2012 年7月

Vol. 33 No. 7

文章编号: 1000-7032(2012)07-0785-05

# 温度对 p-InN 薄膜光电导灵敏度的影响

#### 冯 丽\*

(北京大学物理学院,北京 100871)

**摘要:**研究了 p 型 InN 的光电导效应。利用分子束外延技术(MBE)法生长出高质量的 InN 薄膜,在此基础 上利用 Mg 掺杂获得了 p-InN。原位反射高能电子衍射(RHEED)表明样品在生长过程中保持二维生长模式, 原子力显微镜(AFM)测试结果显示台阶流的生长模式。实验发现,p 型 InN 的光电导灵敏度随温度的升高而 降低。其主要原因是当温度升高时,光生载流子浓度降低和样品背景浓度升高共同造成的。

**关 键 词:** 分子束外延; 原位反射高能电子衍射; Mg 掺杂 p-InN; 光电导灵敏度 中图分类号: 0472.3 **文献标识码:** A **DOI**: 10.3788/fgxb20123307.0785

## Temperature-dependent Photoresponsivity Observed in Mg-doped p-InN Layers

FENG Li\*

(School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China) \* Corresponding Author, E-mail: fenglislp@gmail.com

**Abstract**: We reported the photoconductivity of Mg-doped p-InN layers, which were grown by molecular beam epitaxy (MBE). The surface of these samples was very flat which were observed by both reflection high energy electron diffraction (RHEED) and atomic force microscope (AFM). We studied the temperature-dependent photoconductivity of Mg-doped p-InN layers. We found out that the photosensitivity decreased with increasing temperature, which resulted from both the variation of photon-generated carrier concentration and the residual carrier concentration with increasing temperature.

Key words: molecular beam epitaxy(MBE); reflection high energy electron diffraction(RHEED); Mg doped p-InN; photosensitivity

## 1引言

随着薄膜外延技术的提高,利用分子束外延 (MBE)技术生长的 InN 薄膜的质量有了显著的 提高。近年来,研究发现室温下 InN 的禁带宽度 为0.63~0.65 eV,而不是先前普遍认为的1.9 eV<sup>[1-7]</sup>。这一发现大大拓宽了Ⅲ族氮化物材料的 发光波长范围,从 AlN 到 InN 可以从紫外区覆盖 到红外区,在多波段发光器件、高转换效率的太阳 能薄膜电池等方面具有广泛的应用前景<sup>[1-7]</sup>。

p型掺杂是 InN 研究的重要一环,是实现 InN 基光电子器件的先决条件之一。随着材料生长技 术的提高,已有利用 Mg 掺杂实现 p型 InN 的报 道<sup>[8]</sup>,然而目前还没有关于 p-InN 光电导现象的

收稿日期: 2012-04-26;修订日期: 2012-05-30

作者简介: 冯丽(1988-), 女, 安徽宿州人, 主要从事氮化物半导体材料与器件研究。

E-mail: fenglislp@gmail.com

报道。本文在生长 p 型 InN 的基础上,研究了 p 型 InN 的光电导现象,观察到光电导灵敏度随着 温度的升高而降低,其原因是随温度的升高,背景 浓度升高和光生载流子浓度降低。

## 2 样品制备与光电导实验

采用 MBE 技术生长不同 Mg 掺杂浓度的 InN 薄膜样品。选用的衬底是利用 MOCVD 法在蓝宝 石上生长的 GaN 模板(GaN 层厚 4.5 μm)。在高 温除气后,先生长一层 200 nm 厚的 GaN,然后降 温生长 30 nm 的非掺杂 InN 层,最后生长掺 Mg 的 InN,厚度为 800 nm。

为了避免日光对 InN 光电导测量的影响,实验前把待测样品保持在测试暗室中 10 h 以上。 光电导效应测量采用波长为 808 nm 的连续激光 作为激发光源,光功率为 80 mW(1.3 W/cm<sup>2</sup>)。 四点范德堡 Hall 图形用来测量 Mg 掺杂 InN 薄膜 中载流子的输运性质。欧姆接触为 Ti/Al/Ni/Au (20 nm/175 nm/35 nm/150 nm) 多层金属,用磁 控溅射方法沉积得到。利用 Hall 变温系统调节 温度变化(100~300 K),磁场强度为 0.503 T。 整个测量是在真空的条件下进行的。

## 3 实验结果与分析

图 1 为 MBE 生长 Mg 掺杂 InN 薄膜[1120] 晶面典型的 RHEED 图。生长过程中 RHEED 图 案始终保持为条纹状,表明样品在生长过程中保 持二维生长模式,即外延层表面较为平坦。随着 生长的进行,RHEED 条纹亮度逐渐变暗,可能是 富 In 生长条件下累积的金属对 RHEED 条纹产生 了遮蔽效应。

图 2 为原子力显微镜(AFM)观察到的 Mg 掺 杂 InN 薄膜的表面形貌,在 3 μm × 3 μm 的扫描 围内,其表面粗糙度(RMS)值低至 0.89 nm,从中 可以看出 Mg 掺杂 InN 薄膜表面具有台阶流生范



图 1 Mg 掺杂 InN 样品生长过程中典型 RHEED 图案 Fig. 1 RHEED pattern of Mg-doped InN layer



- 图 2 Mg 掺杂 InN 样品在 3 μm × 3 μm 的扫描范围内典型的 AFM 表面形貌图
- Fig. 2 AFM image of Mg doped InN layer in a scan area of 3  $\mu m \times 3 ~\mu m$

长模式,这也表明其具有非常平整的表面形貌。

RHEED 和 AFM 测量结果表明,通过 MBE 法可以生长出高质量的 Mg 掺杂 InN 薄膜。为了确认该生长条件下 Mg 掺杂 InN 是否为 p 型,我们通过 Hall 系统测量了该样品的输运特性(室温下),测量结果如表1所示。

表1 室温下 Hall 效应测量的样品的电子浓度(n)和迁 移率(μ)

Table 1 Directly measured electron concentrations (n) and mobilities  $(\mu)$  at room temperature by single-field Hall-effect measurement

样品标号	Mg cell 温度/℃	载流子浓度/ (10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup> )(c	迁移率/ m <sup>2</sup> ・V <sup>-1</sup> ・s <sup>-1</sup> )
1	237	-1.52	118
2	250	-1.6	101

由表1可以看出,由于 InN 表面的电子堆积 层,Mg 掺杂的 InN 薄膜都表现出 n 型(由载流子 浓度的负号可以判断)。所以通过常温 Hall 效应 测量无法判断是否获得了 p-InN 薄膜。但是通过 变温 Hall 效应测量可以判断其是否为 p 型,因为 p-InN 的迁移率随着温度升高会出现转折点 (Kink)<sup>[9-12]</sup>,结果显示该生长条件下我们已经成 功制备了 p-InN 薄膜。

不同浓度 Mg 掺杂的 p-InN 薄膜的变温光电 导实验结果如图 3 所示。图 3 给出了样品 2(样 品 1 也观察到相同现象)分别在 100,160,240, 300 K 的光电导现象(电流均归一化)。由图 3 可 以看出,随着温度的升高,光电流的增大幅度减 小,即光电导灵敏度减小<sup>[13-14]</sup>。光电导灵敏度<sup>[13]</sup> 定义为

$$S = \frac{i_{\rm p}}{i_{\rm d}},\tag{1}$$

其中 i, 为光电流(未扣除暗电流), i, 为暗电流。



图 3 p-InN 薄膜样品 2 的光电导现象随温度的变化关系,↓和↑分别表示加光和不加光。

Fig. 3 The selected photocurrent response to the 808 nm excitation of p-InN layer(sample 2) at different temperatures with illuminations on and off marked by  $\downarrow$  and  $\uparrow$ , respectively.

为了进一步研究样品光电导灵敏度随温度的 变化关系,本文对 2 号样品光电流和暗电流进行 了变温测试,如图 4(a)所示,光电流和暗电流均 随着温度的升高而上升,但是光电流上升的幅度 在减小,即光电流的增益  $\Delta i$  在减小如图 4(b)所 示。令  $i_p = i_d + \Delta d$ ,将  $S = \frac{i_p}{i_d}$ 变形为  $S = 1 + \frac{\Delta i}{i_d}$ 。 由图 4(b)可知  $\Delta i$  随温度升高而减小。当温度由 100 K 升高到 300 K 时, $\Delta i$  从 0.02 mA 降到 0.005 mA。另一方面暗电流  $i_d$  随着温度的升高而增 大,从 1.15 mA 上升到 1.4 mA,从而使得光电流 与暗电流的比值即光电导灵敏度随着温度升高而 减小(图 4(c))。光电导灵敏度从 100 K 到 300

由前面分析可以看出,光电流增益  $\Delta i$  和暗电流  $i_a$  共同影响了光电导灵敏度,所以需要进一步讨论  $\Delta i$  和  $i_a$  随温度的变化关系。因为光电流的增益  $\Delta i$  正比于光电导,所以仅需讨论光电导  $\Delta \sigma$  随温度的变化关系即可。

K 大约降低了 2%。

由于 p-InN 的双层结构,总的电导应该是每 层的电导之和<sup>[15-16]</sup>:

$$\sigma = \sum_{i} \sigma_{si} d_{i}, \qquad (2)$$

其中 $\sigma_{si}$ 是每层单位面积的电导, $d_i$ 是每层的厚度。则



- 图 4 样品 2 的光电流和暗电流(a)、光电流增益 Δ*i*(b) 及光灵敏度(c)随温度的变化关系。
- Fig. 4 Temperature-dependent curves of the dark and photocurrents(a), photocurrent gain( $\Delta i$ )(b), and photosensitivity (c) of the p-InN layer(sample 2).

$$\sigma = \sigma_{\rm s} d_{\rm s} + \sigma_{\rm b} d_{\rm b}, \qquad (3)$$

其中 $\sigma_s$ 、 $d_s$ 是表面电导和厚度, $\sigma_b$ 、 $d_b$ 是体内电导和厚度。尽管表面电子堆积层的背景浓度很高, 但厚度仅为十几纳米<sup>[17]</sup>,远小于样品厚度(800 nm),所以可以认为光电导现象是体内效应。则 无光照情况下电导

$$\sigma_1 = q p_0 \mu_p, \qquad (4)$$

光照后电导

 $\sigma_2 = qp_0\mu_p + q\Delta p\mu_p + q\Delta n\mu_n$ , (5) 其中 $\mu_p,\mu_n,p_0,\Delta n,\Delta p$ 分别为空穴迁移率、电子迁 移率、无光照时空穴浓度、光生电子浓度和光生空 穴浓度,并且我们假设光照后迁移率没有变化。 又因为 $\mu_p \ll \mu_n$ , $\Delta n = \Delta p$ ,所以光电导

 $\Delta \sigma = \sigma_2 - \sigma_1 = q \Delta n \mu_n$ , (6) 可见光电导正比光生电子浓度。用变温 Hall 效 应测量了有光和无光情况下载流子浓度随温度的 变化关系,如图 5 所示。





Fig. 5 Temperature dependence of (a) Hall carrier concentration, and (b) photon-generated carrier concentration  $(\Delta n)$  in the p-InN layer.

从图 5 可以看到,当温度上升时,热激发载流 子浓度增大,从而导致光电流和暗电流都随温度 的升高而增大(图 5(a)),但光生载流子的浓度 Δn 随温度的升高而降低(图 5(b))。

根据光电导灵敏度的定义可知:一方面光生 载流子浓度越低,光照后引起的 Δσ 越小,即 Δi 越小,则光电导灵敏度 S 越小;另一方面背景载流 子浓度越高,即暗电流越大,则光电导灵敏度 S 也 越低。由此可见,随着温度的升高,光生载流子浓 度下降,导致光电流增益 Δi 变小,并且背景载流 子浓度升高,导致暗电流 i<sub>d</sub> 增大,从而光电导灵 敏度随温度的升高而降低。

综上所述,光生载流子浓度和暗电流共同影 响着光电导灵敏度的大小,光生载流子浓度越高, 暗电流越小,光电导灵敏度越大。并且可以看出, 光生载流子浓度和暗电流都对温度具有较大的敏 感性,从而使得光电导灵敏度对温度具有较高的 敏感性。

#### 4 结 论

采用 MBE 法成功制备了高质量的 Mg 掺杂 p-InN 薄膜。并且通过对其光电导现象的研究, 在温度 100~300 K 的变化范围内,发现光电导灵 敏度随温度升高而下降。通过载流子浓度随温度 的变化关系得到,光生载流子浓度随着温度的升 高而下降,并且暗电流随着温度的升高而升高,是 产生这一现象的主要原因。

#### 参考文献:

- [1] Li S X, Yu K M, Wu J, et al. Fermi-level stabilization energy in group Ⅲ nitrides [J]. Physical Review B, 2005, 71 (16):161201-1-4.
- [2] Klochikhin A, Davydov V, Emtsev V, et al. Photoluminescence of n-InN with low electron concentrations [J]. Phys. Stat. Sol., 2006, 203(1):50-58.
- [3] Kamińska A, Franssen G, Suski T, et al. Role of conduction-band filling in the dependence of InN photoluminescence on hydrostatic pressure [J]. Physical Review B, 2007, 76(7):075203-1-5.
- [4] Wang X Q, Yoshikawa A. Molecular beam epitaxy growth of GaN, AlN and InN [J]. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 2004, 49(48):42-103.
- [5] Nanishi Y, Saito Y, Yamaguchi T. RF-molecular beam epitaxy growth and properties of InN and related alloys [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2003, 42(9):2549-2559.
- [6] Wang X Q, Liu S T, Ma N, et al. High-electron-mobility InN layers grown by boundary-temperature-controlled epitaxy [J]. Appl. Phys. Express, 2012, 5(1):015502-1-3.
- [7] Walukiewicz W, Li S X, Wu J K, et al. Optical properties and electronic structure of InN and In-rich group Ⅲ-nitride alloys [J]. Journal of Crystal Growth, 2004, 269(1):119-127.

- [8] Ding S F, Fan G H, Li S T, et al. First-principles study of the p-type doped InN [J]. Acta Physica Sinica (物理学报), 2007, 56(7):4062-4067 (in Chinese).
- [9] Ma N, Wang X Q, Xu F J, et al. Anomalous Hall mobility kink observed in Mg-doped InN: Demonstration of p-type conduction [J]. Appl. Phys. Lett., 2010, 97(22):222114-1-4.
- [10] Hea L, Yang J R, Wang S L. A study of MBE growth and thermal annealing of p-type long wavelength HgCdTe [J]. Journal of Crystal Growth, 1997, 176(175):677-681.
- [11] Besikci C, Choi Y H, Labeyrie G, et al. Detailed analysis of carrier transport in InAs<sub>0.3</sub>Sb<sub>0.7</sub> layers grown on GaAs substrates by metalorganic chemical-vapor deposition [J]. J. Appl. Phys., 1994, 76(10):5820-5828.
- [12] Jones R E, Yu K M, Li S X, et al. Evidence for p-type doping of InN [J]. Phys. Rev. Lett., 2006, 96(12):125505-1-4.
- [13] Chen R S, Yang T H, Chen H Y, et al. High-gain photoconductivity in semiconducting InN nanowires [J]. Appl. Phys. Lett., 2009, 95(16):162112-1-3.
- [14] Soci C, Zhang A, Xiang B, et al. ZnO nanowire UV photodetectors with high internal gain [J]. Nano Lett., 2007, 7 (4):1003-1009.
- [15] Arnaudov B, Paskova T, Evtimova S, et al. Multilayer model for Hall effect data analysis of semiconductor structures with step-changed conductivity [J]. Phys. Rev. B, 2003, 67(4):045314-1-10.
- [16] Wang X Q, Che S B, Ishitani Y, et al. Hole mobility in Mg-doped p-type InN films [J]. Appl. Phys. Lett., 2008, 92 (13):132108-1-3.
- [17] Bailey L R, Veal T D, Kendrick C E, et al. Sulfur passivation of InN surface electron accumulation [J]. Appl. Phys. Lett., 2009, 95(19):192111-1-3.