

Дрейфовая скорость электронов в квантовых ямах селективно легированных гетероструктур $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ и $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в сильных электрических полях

© Ю. Пожела[†], К. Пожела, Р. Рагютис, В. Юцене

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

(Получена 22 ноября 2010 г. Принята к печати 29 ноября 2010 г.)

Вычислена (методом Монте-Карло) полевая зависимость дрейфовой скорости электронов в квантовых ямах селективно легированных гетероструктур $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ и $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Исследовано влияние изменения мольной доли Al в составе барьеров квантовой ямы $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ на подвижность и дрейфовую скорость электронов в сильных электрических полях. Показано, что подвижность электронов растет с уменьшением доли Al x в составе барьеров. В квантовых ямах $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ максимальное значение подвижности превышает подвижность в объемном материале в 3 раза. Повышение доли Al x в барьере приводит к росту порогового поля E_{th} междолинного переброса (эффект Ганна). В гетероструктурах $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$ пороговое поле составляет $E_{\text{th}} = 16$ кВ/см, в $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ — $E_{\text{th}} = 10$ кВ/см. В гетероструктурах с наивысшей подвижностью электронов $E_{\text{th}} = 2-3$ кВ/см, что меньше $E_{\text{th}} = 4$ кВ/см в объемном InGaAs.

1. Введение

Селективно легированные гетероструктуры InGaAs/AlInAs с высокой подвижностью электронов (называемые также НЕМТ-структурами) являются сегодня базовыми элементами микроволновой и терагерцевой электроники [1–5]. Этим они обязаны наивысшим значениям подвижности в полупроводниках, достигнутым благодаря селективному легированию гетероструктур.

Высокая подвижность электронов в селективно легированных структурах обусловлена снижением рассеяния электрона на примесях благодаря разделению в пространстве ионизованных примесных центров и свободных электронов в квантовой яме (КЯ). Однако разделение заряда примесных центров и свободных электронов приводит к образованию сильного поперечного КЯ поля $E_{\perp} \sim 10^5$ В/см. Это поле захватывает электроны в узкую КЯ и увеличивает рассеяние электронов на интерфейсных фононах гетероструктуры. В КЯ селективно легированной структуры при 300 К рассеяние электронов на интерфейсных фононах оказывается доминирующим механизмом рассеяния, ограничивающим рост подвижности электронов.

Дальнейшее повышение подвижности электронов в НЕМТ-структурах с высокой подвижностью возможно за счет снижения рассеяния электронов на интерфейсных фононах. Частота интерфейсных фононов зависит от частоты оптических фононов в полупроводниках, образующих интерфейс. Эта основная отличительная особенность интерфейсных фононов. Подбирая полупроводники для барьеров КЯ, можно менять частоту интерфейсных фононов и тем самым регулировать скорость рассеяния электронов в КЯ [6–8].

В данной работе определяются зависимости скорости рассеяния на интерфейсных фононах от измене-

ния мольных долей в катионной подрешетке Al (x), In (y) в составе гетероструктур $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ и вычисляются (методом Монте-Карло) полевые зависимости дрейфовой скорости в КЯ гетероструктур $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ и $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ при различных долях Al x в составе твердого раствора барьерного слоя. Определены возможности повышения подвижности и дрейфовой скорости за счет изменения состава твердых растворов полупроводников, образующих гетероструктуры.

2. Взаимодействие электронов и интерфейсных фононов

Зависимость скорости электрон-фононного рассеяния от частоты фононов определяется зависимостью от частоты фононов силы взаимодействия электронов с полярными оптическими (ПО) и интерфейсными фононами.

Согласно модели диэлектрического континуума, сила взаимодействия электронов с интерфейсными фононами с частотой ω_v характеризуется фактором

$$F(\omega_v) = \frac{(\omega_L^2 - \omega_T^2)^2}{2\omega_v(\omega_v^2 - \omega_T^2)\epsilon_{\infty}}. \quad (1)$$

где ω_L и ω_T — частоты продольных и поперечных оптических фононов соответственно, ϵ_{∞} — оптическая диэлектрическая проницаемость полупроводника [9,10,11]. Для взаимодействия электронов с продольными оптическими фононами с частотой ω_L фактор $F(\omega_v)$ принимает известный вид

$$F(\omega_L) = \frac{\omega_L}{2} \left(\frac{1}{\epsilon_{\infty}} - \frac{1}{\epsilon_{\text{st}}} \right), \quad (2)$$

где $\epsilon_{\text{st}} = \epsilon_{\infty}\omega_L^2/\omega_T^2$.

[†] E-mail: pozela@pfi.lt

Параметры зонной структуры и частоты оптических фононов

Параметр	GaAs	In _{0.2} Ga _{0.8} As	In _{0.5} Ga _{0.5} As	InAs	AlAs
E_g , эВ	1.45	1.23	0.9	0.35	—
E_{GL} , эВ	0.33	0.41	0.53	0.73	—
α_T , эВ ⁻¹	0.69	1.09	1.69	2.7	—
ω_L , мэВ	36.2	35	33.2	30.2	50.1
ω_T , мэВ	33.4	32.14	30.25	27.1	44.8
ϵ_∞	10.9	11.18	11.6	12.3	8.16
m_T/m_0	0.064	0.05	0.045	0.027	0.1

Частота интерфейсных фононов ω_v определяется из условия равенства компонент электрического смещения, перпендикулярного интерфейсу между двумя полярными полупроводниками А и В с изотропными диэлектрическими функциями $\epsilon_A(\omega)$ и $\epsilon_B(\omega)$ [11]:

$$\epsilon_A(\omega) + \epsilon_B(\omega) = 0. \quad (3)$$

Диэлектрические функции равны:

$$\epsilon_{A,B}(\omega_v) = \frac{\omega_v^2 - \omega_{LA,B}^2}{\omega_v^2 - \omega_{TA,B}^2} \epsilon_{\infty A,B}. \quad (4)$$

Решение биквадратного уравнения (3) определяет две частоты интерфейсных фононов ω_{v1} и ω_{v2} . Две интерфейсные моды соответствуют разным модам оптических фононов в полупроводниках А и В.

Определим фактор $F(\omega_v)$ для интерфейсов, которые образуют твердые растворы In_yGa_{1-y}As/Al_xIn_{1-x}As и In_yGa_{1-y}As/Al_xGa_{1-x}As.

Для крайних значений $y = 1$ и $x = 0, 1$ интерфейсы In_yGa_{1-y}As/Al_xIn_{1-x}As и In_yGa_{1-y}As/Al_xGa_{1-x}As образуют бинарные полупроводники, InAs/AlAs и InAs/GaAs, с хорошо определенными частотами оптических фононов. Для интерфейсов InAs/AlAs фактор есть $F(\omega_{v2}) + F(\omega_{v1}) = 10.8$ мэВ и для InAs/GaAs — $F(\omega_{v2}) + F(\omega_{v1}) = 1.6$ мэВ. Это значит, что рассеяние на интерфейсных фононах электронов в КЯ InAs при изменении состава барьера Al_xGa_{1-x}As от AlAs до GaAs уменьшается в 6.7 раз. Изменение состава полупроводников привело к громадному изменению силы взаимодействия электронов с интерфейсными фононами.

Положим, что величина фактора $F(\omega_v)$ для интерфейсов с промежуточными значениями составов твердых растворов в КЯ ($0 < y < 1$) и барьерах ($0 < x < 1$) лежит между крайними значениями, соответствующими составам бинарных полупроводников, составляющих интерфейс. При оценке ω_v и $F(\omega_v)$ для промежуточных составов твердых растворов (промежуточных x, y) положим для частот оптических фононов некоторые промежуточные значения, лежащие между крайними значениями, соответствующими $x = 0, 1$ и $y = 0, 1$, бинарным полупроводником, составляющим интерфейс [11].

Зависимость частоты продольного оптического фонона $\omega_L(y)$ от содержания In y в сплаве In_yGa_{1-y}As

определена экспериментально [12]. Она линейно зависит от доли In y в составе In_yGa_{1-y}As и лежит в интервале между частотами фононов в GaAs и InAs. В качестве грубого приближения мы допускаем такую же линейную зависимость частот оптических фононов в Al_xIn_{1-x}As и Al_xGa_{1-x}As от доли компоненты Al x в составе твердых растворов.

Оцененные таким образом частоты оптических фононов в тройных соединениях позволяют использовать соотношения (1) и (3), написанные для бинарных полупроводников, при расчете частот интерфейсных фононов и фактора $F(\omega_v)$.

В таблице приведены значения частот оптических фононов в GaAs, InAs, AlAs, а также оценочные значения частот в твердых растворах In_{0.2}Ga_{0.8}As и In_{0.5}Ga_{0.5}As, используемые при расчете фактора $F(\omega_v)$.

На рис. 1, а показана зависимость фактора $F(\omega_v)$ от доли Al x в составе барьера Al_xIn_{1-x}As, для нескольких значений доли In y в составе КЯ In_yGa_{1-y}As.

Как видим, фактор $F(\omega_v)$ увеличивается при повышении доли Al x в составе барьеров Al_xIn_{1-x}As и Al_xGa_{1-x}As. Диапазон изменения величины $F(\omega_v)$ от содержания Al в барьере (следовательно, и от

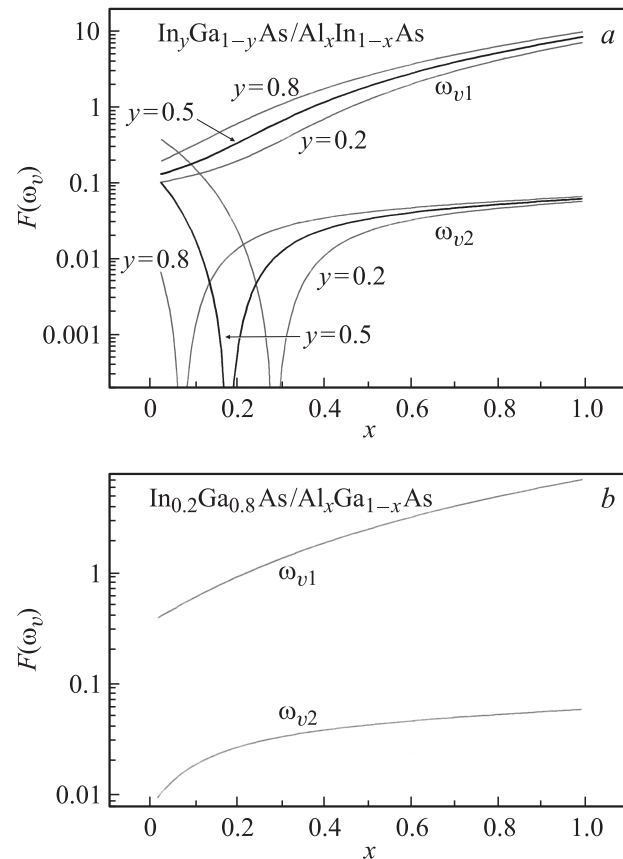


Рис. 1. Зависимости силы взаимодействия электронов с интерфейсными фононами с частотами ω_{v1} и ω_{v2} , $F(\omega_v)$, от мольных долей Al (x) в составе барьеров и In (y) в составе квантовой ямы для гетероструктур In_yGa_{1-y}As/Al_xIn_{1-x}As (а) и In_{0.2}Ga_{0.8}As/Al_xGa_{1-x}As (б).

скорости рассеяния) очень значителен. В гетероструктуре $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ при изменении доли Al от $x = 0$ до 1 изменяется в 20 раз, а в случае $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ — в 14 раз. Это значит, что изменение доли Al в составе барьера позволяет изменять подвижность электронов в КЯ в десятки раз.

Наименьшее значение $F(\omega_\nu)$, соответствующее наивысшему значению подвижности электронов в структуре $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$, наблюдается при $x = 0.2$. При $x = 0.2$ имеет место резонансное снижение скорости рассеяния электронов на одной из частот интерфейсных фононов. Следует отметить, что наивысшие экспериментально наблюдаемые при 300 К значения подвижности в структурах $\text{InGaAs}/\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ получены при содержании индия 0.8 на интерфейсном слое [13–15]. В структуре $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ наименьшая скорость рассеяния имеет место при $x = 1$. Отметим, что экспериментально наблюдаемые значения подвижности в структурах $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ превышают значения в $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{AlGaAs}$ в 2 раза [8,16].

3. Полевая зависимость дрейфовой скорости в $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

Расчеты методом Монте-Карло полевой зависимости дрейфовой скорости электронов (v_{dr}) в InGaAs выполнены при учете междолинного рассеяния и рассеяния на ПО и акустических фононах, а также с учетом непараболической зависимости энергии от импульса электрона. Для удобства сравнения дрейфовой скорости электрона в селективно легированных структурах с дрейфовой скоростью в объеме мы в обоих случаях не учитываем рассеяние на примесях.

Параметры твердых растворов в системах InAs/GaAs , InAs/AlAs , GaAs/AlAs будем аппроксимировать величинами, лежащими между известными параметрами двух бинарных соединений, образующих сплав, и линейно зависящими от доли каждого из соединений.

В таблице приведены значения энергий запрещенной зоны E_g , междолинного зазора E_{GL} , параметра непараболическости α_Γ , эффективной массы электронов в Γ -долине m_Γ , оптической диэлектрической проницаемости ϵ_{opt} , частот продольных (ω_L) и поперечных (ω_T) фононов для бинарных соединений GaAs , InAs , AlAs . Значения параметров в $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ и $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ оценены как промежуточные между значениями бинарных соединений.

Вычисленные (методом Монте-Карло) полевые зависимости дрейфовой скорости $v_{dr}(E)$ в объемных GaAs , InAs и твердых растворах $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ и $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ при 300 К показаны на рис. 2.

Увеличение подвижности и максимальной дрейфовой скорости электронов с ростом доли In в составе твердого раствора $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ соответствует уменьшению эффективной массы электронов и величины фактора $F(\omega_\nu)$ для рассеяния электронов на ПО фононах

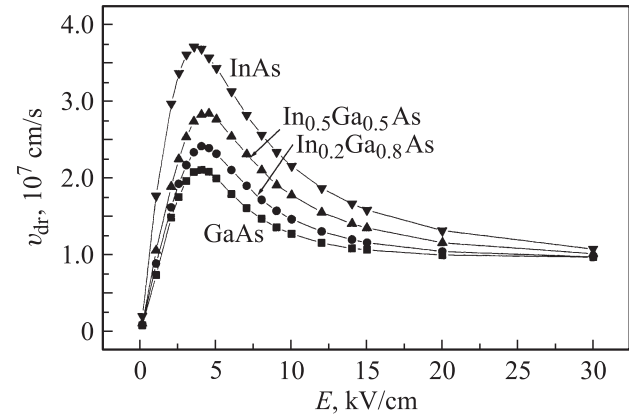


Рис. 2. Полевые зависимости дрейфовой скорости электронов в твердом растворе $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ при $y = 0, 0.2, 0.5$ и 1.

(уравнение (2)). Важно отметить, что, несмотря на значительный рост величины междолинного зазора E_{GL} с ростом доли In в составе твердого раствора $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$, величина порогового поля E_{th} для междолинного переброса электронов почти не меняется.

4. Полевая зависимости дрейфовой скорости электронов в квантовых ямах селективно легированных структур $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ и $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

Расчет полевой зависимости дрейфовой скорости в КЯ селективно легированных структур проводился с учетом рассеяния электронов на акустических, захваченных в КЯ полярных оптических и интерфейсных фононах, а также междолинного рассеяния. Ширина КЯ принята 12 и 16 нм для $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ и $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ соответственно.

Определенная методом Монте-Карло полевая зависимость дрейфовой скорости электронов $v_{dr}(E)$ в КЯ селективно легированных структур при разных долях Al в составах барьеров КЯ показана для структуры $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на рис. 3, а, а для структуры $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ на рис. 4, а. На рис. 3, б и 4, б показаны полевые зависимости заселенности Γ - и L -долин в КЯ соответствующего состава.

Как видим, полевые зависимости дрейфовой скорости $v_{dr}(E)$ и междолинного переброса электронов в КЯ (рис. 3 и 4) радикально отличаются от аналогичных зависимостей в объемном материале (рис. 2).

Низкополевая подвижность электронов в КЯ зависит от состава твердых растворов, образующих интерфейс, в соответствии с изменением фактора $F(\omega_\nu)$.

В гетероструктуре $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ подвижность растет с понижением доли Al в составе барьера $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и при $x = 0$ достигает максимального значения (рис. 3). В гетероструктуре $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$

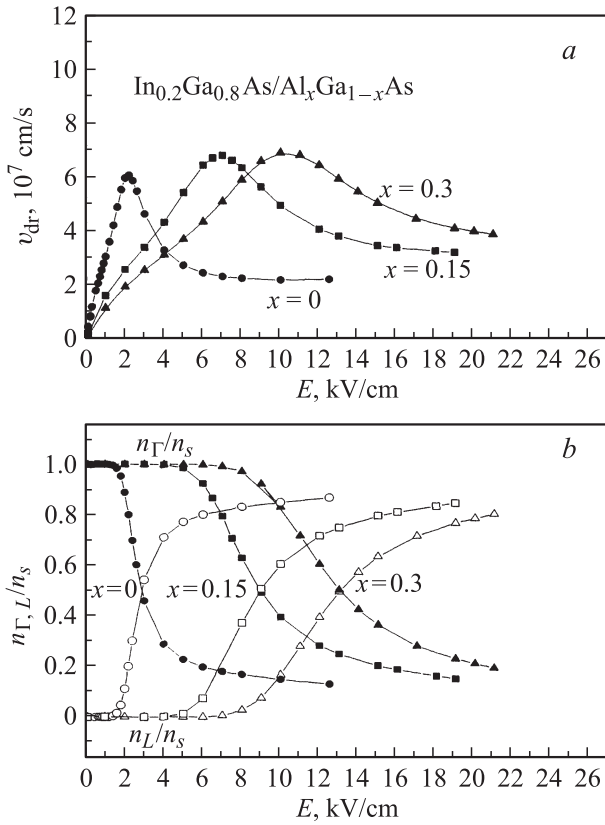


Рис. 3. Полевые зависимости дрейфовой скорости электронов (a) и доли электронов в Г- (n_{Γ}/n_s) и L-долинах (n_L/n_s), (b) для различных составов барьерного слоя структуры $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$: $x = 0, 0.15$ и 0.3 .

максимальный рост подвижности достигается при $x = 0.2$ (рис. 4). Максимальные значения подвижности в КЯ $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ и $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ превышают подвижность в объемном материале в 3 раза. В то же время уже при значениях $x > 0.3$ подвижность оказывается много ниже, чем в объемном материале.

Повышение подвижности не приводит, однако, к повышению максимальной дрейфовой скорости v_{\max} , которая слабо зависит от напряженности порогового поля E_{th} .

Самой существенной особенностью полевой зависимости $v_{\text{dr}}(E)$ как в гетероструктурах $\text{InGaAs}/\text{AlInAs}$, так и в гетероструктурах $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$ является изменение от состава барьера порогового поля для междолинного переброса E_{th} . При этом пороговое поле E_{th} растет с уменьшением подвижности.

Следует отметить, что рост E_{th} для междолинного переброса с уменьшением подвижности μ вытекает из оценки E_{th} , на основе уравнения баланса энергии:

$$q\mu E_{\text{th}}^2 \tau_e = \Delta_{\Gamma L}, \quad (5)$$

где q — заряд и μ — подвижность электрона, $\Delta_{\Gamma L}$ — средняя энергия, необходимая электрону для междолинного переброса. Полагая для неупругих соударений время релаксации энергий τ_e близким по величине

к времени релаксации импульса τ_p , получаем, что пороговое поле обратно пропорционально подвижности электронов:

$$E_{\text{th}} = \sqrt{\frac{\Delta_{\Gamma L}}{q\mu\tau_e}} \frac{1}{\mu}. \quad (6)$$

В полях выше порогового поля, $E > E_{\text{th}}$, в результате переброса электронов из Г-долины в L-долину среднее значение дрейфовой скорости электронов понижается с ростом поля. Дифференциальная дрейфовая скорость электронов становится отрицательной. При этом дифференциальные дрейфовые скорости в области полей выше и ниже порогового поля E_{th} оказываются близкими по величине, но противоположными по знаку.

Следует отметить, что дифференциальный наклон изменения числа электронов в Г- и L-долинах от поля растет, а интервал полей, при которых число электронов в Г- и L-долинах выравнивается, уменьшается с уменьшением доли Al в составе барьеров $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ (рис. 3, b и 4, b).

Междолинный переброс в структурах с повышенной подвижностью происходит при пороговом поле E_{th} , меньшем порогового поля в объемном материале. В результате дрейфовая скорость в образцах с меньшей подвижностью оказывается в сильных полях выше дрей-

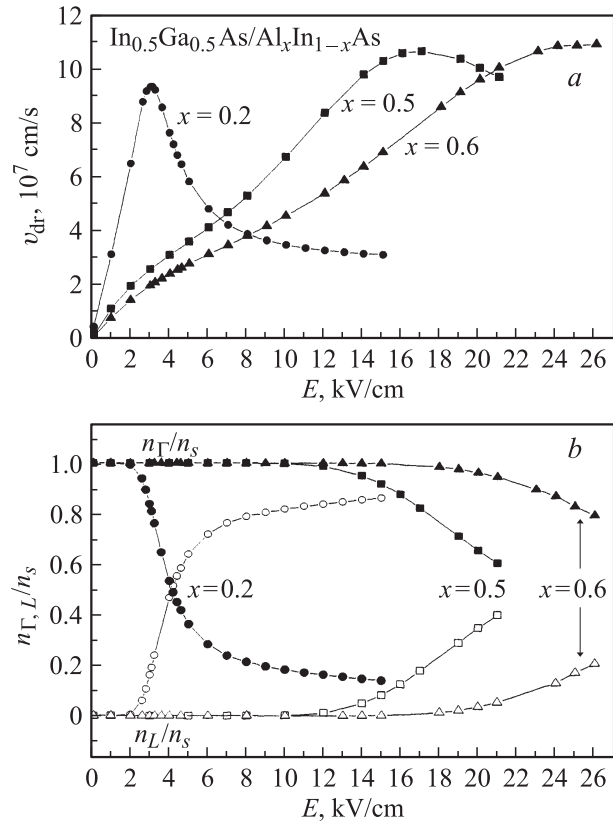


Рис. 4. Полевые зависимости дрейфовой скорости электронов (a) и доли электронов в Г- (n_{Γ}/n_s) и L-долинах (n_L/n_s), (b) для различных составов барьерного слоя структуры $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$: $x = 0.2, 0.5$ и 0.6 .

фовой скорости в структурах с высокой подвижностью. Этим объясняется, почему в КЯ структур InGaAs/AlInAs экспериментально наблюдаемые зависимости $v_{\text{dr}}(E)$ оказываются сублинейными с пороговым полем E_{th} , существенно превышающим значения порогового поля в объемном материале $E_{\text{th,bulk}} = 4 \text{ кВ/см}$ [7,8]. При этом максимальная дрейфовая скорость (скорость насыщения) электронов в структурах с высокой подвижностью оказывается ниже, чем в структурах с низкой подвижностью [13,16].

5. Заключение

Таким образом, снижение мольной доли Al в составе барьера селективно легированных структур $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As/Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As/Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ от $x = 1$ до $x = 0$ уменьшает скорость рассеяния электронов на интерфейсных фононах в десятки раз. Это приводит к многократному увеличению подвижности электронов и уменьшению порогового поля эффекта Ганна в квантовой яме InGaAs . Максимальная подвижность электронов имеет место в структурах $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As/GaAs}$ и $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As/Al}_{0.2}\text{In}_{0.8}\text{As}$.

Увеличение мольной доли Al в составе барьера приводит к резкому росту порогового поля междолинного переброса E_{th} . В квантовых ямах селективно легированных структур $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As/Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As/Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ при $x > 0.3$ дифференциальная дрейфовая скорость электронов остается положительной вплоть до электрических полей 10 кВ/см , в несколько раз превышающих величину порогового поля эффекта Ганна в объемном материале.

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] N. Dyakonova, A. El Fatimy, J. Lusakowski, W. Кнар. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 141 906 (2006).
- [3] N. Dyakonova, F. Teppe, J. Lusakowski, W. Кнар, M. Levinshstein, A.P. Dmitriev, M. Shur, S. Bollacrt, A. Cappy. *J. Appl. Phys.*, **97**, 114 313 (2005).
- [4] W.J. Stillman, M.S. Shur. *J. Nanoelectron. Optoelectron.*, **2**, 209 (2007).
- [5] J. Požela, A. Namajūnas, K. Požela, V. Jucienė. *J. Appl. Phys.*, **81**, 1775 (1997).
- [6] Ю. Пожела, К. Пожела, В. Юцене. *ФТП*, **41**, 1093 (2007) [*Semiconductors*, **41**, 1074 (2007)].
- [7] В.Г. Мокеров, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Ю. Пожела, К. Пожела, А. Сужеделис, В. Юцене, Ч. Пашкевич. *ФТП*, **43**, 478 (2009) [*Semiconductors*, **43**, 458 (2009)].
- [8] J. Požela, K. Požela, A. Shkolnik, A. Sužiedėlis, V. Jucienė, S. Mikhrin, V. Mikhrin. *Phys. Status Solidi C*, **6**, 2713 (2009).
- [9] I. Lee, S.M. Goodnick, M. Gulia, E. Molinari, P. Lugli. *Phys. Rev. B*, **51**, 7046 (1995).
- [10] N. Mori, T. Ando. *Phys. Rev. B*, **40**, 6175 (1989).
- [11] Ю. Пожела, К. Пожела, В. Юцене, А. Сужеделис, А.С. Школьник, С.С. Михрин, В.С. Михрин, *ФТП*, **43**, 1634 (2009) [*Semiconductors*, **43**, 1590 (2009)].
- [12] T.P. Pearsall, R. Carles, J.S. Portal. *Appl. Phys. Lett.*, **42**, 436 (1983).
- [13] И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Ю.А. Матвеев, Е.А. Климов, Ю. Пожела, К. Пожела, А. Сужеделис, Ч. Пашкевич, В. Юцене. *ФТП*, **44**, 928 (2010) [*Semiconductors*, **44**, 898 (2010)].
- [14] X. Wallart, B. Pinsard, F. Mollot. *J. Appl. Phys.*, **97**, 053 706 (2005).
- [15] V. Drouot, M. Gendry, C. Santinelli, P. Victorovitch, G. Hollinger. *J. Appl. Phys.*, **77**, 1810 (1995).
- [16] J. Požela, K. Požela, V. Jucienė, A. Shkolnik. *Semicond. Sci. Technol.*, **26**, 014025 (2011).

Редактор Л.В. Шаронова

Drift velocity of electrons in quantum wells of selectively-doped $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As/Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ and $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As/Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ heterostructures in high electric fields

J. Požela, K. Požela, R. Ragutis, V. Jucienė

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

Abstract The Monte Carlo method was used to calculate the field dependence of electron drift velocity in quantum wells of selectively-doped $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As/Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ and $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As/Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ heterostructures. The influence of Al content change in composition of quantum well barriers $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ and $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ to electron mobility and drift velocity in high electric fields is investigated. It is shown that electron mobility increases when the Al content in composition of the barriers decreases. In the $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As/In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ quantum well, the maximal mobility value exceeds electron mobility in bulk material by a factor of 3. Increase of the Al content x in the barrier leads to increase in the threshold field E_{th} of intervalley transfer of electrons (Gunn effect). In the $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As/Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$ and $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As/Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ heterostructures, $E_{\text{th}} = 16$ and 10 кВ/см , respectively. In the heterostructures with the maximal electron mobility, $E_{\text{th}} = 2-3 \text{ кВ/см}$ what is lower than $E_{\text{th}} = 4 \text{ кВ/см}$ in bulk InGaAs .