

Дрейфовая скорость электронов в квантовой яме в сильных электрических полях

© В.Г. Мокеров, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Ю. Пожела*,[¶], К. Пожела*,
А. Сужделис*, В. Юцене*, Ч. Пашкевич*

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

* Институт физики полупроводников,
01108 Вильнюс, Литва

(Получена 16 июня 2008 г. Принята к печати 8 июля 2008 г.)

Экспериментально обнаружено повышение, по сравнению с максимальной дрейфовой скоростью электронов в объемных материалах, максимальной дрейфовой скорости в квантовых ямах гетероструктуры AlGaAs/GaAs различной конфигурации и псевдоморфной гетероструктуры $\text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$. Установлено, что полевая зависимость дрейфовой скорости двумерных электронов в GaAs и $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ не имеет области отрицательной дифференциальной проводимости. Насыщение дрейфовой скорости в квантовой яме GaAs имеет место в полях, в несколько раз превышающих поле, соответствующее перебору электронов Г-долины в L-долину в объемном GaAs.

PACS: 72.20.Ht, 72.10.Di, 73.40.Kp, 73.63.Hs

1. Введение

Известно, что в GaAs дрейфовая скорость электронов в электрическом поле выше 10^4 В/см не превышает 10^7 см/с [1–4]. Поэтому повышение быстродействия высокочастотных (сотни ГГц) полевых транзисторов (ПТ) путем уменьшения времени пролета электронов активной области канала транзистора достигается за счет сокращения длины затвора ниже сотни нанометров. Необходимость использования специальной литографии в нанометровом диапазоне значительно усложняет и удорожает процесс изготовления СВЧ ПТ.

Однако недавно было обнаружено, что в квантовых ямах (КЯ) специальных гетероструктур типа AlGaAs/GaAs дрейфовая скорость электронов в сильных электрических полях может значительно превышать максимальную дрейфовую скорость в объемном GaAs [5–7]. Это открывает альтернативный путь создания СВЧ транзисторов в диапазоне сотен ГГц не за счет усложнения литографического процесса, а путем повышения максимальной дрейфовой скорости в канале гетероструктуры.

Теоретические оценки [8–10] показывают, что уменьшение скорости неупругого рассеяния электронов оптическими фононами в широкой КЯ GaAs (ширина $L > 10$ нм) отвечает за повышение максимальной дрейфовой скорости в сильных электрических полях.

В настоящей работе с целью определения условий повышения максимальной дрейфовой скорости экспериментально исследована зависимость дрейфовой скорости электронов от электрического поля в гетероструктурах AlGaAs/GaAs различной конфигурации, а также в псевдоморфной гетероструктуре $\text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$.

2. Образцы

Были исследованы четыре типа гетероструктур, параметры которых приведены в таблице.

Структура А представляет собой однопереходную гетероструктуру $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ с δ -легированным (Si) барьером и эффективной шириной треугольной КЯ на уровне нижнего электронного состояния $z_0 = 6$ нм.

Структуры В и С представляют собой двухбарьерные гетероструктуры $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с двухсторонним легированием (Si), различающиеся шириной КЯ: в структуре В она равна 10 нм, а в структуре С 26 нм.

Структура D представляет собой псевдоморфную двухбарьерную гетероструктуру $\text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}$ с сильно легированным слоем $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$.

Для исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) каналов в гетероструктурах были изготовлены образцы, представляющие собой беззатворные мезоструктуры шириной 100 мкм с омическими контактами (Au/Ni/Ge) площадью 100×100 мкм с различными зазо-

Основные параметры исследованных гетероструктур

Тип структуры [номер]	Ширина КЯ L , нм	Концентрация электронов n_s , 10^{12} см $^{-2}$	Подвижность электронов μ , см 2 /В · с
А [4Г]	6*	1.18	5100
В [660]	10	1.0	3100
С [17π]	26	0.7	2200
Д [663]	16	6	1500

Примечание. * — приведена эффективная ширина КЯ z_0 на уровне нижнего электронного состояния.

[¶] E-mail: pozela@pfi.lt

рами между истоковым и стоковым контактами d от 6 до 90 мкм.

3. Дрейфовая скорость электронов в квантовой яме AlGaAs/GaAs

Полевая зависимость дрейфовой скорости электронов в КЯ GaAs полагается схожей с полевой зависимостью в объеме GaAs с характерной областью отрицательной дифференциальной проводимости [11]. Однако в зависимости тока сток–исток в канале AlGaAs/GaAs полевого гетеротранзистора отрицательная дифференциальная проводимость не наблюдается. Для объяснения ВАХ ПТ в теории используются различные аппроксимации для зависимости дрейфовой скорости электронов в КЯ от поля, в которых отсутствует область отрицательной дифференциальной проводимости [12].

Для определения особенностей зависимости дрейфовой скорости электронов в КЯ от поля были экспериментально измерены ВАХ в трех типах структур AlGaAs/GaAs (А, В и С — см. таблицу).

На рис. 1 показана полевая зависимость тока, $I(E)$, в GaAs-канале структуры А с единичным гетеробарьером AlGaAs/GaAs (треугольная КЯ). Поле в образце определено как $E = V/d$, где V — напряжение на образце длиной d . Примечательно, что для всех пяти исследованных образцов структуры А с различными длинами d между контактами получены точно совпадающие результаты зависимости тока от поля. Полевая зависимость тока $I(E)$ полностью определяет полевую зависимость дрейфовой скорости: $v_{dr}(E) = I(E)/qn_s w$, где $w = 100$ мкм — ширина канала, q — заряд электрона. Для структуры А насыщению тока при 30 мА соответствует дрейфовая скорость $v_{sat} = 1.5 \cdot 10^7$ см/с.

Как видим, полевая зависимость дрейфовой скорости не имеет области с отрицательной дифференциальной

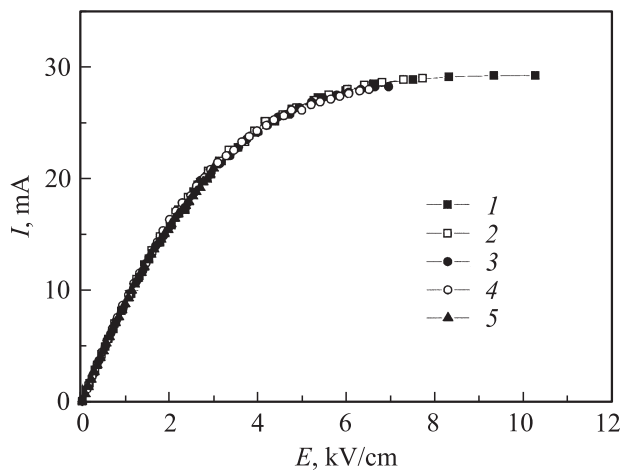


Рис. 1. Зависимости тока I от напряженности электрического поля E в КЯ единичного гетероперехода AlGaAs/GaAs (структура А) в образцах с длиной канала $d = 10$ (1), 20 (2), 30 (3), 40 (4), 100 мкм (5).

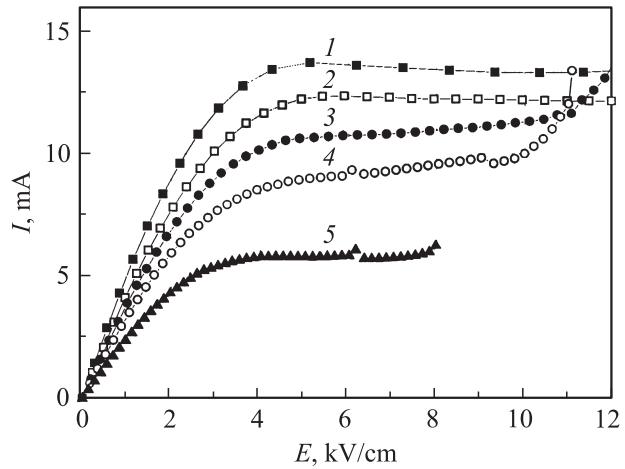


Рис. 2. Полевые зависимости тока в КЯ двухбарьерной гетероструктуры AlGaAs/GaAs/AlGaAs типа В в образцах с длиной канала $d = 10$ (1), 20 (2), 30 (3), 40 (4), 60 мкм (5). Ширина КЯ $L = 10$ нм.

проводимостью, и электрическое поле 8 кВ/см, при котором происходит насыщение тока, значительно выше порогового поля 3 кВ/см для междолинного Γ – L перебора электронов, приводящего к спаду дрейфовой скорости в объемном GaAs.

Экспериментально наблюдаемую сублинейную зависимость $v_{dr}(E)$ мы связываем с уменьшением скорости рассеяния носителей тока в верхних L -долинах GaAs при захвате электрона в треугольную КЯ [8–10]. В результате роста в верхних долинах GaAs подвижности захваченных в КЯ электронов междолинный Γ – L перебор в полях 2–4 кВ/см не приводит к возникновению отрицательной дифференциальной проводимости. Насыщение дрейфовой скорости в больших полях (8–12 кВ/см) мы связываем с процессом перебора электронов из L - в X -долину [4]. Величина максимальной дрейфовой скорости, соответствующая насыщению тока в КЯ GaAs типа А, в 1.5 раза превышает дрейфовую скорость насыщения 10^7 см/с в объемном GaAs.

В отличие от гетероструктуры А с одним гетеробарьером, в двухбарьерных структурах В и С с двусторонним легированием полевые зависимости тока через образец существенно зависят от длины d образца. На рис. 2 показаны зависимости $I(E)$ образцов структуры В с длинами $d = 10, 20, 30, 40, 60$ мкм; на рис. 3 — схожие зависимости $I(E)$ для структуры С при $d = 6, 10, 30$ мкм.

Наблюдается значительное снижение тока при одинаковом поле с ростом длины образца d , которое соответствует уменьшению концентрации носителей в канале с ростом приложенного к образцу напряжения. Эффект изменения концентрации электронов в канале КЯ GaAs мы связываем с наличием параллельных каналов проводимости — с легированными слоями в AlGaAs-барьерах.

В КЯ GaAs полевая зависимость тока не имеет отрицательной дифференциальной проводимости (рис. 1),

а в параллельном AlGaAs-слое, где электроны не квантуются, она неизбежно возникает при поле в канале выше 3 кВ/см. Возмущение распределения зарядов в области отрицательной дифференциальной проводимости приводит к перераспределению потенциала вдоль AlGaAs-слоя, которое существенно отличается от ненарушенного распределения потенциала вдоль GaAs-канала с положительной дифференциальной проводимостью. В результате между этими двумя каналами возникает разность потенциалов ΔV_g . Образование разности потенциалов на емкости C между двумя каналами приводит к индуцированию $\Delta n_{\text{ind}} = C\Delta V_g/q$ электронов в канале КЯ GaAs.

Нарушение распределения заряда вдоль AlGaAs-слоя может носить сложный характер. Амплитуда нарушения распределения потенциала определяется соотношением между временем пролета электронов расстояния d между электродами, t_{tr} , и временем релаксации, τ_{RC} , определяющим скорость нарастания возмущения объемного заряда в области отрицательной дифференциальной проводимости. При $t_{\text{tr}} = \tau_{RC}$ возмущение нарастает в e раз. Заметим, что, как показано в [13], время релаксации возмущения объемного заряда τ_{RC} в слоистых гетероструктурах значительно превышает максвелловское время релаксации в объемном материале. Амплитуда возмущения потенциала, а значит и величина ΔV_g , возрастает с ростом времени пролета $t_{\text{tr}} = d/v_{\text{dr}}$. Соответственно росту амплитуды возмущения зарядов за время пролета величины ΔV_g и Δn_{ind} возрастают с ростом длины образца d . В длинных образцах из-за большого значения Δn_{ind} наряду с возмущением потенциала вдоль параллельных AlGaAs-каналов происходит искажение потенциала и в канале КЯ GaAs. При этом ВАХ принимает сложный вид. В структуре С качественное искажение ВАХ наблюдается уже в образцах длиной $d = 30$ мкм при напряжениях на образце $V = Ed$ выше 0.1 В (рис. 3).

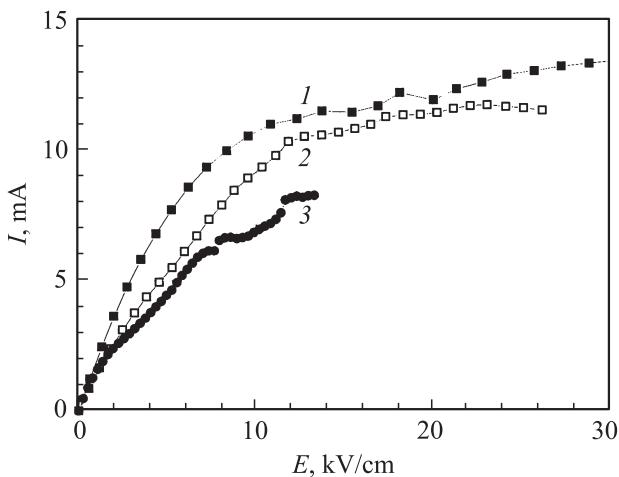


Рис. 3. Полевые зависимости тока в КЯ двухбарьерной гетероструктуры AlGaAs/GaAs/AlGaAs типа С в образцах с длиной канала $d = 6$ (1), 10 (2), 30 мкм (3). Ширина КЯ $L = 26$ нм.

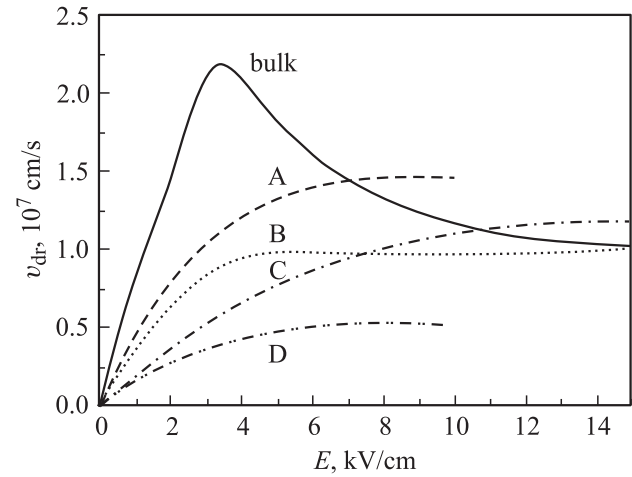


Рис. 4. Полевые зависимости дрейфовой скорости $v_{\text{dr}}(E)$ электронов в КЯ GaAs гетероструктур типа А, В и С в сравнении с дрейфовой скоростью в объемном GaAs. D — зависимость $v_{\text{dr}}(E)$ в КЯ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}$.

Наименьшее значение Δn_{ind} в GaAs-канале имеет место в образцах с наименьшей длиной d . Поэтому полевые зависимости тока в образцах структуры С длиной 6 мкм (рис. 2) и структуры В длиной 10 мкм (рис. 3) близко соответствуют полевой зависимости дрейфовой скорости. Более точное соответствие тока дрейфовой скорости получим, оценив путем экстраполяции значение тока при $d = 0$.

На рис. 4 показаны полевые зависимости дрейфовой скорости в образцах структур В и С, полученные с учетом оценки изменения концентрации с изменением длины d . В образце В с КЯ шириной $L = 10$ нм дрейфовая скорость насыщается в поле 4 кВ/см и не превышает дрейфовую скорость насыщения $v_{\text{sat}} = 10^7$ см/с в объемном материале. Максимальная дрейфовая скорость в образце С с широкой КЯ в поле 15 кВ/см превышает в 1.2 раза скорость насыщения в объемном GaAs. При этом пороговое поле насыщения дрейфовой скорости превышает 10 кВ/см. Это соответствует выполненным в работах [9,10] оценкам, согласно которым скорость рассеяния электронов на оптических фонах падает с ростом ширины КЯ. В КЯ шириной $L = 10$ нм она сравнима со скоростью рассеяния в объемном материале. В более широкой КЯ ($L = 26$ нм) скорость рассеяния электронов на оптических фонах в несколько раз ниже, чем в объемном материале. Соответственно дрейфовая скорость в образце С растет с ростом поля до значительно больших значений, чем в образце В.

Насыщение дрейфовой скорости обусловлено междолинным перебросом электронов. Об этом свидетельствует слабая отрицательная дифференциальная проводимость, наблюдаемая в полях выше порогового E_t , при котором дрейфовая скорость максимальна (рис. 2 и 3). В образце В с узкой КЯ рост дрейфовой скорости ограничивается перебросом электронов из Γ - в L -долину,

так как рассеяние электронов L -долины на оптических фононах в узкой КЯ велико и их подвижность мала. В образце С с широкой КЯ переброс электронов из Γ - в L -долину не ограничивает роста дрейфовой скорости, так как рассеяние электронов L -долины на оптических фононах в широкой КЯ мало и их подвижность велика [9,10]. Ограничение дрейфовой скорости возникает в более сильных полях, когда имеет место переброс электронов из L - в X -долину [4].

Экспериментальные кривые $v_{dr}(E)$ (рис. 4) хорошо описываются выражением

$$v_{dr} = \mu E [1 + (\mu E / v_{sat})^2]^{-1/2}, \quad (1)$$

где μ — низкополевая подвижность, v_{sat} — скорость насыщения. Важно отметить, что v_{sat} зависит от ширины КЯ и растет с ростом ширины КЯ в соответствии с изменением скорости рассеяния электронов в верхних долинах GaAs.

Отметим, что формула типа (1) часто используется в качестве аппроксимации при описании характеристик ПТ [11,12]. Как видим, аппроксимация (1) при учете зависимости v_{sat} от ширины КЯ соответствует реальной зависимости $v_{dr}(E)$ электронов в КЯ.

4. Дрейфовая скорость электронов в структуре $Al_{0.36}Ga_{0.64}As/In_{0.15}Ga_{0.85}As$

На рис. 5 показана полевая зависимость тока электронов в канале псевдоморфной двойной гетероструктуры $Al_{0.36}Ga_{0.64}As/In_{0.15}Ga_{0.85}As$ (тип D). Как видим, она носит сублинейный характер и в полях выше 7 кВ/см достигает насыщения.

Благодаря сильному легированию непосредственно $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ -канала проявление параллельных каналу

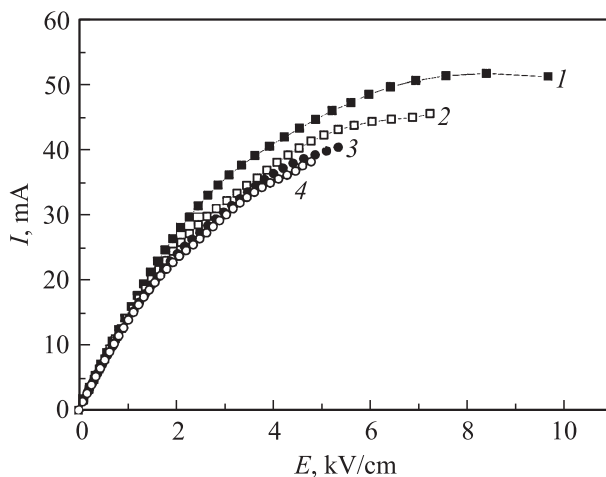


Рис. 5. Полевая зависимость тока в КЯ $In_{0.15}Ga_{0.85}As/Al_{0.36}Ga_{0.64}As$ в образцах с длиной канала $d = 10$ (1), 20 (2), 30 (3), 40 мкм (4).

слоев проводимости и изменение концентрации электронов в канале в зависимости от длины образца относительно малы. Аппроксимация полевой зависимости дрейфовой скорости с учетом поправки на изменения концентрации электронов в канале приведена на рис. 4.

Как видим, максимальная скорость электронов в канале КЯ $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ достигает $6 \cdot 10^6$ см/с, что почти в 1.3 раза выше, чем в объемном $In_{0.15}Ga_{0.85}As$. В объемном $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ с низкополевой подвижностью $\mu = 1000$ см²/В·с максимальная дрейфовая скорость электронов не превышает $4.5 \cdot 10^6$ см/с [14]. Существенное повышение дрейфовой скорости в КЯ объясняется успешное использование псевдоморфной структуры $Al_{0.36}Ga_{0.64}As/In_{0.15}Ga_{0.85}As$ при создании СВЧ транзисторов.

5. Заключение

Экспериментально установлено, что полевая зависимость дрейфовой скорости электронов в квантовых ямах гетероструктур $AlGaAs/GaAs$ и $Al_{0.36}Ga_{0.64}As/In_{0.15}Ga_{0.85}As$ носит сублинейный характер и не имеет области отрицательной дифференциальной проводимости. В полях выше порогового, E_t , дрейфовая скорость достигает насыщения v_{sat} . Пороговое поле E_t и скорость насыщения v_{sat} зависят от ширины КЯ.

В узкой квантовой яме (10 нм) двухбарьерной структуры $AlGaAs/GaAs/AlGaAs$ типа В пороговое поле $E_t \approx 4$ кВ/см и скорость насыщения $v_{sat} = 10^7$ см/с близки к значениям в объемном GaAs.

В широкой квантовой яме (26 нм) двухбарьерной структуры типа С, а также в однобарьерной структуре типа А пороговое поле и скорость насыщения много выше, $E_t \approx 8-10$ кВ/см, и $v_{sat} \approx (1.2-1.5) \cdot 10^7$ см/с.

Мы полагаем, что в узкой квантовой яме ограничение роста дрейфовой скорости в сильных полях обусловлено перебросом электронов из Γ - в L -долину GaAs, а в широкой квантовой яме — перебросом электронов из L - в X -долину GaAs.

В двухбарьерной гетероструктуре $Al_{0.36}Ga_{0.64}As/In_{0.15}Ga_{0.85}As/Al_{0.36}Ga_{0.64}As$ (тип D) полевая зависимость дрейфовой скорости в квантовой яме $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ схожа с наблюдаемой зависимостью в квантовой яме GaAs. Дрейфовая скорость насыщения в квантовой яме превышает дрейфовую скорость в объемном материале.

Список литературы

- [1] J.G. Ruch, G.S. Kino. Phys. Rev., **174**, 921 (1968).
- [2] G. Hill, P.N. Robson. Sol. St. Electron., **25**, 589 (1982).
- [3] W. Fawcett, A.D. Boardman, S. Swain. J. Phys. Chem. Sol., **31**, 1963 (1970).
- [4] J. Pozela, A. Reklaitis. Sol. St. Electron., **23**, 927 (1980).
- [5] Ю.К. Пожела, В.Г. Мокеров. ФТП, **40**, 362 (2006).
- [6] J. Požela, K. Požela, A. Sužiedėlis, V. Jucienė, V. Petkun. Acta Phys. Polon. A, **113**, 989 (2008).

- [7] V.G. Mokerov, J. Pozela, K. Pozela, V. Juciene. *Non-equilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors. Series: Springer Proc. in Physics*, v. 110, ed. by M. Saraniti, U. Ravaioli (Berlin, Heidelberg, Springer, 2006) p. 245.
- [8] Ю. Пожела, К. Пожела, В. Юцене, С. Балакаускас, В.П. Евтихийев, А.С. Школьник, Ю. Стораста, А. Мекис. *ФТП*, **41**, 1460 (2007).
- [9] Ю. Пожела, К. Пожела, В. Юцене. *ФТП*, **41**, 1093 (2007).
- [10] J. Požela, K. Požela, V. Jucienė. *Lithuan. J. Phys.*, **47**, 41 (2007).
- [11] M. Tomizawa, K. Yokoyama, A. Yoshii. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **EDL-5**, 464 (1984).
- [12] M. Shur. *GaAs Devices and Circuits* (N.Y.–London, Plenum Press, 1986) p. 542.
- [13] M. Shur. *GaAs Devices and Circuits* (N.Y.–London, Plenum Press, 1986) p. 412.
- [14] M. Inoue, K. Ashida, T. Sugino, J. Shirafuji, Y. Inuishi. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **12**, 932 (1973).

Редактор Л.В. Шаронова

Electron drift velocity at high electric fields in a quantum well

V.G. Mokerov, I.S. Vasil'evskii, G.B. Galiev, J. Požela*, K. Požela*, A. Sužiedėlis*, V. Jucienė*, Č. Paškevič*

Institute of Microwave Semiconductor Electronics,
Russian Academy of Sciences,
117105 Moscow, Russia

* Semiconductor Physics Institute,
LT-01108 Vilnius, Lithuania

Abstract The enhancement of the electron drift velocity in various configurations of AlGaAs/GaAs quantum wells and in pseudomorphic heterostructure $\text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ over the maximum (saturated) drift velocity in the bulk materials is experimentally observed at high electric fields. It is determined that the drift velocity–field characteristics of two-dimensional electrons in GaAs and $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ have no negative differential conductivity region. The drift velocity saturation in AlGaAs/GaAs quantum wells takes place at electric fields higher than the field, which corresponds to the transfer of Γ -valley electrons to L valleys in the bulk GaAs.