

GaN 紫外光探测器*

张德恒 刘云燕

(山东大学物理系 济南 250100)

摘要 评述了近年来在 GaN 紫外光探测器方面的研究进展,介绍了 GaN 光电导探测器、p-n 结二极管探测器、肖特基势垒探测器以及 MSM 结构探测器的制备方法、光电参数及研究现状。

关键词 GaN, 紫外光探测器

GaN UV PHOTODETECTORS

ZHANG De Heng LIU Yun Yan

(Department of Physics, Shandong University, Jinan 250100)

Abstract The new generation of GaN ultraviolet photodetectors is introduced. The preparation and electro-optic parameters of various photodetectors, including photoconductive, photovoltaic, Schottky barrier and metal-semiconductor-metal structure photodetectors are reviewed.

Key words GaN, UV photodetectors

GaN 和 III 族氮化物作为第三代半导体材料的典型代表是近年来光电子材料领域研究的重要课题。用 GaN 制造的蓝光发光二极管(LED)可作为新一代全彩色平面显示的主要器件和各种信号源的重要组成部分;蓝光激光器用于新一代光学数据存储系统,可大大提高存储密度,在新一代医学工程领域也有广泛应用。GaN 在制作蓝、紫和紫外光大功率短波长耐高温器件方面也是理想的材料。除此之外,用 GaN 材料制作紫外光探测器亦引起很多研究者的注意。目前,GaN 紫外光探测器被认为是和蓝光发光二极管、蓝光激光器同样重要的 GaN 器件。美国在 1997 年规定的宽禁带半导体的发展目标中,把生产寿命在 1000h 的紫外光探测器和寿命为 1000h 的蓝光发光二极管、蓝光紫光激光器并列为 GaN 材料研究的目标。

不少半导体材料可用来制作紫外光探测器,这些材料包括 Ge, Si, GaAs, GaP 等。目前由于 Si 材料成熟的技术, Si 仍然是制作光探测器最主要的材料。但紫外(UV)探测器大都工作在极其恶劣的环境下,像火焰燃烧监视器、卫星羽烟探测器。在工业上像航空、汽车、石油等工业都要求能够耐受高温和恶劣环境的光探测器。在其他一些应用领域,像空气质量监视、气体敏感元件及紫外光剂量测量,要利用宽禁带探测器来完成。这些都是 Si 探测器所不能胜

任的。在半导体光电子器件研究上,一个明显的进步是 SiC 的发展。它的大的禁带宽度也使其成为制造紫外光探测器的优秀材料。另一个更大的技术进步是 III-V 族氮化物制备成功,特别是 GaN 的制备成功给高温大功率器件展示了更广阔的前景。与 SiC 相比较, GaN 有很多优点。它的热导、热稳定性、化学惰性、击穿电场和带隙都可与 SiC 相比,但其光电性质要好于 SiC。GaN 是直接禁带半导体,适合制造光电子器件。另外,它具有宽的带隙,在可见光和红外范围没有光响应(长波截止波长为 365nm)。这对在红外或可见光的背景下探测紫外光具有特殊的意义。另外,与 SiC 相比, GaN 具有高的辐射电阻,易制成欧姆接触和异质结结构。这对制造复杂结构的器件非常重要。

根据基本工作方式的不同,可以将半导体光探测器分为光电导探测器(无结器件)和光生伏特探测器(结型器件)。其中,光生伏特探测器又可分为 p-n 结型、pin 结型和肖特基势垒型等。下面对近几年来这几种类型 GaN 光电探测器研究情况和取得的进展作一评述。

* 山东省自然科学基金资助项目

1999-05-31 收到初稿, 1999-07-02 修回

1 光电导探测器

与其他光探测器相比,光电导探测器的一个主要优点是内部的光电子增益较高,在同样的紫外光照射下,它比光生伏特探测器有大得多的响应电流。目前,制作良好的紫外光电导器件还存在困难,主要是由于:(1)光响应速度较慢,即存在光电导持续(photoconductivity persistent)时间;(2)光响应与入射光之间存在非线性变化关系。近几年在解决这两点困难上进行了大量的工作,已取得很大的进展。

第一个高质量的 GaN 光电探测器是由 Khan 等人^[1]在 1992 年用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)的方法在蓝宝石衬底上制造出来的。该探测器光响应的最大值在波长 365nm 处,在此波长之下直到 200nm 波长,光响应接近于常数。在 5V 的直流偏压下,光响应的峰值可达 2000 A/W。他们的光探测器在波长 365nm 处增益可达 6×10^3 ,带宽超过 2kHz。当入射光的功率在 5 个数量级范围内变化时,光电流随光强呈线性变化。

与上述探测器相比, Binet 等人^[2]用低压 MOCVD 方法制备的 GaN 有更高的光响应灵敏度。在电场强度为 3 kV/cm 的条件下,其光响应可达 4000 A/W,而且在带边以上光响应曲线相当平直。在带边以下光响应呈现一突然指数衰减。当入射光波长为 500nm 时,光响应变得仅为 4×10^{-3} A/W。这说明他们的光探测器具有很好的灵敏度和光波长选择性。在一 He - Cd 激光器的照射下(波长 325nm),当所加电压为 4V 时,光响应与入射光功率密度关系曲线出现两个不同的区域:在低入射光功率密度区域,光电流随功率密度线性地增加,呈现出一常数的光响应,其值为 4500 A/W(他们认为常数光响应来源于电子和空穴的非本征复合);在高入射功率密度区,光响应随功率密度的增加而减少,呈 $P^{-1/2}$ 的关系。在这一区域电子空穴的本征复合占主导地位。

与在绝缘衬底上沉积的 GaN 薄膜相比, Stevens 等人^[3]在 Si 衬底上沉积的 Mg 掺杂的 p 型 GaN 薄膜的光响应较低。在 14V 偏压下,所达到的最大光响应为 30 A/W。当外加偏压小于 8V 时,随外加偏压的增加,光响应近于呈线性增长,随后其增长变慢,直到饱和。当光强在 10 W/m^2 以下时,光电流随光强的增加近似呈线性增长。但当入射光强大于 10 W/m^2 时,光电流偏离到线性以下。当外加一脉冲

电压时,光电导呈抛物线型衰减,衰减时间常数 0.67ms。这一现象被认为是空穴在被补偿的 Mg 的深施主格点上或与 Mg 有关的复合中心上所俘获所致。

GaN 光电导型紫外探测器的最大缺点是光电导的持续性(persistent photoconductivity, PPC),此效应增加了光响应时间,使紫外光探测器的性能变坏。其弛豫时间决定于样品的制备方法、制备条件及所掺杂杂质的类型与浓度。对 Binet 等人^[3]制备的 n 型的没有特意掺杂的 GaN 薄膜,光响应时间在毫秒的数量级,其大小决定于测试温度和所使用的紫外光的光强。随着温度的降低和光强的增加,响应时间变短。他们认为,在 GaN 的带隙中存在着深能级,这些深能级作为具有受主特性的复合中心。在强光照射下,单分子复合占主导地位,呈现出一较长的光响应时间。相反,在弱光照射下,起主要作用的主要是双分子复合,光响应时间变短。观测到的持续光电导和大的光电导增益,归因于小的电子俘获截面和非常快的空穴俘获率。

Qiu 等人研究了 n 型和 p 型 GaN 光电导 PPC 效应。他们的未掺杂的 n 型样品是用低压 MOCVD 方法沉积在蓝宝石衬底上制成的。其光电导探测器的衰减时间常数在微秒的量级。他们研究了光电导的衰减过程,发现刚关闭激发光源时,光电导呈指数衰减,在随后的时间间隙内衰减呈准二次曲线的形式。衰减的速率取决于电子浓度,对温度也有一定依赖性。他们用空穴在带隙态中的被俘获和随后的复合来解释观测到的结果。对于他们掺杂 Mg 的 p 型 GaN 样品,光电导的持续性非常明显。上述光探测器虽然有明显的光电导持续性,但持续时间很短,在低频下使用不存在问题。Johnson 用低压 MOCVD 方法制作的 Mg 掺杂的 p 型 GaN 样品具有强烈的 PPC 效应,光电流上升和衰减时间非常长。衰减时间常数可达 10^5 s 。这样的样品不能作为光探测器使用。

2 光生伏特探测器

光生伏特探测器主要包括 p - n 结光生伏特探测器和肖特基势垒光生伏特探测器。

2.1 p - n 结型光生伏特探测器

与光电导探测器相比, p - n 结型光探测器的优点是:低的工作偏压,高的输入阻抗和工作频率,而且其制作技术也与半导体平面工艺相容。与肖特基

势垒光探测器相比, p-n 结型光生伏特探测器的优点是:在给定的内建电压情况下, p-n 结中饱和电流要比肖特基势垒二极管中的饱和电流小几个数量级.另外,对于同一半导体材料, p-n 结中的内建电压要比肖特基势垒中的大.但是, p-n 结型光电探测器的缺点是存在少数载流子的存储效应,限制了此种探测器的使用频率.

p-n 结 GaN 光探测器最早也是由 Khan 等人用 MOCVD 法制造出来的.其光响应是 0.09 A/W , 漏电流约为 10 nA , 响应时间为 0.3 ms . 随后, Zhang^[4] 等人也报道了他们对 p-n 结光伏特探测器的研究结果.他们的 p-n 结也是用 MOCVD 法生长的.其结构为:首先在蓝宝石衬底上生长一 AlN 缓冲层,然后生长一层 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 的 n 型 GaN, 最后生长半绝缘的 p 型 GaN: Mg 层. p-n 结中 p 区空穴浓度约为 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, n 区电子浓度约为 10^{18} cm^{-3} . 他们估计空穴在 n 型 GaN 中的扩散长度是 $0.1 \mu\text{m}$, 零偏压下结电阻高于 $330 \text{ k}\Omega$. 其光谱响应曲线存在两个峰,较窄的主响应峰是正的,其位置处在 $h\nu \approx 3.43 \text{ eV}$. 在 $h\nu \approx 3.43 \text{ eV}$ 处还存在一较宽的负响应峰.可通过减少 n 区的厚度增加光电压信号.他们认为,光响应谱中两极性相反峰的出现与电极引起的背对背的 p-n 结和肖特基势垒结有关.

Chen 等人用低压 CVD 方法制造出两种结构的 p-n 结光探测器.一种是 n 型 GaN 沉积到 p 型 GaN 上,另一种是 p 型材料沉积到 n 型材料上.第一种样品的结构是首先在平面的蓝宝石衬底上沉积 $1 \mu\text{m}$ 厚的没有特意掺杂的 n 型 GaN, 然后沉积一层厚度为 $0.5 \mu\text{m}$ Mg 掺杂的 p 型 GaN. 类似的另一种样品是首先沉积 $1 \mu\text{m}$ 厚的 p 型 GaN, 然后沉积一层厚度为 $0.5 \mu\text{m}$ n 型 GaN 层. 他们样品的最大光响应为 0.09 A/W , 此值可以和 Si 探测器相比较.对于面积为 16 mm^2 的探测器光响应上升和下降时间为 0.4 ms .

对紫外探测来说,场效应结构似乎有更高的效率. Khan 等人^[5] 制备出 GaN/AlGaIn 异质结结构场效应晶体管紫外光探测器.其结构如图 1 所示.此器件作为微波放大器工作温度可高达 $300 \text{ }^\circ\text{C}$. AlGaIn 势垒层厚约 25 nm , 掺杂水平是 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. GaN 是没有特意掺杂的,这一栅控的光探测器是在背面进行光照射的.光生电子空穴对产生于半绝缘的 i-GaN 缓冲层和 n-GaN 激活层.光生空穴移向 i-GaN 与蓝宝石衬底界面,而光生电子移向沟道,随后被高的沟道电场驱动到达漏极.在栅极电压为 1 V

时,探测器最大的光响应为 3000 A/W . 当入射光波长大于 365 nm 时,光响应很快地下降两个数量级,这表明此种探测器具有高的光响应灵敏度和好的光波长选择性.

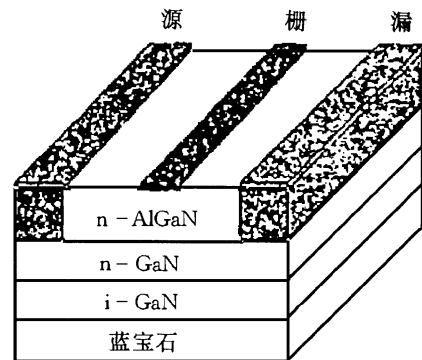


图 1 GaN/AlGaIn 异质结结构场效应晶体管紫外光探测器结构图

为提高光电探测器的量子效率和响应速度,需要加宽耗尽层的厚度.最好的方法是减少 N 区的掺杂浓度,可在 p 区和 n 区之间添加一轻施主掺杂的近本征区,这就是 pin 光探测器.这种光探测器具有高的光响应和高的响应速度,漏电流和噪声比较小.同时, pin 结构工艺也比较成熟,因此是一个有实用价值的结构.但是, GaN 的 pin 结构受 p 型材料质量的限制,工作性能还不很理想. Van Hove 等人用 MBE 法在蓝宝石衬底上制作了 pin 结光探测器.其响应峰值在波长为 360 nm 处,光响应是 0.11 A/W , 相对应的内量子效率为 48% . 在可见光范围,光响应降低 3 到 4 个数量级.响应时间是 $8.2 \mu\text{s}$.

和 pin 型 GaN 探测器相类似, Osinsky 等人制造出 p- π -n 结构紫外光探测器.即在重掺杂的 p 型和 n 型层中间沉积一层轻掺杂的补偿层—— π 层.这样得到的探测器在峰值光响应处 (365 nm), 零偏压时光响应电流为 0.1 A/W , 偏压为 -15 V 时,光响应电流为 0.14 A/W . 光响应速度受电路 RC 参数的影响,从零偏压的 17.4 ns 降到 -6 V 偏压的 10.3 ns . 对于尺寸为 $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ 的器件,在 -3 V 偏压时,暗电流是 2.7 pA , 噪音浓度少于 $10^{-25} \text{ A}^2/\text{Hz}$, 且遵从 $1/f$ 特性,噪音等价功率 (NEP) 为 $6.6 \times 10^{-15} \text{ W/Hz}^{1/2}$.

2.2 肖特基势垒光电探测器

比较 p-n 结二极管,肖特基势垒结制作简单,不存在高温扩散过程,光响应速度也较快.

p 型 GaN 肖特基势垒光探测器也是首先由 Khan^[6] 等人制备出的,其结构如图 2 所示.他们在蓝宝石衬底上用低压 MOCVD 法生长 $2 \mu\text{m}$ 厚的 Mg

掺杂的 p 型 GaN 层, Mg 掺杂的浓度为 $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. 在该层上面沉积如图 2 所示的环形电极. 外环电极为 Cr/Au 欧姆接触, 内环为 Ti/Au 肖特基势垒电极. 光从蓝宝石衬底一侧入射. 他们测出此种探测器零偏压光响应是 0.13 A/W , 响应时间大约为 $1 \mu\text{s}$. 在 $200-365 \text{ nm}$ 波长范围内, 光响应强度基本平缓, 而当波长大于 365 nm 时, 光响应迅速截断.

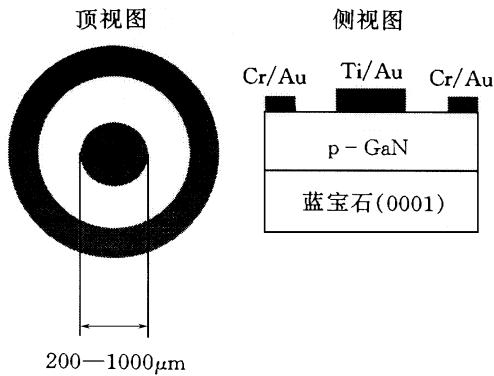


图 2 p 型 GaN 肖特基势垒光探测器结构图

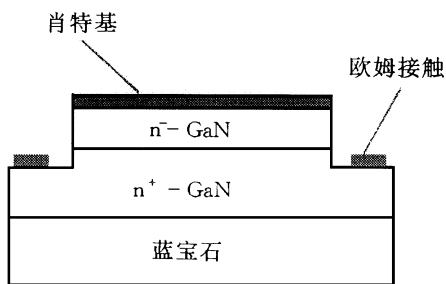


图 3 n⁻/n⁺结构的 GaN 肖特基势垒光电探测器

Chen 等人改进了 Khan 上述光探测器的结构, 制作出如图 3 所示的 n⁻/n⁺结构的 GaN 肖特基势垒光电探测器. 其构成是在蓝宝石衬底上沉积一层 40 nm 厚的 AlN 缓冲层, 再沉积 $1 \mu\text{m}$ 厚的 n⁺ GaN 层 ($n = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), 随后沉积 $0.4 \mu\text{m}$ 厚的 n⁻ GaN 层 ($n = 3 \times 10^{16} - 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$). 应用反应离子刻蚀法刻蚀出一个 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的台面用以制作肖特基势垒. 顶部的肖特基势垒由 5 nm 厚的电子束蒸发的 Pd 形成的. 在 n⁺ 层上的欧姆接触电极是用电子束蒸发 15 nm Ti 和 200 nm Al. Pd 层在 $200-365 \text{ nm}$ 范围的透射率约为常数 (70%). 此种探测器在 -5 V 偏压下光响应近于常数 (约为 18 A/W), 相应的量子效率超过 65% . 光响应的时间常数受电路 RC 时间常数的限制, 与负载电阻近于线性关系. 在负载电阻为 50Ω 的条件下, 光响应时间为 118 ns . 测量表明, $1/f$ 噪音为主要噪音特性, 其 NEP 值为 $7 \times 10^{-12} \text{ W/Hz}^{1/2}$.

与上面探测器相比, Osinsky 等人在 Si(111) 衬

底上制备的 GaN 平面结构肖特基势垒探测器参数较差. 他们的探测器是采用分子束外延 (MBE) 技术制造的. 具体结构是首先在 p 型 Si(111) 衬底上沉积 $0.2 \mu\text{m}$ 厚 AlN 层, 然后沉积 $0.7 \mu\text{m}$ 厚的 n 型 GaN 层. 在此层之上蒸发 Ti/Al/Ti/Au 欧姆接触电极和 Pd 肖特基电极. 所制作的器件峰值光响应在 0 V 时为 0.05 A/W , -4 V 时为 0.1 A/W , 光响应的截止频率为 365 nm . 在 -2 V 偏压下, 暗电流为 60 nA . NEP 值估计为 $3.7 \times 10^{-9} \text{ W/Hz}^{1/2}$.

2.3 MSM 结构光探测器

MSM (金属 - 半导体 - 金属) 结构在制作紫外光探测器方面, 是一种比较有吸引力的结构形式. Carrano 等人^[7]曾制备 GaN MSM 结构的紫外光探测器. 其截面结构如图 4 所示. 具体制备过程是: 首先在较低温度下 ($525 \text{ }^\circ\text{C}$) 用低压 CVD 方法在蓝宝石衬底上制备出 30 nm 厚的缓冲层, 然后在高温下 ($1050 \text{ }^\circ\text{C}$) 沉积 $1.5 \mu\text{m}$ 厚的没有特意掺杂的 n 型 GaN 外延层. 在 GaN 层上沉积 165 nm 厚的 SiO_2 层作为钝化和抗反射层. 再采用光刻技术用稀 HF 腐蚀掉一部分氧化物层, 用作蒸发肖特基势垒电极. 肖特基势垒接触采用蒸发 5 nm 厚 Ti 附着层而后蒸发 80 nm 厚的 Pt 制成. 他们是在剩余的 SiO_2 层上面蒸发 150 nm 厚的 Al 层, 制成插指式电极. 此探测器在 2 V 偏压时, 暗电流仅为 1 pA , 在 10 V 偏压下, 暗电流是 57 pA , 这比以前所报道的数值低一个数量级. 该探测器零偏压光响应为 0.1 A/W , 且在波长为 350 nm 处有一明显的带边降落. 光谱响应特性也非常好. 但 MSM 结构内部增益较低, 有人认为这是由于电子和空穴的迁移率不同, 或与陷阱对空穴的俘获有关.

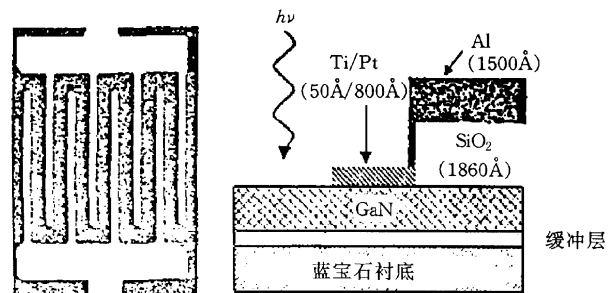


图 4 GaN MSM 紫外探测器的截面结构

近几年, 在 GaN 紫外光探测器方面的研究已取得很大进步. 所制备出器件的光响应灵敏度已超过了紫外增强型 Si 和 SiC 光探测器, 显示了此种探测器广阔的发展前景和巨大的潜力. 但是, 比较 Si 和

(下转第 113 页)