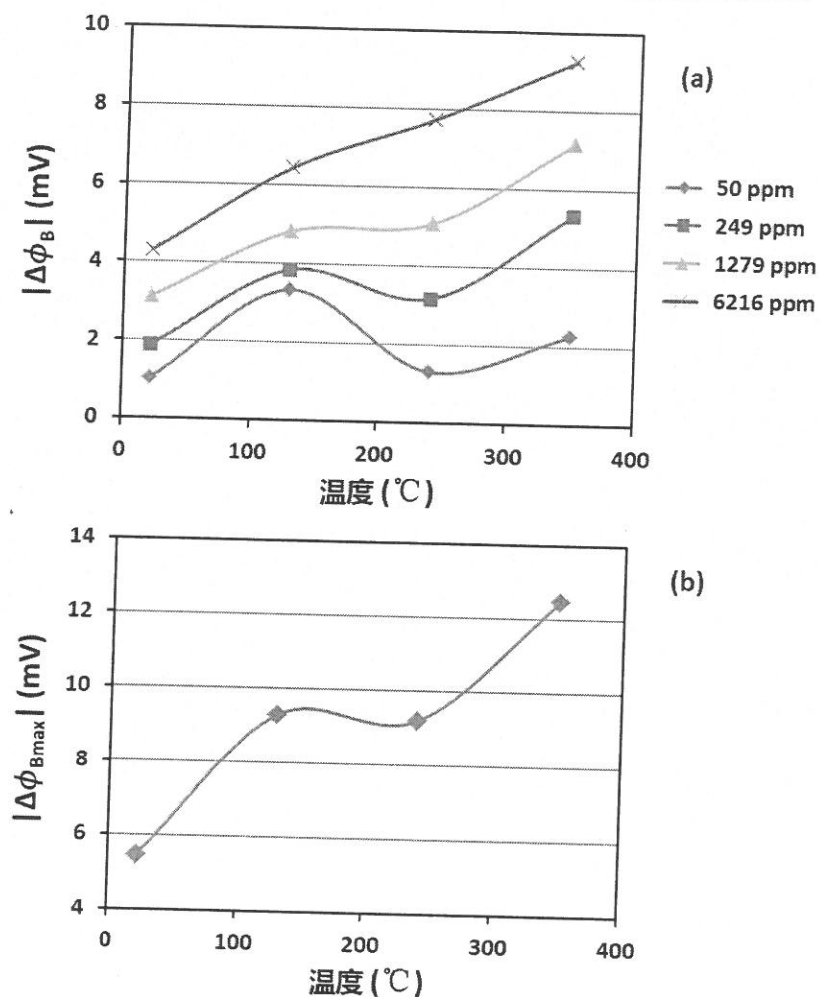



 图3.11 (a) 不同氢气浓度下 $|\Delta\Phi_B|$ 随温度的变化曲线

 (b) $|\Delta\Phi_{Bmax}|$ 随温度的变化曲线

由上述分析可知, 若没有 GaN 体材料漏电流的影响, 器件的传感响应度会随着温度的升高呈上升趋势。在高温下, n_{leak} 的显著增大会严重制约传感响应度。在一定的漏电流水平下, 器件有一个使响应度最大的工作温度。提高 GaN 体材料的绝缘性从而减小漏电流, 可以提高这一工作温度, 增大器件在高温下的传感响应度, 优化器件的高温工作特性。

3.4 传感器的恢复特性和重复性测试

3.4.1 传感器的恢复特性

实验中分别对栅极 Pt 厚度为 30 nm 和 12 nm 的器件测量了恢复特性。两器件

的其他结构参数均相同。测量并比较了器件在氮气和空气下的恢复特性,研究了温度对恢复特性的影响。

图 3.12 显示了栅极 Pt 厚度为 30 nm 的器件分别在氮气和空气环境下的恢复特性。实验在常温 (22 °C) 下进行,首先测量器件在纯 N_2 环境下的 I-V 曲线,然后将器件置于 6216 ppm 的 H_2/N_2 混合气中进行测量,之后将混合气抽走并通入氮气或空气,观测一定时间后的 I-V 曲线变化,看其能否逐渐恢复至初始水平。从图中可以看出,在氮气环境下,电流有一定程度的下降,但无法恢复至初始水平;在空气环境下,器件电流随时间逐渐趋近初始电流。

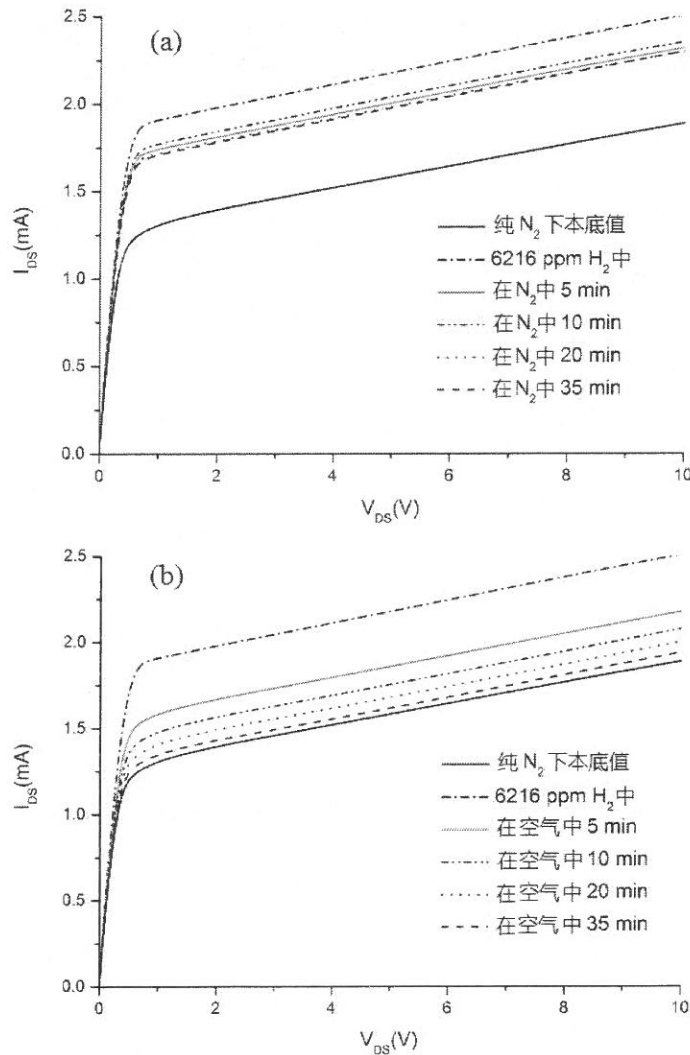


图 3.12 (a) 器件在氮气中的 I-V 曲线恢复特性 ($V_{GS} = -1.5$ V)

(b) 器件在空气中的 I-V 曲线恢复特性 ($V_{GS} = -1.5$ V)

图 3.13 显示了 $V_{DS} = 1$ V 下的电流值随恢复时间的变化趋势。在空气中,电流

近似指数下降并趋于纯 N_2 下的初始值。在 O_2 存在的情况下, 会发生 (3-24) 式所示的反应^[33], 空气中的 O_2 分子和栅极 Pt 表面的 H 原子反应生成 OH 与 H_2O , 使得表面的氢原子浓度下降, 进而促进 Pt 和 AlGaIn 界面处的 H 原子向外扩散, 降低偶极子层浓度, 因此器件在空气中具有更好的恢复特性^[15]。

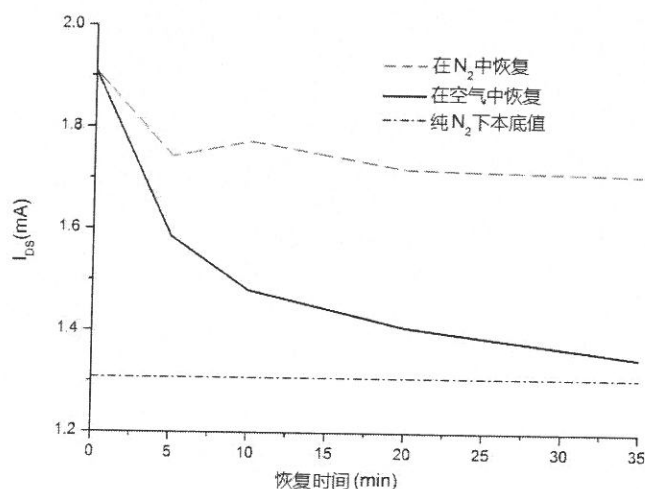


图3.13 器件分别在氮气和空气中的恢复时间曲线 ($V_{GS} = -1.5 V$, $V_{DS} = 1 V$)

对栅极 Pt 厚度为 12 nm 的器件作了类似的测量, 器件从 1279 ppm 的氢气环境下的电流值恢复, 常温下在氮气和空气中的恢复时间曲线如图 3.14 所示。可见, 与上述结论类似, 在有氧气参与的情况下, 器件的恢复特性更好。

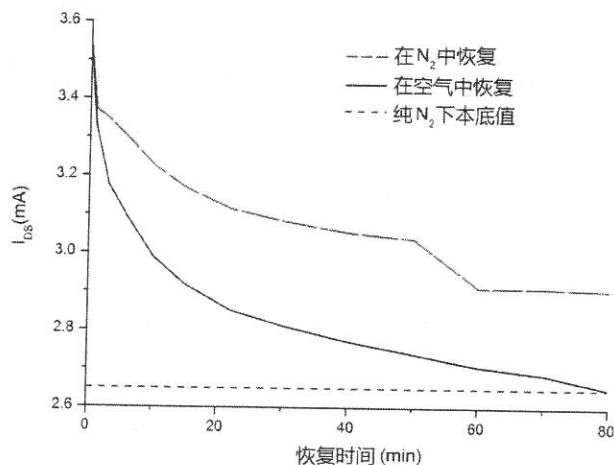


图 3.14 器件分别在氮气和空气中的恢复时间曲线 ($V_{GS} = -1.5 V$, $V_{DS} = 1 V$)

为了研究温度对恢复特性的影响, 实验中还比较了该器件分别在 22 °C 和 80

℃下，在空气中的恢复特性。器件在测量 1279 ppm 的氢气后开始恢复，恢复系数随恢复时间的变化曲线如图 3.15 所示 ($V_{GS} = -1.5 \text{ V}$, $V_{DS} = 1 \text{ V}$)。恢复系数 R (Recovery Coefficient) 是对恢复特性的归一化，定义为

$$R = \frac{I_{DS} - I_{N_2}}{I_{H_2} - I_{N_2}} \quad (3-25)$$

其中 I_{DS} 为实时测量的电流值， I_{H_2} 为恢复的起始值， I_{N_2} 为纯氮气环境下的电流本底值。即 $R=100\%$ 表示初始状态， $R=0$ 表示完全恢复到本底值。由图中可见，器件在 80°C 下的恢复特性明显好于 22°C 。可知随着温度升高，(3-24) 式所示反应消耗氢原子的反应会明显增强， 22°C 下器件需要 80 min 的恢复时间， 80°C 下只需要 35 min。在有氧气的环境中，提高器件的工作温度可以优化恢复特性。但如果温度过高，暴露在有氧环境中的器件可能会有电极氧化等问题，需要在实际应用中综合考虑，并对器件材料和结构进行优化设计。

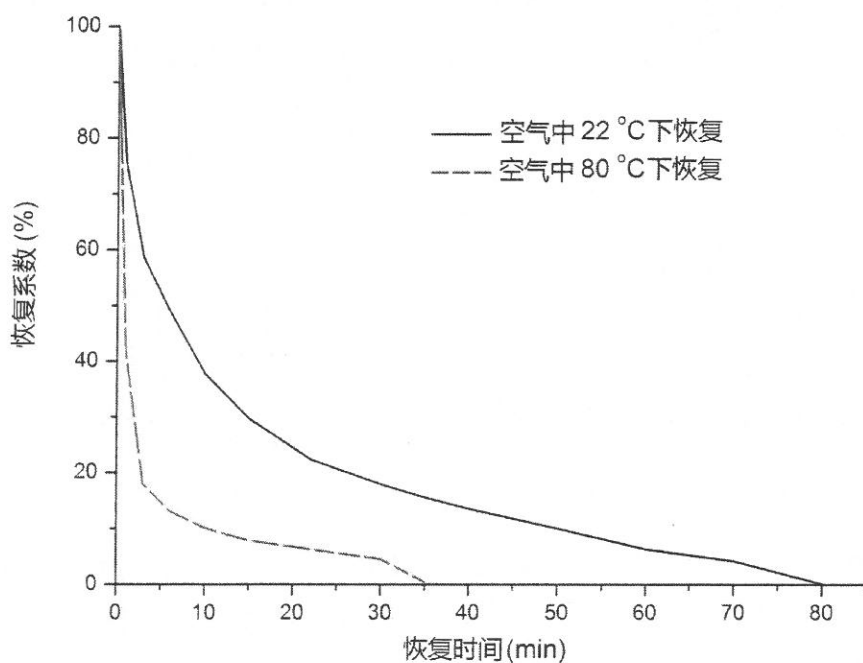


图3.15 22°C 和 80°C 下恢复系数随恢复时间的变化曲线

3.4.2 传感器的重复性

实验中对器件的重复性进行了研究，对栅极 Pt 厚度为 30 nm 的器件在各个氢气浓度下三次测量的电流值进行了比较，如图 3.16 所示。

由图可见，器件在各次测量中均显示出了对 H_2 良好的响应特性，总体上具有较好的重复性。在较高浓度氢气下 (50 ppm 以上)，各次测量的电流值变化较小，

重复性良好；而对于纯 N_2 、2 ppm 和 10 ppm 的情况，各次测量的 I_{DS} 重复性稍差，总体上随测量次数呈上升趋势。这是由于在前次测量后，器件未能完全恢复，Pt 与 AlGaIn 界面处仍有 H 原子残留，这种微量的残留虽然对较高浓度氢气的测量影响不大，但会较明显的影响低浓度氢气的测量，使得后次测量的电流较前次增大。传感器的测量可重复性与其恢复特性密切相关，若能有效促进测量后器件的恢复，则器件可以获得良好的重复性。

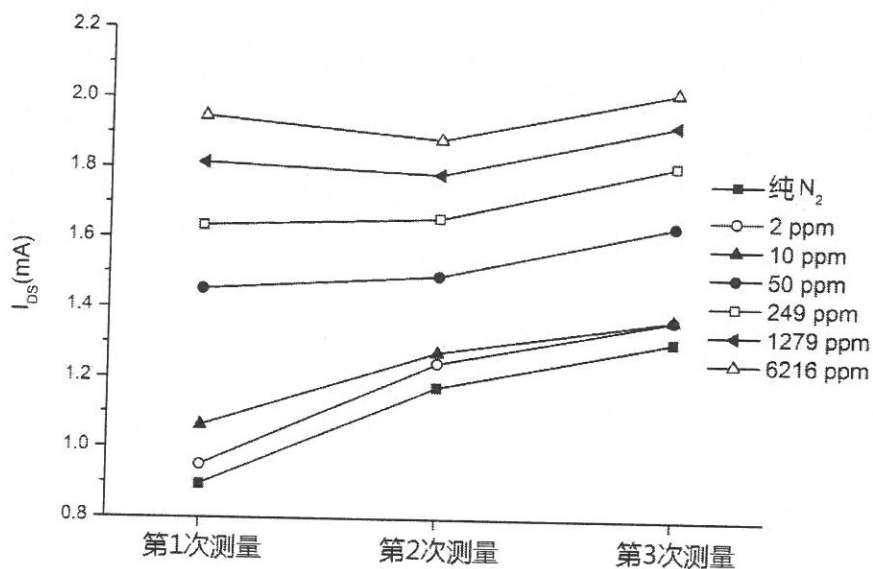


图3.16 器件在三次测量中的电流值比较 ($V_{GS} = -1.5$ V, $V_{DS} = 1$ V)

3.5 传感器的耐高温测试

3.5.1 高温对传感器的性能影响

氮化镓基氢气传感器的主要优势是可以进行高温下的传感，器件的耐高温性能也是研究中需要评测的重要内容。器件所能耐受的最高温度，直接影响到其适用范围。由 3.3.4 节的研究可以看出，器件至少可以工作在 350 °C 的环境下，只是 GaN 层的绝缘性还有待提高，以在高温下也能获得较高的传感响应度。器件能否在更高的温度下工作，是本节（3.5 节）要研究的内容。

实验中对栅极 Pt 厚度为 30 nm 的器件进行了耐高温测试。在进行该测试前，该器件只进行过常温测量。测试过程如下：

- 1、将器件置于纯氮气环境中，450 °C 下放置 20 min，比较前后的测试电流；
- 2、将器件置于纯氮气环境中，600 °C 下放置 20 min，比较前后的测试电流。

重点比较器件在两次加热前后，栅极偏压 $V_{GS} = -1.5$ V 下和浮栅下的电流值变

化 (24 °C 下)。

450 °C 下放置前后, 电流的变化如图 3.17 所示。可见, 对于加栅压测量, 源漏电流 I_{DS} 有明显的增加, 可能是加热蒸发掉了栅极的水汽, 使得栅极的表面势发生了变化, 导致电流发生变化。对于浮栅测量, I_{DS} 稍有下降但变化不大。器件经过 450 °C 的高温后, 性能并无明显恶化。

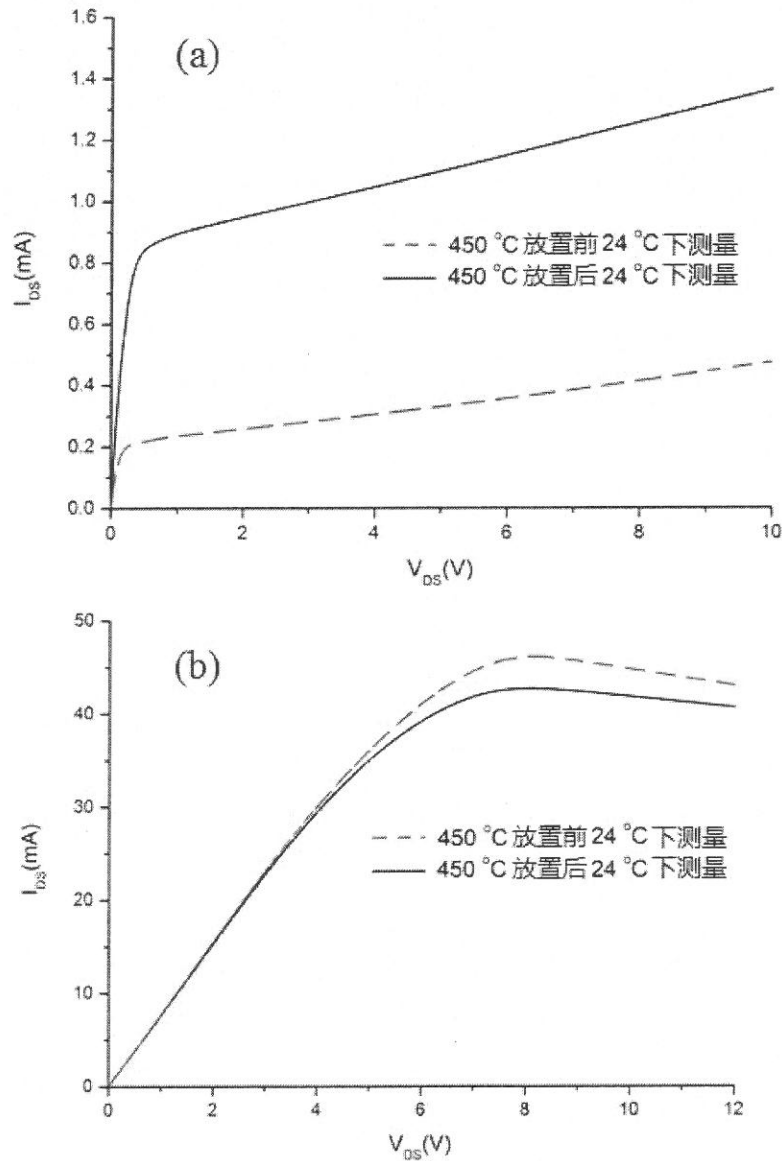


图3.17 (a) 450 °C 放置前后加栅压下源漏电流对比 (24 °C, $V_{GS} = -1.5$ V)

(b) 450 °C 放置前后浮栅下源漏电流对比 (24 °C)

600 °C 下放置前后, 电流的变化如图 3.18 所示。不论是对于加栅压测量还是浮栅测量, 源漏电流 I_{DS} 都有非常明显的下降, 甚至下降到只有原来的 1/10 左右。

可见所测器件在 600 °C 下的性能会明显恶化。但这种恶化并不是 GaN 或 AlGaIn 材料本身导致的, 更可能是金属电极与 GaN 的接触特性发生了变化。图 3.19 显示了分别在 450 °C 和 600 °C 下放置后, 器件在不同氢气浓度下的 $I_{DS}-V_{DS}$ 曲线 (24 °C 下)。器件在 600 °C 下放置后, 电流值大体降到了只有 450 °C 下放置后的 1/10, 但是依然具有较明显的饱和特性和传感特性。很有可能是经过 600 °C 处理后, 欧姆接触电极的大部分区域导电性变差, 电极与 AlGaIn/GaN 材料的接触电阻增大, 只有少部分电极区域在导电, 氢气引起的栅极 Pt 的电位变化只对这部分电流产生作用。具体原因有待下节进一步研究。

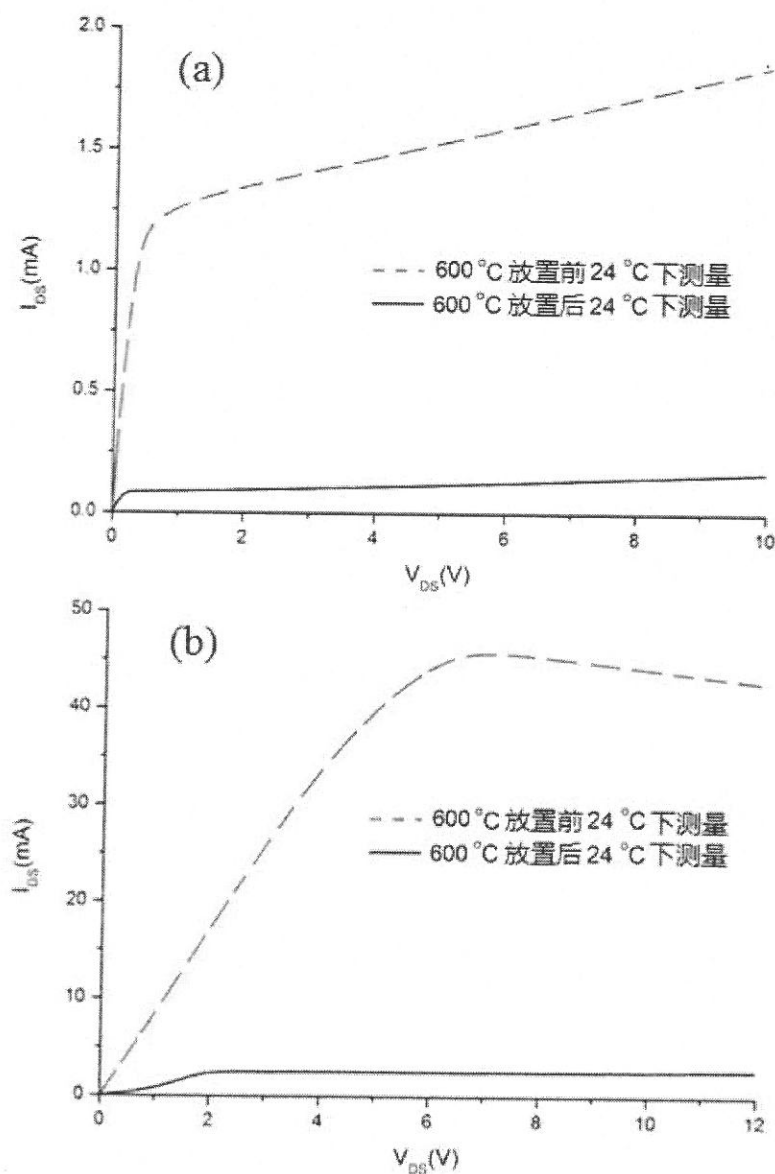


图3.18 (a) 600 °C放置前后加栅压下源漏电流对比 (24 °C, $V_{GS} = -1.5$ V)

(b) 600 °C放置前后浮栅下源漏电流对比 (24 °C)

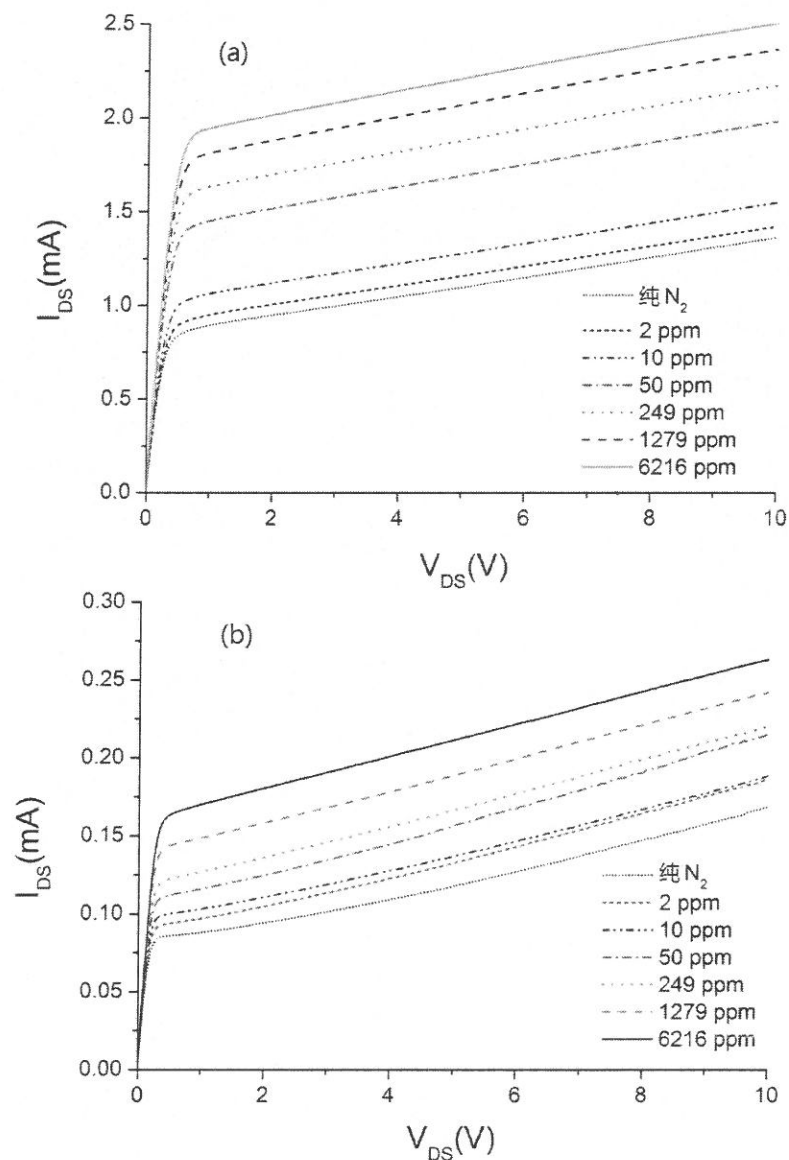


图3.19 (a) 450 °C放置后不同氢气浓度下的 I_{DS} - V_{DS} 曲线 (24 °C, $V_{GS} = -1.5$ V)

(b) 600 °C放置后不同氢气浓度下的 I_{DS} - V_{DS} 曲线 (24 °C, $V_{GS} = -1.5$ V)

3.5.2 传感器性能变化的原因分析

上一节的测试结果显示, 器件可以耐受 450 °C 的高温, 但 600 °C 下的器件性能会明显恶化。为了研究器件恶化的原因, 并考虑环境中氢气存在时的影响, 对未经过高温烘烤的样品分别做了如下的对比试验, 观测温度和气氛对器件的影响:

样片 1: N_2 氛围下 450 °C 加温 8min; N_2 氛围下 600 °C 加温 8min;

样片 2: 1279 ppm H_2 氛围下 450 °C 加温 8min;

样片 3: 1279 ppm H_2 氛围下 600 °C 加温 8min。

这四种氛围下处理过的器件的电极区域的光学显微镜照片如图 3.20 所示。照片从下至上四块区域分别为：栅极 Pt 电极，AlGaIn 表面，欧姆电极，电极焊盘与欧姆电极的重叠部分。重点观察对电学特性影响最大的欧姆电极部分。可以看出，两种气氛 450 °C 处理后，欧姆电极的颜色基本不变；而经 600 °C 处理后，电极均变为青白色，显示电极性质发生了变化。此外，栅极与 AlGaIn 表面并无明显变化，电极焊盘因为高温退火作用而明显变为青色。

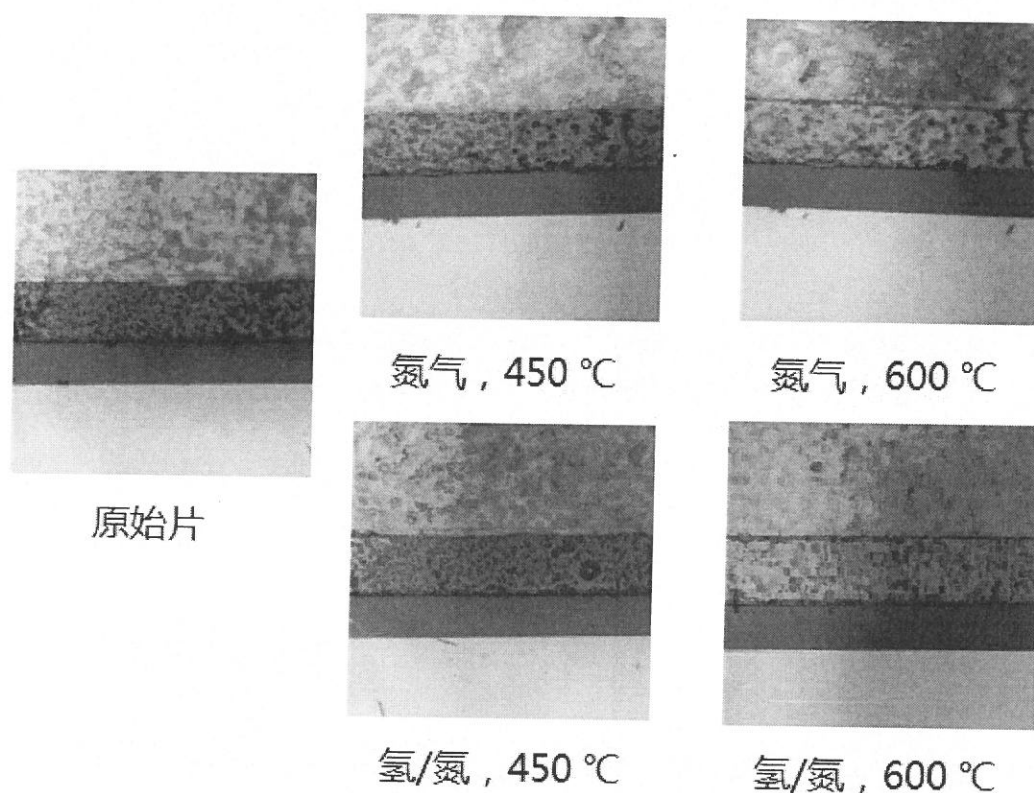


图3.20 不同氛围下处理过的器件电极区域的光学显微镜照片

此后，用扫描电子显微镜 (SEM) 分别对原始片、氮气 600 °C 处理的样片一、氢/氮 450 °C 处理的样片二和氢/氮 600 °C 处理的样片三的欧姆电极和 Pt 电极观测了表面形貌并分析了表面成分。图 3.21 和图 3.22 分别显示了欧姆电极和栅极 Pt 的形貌对比。可以看出，欧姆电极表面有很多微米量级的突起，这主要是由电极工艺中的 820 °C 退火导致的，四个样品的表面形貌并无本质区别。栅极 Pt 的表面则都比较平整，氢/氮 450 °C 处理的样片和原始片的表面颜色都很均一，表明平整度较高。但两种气氛下 600 °C 处理的样片，表面出现了很多几十纳米量级的白色斑点，很可能是在此温度下 Pt 电极发生了一定程度的重构和团聚成岛。不过从原理上看，这种变化并不是 600 °C 处理后源漏电流大幅减小的原因。

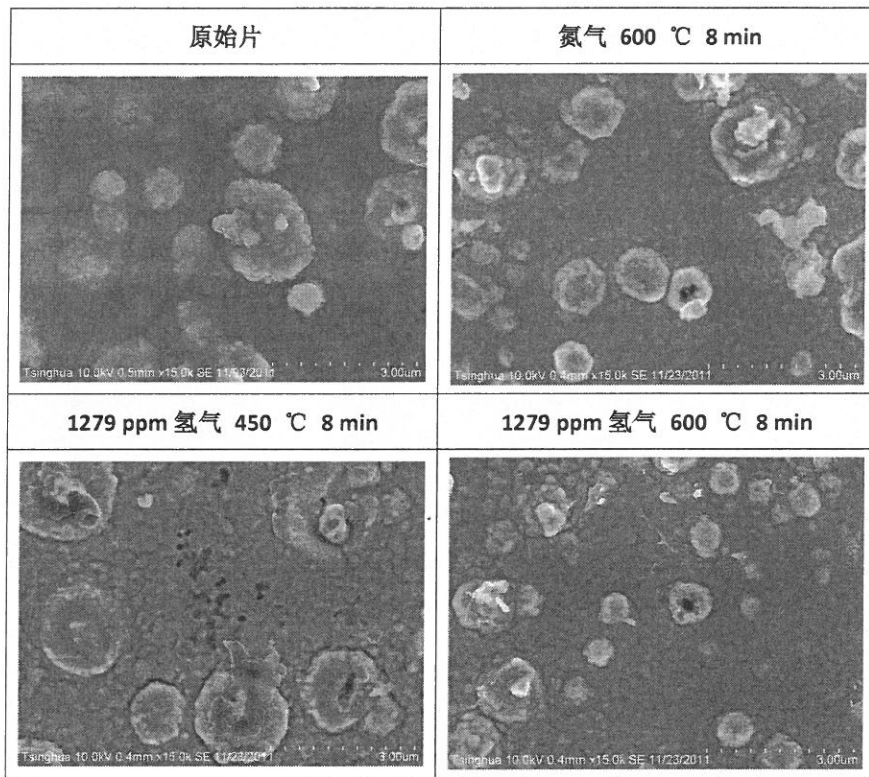


图3.21 不同氛围下处理过的器件欧姆电极的SEM照片

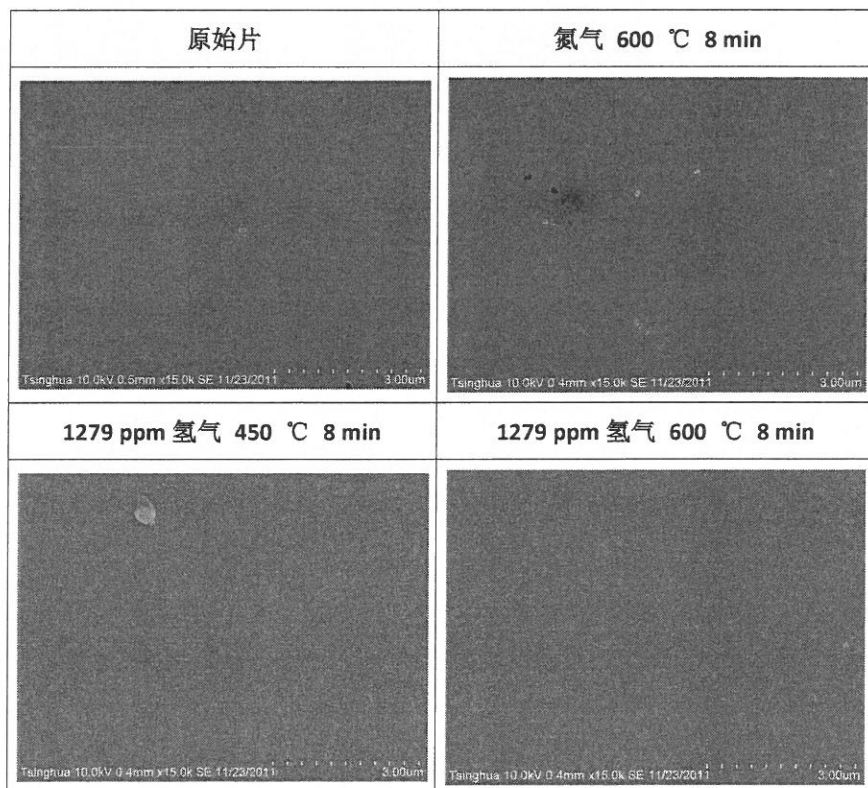


图3.22 不同氛围下处理过的器件栅电极的SEM照片

对欧姆电极和栅电极进行的表面成分分析结果如图 3.23 所示。探测深度约为 400 nm。可见, 对欧姆电极而言, 高温放置后探测到的 Al 明显减少, 从而使得 O 和 Au 的相对含量上升了, O 元素来源于电极 820 °C 退火时因为放样品使退火腔混入少量氧气造成的氧化。这种变化说明高温会促进 Al 元素向半导体内部的扩散。这种扩散会使 Al 元素与半导体的合金态发生变化, 从而影响其导电性能。由于探测深度的限制, 不能探测到合金态所在深度, 该成分分析并不能看出 450 °C 处理和 600 °C 处理的显著区别。与 450 °C 处理相比, 600 °C 处理后 Al 元素与半导体的合金态 (成分、结构等) 可能会发生质的变化, 使大部分电极区域的金属与半导体的接触电阻增大, 导致电流显著减小。对于栅电极而言, 因为所测样片的 Pt 厚度为 30 nm, 于是成分分析可以探测到 GaN 层。由图 3.23(b) 可知, 各元素的原子百分比在高温下并无明显变化, 表明 Pt 氢敏电极可以耐受高温环境下的测量。

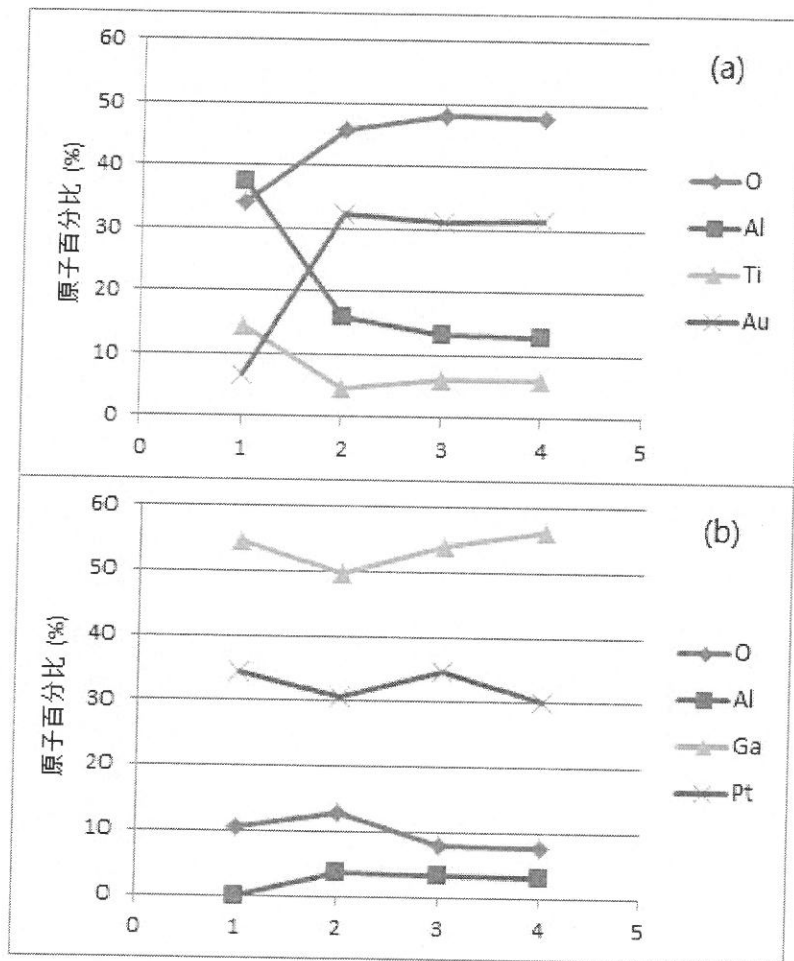


图3.23 (a) 欧姆电极表面成分对比 (b) 栅电极表面成分对比

1—原始片; 2—氢/氮450°C; 3—氢/氮600°C; 4—氮气600°C

综合以上结果可知：高温会使栅极 Pt 电极发生一定程度的重构和成岛，但其功能并无明显影响，可以利用这一点制备纳米点结构的 Pt 电极，增大其与气体的有效接触面积。欧姆电极在 600 °C 下处理后会变为青白色，说明电极合金态发生了明显改变。成分分析的结果显示高温会促进 Al 元素向半导体内部的扩散。分析认为与 450 °C 处理相比，欧姆接触的合金态（成分、结构等）在 600 °C 处理后可能会发生质的变化，导致接触电阻显著增加，是造成器件在高温下电流减小，性能恶化的原因。若用电镜对高温处理前后欧姆接触的截面进行进一步的成分与结构分析，可能会找到更确凿的证据。

3.6 本章小结

本章介绍了栅极修饰金属 Pt 的 AlGaIn/GaN HEMT 结构氢气传感器的制作工艺和性能分析，以及传感器测试系统的设计与搭建。建立了器件传感响应度 S 的模型，同时对朗缪尔等温方程进行了修正，考虑了 Pt 表面各氢原子吸附位的吸附热差异的影响，引入了描述这一差异的反应速率变化指数 r 。实验中研究了传感响应度随氢气浓度、栅极偏压和温度的变化趋势，并借助模型进行了理论分析。结果表明，在一定的氢气浓度范围内，传感响应度随对数氢气浓度线性变化，线性区的中心由反应平衡常数 K 与环境总压强 P 决定，较大的 r 值意味着更宽的线性区，但同时会使 S 随氢气浓度的变化更小。器件在临近截止处具有使响应度最大的栅极工作偏压，减小 GaN 体材料漏电流可以降低这一偏压，提高响应度，同时可以减小工作电流，降低器件功率。随着温度的升高，Pt 表面有效氢原子吸附位密度 N_0 的增加会使传感响应度增大，但高温下漏电流的显著增大，会严重制约器件的响应度。提高 GaN 体材料的绝缘性，从而减小漏电流，对于器件应用于高温下的氢气传感具有重要意义。

此外，本章还研究了传感器的恢复特性、重复性和耐高温特性。在有氧气存在和温度更高的情况下，器件具有更好的恢复特性。器件的重复性良好，较高氢气浓度下的重复性比较低氢气浓度下更好。器件可以耐受 450 °C 以下的高温，在 600 °C 下性能会恶化，电流明显减小，可能是该温度下欧姆接触的合金态发生改变，使得接触电阻明显增大所导致。若使器件在更高温度下工作，需要对器件结构和工艺进行进一步优化。

第4章 AlGaIn/GaN HEMT 结构溶液 pH 值传感器的研究

4.1 传感器的结构和制作工艺

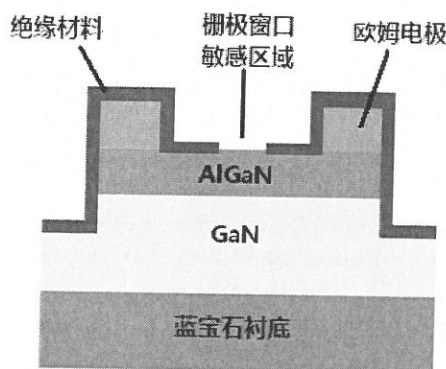


图4.1 AlGaIn/GaN HEMT溶液pH值传感器的器件结构

AlGaIn/GaN HEMT 溶液 pH 值传感器的器件结构如图 4.1 所示，除了栅极敏感区域外，其余部分均用绝缘材料覆盖，以满足溶液中测试的需求。与氢气传感器相同，所使用的 HEMT 外延片采用 MOCVD 方法在 c 面蓝宝石衬底上制备而成。外延层分别为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的 GaN 体材料， 5 nm 的非掺杂 AlGaIn 势垒层，和 15 nm 的 n 型掺杂 AlGaIn 层，AlGaIn 的 Al 组分约为 30%。生长完成后，台面隔离采用 ICP 刻蚀，ICP 功率为 1500 W ，刻蚀气体为 Ar/Cl_2 ，平均刻蚀深度为 170 nm ，有效隔断了器件之间的二维电子气。用氟硝酸去除器件表面的氧化层后，用溅射的方法制作了 Ti/Al/Ti/Au ($25/250/50/50\text{ nm}$) 源漏电极，在氮气气氛下 $820\text{ }^\circ\text{C}$ 退火 3 min 形成良好的欧姆接触。随后溅射了 Ti/Au ($50/50\text{ nm}$) 电极焊盘将源漏电极引出，以便在测试滴加溶液时液体不会接触到测量探针。绝缘层的选取并不唯一，本论文采用最多的是氮化硅，用等离子体增强化学气相沉积（PECVD）的方法制作在器件表面，并要控制其厚度在合适的范围（见 4.4.1 节）。随后以光刻胶作为掩膜，将栅极敏感区域和电极焊盘施加电信号的位置处的氮化硅用缓冲氢氟酸腐蚀掉，分别露出 AlGaIn 表面和金属电极。苯并环丁烯（BCB）和光刻胶也是可选的绝缘材料，将在 4.4 节予以介绍。栅极不做修饰，直接以 AlGaIn 表面与溶液接触，或者修饰 Pt 薄膜，测试效果将在 4.3 节予以介绍。

实验制作了栅极敏感区域长度分别为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $15\text{ }\mu\text{m}$ 、 $50\text{ }\mu\text{m}$ 、 $100\text{ }\mu\text{m}$ 和 $250\text{ }\mu\text{m}$ 的器件，栅宽均为 $400\text{ }\mu\text{m}$ 。不同栅极敏感区域长度的器件的光学显微镜照片如图

4.2 所示，图中右端为源漏电极和敏感区域，左端为用来扎针测量的电极焊盘。源漏电极和栅极窗口的细节照片如图 4.3 所示。

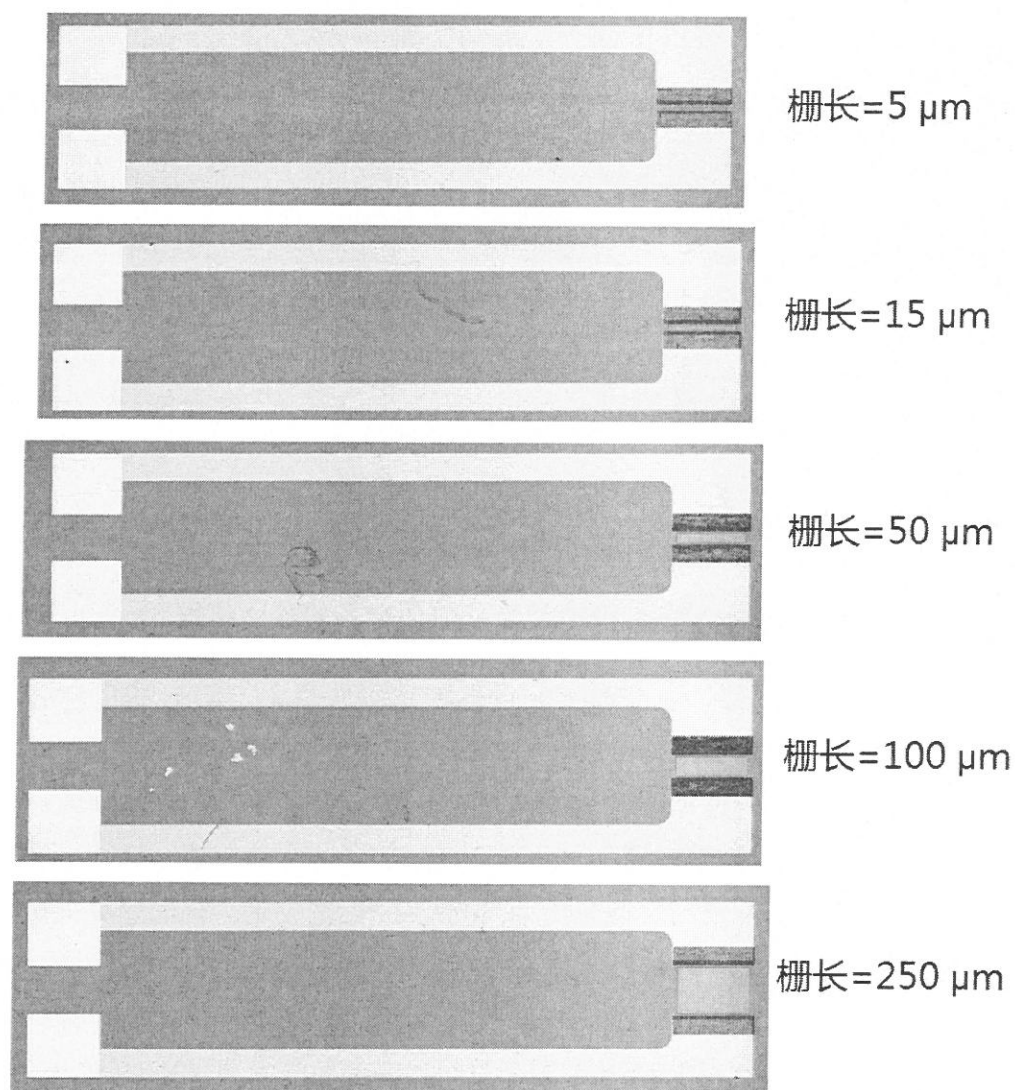


图4.2 AlGaIn/GaN HEMT溶液pH值传感器的光学显微镜照片

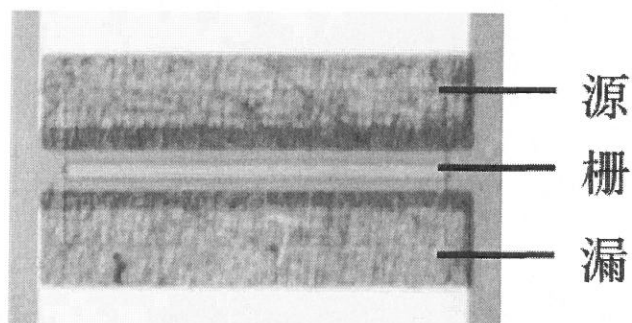


图4.3 器件源漏电极和栅极窗口照片 (栅长=15 μm)

4.2 传感器的测试方法

本论文采用浮栅方法对 pH 值传感器进行测试。分别用盐酸和氢氧化钠配制酸性和碱性的相应 pH 值的溶液。用 DragonLAB MicroPette 0.1~2.5 μL 规格的移液器在栅极敏感区域滴加不同 pH 值溶液，在常温下（25 $^{\circ}\text{C}$ ）用 Agilent 4155c 半导体参数测试仪测量器件的源漏电流随源漏电压变化的 I-V 特性。滴加的液滴体积约为 1 μL 。测试时的器件照片和测试平台照片分别如图 4.4 和图 4.5 所示。

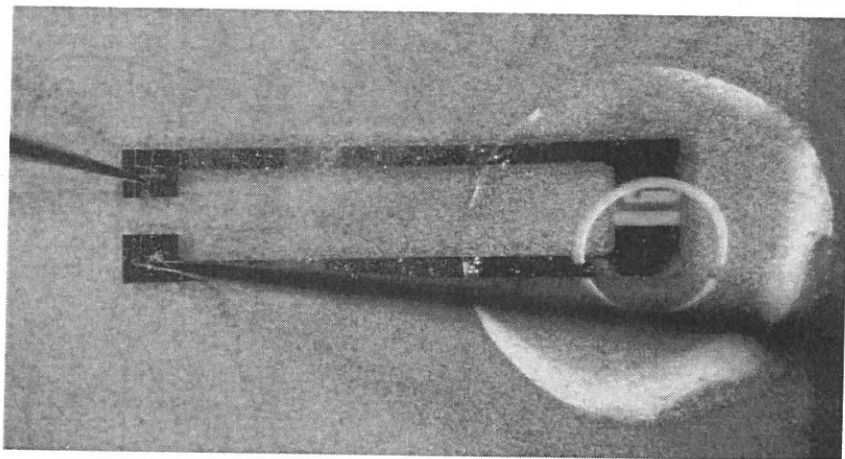


图 4.4 器件进行测量时的照片（电极扎针，栅极区域滴加溶液）

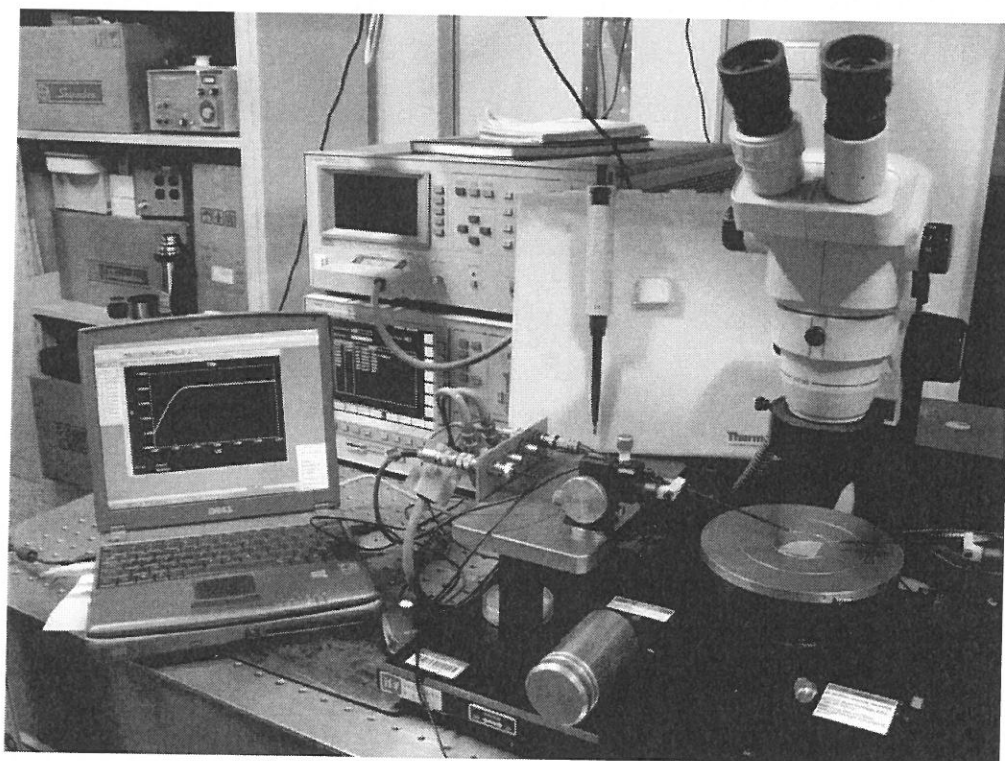


图 4.5 溶液 pH 值传感器测试平台照片（样品位于显微镜下平台上）

4.3 传感器的测试结果分析

4.3.1 测试目标：在饱和区获得传感特性

晶体管具有源漏电流不随源漏电压变化（或变化很小）的饱和区。晶体管结构的传感器如果能够在饱和区进行传感，可以克服电压波动带来的误差，从而降低对电压源稳压性的要求。第3章介绍的氢气传感器的测试结果即是在饱和区获得的。关于 AlGaIn/GaN HEMT 结构溶液 pH 值传感器，文献中在浮栅下的测量结果是在线性区获得的^[25]。本论文的研究中试图在器件的饱和区获得传感特性。

晶体管的饱和有两种机制：载流子速度饱和以及沟道夹断饱和^[45]。栅极无修饰的器件只会出现载流子速度饱和，对于 AlGaIn/GaN HEMT 结构传感器，表现为源漏电压足够大时，2DEG 区域具有足够强的电场，使其中的电子达到饱和漂移速度，电压继续增大时电流不再增加。栅极修饰金属的器件会出现沟道夹断饱和，且一般情况下沟道的夹断先于载流子速度的饱和。对于 AlGaIn/GaN HEMT 结构传感器，表现为源漏电压增大到一定程度时，2DEG 开始出现夹断，此后随着电压继续增大，电流基本保持不变。

由此，若要使器件在浮栅测量下达到饱和区，对于无栅极修饰的器件，则要使其达到 2DEG 中的电子速度饱和，此时栅极敏感区域长度是要控制的参数，相关研究在 4.3.2 节中介绍。另一种途径是在器件栅极修饰金属，使其达到 2DEG 夹断饱和，相关研究在 4.3.3 节中介绍。

4.3.2 控制栅极长度实现载流子速度饱和

实验中研究了以氮化硅作为绝缘层（厚度 430 nm），栅极窗口无修饰的器件。首先测试了栅长为 250 μm 器件在不同 pH 值下（只进行酸溶液测量的原因在 4.4.1 节中介绍）的 $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$ 曲线，在所测范围（0-15 V）内，器件未达到饱和区，且在 V_{DS} 超过 1 V 后，曲线毛刺增多。因此选取 0-0.6 V 范围内的测量曲线如图 4.6(a) 所示。可见，在一定的电压下，源漏电流随着 pH 值的减小而增加，这可以用 AlGaIn 表面吸附更多的 H^+ 使得表面电势升高，进而增加了异质结处二维电子气的浓度来解释。选取源漏偏压 0.5 V 处的电流值（mA）对 pH 值进行线性拟合如图 4.6(b) 所示。线性拟合得到在 pH=2~6 的范围内传感器灵敏度为 0.0944 mA/mm-pH。

之后对栅长为 15 μm 的器件在不同 pH 值下测试其 I-V 特性曲线，在所测范围（0-15 V）内，器件达到饱和区，其饱和电压约为 10 V。选取 0-13 V 范围内的测量曲线如图 4.7(a) 所示。在饱和区，相同偏压下源漏电流亦随着 pH 值的减小而增加。不论是在饱和区还是上述在线性区测得的特性，都可以归因于栅极敏感区

域表面势随溶液 pH 值的变化调节了二维电子气浓度。选取源漏偏压 13 V 处的电流值 (mA) 对 pH 值进行线性拟合如图 4.7(b) 所示。线性拟合得到在 pH=2~6 的范围内传感器灵敏度为 2.19 mA/mm-pH。

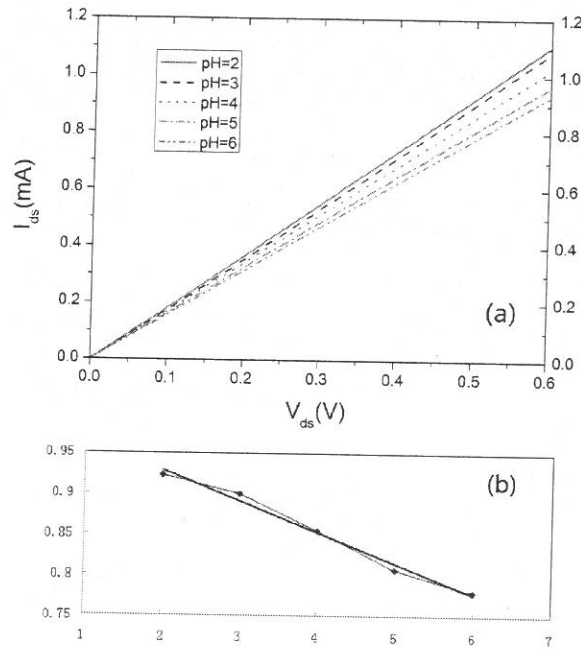


图4.6 栅长为250 μm 器件测量结果：(a) I-V曲线；(b) 线性拟合结果

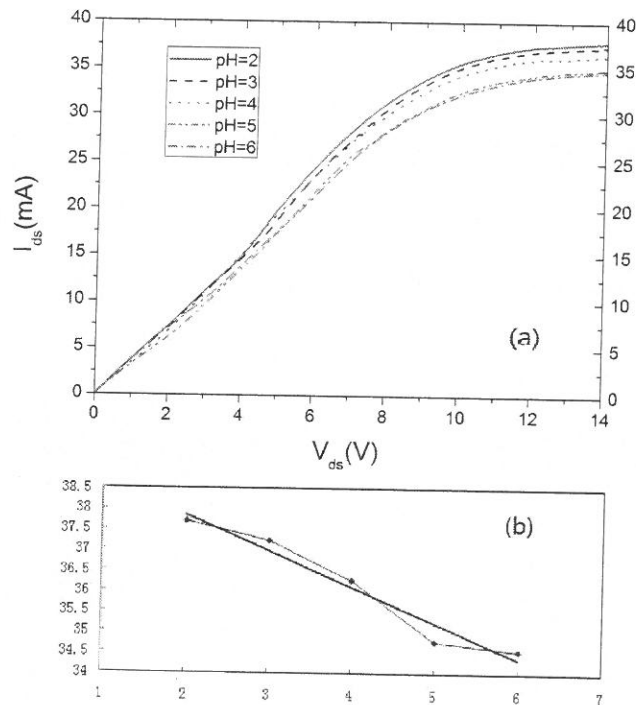


图4.7 栅长为15 μm 器件测量结果：(a) I-V曲线；(b) 线性拟合结果

该种结构传感器的源漏电流 (I_{DS}) 的大小由 (4-1) 式决定:

$$I_{DS} = qn_s v W \quad (4-1)$$

其中 q 为电子电荷, n_s 为二维电子气面密度, v 为电子漂移速度, W 为栅极宽度。栅极敏感区域的表面势只调节二维电子气密度 n_s , 电子漂移速度 v 只和源漏极之间的电场 E 相关。电场 E 由 (4-2) 式决定:

$$E = V_{DS} / L_{DS} \quad (4-2)$$

其中 V_{DS} 为源漏电压, L_{DS} 为源漏极间距。

由上可知, 当 n_s 与 L_{DS} 一定时, $I_{DS}-V_{DS}$ 关系与 $v-E$ 关系完全相似。当 E 较小时, v 随 E 线性变化, 此时器件工作在线性区; 当 E 增加到临界饱和点 E_{sat} 时, v 增加到饱和漂移速度 v_{sat} , 此后 v 几乎不随 E 的增加而变化, 此时器件工作在饱和区。器件栅长越大, 对应的 L_{DS} 越大, E 达到 E_{sat} 所需要的 V_{DS} 就越大。在上述测量中, 相同测量范围 (0-15 V) 下, 栅长为 250 μm 的器件未能饱和, 栅长为 15 μm 的器件达到饱和。若想让前者工作在饱和区, 则需要施加更大的 V_{DS} , 而这将导致绝缘作用的氮化硅发生击穿使器件失效 (见 4.4.1 节)。因此减小栅极敏感区域的长度是获得饱和和工作特性的方法, 此时的饱和机制是载流子速度饱和。

此外, 比较两个器件测得的灵敏度, 可知 15 μm 器件在饱和区测量的灵敏度比 250 μm 器件在线性区测得的更大, 这由 (4-1) 式可以看出。前者比后者具有更高的电子漂移速度, 因此由 pH 值引起的 n_s 的相同变化产生的 I_{DS} 变化量更大, 即灵敏度更高。

4.3.3 栅极修饰金属Pt实现2DEG夹断饱和

使器件达到饱和的另一种方法是在栅极修饰金属 Pt 膜, 以实现沟道夹断饱和。以 4.1 节所述工艺为基础, 氮化硅绝缘层沉积 1050 nm, 最后在敏感区域溅射一层 2 nm 厚的 Pt 薄膜。器件照片如图 4.8 所示, 栅极的白色区域即为金属 Pt。

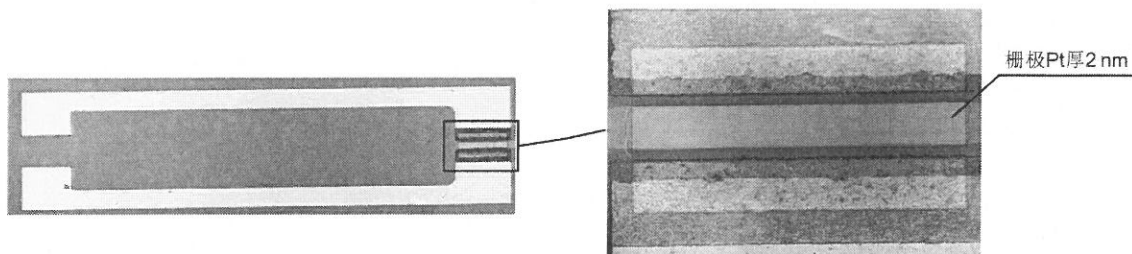


图4.8 栅极溅射金属Pt后的器件照片 (栅长=50 μm)

比较溅射金属 Pt 前后, 不同栅极长度的器件的浮栅 $I_{DS}-V_{DS}$ 曲线如图 4.9 所示。

图 4.9(a)为制作 Pt 膜之前的测试结果,可见栅长较长的器件并未达到饱和区,只有栅长为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $15\text{ }\mu\text{m}$ 的器件显示出饱和特性,其中 $5\text{ }\mu\text{m}$ 栅长器件的饱和膝电压约为 10 V 。栅长越短,饱和趋势约明显,这与 4.3.2 节的分析结果相同。但是在载流子速度饱和的机制下,饱和膝电压比较高,较高的工作电压可能会使绝缘层发生腐蚀或击穿(见 4.4.1 节)。在栅极制作 Pt 薄膜后,如图 4.9(b)所示,器件的饱和特性显著了很多,此时的饱和机制为 2DEG 夹断饱和,且对于长栅长器件,其饱和膝电压更低, $250\text{ }\mu\text{m}$ 栅长器件的饱和膝电压约只有 2.5 V 左右,可能是因为栅长越长,其占源漏间距的比例越大所致。Pt 膜对促进器件饱和效果明显。

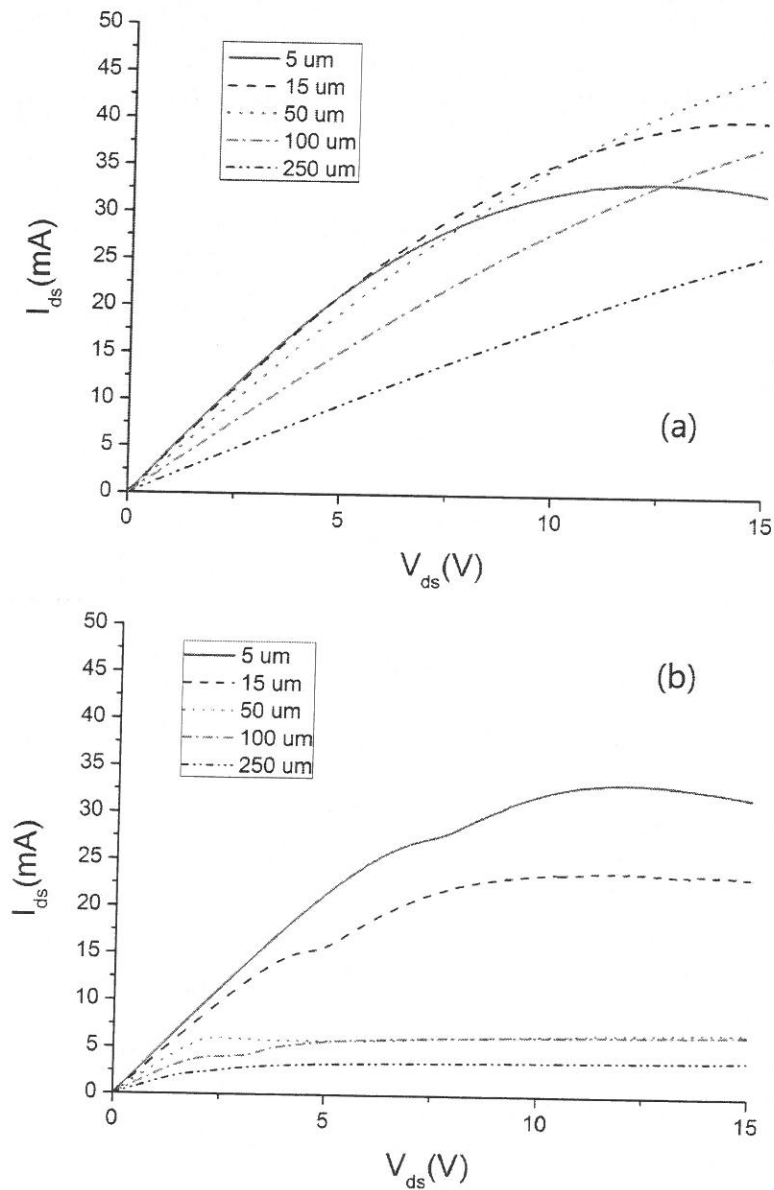


图4.9 不同栅长器件的 I_{DS} - V_{DS} 曲线: (a) 溅射Pt前; (b) 溅射Pt后

测试不同栅长器件的 pH 值响应特性, 图 4.10 和图 4.11 分别为栅长 $15\text{ }\mu\text{m}$ 和栅长 $100\text{ }\mu\text{m}$ 器件在不同 pH 值溶液中的 $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$ 曲线。为了使测量曲线更加清晰, 将酸溶液测量的曲线和碱溶液测量的曲线分开显示。

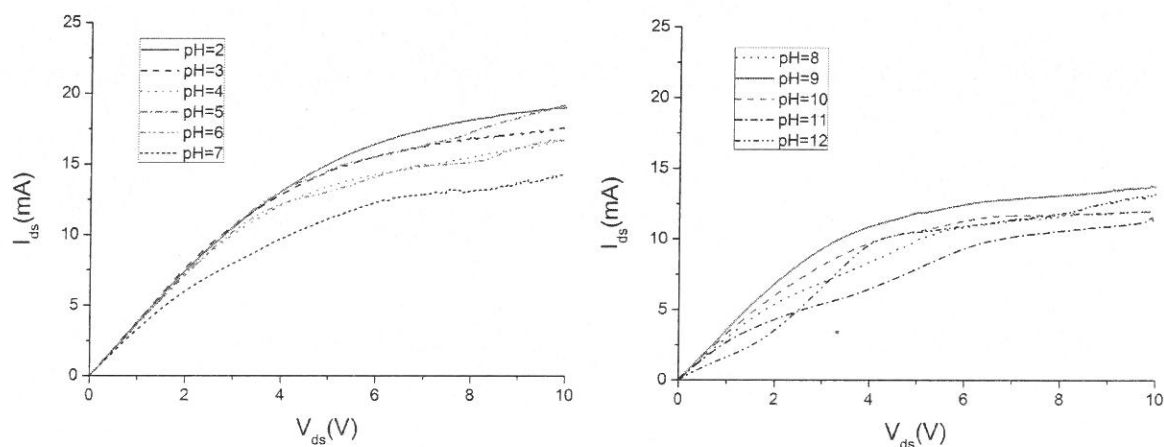


图 4.10 栅长 $15\text{ }\mu\text{m}$ 器件的测量结果

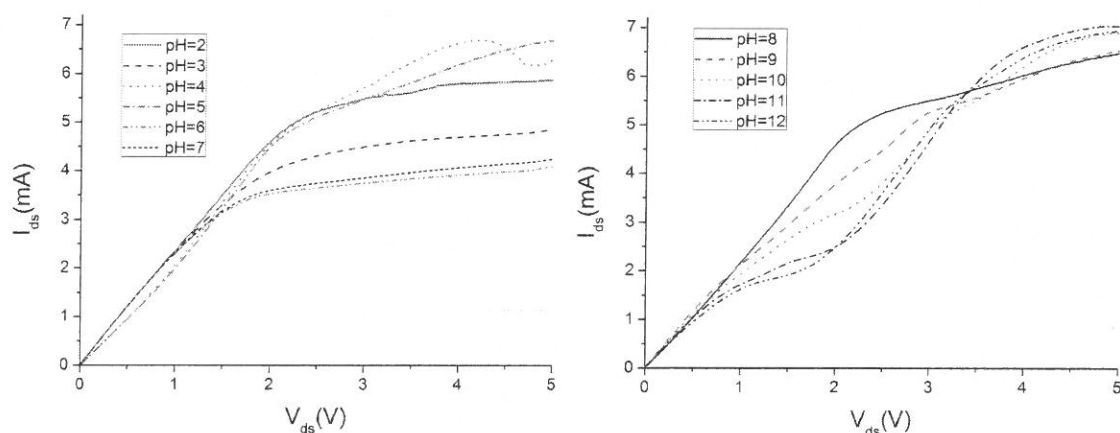


图 4.11 栅长 $100\text{ }\mu\text{m}$ 器件的测量结果

由图中可以看出, 对于酸性溶液的测量, 器件显示出良好的饱和特性, 但电流随 pH 值增大而降低的规律性不理想, 如图 4.10 中, 虽然从 pH=2 到 pH=4 符合上述规律, 但 pH=5 时的电流值又和 pH=3 时相当。对于碱性溶液的测量, 则饱和特性不够理想, 尤其是图 4.11 中出现了双膝电压的情况 (pH=12 的曲线)。不过器件对碱溶液有较为明显的传感特性, 在膝电压处有较高的灵敏度, 但若电压继续增大, 传感的规律性变差。器件的响应特性, 源于金属 Pt 对溶液中 H^+ 和 OH^- 的吸附作用。器件传感特性不够理想的原因, 可能是浮栅测量下栅极电势不够稳定, 也可能是多次测量后 Pt 表面离子残留造成的测量误差, 具体原因有待进一步

研究。后一种原因则会影响器件的恢复特性和重复性,图 4.12 显示的两次测量结果的不重复,表明 Pt 表面在测量后存在离子残留。此外,图 4.10 和图 4.11 所示测量曲线的抖动、毛刺与不规则,可能还和绝缘层被腐蚀从而产生漏电通道相关。优化绝缘材料和测试方法(如加栅极偏压、对器件进行恢复处理等)以获得良好而稳定的饱和区传感特性,是下步的研究重点。

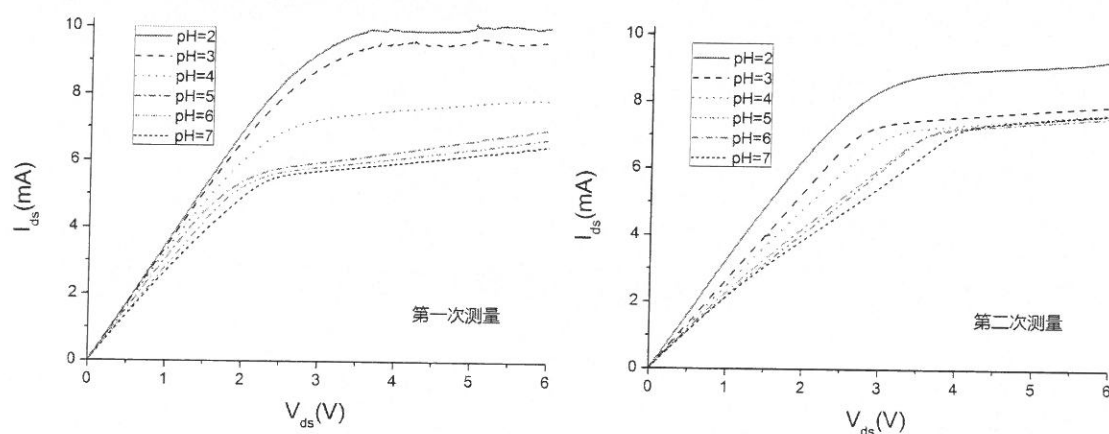


图4.12 栅长50 μm 器件的两次测量结果对比

4.4 绝缘层材料的选取和工艺研究

4.4.1 氮化硅作绝缘层

用于溶液检测的传感器的绝缘层,要既能很好的隔离溶液与电极,又可以在测量过程中不被腐蚀,并且在工艺上可以实现。氮化硅作为一种常用的绝缘材料,在本论文中使用最多,摸索其合适的厚度,对于器件工艺和性能都十分重要。

4.3.2 节中所测器件的氮化硅厚度为 430 nm。实验结果只涉及了酸性溶液的测量,是因为在碱性溶液测试过程中,出现了绝缘层腐蚀的现象。对 $\text{pH}=10\sim\text{pH}=12$ 的溶液进行测量,当 $V_{\text{DS}} > 8\text{ V}$ 时均有较明显的腐蚀现象,即覆盖在电极上方的氮化硅出现气泡; pH 值越高, V_{DS} 越大,该现象越明显。同时,氮化硅内部出现的漏电通道让溶液中有不稳定的电流流过,使得 $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$ 曲线有毛刺且 I_{DS} 增大。重复测量多次后,电极上方的氮化硅即被腐蚀掉了,如图 4.13 所示。

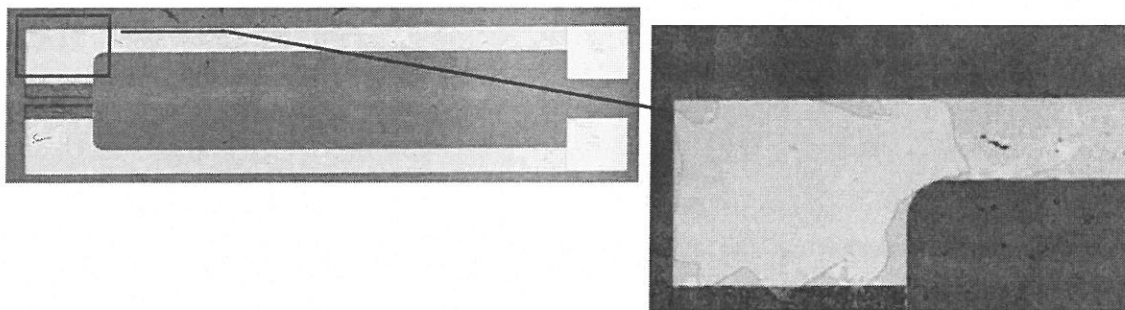


图4.13 碱性溶液测量后电极区域氮化硅绝缘层被腐蚀的照片

一般情况下, 氮化硅只能和高浓度氢氧化钠溶液或熔融氢氧化钠发生反应。但是在加电测量的情况下, 反应速率会急剧上升, 氮化硅与 pH 量级的低浓度碱溶液接触也可以很快的被电解。这也是氮化硅的腐蚀只发生在电极区域的原因。若要避免氮化硅的腐蚀, 一方面要尽量减小测量电压; 另一方面可以通过加大氮化硅的厚度, 使相同电压下氮化硅内的电场减小从而缓解腐蚀。

为了研究增加厚度的效果, 实验中尝试了厚度为 1500 nm 的氮化硅的制作。在 PECVD 沉积后, 以光刻胶作掩膜, 用缓冲氢氟酸腐蚀掉栅极窗口处和电极扎针处的绝缘层。但是在腐蚀的过程中, 因为氮化硅较厚, 腐蚀时间较长, 250 s 左右才露出 AlGaIn 表面, 但在去掉光刻胶后发现侧蚀已经非常严重, 乃至电极上方覆盖的氮化硅也被腐蚀掉了, 如图 4.14 所示。

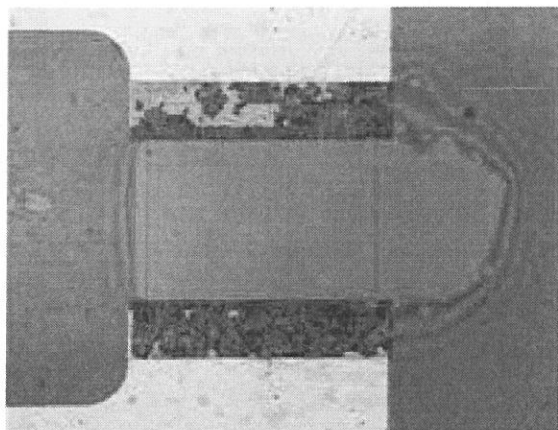


图4.14 缓冲氢氟酸腐蚀氮化硅发生侧蚀的照片

综上所述, 氮化硅绝缘层过薄, 会在碱溶液测量时被腐蚀; 氮化硅过厚又会在工艺制作中开窗时发生侧蚀。合适的氮化硅厚度大致应在 800~1100 nm。4.3.3 节中沉积的氮化硅厚度为 1050 nm, 工艺中未发生侧蚀, 测试时也未见明显腐蚀, 是该绝缘层一个比较合适的厚度。

4.4.2 BCB作绝缘层

苯并环丁烯 (BCB) 具有优异的电绝缘性能, 在半导体工艺中常被用作钝化层。实验中尝试了用 BCB 作绝缘层的效果。BCB 绝缘层的工艺流程如下:

- 1、PECVD 沉积 200 nm 氮化硅;
- 2、先旋涂助粘剂 AP3000, 再旋涂约 3 μm 厚的 BCB, 之后进行高温固化;
- 3、光刻后, 溅射蒸镀 40 nm 厚的 Cr 掩膜;
- 4、用 RIE 刻蚀掉栅极窗口和电极扎针处的 BCB, 后用缓冲氢氟酸腐蚀掉该处的氮化硅;
- 5、配制腐蚀液, 将 Cr 掩膜腐蚀掉。

工艺完成后的器件照片如图 4.15 所示。用台阶仪测得绝缘层的厚度在 1700~3300 nm 之间, 不够均匀。器件栅极未做修饰。

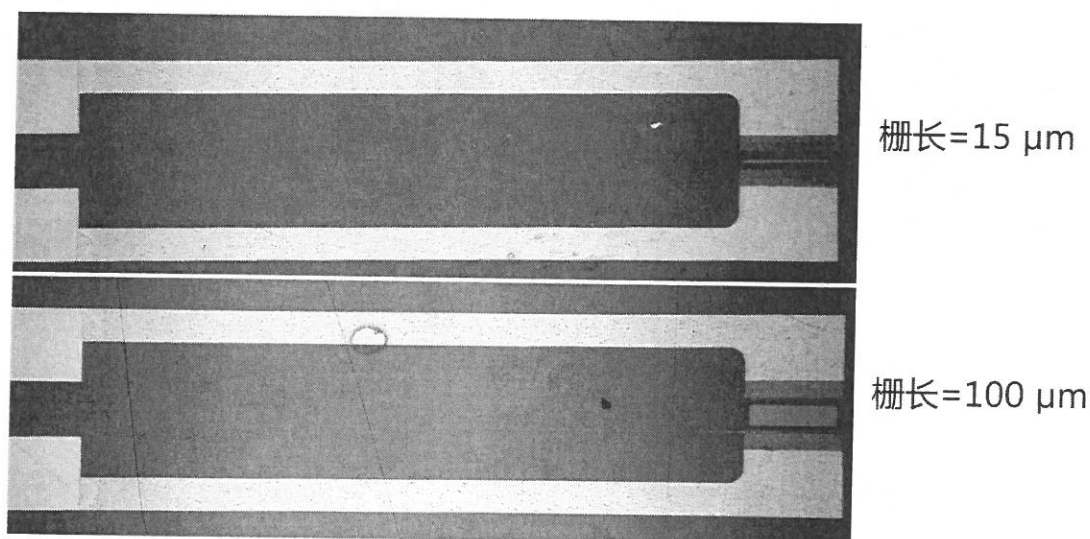
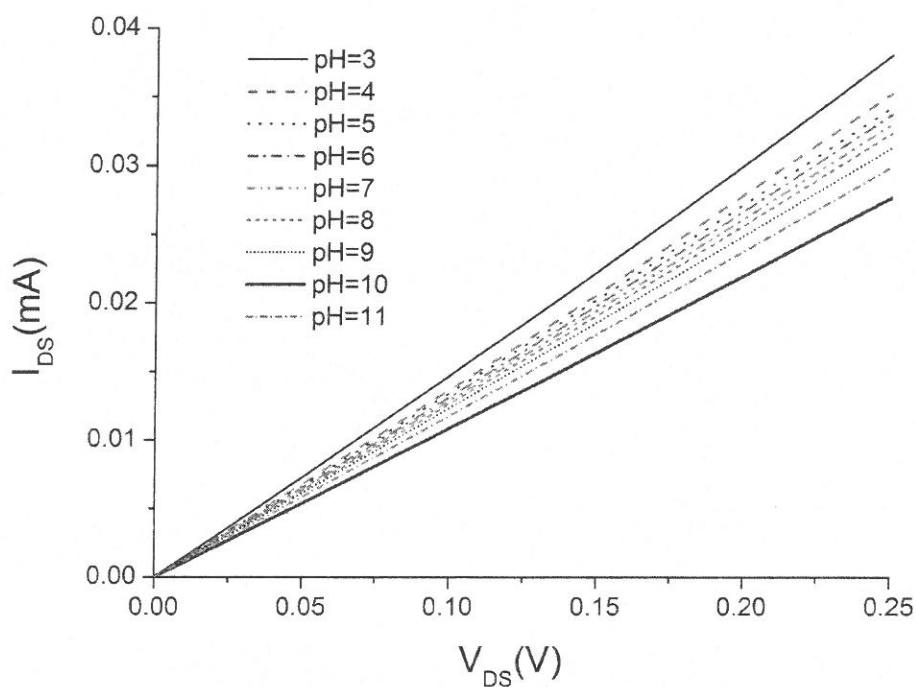
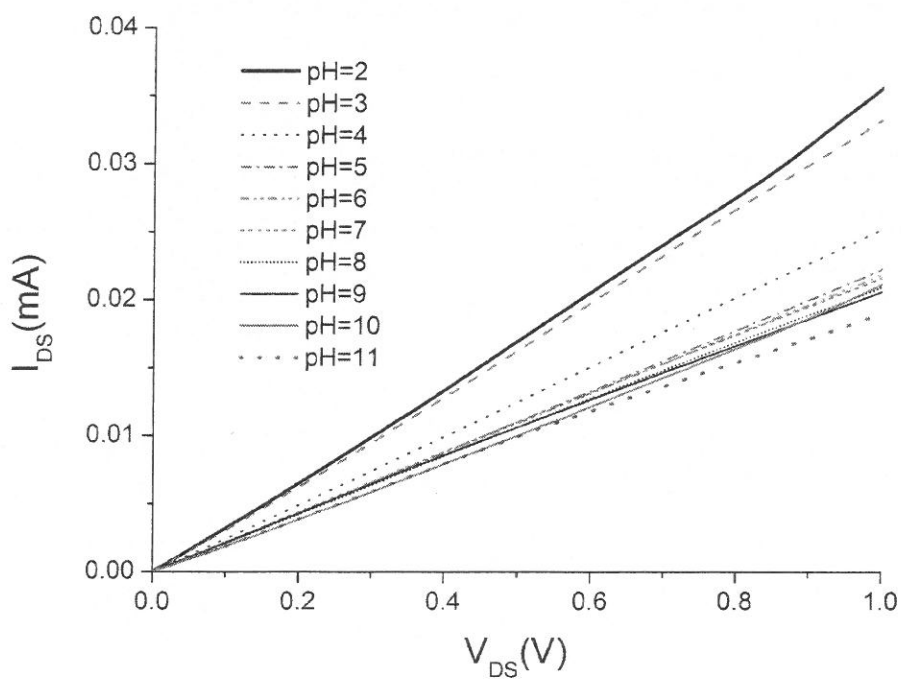


图4.15 制作BCB绝缘层的器件的光学显微镜照片

实验中测试了器件的传感特性, 测量中 BCB 没有被腐蚀的迹象, 表明其耐腐蚀性要优于氮化硅。因为在较大电压下传感效果不佳, 在此展示小电压线性区的测试结果, 如图 4.16, 图 4.17 所示。

图4.16 栅长为15 μm 器件测量结果图4.17 栅长为100 μm 器件测量结果

由图可知, 栅长 15 μm 的器件在 $\text{pH}=4 \sim \text{pH}=9$ 的范围内有良好的线性度, 其在 $V_{\text{DS}} = 0.25 \text{ V}$ 处的灵敏度约为 0.002 mA/mm-pH , 灵敏度不高可能与外延片本身的二维电子气浓度不高有关。栅长 100 μm 的器件有电流随 pH 值增大而减小的趋

势,但仍然不理想, $\text{pH}=8 \sim \text{pH}=10$ 的曲线几乎重合。本质上可能与浮栅测量不够稳定有关。总的来说,BCB 作绝缘层是一种可行方案,但其工艺较为复杂,会增大器件制作的成本。

4.4.3 光刻胶作绝缘层

实验中还尝试了直接用 AZ nLOF 2020 负胶作为绝缘层(厚度约 $1\text{ }\mu\text{m}$),用曝光显影的办法在栅极开窗,与氮化硅和 BCB 相比,从工艺上是最为简单的。虽然其会被碱性溶液腐蚀(显影液即为碱性),但测量中,其与 pH 量级的低浓度碱溶液基本不发生反应。器件照片如图 4.18 所示。

图 4.19 和图 4.20 分别显示了栅长 $5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $15\text{ }\mu\text{m}$ 器件的测量结果,图中只列出了传感特性较好的 pH 值范围。传感特性均是在线性区获得的。栅长 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的器件在 $V_{\text{DS}}=1\text{ V}$ 处灵敏度约为 0.75 mA/mm-pH ,栅长 $15\text{ }\mu\text{m}$ 的器件在 $V_{\text{DS}}=6\text{ V}$ 处灵敏度约为 6.3 mA/mm-pH ,后者获得了较大的灵敏度。在其他 pH 值和更大的 V_{DS} 下,传感特性不够理想,可能与外延层质量不高和浮栅测试方法不够稳定有关。由实验可知光刻胶也是绝缘层的一种可选方案,但从工艺上看,甩胶的过程在常温进行,其附着力不及在 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下沉积的氮化硅和经过 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温固化的 BCB,这可能会限制相应的器件寿命。

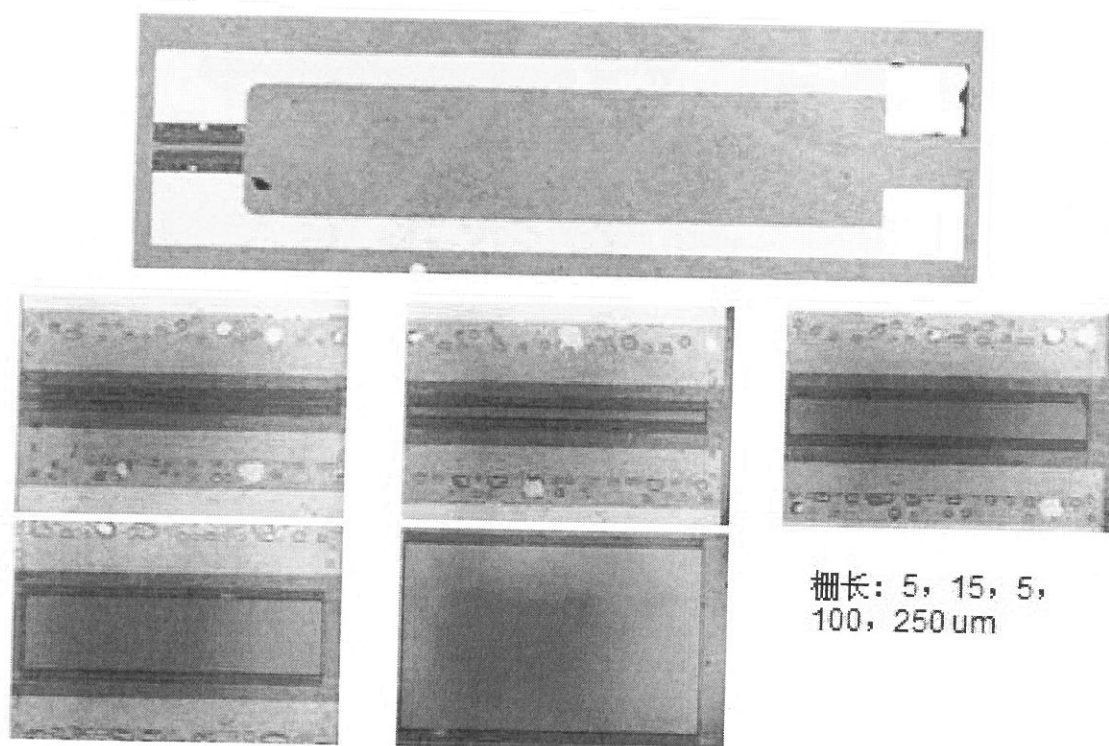


图4.18 以光刻胶作绝缘层的器件照片(上方器件栅长 $15\text{ }\mu\text{m}$)

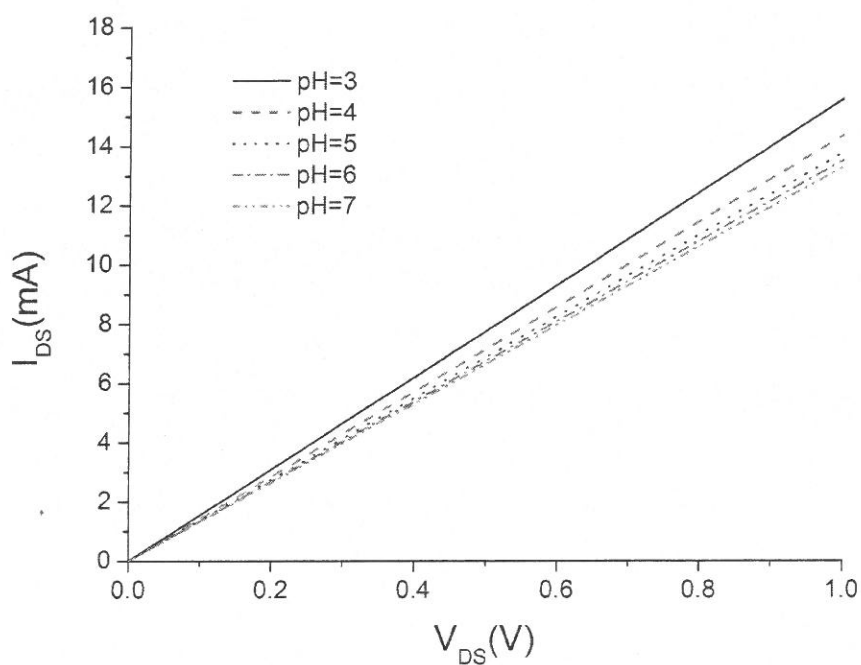


图4.19 栅长为 $5\ \mu\text{m}$ 器件测量结果

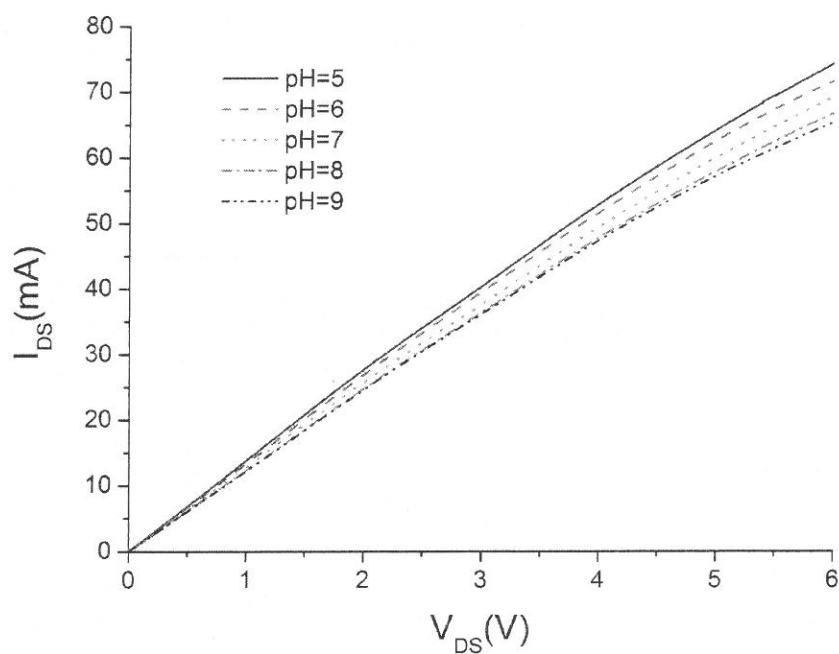


图4.20 栅长为 $15\ \mu\text{m}$ 器件测量结果

4.5 本章小结

本章介绍了 AlGaIn/GaN HEMT 结构溶液 pH 值传感器的制作工艺和传感特性

评测。在浮栅测量条件下,为了在器件的饱和区进行传感,以实现克服电压波动的目的,讨论了两种促进器件饱和的方法:减小栅长以达到载流子速度饱和;栅极制作 Pt 膜以达到 2DEG 夹断饱和。结果表明,同样的 V_{DS} 下,栅长变短可以提高 2DEG 内的电场,因此更容易在较低的工作偏压 V_{DS} 下达到饱和。实验中对栅极修饰 Pt 的器件在饱和区测得了一定的传感特性,但不够理想,且重复性不佳,有待进一步优化。

绝缘层的选取上,分别研究了氮化硅、BCB 和光刻胶三种材料。采用这几种材料的器件均显示出对不同 pH 值溶液的响应特性。BCB 具有优良的绝缘性和耐腐蚀性,在三种材料中性能最好,但工艺最为复杂;若综合考虑性能和工艺,则氮化硅也为可选方案,只是其厚度需要控制在合适的值,太薄会在测试中被腐蚀,太厚则会在工艺中发生严重侧蚀;光刻胶的工艺最为简单,但附着力较差。若用于溶液中其他物质的传感,则需要进一步结合这几种材料对所测溶液的耐受程度,以选取合适的绝缘材料。此外,研究中对上述各器件的测量,均未测得具有良好稳定性和重复性的传感特性, $I_{DS}-V_{DS}$ 曲线常有毛刺和不平滑的现象。分析认为很可能是浮栅测量时栅极电势不稳定所导致的(如 2.2 节所述),下步的研究中可尝试对栅极施加偏压。

第5章 结论

5.1 研究总结

AlGaIn/GaN HEMT 结构传感器良好的耐高温、耐腐蚀、抗辐射特性,使其在一些极端环境下的传感具有明显的优势。目前关于该种结构传感器已经报道了对多种物质的传感特性,但其工艺制作、理论分析和性能提升方面尚有研究空间,并且国内的相关研究还鲜有报道。本论文主要针对氢气传感器和溶液 pH 值传感器进行了研究,主要的研究成果如下:

建立了氢气传感器传感响应度的模型,并在 Pt 表面各吸附位具有不同吸附热的前提下,对模型涉及的朗缪尔等温方程进行了修正。用响应度模型对实验测得的传感响应度随氢气浓度、栅极偏压和温度的变化趋势进行了理论分析。同时指出提高 GaN 层的绝缘性从而减小漏电流,对于提高响应度、降低功率和优化高温工作特性具有重要意义。制作的氢气传感器在 130 °C 下对 2 ppm H₂/N₂ 混合气的传感响应度为 31.9%,为目前国内报道的该种传感器低浓度检测极限的最好结果。

国内首次报道了将 GaN 基 HEMT 传感器用于溶液检测。提出了 pH 值传感器浮栅测量中获得饱和区工作特性的两种基于不同机制的方法:减小栅极敏感区域长度和在栅极修饰金属 Pt。栅长为 15 μm 的器件在其饱和区测得了 2.19 mA/mm-pH 的灵敏度。在饱和区进行传感可以降低对电压源恒压特性的要求。

5.2 需进一步开展的工作

基于本论文的研究成果,还需进一步开展如下研究工作:提高 GaN 层的绝缘性,增大氢气传感器响应度;探究其在氧气存在的环境下的传感特性;对 pH 值传感器进行施加栅极偏压的测量;通过改变栅极修饰材料,实现对其他物质的传感;优化该种结构传感器的恢复特性和可重复性,以满足实用化需求。

参考文献

- [1] 张彩霞, 马小芬, 申霖, 等. 离子敏场效应晶体管(ISFET)的研究进展. 材料导报, 2007, 21(6):9-12.
- [2] J. Schalwig, G. Müller, M. Eickhoff, et al. Gas sensitive GaN/AlGa_N-heterostructures. Sens Actuators B, 2002, 87:425-430.
- [3] B. P. Luther, S. D. Wolter, S. E. Mohney. High temperature Pt Schottky diode gas sensors on n-type GaN. Sens Actuators B, 1999, 56:164-168.
- [4] Mishra U K, Shen L, Kazior T E, et al. GaN-Based RF power devices and amplifiers. Proceedings of the IEEE, 2008, 96:287-305.
- [5] O. Ambacher. Growth and applications of Group III-nitrides. J Phys D: Appl Phys, 1998, 31:2653-2710.
- [6] M. Stutzmann, G. Steinhoff, M. Eickhoff, et al. GaN-based heterostructures for sensor applications. Diamond Relat Mater, 2002, 11:886-891.
- [7] S. J. Pearton, F. Ren, Y. L. Wang, et al. Recent advances in wide bandgap semiconductor biological and gas sensors. Prog Mater Sci, 2010, 55:1-59.
- [8] M. Eickhoff, J. Schalwig, G. Steinhoff, et al. Electronics and sensors based on pyroelectric AlGa_N/Ga_N heterostructures Part B: Sensor applications. Phys Stat Sol (c), 2003, 6:1908-1918.
- [9] B. S. Kang, F. Ren, B.P. Gila, et al. AlGa_N/Ga_N-based metal-oxide-semiconductor diode-based hydrogen gas sensor. Appl Phys Lett, 2004, 84:1123-1125.
- [10] Y. Y. Tsai, K. W. Lin, H. I. Chen, et al. Hydrogen sensing properties of a Pt-oxide-GaN Schottky diode. J Appl Phys, 2008, 104:024515.
- [11] J. Song, W. Lu. AlGa_N/Ga_N heterostructure field effect transistors for high temperature hydrogen sensing with enhanced sensitivity. IEEE IEDM, 2007, 835-838.
- [12] J. Song, W. Lu, J. S. Flynn, et al. AlGa_N/Ga_N Schottky diode hydrogen sensor performance at high temperatures with different catalytic metals. Solid-State Electron. 2005, 49:1330-1334.
- [13] 虞惇. 半导体场效应化学传感器. 传感器技术, 1982, 4:32-40.
- [14] 罗细亮, 徐静娟, 陈洪渊. 场效应晶体管生物传感器. 分析化学, 2004, 32(10):1395-1400.
- [15] X. H. Wang, X. L. Wang, C. Feng. Hydrogen sensors based on AlGa_N/Al_N/Ga_N HEMT. Microelectron J, 2008, 39:20-23.
- [16] T. Higuchi, S. Nakagomi, Y. Kokubun. Field effect hydrogen sensor device with simple structure based on GaN. Sens Actuators B, 2009, 140:79-85.
- [17] C. F. Lo, C. Y. Chang, B. H. Chu, et al. Effect of humidity on hydrogen sensitivity of Pt-gated AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistor based sensors. Appl Phys Lett, 2010, 96:232106.

- [18] T. Anderson, F. Ren, S. Pearton, et al. Advances in hydrogen, carbon dioxide, and hydrocarbon gas sensor technology using GaN and ZnO-based devices. *Sensors*, 2009, 9:4669-4694.
- [19] Y. L. Wang, C. Y. Chang, W. Lim, et al. Oxygen gas sensing at low temperature using indium zinc oxide-gated AlGaIn/GaN high electron mobility transistors. *J Vac Sci Technol B*, 2010, 28:376-379.
- [20] K. H. Chen, H. W. Wang, B. S. Kang, et al. Low Hg(II) ion concentration electrical detection with AlGaIn/GaN high electron mobility transistors. *Sens Actuators B*, 2008, 134:386-389.
- [21] B. H. Chu, H. W. Lin, Y. L. Wang, et al. Chloride ion detection by InN gated AlGaIn/GaN high electron mobility transistors. *J Vac Sci Technol B*, 2010, 28:L5-L8.
- [22] Y. L. Wang, B. H. Chu, C. Y. Chang, et al. Long-term stability study of botulinum toxin detection with AlGaIn/GaN high electron mobility transistor based sensors. *Sens Actuators B*, 2010, 146:349-352.
- [23] B. H. Chu, C. Y. Chang, K. Kroll, et al. Detection of an endocrine disrupter biomarker, vitellogenin, in largemouth bass serum using AlGaIn/GaN high electron mobility transistors. *Appl Phys Lett*, 2010, 96:013701.
- [24] Y. L. Wang, B. H. Chu, K. H. Chen, et al. Fast detection of a protozoan pathogen, *Perkinsus marinus*, using AlGaIn/GaN high electron mobility transistors. *Appl Phys Lett*, 2009, 94:243901.
- [25] H. S. Huang, C. W. Lin, H. C. Chiu. High sensitivity pH sensor using $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT heterostructure design. *IEEE International Conference of Electron Devices and Solid-State Circuits*, 2008, 45-48.
- [26] M. S. Z. Abidin, A. M. Hashim, M. E. Sharifabad, et al. Open-gated pH sensor fabricated on an undoped-AlGaIn/GaN HEMT structure. *Sensors*, 2011, 11:3067-3077.
- [27] T. Kokawa, T. Sato, H. Hasegawa, et al. Liquid-phase sensors using open-gate AlGaIn/GaN high electron mobility transistor structure. *J Vac Sci Technol B*, 2006, 24:1972-1976.
- [28] B. H. Chu, B. S. Kang, C. Y. Chang, F. Ren, et al. Wireless detection system for glucose and pH sensing in exhaled breath condensate using AlGaIn/GaN high electron mobility transistors. *IEEE Sens J*, 2010, 10:64-70.
- [29] B. S. Kang, H. T. Wang, F. Ren, et al. pH sensor using AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with Sc_2O_3 in the gate region. *Appl Phys Lett*, 2007, 91:012110.
- [30] G. Steinhoff, M. Hermann, W. J. Schaff, et al. pH response of GaN surfaces and its application for pH-sensitive field-effect transistors. *Appl Phys Lett*, 2003, 83:177-179.
- [31] P. W. Atkins. *Physical Chemistry*, 6th ed. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- [32] H. Hasegawa, M. Akazawa. Mechanism and control of current transport in GaN and AlGaIn Schottky barriers for chemical sensor applications. *Appl Surf Sci*, 2008, 254:3653-3666.
- [33] K. I. Lundström, M. S. Shivaraman, C. M. Svensson. A hydrogen-sensitive Pd-gate MOS transistor. *J Appl Phys*, 1975, 46:3876-3881.
- [34] J. Song, W. Lu. Thermodynamic and kinetic analysis of hydrogen sensing in Pt/AlGaIn/GaN

- Schottky diodes at high temperatures. *IEEE Sens J*, 2008, 8:903-909.
- [35] 席光义. GaN 基高电子迁移率晶体管材料与器件特性研究[博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2008.
- [36] U. K. Mishra, P. Parikh, Y. F. Wu. AlGaIn/GaN HEMTs-an overview of device operation and applications. *Proc. IEEE*, 2002, 90:1022-1031.
- [37] 吴桐. AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管的静态特性研究[硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2002.
- [38] T. Y. Chen, H. I. Chen, Y. J. Liu, et al. Ammonia sensing characteristics of a Pt/AlGaIn/GaN Schottky diode. *Sens Actuators B*, 2011, 155:347-350.
- [39] C. H. Hamann, A. Hamnett, W. Vielstich. *Electrochemistry*, 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2007.
- [40] M. Jia, A. M. Meretskyi. Hydrogen Adsorption on Pt, Rh and Pt-Rh Electrodes. *Chin J Chem Eng*, 2005, 13:102-106.
- [41] F. G. Will. Hydrogen Adsorption on Platinum Single Crystal Electrodes. *J Electrochem Soc*, 1965, 112:451-455.
- [42] X. H. Wang, X. L. Wang, H. L. Xiao, et al. Hydrogen sensors based on Pt-AlGaIn/GaN back-to-back Schottky diode. *Phys Stat Sol (c)*, 2008, 5:2979-2981.
- [43] H. Kim, M. Schuette, H. Jung, et al. Passivation effects in Ni/AlGaIn/GaN Schottky diodes by annealing. *Appl Phys Lett*, 2006, 89:053516.
- [44] A. R. Cholach and N. N. Bulgakov. Adsorbed NH_x species on Pt(111) and Pt(100) surfaces studied by the semi-empirical method of interacting bonds. *Catal Lett*, 1999, 58:183-187.
- [45] 亢宝位. 场效应晶体管理论基础. 北京: 科学出版社, 1985.

致 谢

本文是在导师罗毅教授的精心指导下完成的。他严谨的科研作风和深厚的理论功底让我受益匪浅，他的前瞻性指导使我的研究工作能够把握正确的方向。在此，谨向罗老师表达我崇高的敬意和由衷的感谢。

感谢汪莱老师在学术知识、实验方案、器件工艺和文章撰写等方面的指导和帮助，他对学术的热忱投入、清晰的研究思路和干练的工作作风让我钦佩。

感谢郝智彪老师在学术知识和实验结果分析方面的悉心帮助和建议。

感谢台湾国立中山大学的李明逵教授在研究方案上的热心探讨和建议。

感谢台湾国立成功大学的刘文超教授在氢气传感器研究和半导体气体传感器测试系统设计方面的建议。

感谢北京帕斯克真空技术开发中心的李一凡老师、冉锐工程师和文宪伟工程师在半导体气体传感器测试系统设计、搭建和调试方面的悉心投入和帮助。

感谢齐京老师、李德杰老师在气体传感器测试系统设计与调试方面的建议。

感谢北京电子显微镜中心的闫允杰老师在 SEM 使用上的帮助。

感谢王磊师姐、王嘉星师兄在器件工艺和数据处理上的指导，感谢张敏老师课题组的博士生杨振在氢气传感器测试系统设计方面的建议，感谢技术员叶柳顺、王鸣巍、程顺波和徐蔚在器件工艺和设备使用上的帮助，感谢实验室同窗们的关心和支持！

感谢我的家人一直以来对我的鼓励和支持！

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：_____日 期：_____

个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果

个人简历

1987 年 1 月 11 日出生于内蒙古呼和浩特市。

2005 年 9 月考入清华大学电子工程系电子信息科学与技术专业，2009 年 7 月本科毕业并获得工学学士学位。

2009 年 9 月免试进入清华大学电子工程系电子科学与技术专业攻读工学硕士至今。

发表的学术论文

- [1] Z. B. Guo, L. Wang, Z. B. Hao, Y. Luo. pH sensor based on an AlGa_N/Ga_N HEMT structure. *Procedia Engineering*, 2012, 27:693-697. (2011 中国材料研讨会会议论文)
- [2] 郭智博, 汪莱, 郝智彪, 罗毅. 基于 AlGa_N/Ga_N HEMT 结构的氢气传感器. *真空科学与技术学报*. (EI 源刊, 已录用)

研究成果

- [1] 汪莱, 郭智博, 郝智彪, 罗毅. 用于氮化镓肖特基生化传感器的接触电极及其制备方法: 中国, CN102135520A. (中国专利公开号.)
- [2] 郭智博, 汪莱, 郝智彪, 罗毅. 基于 AlGa_N/Ga_N HEMT 结构的氢气传感器. 北京真空学会第一届安捷伦论文奖. 二等奖.