

## GaN HEMT 栅边缘电容用于缺陷的研究\*

王鑫华 庞磊 陈晓娟 袁婷婷 罗卫军 郑英奎 魏珂 刘新宇†

(中国科学院微电子研究所, 微电子器件与集成技术重点实验室, 北京 100029)

(2010年10月18日收到; 2010年12月27日收到修改稿)

本文对 GaN HEMT 栅漏电容的频率色散特性进行分析, 认为栅边缘电容的色散是导致栅漏电容频率色散特性不同于圆肖特基二极管电容的主要原因. 通过对不同栅偏置条件下缺陷附加电容与频率关系的拟合, 发现小栅压下的缺陷附加电容仅满足单能级缺陷模型, 而强反向栅压下的缺陷附加电容同时满足单能级和连续能级缺陷模型. 实验中栅边缘电容的频率色散现象在钝化工艺后出现, 其反映的缺陷很可能是钝化工艺引入, 且位于源漏间栅金属未覆盖区域的表面. 最后通过低频噪声技术进一步验证栅边缘电容提取缺陷参数的可行性. 低频噪声技术获得的单能级缺陷时间常数与强反向栅压下栅边缘电容拟合的结果一致.

**关键词:** HEMT, 边缘电容, 缺陷, 低频噪声

**PACS:** 71.10Ca, 73.40.Kp, 71.55.Eq

## 1. 引言

GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 的研制已进入亚微米时代, 对器件和微波单片集成电路 (MMIC) 的成品率, 重复性和可靠性提出了更高的要求<sup>[1, 2]</sup>. 研究发现缺陷对器件频率特性、功率等影响很大<sup>[3-5]</sup>, 更严重影响器件的可靠性<sup>[6, 7]</sup>, 尤其是栅漏之间的势垒层缺陷和表面缺陷, 易导致虚栅效应<sup>[8]</sup>, 进而增加外沟道电阻, 导致功率压缩<sup>[9]</sup>. 对于功率器件来说, 如何确定缺陷的位置及来源, 尽量减少缺陷非常重要. 目前缺陷表征的技术有 CV 技术<sup>[3, 10-13]</sup>、脉冲技术<sup>[14]</sup>、低频噪声技术<sup>[10, 15, 16]</sup>、场致发光分析<sup>[17]</sup>等. 其中 CV 技术一直以来都是研究缺陷的有力工具, 缘于其设备普及, 测试简单, 模型较成熟, 通用性好.

目前用 CV 方法分析 HEMT 缺陷的理论绝大部分都是借鉴基于 MOS 器件的经典 CV 分析法. Miller 在原有模型的基础上, 结合 AlGaIn/GaN HEMT 器件结构特点, 运用 CV 方法获得材料的缺陷信息, 缺陷类型包括异质结界面缺陷、金半接触缺陷、势垒层缺陷及 2DEG 沟道缺陷<sup>[18]</sup>. 需要注意的是, 模型中将势垒层看做 MOS 的氧化层, 空间电

荷区电容看作沟道调制电容,  $C_{it}$  和  $R_{it}$  为异质界面或沟道内部缺陷引起的附加电容和损耗. 利用上述经典 CV 模型, 若用大尺寸肖特基二极管的 CV 曲线来求缺陷参数, 则结果是合理的; 若用 HEMT 栅源或栅漏的 CV 曲线来求解缺陷参数, 则结果需要进一步讨论. Kokorev 等人<sup>[19]</sup>在研究 GaAs MESFETs 时将栅源或栅漏电容看成以下三部分的总和: 栅-沟道电容、边缘电容、极间电容, 其中边缘电容是指栅两侧边缘耗尽区域的电容 (即耗尽区中除栅下矩形耗尽区域以外的电容). 对于高频 HEMT 而言, 器件一般具有短栅, 而短栅意味着较小的栅面积, 即较小的栅-沟道电容, 这样, 边缘电容在总电容中的比重凸显, 在研究缺陷时必须要考虑.

Liu 等人<sup>[10]</sup>在研究 AlGaIn/GaN HEMT 缺陷时认为边缘电容的频散特性很可能与未被栅覆盖的势垒层及其表面缺陷有关. 本论文将对 GaN HEMT 边缘电容进行进一步研究, 包括边缘电容所反映的缺陷位置以及怎样将边缘电容用于材料缺陷参数的求解. 另外, 低频噪声技术已成功用于包括 InP, GaAs, GaN 在内的多种材料的 HEMT, HBT 的质量分析和可靠性评估, 它的高灵敏度有助于准确反映缺陷信息. 文章最后结合低频噪声技术进一步验证利用边缘电容求解缺陷参数的可行性.

\* 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号:2010CB327500)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: xyliu@ime.ac.cn

## 2. 实 验

器件的外延材料用 MOCVD 生长,材料结构自上而下为: GaN 帽层、AlGaIn 势垒层、AlN 插入层、GaN 缓冲层、SiC 衬底. AlGaIn 势垒层的铝组分为 0.25. 器件重要工艺步骤包括标记、欧姆接触、注入隔离、淀积钝化层、刻孔、肖特基接触等. 欧姆接触采用 TiAlNiAu,金属蒸发后在 870°C N<sub>2</sub> 中快速退火 30 s. 注入隔离采用氮注入,用 TLM 方法测得比接触电阻率为 10<sup>-6</sup> Ωcm<sup>2</sup>. 接着用 PECVD 淀积钝化层 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (1200 Å). 光刻栅图形,显影坚膜后用 Matrix 打底胶. 用 ICP 刻蚀栅孔,蒸发栅金属前用 HCl/H<sub>2</sub>O(1:3) 溶液清洗 40 s. 蒸发栅金属 NiAu 之后电镀空气桥,用于源之间的连接,最后蒸发布线金属. 器件采用凹栅槽结构,栅长  $L_g = 0.5 \mu\text{m}$  (光学栅),单个栅宽  $W_g = 100 \mu\text{m}$  (十指),源漏间距  $L_{sd} = 4.5 \mu\text{m}$  (称为样品 A),另一版图设计了栅长  $L_g = 80 \text{ nm}$  的单管(电子束栅),栅宽  $W_g = 60 \mu\text{m}$ ,源漏间距  $L_{sd} = 4 \mu\text{m}$  (称为样品 B).

CV 测量使用 HP4284A LCR 表,用安捷伦 VEE 语言编制的自动测试程序自动控制 and 读取 CV 数据. 此 LCR 表的测量范围从 20 Hz 到 1 MHz. CV 测量使用了扫描电压和扫描频率两种测量方式. CV 测量时叠加的交流信号幅度为 0.1 V,扫描电压时电压范围为 (-10 V, 3V),扫描频率时频率范围为 (4 kHz—1 MHz).

低频噪声 (LFN) 测量基本使用安捷伦提供的测试方案. 测量系统主要包括低噪声电流前置放大器 LNA SR570, 频谱分析仪 FFT SR760, Agilent 4142, 1 Hz 低通滤波器, GSG 在片测试探针台, 电缆线 (BNC, SMA), GPIB 线. SR760 测量频率从 1 Hz 到 100 kHz, 测量模式设置为 PSD 模式, 以保证输出的噪声功率谱为归一化信号; SR570 可以提供最大偏置电压为 5 V, 最大补偿电流为 5 mA, 测量时需要适当调节栅控, 保证输出电流不过载.

## 3. 讨论与分析

### 3.1. 栅边缘电容频率色散分析

根据 Kokorev 等人<sup>[19]</sup>提到的关于边缘电容的定义,边缘电容是指耗尽区中除栅下矩形耗尽区域

之外的电容,可表达为

$$C_{\text{fringe}} = C_g - C_{\text{gch}} - C_{\text{pad}}, \quad (1)$$

其中  $C_g$  为所测栅源电容或栅漏电容,  $C_{\text{gch}}$  为栅与沟道之间的矩形耗尽区电容,  $C_{\text{pad}}$  为栅与其他电极间的电容. 文献 [19] 中提到的栅-沟道电容是以 MESFET 为例说明,若应用于 HEMT,该栅-沟道电容应包括势垒层电容和沟道调制电容,如果仅认为是沟道调制电容则难以理解. 对于大尺寸肖特基二极管来说,其本征边缘电容的比例非常小,通常可以忽略.

图 1 是栅长分别为 0.5 μm (a) 和 80 nm (b) 的 GaN HEMT 栅漏电容  $C_{\text{gd}}$  在不同频率下随栅漏电压的变化. 可以看到,栅漏电容随频率的色散程度在阈值附近不明显,而在强反向栅电压时表现最为明显,在小的栅电压时也有一些色散现象. 这与一般报道的肖特基二极管的电容频散现象有所不同<sup>[10,18]</sup>. 肖特基二极管的栅电容色散在阈值附近最为明显,而在其他电压下较小. 这种差异也许暗示了不同的缺陷信息. 栅源(漏)电容与肖特基二极管电容的最大差别在于其边缘电容在短栅长的器件中表现明显,由于  $C_{\text{pad}}$  与频率没有关系,所以  $C_{\text{gd}}$  的色散现象很有可能是边缘电容起主导作用,其色散程度已经掩盖栅-沟道电容  $C_{\text{gch}}$  本身的色散. Liu 等人<sup>[10]</sup>也将栅漏电容较大的色散归结为边缘电容的色散. 另外,Miller 等人<sup>[18]</sup>根据 GaN 基肖特基二极管电容的频散现象,利用经典 MOS CV 模型分别就缺陷在异质结界面、2DEG 沟道、金半接触界面、势垒层做了详细的计算,计算结果表明由不同位置缺陷模型得出的缺陷密度和时间常数都是相近的,且在合理的范围,不能具体确定缺陷的位置. 而对于

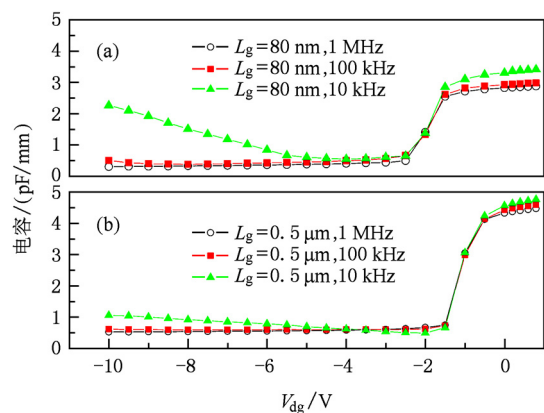


图 1 GaN HEMT 栅漏电容的频率色散特性 (a) 栅长  $L_g = 80 \text{ nm}$ ; (b) 栅长  $L_g = 0.5 \mu\text{m}$

边缘电容影响较大的器件则需要寻找其他的方法来推算缺陷参数.

定义边缘电容包括边缘本征电容和缺陷引起的附加电容,即

$$C_{\text{fringe}} = C_{\text{fringe}}^{\infty} + C_{\text{trap}}, \quad (2)$$

其中,  $C_{\text{fringe}}^{\infty}$  为边缘本征电容,  $C_{\text{trap}}$  为缺陷引起的电容. 边缘本征电容与栅源或栅漏间距、栅宽、势垒层厚度、偏置电压等有关,与频率无关<sup>[10, 20, 21]</sup>;缺陷引起的电容与频率有关,测量频率低时,缺陷捕获释放电子的行为跟不上信号变化的速度,从而产生了附加电容<sup>[11]</sup>,而在高频测量下该附加电容基本可以忽略,从大量文献中可以看出 1 MHz 测量 CV 时缺陷影响非常小. 由于大尺寸圆形肖特基二极管的边缘电容所占比例非常小,通过等比缩小的方法可以近似获得短栅 HEMT 的栅-沟道电容  $C_{\text{gch}}$ ;边缘本征电容及栅-沟道电容与栅宽  $W$  成比例,绘制  $C_{\text{g}}$  与栅宽  $W$  的关系图,直线在  $C_{\text{g}}$  轴上的截距即为  $C_{\text{pad}}$ <sup>[10, 19]</sup>. 此方法要求版图中含有大尺寸圆形肖特基二极管和变栅宽的 HEMT,对工艺一致性要求也较高,这样才能保证等比缩小方法的合理. 文献<sup>[10, 19]</sup>认为边缘电容在阈值附近出现峰值很可能是人为引入的误差,而实际是不存在的. 如果工艺一致性不是非常高,那么圆形肖特基二极管的表面态和短栅 HEMT 的表面态必有区别,而表面态对电容的影响是使 CV 曲线沿电压轴移动<sup>[22]</sup>,那么不同的表面态导致了 CV 曲线不同的偏移量,微小的电压偏移量在阈值附近引起的电容偏移量将会非常明显,从而导致计算的边缘电容在阈值附近出现峰值. 为了避免由于工艺的不均匀性导致的偏差,我们最好选用同一器件进行计算. 然而这给计算边缘电容带来了困难. 不过没有关系,因为最终目的是获得缺陷引起的附加电容来表征缺陷.

仔细分析(1),(2)式,我们可以发现

$$C_{\text{g}} = C_{\text{gch}} + C_{\text{fringe}}^{\infty} + C_{\text{trap}} + C_{\text{pad}} = C_{\text{h}} + C_{\text{pad}} + C_{\text{trap}}, \quad (3)$$

其中  $C_{\text{h}} + C_{\text{pad}}$  为 HEMT 在高频下测得的栅漏或栅源电容. 将低频下测得的电容与高频下测得的电容作差则很容易获得  $C_{\text{trap}}$ . 若缺陷为单能级缺陷<sup>[18, 23]</sup>则  $C_{\text{trap}}$  满足

$$C_{\text{trap}} = \frac{qD_{\text{it}}}{1 + (\omega\tau)^2}. \quad (4)$$

若缺陷为连续能级缺陷,则  $C_{\text{trap}}$  满足

$$C_{\text{trap}} = \frac{qD_{\text{it}}}{\omega\tau \tan(\omega\tau)}. \quad (5)$$

图 2 为样品 A-1 在  $V_{\text{gd}} = 0$  V 时 CV 频率扫描数据(4 kHz—1 MHz). 若用单能级缺陷模型拟合,获得缺陷密度为  $3.02 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ,时间常数为 3.2  $\mu\text{s}$ ,拟合相关度为 0.955;若用连续能级缺陷模型拟合,拟合相关度为 0.545,说明该模型与数据的相关性较弱,即缺陷为连续能级不合适. 图 3 样品 A-1 为  $V_{\text{gd}} = -8$  V 时 CV 频率扫描数据(4 kHz—1 MHz). 若用单能级缺陷模型拟合,获得缺陷密度为  $3.33 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ,时间常数为 37.6  $\mu\text{s}$ ,拟合相关度为 0.996;若用连续能级缺陷模型拟合,获得缺陷密度为  $5.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ,时间常数为 2 ms,拟合相关度为 0.963. 表 1 列出了部分 0.5  $\mu\text{m}$  栅长(样品 A)和 80 nm 栅长(样品 B)的 GaN HEMT 的缺陷参数拟合值.

表 1 样品 A, B 部分器件缺陷参数拟合数据

样品名称	$V_{\text{gd}}/\text{V}$	拟合模型	$D_{\text{it}}/\text{cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$	$\tau/\text{s}$	$R$
样品 A-1	0	单能级	$3.02 \times 10^{11}$	$3.19 \times 10^{-6}$	0.955
		连续能级	—	—	0.545
	-8	单能级	$3.33 \times 10^{12}$	$3.76 \times 10^{-5}$	0.996
		连续能级	$5.21 \times 10^{12}$	$2.00 \times 10^{-3}$	0.963
样品 A-2	0	单能级	$8.79 \times 10^{11}$	$3.95 \times 10^{-6}$	0.985
		连续能级	—	—	0.652
	-8	单能级	$3.00 \times 10^{12}$	$2.79 \times 10^{-5}$	0.999
		连续能级	$5.04 \times 10^{12}$	$2.90 \times 10^{-3}$	0.998
样品 B-1	0	单能级	$4.76 \times 10^{12}$	$1.48 \times 10^{-5}$	0.963
		连续能级	—	—	0.801
	-8	单能级	$4.12 \times 10^{13}$	$4.23 \times 10^{-5}$	0.995
		连续能级	$1.70 \times 10^{14}$	$2.01 \times 10^{-3}$	0.968
样品 B-2	0	单能级	$4.44 \times 10^{12}$	$2.25 \times 10^{-5}$	0.975
		连续能级	—	—	0.722
	-8	单能级	$3.72 \times 10^{13}$	$3.49 \times 10^{-5}$	0.993
		连续能级	$1.37 \times 10^{14}$	$2.00 \times 10^{-3}$	0.978

我们注意到单能级缺陷模型在以上两种偏置下获得的缺陷密度和时间常数有差异,这与不同偏置下边缘电容所反映的缺陷范围及缺陷能级有关<sup>[24]</sup>. 边缘电容的大小与直流偏置条件有直接关系<sup>[19-21]</sup>. 偏置电压较小时,栅下边缘耗尽区较小,随着反向电压逐渐增大,耗尽区边界先纵向扩展,这一过程中边缘耗尽区增加很小,若继续增大反向电压并超过阈值电压时,耗尽区边界基本不纵向扩展,转而横向扩展,此时边缘耗尽区域增加明显<sup>[19]</sup>. 在大的反向栅压下,边缘耗尽区覆盖栅漏之间的大

部分区域,也涉及钝化界面,其缺陷密度很大可以理解. 另外,随着负向栅电压的增大,材料表面或内部费米能级逐渐降低. 当费米能级穿过缺陷能级  $E_i$  时,缺陷对电子的作用更加明显,其引起的附加电容将达到最大值<sup>[3]</sup>,而位于势垒层的缺陷或表面态是导致附加电容的主要原因. 这与 Liu 等人<sup>[10]</sup>认为缺陷密度和激活能依赖偏置水平的观点是一致的. 从图中还可以观察到  $V_{gd} = -8$  V 时的缺陷电容满足连续缺陷能级模型,但拟合获得的缺陷时间常数在 ms 级,远大于单能级缺陷拟合得到的  $\mu\text{s}$  级结果. 此结果并不奇怪, Qian 等人<sup>[14]</sup>在用脉冲测试方法研究电流崩塌时,也获得 ms 级缺陷俘获时间,并

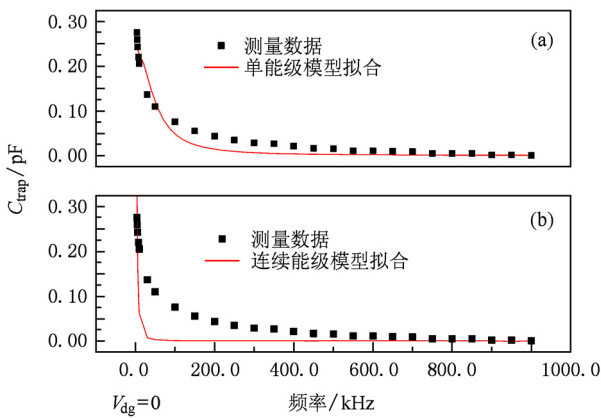


图2 为样品 A-1  $V_{gd} = 0$  V 时 CV 频率扫描数据(4 kHz—1 MHz) (a)单能级缺陷模型拟合,缺陷密度为  $3.02 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ , 时间常数为  $3.2 \mu\text{s}$ ,拟合相关度为 0.955; (b)连续能级缺陷模型拟合,拟合相关度为 0.545,该模型不适合此缺陷

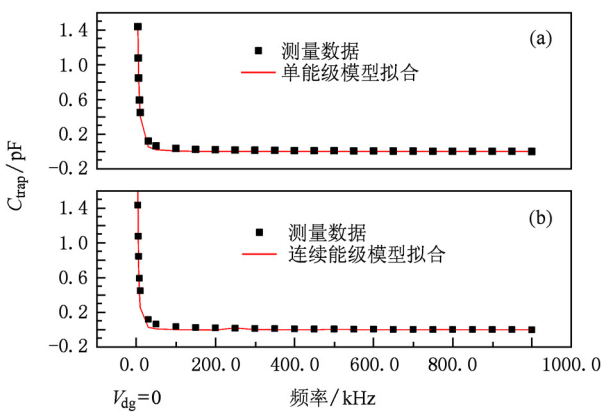


图3 为样品 A-1 在  $V_{gd} = -8$  V 时 CV 频率扫描数据(4 kHz—1 MHz) (a)单能级缺陷模型拟合,缺陷密度为  $3.33 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ,时间常数为  $37.6 \mu\text{s}$ ,拟合相关度为 0.996; (b)连续能级缺陷模型拟合,缺陷密度为  $5.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ,时间常数为,拟合相关度为 0.963

认为这不是单个电子导致的,而是电子群的动态平衡所致. 这似乎意味着多个能级缺陷捕获释放电子的群速度小于单能级缺陷捕获释放电子的速度.

### 3.2. 缺陷位置

缺陷的具体位置是值得关心的问题. 边缘耗尽区涉及势垒层及其钝化界面,边缘电容所反映的缺陷主要来源于上述 2 个区域. Liu 等人<sup>[10]</sup>在研究 GaN HEMT 边缘电容时认为缺陷位于栅漏之间未被栅覆盖的区域,很可能来源于  $\text{SiO}_2$  钝化层. Dammann 等人<sup>[7]</sup>在 GaN 体材料上制作 MIS 电容(介质为 SiN),利用高低频电容技术计算得 SiN 与 GaN 的界面缺陷密度在  $10^{12}$  量级. 为了进一步确定本实验中电容频率色散所反映的缺陷位置,我们专门设计版图并改变工艺流程,以观察色散发生的具体工艺步骤. 样品 A 和样品 B 是先淀积 SiN 介质后蒸发栅金属,改变工艺流程后是先蒸栅极后淀积 SiN 钝化层,这样可以在钝化前测量器件是否存在电容频率色散. 实验发现,在蒸栅后钝化前器件并没有出现频率色散现象,但在淀积 SiN 后强负栅压下的频率色散现象非常明显(图 4),而小栅压附近的频率色散并没有出现,还需要进一步研究. 显然, SiN 工艺引入了额外的缺陷或者改变了原先 GaN 帽层表面的性质,导致在强反向栅压下电容频率色散明显. 这与 Vetury<sup>[8]</sup>关于钝化剂在帽层表面引入施主的观点是一致的. 对器件进行单能级模型拟合可获得  $V_{gd} = -8$  V 时对应的缺陷密度为  $D_{it} = 2 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ,时间常数  $\tau = 44 \mu\text{s}$ ,拟合相关度 0.98. 可以看到 SiN 与 GaN 帽层的界面缺陷密度很大,这将影响器件的直流和功率特性.

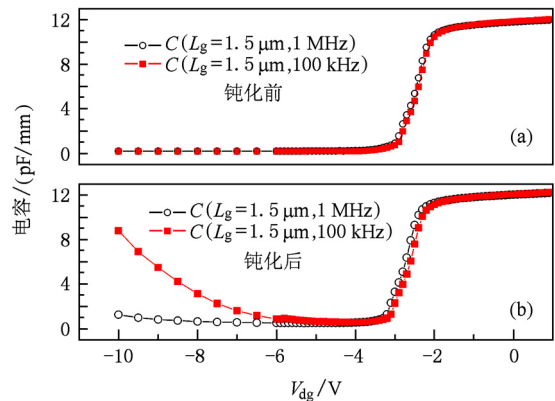


图4 钝化前(a)和钝化后(b)栅漏电压的频率色散(栅长  $L_g = 1.5 \mu\text{m}$ )

### 3.3. 低频噪声技术的验证

一些研究者试图通过低频噪声技术确定缺陷的位置. 器件中的缺陷会在低频噪声特性中有所体现. 而产生复合噪声(G-R 噪声)是重要的低频噪声之一,它被认为与深能级缺陷关系密切. 深能级缺陷常常扮演着产生复合中心的角色. 许多关于 GaN HEMT 低频噪声的研究表明噪声功率谱上叠加的“鼓包”是产生复合噪声的典型标志<sup>[10, 16, 25-27]</sup>. G-R 噪声源的位置至今仍在研究. 但缺陷不可能在 HEMT 的 2DEG 沟道中,因为其对应的缺陷俘获截面小到难以实现. 研究发现该噪声存在激活能,所以缺陷也不可能在临近 2DEG 沟道的 GaN 层,因为电子隧穿至 GaN 层不需要激活能. 所以引起 G-R 噪声的缺陷最有可能在 AlGaIn 势垒层及其表面<sup>[26, 27]</sup>. 这与边缘电容反映的缺陷位置相近,所以通过低频噪声技术进一步验证上述的缺陷信息变得很有意义.

禁带中单能级的 G-R 噪声谱<sup>[26]</sup>可以表示为

$$\frac{S_I}{I^2} = \frac{4N_{is}}{L_0 W n_s^2} \frac{\tau F(1-F)}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (6)$$

其中,  $N_{is}$  为缺陷面密度,  $L_0, W$  分别为沟道长度和宽度,  $n_s$  为 2DEG 面密度,  $\omega$  为圆频率,  $\tau$  为缺陷时间常数,  $F$  为费米分布函数. 远高于或远低于费米能级的缺陷能级或者全被占据或者全空,其表现出对自由载流子调制作用的可能性很小,只有在费米能级附近的缺陷能级对电子的捕获释放作用较明显,所以(6)式中的  $F$  一般取 0.5,即缺陷能级等于费米能级<sup>[28]</sup>. 另一个重要的低频噪声为  $1/f$  噪声,其噪声谱可以表示为

$$\frac{S_I}{I^2} = \frac{\alpha}{Nf^\gamma}, \quad (7)$$

其中,  $\alpha$  为 Hooge 系数,  $N$  为栅下总载流子数,  $\gamma$  通常为接近 1 的指数,  $f$  为频率. 总低频噪声近似为这两种主要噪声的叠加,通过对实测低频噪声的拟合能获得噪声表达式中的相关参数.

图 5 为归一化到漏电流的 GaN HEMT(样品 A-1) 低频噪声功率谱密度(1—100 kHz). 实验采用输出特性为线性区的偏置条件<sup>[25]</sup>,具体为  $V_d = 0.5$  V,  $I_d = 5$  mA,  $V_g = -0.665$  V. 图中空心方形数据为实验测量所得,拟合的总噪声曲线以及  $1/f$  噪声分量、G-R 噪声分量均在图中标出. 曲线末端有部分数据偏离拟合曲线,很可能是散粒噪声的影响,其在特

低频段往往被  $1/f$  噪声和产生复合噪声所掩盖<sup>[29]</sup>. 总低频噪声曲线拟合的结果为 Hooge 系数  $\alpha = 1.8 \times 10^{-2}$ ,  $\gamma = 1.37$ ,  $N_{is} = 2.6 \times 10^{12}$  cm<sup>-2</sup>,  $\tau = 30$   $\mu$ s.

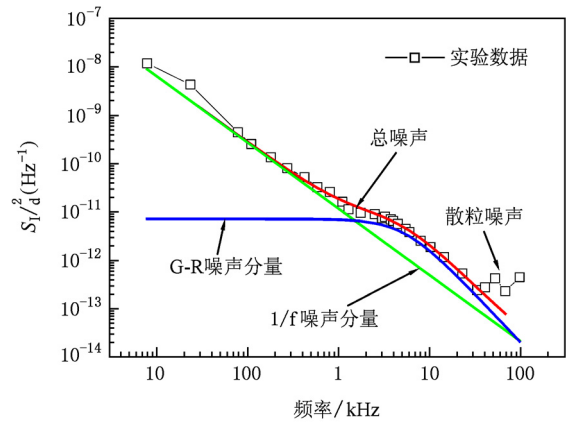


图 5 归一化的 GaN HEMT(样品 A-1) 低频噪声功率谱密度

比较低频噪声测试结果与 CV 测试结果不难发现,低频噪声技术获得的缺陷参数与强负栅压下栅边缘电容求出的缺陷参数符合,单能级缺陷时间常数为均为 30  $\mu$ s 左右. 这从侧面说明用栅边缘电容的频率色散特性来反映 GaN HEMT 势垒层及其表面的缺陷在一定程度上是可行的.

## 4. 结 论

本文对 GaN HEMT 栅漏电容的频率色散特性进行深入的分析,认为栅边缘电容的色散是导致栅漏电容频率色散特性不同于圆肖特基二极管电容的主要原因. 该频率色散特性反映了栅外势垒层及其表面的缺陷信息,并给出一种提取该缺陷密度和时间常数的方法. 文章用单能级缺陷模型和连续能级缺陷能级分别对不同偏置条件下缺陷附加电容与频率的关系进行拟合,发现缺陷附加电容在小栅压下仅满足单能级模型,而强反向栅压下同时满足两种模型. 通过改变工艺流程发现器件的电容频率色散现象在淀积 SiN 介质后表现出来,由此认为边缘电容的色散可以反映钝化工艺引入的缺陷信息,并且缺陷很可能在源漏间栅金属未覆盖区域的表面. 最后通过低频噪声技术对器件进行进一步分析,以验证栅边缘电容获取缺陷参数的可行性. 用低频噪声技术求得的单能级缺陷时间常数与强反向栅压下栅边缘电容拟合的结果相近.

感谢测试部门工程师欧阳思华和李艳奎对 CV 测试系统的维护和对低频噪声测试平台搭建的支持. 作者感谢中

国科学院物理研究所提供的外延片.

- [1] Waltireit P, Bronner W, Kiefer R, Quay R, Kühn J, Van Raay F, Dammann M, Müller S, Libal C, Meier T, Mikulla M, Ambacher O 2010 *CS MANTECH Conference* Oregon Portland, USA, May 17th—20th, 2010 p137
- [2] Del Alamo J A, Joh J 2009 *Microelectron. Reliab.* **49** 1200
- [3] Wang R X, Xu S J, Shi S L, Beling C D, Fung S, Zhao D G, Yang H, Tao X M 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 3
- [4] Burgaud P, Constancias L, Martel G, Savina C, Mesnager D 2007 *Microelectron. Reliab.* **47** 1653
- [5] Chou Y C, Leung D, Smorchkova I, Wojtowicz M, Grundbacher R, Callejo L, Kan Q, Lai R, Liu P H, Eng D, Oki A 2004 *Microelectron. Reliab.* **44** 1033
- [6] Park S Y, Floresca C, Chowdhury U, Jimenez J L, Lee C, Beam E, Saunier P, Balistreri T, Kim M J 2009 *Microelectron. Reliab.* **49** 478
- [7] Dammann M, Pletschen W, Waltireit P, Bronner W, Quay R, Müller S, Mikulla M, Ambacher O, van der Wel P J, Murad S, Rüdle T, Behtash R, Bourgeois F, Riepe K, Fagerlind M, Sveinbjörnsson E Ö 2009 *Microelectron. Reliab.* **49** 474
- [8] Vetry R, Zhang N Q Q, Keller S, Mishra U K 2001 *IEEE Trans. Electron Devices* **48** 560
- [9] Conway A M, Chen M, Hashimoto P, Willadsen P J, Micovic M *CS MANTECH Conference*, Texas Austin, USA, May 14—17 p99
- [10] Liu W L, Chen Y L, Balandin A A, Wang K L 2006 *J. Nanoelectron. Optoelectron.* **1** 258
- [11] Shealy J R, Brown R J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 032101
- [12] Wang X H, Zhao M, Liu X Y, Pu Y, Zheng Y K, Wei K 2010 *Chin. Phys. B* **19** 097302
- [13] Zhang J F, Wang C, Zhang J C, Hao Y 2006 *Chin. Phys.* **15** 1060
- [14] Qian L, Jiangfeng D, Mohua Y, Shenghui L, Wei Z, Jianxin X, Qi Y 2000 *the 8th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology* Shanghai, China, Oct 23—26 p923
- [15] Balandin A, Morozov S V, Cai S, Li R, Wang K L, Wijeratne G, Viswanathan C R 1999 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **47** 1413
- [16] Rice A K, Malloy K J 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 7892
- [17] Bouya M, Malbert N, Labat N, Carisetti D, Perdu P, Clément J C, Lambert B, Bonnet M 2008 *Microelectron. Reliab.* **48** 1366
- [18] Miller E J, Dang X Z, Wieder H H, Asbeck P M, Yu E T, Sullivan G J, Redwing J M 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 8070
- [19] Kokorev M F, Maleev N A 1996 *Solid State Electron.* **39** 297
- [20] Parvesh G, Sujata P, Subhasis H, Mridula G, Gupta R S 2007 *Microelectron. J.* **38** 848
- [21] Gangwani P, Gupta M, Kaur R, Pandey S, Haldar S, Gupta R S *Asia-Pacific Microwave Conference*, Hong Kong, China, Dec 16—20 p1
- [22] Nicollian E H, Brews J R 1982 *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology* (1st ed) (New York: Wiley Interscience) p928
- [23] Goetzberger E H N a A 1968 *Microelectron. Reliab.* **7**
- [24] Hashizume T, Alekseev E, Pavlidis D, Boutros K S, Redwing J 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 1983
- [25] Balandin A, Morozov S, Wijeratne G, Cai S J, Li R, Li J, Wang K L, Viswanathan C R, Dubrovskii Y 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 2064
- [26] Rumyantsev S L, Pala N, Shur M S, Borovitskaya E, Dmitriev A P, Levinshtein M E, Gaska R, Khan M A, Jinwei Y, Xuhong H, Simin G 2001 *IEEE Trans. Electron Devices* **48** 530
- [27] Levinshtein M E *15th International Conference on Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations* Hong Kong, China, August 23—26 p213
- [28] Jones B K 1994 *IEEE Trans. Electron Devices* **41** 2188
- [29] Vandamme L K J 1994 *IEEE Trans. Electron Devices* **41** 2176

## Investigation on trap by the gate fringe capacitance in GaN HEMT\*

Wang Xin-Hua Pang Lei Chen Xiao-Juan Yuan Ting-Ting Luo Wei-Jun  
Zheng Ying-Kui Wei Ke Liu Xin-Yu<sup>†</sup>

(Key Laboratory of Microelectronics Device & Integrated Technology, Institute of  
Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

(Received 18 October 2010; revised manuscript received 27 December 2010)

### Abstract

The analysis of the frequency dispersion characteristics of the gate-drain capacitance of GaN HEMT indicates that the gate fringe capacitance is responsible for the dispersion difference between the gate-drain capacitance and circle Schottky diode. By fitting the relationship between the additional capacitance of trap and frequency, we discover that the additional capacitance of trap can meet single energy level model only under small gate bias, and meet both single and consecutive energy level model under strong reverse gate bias. The gate fringe capacitance dispersion appears after SiN passivation. It suggests that the trap observed by fringe capacitance is introduced by passivation, which lies in the surface of the ungated region between source and drain. Finally, the low frequency noise technology is used to validate the feasibility of abstracting trap parameter by the gate fringe capacitance. The time constant of single energy level trap obtained by low frequency noise technology is consistent with the result obtained by the gate fringe capacitance under strong reverse gate bias.

**Keywords:** HEMT, fringe capacitance, trap, low frequency noise

**PACS:** 71.10Ca, 73.40.Kp, 71.55.Eq

---

\* Project supported by the National Basic Research Program (973) of China (Grant No. 2010CB327500).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: xyliu@ime.ac.cn