

背势垒层结构对 AlGaIn/GaN 双异质结载流子分布特性的影响*

张进成 郑鹏天[†] 董作典 段焕涛 倪金玉 张金凤 郝 跃

(西安电子科技大学微电子学院, 宽带隙半导体技术国防重点学科实验室,

宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

(2008 年 9 月 24 日收到, 2008 年 11 月 2 日收到修改稿)

首先通过一维自洽求解薛定谔/泊松方程, 研究了 AlGaIn/GaN 双异质结构中 AlGaIn 背势垒层 Al 组分和厚度对载流子分布特性的影响. 其次利用低压 MOCVD 方法在蓝宝石衬底上生长出具有不同背势垒层的 AlGaIn/GaN 双异质结构材料, 通过汞探针 CV 测试验证了理论计算的正确性. 理论计算和实验结果均表明, 随着背势垒层 Al 组分的提高和厚度的增加, 主沟道中的二维电子气面密度逐渐减小, 寄生沟道的二维电子气密度逐渐增加; 背势垒层 Al 组分的提高和厚度的增加能有效的增强主沟道的二维电子气限域性, 但是却带来了较高的寄生沟道载流子密度, 因此, 在 AlGaIn/GaN 双异质结构的设计时, 需要在主沟道二维电子气限域性的提高和寄生沟道载流子密度抑制之间进行折中考虑.

关键词: AlGaIn/GaN, 双异质结构, 限域性, 寄生沟道

PACC: 7280E, 7340L, 7360L

1. 引 言

由于 GaN 基材料具有禁带宽度大、电子饱和漂移速度高、击穿场强高和导热性好等特点, 使它成为制作高温、高频及大功率电子器件颇具吸引力的材料. 特别是 GaN 基材料存在极强的自发极化和压电极化效应, 在 AlGaIn/GaN 异质结构中可以形成高温迁移率(高于 $1500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)和高密度(高于 $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$)的二维电子气(2DEG)^[1]. 因此, 基于 AlGaIn/GaN 异质结的高电子迁移率晶体管(HEMT)在大功率微波器件方面具有非常好的应用前景.

迄今为止有关 AlGaIn/GaN 异质结的研究主要集中在单异质结构上, 而 AlGaIn/GaN 双异质结构材料的研究在国内外只有少量报道^[2-9]. 和单异质结构相比, 由于 AlGaIn 背势垒层的引入, 双异质结构材料导带中出现了两个量子阱, 载流子主要分布在这两个量子阱之中^[2], 从而使载流子的分布出现了新的规律, 该规律和 AlGaIn 背势垒层的结构密切相关, 而

且对双异质结构的设计具有重要的意义. 此外, 已有报道较多的指出了 AlGaIn/GaN 双异质结构中可以获得更好的 2DEG 限域性^[3-5], 这有助于 2DEG 迁移率的提高和电流崩塌效应的抑制^[6], 但却几乎没有主沟道 2DEG 限域性和背势垒层结构关系的系统报道.

本文首先通过自洽求解一维薛定谔/泊松方程, 研究了 AlGaIn/GaN 双异质结构中 AlGaIn 背势垒层 Al 组分和厚度对载流子分布特性的影响. 其次利用低压 MOCVD 方法在蓝宝石衬底上生长出具有不同背势垒层的 AlGaIn/GaN 双异质结构材料, 通过汞探针 CV 测试验证了理论计算的正确性.

2. 理论计算

为了充分说明背势垒层结构对载流子分布的影响, 本文首先通过自洽求解一维薛定谔/泊松方程对 AlGaIn/GaN 双异质结构的能带图和载流子分布进行了理论计算. 纵向上异质结界面的导带底势阱对电

* 国防预研项目(批准号: 51311050112, 51308030102, 51308040301), 国家自然科学基金重点项目(批准号: 60736033)和国防基础科研项目(批准号: A1420060156)资助的课题.

[†] E-mail: alittlefat@163.com

子的量子限制作用可以用有效质量近似下的薛定谔方程描述：

$$-\frac{\hbar}{2m^*} \frac{d^2}{dz^2} \Psi_k(z) + E_C(z) \Psi_k(z) = E_k \Psi_k(z), \quad (1)$$

其中 m^* 是电子的有效质量, E_k, Ψ_k 分别为二维电子气的本征能级和波函数, \hbar 是归一化普朗克常数. 导带底 $E_C(z) = -eV(z) + \Delta E_C(z)$, e 是基本电荷电量, $V(z)$ 是静电势, ΔE_C 是导带突变量, 通常取 $\Delta E_C = 0.7 \Delta E_g$. 由电荷分布求导带底则用泊松方程描述, 只考虑施主掺杂时可得

$$\frac{d}{dz} \left[\epsilon_0 \epsilon(z) \frac{d}{dz} V(z) \right] = -\rho(z), \quad (2)$$

$$\rho(z) = e \left[N_D^+(z) - n_{2D}(z) - n_{3D}(z) \right],$$

其中 ϵ_0 是真空介电常数, $\epsilon(z)$ 是静态介电常数, $\rho(z)$ 是所有电荷之和, $N_D^+(z)$ 为电离杂质密度, $n_{2D}(z)$ 为二维电子气密度, $n_{3D}(z)$ 为服从费米分布的体电子密度, $n_{2D}(z)$ 和 $n_{3D}(z)$ 分别由下面两式决定：

$$\begin{aligned} n_{2D} &= \sum_k n_k \\ &= \sum_k \frac{m^* k_B T}{\pi \hbar^2} \ln \left[1 + \exp \left(\frac{E_F - E_k}{k_B T} \right) \right] \\ &\quad \times |\Psi_k(z)|^2, \end{aligned} \quad (3)$$

$$n_{3D}(z) = N_C F_{1/2} \left(\frac{E_F - E_C(z)}{k_B T} \right), \quad (4)$$

其中 E_F 是费米能级和能量零点的差, k_B 是玻尔兹曼常数, T 是温度, N_C 是导带有效态密度, $F_{1/2}(\xi)$ 是二分之一阶费米积分. 本文求解过程中采用的边界条件为: 在异质结界面处, 电位移矢量是连续的, 即

$$P_1 + \epsilon_1 E_1 = P_2 + \epsilon_2 E_2, \quad (5)$$

其中 P_1, P_2 为异质结界面两侧半导体材料的自发极化 (P_{sp}) 和压电极化 (P_{pe}) 之和, E_1, E_2 分别为异质结界面两侧的电场强度. 理论仿真过程中, $Al_x Ga_{1-x} N$ 势垒层禁带宽度为 $E_g(x) = 6.2x + (1-x)3.4 - x(1-x)$; $Al_x Ga_{1-x} N/GaN$ 界面导带带阶为 $\Delta E_C(x) = 0.7 [E_g(x) - E_g(0)]$; $Al_x Ga_{1-x} N$ 势垒层介电常数为 $\epsilon_r(x) = 8.9 - 0.4x$; 压电极化表示为 $P_{pe}(x) = (-3.2x - 1.9x^2) \times 10^{-6} \text{ C/cm}^2$; 由 GaN 层与 $AlGaN$ 层间自发极化差所产生的自发极化为 $P_{sp}(x) = -5.2x \times 10^{-6} \text{ C/cm}^2$.

3. 理论计算结果和分析

为了研究 $AlGaN$ 背势垒层厚度与 Al 组分对双异质结构特性的影响, 本文模拟中采用了这样的结构: (1) 28 nm $Al_{0.3} Ga_{0.7} N/20 \text{ nm GaN}$ 沟道层/10 nm $Al_x Ga_{1-x} N$ 背势垒层/1.2 $\mu\text{m GaN}$ 层, 用以研究背势垒层 Al 组分 x 对双异质结载流子分布和 2DEG 局限性的影响, 模拟计算的结果见图 1; (2) 28 nm $Al_{0.3} Ga_{0.7} N/20 \text{ nm GaN}$ 沟道层/ $d \text{ nm } Al_{0.1} Ga_{0.9} N$ 背势垒层/1.2 $\mu\text{m GaN}$ 层, 用以研究背势垒层厚度 d 对双异质结 2DEG 分布和局限性的影响, 模拟计算的结果见图 2.

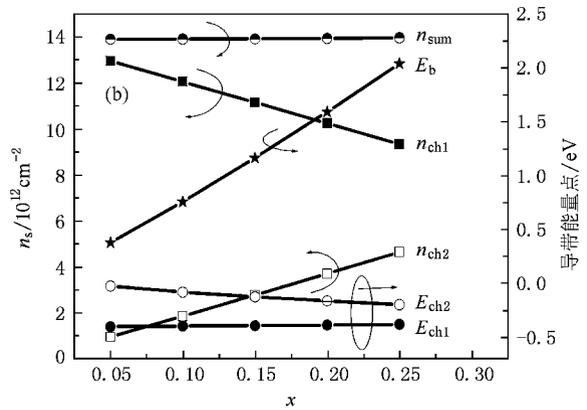
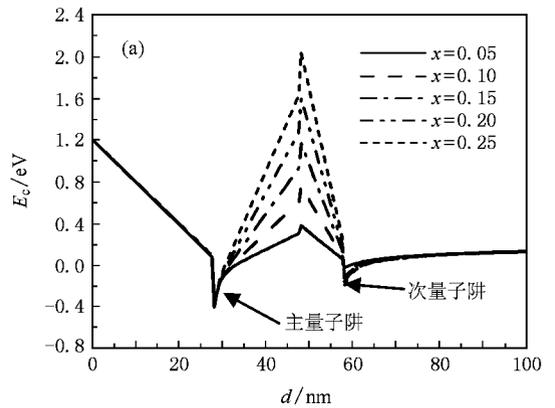


图 1 背势垒层厚度为 10 nm 时, Al 组分 x 的变化对双异质结 2DEG 分布特性的影响 (a) 导带 E_C ; (b) 主量子阱和次量子阱中的面电子密度 n_{ch2} 和量子阱深度 E_{ch1} 、总的面电子密度 n_{sum} 以及背势垒层中导带最高点 E_b 随 Al 组分 x 的变化曲线

由图 1 可见, 由于强的极化效应, 分别在两个 $AlGaN/GaN$ 异质结界面处形成了两个量子阱(主量子阱和次量子阱), 载流子将主要分布在这两个量子阱之中, 形成双导电沟道(分别为主沟道和寄生沟

道)同时由于 Ga_N/AlGa_N 异质界面的极化效应使得两个量子阱之间形成了一个高度随 Al 组分变化的势垒。

随着背势垒层 Al 组分 x 的增加, Ga_N/AlGa_N 异质界面的极化效应逐渐增强, 两个量子阱之间的势垒逐渐变高, 该势垒的变高使得主量子阱逐渐变浅, 阱中的 2DEG 面密度 n_{ch1} 随之呈线性减小趋势 (Al 组分每提高 0.05, n_{ch1} 大约下降 $9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$); 由于次量子阱两侧的半导体材料的导带断续随着背势垒中的 Al 组分升高而增大, 因而次量子阱逐渐变深, 阱中的 2DEG 密度 n_{ch2} 随之线性增加 (Al 组分每提高 0.05, n_{ch1} 大约下降 $9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$); 主量子阱中总的的面电子密度 n_{sum} 几乎保持不变。

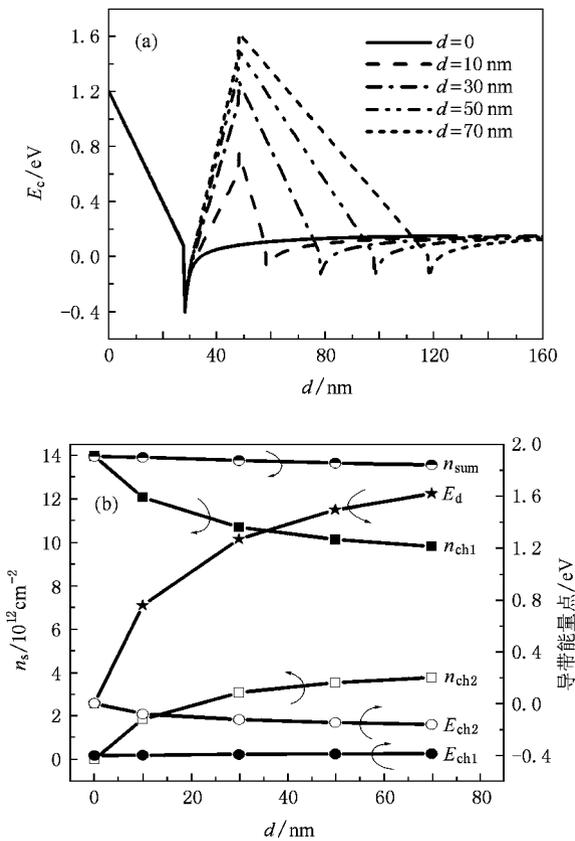


图 2 背势垒层 Al 组分为 0.1 时, 厚度 d 的变化对双异质结 2DEG 分布特性的影响 (a) 导带 E_c (b) 主量子阱和次量子阱中的面电子密度 n_{ch1} 和量子阱深度 E_{ch1} 、总的的面电子密度 n_{sum} 以及背势垒层中导带最高点 E_d 随厚度 d 的变化曲线

从图 2 可以看出, 随着背势垒层厚度 d 的增加, Ga_N/AlGa_N 异质界面的极化效应逐渐增强, 两个量子阱之间的势垒逐渐变高, 该势垒的变高使得主量子阱逐渐变浅, 阱中的 2DEG 面密度 n_{ch1} 逐渐减

小, 减小趋势逐渐变缓, 同时由于次量子阱左侧的背势垒层能带随着厚度的增加逐渐变缓, 次量子阱逐渐变深, 阱中的 2DEG 密度 n_{ch2} 逐渐增加, 增加趋势逐渐变缓; 主量子阱和次量子阱中总的的面电子密度 n_{sum} 略有减小. 本次模拟计算中主、次沟道中 2DEG 面密度的变化逐渐变缓, 这是由于随着背势垒层厚度 d 的增加, 背势垒层逐渐发生了应变弛豫的结果, 这也解释了总的的面电子密度 n_{sum} 随背势垒层厚度 d 的增加略有减小的现象。

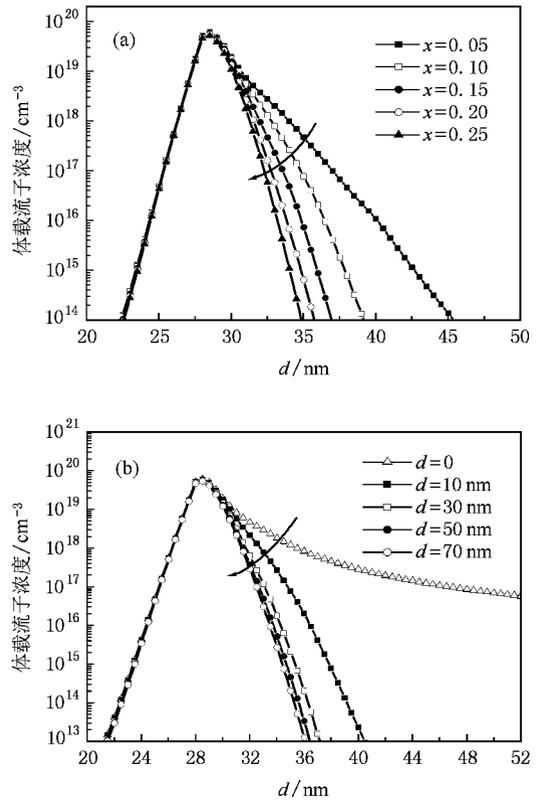


图 3 Al 组分 (a) 和厚度 (b) 对双异质结构中主沟道载流子限域特性的影响 (图中箭头所指方向定性反映了主沟道载流子限域性的变化)

图 3 给出了 AlGa_N 背势垒层 Al 组分和厚度对双异质结构中主沟道载流子限域特性的影响曲线图. 由图 3 可见, AlGa_N 背势垒层 Al 组分的提高或者厚度的增加, 都使得主沟道中 2DEG 分布更窄, 载流子限域特性显著增强. 这种增强在 Al 组分小于 0.2 或者厚度小于 50 nm 时表现得尤为突出. 当 Al 组分超过 0.2 或者厚度大于 50 nm 时, 载流子限域性仍有所增强, 但是已经不那么明显. 结合图 1 和图 2, 限域性的增强可以做如下解释, AlGa_N 背势垒层 Al 组分的提高和厚度的增加都增强了 Ga_N/AlGa_N

异质结中的极化效应,使得该异质结中极化电场增强,背势垒高度增加,GaN/AlGa_xN 异质界面左侧能带弯曲更加陡峭,从而使得主沟道中 2DEG 分布更窄,载流子限域特性显著增强.

虽然 AlGa_xN 背势垒层 Al 组分的提高或者厚度的增加有助于载流子限域特性的增强,但是从图 1 (b)和图 2 (b)中可以看到,随着载流子限域特性的增强,寄生沟道 2DEG 面密度也越来越高.虽然当背势垒层组分从 0.05 提高到 0.25 时主沟道的 2DEG 限域性得到了显著增强(由图 3 (a)可见),但是寄生沟道的载流子密度也从 $9.4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 增加到了 $4.64 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.高的寄生沟道 2DEG 面密度将会影响器件的关断特性^[5],增加器件的开态电阻,使得器件 I/V 特性曲线线性区变差^[9],因此需要在主沟道 2DEG 限域性提高和寄生沟道载流子密度抑制之间进行折中考虑.

本文将模拟计算的结果总结如下:随着背势垒层 Al 组分的提高和厚度的增加,主沟道中的二维电

子气面密度逐渐减小,寄生沟道的二维电子气密度逐渐增加,主沟道和寄生沟道密度之和受应变弛豫的影响,主沟道的二维电子气限域性随着背势垒层 Al 组分的提高和厚度的增加而增强,但是却带来了较高的寄生沟道载流子密度,因此 AlGa_xN/GaN 双异质结构的设计中,需要在主沟道 2DEG 限域性提高和寄生沟道载流子密度抑制之间进行折中考虑.

4. 实验验证

为了验证上述理论模拟的结果,本文设计并生长了 3 种 AlGa_xN/GaN 双异质结构,其中一种为常规单异质结构(编号为 SH),即背势垒层厚度 $d = 0$,组分 $x = 0$,纵向结构如图 1 (a)所示;另三种为 AlGa_xN/GaN 双异质结构,如图 1 (b)所示,采用的背势垒层分别为:1) 10 nm 厚 Al_{0.25}Ga_{0.75}N 背势垒层(编号为 DH₁);2) 10 nm 厚 Al_{0.1}Ga_{0.9}N 背势垒层(编号为 DH₂);3) 70 nm 厚 Al_{0.1}Ga_{0.9}N 背势垒层(编号为 DH₃).

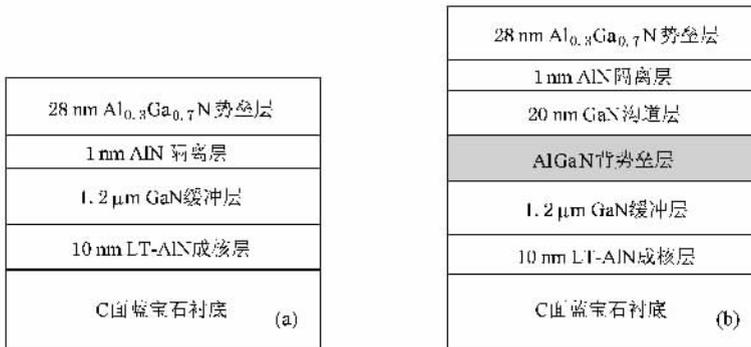


图 4 AlGa_xN/GaN 异质结材料样品结构示意图 (a)单异质结构 (b)双异质结构

本文 GaN 基材料生长采用自主开发的 3 片 2 in (1 in = 2.54 cm) 低压 MOCVD 设备在(0001)面蓝宝石衬底进行.放入反应室前蓝宝石衬底的清洗流程为:首先在有机溶剂中超声清洗 5 min,然后利用煮沸的 3H₂SO₄:1H₃NO₄ 的混合溶液处理 10 min,再用去离子水漂洗三次,最后用高纯 N₂ 吹干.生长过程中保持反应室压力为 40 Torr(1 Torr = 1.33322 × 10² Pa)不变,首先在 1050 °C 下 NH₃ 和 H₂ 混合气氛中对蓝宝石衬底进行高温预处理 10 min,然后降温到 620 °C 生长厚度为 10 nm 的 AlN 成核层,接着升温至 1020 °C 生长厚度为 1.2 μm 的 GaN 缓冲层,最后保持生长温度 1020 °C 不变,生长其余各层.

5. 结果和讨论

图 5 给出了四种异质结结构材料的 $C-V$ 测试曲线和载流子分布图.由图 5 (b)可以看出,单异质结构样品 SH 只有一个 2DEG 沟道,而三种双异质结构样品中均出现了双沟道现象,主沟道载流子密度峰值均在 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 附近,但是寄生沟道载流子密度峰值差异较大,其中 DH₁ 和 DH₃ 寄生沟道密度峰值较高,分别为 $7.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 和 $6.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,样品 DH₂ 寄生沟道密度峰值很低,只有 $3.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

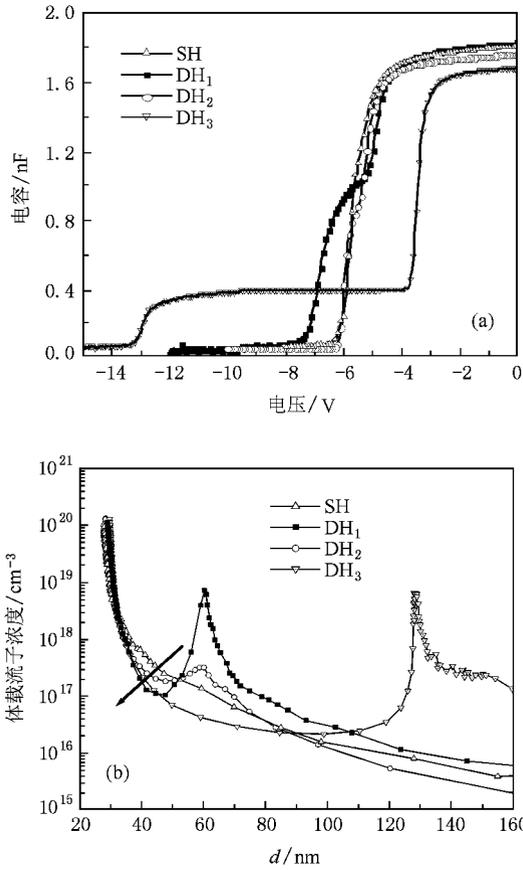


图 5 汞探针 CV 测试结果(箭头所指方向定性反映了主沟道 2DEG 限域性的变化) (a)C-V 测试曲线 (b)C-V 测试得到的载流子分布曲线

图 6 给出了实验得到的背势垒层结构对载流子分布特性的影响曲线. 为了方便和理论结果进行比较, 图中也给出了各个样品理论计算的载流子面密度. 从图 6(a)中可以看到, 随着背势垒层 Al 组分 x 的增加, 主沟道中的 2DEG 面密度 n_{ch1} 呈线性减小趋势, 寄生沟道中的 2DEG 密度 n_{ch2} 呈线性增加趋势; 主量子阱中总的面电子密度 n_{sum} 几乎保持不变. 这和理论计算的结果完全一致. 从图 6(b)中可以看到, 实验测试得到的载流子密度的变化趋势和理论计算得到的结果也非常的一致, 即随着背势垒层厚度 d 的增加, 主沟道中的 2DEG 面密度 n_{ch1} 越来越小, 减小趋势先快后慢; 寄生沟道中的 2DEG 面密度 n_{ch2} 越来越大, 变化趋势也先快后慢; 主、次量子阱中总的面电子密度 n_{sum} 略有减小. 其中 2DEG 面密度的变化逐渐变缓以及 n_{sum} 的减小依然可以用应变弛豫来解释. 另外, 由于汞探针台对 2DEG 的耗尽作用, 测量得到的 n_{ch1} 和总的面电子密度 n_{sum} 均小于

理论计算的结果.

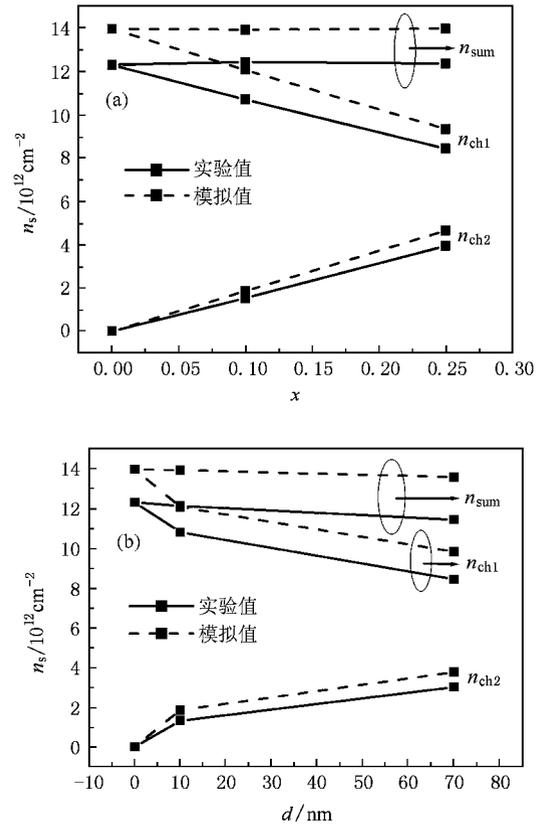


图 6 背势垒层结构对载流子分布特性的影响曲线 (a)背势垒层 Al 组分 x 不同的样品 SH($x = 0$), DH₁($x = 0.1$)和 DH₂($x = 0.25$) 中载流子面密度的变化图 (b)图为背势垒层厚度 d 不同的样品 SH($d = 0$), DH₂($d = 10$ nm)和 DH₃($d = 70$ nm) 中载流子面密度的变化图

为了验证背势垒层结构对主沟道 2DEG 限域性的影响, 本文分别由图 3 和图 5(b)计算得到了主沟道 2DEG 分布的半高宽(FWHM), 结果如表 1 所示. 在计算 2DEG 分布半高宽时假设图 5(b)中主沟道载流子为对称分布.

表 1 四种样品的主沟道 2DEG 分布的半高宽

样品编号	SH	DH ₁	DH ₂	DH ₃
理论计算的 2DEG 分布半高宽/nm	1.32	1.03	1.12	1.08
实验得到的 2DEG 分布半高宽/nm	1.42	1.07	1.14	1.03

从 SH, DH₁ 和 DH₂ 的 2DEG 分布半高宽比较来看, 理论计算和 CV 测试都呈现这样的规律, FWHM(DH₁) < FWHM(DH₂) < FWHM(SH). 这说明随着异

质结样品中背势垒层 Al 组分的提高,主沟道 2DEG 限域性逐渐增强;从 SH, DH₂ 和 DH₃ 的 2DEG 分布半高宽比较来看,理论计算和 CV 测试都呈现这样的规律, FWHM(DH₃) < FWHM(DH₂) < FWHM(SH). 这说明随着异质结样品中背势垒层厚度的增加,主沟道 2DEG 限域性逐渐增强. 实验和理论计算表现出来的规律非常一致,这充分验证理论模拟的正确性.

和背势垒层 Al 组分较低且厚度很薄的 DH₂ 样品相比,虽然 DH₁ 和 DH₃ 样品主沟道 2DEG 的限域性有明显增强,但是寄生沟道载流子密度也更高. DH₁ 和 DH₃ 的寄生沟道 2DEG 面密度分别达到了 $3.24 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 和 $2.81 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 分别占总 2DEG 面密度的 27.9% 和 22.6%, 而 DH₂ 样品寄生沟道的载流子浓度只有 $5.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 只占总 2DEG 密度的 4.2%. 因此在 AlGaIn/GaN 双异质结构的设计中,需要在主沟道 2DEG 限域性提高和寄生沟道载流子密度抑制之间进行折中考虑.

6. 结 论

本文首先通过自洽求解一维薛定谔/泊松方程,研究了 AlGaIn/GaN 双异质结构中 AlGaIn 背势垒层 Al 组分和厚度对载流子分布的影响. 其次利用低压 MOCVD 方法在蓝宝石衬底上生长出具有不同背势垒层的 AlGaIn/GaN 双异质结构材料,通过汞探针 CV 测试验证了理论计算的正确性. 理论计算和实验结果均表明,随着背势垒层 Al 组分的提高和厚度的增加,主沟道中的二维电子气面密度逐渐减小,寄生沟道的二维电子气密度逐渐增加,主沟道和寄生沟道密度之和受应变弛豫的影响;此外,背势垒层 Al 组分的提高和厚度的增加有助于主沟道的二维电子气限域性的增强,但是却带来了寄生沟道二维电子气密度的增加,因而在 AlGaIn/GaN 双异质结构的设计中,需要在主沟道 2DEG 限域性提高和寄生沟道载流子密度抑制之间进行折中考虑.

- [1] Ambacher O, Smart J, Shealy J R, Weimann N G, Chu K 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 3222
- [2] Simin G, Hu X, Tarakji A, Zhang J, Koudymov A, Saygi S, Yang J, Khan M A, Shur M, Gaska R 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** L1142
- [3] Heikman S, Keller S, Green D S, DenBaars S P, Mishra U K 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 5321
- [4] Maeda N, Saitoh T, Tsubaki K, Nishida T, Kobayashi N 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 3118
- [5] Chu R M, Zhou Y G, Liu J, Wang D, Chen K J, Lau K M 2005

IEEE Trans. Electron Devices **52** 438

- [6] Liu J, Zhou Y, Zhu J, Lau K M 2006 *IEEE Electron Dev. Lett.* **27** 10
- [7] Chu R M, Zheng Y D, Zhou Y G, Gu S L, Shen B, Han P, Zhang R, Jiang R L, Shi Y 2003 *Appl. Phys. Lett.* **77** 669
- [8] Zervos M, Kostopoulos A, Constantinidis G 2001 *Phys. Stat. Sol. (a)* **188** 259
- [9] Gaska R, Shur M S, Fjeldly T A, Bykhovski A D 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 3009

The effect of back-barrier layer on the carrier distribution in the AlGaIn/GaN double-heterostructure^{*}

Zhang Jin-Cheng Zheng Peng-Tian[†] Dong Zuo-Dian Duan Huan-Tao Ni Jin-Yu Zhang Jin-Feng Hao Yue

(The School of Microelectronics, Xidian University, Key Lab. of Fundamental Science for National Defense on Wide Band-Gap Semiconductor Technology, Key Lab of Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, Xi'an 710071, China)

(Received 24 September 2008; revised manuscript received 2 November 2008)

Abstract

The one-dimensional self-consistent simulation of the band diagram and carrier distribution of the AlGaIn/GaN double hetero-structure is firstly carried out to research the effect of the thickness and Al content of the AlGaIn back-barrier layer on the carrier distribution. Then the AlGaIn/GaN double hetero-structure materials with different back-barrier layers were grown by low-pressure MOCVD method on c-plane sapphire substrate. The mercury probe CV measurement was carried out to verify the results of theoretical simulation. The results of theoretical simulation and experiment both indicate that with the increase of Al content and thickness of the AlGaIn back-barrier layer, the two-dimensional electron Gas density becomes low in the main channel and high in the parasitic channel gradually. The increase of Al content and thickness of the AlGaIn back-barrier layer effectively enhances the two-dimensional electron Gas confinement but simultaneity produces higher-density parasitic channel. So a compromise has to be made between the improvement of the two-dimensional electron Gas confinement and the restraint of the carrier density in parasitic channel in designing the double heterostructure.

Keywords: AlGaIn/GaN, double heterostructure, carrier confinement, parasitic channel

PACC: 7280E, 7340L, 7360L

^{*} Project supported by the National Defense Scientific and Technical Pre-Research Program of China (Grant Nos. 51311050112, 51308030102, 51308040301), the Key Program of National Nature Science Fund (Grant No. 60736033) and the National Fundamental Science Research Program (Grant No. A1420060156).

[†] E-mail: alittlefat@163.com