

06.2

О причине низкочастотного гистерезиса и дисперсии тока в гетероструктурных полевых транзисторах на основе AlGaIn/GaN

© П.А. Иванов, М.Е. Левинштейн

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 6 февраля 2003 г.

В режиме большого пилообразного сигнала на затворе (частота 10^{-2} – 10^{-1} Hz) обнаружены гистерезис переходных характеристик и дисперсия тока стока в гетероструктурных полевых транзисторах с двумерным электронным газом на основе AlGaIn/GaN. Наблюдаемая нестабильность объясняется тем, что область пространственного заряда (ОПЗ) в слое *n*-GaN, расширяющаяся при запираании транзистора, контролируется „плавающим“ потенциалом этого слоя, не имеющего гальванической связи с заземленным истоком. Как следствие, время релаксации индуцированного в ОПЗ заряда довольно велико и этот заряд не успевает следовать за изменениями потенциала затвора.

В настоящее время на основе гетероструктурной пары AlGaIn/GaN изготавливают полевые транзисторы с двумерным электронным газом (HFET), имеющие рекордно высокие значения выходной мощности в СВЧ диапазоне [1]. Проводимость 2D-газа в таких транзисторах выше по сравнению с транзисторами на основе гетеропары AlGaAs/GaAs. В частности, максимальная слоевая концентрация носителей (электронов) в 2D-газе AlGaIn/GaN HFETs составляет около $2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ [2], а подвижность электронов достигает $2100 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ при комнатной температуре [3]. Однако для AlGaIn/GaN HFETs пока остаются нерешенными некоторые проблемы, связанные с частотной дисперсией тока в режиме большого сигнала (см., например, [4–7]). Уменьшение амплитуды выходного тока наблюдают в очень широком диапазоне частот от 10^{-3} Hz до 10 GHz. Дисперсионные эффекты связывают, как правило, с перезарядкой глубоких ловушек, локализованных на интерфейсе AlGaIn/GaN, в барьерном слое AlGaIn или на поверхности слоя AlGaIn [5–8]. Однако, как было отмечено в работе [5], при определенных условиях дисперсия

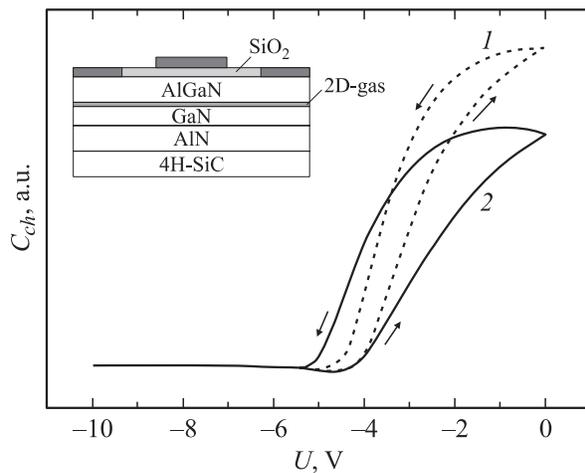


Рис. 1. Кривые изменения проводимости канала AlGaIn/GaN HFET под действием пилообразного управляющего напряжения, изменяемого в пределах от -10 V до нуля и обратно с частотой 10^{-2} Hz (1) и 10^{-1} Hz (2).

может привести к полному „коллапсу“ тока, поэтому за этот эффект не могут быть ответственны только глубокие ловушки.

В настоящей работе обсуждается еще один возможный механизм нестабильности в AlGaIn/GaN HFETs, обусловленный „плавающим“ потенциалом подложки.

Исследованные AlGaIn/GaN гетероструктуры были выращены MOCVD эпитаксией на полупроводящих 4H-SiC подложках [8] (см. вставку на рис. 1). Структуры включают в себя 50-нм буферный слой AlN, 0,4- μm слой *n*-GaN с высоким удельным сопротивлением и 10-нм барьерный слой $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$, легированный кремнием до концентрации $2 \cdot 10^{18}\text{ cm}^{-3}$. Перед нанесением затвора на поверхность структуры наносился 10-нм слой SiO_2 для уменьшения токов утечки затвора. В качестве затвора использовались напыленные Pt/Au контакты. В качестве омических контактов к стоку и истоку использовались напыленные Ti/Al/Ti/Au контакты.

На рис. 1 показаны типичные кривые изменения проводимости канала HFETs под действием пилообразного управляющего напряже-

ния, размах которого превышал по абсолютной величине пороговое напряжение $V_T = -5.5 \text{ V}$ (напряжение изменялось от -10 V до нуля и обратно с частотой 10^{-2} Hz (кривая 1) и 10^{-1} Hz (кривая 2)). Как видно, переходные характеристики, записанные таким способом, имеют характерный вид гистерезисной петли. При этом увеличение частоты колебаний управляющего напряжения приводило, с одной стороны, к усилению гистерезиса, а с другой стороны, к дисперсии тока, т.е. к уменьшению размаха колебаний проводимости канала. Наблюдаемый гистерезис переходных характеристик обусловлен, по-видимому, тем, что под влиянием изменяющегося потенциала затвора в структуре индуцируется некоторый заряд, время релаксации которого сравнимо по порядку величины с периодом изменения потенциала затвора.

По форме гистерезисной петли можно косвенно судить о том, в каком месте транзисторной структуры локализуется индуцированный заряд, и отчасти о том, каков механизм его релаксации. Предположим, что индуцированный заряд возникает между металлическим затвором и двумерным n -каналом в слое широкозонного AlGaIn, например за счет перезарядки ловушек на интерфейсе AlGaIn/GaN или на интерфейсе SiO₂/AlGaIn. При положительном смещении затвора в ловушках будет индуцироваться отрицательный заряд за счет захвата свободных электронов. Если этот заряд не успевает следовать за изменением потенциала затвора, то он будет вызывать неравновесное обеднение в слое высокоомного n -GaIn, уменьшая тем самым проводимость двумерного n -канала по сравнению с ее квазиравновесным значением. При отрицательном смещении затвора в ловушках будет индуцироваться положительный заряд, который, напротив, будет увеличивать проводимость двумерного канала по сравнению с квазиравновесной. Таким образом, при записи переходной характеристики из открытого состояния транзистора в закрытое проводимость канала будет меньше, чем при обратном проходе. Очевидно, что в том случае, когда индуцированный заряд возникает за двумерным n -каналом (в слое GaIn), знак гистерезиса будет противоположным: при переходе транзистора из открытого состояния в закрытое проводимость канала будет больше, чем при обратном проходе. Как видно из рис. 2, в исследованных HFETs реализуется именно второй случай, т.е. индуцированный заряд возникает за двумерным n -каналом в высокоомном слое GaIn.

Механизм возникновения и релаксации индуцированного заряда в слое n -GaIn может быть двояким. При запираании транзистора в

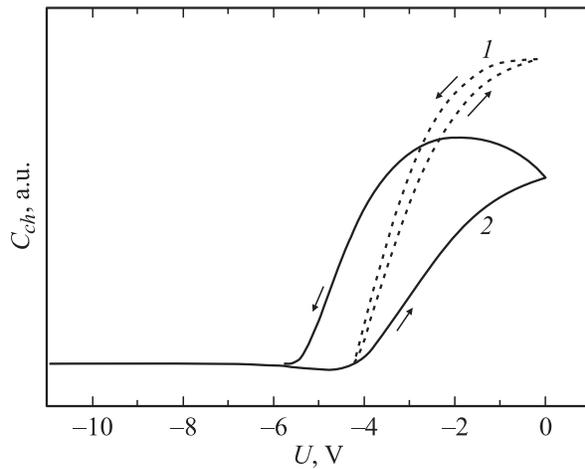


Рис. 2. Кривые изменения проводимости канала AlGaIn/GaN HFET под действием пилообразного управляющего напряжения, изменяемого в пределах от -4 В до нуля и обратно (1), от -20 В до нуля (2). Частота 10^{-2} Hz.

слой n -GaIn расширяется ОПЗ, образованная положительным зарядом ионизированных доноров. С одной стороны, рассматриваемым медленно релаксирующим индуцированным зарядом может быть заряд, возникающий при перезарядке глубоких ловушек (донорного типа) в слое GaIn. Однако в этом случае следует предполагать, что концентрация глубоких ловушек по порядку величины сравнима с концентрацией мелких легирующих доноров. Нам представляется более вероятным другое объяснение. В рассматриваемой конструкции транзистора подложка не имеет гальванической связи с заземленным истоком, т. е. толщина ОПЗ в объеме n -GaIn контролируется „плавающим“ потенциалом подложки. В этом случае медленно релаксирующим индуцированным зарядом будет непосредственно заряд мелких доноров в ОПЗ. Действительно, в условиях „плавающего“ потенциала подложки установление зарядового равновесия после изменения потенциала затвора может происходить только за счет генерационно-рекомбинационных процессов. Однако при комнатной температуре это время в случае широкозонного GaIn может быть весьма большим, так что заряд в ОПЗ не будет успевать

следовать за изменением управляющего напряжения. Рассмотренный механизм возникновения и релаксации индуцированного заряда косвенно подтверждается тем, что гистерезис переходных характеристик был незначительным в том случае, когда размах управляющего потенциала затвора не превышал I_T (рис. 2, кривая 1, записанная при $\Delta V_{GS} = 4 \text{ V}$). Этот результат довольно понятен, так как в этом случае изменение потенциала затвора не влияет на толщину ОПЗ: практически весь индуцированный заряд сосредоточен в двумерном канале. Напротив, при увеличении размаха потенциала затвора свыше 10 V гистерезис усиливался еще больше за счет большей величины заряда, индуцированного в ОПЗ (рис. 2, кривая 2, записанная при $\Delta V_{GS} = 20 \text{ V}$). Кроме того, при большом размахе управляющего напряжения наблюдался не совсем обычный эффект. Он заключается в том, что во время записи переходной характеристики в течение некоторого времени после прохождения точки поворота (при $V_{GS} = 0$) проводимость канала продолжает возрастать, хотя потенциал затвора уже изменяется в сторону запираения. Такой характер поведения проводимости канала может быть объяснен только тем, что „плавающий“ отпирающий потенциал подложки в течение этого времени продолжает расти, причем быстрее, чем запирающий потенциал затвора. Для устранения описанной нестабильности в конструкции транзисторов необходимо предусматривать электрический вывод от подложки или ее закоротку на исток, как это делается, например, в кремниевых МОП-транзисторах с инверсным каналом [10].

Работа поддержана грантом РФФИ N 02-02-17619.

Список литературы

- [1] *Simin G., Hu X., Il'inskaya N.* et al. // *Electronics Letters*. 2000. V. 36. P. 2043–2044.
- [2] *Gaska R., Yang J., Osinsky A.* et al. // *IEDM-97 Technical Digest*. Washington DC, 1997. P. 565.
- [3] *Gaska R., Shur M.S., Bykhovski A.D.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1999. V. 74. P. 287–289.
- [4] *Asif Khan M., Shur M.S., Chen Q.* et al. // *Electronics Letters*. 1994. V. 30. P. 2175–2176.
- [5] *Daumiller D., Theron D., Caguere C.* et al. // *IEEE Electron Dev. Lett.* 2001. V. 22. P. 62–64.

- [6] *Vetury R., Zhang N.Q., Keller S. et al. // IEEE Electron Dev. 2001. V. 48. P. 560–565.*
- [7] *Klein P.B., Binari S.C., Ikossi-Anastasiou K. et al. // Electronics Letters. 2001. V. 37. P. 662–664.*
- [8] *Tarakji A., Simin G., Il'inskaya N. et al. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. P. 2169–2171.*
- [9] *Asif Khan M., Hu X., Simin G. et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. P. 1339–1341.*
- [10] *Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 2. М.: Мир, 1984. 455 с.*