

高阻氮化镓外延层的异常光吸收*

刘文宝[†] 赵德刚 江德生 刘宗顺 朱建军 张书明 杨 辉

(中国科学院半导体研究所集成光电子国家重点联合实验室, 北京 100083)

(2010 年 1 月 17 日收到; 2010 年 2 月 20 日收到修改稿)

通过光伏谱(PV)的测量发现,采用 MOCVD 方法生长的非故意掺杂 GaN 外延膜,电阻较大的样品在带隙内有明显的异常光吸收. 吸收峰的能量位置表明这种异常吸收可能与激子有关. 在这些高阻样品上制作的 MSM 型探测器,当入射光照射不同位置,其光谱响应显示了区域不一致性. 20 V 偏压下反向偏置结处的光谱响应比正向偏置结处的光谱响应大一个数量级左右,峰值响应的位置也发生明显红移现象,红移的能量约为 28 meV,并且几乎不随环境温度变化. 根据 MSM 结构的电场分布不均以及带边和激子响应对电场的依赖性不同,MSM 型探测器的这种区域响应不一致性可以得到很好的解释.

关键词: GaN, 激子, 光伏谱, 光谱响应

PACC: 7135, 7340L

1. 引 言

GaN 材料因其高的热导率、高的击穿电场、高电子饱和迁移速度等性质,在微电子器件和光电子器件方面都有着广阔的应用前景^[1]. 激子效应由于在激光器、探测器等光电子器件的设计、制作以及物性分析中都有着十分重要的意义而备受关注^[2]. 特别是对于 GaN 薄膜材料,由于它具有很宽的直接带隙(>3.4 eV),其激子束缚能较大,甚至在室温下也可能观察得到.

本文报道了采用 MOCVD 方法生长的高阻 GaN 外延层的室温下异常光吸收的研究结果. 通过对光伏谱以及 MSM 型探测器的光谱响应中观察到的异常光吸收信号的分析,我们推断这种异常吸收可能与激子有关. 进一步对探测器的变温光谱响应进行测试,结果分析与激子吸收的性质相符合.

2. 实 验

实验中使用的样品是在蓝宝石(0001)衬底上采用低压 MOCVD 方法生长的非故意掺杂的六方相 GaN 外延层. 其生长过程是:使用三甲基镓、高纯氮气、氢气分别作为 Ga 源、N 源和载气首先在 550℃

下生长一层低温 GaN 缓冲层,随后在 1100℃下生长 4 μm 厚的非掺杂 GaN. 在制作 MSM 型探测器时使用标准光刻的方法制作 Ni/Au 透明电极然后在 N_2 , O_2 混合气氛下 500℃退火形成肖特基接触. 最后在 Ni/Au 上溅射 Ti/Al/Ti/Au 作为压焊点. 探测器的暗电流测试是使用 Keithley6430 源表. 光谱响应测试系统使用的光源为 150W 氙灯,光经过单色仪分光后再通过斩波器调制,然后照射到探测器上. 而探测器与一个取样电阻串联,和外加直流电源一起构成回路. 这样用锁相放大器测得取样电阻上的交流同步电压信号实际上就是探测器的响应.

我们在制作 MSM 型探测器之前先对样品进行了双晶 X 射线衍射和 Hall 的测量,从而得到晶体质量及本底载流子浓度. 随后测量了样品的室温光致发光(PL)谱以及光伏(PV)谱,分别得到晶体的发光和吸收的性质.

3. 结果和讨论

GaN 外延层的晶体质量我们采用双晶 X 射线衍射仪(DCXR)测量样品的半高宽(FWHM)来表征. 实验中我们取两片典型样品其 FWHM 分别为:样品 A 的(0002)和(10-12)为 3 分;样品 B 的(0002)为 5 分,(10-12)为 6 分. 晶体质量都比较

* 国家自然科学基金(批准号:60776047,60506001,60476021,60576003,60836003)资助的课题.

[†] E-mail: wbliu@semi.ac.cn

好,而 A 样品略优于 B 样品. 采用 Hall 测量得到 A 样品的本底载流子浓度都为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 而 B 样品为高阻材料.

在图 1(a) 中给出了 A, B 两个样品 PL 谱的测试结果. 可以发现两个样品 PL 谱除强度相差较大以外光谱形状十分相似. 带边峰位置在 361 nm (3.435 eV) 左右. 同时观察到带隙内 367 nm (3.379 eV) 处有明显的发光峰(见图 1(a) 中插图), 可能是带隙内的缺陷态发光^[3], A 样品在带隙内以 2.8 eV 为中心很宽的范围观察到明显的所谓的黄光带. 但 B 样品由于 PL 强度较低, 黄光带不是很明显. 在随后进行的光伏谱测量中我们发现在 B 样品观察到了明显的带隙内的峰值吸收, 位置 363.5 nm (3.411 eV) 附近. 而 A 样品有明显的带边吸收, 位置在 360 nm (3.444 eV). 如图 1(b) 所示.

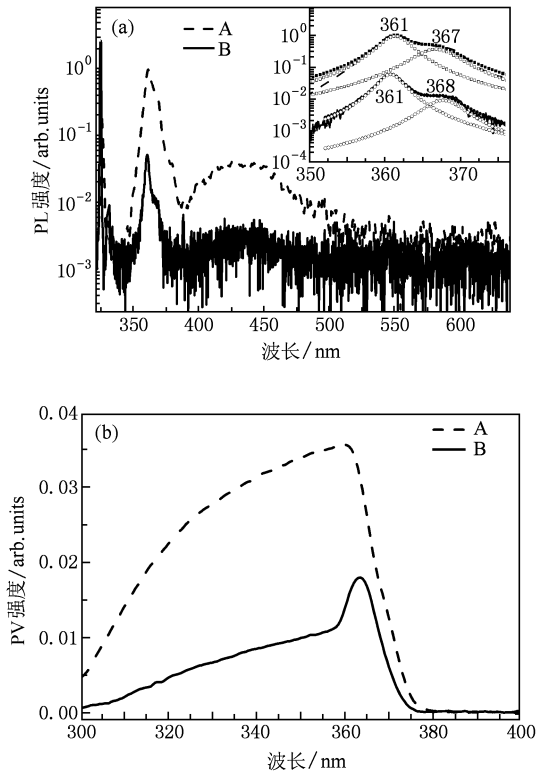


图 1 室温下样品 A, B 的 PL 谱和 PV 谱 (a) PL 谱; (b) PV 谱

我们在感兴趣的 B 样品上制作了 MSM 型肖特基探测器. 因为 MSM 型结构实际上是两个背靠背串联的肖特基结, 外加偏压时总是一个结为正向偏置另一个结为反向偏置. 从暗电流的测量的结果(如图 2 所示)中可以看出正反向暗电流显示了较好对称性, 在 5 V 偏压下暗电流小于 10 pA.

测量探测器不同区域的光谱响应, 实验中发现

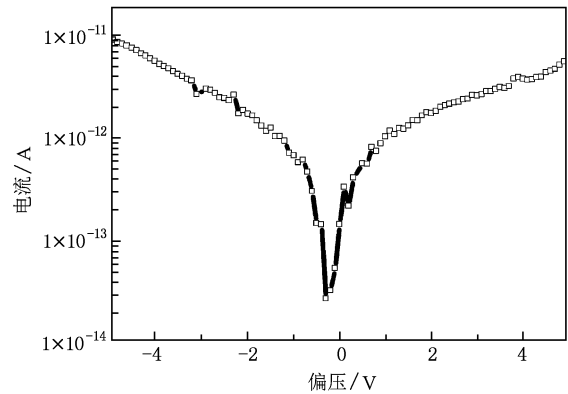


图 2 MSM 型探测器的暗电流

随着光斑照射位置的不同, 光谱响应曲线有明显的不同. 图 3 表示了在不同温度下光斑分别照射左右两个电极时的光谱响应. 从图中可以明显看出光谱响应的区域不一致性. 光斑照射反偏结处的响应度比正偏结处的要大一个数量级左右. 同时当光斑照射反偏结一侧时光谱响应的截止波长比照在正偏结时的截止波长发生红移. 红移的能量约为 28 meV, 且不随温度变化.

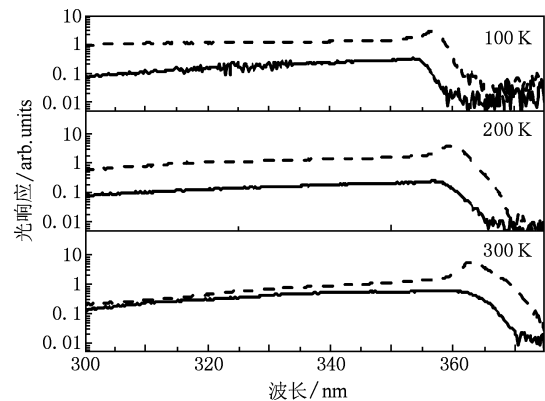


图 3 不同温度下分别照射左右电极的光谱响应. 虚线表示照射反偏结的响应, 实线表示照射正偏结的响应

针对以上结果我们讨论激子吸收对 MSM 型探测器光谱响应的影响. 首先分析 MSM 型肖特基探测器的电场分布^[5]. 参照图 4, 在热平衡状态下, 金属和半导体的费米能级位于同一水平. Φ_n 为肖特基结的势垒高度, V_b 为内建势, W 为耗尽区宽度, L 是金属电极间总距离. 内建电场方向是从半导体指向金属由箭头标出. 当外加偏压例如图中所示左侧为负电压、右侧为正电压时, 耗尽区宽度及内建电场强度随所加偏压发生变化. 根据突变结近似理论, 耗尽区宽度和结内最大电场强度分别为^[6]

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} \left(V_b - V - \frac{kT}{q} \right)}, \quad (1)$$

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{2qN_D}{\epsilon_s} \left(V_b - V - \frac{kT}{q} \right)}, \quad (2)$$

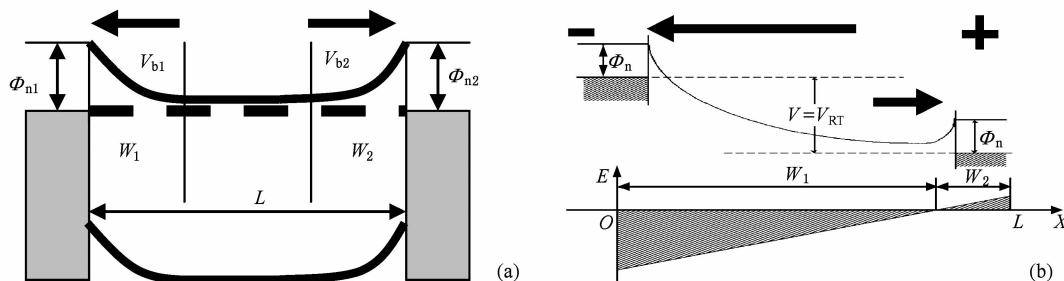


图4 MSM结构的能带示意图 (a)热平衡下的能带示意图;(b)外加偏压时的能带及电场示意图

我们知道激子是由于静电库仑作用而束缚在一起的电子空穴对,它是一种电中性的、非导电性的电子激发态.但是当外加电场足够大时,激子能够在强电场作用下解离^[7],形成能够自由运动对导电有贡献的自由载流子^[8].由以上电场分布的分析,当光照在正偏结时,结电场较小而无法分离激子,故激子效应不明显,自由载流子形成的电流为主.同时耗尽区宽度也较小,故响应度很小.当光照反偏结时,结电场能有效离化激子形成光电流,出现明显的激子响应峰.同时耗尽区宽度较大,故响应度也较大.

这样,我们把正向结的响应归结为自由载流子的贡献,那么光谱响应的截止边就是 GaN 的带边.而反向结的响应含有激子吸收、分离而对光电流产生的贡献,其截止边对应的是激子的能量.而我们知道,激子的束缚能是电子-空穴对间的库仑相互作用,它对温度是不敏感的.这一点从变温光谱响应也得到了证实.也就是说光斑照射正反向结得到的截止边能量差即带隙和激子能量之差,也就是说激

由此可见,当外加偏压时 MSM 结构的左右电极附近的耗尽区宽度及电场不同,反向偏置的一侧耗尽区宽度及电场强度增加,而另一侧处于正偏,耗尽区及电场强度减小.

子束缚能大约是 26 meV.

4. 结 论

我们对蓝宝石衬底上采用 MOCVD 方法生长的非故意掺杂 GaN 外延层进行了室温下的 PL 谱以及 PV 谱的测量.在 PL 谱中没有观察到明显的激子发光信号,但是通过光伏谱的测量从高阻样品中观察到了激子吸收信号.在这些样品上制作的 MSM 型光伏探测器,其光谱响应显示了区域不一致性即光斑照射反偏结一侧时比照在正偏结一侧得到的光响应度大一个数量级左右,并且截止边波长发生红移.根据 MSM 结构电场分布的特点,给出如下解释:反偏结处的电场强度大,耗尽区也相对较宽,载流子能够有效分离所以响应度较大.同时在反偏结处由于具有较强的电场,能够将激子有效分离从而对光电流产生贡献,所以截止边是在激子能量对应的位置而不是带边,这两个能量之差即激子的束缚能不随温度变化,大约为 28 meV.

- [1] Strite S, Morkoc H 1992 *J. Vac. Sci. Technol.* B **10** 1237
 [2] Chow W W, Knorr A, Koch S W 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 754
 [3] Reshchikov M A, Morkoc H 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 061301
 [4] Liu W, Li M F, Chua S J, Zhang Y H, Uehida K 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 2511
 [5] Morkoc H 1999 *Nitride Semiconductors and Devices* (Berlin: Springer) p205

- [6] Sze S M 1981 *Physics of semiconductor Devices* (New York: John Wiley & Sons) p248
 [7] Li L, Rao X S, Sun X, Fu R L, Chu J H, Zhang Z L 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1536 (in Chinese) [李 蕾、饶雪松、孙 鑫、傅柔励、褚君浩、张志林 1998 物理学报 **47** 1536]
 [8] van de Lagemaat J, Vanmaekelbergh D, Kelly J J 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 958

Abnormal photoabsorption in high resistance GaN epilayer^{*}

Liu Wen-Bao[†] Zhao De-Gang Jiang De-Sheng Liu Zong-Shun Zhu Jian-Jun Zhang Shu-Ming Yang Hui

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(Received 17 January 2010; revised manuscript received 20 February 2010)

Abstract

Unintentionally doped GaN epilayers are grown by the metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD). Photovoltaic (PV) spectroscopy shows that there appears an abnormal photoabsorption in some undoped GaN films with high resistance. The peak energy of the absorption spectrum is smaller than the intrinsic energy band gap of GaN. This phenomenon may be related to exciton absorption. Then metal-semiconductor-metal (MSM) Schottky photodetectors are fabricated on these high resistance epilayers. The photo spectrum responses are different when the light individually irradiates each of the two electrodes with the photodetector which are differently biased. When the excitation light irradiates around the reverse biased Schottky junction, the responsivity is almost one order of magnitude larger than that around the forward biased junction. Furthermore, when the excitation light irradiates the reverse biased Schottky junction, the peak energy of the spectrum has a prominent red-shift compared with the peak energy of the spectrum measured with the excitation light irradiating the forward biased Schottky junction. The shift value is about 28 meV, and it is found to be insensitive to temperature. According to the analyses of the distribution of the electric field within the MSM device and the different dependences of the response on the electric field intensity between the free carriers and excitons, a reliable explanation for the different response among various areas is proposed.

Keywords: GaN, exciton, photovoltaic spectroscopy, MSM, photoresponsivity

PACC: 7135, 7340L

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60776047, 60506001, 60476021, 60576003, 60836003).

[†] E-mail: wbliu@semi.ac.cn