

Максимальная дрейфовая скорость электронов в селективно легированных гетероструктурах InAlAs/InGaAs/InAlAs с введенной InAs-вставкой

© А. Шиленас, Ю. Пожела[¶], К. Пожела, В. Юцене, И.С. Васильевский^{*+}, Г.Б. Галиев^{*}, С.С. Пушкарев^{*}, Е.А. Климов^{*}

Институт физики полупроводников Центра физических и технологических наук,
01108 Вильнюс, Литва

^{*} Институт СВЧ полупроводниковой электроники Российской академии наук,
117105 Москва, Россия

⁺ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
115409 Москва, Россия

(Получена 16 июля 2012 г. Принята к печати 25 июля 2012 г.)

Исследована зависимость подвижности и дрейфовой скорости электронов от условий роста, толщины и параметров легирования InAs-вставки в центре квантовой ямы селективно легированной гетероструктуры InAlAs/InGaAs/InAlAs. Получено рекордное повышение до $(2-4) \cdot 10^7$ см/с дрейфовой скорости электронов в электрическом поле $5 \cdot 10^3$ В/см в квантовый яме InGaAs толщиной 17 нм при толщине нелегированной InAs-вставки 4 нм. Показано, что при дополнительном легировании InAs-вставки с повышением плотности электронов в квантовой яме до $4.0 \cdot 10^{12}$ см⁻² максимальная дрейфовая скорость достигает $2 \cdot 10^7$ см/с в поле $7 \cdot 10^3$ В/см.

1. Введение

Селективно легированные гетероструктуры InAlAs/InGaAs/InAlAs благодаря высокой подвижности электронов в квантовых ямах (КЯ) InGaAs стали базовыми элементами самых быстродействующих транзисторов сверхвысочастотного СВЧ диапазона [1–5].

Наивысшие значения подвижности электронов достигаются путем снижения примесного рассеяния (путем селективного легирования), а также путем снижения электрон-фононного рассеяния (путем захвата электронов и фононов в КЯ) [6–10].

В работах [9–12] получено повышение подвижности электронов путем снижения электрон-фононного рассеяния при введении тонкой InAs-вставки.

В работе [6] показано, что подвижность электронов зависит от ширины InAs-вставки. В КЯ шириной $L_e = 17$ нм при толщине вставки InAs $L_a = 4$ нм имеет место максимальное значение подвижности. В интервале 5–12 нм подвижность резко падает до минимума. Получено, что при толщине InAs-вставки 4 нм максимальная дрейфовая скорость электронов в 1.5–2 раза выше, чем в структуре без InAs-вставки.

В настоящей работе с целью достижения максимальных значений дрейфовой скорости насыщения, подвижности и плотности электронов рассматриваются селективно легированные структуры InAlAs/InGaAs/InAlAs с введенной InAs-вставкой с различной степенью легирования и толщиной.

2. Скорость рассеяния и подвижность электронов

Определим оптимальное значение толщины InAs-вставки в КЯ InGaAs для получения наивысшей подвижности электронов.

Подвижность электронов в КЯ InGaAs с InAs-вставкой толщиной L_a оценивалась как

$$\mu(L_a) = \frac{e}{\bar{m}} \frac{1}{(L_a)WL(L_a)}, \quad (1)$$

где $\bar{m}(L_a)$ — среднее значение электронной эффективной массы в слоистой гетероструктуре InGaAs/InAs/InGaAs и $WL(L_a)$ — скорость рассеяния электронов с энергией 50 мэВ на захваченных в КЯ полярных оптических (ПО) и интерфейсных (ИФ) фононах [6].

На рис. 1 показана зависимость подвижности электронов от толщины InAs-вставки L_a для двух толщин КЯ InGaAs ($L_e = 10$ и 17 нм). В образце с $L_e = 17$ нм максимальное увеличение подвижности имеет место при толщине $L_a = 4$ нм. При $L_e = 10$ нм максимум подвижности имеет место при $L_a = 2.1$ нм. При этом максимальная подвижность в КЯ шириной $L_e = 10$ нм в 1.2 раза выше, чем в КЯ шириной $L_e = 17$ нм.

Заметим, что наивысшее, когда-либо измеренное, значение частоты отсечки $f_T = 644$ ГГц было получено для полевого транзистора с InGaAs-каналом толщиной 10 нм с InAs-вставкой 5 нм [4,5].

3. Низкополевая подвижность электронов

Цель настоящих исследований заключается в изучении влияния вставок InAs в КЯ InGaAs на дрей-

[¶] E-mail: pozela@pfi.lt

Холловская подвижность μ_e и концентрация электронов n_{s0} при $T = 300$ К. Ширина InAs-вставки L_a и уровень легирования вставки N_{Si}

Тип образца	μ_e , $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$	n_{s0} , 10^{12}cm^{-2}	InAs-вставка L_a , нм	N_{Si} , легирование InAs-вставки	T_{gr} (InAs), °C	$P(\text{As}_4)$, мкТорр	
						InGaAs	InAs
861*	8387	2.607	—	—	—	9.9	—
862	2385	2.394	4.0	—	410	10.0	3.8
863	992	2.621	8.0	—	410	9.8	2.3
864*	1344	2.703	2×3.5	—	410	9.8	2.1
865*	9780	3.238	4.0	—	430	9.9	2.8
866	1284	2.484	4.0	—	410	9.8	9.8
867*	9108	2.853	4.0	—	430	9.8	9.8
868*	3063	3.963	4.0	$2.8 \cdot 10^{18}\text{cm}^{-3}$	430	9.8	9.8
890	2452	1.308	4.0	$\delta\text{Si } 1.7 \cdot 10^{12}\text{cm}^{-2}$	430	9.8	9.8
891	2419	3.145	4.0	$7.5 \cdot 10^{17}\text{cm}^{-3}$	430	9.8	9.8

Примечание. * Образцы этого типа исследованы также в работе [6].

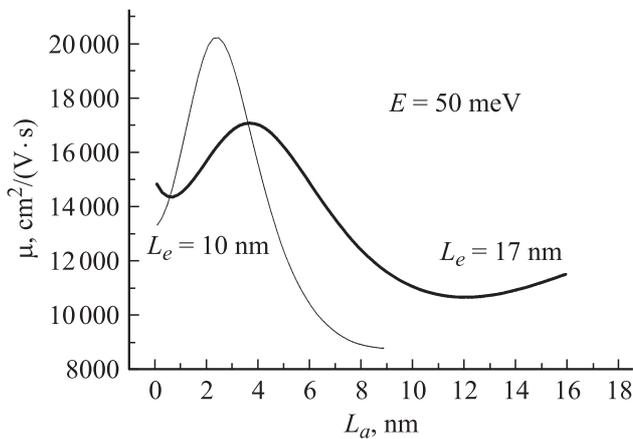


Рис. 1. Оценка зависимости средней подвижности электронов с энергией 50 мэВ μ от толщины InAs-вставки L_a для двух толщин квантовых ям $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$: $L_e = 10$ и 17 нм. Учитывалось лишь рассеяние электронов на полярных оптических и интерфейсных фононах.

фовую подвижность носителей в двухсторонне δ -легированных кремнием гетероструктурах $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$. Исследуемые образцы были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на полуизолирующих подложках InP с ориентацией $(100) \pm 0.1^\circ$ фирмы Wafer Technology LTD. Общая технология выращенных образцов заключается в том, что сначала выращивалась базовая структура (образец 861), параметры которой, а также температура роста слоев представлены на рис. 2. Следующие образцы выращивались таким образом, что суммарная толщина КЯ InGaAs вместе со вставками InAs была постоянной и равнялась 17 нм. Кроме того, оставалось постоянным для всех образцов и количество внедренного кремния при сохранении постоянным соотношения степени легирования $\delta 1\text{-Si}$ и $\delta 2\text{-Si}$ (в нашем случае $N_{\delta 1\text{-Si}}/N_{\delta 2\text{-Si}} = 4.4$). В случае однородно легированных

вставок (образцы 868 и 891) их легирование проводилось за счет уменьшения уровня легирования барьерных слоев при сохранении суммарного количества внедренного кремния. Следующие образцы, кроме образца 861, выращивались с введенными в КЯ вставками InAs. При этом менялись толщины вставок, и (или) условия их формирования, а именно температура роста и парциальное давление мышьяка в камере роста установки МЛЭ. В таблице показаны измеренные параметры μ_e , n_{s0} и L_a структур InAlAs/InGaAs/InAlAs с введенной InAs-вставкой с различной степенью легирования N_{Si} и толщиной L_a , а также с технологическими условиями их формирования T_p и P_{As} .

Результаты измерений показывают высокую чувствительность величины низкополевой подвижности электронов в КЯ к технологическому режиму роста и толщины InAs-вставки.

62 Å	<i>i</i> - $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	cap	$T_g = 490^\circ\text{C}$
170 Å	<i>i</i> - $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	barrier	$T_g = 490^\circ\text{C}$
		$\delta 2\text{-Si}$	
46 Å	<i>i</i> - $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	spacer	$T_g = 490^\circ\text{C}$
170 Å	<i>i</i> - $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	QW	$T_g = 430^\circ\text{C}$
46 Å	<i>i</i> - $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	spacer	$T_g = 500^\circ\text{C}$
		$\delta 1\text{-Si}$	
0.24 μm	<i>i</i> - $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	buffer	$T_g = 500^\circ\text{C}$
		(100)InP substrate	

Рис. 2. Схематическое изображение поперечного сечения базового образца (образец 861) с указанием температуры роста слоев.

Образцы можно разделить на 3 группы.

К 1-й группе относятся образцы 865 и 867, в которых в соответствии с теоретической оценкой введение технологически совершенной InAs-вставки (рост при 430°C) оптимальной толщины (4 нм) приводит к повышению подвижности электронов по сравнению с опорным образцом 861.

2-я группа — это образцы 868, 890 и 891, в которых InAs-вставка легировалась донорными примесями. В образце 890 δ -Si легирование приводит к сильному снижению подвижности и понижению плотности свободных электронов. В образцах 868 и 891 с однородным легированием по всей толщине InAs-вставки подвижность электронов снижается, однако имеет место большой рост плотности носителей в КЯ (выше $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$).

Наконец, к 3-й группе относятся образцы, в которых введение InAs-вставки в КЯ привело к сильному снижению подвижности по сравнению с базовым образцом 861 без InAs-вставки. Это образцы 862, 863 и 866, в которых InAs-вставки выращивались при температуре 410°C и при разных давлениях мышьяка, что приводило к резкому снижению подвижности электронов. В образцах 863 и 864 толщина InAs-вставки составляла 7–8 нм. Снижение подвижности при $L_a = 8 \text{ нм}$, в сравнении с подвижностью при $L_a = 4 \text{ нм}$, соответствует теоретически предсказанному увеличению скорости рассеяния в образцах с толстой InAs-вставкой (см. рис. 1).

4. Максимальное значение дрейфовой скорости электронов

Максимальное значение дрейфовой скорости v_{max} в сильных полях F определяет значение предельной частоты усиления FET по току f_T ,

$$f_T = \frac{v_{\text{max}}}{2\pi\lambda_g}, \quad (2)$$

где λ_g — длина затвора.

Два механизма рассеяния электронов в КЯ InGaAs определяют максимальное среднее значение дрейфовой скорости в сильных полях: (1) неупругое рассеяние на ПО фононах и (2) междолинный перебор Γ - L при разогреве электронов.

При сильном неупругом рассеянии электронов с эмиссией ПО фонона дрейфовая скорость в сильных полях достигает насыщения, которое оценивается как

$$v_{\text{sat}} \approx \sqrt{\frac{\hbar\omega_0}{2m^*}}, \quad (3)$$

где в InGaAs $\hbar\omega_0 = 34 \text{ мэВ}$, $m^* = 0.041m_0$ и $v_{\text{sat}} \approx 2.7 \cdot 10^7 \text{ см/с}$. В КЯ в связи с захватом ПО фононов частота ИФ фононов определяет величину v_{sat} .

Уменьшение скорости рассеяния электронов на ПО и ИФ фононах при введении InAs-вставки ослабляет этот механизм насыщения дрейфовой скорости, и максимальное значение дрейфовой скорости ограничивается

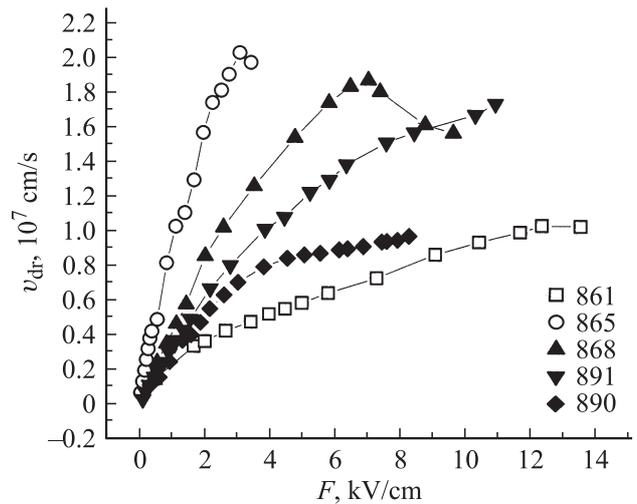


Рис. 3. Полевая зависимость дрейфовой скорости электронов v_{dr} в образцах 868, 890 и 891 с легированной InAs-вставкой в сравнении с образцами 861 и 865 без легирования InAs-вставки.

пиковым значением дрейфовой скорости $v_{\text{max}}(F_{\text{th}})$ при пороговом значении поля F_{th} , при котором имеет место междолинный перебор электронов.

Полевые зависимости дрейфовой скорости в КЯ InGaAs с введенной InAs-вставкой были измерены в образцах, которые имели форму беззатворных мезоструктур шириной 400 мкм с нанесенными полосками Au/Ni/Ge омических контактов площадью $400 \times 400 \text{ мкм}^2$, разделенными расстоянием $d = 18 \text{ мкм}$. ВАХ измерялись при помощи импульсов длиной 1.5 мкс с частотой повторения 40 Гц, чтобы предотвратить нагревание кристалла. Электрическое поле определялось как $F = V/d$, где V — приложенное к образцу напряжение.

Полевые зависимости дрейфовой скорости электронов в образцах 2-й группы 868, 890, 891 с легированными InAs-вставками показаны на рис. 3. Для сравнения приведены полевые зависимости дрейфовой скорости для опорного образца 861 и образца с высокой подвижностью 865.

Нужно отметить, что сильно легированные образцы 868 и 891 имеют малую низкополевую подвижность в сравнении с образцами 861 и 865 с нелегированной вставкой. Однако максимальные дрейфовые скорости в этих образцах сравнимы по величине и близки к $2 \cdot 10^7 \text{ см/с}$.

Легирование вставок InAs внутри КЯ InGaAs повышает скорость рассеяния электронов ионизованными примесями. Однако при увеличении энергии электронов скорость рассеяния ионизованными примесями резко падает и не ограничивает увеличения дрейфовой скорости горячих электронов в сильных полях. Поэтому дополнительное легирование внутри InAs-слоя повышает плотность электронов и сохраняет высокий уровень максимальной дрейфовой скорости. Это позволяет по-

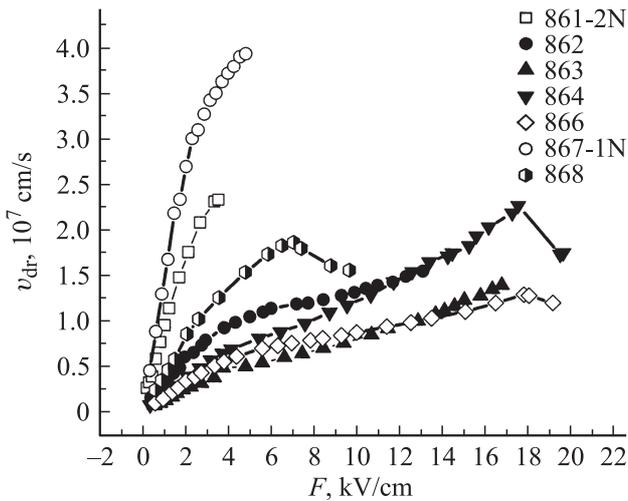


Рис. 4. Полевая зависимость дрейфовой скорости электронов v_{dr} в образцах 862–864, 866 и 868 с малой низкополевой подвижностью. Рекордные значения максимальной дрейфовой скорости, получены в отдельных образцах 867 с InAs-вставкой и 861 без InAs-вставки.

высить параметры быстродействующих транзисторов в области СВЧ.

На рис. 4 показаны полевые зависимости дрейфовой скорости в образцах 3-й группы с низкой полевой подвижностью, с различной толщиной и параметрами нелегированной InAs-вставки.

В образцах 863 и 864 с толстой (7–8 нм) InAs-вставкой, несмотря на понижение подвижности, дрейфовая скорость достигает высокого максимального значения $2 \cdot 10^7$ см/с в электрических полях выше 15 кВ/см. Наименьшее значение дрейфовой скорости имеют образцы 866 и 862 с 4 нм InAs-вставками, выращенными при температуре 410°C.

Полевые дрейфовые скорости электронов в сильных электрических полях существенно зависят от технологии выращивания структур и сильно различаются от образца к образцу. На рис. 4 показаны наивысшие значения $v_{dr}(F)$, полученные для отдельных образцов 867 с оптимальной 4 нм InAs-вставкой и 861 — без InAs-вставки. Получено рекордное значение величины максимальной дрейфовой скорости электронов $4 \cdot 10^7$ см/с при 5 кВ/см.

Столь высокое значение дрейфовой скорости электронов в канале полевого транзистора позволяет получить максимальное значение частоты отсечки $f_T > 10^3$ ГГц при длине затвора $\lambda_g < 10^{-5}$ см.

5. Заключение

Оценка величины низкополевой подвижности электронов в КЯ InGaAs с InAs-вставкой толщиной до 4 нм показывает рост подвижности электронов с уменьшением толщины КЯ от 17 до 10 нм.

Введение InAs-вставки толщиной 4 нм в центр КЯ шириной 17 нм селективно легированной гетероструктуры InAlAs/InGaAs/InAlAs, выращенной методом МЛЭ, позволяет повысить максимальную дрейфовую скорость до $(2-4) \cdot 10^7$ см/с.

Легирование InAs-вставки позволяет увеличить плотность электронов до $4 \cdot 10^{12}$ см⁻² в канале гетероструктуры InAlAs/InGaAs/InAlAs при сохранении максимальной дрейфовой скорости $2 \cdot 10^7$ см/с.

Работа поддержана проектами Совета науки Литвы (Grant No. MIP-091/2011-AM) и Министерства образования и науки России № 14.740.11.0869 и № 16.513.11.3113.

Список литературы

- [1] H. Zhao, Y.-T. Chen, J.H. Yum, Y. Wang, F. Zhou, F. Xue, J.C. Lee. *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 102 101 (2010).
- [2] X. Wallart, B. Pinsard, F. Mollot. *J. Appl. Phys.*, **97**, 053 706 (2005).
- [3] Jesus A. del Alamo. *Nature*, **479**, 317 (2011).
- [4] Dae-Hyun Kim, Jesus A. del Alamo. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **31**, 806 (2010).
- [5] Dae-Hyun Kim, Jesus A. del Alamo. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **29**, 830 (2008).
- [6] K. Požela, A. Šilėnas, J. Požela, V. Jucienė, G.B. Galiev, I.S. Vasil'evskii, E.A. Klimov. *Appl. Phys. A*, **109**, 233 (2012).
- [7] Ю. Пожела, К. Пожела, В. Юцене. *ФТП*, **41**, 1093 (2007).
- [8] K. Požela, J. Požela, V. Jucienė, I.S. Vasil'evskii, G.B. Galiev, E.A. Klimov, A. Sužiedėlis, N. Žurauskienė, V. Stankevič, S. Keršulis, Č. Paškevič. *Acta Phys. Polon. A*, **119**, 170 (2011).
- [9] V.A. Kulbachinskii, N.A. Yuzeeva, G.B. Galiev, E.A. Klimov, I.S. Vasil'evskii, R.A. Khabibullin, D.S. Ponomarev. *Semicond. Sci. Technol.*, **27**, 035 021 (2012).
- [10] J. Požela, K. Požela, V. Jucienė, A. Sužiedėlis, N. Žurauskienė, A.S. Shkolnik. *Lithuanian J. Phys.*, **51**, 270 (2011).
- [11] Ю. Пожела, К. Пожела, Р. Рагуотис, В. Юцене. *ФТП*, **45**, 778 (2011).
- [12] J. Požela, K. Požela, V. Jucienė, A. Shkolnik. *Semicond. Sci. Technol.*, **26**, 014 025 (2011).

Редактор Т.А. Полянская

Maximal electron drift velocity in selectively-doped InAlAs/InGaAs/InAlAs heterostructures with InAs inserts

A. Šilėnas, Yu. Požela, K. Požela, V. Jucienė,
I.S. Vasil'evskii^{*†}, G.B. Galiev^{*},
S.S. Pushkarev^{*}, E.A. Klimov^{*}

Semiconductor Physics Institute,
Center for Physical Sciences and Technology,
01108 Vilnius, Lithuania

^{*} Institute of Microwave Semiconductor Electronics,
Russian Academy of Sciences,
117105 Moscow, Russia

[†] National Research Nuclear University MEPhI,
115409 Moscow, Russia

Abstract The influence of growth conditions, thickness and doping level of the InAs insert located in a center of the quantum well (QW) of the selectively-doped InAlAs/InGaAs/InAlAs heterostructures was investigated. The record increase of the maximal drift velocity up to $(2-4 \cdot 10^7)$ cm/s is obtained at the electric field of $5 \cdot 10^3$ V/cm when the undoped InAs thickness was 4 nm and the QW width was 17 nm. It is shown that the additional doping of the InAs insert up to electron density of $4.0 \cdot 10^{12}$ cm⁻² in the InGaAs QW reduces the electron mobility, but in spite of that, maximal drift velocity reaches $2 \cdot 10^7$ cm/s at the electric field of $7 \cdot 10^3$ V/cm.