

近代
与综合实验

C-V 法测量 GaN 基蓝光 LED 的 PN 结特性

符斯列¹, 王春安², 蒋联娇¹, 秦盈星¹, 吴先球¹

(1. 华南师范大学 物理与电信工程学院

广东省量子调控工程与材料重点实验室, 广东 广州 510006;

2. 广东技术师范学院 电子与信息工程学院, 广东 广州 510006)

摘 要:应用 C-V 法研究了 GaN 基蓝光 LED 的 PN 结特性. 通过变温的 C-V 曲线、相应的 C^{-2} -V 曲线和 C^{-3} -V 曲线判断 GaN 基 PN 结的结类型, 计算杂质浓度分布和 PN 结接触电势差, 并分析了温度变化对 PN 结特性的影响. 该实验不仅能加深学生对二极管 PN 结及 C-V 法应用的认识和理解, 还可以让学生了解 GaN 新型半导体材料的相关知识.

关键词:C-V 法; GaN 基蓝光二极管; PN 结特性; 杂质浓度分布

中图分类号:O475

文献标识码:A

文章编号:1005-4642(2017)05-0001-06

电容-电压(C-V)测量法是一种简单、快速、无损伤的二极管 PN 结特性测量方法^[1-2], 同时也是大学本科高年级物理专业近代物理实验的主要实验内容^[3]. 通过给二极管施加反向偏置电压 V , 测量对应的二极管 PN 结电容 C , 然后根据 C-V 曲线以及相应的 C^{-2} -V 曲线和 C^{-3} -V 曲线, 就可以判断二极管的 PN 结类型, 计算 PN 结接触电势差 V_D , 以及获得 PN 结的杂质浓度分布信息. C-V 法不仅可以应用于电子二极管和肖特基结, 也可以应用于发光二极管(LED)的 PN 结特性研究, 如新一代 GaN 基蓝光 LED. GaN 是一种高亮度、耐高温、抗腐蚀的宽禁带直接带隙的蓝光半导体材料. GaN 基 LED 所辐射的蓝光, 和 GaAs 基 LED 所辐射的红光及绿光一起, 构成了白光的三基色, 目前已经广泛应用于大型户外平板显示、白光照明等^[4-6]方面.

本文通过 C-V 法测量 GaN 基 PN 结特性, 并通过液氮制冷得到变温的 GaN 基 PN 结的 C-V 曲线及相应的 C^{-2} -V 曲线和 C^{-3} -V 曲线, 分析 GaN 基 PN 结的结构特性, 以及温度变化对 GaN 基 PN 结特性的影响. 该实验不仅能加深学生对二极管 PN 结及 C-V 法应用的认识和理解, 还可以让学生了解 GaN 新型半导体材料的相关知识, 拓宽学生的知识视野, 同时也是对近代物理实验中常规 C-V 实验的有益补充和拓展.

1 实验原理

一般而言, 采用合金法、扩散法、气相沉积法和离子注入法等工艺制备的二极管 PN 结, 根据杂质浓度随结宽的变化, PN 结类型基本可分为突变结、线性缓变结及非突变非线性缓变结^[2,7]. PN 结的杂质浓度分布如图 1 所示.

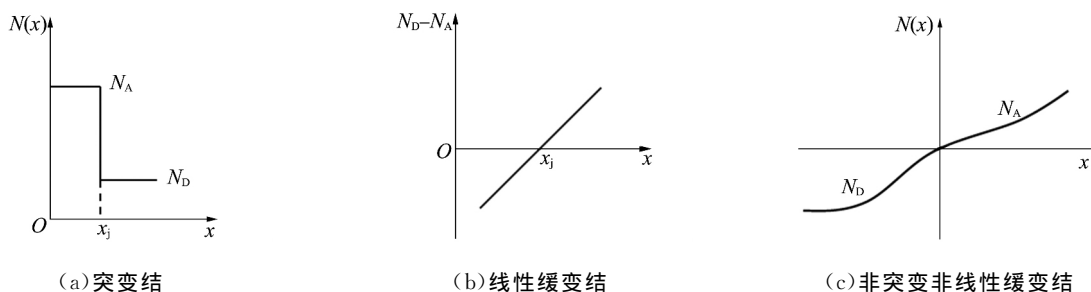


图 1 3 种类型 PN 结的杂质浓度分布示意图

收稿日期: 2016-11-08; 修改日期: 2016-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助(No. 10575039); 广东省自然科学基金资助(No. S2013010012548)

作者简介: 符斯列(1972-), 男, 海南临高人, 华南师范大学物理与电信工程学院副教授, 博士, 研究方向为 III-V 族化合物半导体的低温制备及材料特性.



突变结的杂质分布特点是: N 型区施主杂质浓度 N_D 在界面 $x = x_j$ 处, 突变为 P 型区受主杂质浓度 N_A [如图 1(a) 所示], 且 N_D 和 N_A 都是均匀分布. 特别是当杂质浓度一侧比另一侧高很多, 则称为单边突变结, 单边突变结的结宽主要集中在低杂质浓度一侧.

线性缓变结的特点是: 杂质浓度从 PN 结一侧到另一侧线性缓慢变化, 如图 1(b) 所示, 其杂质分布可用杂质浓度梯度 G 来表示:

$$N_D - N_A = G(x - x_j), \quad (1)$$

若结 PN 的杂质分布既不符合突变结也不符合线性缓变结, 则为非突变非线性缓变结, 其杂质浓度分布如图 1(c) 所示.

对任意结类型的 PN 结, 其 PN 结空间电荷区域的电势与电荷关系可以用泊松方程描述, 若仅考虑纵向分布, 则一维纵向分布的泊松方程为

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_0 \epsilon_r}, \quad (2)$$

其中 ϵ_0 和 ϵ_r 分别为真空电容率和材料的相对电容率, $\rho(x)$ 和 $V(x)$ 为空间电荷区净电荷密度和电势.

根据 PN 结的电容理论, 如果假设耗尽层成立, 同时认为杂质完全电离, 则可通过泊松方程得到突变结 PN 结两端的总电势差与势垒电容 C 的关系为^[2,7]

$$V_D - V = \frac{eS^2 \epsilon_0 \epsilon_r N^*}{2} \left(\frac{1}{C} \right)^2, \quad (3)$$

其中 V 和 V_D 分别为 PN 结两端外置偏压和接触电势差, $N^* = \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}$ 为约化杂质浓度, e 为基本电荷量, S 为结面积. (3) 式说明, 对于突变结而言, $C^{-2} - V$ 呈线性关系, 如图 2 所示. 其中直线延长线在横轴的截距即为 PN 结的接触电势差 V_D , 并且由直线斜率 $\left(k = \frac{2}{eS^2 \epsilon_0 \epsilon_r N^*} \right)$ 可求出 N^* .

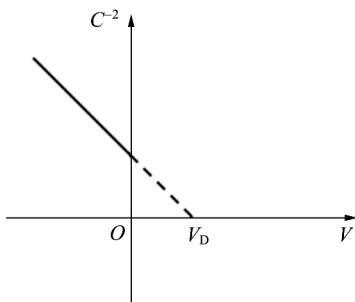


图 2 突变结的 $C^{-2} - V$ 曲线关系

需要说明的是, 对于单边突变结, 由于 PN 结两侧掺杂浓度相差几个数量级, 约化杂质浓度 N^* 可看成是低浓度一侧的平均杂质浓度.

对线性缓变结, 同样假设耗尽层成立, 则 PN 结两端的总电势差与势垒电容 C 的关系满足:

$$V_D - V = \frac{eS^3 (\epsilon_0 \epsilon_r)^2 G}{12} \left(\frac{1}{C} \right)^3, \quad (4)$$

其中 G 为杂质浓度梯度. (4) 式说明 C^{-3} 与 V 呈线性关系, 如图 3 所示. 同样, 直线延长线在横轴的截距即为 PN 结的接触电势差 V_D , 而由直线斜率

$\left[k = \frac{12}{eS^3 (\epsilon_0 \epsilon_r)^2 G} \right]$ 可求出杂质浓度梯度 G .

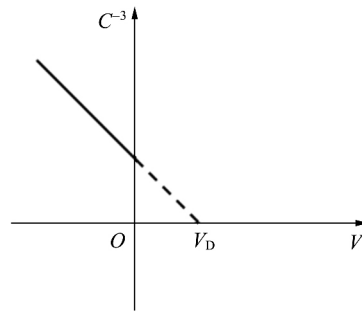


图 3 线性缓变结的 $C^{-3} - V$ 曲线关系

对于非突变非线性缓变结, $C^{-2} - V$ 曲线与 $C^{-3} - V$ 曲线都不呈线性关系, 势垒电容为

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{l}, \quad (5)$$

在杂质任意分布情况下均成立, 其中 l 为 PN 结结宽, 相应的约化杂质浓度随结宽 l 的分布满足:

$$N^*(l) = -\frac{C^3}{eS^2 \epsilon_0 \epsilon_r} \left(\frac{dC}{dl} \right)^{-1}. \quad (6)$$

对单边突变结, 约化杂质浓度 N^* 可看成是低杂质浓度一侧的杂质浓度.

实验采用的样品为市面上常见的普通亮度 $\phi 5$ mm GaN 基蓝光 LED, 采用引脚式封装, 其中中心波长为 460~465 nm, 工作电压 3.0~3.2 V, 结面积 $S = 6.25 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$, GaN 材料的相对电容率 $\epsilon_r = 8.9$, 真空电容率 $\epsilon_0 = 8.854 \text{ pF/m}$. 实验仪器为 CTG-1 型高频电容-电压特性测试仪, 温度传感器为标准 Pt 100 Ω 温度探头. LED 样品和温度探头紧挨着置于紫铜做成的圆柱形恒温器内, 以确保温度探头能真实反映样品温度. 实验时通过沉降法把 LED 样品缓慢放入液氮杜瓦瓶, 在 LED 样品温度分别为 $T = 289, 223, 173, 123, 83 \text{ K}$ 时测量其 $C-V$ 曲线. 另外, 为了减少 PN 结

扩散电容对测量结果的影响,实验时二极管施加偏压为负偏压,在负偏压条件下,反向饱和电流很小,此时势垒电容起主要作用,扩散电容可以忽略^[7]. 在本实验中,施加的负偏压范围为 0 ~ -8 V.

2 实验结果与分析

2.1 GaN 基蓝光 LED 变温 C-V 曲线

各个温度下测得的 GaN 基蓝光 LED 样品的 C-V 曲线如图 4 所示. 图 4 表明:

1) 同一温度下,PN 结势垒电容 C 随着反向偏压的增大而减小,呈现类似幂律衰减的变化^[8].

2) 在变温情况下,温度降低,则势垒电容 C 变小,且温度越低,其势垒电容 C 随着反向偏压的变化就越平缓. 表现为 0 ~ -8 V 负偏压范围内, $T=289$ K 时的 C-V 曲线比 $T=83$ K 的 C-V 曲线变化范围要大. 这是因为根据半导体的低温载流子冻析效应,当温度高于一定温度时,杂质全部电离,而当温度低于一定温度时,杂质只是部分电离,尚有部分载流子被冻析在杂质能级上,即温度高时电离的杂质浓度高于温度低时电离的杂质浓度. 所以施加同样的反向偏压时,温度越低,势垒电容越小.

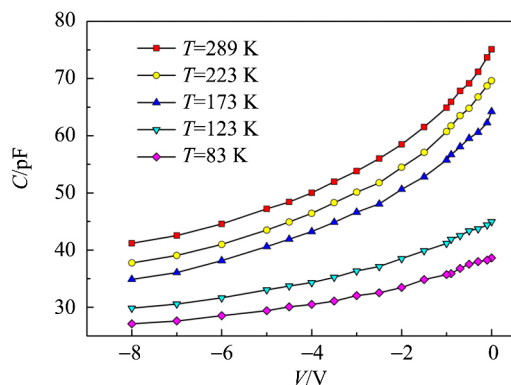


图 4 GaN 基蓝光 LED 的变温 C-V 曲线

2.2 判断 PN 结类型

为了判断该 GaN 基 LED 的 PN 结类型,选择了 $T=289$ K 时样品的 C^{-2} -V 曲线和 C^{-3} -V 曲线来进行最小二乘法线性回归分析,拟合结果如图 5 和图 6 所示,拟合直线分别用图中虚线表示. 其中用于评价 2 条拟合直线优劣的 Pearson 线性相关系数绝对值均在 0.99 以上,并且拟合直线的显著性 F 检验表明 C^{-2} -V 曲线的线性关系

及 C^{-3} -V 曲线的线性关系均达到了 0.05 的显著水平.

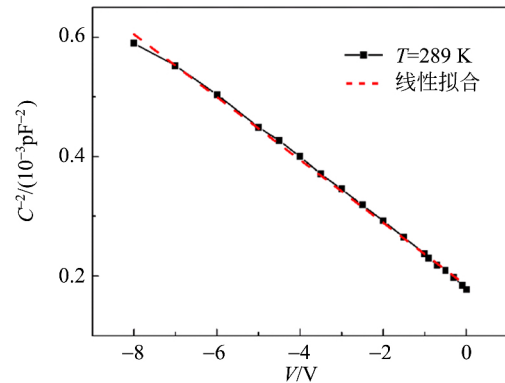


图 5 $T=289$ K 时的 C^{-2} -V 曲线

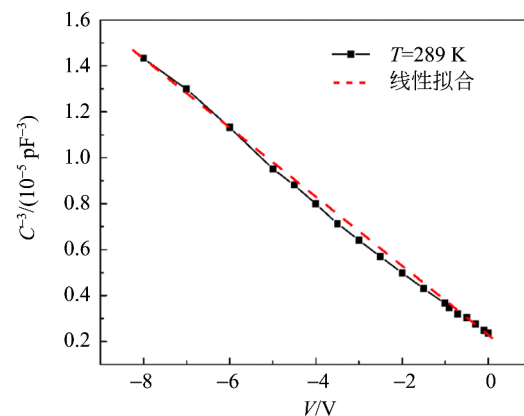


图 6 $T=289$ K 时的 C^{-3} -V 曲线

上述分析数据虽然表明该 GaN 基 LED 样品的 C^{-2} -V 曲线及 C^{-3} -V 曲线均具有一定的线性关系,但是由于图 5 中 C^{-2} -V 曲线更多的点落在拟合直线上,而图 6 中 C^{-3} -V 曲线有轻微的弯曲,这说明 C^{-2} -V 曲线具有更明显的线性关系,因此把该发光二极管的 PN 结类型归类为突变结. 已知 GaN 基蓝光 LED 制备的基本过程为在蓝宝石衬底上先低温生长 1 层很薄的 GaN 缓冲层,然后高温生长掺 Si 的 N 型 GaN 层,最后再生长掺 Mg 的 P 型 GaN,形成 GaN 基 PN 结. 由于掺 Mg 会形成 Mg-H 络合物,导致高浓度 P 型掺杂非常困难,需要热退火处理才能形成有效的 P 型掺杂,因此一般的 GaN 基蓝光 LED 均属于 N^+ P 单边突变结^[9].

此外,为了进一步研究温度变化对 PN 结类型的影响,分析不同温度下的 C^{-2} -V 曲线,其结果如图 7 所示. 图 7 显示,在室温至液氮温区内,

GaN 基 PN 结的 $C^{-2}-V$ 曲线仍保持线性关系,这说明环境温度的变化不会改变该 GaN 基 PN 结的突变结结构特点.

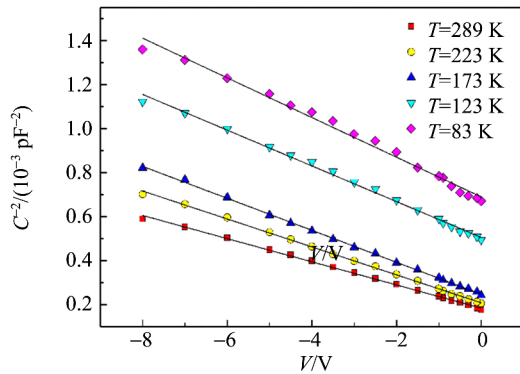


图 7 不同温度下 GaN 基 LED 的 $C^{-2}-V$ 曲线

2.3 计算杂质浓度分布

由于该 GaN 基 PN 结属于 N^+P 单边突变结,所以在反向偏压下,根据 $C^{-2}-V$ 曲线的直线斜率 $\frac{2}{eS^2\epsilon_0\epsilon_r N^*}$ 计算得到的是低杂质浓度一侧,即 P 型区一侧的平均杂质浓度 N^* ,其随温度的变化如表 1 所示. 根据式(5)计算得到的结宽 l 也主要集中在 P 型区一侧. 根据式(6)计算得到的是 P 型区的受主杂质浓度分布 $N_A(l)$, $N_A(l)$ 随结宽 l 的分布如图 8 所示,图 8 中的 N_A 为不同温度下电离了的受主的杂质浓度.

表 1 说明了单边突变结 N^+P 中 P 型区一侧的杂质浓度在 10^{17} cm^{-3} 数量级,与文献[10]相符. 此外,杂质浓度随着温度的降低而减少,这是因为温度降低至一定程度时,杂质将未能全部电离,使得 PN 结空间电荷区浓度降低,从而杂质浓度也随之降低,图 8 也验证了这一现象. 但是,由于杂质浓度分布 $N_A(l)$ 与 $C-V$ 曲线的导数 dC/dV 有关,而导数对 $C-V$ 曲线的起伏变化非常敏感,因此 $C-V$ 曲线的微小起伏造成杂质浓度分布 $N_A(l)$ 在平均杂质浓度 N^* 附近上下波动.

表 1 不同温度下的 GaN 基 PN 结平均杂质浓度

T/K	$N^*/(10^{17} \text{ cm}^{-3})$
289	7.72
223	6.40
173	5.58
123	5.00
83	4.51

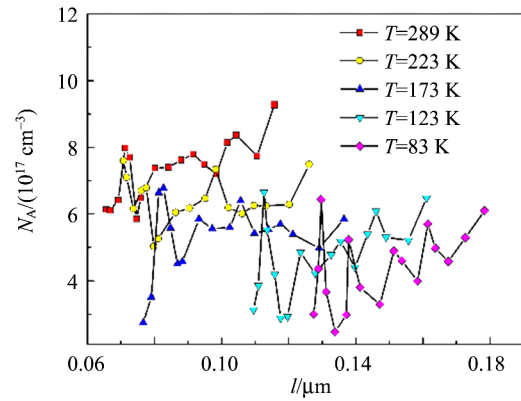


图 8 不同温度下 PN 结杂质浓度随结宽 l 的分布

2.4 计算 PN 结接触电势差 V_D

根据 $C^{-2}-V$ 曲线延长线在电压横轴上的截距,得到各个温度下 PN 结的接触电势差 V_D ,其结果如图 9(a) 所示. 图 9(a) 表明:当温度高于 150 K 时,接触电势差 V_D 在 3.4 V 附近变动;当温度低于 150 K 时,接触电势差 V_D 随着环境温度的降低而快速升高,其数值从 $T=173 \text{ K}$ 时的 3.39 V 上升到 $T=83 \text{ K}$ 的 7.65 V. 根据 PN 结接触电势差公式^[7]

$$V_D = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (7)$$

可知, V_D 与 P 区杂质浓度 N_A 、N 区杂质浓度 N_D 、温度 T 、本征载流子浓度 n_i 有关,同时, n_i 也受到温度 T 的影响:

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp \left(-\frac{E_g}{2k_B T} \right), \quad (8)$$

式中 N_c 和 N_v 分别是导带和价带的有效态密度:

$$N_c = 2 \frac{(2\pi m_e^* k_B T)^{3/2}}{h^3} = 4.3 \times 10^{14} T^{3/2}, \quad (9)$$

$$N_v = 2 \frac{(2\pi m_p^* k_B T)^{3/2}}{h^3} = 8.9 \times 10^{15} T^{3/2}, \quad (10)$$

其中, GaN 导带底电子有效质量 $m_e^* = 0.2m_0$, 价带顶空穴有效质量 $m_p^* = 0.8m_0$ ^[11], 普朗克常量 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, 玻尔兹曼常量 $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, 电子质量 $m_0 = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$, N_c 和 N_v 的单位为 cm^{-3} , T 的单位为 K. 此外,根据 2.3 杂质浓度分析得知, N_A 的变化范围为 $4.5 \times 10^{17} \sim 7.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 而 N_D 数量级一般为 10^{18} cm^{-3} , 由此有 $N_A N_D \sim 10^{36} \text{ cm}^{-6}$, 所以,接触电势差 V_D 改写成:

$$V_D = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_A N_D}{N_c N_v} \right) + \frac{E_g}{e} \approx$$

$$\frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{10^{36}}{38.65 \times 10^{29} T^3} \right) + \frac{E_g}{e} \approx \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{2.6 \times 10^5}{T^3} \right) + \frac{E_g}{e}. \quad (11)$$

因为 E_g 也和温度有关,且一般呈负温度关系.在不考虑杂质浓度对禁带宽度影响的情况下,GaN 材料的禁带宽度 E_g 与温度关系^[11]为

$$E_g = E_g(0) - 7.7 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T+600}, \quad (12)$$

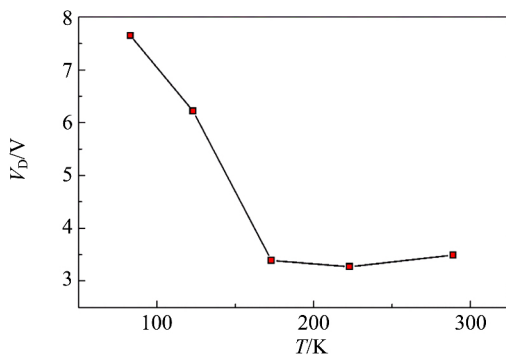
其中 $E_g(0) = 3.47 \text{ eV}$. 由此式(11)可进一步具体写成:

$$V_D \approx \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{2.6 \times 10^5}{T^3} \right) + 3.47 - 7.7 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T+600}. \quad (13)$$

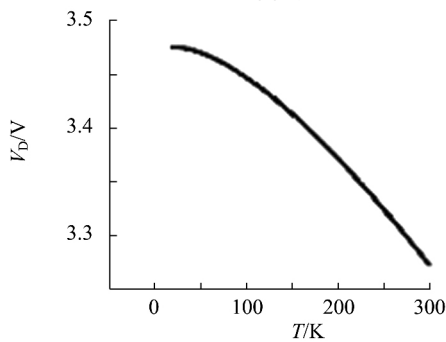
又因为 $k_B T$ 是能量量纲,可以用 eV 表示,且有 $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$,由此根据式(7)最终得到的接触电势差 V_D 与温度的理论关系为

$$V_D \approx 0.86 \times 10^{-4} T \ln \left(\frac{2.6 \times 10^5}{T^3} \right) + 3.47 - 7.7 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T+600}. \quad (14)$$

(14)式中 V_D 单位为 V. 根据式(14)模拟计算得到的 $V_D - T$ 关系如图 9(b)中所示.



(a) 实验曲线



(b) 理论曲线

图 9 GaN 基 LED 接触电势差 V_D 随温度的变化

比较图 9 中接触电势差 V_D 的实验曲线与理论曲线,发现理论与实验 V_D 均随着温度的降低而增加,变化趋势与文献[12]相符.其中在温度高于 150 K 时,实验曲线和理论曲线基本相符,但是随着温度继续降低,实验 V_D 上升特别快,数值大幅升至 7.6 V,而理论模拟值才上升至 3.47 V 左右.这说明实验曲线和理论模拟曲线相比,出现较大偏差.我们认为有 2 个原因造成偏差:

1)在温度高于 150 K 时, $C^{-2} - V$ 曲线的线性还是很明显的,这时可以认为是突变结.但是,当温度小于 150 K 时, $C^{-2} - V$ 曲线会出现稍微的弯曲,此时仍把该 PN 结看成突变结过于简单,由此根据 $C^{-2} - V$ 曲线截距计算出来的结果会有偏差.

2)另一个主要原因是界面态导致,界面态对接触电势会有非常大的影响^[13-14].界面态主要来自界面的悬挂键,或线缺陷延伸到表面形成的界面态,另外,还有表面吸附原子形成的界面态.界面态会在界面附近形成空间电荷区,使能带在界面处弯曲并产生一定的势垒,最终导致 PN 结的总接触电势变大.如果界面态密度很大,会产生接触势垒被高界面态密度钉扎(pinned)的现象.在本实验中,当温度降得很低时(如低于 150 K),会有更多的电子(空穴)被界面态捕获,界面附近的空穴电荷区加强,导致能带在界面处弯曲更厉害,界面态对 PN 结总接触电势差的作用凸显.最终使得 PN 结的总接触电势差快速上升,脱离理论值,并造成 $C^{-2} - V$ 曲线在温度低于 150 K 时出现稍微弯曲的现象.

3 结束语

电容-电压法是一种常用的、有效的二极管 PN 结特性测量方法,不仅可以用于电子二极管及肖特基结的测量,还可以应用于发光二极管 PN 结特性测量中.通过给二极管施加反向偏置电压 V ,测量相应的 PN 结电容 C ,就可以根据 $C - V$ 曲线、 $C^{-2} - V$ 曲线和 $C^{-3} - V$ 曲线来判断二极管结类型,计算接触电势差,获得 PN 结的杂质浓度分布信息.该实验是大学物理专业高年级近代物理实验教学中的常选实验,但平时的实验教学只涉及室温条件下电子二极管 PN 结特性测量.本文把 C-V 法拓展应用到新型 GaN 基发光二极管的 PN 结特性测量中,并通过液氮制冷得到变温的 GaN 基 PN 结的 C-V 曲线,分析温度变化对

GaN 基 PN 结特性的影响. 该实验操作简单, 测量数据可靠, 可作为大学近代物理实验的综合设计性、创新性实验. 该实验不仅能加强学生对电容-电压测量技术的认识和理解, 还可以让学生接触低温制冷, 了解 GaN 基新材料和新器件的特性, 在实验的过程中体验科学技术进步, 拓展知识视野.

参考文献:

- [1] 舒斌, 戴显英, 张鹤鸣. pn 结电容-电压法测量应变 SiGe 禁带宽度[J]. 物理学报, 2004, 53(1): 235-238.
- [2] 何波, 史衍丽, 徐静. C-V 法测量 pn 结杂质浓度分布的基本原理及应用[J]. 红外, 2006, 27(10): 5-10.
- [3] 吴先球, 熊予莹. 近代物理实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 210-216.
- [4] Li E L, Cui Z, Dai Y B, et al. Synthesis and field emission properties of GaN nanowires [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(24): 10850-10854.
- [5] Fu S L, Chen J F, Zhang H B, et al. Characterizations of GaN film growth by ECR plasma chemical vapor deposition [J]. Journal of Crystal Growth, 2009, 311(12): 3325-3331.
- [6] Nakamura S. The roles of structural imperfections in InGaN-based blue light-emitting diodes and laser diodes [J]. Science, 1998, 281(5379): 956-961.
- [7] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 53-61, 146-152, 195-196, 212-221.
- [8] 李潮锐, 刘小伟. 二极管 p-n 结杂质浓度分布模型改进[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(3): 37-40, 46.
- [9] 汪莱, 张贤鹏, 席光义, 等. MOVPE 低温生长的 n 型 GaN 电学特性研究[J]. 物理学报, 2008, 57(9): 5923-5927.
- [10] 谢世勇, 郑有料, 陈鹏, 等. GaN 材料 p 型掺杂[J]. 固体电子学研究与进展, 2001, 21(2): 204-210.
- [11] Levinshtein M E, Rumyantsev S L, Shur M. Properties of advanced semiconductor materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe [M]. New York: John Wiley & Sons, 2001: 1-30.
- [12] Yildirim N, Ejderha K, Turut A. On temperature-dependent experimental I-V and C-V data of Ni/n-GaN Schottky contacts [J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(11): 114506-114506-8.
- [13] Mohammad S N. Contact mechanisms and design principles for Schottky contacts to group-III nitrides [J]. J. Appl. Phys., 2005, 97(6): 063703-063703-19.
- [14] 孙以材. 界面态对 p/p⁺ 外延片高频 C-V 法测定杂质纵向浓度分布的影响[J]. 固体电子学研究与进展, 1984, 4(1): 61-69.

Measuring characteristics of PN junction in GaN-based LED using C-V method

FU Si-lie¹, WANG Chun-an², JIANG Lian-jiao¹, QIN Ying-xing¹, WU Xian-qiu¹
(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Quantum Engineering and Quantum Materials, School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China; 2. School of Electronic and Information, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Temperature-dependent C-V measurement was applied to study the PN junction in GaN-based blue LED. The type of the PN junction was determined, the impurity distribution and the contact potential difference were calculated, and temperature dependence of the characteristics of the PN junction was analyzed. The experiment could not only deepen students' understanding on PN junction and the application of the C-V method, but also help students understand the relevant knowledge of GaN semiconducting materials.

Key words: C-V measurement; GaN-based LED; PN junction; impurity distribution

[责任编辑: 任德香]