

调制掺杂 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结中 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 势垒层表面态及其他局域态性质研究*

刘杰 沈波 周玉刚 周慧梅 郑泽伟 张荣 施毅 郑有炓

(南京大学物理系, 南京 210093)

摘要: 通过测量调制掺杂 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结样品的变频电容-电压 ($C-V$) 特性, 对 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 势垒层表面态的性质进行了研究。结果发现在小偏压下, 样品的电容随着测量信号频率的增加而下降, 说明势垒层中存在表面态。实验数据分析表明: 表面态密度约为 10^{13}cm^{-2} 量级, 表面态的时间常数比势垒层中其他局域态大。随着空间隔离层厚度的增加, 势垒层中其他局域态密度随之增加。在金属电极和 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 势垒层之间加入 Si_3N_4 绝缘层可以对表面态起到显著的钝化作用, 使表面态密度降为 $\sim 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 量级。

关键词: III族氮化物; 调制掺杂异质结构; 势垒层; 表面态

PACC: 7280E; 7320A

中图分类号: TN386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)08-0822-05

1 引言

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结构体系由于其在高温、高频、大功率微波电子器件领域的广泛应用, 已成为半导体科学与技术研究中的热点^[1~4]。在 III族氮化物的异质结构场效应晶体管(HFET)研制上, 已经获得了优异的直流(DC)和射频(RF)特性^[5~7]。近期的研究表明, 在 GaN 和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 势垒层的表面存在表面态, 这对 GaN 和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结中载流子的分布有显著的影响^[8~11], 从而对基于调制掺杂 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结构器件的性能有着很大的影响, 会降低载流子浓度和漏电流, 减小器件的跨导和阈值电压。通过在金属电极下面加入一层绝缘层(钝化层), 可以降低表面态的密度, 提高器件的电学性能。

在本文的工作中, 我们制备了两种基于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结的不同结构——金属-半导

体(MS)结构和金属-绝缘层-半导体(MIS)结构。通过对这两种样品变频电容-电压性质的测量与分析, 研究了 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 势垒层表面态和其他局域态的性质。

2 实验

实验中使用的调制掺杂 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结构采用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)方法在(0001)面蓝宝石衬底上生长得到^[12]。首先在448℃下生长一层GaN缓冲层, 之后在1071℃下生长2.0μm厚的非故意掺杂GaN(r-GaN)层; 然后生长一层非故意掺杂 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ (r-AlGaN)隔离层; 最后在1080℃下生长一层掺Si的 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ (r-AlGaN)势垒层。该异质结构的示意图如图1所示。

为了研究调制掺杂 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结构的表面态, 我们采用标准器件工艺分别制备了两种不同的结构, 一种是金属-半导体结构, 另一种是

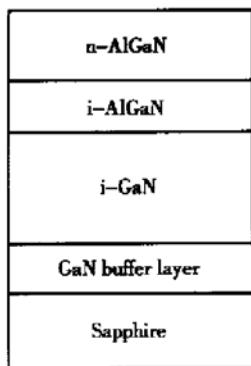
* 国家重点基础研究专项基金(No. G20000683), 国家自然科学基金(批准号: 60136020, 60276031)和国家高科发展计划(No. 2002AA305304)资助项目

刘杰 男, 1978年出生, 硕士研究生, 从事III族氮化物异质结构物性研究。

沈波 男, 1963年出生, 博士, 教授, 博士生导师, 从事III族氮化物材料和器件研究。

2002-09-27 收到, 2003-01-02 定稿

©2003 中国电子学会

图 1 调制掺杂 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结构示意图Fig. 1 Schematic structure of modulation doped $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructures used in this study

金属-绝缘层-半导体结构。共制备了四个样品, 样品 1 和样品 2 为 MS 结构, 所用调制掺杂 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结构的 n-AlGaN 层的厚度为 25nm, 样品 1 的 i-AlGaN 层厚度为 5nm, 样品 2 的 i-AlGaN 层厚度为 25nm; 样品 3 和样品 4 为 MIS 结构, 在调制掺杂 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结构表面和栅电极之间有一层厚度为 30nm 的 Si_3N_4 绝缘层, n-AlGaN 层的厚度与 MS 结构的样品一样, 同样是 25nm, 样品 3 的 i-AlGaN 层厚度为 3nm, 样品 4 为 5nm。

欧姆接触为 Au(300nm, 顶层)/Pt(40nm)/Al(100nm)/Ti(15nm) 四层金属结构, 肖特基接触为 Au(300nm, 顶层)/Pt(40nm) 双层金属结构。在 MIS 结构中, 绝缘层为 30nm 厚的 Si_3N_4 , MS 和 MIS 结构的电极形状不同, 如图 2 所示。图 2(a) 所示的是 MS 结构(样品 1 和样品 2) 的电极图形, 肖特基接触

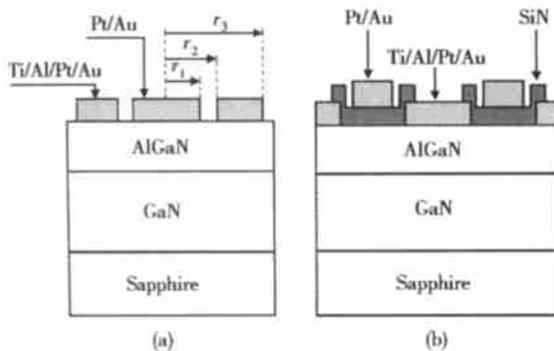


图 2 不同结构样品上金属电极结构示意图 (a) MS 结构; (b) MIS 结构

Fig. 2 Schematic structures of the metal contacts on modulation doped $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructures

(a) MS structure; (b) MIS structure

为半径 r_1 (200μm) 的圆点, 欧姆接触为与其同心的

内外半径分别为 r_2 (300μm) 和 r_3 (600μm) 的圆环。MIS 结构(样品 3 和样品 4) 的电极图形如图 2(b) 所示, 欧姆接触是整片的金属, 栅极接触是半径为 100μm 的圆点, 绝缘层(Si_3N_4) 为与其同心的圆点, 半径为 200μm, 欧姆电极与栅电极之间的距离为 50μm。

样品的变频电容-电压($C-V$) 特性是采用 HP 4294A LCR 测量仪在室温下测得, 表面态和其他局域态的密度和时间常数通过对实验数据的数值拟合得到。

3 结果分析

半导体中费米能级的位置反映了电子的填充状态, 当费米能级的位置发生改变时, 表面陷阱(表面态)中的电子数将随之改变。这一变化在宏观上表现为一个与表面态密度和时间常数相关的电容, 它是信号频率 ω 和直流偏压 V 的函数。

对于孤立的表面态, 电子的俘获率 $R_n(t)$ 和发射率 $G_n(t)$ 可以用以下两个方程表示^[13]:

$$R_n(t) = N_{ss} C_n [1 - f(t)] n_s(t) \quad (1)$$

$$G_n(t) = N_{ss} e_n f(t) \quad (2)$$

其中 N_{ss} 为表面态密度; C_n 为电子俘获系数; e_n 为电子发射系数; $f(t)$ 为费米分布函数; $n_s(t)$ 为表面处的电子浓度; t 为时间。对于具有 n 型缓冲层的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结构, 可以忽略空穴的影响。在样品的电极上加上一个交流小信号, 单位面积上孤立表面态的总跨导为:

$$Y_{ss} = q[R_n(t) - G_n(t)] / \delta V_s \quad (3)$$

其中 q 为电子电量; V_s 为异质结的表面势能; δV_s 为表面势能的偏移量。由(1)~(3)式, 总的跨导可以表示为^[13]:

$$Y_{ss} = j \omega \frac{q^2}{kT} \times \frac{N_{ss} f_0 (1 - f_0)}{1 + j \omega f_0 / C_n N_{s0}} \quad (4)$$

其中 k 为玻耳兹曼常数; T 为绝对温度; f_0 为直流偏压下的费米函数; N_{s0} 为直流偏压下的表面电子浓度。在直流小偏压下, 孤立表面态的位置接近费米能级, 故费米分布函数的值约为 1/2, 跨导的表达式可以简化为:

$$Y_{ss} = N_{ss} q^2 \frac{\omega^2 \tau}{2kT(4 + \omega^2 \tau^2)} + j \omega N_{ss} q^2 \frac{1}{kT(4 + \omega^2 \tau^2)} \quad (5)$$

从而等效平行跨导和电容可表示为:

$$G_p = \omega C_p^0 \frac{\omega^2 \tau}{2kT(4 + \omega^2 \tau^2)} \quad (6)$$

$$C_p = C_p^0 \frac{1}{kT(4 + \omega^2 \tau^2)} \quad (7)$$

其中 $C_p^0 = q^2 N_{ss}$, $\tau = 1/C_n n_{s0}$, $\omega = 2\pi f$; τ 为表面态的时间常数; ω 为测量信号的频率. 通过 Cf 实验数据的数值拟合, 可以得到表面态密度 N_{ss} 和时间常数 τ .

图 3 所示的是样品 1(实线) 和样品 3(虚线) $C-V$ 曲线中的一条, 交流小信号的频率变化范围为 $3\text{kHz} \sim 1\text{MHz}$. 从图中可以看出, 当所加负偏压较大时, 电容值较小, 相应的耗尽区边界位于 GaN 层内. 随着负偏压减小, 电容值出现一个平台, 这对应于异质结界面处二维电子气(2DEG) 的耗尽. 从这些 $C-V$ 曲线中, 我们可以得到电容-频率(Cf) 特性曲线, 通过数值拟合的方法, 得到表面态的密度 N_{ss} 和时间常数 τ .

样品的 Cf 曲线如图 4 所示, 黑点为实验值,

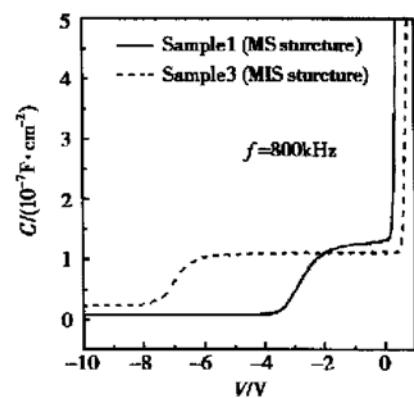
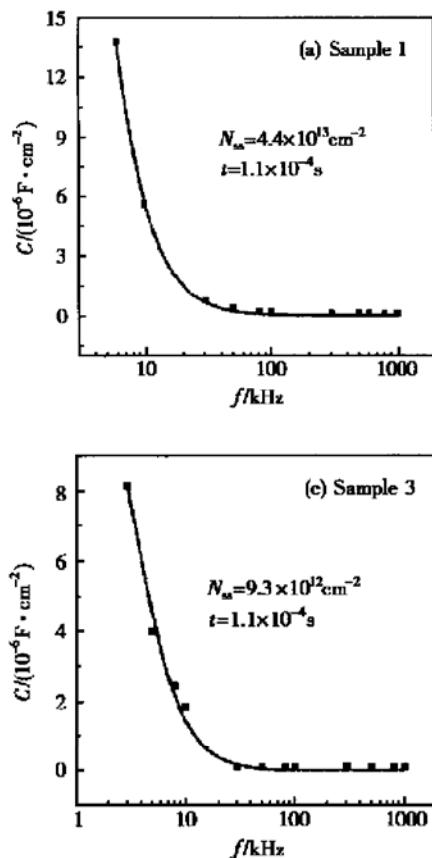


图 3 室温下 800kHz 典型 MS(样品 1) 和 MIS(样品 3) 结构的 $C-V$ 曲线

Fig. 3 Typical $C-V$ curves of MS structure (sample 1) and MIS structure (sample 3), measured under the frequency of 800kHz at room temperature

实线为数值拟合的结果. 其中 C 值是取 $V = 0.7\text{V}$ 时的电容值, 因为在该偏压下, 费米能级扫过表面

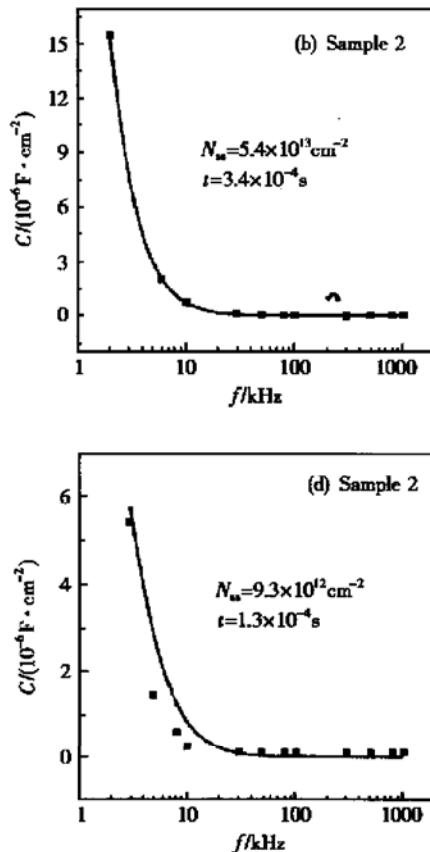


图 4 Cf 实验测量及数值拟合结果 (a) MS 结构(空间层厚度 5nm); (b) MS 结构(空间层厚度 25nm); (c) MIS 结构(空间层厚度 3nm); (d) MIS 结构(空间层厚度 5nm)

Fig. 4 Experimental Cf curves and the numerical fitting results (a) MS structure with a 5nm -thick spacer; (b) MS structure with a 25nm -thick spacer; (c) MIS structure with a 3nm -thick spacer; (d) MIS structure with a 5nm -thick spacer

态,引起电子填充/发射,表现为电容的变化。表面态密度 N_{ss} 和时间常数 τ 的值如表 1 所示。

表 1 调制掺杂 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 上 MS 结构和 MIS 结构的表面态时间常数 τ 、态密度 N_{ss} 及等效电容 C_{p0}

Table 1 Time constant τ , surface states density N_{ss} , and the identical surface states capacitance C_{p0} of various MS and MIS structures based on modulation doped $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructures

样品编号	$\tau/\mu\text{s}$	N_{ss}/cm^{-2}	C_{p0}/F
1	110	4.4×10^{13}	3.4×10^{-7}
2	340	5.4×10^{13}	4.1×10^{-7}
3	110	9.3×10^{12}	7.3×10^{-8}
4	130	9.3×10^{12}	7.2×10^{-8}

从表 1 的结果中可以看出,对于不同的样品结构,表面态密度 N_{ss} 和时间常数 τ 也不同。对于 MS 结构,当空间层(r-AlGaN 层)的厚度增加时,表面态的时间常数也随之增大,表面态密度有少许的增大。而对于 MIS 结构,表面态密度和时间常数随着空间层厚度的增加,均只有微小的增加。这一结果是由于本实验所采用的方法造成的,因为变频 $C-V$ 法不能将表面态的等效电容与 r-AlGaN 和 n-AlGaN 层中的局域态等效电容完全分离开来,所以通过这一方法拟合得到的态密度和时间常数实际上包含了 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 势垒层中局域态的相应部分。当 r-AlGaN 层(空间层)的厚度增加时,空间层中局域态的数量也随之增加,从而从 $C-f$ 曲线拟合得到的总的态密度(包括 n-AlGaN 层 r-AlGaN 层中的局域态和 n-AlGaN 表面的表面态)也随之增加。由于 n-AlGaN 层和 r-AlGaN 层中局域态的时间常数大于 n-AlGaN 层表面态的时间常数,当 n-AlGaN 层和 r-AlGaN 层中局域态密度增加时,等效的总的时间常数将变大。比较样品 1 和样品 4,异质结的结构完全一样,只是 MIS 结构(样品 4)中,金属栅电极下有一层绝缘层。两个样品的时间常数接近,但是样品 4(MIS 结构)的表面态密度远小于样品 1(MS 结构),前者约为后者的 21%。这一结果表明,位于栅电极和 n-AlGaN 表面之间的绝缘层可以有效地钝化 n-AlGaN 层表面,降低表面态密度。

4 结论

采用变频 $C-V$ 测量和数值拟合的方法,研究了调制掺杂 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结构中 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 势垒层表面态的性质。结果表明在调制掺杂 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结构势垒层表面存在态密度约为 10^{13}cm^{-2} 量级的表面态,表面态的时间常数小于势垒层中其他的局域态。随着空间隔离层厚度的增加,势垒层中局域态的密度随之增加。MIS 结构的表面态密度小于 10^{13}cm^{-2} ,说明位于金属栅电极和 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 势垒层表面之间的 Si_3N_4 绝缘层能够有效地钝化表面态,从而提高器件性能。

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结构势垒层表面存在态密度约为 10^{13}cm^{-2} 量级的表面态,表面态的时间常数小于势垒层中其他的局域态。随着空间隔离层厚度的增加,势垒层中局域态的密度随之增加。MIS 结构的表面态密度小于 10^{13}cm^{-2} ,说明位于金属栅电极和 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 势垒层表面之间的 Si_3N_4 绝缘层能够有效地钝化表面态,从而提高器件性能。

参考文献

- [1] Khan M A, Chen Q, Shur M S, et al. Microwave operation of GaN/AlGaN doped channel heterostructure field effect transistors. IEEE Electron Device Lett, 1996, 17: 325
- [2] Khan M A, Kuznia J N, Olson D T. Microwave performance of a 0.25 μm gate AlGaN/GaN heterostructure field effect transistor. Appl Phys Lett, 1994, 65: 1121
- [3] Aktas O, Fan Z F, Mohammad S N, et al. High temperature characteristics of AlGaN/GaN modulation doped field effect transistors. Appl Phys Lett, 1996, 69: 3872
- [4] Bykhovski A D, Gelmont B L, Shur M S. Elastic strain relaxation in $\text{GaN}-\text{AlGaN}-\text{GaN}$ semiconductor insulator-semiconductor structures. J Appl Phys, 1995, 78: 3691
- [5] Sheppard S T, Doverspike K, Pribble W L, et al. High power microwave GaN/AlGaN HEMT's on semi-insulating silicon carbide substrates. IEEE Electron Device Lett, 1999, 20: 161
- [6] Dang X Z, Welty R J, Qiao D, et al. Fabrication and characterization of enhanced barrier AlGaN/GaN HFET. Electron Lett, 1999, 35: 602
- [7] Chen C H, Keller S, Parish G, et al. High transconductance self-aligned AlGaN/GaN modulation doped field effect transistors with regrown ohmic contacts. Appl Phys Lett, 1998, 73: 3147
- [8] Khan M A, Hu X, Simin G, et al. AlGaN/GaN metal oxide semiconductor heterostructure field effect transistor. IEEE Electron Device Lett, 2000, 21: 63
- [9] Khan M A, Shur M S, Chen Q C, et al. Current/voltage characteristic collapse in AlGaN/GaN heterostructure insulated gate field effect transistors at high drain bias. Electron Lett, 1994, 30: 2175
- [10] Ren F, Hong M, Chu S N G, et al. Effect of temperature on Gd_2O_3 (Gd_2O_3)/ GaN metal oxide semiconductor field effect transistors. Appl Phys Lett, 1998, 73: 3893
- [11] Vetary R, Zhang N Q, Keller S, et al. The impact of surface states on the DC and RF characteristics of AlGaN/GaN HFETs. IEEE Trans Electron Devices, 2000, 48(3): 560
- [12] Shen B, Sameya T, Arakawa Y. Influence of strain relaxation of the $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ barrier on transport properties of the two-dimensional electron gas in modulation doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructures. Appl Phys Lett, 2000, 76: 2746

- [13] Nicollian E H, Goetzberger A. The Si-SiO₂ interface electrical properties as determined by the metal insulator-silicon conductance technique. J Bell Syst Tech, 1967, 46: 1055

Surface States and Other Local States in Al_xGa_{1-x}N Barriers of Modulation-Doped Al_xGa_{1-x}N/GaN Heterostructures*

Liu Jie, Shen Bo, Zhou Yugang, Zhou Huimin, Zheng Zewei,
Zhang Rong, Shi Yi and Zheng Youdou

(Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Characteristic of the surface states of modulation-doped Al_{0.22}Ga_{0.78}N/GaN heterostructures is investigated by means of frequency-dependent capacitance-voltage (*C-V*) technique. It is found that the capacitance decreases with increasing signal frequency under small forward bias voltage. This indicates the presence of the surface states on the surface of the barrier layer. The analysis of experimental data indicates that the density of the surface states is $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, and the time constant of the surface states is smaller than that of other local states in the barrier layer. When the thickness of the spacer increases, the density of the local states in the Al_{0.22}Ga_{0.78}N layer increases correspondingly. The presence of the insulating layer between the metal contact and the surface of Al_{0.22}Ga_{0.78}N can passivate the surface states remarkably, which decrease the density of surface states down to $\sim 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

Key words: III-nitride; modulation heterostructures; barrier layer; surface states

PACC: 7280E; 7320A

Article ID: 0253-4177(2003)08-0822-05

* Project supported by Special Fund for Major State Basic Research Projects (No. G20000683), National Natural Science Foundation of China (Nos. 60136020, 60276031), and National High Technology Research & Development Project of China (No. 2002AA305304)

Liu Jie male, was born in 1978, master student. He is primarily involved in III-nitride heterostructures.

Shen Bo male, was born in 1963, professor. He is primarily involved in III-nitride materials and devices.

Received 27 September 2002, revised manuscript received 2 January 2003

©2003 The Chinese Institute of Electronics