

Большое повышение максимальной дрейфовой скорости электронов в канале полевого гетеротранзистора

© Ю.К. Пожела*[¶], В.Г. Мокеров[†]

* Институт физики полупроводников,
01108 Вильнюс, Литва

[†] Институт СВЧ полупроводниковой электроники Российской академии наук,
117105 Москва, Россия

(Получена 23 мая 2005 г. Принята к печати 30 июня 2005 г.)

Показано, что квантование моментов оптических фононов в квантовой яме GaAs путем формирования барьерного слоя InAs с квантовыми точками позволяет исключить неупругое рассеяние электронов на оптических фононах и повысить дрейфовую скорость электронов выше дрейфовой скорости насыщения. Экспериментально установлено десятикратное увеличение максимальной дрейфовой скорости электронов в сильных электрических полях в гетероструктуре AlGaAs/GaAs с введенными барьерами в виде квантовых точек InAs в квантовой яме GaAs в сравнении с дрейфовой скоростью насыщения в объемном GaAs. Увеличение максимальной дрейфовой скорости электронов позволяет повысить максимальную плотность тока, крутизну и частоту отсечки гетероструктурного полевого транзистора с квантовыми точками.

PACS: 85.30.Tv, 85.35.Be

1. Введение

Повышение крутизны и быстродействия транзисторов является центральной задачей современной электроники. Крутизна полевого транзистора (ПТ) g_m и предельная частота f_T определяются размерами активной области (длиной затвора L_g) и дрейфовой скоростью v_{dr} электронов в канале:

$$g_m \propto v_{dr}, \quad f_T \sim v_{dr}/L_g.$$

Повышение быстродействия достигается минимизацией длины канала транзистора на уровне предельных возможностей литографического процесса. Повышение быстродействия за счет увеличения подвижности и дрейфовой скорости электронов в структурах с модулированным легированием (MODFET или HEMT) ограничивается условием $v_{dr} < v_S$, где v_S — максимальная дрейфовая скорость в материале. В канале ПТ поле превышает 10^3 – 10^4 В/см и дрейфовая скорость электронов достигает своего максимального значения $v_S \approx 10^7$ см/с, которое соответствует насыщению тока. Насыщение дрейфовой скорости является физическим ограничением, которое формирует предел для повышения крутизны и быстродействия транзистора.

Максимальная дрейфовая скорость электронов в полупроводнике определяется резко неупругим рассеянием электронов на оптических фононах. В этом смысле $v_S \propto \sqrt{\hbar\omega_0}$ ($\hbar\omega_0$ — энергия оптического фонона) является фундаментальной постоянной материала. Фундаментальным решением проблемы повышения дрейфовой скорости электронов в сильных электрических полях является исключение неупругого рассеяния электронов оптическими фононами в канале транзистора. Известно, например, что в субмикрометровых структурах при

бесстолкновительном пролете дрейфовая скорость электронов в GaAs может достигать $(5-10) \cdot 10^7$ см/с [1].

В настоящей работе предложена слоистая гетероструктура GaAs/AlGaAs/GaAs/InAs/GaAs/InAs/GaAs, в которой удается путем квантования моментов фононов подавить рассеяние оптическими фононами и экспериментально наблюдать увеличение максимальной скорости дрейфа электронов в квантовой яме (КЯ/QW) GaAs с введенными тонкими слоями InAs с квантовыми точками (КТ/QD).

2. Квантование моментов оптических фононов и увеличение дрейфовой скорости в слоистой гетероструктуре

Рассмотрим транспорт электронов в модулированно легированной гетероструктуре AlGaAs/GaAs с введенными в КЯ GaAs слоями InAs с КТ (рис. 1).

В отсутствие слоев InAs с КТ электроны, захваченные в КЯ GaAs, ускоряясь в электрическом поле до энергии оптического фонона, теряют приобретенную в поле скорость в результате резкого неупругого рассеяния с эмиссией оптического фонона и останавливаются. Повторение процесса ускорения и остановки приводит к тому, что средняя дрейфовая скорость электронов не растет с ростом поля, а насыщается [2]. Рис. 2 иллюстрирует эффект ограничения дрейфовой скорости. Средняя максимальная дрейфовая скорость v_S может быть оценена как

$$v_S = v_{opt}/2, \quad (1)$$

где $v_{opt} = \sqrt{2\hbar\omega_0/m}$. Именно этот эффект лимитирует рост дрейфовой скорости электрона и ограничивает быстродействие и крутизну транзистора.

В GaAs момент электрона с энергией оптического фонона $\hbar\omega_0 = 36$ мэВ равен $k_{opt} = \pi/L_{opt}$, где

[¶] E-mail: pozela@spi.pfi.lt

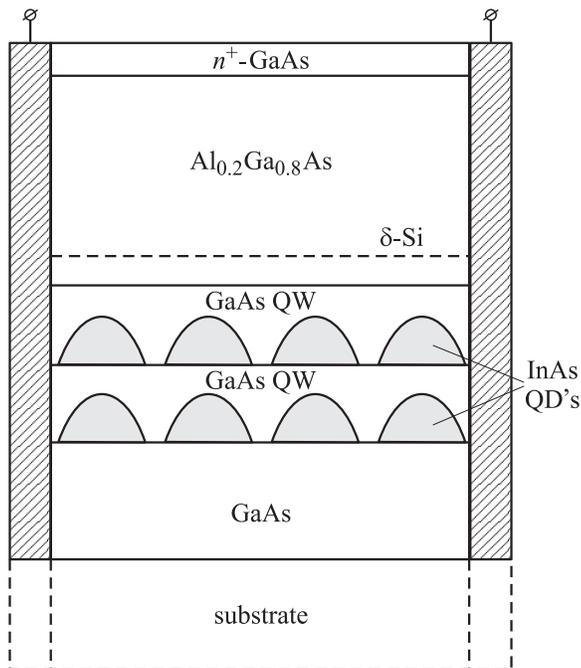


Рис. 1. Схема гетероструктуры AlGaAs/GaAs со слоями квантовых точек в квантовой яме GaAs. Слои структуры показаны не в масштабе.

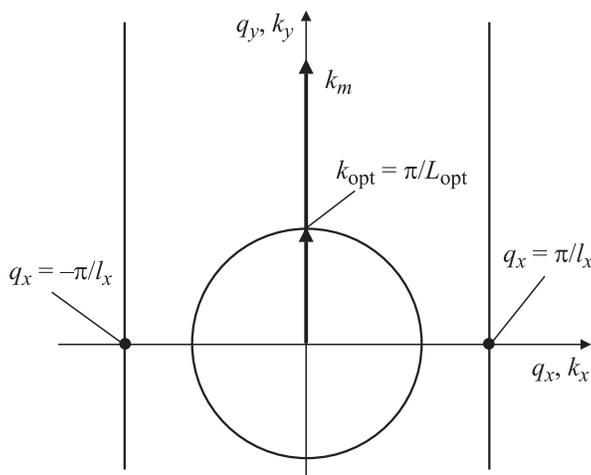


Рис. 2. Плоскость волновых векторов электронов \mathbf{k} и фононов \mathbf{q} . В отсутствие квантования волновой вектор электронов ограничивается окружностью с радиусом $k \leq k_{\text{opt}} = \sqrt{2\hbar\omega_0 m}/\hbar$. При квантовании оптические фононы между плоскостями $q_x = \pi/l_x$ отсутствуют. Электрон ускоряется до $\mathbf{k}_m > \mathbf{k}_{\text{opt}}$.

$L_{\text{opt}} = 12.5$ нм, и $v_S = 2 \cdot 10^7$ см/с. В полях $E > 10^4$ В/см в результате переброса электронов в верхние долины максимальная дрейфовая скорость снижается до $v_S \approx (0.7-1) \cdot 10^7$ см/с [3].

Задача о снижении электрон-фононного рассеяния путем квантования моментов оптических фононов решалась во многих работах [4–11]. Показано, что захват

фононов многократно уменьшает скорость рассеяния электронов на захваченных оптических фононах [5,6]. Однако захват фононов в фононную КЯ сопровождается генерацией поверхностных фононов на границе раздела гетероструктуры, и электрон при своем движении параллельно плоскостям раздела неупруго рассеивается на поверхностных фононах так же эффективно, как на объемных. Уменьшение скорости рассеяния на захваченных фононах в значительной степени компенсируется ростом скорости рассеяния на поверхностных фононах. Это означает, что квантование моментов оптических фононов только в одном, поперечном движении электронов, направлении не решает задачи о резком снижении скорости рассеяния электронов на оптических фононах.

Формирование в КЯ GaAs слоев КТ InAs приводит к квантованию моментов оптических фононов в GaAs между КТ InAs как в продольном, так и в поперечном движении электрона направлении. Каждая линзообразная КТ [12] является отражателем для оптических фононов в GaAs. Минимальный момент оптического фонона в направлении x есть

$$q_x = \frac{\pi}{l_x}, \tag{2}$$

где l_x — толщина слоя GaAs между КТ InAs и гетеропереходом. Если $l_x < 12.5$ нм, то электроны в своем движении, достигнув энергии оптического фонона, не встречают фононов, на которых они могли бы рассеяться (рис. 2), и их дрейфовая скорость растет с ростом электрического поля, пока не происходит неупругое рассеяние на квантованном оптическом фононе. Условия сохранения энергии и импульса дают для нового максимального значения дрейфовой скорости электрона, v_{max} , в направлении, перпендикулярном x ,

$$\frac{v_{\text{max}}}{v_S} = 1 + \left(\frac{L_{\text{opt}}}{l_x} \right)^2. \tag{3}$$

Необходимым условием для существенного увеличения максимальной дрейфовой скорости является малый размер длины квантования l_x . Это условие можно выполнить при достаточной плотности КТ, образующих сплошной барьер вдоль всего канала структуры и малой толщине слоев GaAs между слоями КТ. Например, в GaAs при $l_x \approx 4$ нм, согласно (3), дрейфовая скорость электрона v_{max} при квантовании момента фонона превышает максимальную дрейфовую скорость при рассеянии на объемных фононах, v_S , в 10 раз.

Квантование момента оптических фононов выталкивает их из пространства моментов электронов и тем самым снимает ограничение роста дрейфовой скорости.

3. Экспериментальное наблюдение повышения дрейфовой скорости

Схема выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии структур показана на рис. 1. На полуизолирующей подложке GaAs (100) выращивался нелегиро-

ванный барьерный слой GaAs толщиной 0.5 мкм и разделенные слоями GaAs (5.6 нм) два слоя InAs (1.07 нм), в которых формировались КТ различных размеров и с различной плотностью. Затем выращивались нелегированный спейсерный слой $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ толщиной 10 нм, δ -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 6 нм и легированного кремнием ($3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) контактного слоя n^+ -GaAs.

Длина структуры между токовыми контактами составляла 2 мкм, а ширина канала GaAs — 0.4 мкм. Квантовые точки представляли собой „линзы“ диаметром 20–40 нм и толщиной 3–5 нм [10–12]. Существенным является то, что в отличие от работ [13,14] оба слоя КТ InAs располагались на расстоянии меньше 10 нм от границы гетероперехода AlGaAs/GaAs, т.е. внутри КЯ GaAs (ширина КЯ на уровне нижнего энергетического состояния $L \approx 15 \text{ нм}$). Это приводило к захвату на КТ свободных электронов, индуцированных в КЯ GaAs.

В рассматриваемой структуре расстояние между слоями КТ и гетеропереходом с учетом толщины КТ было 1–2 нм, благодаря чему величина минимального момента оптического фонона оказывалась много больше $k_{\text{опт}}$. Это обеспечивало при достаточной плотности КТ отсутствие рассеяния электронов на захваченных фононах.

Были выращены также структуры с меньшей концентрацией КТ. В этих структурах нарушались условия квантования моментов фононов на малых длинах, и лишь малое число свободных электронов в канале захватывалось на КТ.

Выращенные оба типа структур — с большой и малой плотностью КТ — имели существенно разные проводимости и вольт-амперные характеристики. Измерение низкополевой холловской подвижности и концентрации электронов показывает, что от плотности КТ зависит не только число захваченных электронов на КТ, но и их подвижность. Измерения концентрации свободных электронов в этих структурах показали, что в структуре с малым числом КТ концентрация свободных электронов близка к той, что имеет структура без КТ, $8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. В структуре с большой концентрацией КТ эта концентрация лишь $6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Практически все свободные электроны оказываются захваченными на КТ и не участвуют в проводимости.

В образцах с большим количеством КТ ($3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$) подвижность ($\mu \approx 2830 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) оказалась выше, чем в образцах с малым числом КТ ($\mu \approx 1000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$).

Зависимости тока I_D через структуру с большой плотностью КТ от напряжения на структуре V_D демонстрируют двухступенчатый рост тока, характерный для полевого транзистора с КТ [15], с хорошо проявленным насыщением тока на уровне 500 мкА для всех образцов (см. рис. 3). Первая ступенька соответствует началу ионизации КТ в сильном электрическом поле, вторая — насыщению тока после ионизации КТ.

Прирост тока от первой полки до второй за счет освобождения n_d электронов из КТ во всех образцах с

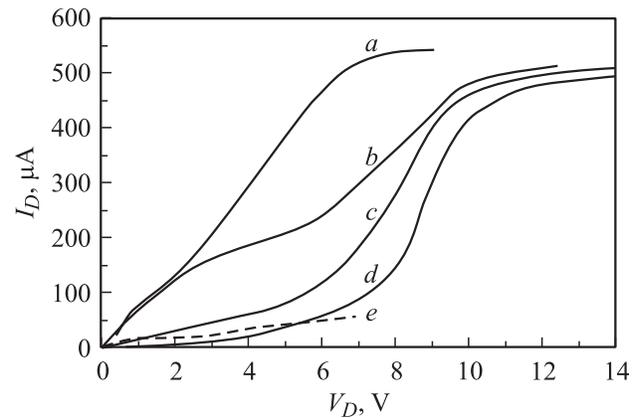


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики структур с большой плотностью КТ: *a, b* и *c* — различная толщина контактного слоя n^+ -GaAs, *d* — стравлен контактный слой. *e* — ВАХ структуры с малой плотностью КТ.

различной толщиной контактного слоя составляет 450–500 мкА (рис. 3). Этому приросту тока соответствует равенство

$$n_d v_{\text{max}} = (0.7-0.8) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (4)$$

где v_{max} — новое значение максимальной дрейфовой скорости.

Плотность и латеральные размеры КТ InAs в рассматриваемой структуре не превышали $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ и 40 нм [12,13,16,17]. Соответственно максимальное количество электронов, захваченных на КТ, не превышало $n_d \approx 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Значит, согласно (4), наблюдаемая максимальная дрейфовая скорость в области насыщения тока составляет

$$v_{\text{max}} \geq (7-8) \cdot 10^7 \text{ см/с} \quad (5)$$

и на порядок превышает максимальную дрейфовую скорость в объемном GaAs $v_s \approx 0.8 \cdot 10^7 \text{ см/с}$ при $E > 3 \cdot 10^4 \text{ В/см}$.

Столь большое увеличение дрейфовой скорости соответствует условию независимости низкополевой подвижности $\mu_0 = 3 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ от величины электрического поля благодаря исключению рассеяния на оптических фононах. В поле $E_2 = 3 \cdot 10^4 \text{ В/см}$ в области второй ступеньки дрейфовая скорость $v_{\text{др}2} = \mu_0 E_2 = 10^8 \text{ см/с}$, или $v_{\text{др}2} \approx v_{\text{max}}$. В поле $E_1 = 10^4 \text{ В/см}$ в области первой ступеньки $v_{\text{др}1} = \mu_0 E_1 = 3 \cdot 10^7 \text{ см/с}$, или $v_{\text{др}1} > v_s$. Эксперимент подтверждает, что в области первой ступеньки не наблюдается насыщения тока, обусловленного насыщением дрейфовой скорости v_s , характерного для ПТ без КТ.

Таким образом, экспериментально открыт эффект гигантского увеличения максимальной дрейфовой скорости электронов в КЯ GaAs при введении в нее барьера InAs с КТ в сравнении с дрейфовой скоростью насыщения в объемном GaAs ($v_s \approx 10^7 \text{ см/с}$).

Гигантский рост максимальной дрейфовой скорости электронов наблюдается только в структуре с большой плотностью КТ в слое InAs (выше $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$). В структуре с малой плотностью КТ в слое InAs (меньше $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$) дрейфовая скорость не превышает дрейфовой скорости насыщения в объемном GaAs. Об этом свидетельствует то обстоятельство, что максимальный ток через такую структуру, несмотря на высокую концентрацию свободных электронов в канале ($8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$), не превышает 70 мкА (рис. 3). Это соответствует дрейфовой скорости насыщения $v_S \approx 10^7 \text{ см/с}$.

Этот факт мы связываем с тем, что при концентрации КТ больше $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ образуется сплошной, разделяющий фононы в КЯ GaAs барьер из КТ. Из-за отражения фононов от барьеров из КТ их момент квантуется и максимальная дрейфовая скорость электронов, согласно (3), растет. При меньшем числе КТ оптические фононы захватываются лишь на отдельных малых участках вдоль канала GaAs. На большей части длины канала фононный барьер отсутствует и рассеяние электронов на оптических фононах велико.

Гигантский рост тока насыщения не обусловлен ростом тока через поверхностный контактный слой n^+ -GaAs высокой проводимости (рис. 1). Ток насыщения через слой n^+ -GaAs толщиной 10 нм не превышал 50 мкА и был малым по сравнению с большим ростом тока насыщения в канале с КТ. Токи в переходной области, где происходит ударная ионизация КТ, зависят от толщины, распределения заряда в канале и контактном слое n^+ -GaAs и других факторов [15]. Они во многом различаются от образца к образцу (рис. 3). Однако после завершения ионизации КТ для всех образцов характерен выход на почти одинаковый высокий уровень тока насыщения $\sim 500 \text{ мкА}$, демонстрирующий эффект гигантского роста максимальной дрейфовой скорости.

Наконец, гигантский рост тока насыщения не обусловлен ударной ионизацией зона–зона и лавинным умножением числа носителей тока. Оценка коэффициента ударной ионизации зона–зона в GaAs в поле $4 \cdot 10^4 \text{ В/см}$ дает $\alpha_m \approx 10^4$ [18]. Однако эксперимент при росте поля E в области насыщения тока не дает такого умножения. Эффект умножения носителей тока наблюдается лишь в некоторых образцах при температуре жидкого азота.

Таким образом, квантование оптических фононов в узких КЯ позволяет преодолеть фундаментальный барьер для роста дрейфовой скорости $v_S \approx 10^7 \text{ см/с}$ и увеличить дрейфовую скорость до нового максимального значения $v_{\text{max}} \gg v_S$.

4. Заключение

Квантование моментов оптических фононов в GaAs путем формирования фононных барьеров (слоев КТ InAs) непосредственно в КЯ GaAs позволяет исключить неупругое рассеяние электронов на уровне энергии оп-

тического фонона и тем самым повысить максимальную дрейфовую скорость электрона.

Экспериментально установлено десятикратное увеличение максимальной дрейфовой скорости в сильных электрических полях в гетероструктурах AlGaAs/GaAs с введенными барьерами КТ InAs с большой плотностью ($3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$) в КЯ GaAs в сравнении с дрейфовой скоростью насыщения в объемном GaAs.

Увеличение дрейфовой скорости в гетероструктурах с КТ позволяет значительно повысить плотность тока, крутизну и частоту отсечки полевых транзисторов на базе таких структур.

Список литературы

- [1] J. Požela. *Physics of High-Speed Transistors* (Plenum Press, N.Y.–London, 1993).
- [2] I. Vosylius, I. Levinson. *Zhurn. Exp. Theor. Fiz.*, **50**, 1660 (1966); *Fiz. Tverd. Tela*, **10**, 1462 (1968).
- [3] G. Hill, P.N. Robson. *Sol. St. Electron.*, **25**, 589 (1982).
- [4] N. Mori, T. Ando. *Phys. Rev. B*, **40**, 6175 (1989).
- [5] I. Lee, S.M. Goodnick, M. Gulia, E. Molinary, P. Lugli. *Phys. Rev. B*, **51**, 7046 (1995).
- [6] J. Požela, K. Požela, V. Jucienė. *Semicond. Sci. Technol.*, **10**, 1076, 1555 (1995).
- [7] J. Požela, V. Jucienė, A. Namajūnax, K. Požela. *Physica E*, **5**, 108 (1999).
- [8] B.K. Ridley. *Phys. Rev. B*, **39**, 5282 (1989).
- [9] B.K. Ridley, M. Babiker, N.A. Zakhleniuk, C.R. Bennett. In: *Proc. 23rd Int. Conf. on Physics of Semiconductors* (Berlin, 1966) (World Sci., Singapore, 1966) p. 1807.
- [10] G.B. Galiev, V.E. Kaminskii, V.A. Kul'bachinskii. In: *Micro- and Nanoelectronics 2003*, ed. by K.A. Valiev, A.A. Orlikovsky [Proc. SPIE, (SPIE, Bellingham, WA, 2004) v. 5401, p. 466].
- [11] Ю. Пожела, К. Пожела, В. Юцене. *ФТП*, **34**, 1053 (2000) [J. Požela, K. Požela, V. Jucienė. *Semiconductors*, **34**, 1011 (2000)].
- [12] D. Bimberg, M. Grundmann, N. Ledentsov. *Quantum Dot Heterostructures* (N.Y., John Wiley & Sons, 1999) p. 122.
- [13] H. Sakaki, G. Yusa, T. Someya, Y. Ohno, T. Noda, H. Akiyama, Y. Kadoya, H. Noge. *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 3444 (1995).
- [14] P. Redkozubov, D.Yu. Ivanov, Yu.V. Dubrovskii, A. Levin, A. Neumann, L. Eaves, M. Henini. In: *Proc. 11th Int. Symp. „Nanostructures: Physics and Technology“* (St. Petersburg, 2003) (Ioffe Inst., 2003) p. 404.
- [15] 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)].
- [16] Н.А. Черкашин, М.В. Максимов, А.Г. Макаров, В.А. Щукин, В.М. Устинов, Н.В. Луковская, Ю.Г. Мусихин, Г.Э. Цырлин, Н.А. Берг, Ж.И. Алфёров, Н.Н. Леденцов, Д. Бимберг. *ФТП*, **37** (7), 890 (2003).
- [17] Г.Г. Зегря, О.В. Константинов, А.В. Матвеевцев. *ФТП*, **37** (3), 334 (2003).
- [18] K. Thronber. *J. Appl. Phys.*, **52**, 279 (1981).

Редактор Л.В. Шаронова

Giant increase of electron maximum drift velocity in a channel of heterostructure field-effect transistor

*J.K. Požela**, *V.G. Mokerov***

* Semiconductor Physics Institute,
01108 Vilnius, Lithuania

** Institute of Ultra High Frequency
Semiconductor Electronics,
Russian Academy of Sciences,
117105 Moscow, Russia

Abstract It is shown that the quantization of an optical phonon momentum in the GaAs quantum well (QW) by inserting a barrier layer of InAs with quantum dots (QD) eliminates non-elastic scattering of electrons by optical phonons and allows us to increase the electron drift velocity over the saturations drift velocity. It is determined experimentally that there is a tenfold increase of the electron maximum drift velocity in high electric fields in the AlGaAs/GaAs heterostructure with an inserted InAs barrier layer with QDs into GaAs QW in comparison with saturated drift velocity in the bulk GaAs. The increase of electron maximum drift velocity allows to increase the maximum current density, gain and cutoff frequency of heterostructure field-effect transistors with QDs.