光电流比值。光生载流子在二极管耗尽层强电场内的碰撞电离,产生新的电子空穴对,并不断重复而获得光电流的雪崩倍增。

3.6.3.9

导弹来袭告警 missile approaching warning

MAW

该系统是在自身战机被敌方（可以是战斗机或地面防空系统）锁定且发射了导弹，导弹逼近时被己方战机侦测到，系统会响起导弹发射告警，且报告来袭导弹的方位和高度。

3.6.3.10

导弹制导 guided-missile control (missile guidance)

控制导弹飞行姿态和引导导弹飞向目标的技术。

3.6.3.11

火灾探测 fire-detection

将火灾初期所产生的热、烟或光转变为电信号,并在超过某一规定值时,传递给与之相关的报警检测控制设备。

3.6.4 微波射频器件类

3.6.4.1

功率增益 power gain

增益的一般含义简而言之就是放大倍数，在电子学上，通常为一个系统的讯号输出与讯号输入的比率，如天线增益表示定向天线辐射集中程度的参数,为定向天线和无方向天线在预定方向产生的电场强度平方之比、放大器增益表示放大器功率放大倍数,以输出功率同输入功率比值的常用对数表示等。

3.6.4.2

功率附加效率 power added efficiency PAE

射频输出功率减输入功率的差与耗散的直流功率的比值。

3.6.4.3

阻抗匹配 impedance matching

信号源内阻与所接传输线的特性阻抗大小相等且相位相同，或传输线的特性阻抗与所接负载阻抗的大小相等且相位相同，分别称为传输线的输入端或输出端处于阻抗匹配状态，简称为阻抗匹配。

3.6.5 电力电子器件类

3.6.5.1 肖特基二极管

3.6.5.1.1

（肖特基二极管的）正向电压 forward voltage (of a diode)

电流正向流动时在（肖特基二极管）器件两端产生的电压。氮化物肖特基二极管的典型正向电压在0.8~1 V。碳化硅肖特基二极管典型的正向电压在1.2~1.8 V。

[GB/T 4023—2015，定义3.2.1]

3.6.5.1.2

（肖特基二极管的）正向电流 **forward current (of a diode)**

沿二极管低阻方向流动的电流。

[GB/T 4023—2015，定义2.2.1]

3.6.5.1.3

（肖特基二极管的）正向浪涌电流 **surge forward current (of a diode)**

一种持续时间短并规定波形的正向脉冲电流，这种电流是由于电路异常情况（如故障）引起，导致结温超过或可能超过额定最高结温，而假定其极少发生，并在在器件工作寿命期内具有限定的发生次数。

[GB/T4023—2015，定义3.3.6]

3.6.5.1.4

（肖特基二极管的）击穿电压 **breakdown voltage**
V(BR)

在发生击穿的区域内的电压。

[IEC 60747-2: 2016，定义3.2.7]

3.6.5.1.5

（肖特基二极管的）反向电压 **reverse voltage**
VR

施加到二极管反向的恒定电压。

[IEC 60747-2: 2016，定义3.2.4]

3.6.5.1.6

（肖特基二极管的）正向（直流）电流 **forward (d. c.) current**
IF

芯片温度达到最高允许温度时，允许的最大正向直流电流。

3.6.5.1.7

（肖特基二极管的）正向峰值电流 **peak forward current**
IFM

在规定的脉冲条件下，正向电流允许的最大值。

3.6.5.1.8

（肖特基二极管的）反向电流 **reverse current**
IR

施加规定的反向电压时流过二极管的电流。

[IEC 60747-2: 2016, 定义3.3.7]

3.6.5.1.9

（肖特基二极管的）正向（不重复）浪涌电流 **(non-repetitive) surge forward current**

IFSM

一种持续时间短并具有规定波形的正向电流脉冲，施加这种波形会导致结温超过最大额定值。单这种电流是由于电路条件异常（如故障）引起而偶然发生的，在器件工作寿命期间出现的次数有限。

[IEC 60747-2: 2016, 定义3.3.6]

3.6.5.1.10

（肖特基二极管的）反向恢复峰值电流 **peak reverse recovery current**

IRRM

二极管从导通状态到反向截止状态电流的峰值。

3.6.5.1.11

（肖特基二极管的）反向恢复时间 **reverse recovery time**

TRR

当二极管从正向转换到反向时，电流通过零值的瞬间与反向电流经过峰值 I_{rrm} 后再次通过零值的瞬间之间的时间间隔。

3.6.5.1.12

（肖特基二极管的）反向恢复电荷 **recovered charge**

QR

在规定积分时间内，二极管从规定的正向电流条件转换到规定的反向条件后，二极管中恢复的总电荷。

[IEC 60747-2: 2016, 定义3.5.5]

3.6.5.1.13

（肖特基二极管的）反向恢复能量 **reverse recovery energy**

ERR

在反向恢复电荷的积分时间内，通过器件的电压和电流积分得到的转换能量。

[IEC 60747-2: 2016, 定义3.5.2]

3.6.5.1.14

（肖特基二极管的）反向恢复软度系数 **reverse recovery softness factor**

SRR

反向恢复电流下降过零时的斜率与恢复电流上升时斜率的最大值之间比值的绝对值。

3.6.5.1.15

（肖特基二极管的）小信号电容电荷 **diode small signal capacitive charge**

QC

二极管正-负极之间的电压从零升至规定值所需要的电荷。

3.6.5.2 MOSFET

3.6.5.2.1

（MOSFET 的）漏极-源极通态电压 **drain-source on-state voltage (of a MOSFET)**

当漏极电流及栅极电压均为规定的高值时，漏-源电压的最大值。

[IEC 60747-8:2010，定义5.3.3.5.1]

3.6.5.2.2

（MOSFET 的）阈值电压 **threshold voltage (of a MOSFET)**

栅源电压和漏源电压均为规定的高值，相当于漏极截止电流10倍以上的漏极电流所产生的漏-源电压。

[IEC 60747-8:2010，定义5.3.3.4]

（MOSFET 的）阈值电压 **threshold voltage**

当漏极电流值达到规定低值时的栅-源电压。GaN FET（P型栅结构）的阈值电压通常在1.5V左右。SiC MOSFET的阈值电压为 3.5 V左右。

[GB/T 4586-1994，3.3]

3.6.5.2.3

（MOSFET 的）漏极截止电流 **drain leakage current (of a MOSFET)**

栅源电压为低值，漏源电压为规定的高值时的最大值。

[IEC 60747-8:2010，定义5.3.3.2]

3.6.5.2.4

（MOSFET 的）栅极漏电流 **gate leakage current (of a MOSFET)**

栅源电压或栅漏电压为规定值时的最大值。

[IEC 60747-8:2010，定义5.3.3.1]

3.6.5.2.5

（MOSFET 的）输入电容 **short-circuit input capacitance**

在规定的偏置和频率条件下，漏极和源极之间交流短路时，栅极和源极之间的电容。

[GB/T 4586-1994，3.6]

3.6.5.2.6

（MOSFET 的）栅源电阻 **gate-source resistance**

在规定的栅-源和漏-源电压下，栅极和源极之间的直流电阻。

[GB/T 4586-1994, 3.7]

3.6.5.3

开关频率 switching frequency

电力电子元件在每秒内完全导通、断开的次数，等于开关周期的倒数。基于宽禁带半导体GaN和SiC材料的功率器件能够实现比硅功率电子器件更高的开关频率。

3.6.5.4

阻断电压 pinch-off voltage

场效应管从导通到刚好阻断时，源栅之间的电压。

3.6.5.5

额定电流 rated current

$I_{\text{额定}}$

单位：A

用于规定工作状态的电流值。该值和工作状态在相关标准中或由生产商或责任销售商规定。

[GB/T 24826—2009, 定义2.28]

额定电流（设备的） rated current(for equipments)

由制造商对一电气设备在规定的工作条件下所规定的电流。

[GB/T 2900.1—2008, 定义3.5.87]

额定电流 rated current

额定电流是指电子器件在额定电压下，按照额定功率运行时的电流。

3.6.5.6

正向特性近似直线 straight line approximation of the forward characteristic

正向特性曲线上两规定点相连的直线，此直线用以近似表示正向电压-电流特性。

[GB/T 2900.32—1994, 定义3.2.28]

3.6.5.7

正向斜率电阻 forward slope resistance

正向斜率电阻就是由正向特性近似直线的斜率确定的电阻值。

3.6.5.8

导通电阻 conducting resistance

半导体器件（如PN结、场效应晶体管等）在正向导通时表现出的电阻。

导通电阻 on-state resistance

半导体开关器件处于工作导通状态时的电阻值。

3.6.5.9

开关损耗 switching loss

开关损耗包括开通损耗和关断损耗。开通损耗指功率管从截止到导通时，所产生的功率损耗。关断损耗指功率管从导通到截止时，所产生的功率损耗。非理想的晶体管在开通时，电压不是立即下降到零，而是有一个下降时间，同时电流也不是立即上升到负载电流，也有一个上升时间。在这段时间内，电流和电压有一个交叠区，会产生损耗，即为开通损耗。类似可以得出关断损耗产生的原因。

3.6.5.10

正向恢复时间 forward recovery time

从零或规定的反向电压切换至规定的正向偏置状态的瞬间开始，到电流或电压恢复到规定值所需的持续时间。

[GB/T 2900.66—2004，定义521-05-25]

从零或从规定的反向电压向规定的正向偏置条件瞬时转换以后，电流或电压恢复到规定值所需的时间。

[GB/T 2900.32—19944，定义3.2.32]

正向恢复时间指的是二极管从截止转为正向导通所需的时间。

3.6.5.11

反向恢复时间 reverse recovery time

从规定的正向(通态)电流瞬时地转换到规定的反向偏置条件后，电流或电压恢复到规定值所需要的时间。

[GB/T 2900.66—2004，定义521-05-26]

反向恢复时间

开关从导通状态向截止状态转变时所需时间。

反向恢复时间（整流管的） reverse recovery time (of a semiconductor rectifier diode)

当从正向向反向转换时，从电流过零瞬间起，到反向电流从峰值 I_{RM} 减小到某一规定值（如图2所示）或到反向电流外推的零点（如图3所示）止的时间间隔。

注：所谓外推是由两规定点A、B连线延长与时间轴的交点（见图3）。

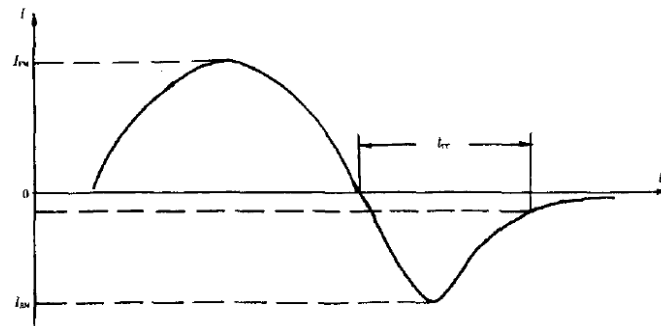


图2 测试反向恢复时间的电流波形

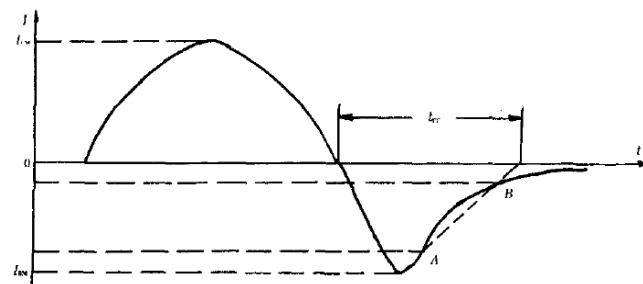


图3 测试反向恢复时间的电流波形

[GB/T 2900.32—1994，定义 3.2.31]

反向恢复时间（反向阻断晶闸管的） **reverse recovery time (of a reverse blocking thyristor)**

当从通态向反向阻断态转换时，从电流过零瞬间起，至反向电流从峰值 I_{RM} 减小到某一规定值止（见图 4），或至反向电流外推的零点为止（见图 5）的时间间隔。

注：所谓外推是由两规定点A、B连线延长与时间轴的交点（见图2）。

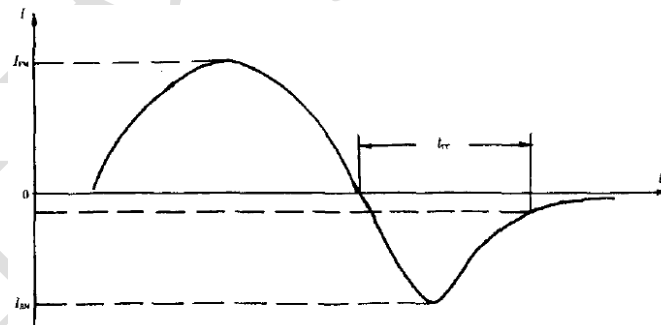


图4 测试反向恢复时间的电流波形

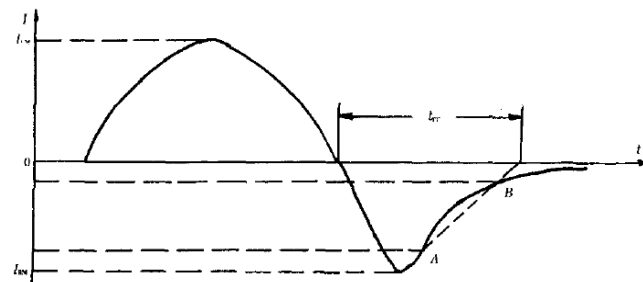


图5 测试反向恢复时间的电流波形

[GB/T 2900.32—1994，定义 5.2.52]

开关从导通状态向截止状态转变时所需时间。

3.6.5.12

恢复电荷（二极管或闸流晶体管的） **recovered charge(of a diode or thyristor)**

从规定的正向(通态)电流条件转换到规定的反向条件以后，二极管或闸流晶体管恢复的总电荷。

注：这种电荷包括载流子储存和耗尽层电容引起的部分。

[GB/T 2900.66—2004，定义 521-05-18]

恢复电荷（晶闸管的） **recovered charge(of a thyristor)**

从规定的通态电流条件向规定的反向条件切换后，在规定的积分时间内，晶闸管恢复的总电荷。

注：恢复电荷包括贮存的载流子和耗尽层电容两部分电荷。

[GB/T 2900.32—1994，定义 5.2.54]

恢复电荷（整流管的） **recovered charge(of a semiconductor rectifier diode)**

整流管从规定的正向电流条件向规定的反向条件转换期间，所存在的全部电荷。

注：恢复电荷包括贮存的载流子和耗尽层电容两部分电荷。

[GB/T 2900.32—1994，定义 3.2.18]

3.6.5.13

反向恢复电流上升时间

开关元件从正向到反偏时，反向电流上升到峰值所需时间。

上升时间 **rise time**

当半导体器件从断态切换到通态时，输出脉冲值分别达到规定的下限和上限的时间间隔。

注：下限和上限通常规定为输出脉冲幅值的10%和90%。

[GB/T 2900.66—2004，定义 521-05-22]

3.6.5.14

反向恢复电流下降时间

开关元件从正向到反偏时，反向电流从峰值到 0 所需时间。

3.6.5.15

（反向恢复）软[度]因子

二极管的反向恢复软度因子定义 S 为二极管反向恢复过程中两段时间的比值, t_b/t_a 是反向电流从零达到最大值所需要的时间; t_b 为从反向电流最大值到经过 $0.9I_{RM}$ 与 $0.25I_{RM}$ 两点的直线与电流为零的直线交点之间所对应的时间。二极管的反向恢复软度因子反应了二极管反向恢复特性的软硬程度。

3.6.6 传感器件类

3.6.6.1

GaN 基肖特基氢探测器 hydrogen sensors with GaN-based schottky diodes

利用 GaN 基肖特基结构对氢气或碳氢化合物的电流响应特性变化, 制作的氢探测器。

3.6.6.2

纳米线氢探测器 nanostructured hydrogen sensors

利用氮化物或氧化物 (GaN, InN, ZnO, SnO₂) 的纳米线结构对氢气的敏感反应, 制作的氢探测器。

3.6.6.3

InN 氢气传感器 hydrogen gas sensors with InN

利用较窄的直接禁带宽度和高效的电子输运 InN 材料, 在其上蒸镀 Pd, Pt 材料形成的氢气敏感的传感器。Pd 覆盖的 InN 纳米带可探测十级 ppm 的氢气浓度。

3.6.6.4

热敏电阻器 thermistor

这一名称源自对热敏感的电阻器(thermally sensitive resistor), 此类器件利用不同材料的电阻与温度的变化关系工作。使用金属的温度计称为电阻测温计, 热敏电阻器通常指的是采用半导体材料, 例如单晶半导体热敏电阻器, 热敏电阻器可以是圆盘形、垫圈形、棒形及探针形。温度检测的范围主要取决于材料的能隙(较大的 E_g 对应较高温度)。硅热敏电阻器限于 250 K 以下的应用, 氧化物半导体热敏电阻器则适用于 200~700 K 的温度范围。对于更高的温度, 热敏电阻器用 Al₂O₃、BeO、MgO、ZrO₂、Y₂O₃ 和 Dy₂O₃ 制作。

3.6.6.5

霍尔器件也称为霍尔发生器 hall device

其原理是基于霍尔效应。由于霍尔效应在金属中非常微弱, 所以直到优良的半导体材料的出现才付诸实用。它只是有四个接触的一块半导体。霍尔器件有兰种形式: (1)分立条形,(2)淀积在支撑衬底上的薄膜,(3)反型衬底上的外延膜化合物半导体之所以有吸引力是因为其迁移率比 Si 高, 而 Si 则由于其工艺更成熟所以在集成传感器中更常用。其主要应用可分成两类:磁场的直接感测以及位置和运动的感测。

3.6.6.6

磁敏电阻器 magnetoresistor

是基于存在磁场时电阻增加的磁阻效应。磁阻效应由两种独立的机理产生，(1)物理磁阻效应，(2)几何磁阻效应。磁敏二极管是在本征层中含有高复合率表面的一种 p-i-n 二极管。当 p-i-n 二极管处于正偏时，本征层内的电子和空穴具有很高的浓度，电流受复合控制。在磁场作用下，高复合速率的电子和空穴同时向表面偏转，复合电流增加。

3. 6. 6. 7

磁敏晶体管 magnetic-field-sensitive transistor

也称为磁变管，通常指的是具有多个集电极的双极型晶体管，而集电极之间的电流差取决于磁场。这种双极型晶体管可以是横向结构，也可以是纵向结构。每一种结构也可以在偏转模式或注入调制模式下工作。

3. 6. 6. 8

**磁场敏感型场效应晶体管 magnetic-field-sensitive field-effect transistor
MAGFET**

通常结构是 MOSFET 结构。它可以工作在两种模式下。类似于样品由一层感生反型层替代的霍尔器件，输出是霍尔接头之间的霍尔电压。在横向磁场作用下，MOSFET 沟道中的载流子向一侧偏转，两个漏电流之差可监测。

3. 6. 6. 9

应变计 strain gage

或称压力计，通过监测对象的电阻变化来测量其形变。当应变计被拉长时，两种效应(由较长的长度和较小的截面产生的几何效应以及在应力作用下由电阻率变化引起的压阻效应)可改变其电阻。后一种效应只发生在半导体中，且比几何效应强烈得多。半导体应变计可以是分立的条形键合结构、扩散或注入的结构或淀积的薄膜。明半导体的灵敏度比金属的高两个量级。应用领域包括：直接应变测量，加速度计，压力传感器，称重传感器，力矩传感器等。

3. 6. 6. 10

**叉指换能器 interdigital transducer
IDT**

是一种表面声波(SAW)传感器。它可把电信号转换成机械 SAW，反之亦然，其工作基于压电效应。叉指换能器主要由压电衬底上的叉指形金属条构成。压电薄膜的厚度约为 SAW 的波长，ZnO 是最常用的材料，采用溅射方法淀积。具有强烈压电性质的氮化物半导体也是该器件的重要制备材料。

3. 6. 6. 11

**离子敏感场效应晶体管 ion-sensitive field-effect transistor
ISFET**

是最通用的化学敏感场效应晶体管(CHEMFET)之一，由于 ISFET 的功能是离子探测，所以含有离子的电解质必须与器件接触。其中栅介质是结构的关键部分，常常使用多层栅介质。除了 SiO_2 之外，还有 Si_3N_4 、 Al_2O_3 、 TiO_2 和 Ta_2O_5 。与其他电化学离子传感器相比 ISFET 具有尺寸小、响应快、输出阻抗低以及源于集成电路工艺的低成本等优点。目前主要应用在生物医学领域，例如血液和尿液分析，可监控的成分如 pH、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、葡萄糖、尿素和胆固醇。

3.6.6.12

半导体氧化物传感器 semiconductor oxide sensor

气体传感器可以采用金属氧化物半导体如 SnO_2 、 ZnO 、 Fe_2O_3 及 TiO_2 来制作，其中 SnO_2 最常用。这些电阻性气体传感器一般会添加一些贵金属如 Pd 或 Pt 以改善其灵敏度。当传感器置于气体如 H_2 、 O_2 或 CO 中，电阻会发生变化。应用于监控气体的泄漏。

3.6.6.13

PH 值测试 test of PH value

溶液的酸碱性（氢离子浓度指数）强弱程度测试。

3.6.7 其它器件类

3.6.7.1

数据存储 data storage

利用稀磁半导体材料自旋特性进行数据的保存。

3.6.7.2

量子计算 quantum computing

同时利用电荷和自旋的状态进行低能耗、高速率计算。

3.6.7.3

异质结热电子晶体管 heterojunction field-effect transistor HHET

具有突变异质结构或缓变组分结构形成发射极-基极结，并通过热电子发射注入发射极。异质结热电子晶体管尚处于研究阶段，工艺复杂。这种器件可用于基础研究，如热电子能谱。

3.6.7.4

感应基区晶体管 inductive base transistor

器件结构是基区由异质结形成的量子阱构成。发射极-基极结是缓变能隙层形成的三角形势垒，而集电极-基极结是突变异质结形成的方形势垒。感应基区晶体管的主要特点是其基区由静电感应形成。它与其他热电子晶体管相比有一些优点。

3.6.7.5

共振隧穿双极晶体管 resonant-tunneling bipolar transistor

RTBT

RBT

在双极型晶体管中引入双势垒量子阱便形成了 RTBT，不同类型结构取决于双势垒量子阱的位置。RTBT 是一种三端器件，具有可调负微分电阻及负微分跨导，而且更重要的是，它在输入和输出电路之间提供隔离。具有多个电流峰值的特性是作为有效功能器件的重要因素。应用实例有模/数转换器、倍频器、奇偶发生器、多值逻辑电路及多值存储器。

3.6.7.6

共振隧穿热电子晶体管 resonant-tunneling hot-electron transistor

RHET

是第一种利用共振隧穿现象的三端器件。它基于共振隧穿二极管的基础研究。RHET 早期结构采用 GaAs/AlGaAs 结构制作，现在已经在氮化物半导体异质结上进行研究，与共振隧穿二极管相比，RHET 的第三端使负微分电阻和负跨导可调。它可隔离输入和输出电路，这是 RHET 是否能有效用作功能器件(能执行很复杂功能的单个器件)的特别重要的因素。共振隧穿的另一突出特点是存在多个负阻区(多个电流峰值)，这一特点有利于逻辑器件。应用的例子有模/数转换器、倍频器。

3.6.7.7

量子阱基区共振隧穿晶体管 quantum-well-base resonant-tunneling transistor

QWBRTT

这种新型器件基本上是一种有第三端与量子阱接触的共振隧穿二极管。其中量子阱作为基区以控制其电势。量子阱基区可掺入与发射极和集电极相同类型或相反类型的掺杂剂。前者通常称为单极器件，而后者则称为双极器件。与共振隧穿二极管不同，QWBRTT 需要由有三种不同能隙的多层材料制作的异质结构。由于 QWBRTT 中从发射极到集电极的载流子传导通过隧穿来实现，所以它是一种潜在的超高速器件。其负阻特性能够应用于制作逻辑和存储器电路。

3.6.7.8

超辐射发光二极管 super luminescent diode

是用于较高光功率的边发光 LED 的一种特殊类型。它采用较大电流进行偏置，直到产生受激发射和光增益。通过取消用于反射和光反馈的法布里·珀罗谐振腔，人为地抑制激光振荡。因此，光增益只来自单一光路。

3.6.7.9

半导体激光器 semiconductor laser

也称为注入式激光帽、结型激光器或激光二极管。激光器本质上是一种具有特殊设计的纵向 p-n 结，使光可从垂直面反射。然而，n 型和 p 型两个区域都必须简并掺杂，以获得粒子数反转，大部分激光器材料是 III-V 族化合物，宽禁带半导体应用于短波长激光器。

3. 6. 7. 10

超晶格激光器 superlattice laser

当多量子阱的间隔减小到与阱厚度同量级时，便形成超晶格激光器。有源超晶格区的导带和价带中开始出现微能带，而受激发射正是由微能带之间的跃迁形成的。宽禁带半导体的超晶格微带跃迁填补了窄带半导体超晶格微带跃迁的空白。

3. 6. 7. 11

分布反馈激光器 distributed feedback laser

DFB laser

产生单模激光振荡的另一种方法是使用分布反馈激光器，该结构在邻近有源层处存在光栅。这些沟纹光栅通过布拉格散射决定其相干波长。另一个优点是激光振荡波长与温度的依赖关系不大。

3. 6. 7. 12

垂直腔面发射激光器 vertical-cavity surface-emitting laser

VCSEL

顾名思义，在垂直腔面发射激光器中，光输出垂直于半导体表面和异质界面，这时光学谐振腔由平行于异质界面的平面确定。VCSEL 是一种谐振腔由多量子阱结构纵向确定的量子阱激光器。VCSEL 的优点是可实现二维激光器阵列，光输出容易与其他介质如光纤耦合，而且与 IC 工艺兼容，所以能够将它们与其他电路集成在同一芯片上。

3. 6. 7. 13

量子级联激光器 quantum cascade laser

基于同一能带内的量子阱产生的量子化子能级之间的电子跃迁产生光子。由于子能级之间的跃迁比能隙之间的跃迁小得多，所以宽禁带半导体量子级联激光器能够获得波长长达 $20\ \mu\text{m}$ 的激光振荡，而不会面临极窄能隙材料的各种困难。此外，波长能用量子阱厚度调谐而与能隙无关。

3. 6. 7. 14

光电导半导体元件 photoconductive semiconductor component

又称为光敏电阻器、光电导电池，或简称为光电池。

它是开发的第一种量子光电探测器，在此之前的很长一段时期内都只有热光电探测器。光电导元件是一种简单的器件，应用领域广阔，从光电探测器到光电开关。光电导性是由于当光子在半导体中被吸收时，产生可移动的载流子所造成的。光电导元件的另一潜在应用是在电路中提供可变电阻。

3. 6. 7. 15

自由载流子光电导元件 free carrier photoconductive semiconductor component

也称为热电子光电导元件或热电子辐射热测量计。在这种器件中，自由载流子被激发到能带内的高能态，而迁移率随着光强增加。光引起的电流增加源于迁移率的改变，但是载流子数保持不变。

3. 6. 7. 16

**雪崩光电二极管 avalanche photodiode
APD**

与 p-i-n 或 p-n 结光电二极管相似。雪崩光电二极管的增益机理是雪崩倍增，雪崩倍增是碰撞电离的结果，通常会重复多次，载流子被认为产生倍增。雪崩光电二极管具有非常高的增益，特别适用于探测微弱光信号。由于它还具有适当的速度，所以常常与激光源配合使用，实例有光纤通信系统。雪崩光电二极管的缺点是噪声大，要求大的偏置(超过 50V 到数百伏)，并需要非常稳定的电压源和环境温度，因为雪崩过程对这些因素非常敏感。超晶格雪崩光电二极管的优点是，通过调整电子和空穴截然不同的电离系数，可以降低噪声水平。

3. 6. 7. 17

负电子亲和势光电阴极 negative electron affinity(NEA) photocathode

与传统的光电阴极不同。因为 NEA 光电阴极在结构上是只有一端的半导体薄层，所以很难称其为器件。为了得到完整的电路，在真空中将另一端(阳极)置于 NEA 光电阴极附近，从而得到光电阴极真空管，也称为光电发射真空管或真空光电二极管。宽禁带半导体中，AlN 本身就具有负的电子亲和势，是新一代 NEA 光电阴极的理想材料。应用是大面积成像管，既可作图像增强管，也可作图像转换管。

参 考 文 献

- 《现代材料科学与工程辞典》李恒德主编，济南，山东科学技术出版社，2001，第134页
- 《现代材料科学与工程辞典》李恒德主编，济南，山东科学技术出版社，2001，第402-403页
- 《金属材料简明辞典》邓安华编，北京，冶金工业出版社，1992，第30页
- 《金属材料简明辞典》邓安华编，北京，冶金工业出版社，1992，第196页
- 《晶体学基础》秦善编，北京，北京大学出版社，2004，第153页
- 《固体物理学大辞典》冯端主编，北京，高等教育出版社，1995，第301-302页
- 《固体物理学大辞典》冯端主编，北京，高等教育出版社，1995，第566页
- “非对称蓝色发光二极管的光谱拟合模型研究[J]”，《真空科学与技术学报》，朱丹红、邹念育、张竞辉等，2014, 34(2)
- “白光LED用球形 $\text{Y}_{2.96}\text{Al}_5\text{O}_{12} : 0.04\text{Ce}^{3+}$ 荧光粉的制备及光致发光[J]”，《光谱学与光谱分析》，李兆，赵西成，江元汝. 2014(11):2918-2922
- “51 V GaN基高压LED的热分析[J]”，《发光学报》，俞鑫、郭伟玲、樊星等，2014, 35(2):213-217.]
- “高功率980nm垂直腔面发射激光阵列[J]”。金珍花，中科院长春光机所知识产出，2004
- “交变力作用下的可见光探测器结构设计[J]”，《计算机仿真》，杨维、高云国、于萍，2015, 32(3):253-257.
- “双色红外探测器[J]”，《红外技术》，苏培超、张星灿，1989(4):29-34
- Photoconduction studies on GaN nanowire transistors under UV and polarized UV illumination
- Hee Ho Lee, MyunghanBae, Sung-Hyun Jo. AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistor-Based Biosensor for the Detection of C-Reactive Protein
- R A Lewis. A review of terahertz sources
- Xiaoxia, YinBrian W.-H.Ng, Derek Abbott. Terahertz Sources and Detectors
- Hiroaki Yasuda, IwaoHosako, Kazuhiko Hirakawa. Designs of GaN-based terahertz quantum cascade lasers for higher temperature operations
- US20110292671A1 - Vehicular lamp
- M Nakagawa. Visible light communications. Conference on Lasers and Electro-Optics
- GL Harvey. A survey of ultraviolet communication systems
- J Werb, C Lanzl. Designing a positioning system for finding things and people indoors
- DH Sliney, ML Wolborsht. Safety standards and measurement techniques for high intensity light sources
- XinHao, Qi-hua Zhu, Ying Zhang. Terawatt femtosecond laser storage cavity with cholesteric liquid crystals for an x-ray source based on Compton scattering

征求意见稿