

# Гетероструктурный транзистор на квантовых точках с повышенной максимальной дрейфовой скоростью электронов

© В. Мокеров, Ю. Пожела\*<sup>¶</sup>, К. Пожела\*, В. Юцене\*

Институт СВЧ полупроводниковой электроники Российской академии наук,  
117105 Москва, Россия

\* Институт физики полупроводников,  
01108 Вильнюс, Литва

(Получена 21 июня 2005 г. Принята к печати 1 июля 2005 г.)

Изготовлен униполярный гетеротранзистор AlGaAs/GaAs/InAs/GaAs/InAs нового типа со слоем квантовых точек InAs непосредственно в канале GaAs. Экспериментально получены высокие значения максимального тока насыщения транзистора до 35 А/см и крутизны до 1300 мСм/мм. Представлена модель, объясняющая особенности вольт-амперной характеристики нового прибора ионизацией квантовых точек сильным полем и десятикратным повышением дрейфовой скорости электронов в структуре со слоем квантовых точек InAs вблизи гетероперехода AlGaAs/GaAs.

PACS: 85.30.Tv, 85.35.Be

## 1. Введение

В работах [1–3] показано, что униполярный транзистор с модулированным легированием на базе гетероструктуры AlGaAs/GaAs/InAs/GaAs/InAs со сформированными квантовыми точками (КТ) в слоях InAs является новым типом твердотельного прибора с электрическими характеристиками, принципиально отличными от характеристик обычного транзистора. Ударная ионизация КТ в канале транзистора приводит к инжекции в канал электронов проводимости, в результате чего электронный канал транзистора на КТ не запирается, как в обычном транзисторе, а наоборот, открывается отрицательным напряжением на затворе. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) нового прибора оказываются подобными ВАХ вакуумного триода. Это открывает новые функциональные возможности применения прибора.

Недостатком прибора является падение низкополевой подвижности электронов в канале GaAs при введении в канал слоя InAs с КТ. Это ухудшает усилительные и высокочастотные характеристики нового прибора.

Однако в работе [4] показано, что если слой InAs с высоким числом КТ вводится непосредственно в слой GaAs вблизи поверхности гетероперехода AlGaAs/GaAs с модулированным легированием, то, несмотря на снижение низкополевой подвижности электронов, их максимальная дрейфовая скорость, соответствующая насыщению тока в сильных полях, значительно возрастает. Использование такой гетероструктуры позволяет значительно улучшить усилительные и высокочастотные характеристики нового прибора.

В настоящей работе изготовлен гетеротранзистор на базе структуры с высокой дрейфовой скоростью насыщения и определены его характеристики, а также предложена модель, объясняющая ВАХ прибора с учетом эффекта повышения дрейфовой скорости насыщения.

## 2. Транзистор с высоким током насыщения и большой крутизной (эксперимент)

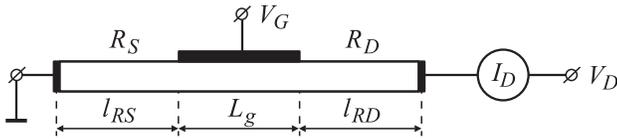
Методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращивалась гетероструктура, описанная в [4]. На полуизолирующей подложке GaAs (100) выращивался нелегированный барьерный слой GaAs толщиной 0.5 мкм и разделенные слоями GaAs (5.6 нм) два слоя InAs (1 нм), в котором формировались КТ с плотностью выше  $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Затем выращивались нелегированный спейсерный слой  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  толщиной 10 нм,  $\delta$ -легированный слой Si ( $2.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ) и нелегированный барьерный слой  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  толщиной 35 нм. Формирование гетероструктур завершалось выращиванием нелегированного слоя GaAs толщиной 10 нм и легированного кремнием ( $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) контактного слоя  $n^+$ -GaAs. Толщина проводящих слоев GaAs между слоями InAs и гетеропереходом составляла, с учетом размеров КТ, 2–3 нм, что, согласно [4], должно обеспечить многократное увеличение дрейфовой скорости насыщения.

Ширина квантовой ямы GaAs на уровне нижнего энергетического состояния — 15 нм, и оба слоя InAs оказываются внутри GaAs-ямы. Электроны захватываются в КТ. Измеренная концентрация свободных, не захваченных в КТ, электронов составляла  $6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Концентрация КТ диаметром 20–40 нм и толщиной 5–7 нм была  $\sim 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

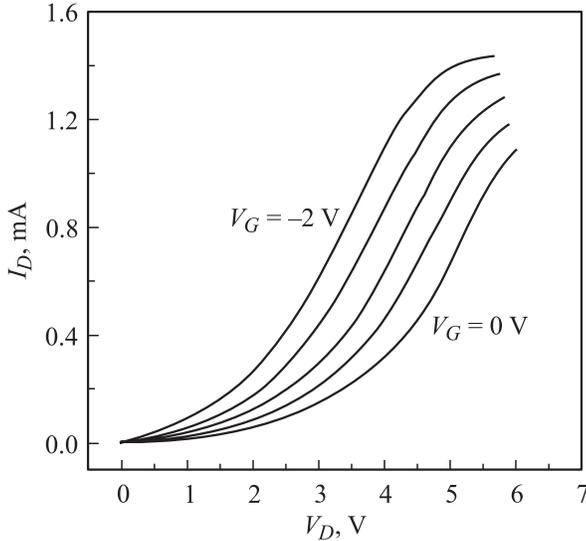
На рис. 1 показана схема транзистора, изготовленного на базе такой структуры. Экспериментальная структура имела следующие размеры: длина затвора  $L_g = 0.4 \text{ мкм}$ , длины участков затвор–исток, затвор–сток  $l_{RS} = l_{RD} = 1 \text{ мкм}$ . Ширина структуры  $W = 0.4 \text{ мкм}$ .

На рис. 2 показаны экспериментально измеренные зависимости тока стока,  $I_D$ , от напряжения на стоке,  $V_D$ , при различных значениях напряжений на затворе,  $V_G$ . Это типичные характеристики транзистора с КТ в канале, обусловленные ионизацией КТ [2,3]. Наблюда-

<sup>¶</sup> E-mail: pozela@spi.pfi.lt



**Рис. 1.** Схема транзистора с КТ на базе гетероструктуры  $n^+$ -GaAs/AlGaAs/GaAs/InAs/GaAs/InAs/GaAs.  $R_S$  и  $R_D$  — последовательные сопротивления исток-затвор и затвор-сток.



**Рис. 2.** Экспериментальные зависимости тока стока  $I_D$  от напряжения стока  $V_D$  транзистора с КТ при различных напряжениях затвора. Шаг изменения  $V_G$  равен 0.5 В.

ется двухступенчатый рост тока стока. Первая ступенька соответствует открытию канала вследствие ударной ионизации КТ в сильном поле, а вторая ступенька — завершению ионизации КТ и насыщению дрейфовой скорости электрона. В переходной между ступеньками области характеристики  $I_D(V_D)$  сдвинуты по шкале напряжений одна относительно другой на величину разности напряжений на затворе  $V_G$ .

Экспериментально наблюдаемый ток в области, близкой к насыщению, составляет 1.45 мА при  $V_G = -2$  В (рис. 2). Это означает, что плотность тока насыщения на единицу ширины затвора достигает необычно высокого значения — 3.5 А/см. Этому значению тока соответствует произведение концентрации электронов на их скорость  $n_{s0}v_s \approx 2.2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . Концентрация носителей в канале  $n_{s0}$  не превышает концентрации легирующей примеси ( $2.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ), и для объяснения высокого значения тока стока следует предположить десятикратное увеличение скорости насыщения по сравнению с дрейфовой скоростью насыщения в объемном GaAs, как это наблюдалось в [4].

Крутизна транзистора в переходной области достигает  $g_m = 1300 \text{ мСм/мм}$  при  $V_D = 4$  В,  $V_G = -1$  В.

Примечательно, что крутизна транзистора отрицательна и по своей абсолютной величине близка к по-

ложительной дифференциальной проводимости канала:

$$dI_D/dV_D \approx -dI_D/dV_g. \quad (1)$$

Крутизна максимальна в средней части переходной области. В области верхней и нижней ступенек крутизна резко падает.

### 3. Вольт-амперные характеристики и крутизна транзистора с квантовыми точками (модель)

Ток стока полевого транзистора при малых значениях напряжений сток-исток,  $V_D$ , равен

$$I_D = \beta_0 C (V_g V_D - V_D^2/2), \quad (2)$$

где  $C$  — удельная емкость затвора,  $V_g = V_G + V_T$ ,  $V_G$  — напряжение на затворе,  $V_T$  — напряжение отсечки,

$$\beta_0 = \frac{\mu_0 W}{L_g} \gamma_0. \quad (3)$$

Здесь  $\mu_0$  — подвижность электронов,  $W$  — ширина и  $L_g$  — длина затвора,

$$\gamma_0 = 1 - n_d/n_s, \quad (4)$$

где  $n_s$  — полное число электронов в канале транзистора, из них  $n_d$  электронов захвачены на КТ и не участвуют в проводимости. Множитель  $\gamma_0$  определяет основное отличие характеристик транзистора с КТ от обычного полевого транзистора.

Определим  $F_C$  как пороговое электрическое поле для ударной ионизации КТ. Положим, что при величине поля  $F \geq F_C$  все захваченные на КТ электроны освобождаются и участвуют в проводимости. Это означает  $\gamma_0 = 1$  при  $F \geq F_C$ . Пороговый ток стока, при котором электрическое поле в канале в области своего максимального значения у края затвора вблизи стока достигает пороговой величины

$$\left. \frac{d\phi}{dx} \right|_{L_g} = F_C, \quad (5)$$

где  $\phi$  — потенциал вдоль канала под затвором, равен [5]

$$I_{DC1} = \beta_0 L_g F_C \left( \sqrt{F_C^2 L_g^2 + V_g^2} - F_C L_g \right). \quad (6)$$

Соответствующее пороговое напряжение сток-исток равно

$$V_{gC} = V_g + F_C L_g - \sqrt{F_C^2 L_g^2 + V_g^2}. \quad (7)$$

Величине  $I_{DC1}$  соответствует не насыщение тока, а напротив, начало роста тока вследствие ионизации КТ. В результате ионизации КТ ток  $I_D$  растет до значения  $I_{DC2}$ , которому соответствует  $\gamma_0 = 1$ :

$$I_{DC2} = I_{DC1} \gamma_0^{-1}. \quad (8)$$

Крутизна транзистора в области после ионизации КТ,

$$Wg_{m2} = dI_{DC2}/dV_g = \gamma_0^{-1} \beta_0 L_g F_C V_g / \sqrt{F_C^2 L_g^2 + V_g^2},$$

достигает величины крутизны обычного транзистора без КТ в канале. Однако в переходной области от  $I_{DC1}$  до  $I_{DC2}$ , где происходит ионизация КТ, крутизна определяется скоростью ионизации, которая экспоненциально растет с ростом поля выше критического  $F_C$ . Характеризуя рост тока стока вследствие ударной ионизации КТ при  $V_D > V_{gC}$  параметром

$$\alpha = dI_D/dV_D, \quad (9)$$

который может достигать больших значений, получаем для крутизны

$$dI_D/dV_g = -\alpha \left( 1 - \frac{V_g}{\sqrt{V_g^2 + F_C^2 L_g^2}} \right) \quad (10)$$

в узком интервале напряжений стока

$$V_{gC} < V_D < V_{gC} + (I_{DC2} - I_{DC1}) \alpha^{-1}. \quad (11)$$

Крутизна отрицательна и из-за больших значений  $\alpha$  может значительно превышать крутизну обычного транзистора. Отрицательное значение крутизны означает отпирание электронного канала транзистора отрицательным напряжением на затворе.

При увеличении напряжения стока,

$$V_D > V_{gC} + I_{DC2} \alpha^{-1}, \quad (12)$$

ток стока растет. Этот рост тока ограничивается насыщением дрейфовой скорости электронов. Зависимость дрейфовой скорости электронов от поля  $F$  аппроксимируем как

$$\begin{aligned} v_{dr} &= \mu_0 F, & F < F_S, \\ v_{dr} &= v_S, & F \geq F_S, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $v_S$  — скорость насыщения,  $F_S$  — пороговое поле, при котором дрейфовая скорость насыщается.

Ток стока, при котором поле под затвором в области своего максимального значения достигает порогового значения  $F_S$ , соответствующего насыщению дрейфовой скорости,

$$\left. \frac{d\varphi}{dx} \right|_{L_g} = F_S, \quad (14)$$

равен

$$I_D^S = CW(V_g - V_{gS}) v_S. \quad (15)$$

Пороговое напряжение насыщения тока стока равно [5]

$$V_{gS} = V_g + F_S L_g - \sqrt{V_g^2 + F_S^2 L_g^2}. \quad (16)$$

Крутизна характеристики транзистора в области насыщения тока определяется скоростью насыщения:

$$g_m = C v_S. \quad (17)$$

В рассматриваемой гетероструктуре  $C \approx 10^{-7} \text{ А} \cdot \text{с} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ , и благодаря высокой скорости насыщения ( $v_S \approx 10^8 \text{ см/с}$ ) крутизна может достигать огромного значения —  $g_m \approx 10^4 \text{ мСм/мм}$ . Это важнейшее преимущество транзистора с КТ с повышенной дрейфовой скоростью по сравнению с другими видами полевых транзисторов.

С учетом последовательных сопротивлений сток-затвор,  $R_D$ , и затвор-исток,  $R_S$  (рис. 1), пороговое напряжение стока, при котором начинается ионизация КТ и выполняется условие (5), равно

$$V_{DC1} = V_{gC} - I_{DC1}(R_S + R_D). \quad (18)$$

Соответствующий пороговый ток равен [5]

$$I_{DC1} = \beta_0 L_g F_C \left( \sqrt{F_C^2 L_g^2 + (V_g - I_{DC1} R_S)^2} - F_C L_g \right). \quad (19)$$

Далее будем полагать  $R_S \approx R_D \gg \alpha^{-1}$ . Тогда ток  $I_{DC2}$  можно выразить в виде [6]

$$\begin{aligned} I_{DC2} &= \frac{\beta(F_C L_g)^2}{1 - \beta^2 R_S^2 (F_C L_g)^2} \\ &\times \left\{ \left[ 1 + 2\beta R_S V_g + V_g^2 / (F_C L_g)^2 \right]^{1/2} - (1 + \beta R_S V_g) \right\}, \end{aligned} \quad (20)$$

где  $\beta = \mu_0 W C / L_g$ .

Пороговое напряжение для тока  $I_{DC2}$  соответственно равно

$$V_{DC2} = V_{gS} + I_{DC2}(R_S + R_D). \quad (21)$$

Ток стока в области перехода от уровня начала ионизации КТ  $I_{DC1}$  до их полной ионизации  $I_{DC2}$  можно, полагая  $V_{gS}$  неизменным, аппроксимировать как

$$I_D = \frac{V_D - V_{gS}}{R_S + R_D} \quad \text{при} \quad I_{DC1} < I_D < I_{DC2}. \quad (22)$$

Крутизна транзистора отрицательна в относительно широкой области напряжений стока:

$$g_m = \frac{V_g / \sqrt{V_g^2 + F_C^2 L_g^2} - 1}{(R_S + R_D) W} \quad \text{при} \quad V_{DC1} < V_D < V_{DC2}. \quad (23)$$

При увеличении тока стока в канале под затвором формируется сильное поле, достаточное для насыщения дрейфовой скорости. Условие (14) выполняется при пороговом напряжении насыщения

$$V_D^S = V_{gS} + I_D^S (R_S + R_D), \quad (24)$$

где  $V_{gS}$  определено выражением (16).

Ток насыщения [5,6] равен

$$I_D^S = \beta V_0^2 \frac{(1 + 2\beta R_S V_g + V_g^2 / V_0^2)^{1/2} - (1 + \beta R_S V_g)}{1 - \beta^2 R_S^2 V_0^2}, \quad (25)$$

где  $V_0 = v_S L_g / \mu_0$ . Ток  $I_D^S$  в отличие от порогового тока ионизации КТ  $I_{DC1}$  (19) не изменяется с ростом напряжения на стоке  $V_D$ .

Согласно (25), при  $\beta R_S \gg 1$  ток насыщения и крутизну можно аппроксимировать как

$$I_D^S \approx \frac{V_g}{R_S} \quad \text{и} \quad g_m \approx \frac{1}{R_S W}. \quad (26)$$

Соответственно при  $\beta R_S \ll 1$  имеем (15) и (17).

Как видим, крутизна транзистора на КТ определяется величиной последовательного сопротивления  $R_S$ .

Сопротивление участка канала между затвором и истоком при малых токах равно

$$R_S = \frac{l_{RS}}{eW_R \mu_0 n_{sR} \gamma_0}, \quad (27)$$

где индекс  $R$  в  $\gamma_0$ ,  $n_{sR}$ ,  $W_R$  относится к величинам  $\gamma_0$ ,  $n_s$ ,  $W$  в канале на отрезке исток–затвор и  $l_{RS}$  — длина этого отрезка. Для получения высокой крутизны необходимо выполнить условие

$$\beta R_S = \frac{l_{RS}}{L_g V_T \gamma_0} \ll 1. \quad (28)$$

Здесь принято  $V_T = (e/C)n_{sR}$ .

Выполнение неравенства (28) затруднительно из-за захвата электронов на КТ в канале  $R_S$ :  $\gamma_0 \ll 1$ . При токе

$$I_D R_S \geq F_C l_{RS} \quad (29)$$

происходит ионизация КТ в канале  $R_S$ . В результате  $\gamma_0$  растет до единицы. Уменьшение  $R_S$  приводит к росту дифференциальной проводимости канала и крутизны прибора. Если при этом выполняется неравенство (28), крутизна достигает своего максимального значения (17).

Однако ток стока через  $R_S$  может расти лишь до максимального значения

$$I_{D2}^{\max} = e n_{sR} v_S W_R. \quad (30)$$

Максимальный ток через  $R_S$  уже не регулируется напряжением на затворе.

Рассмотренная модель объясняет основные особенности экспериментально наблюдаемой зависимости  $I_D(V_D)$  (рис. 2). Модель описывает экспериментальные характеристики в области, где происходит ударная ионизация КТ при следующих параметрах гетероструктуры:  $C \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ А} \cdot \text{с} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ ,  $n_s \approx 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ,  $\mu_0 = 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ,  $\gamma_0 = 10^{-1}$ ,  $F_C L_g = 1.5 \text{ В}$ . В согласии с экспериментом при  $V_G = 0$  и  $-2 \text{ В}$  получаем соответственно  $V_{gS} = 1.2$  и  $0.8 \text{ В}$ ,  $I_{DC1} = 0.18$  и  $0.05 \text{ мА}$ ,  $V_{DC1} = 3$  и  $1.1 \text{ В}$ ,  $g_m(V_{DC2}) = 240$  и  $920 \text{ мСм/мм}$ .

Ионизация КТ в канале затвор–исток имеет место при токе  $I_R \approx 0.3 \text{ мА}$ . При больших токах уменьшение  $R_S$  в  $\gamma_0$  раз приводит к увеличению крутизны, что также соответствует эксперименту.

Насыщение тока стока экспериментально наблюдается в случае  $V_G = -2 \text{ В}$  при  $V_D^S = 5 \text{ В}$ . Расчетное значение  $V_D^S = 2.2 \text{ В}$  при  $V_0 = (v_S/\mu_0)L_g = 4 \text{ В}$ , где  $v_S = 10^8 \text{ см/с}$ , в 2 раза меньше экспериментального значения. Расчетный ток насыщения при  $n_s \approx 10^{12} \text{ см}^{-2}$  и  $v_S = 10^8 \text{ см/с}$

равен  $I_D^S = 0.7 \text{ мА}$ , что также в 2 раза ниже экспериментальной величины  $1.4 \text{ мА}$ . Поэтому для совпадения расчетов с экспериментом следует принять в 2 раза большее значение для скорости насыщения  $v_S = 2 \cdot 10^8 \text{ см/с}$ .

Таким образом, сравнение рассчитанных данных с экспериментальными подтверждает наличие высокой дрейфовой скорости насыщения в канале транзистора на КТ.

## 4. Заключение

Показано, что введение барьера InAs с КТ непосредственно в канал гетероструктурного транзистора AlGaAs/GaAs с модулированным легированием позволяет многократно повысить максимальный ток стока и крутизну транзистора на КТ благодаря росту максимальной дрейфовой скорости электронов до  $10^8 \text{ см/с}$ . Экспериментально получена крутизна  $g_m = 1300 \text{ мСм/мм}$  и максимальный ток насыщения до  $35 \text{ А/см}$ .

Расчетная максимальная крутизна транзистора с КТ с повышенной дрейфовой скоростью электронов достигает  $10^4 \text{ мСм/мм}$ . В силу этого новый транзистор с КТ имеет существенные преимущества перед обычным полевым транзистором.

Транзистор на КТ открывает новый путь повышения быстродействия и коэффициента усиления полупроводниковых приборов в области сотен ГГц не за счет использования предельных возможностей субмикрометровой литографии, а за счет использования двух физических факторов: безынерционной ударной ионизации КТ в сильном электрическом поле и радикального повышения дрейфовой скорости насыщения электронов в канале транзистора.

## Список литературы

- [1] В.Г. Мокеров, Ю.В. Федоров, Л.Е. Велиховский, М.Ю. Щербакова. Докл. РАН, **375**, 754 (2000). [V.G. Mokerov, Yu.V. Fedorov, L.E. Velikhovskii, M.Yu. Scherbakova. Dokl. Phys., **45**, 649 (2000)].
- [2] V.G. Mokerov, Yu.V. Fedorov, L.E. Velikhovskii, M.Yu. Scherbakova. Nanotechnology, **12**, 552 (2001).
- [3] В.Г. Мокеров, Ю.К. Пожела, Ю.В. Федоров. ФТП, **37**, 1248 (2003). [V.G. Mokerov, Yu.K. Pozela, Yu.V. Fedorov. Semiconductors, **37**, 1217 (2003)].
- [4] Ю.К. Пожела, В.Г. Мокеров. ФТП, **40**, 362 (2006).
- [5] D. Delagebeaudeuf, N.T. Linh. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-29**, 955 (1982).
- [6] K. Lee, M. Shur, T.J. Drummond, H. Morkoc. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-30**, 207 (1983).

Редактор Л.В. Шаронова

## Heterostructure quantum dot transistor with an increased maximum electron drift velocity

*V. Mokerov, J. Pozēla\*, K. Požela\*, V. Juciene\**

Institute of Ultra High Frequency  
Semiconductor Electronics,  
Russian Academy of Sciences,  
117105 Moscow, Russia  
\* Semiconductor Physics Institute,  
01108 Vilnius, Lithuania

**Abstract** A new type of the unipolar AlGaAs/GaAs/InAs/GaAs/InAs-heterostructure transistor with an InAs quantum dot (QD) layer in a GaAs channel is produced. The high values of maximum saturation current up to 35 A/cm and transconductance up to 1300 mS/mm are observed experimentally. A model for the explaining specific properties of the current–voltage characteristics of the transistor is presented. The ionization of QDs and the tenfold increase of the electron maximum drift velocity in high electric fields in the structure containing InAs layers with QDs at the AlGaAs/GaAs interface are responsible for these specific properties.