

©1995 г.

ГЕТЕРОПЕРЕХОДЫ II ТИПА GaInAsSb/InAs

*М.П. Михайлова, И.А. Андреев, Т.И. Воронина,
Т.С. Лагунова, К.Д. Мусеев, Ю.П. Яковлев*

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 27 сентября 1994 г. Принята к печати 3 октября 1994 г.)

Впервые получены и изучены гетеропереходы на основе твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ ($x = 0.17$, $y = 0.22$), изопериодных с подложкой InAs (100). Исследованы гальваномагнитные, электрические и фотоэлектрические свойства четырех типов гетероструктур $N-n$ -, $P-p$ -, $P-n$ - и $N-p$ -GaInAsSb/InAs, определены значения скачков потенциалов на гетерогранице ΔE_c , ΔE_v и установлены приближенные зонные энергетические диаграммы этих гетеропереходов. Показано, что гетероструктура $\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}_{0.22}\text{Sb}_{0.78}/\text{InAs}$ представляет собой разьединенный гетеропереход II типа. Впервые наблюдалась высокая подвижность электронов ($\mu_n = 70000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $T = 77 \text{ К}$) в канале в одиночном гетеропереходе GaInAsSb/InAs, полученном при выращивании нелегированного слоя четверного твердого раствора на слабо легированной подложке p -InAs.

Введение

Четверные твердые растворы $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$, изопериодные с подложками GaSb и InAs давно привлекают внимание как материалы перспективные для создания оптоэлектронных приборов (лазеров и фотодетекторов) в спектральном диапазоне 2–5 мкм [1–4]. Этот диапазон весьма важен для лазерной диодной спектроскопии газов и молекул [5], экологического мониторинга, систем лазерной дальнометрии [6], а также ИК волоконных линий связи на основе флюоридных стекол с низкими потерями.

До недавнего времени большое число работ было посвящено твердым растворам $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$, выращенным на подложке GaSb. Отличительной особенностью таких твердых растворов является наличие большой области несмешиваемости для составов $0.70 > x > 0.25$, что дает возможность получать их методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) только в узком интервале составов либо вблизи GaSb ($x < 0.25$) [1,2], либо вблизи InAs ($0.7 < x < 1$) [7]. Как было показано нами ранее, такие материалы интересны также и тем, что они могут образовывать с GaSb гетеропереходы II типа как ступенчатые, так и разьединенные в зависимости от состава твердого раствора [8]. Основным свойством гетероперехода II типа является пространственное разделение

носителей заряда на гетерогранице и возможность образования самосогласованных квантовых ям, что приводит к необычным оптическим, электролюминесцентным и транспортным свойствам структур на их основе [2,8].

В значительно меньшей степени изучены свойства гетероструктур на основе твердых растворов GaInAsSb, изопериодных с подложкой InAs. Ранее имелось лишь несколько работ, где сообщалось о выращивании растворов $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ методом ЖФЭ на подложках InAs с ориентацией (111) *B* и (100) [7,9,10]. Были получены эпитаксиальные слои $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ в интервале составов $0.1 < x < 0.2$ и $0.83 < x < 1.0$, исследованы рентгеноструктурные, морфологические и оптические свойства таких слоев [9,10].

Интерес к твердым растворам GaInAsSb, изопериодным с InAs, а также с твердыми растворами InAsSbP, обусловлен перспективой создания на их основе длинноволновых лазеров с хорошим электронным и оптическим ограничением, а также фотоприемников для спектрального диапазона 2.5–4.0 мкм. О создании на основе GaInAsSb/InAs первых лазерных структур на длину волны излучения $\lambda = 2$ мкм сообщалось в [11]. Однако до настоящего времени не проводилось экспериментальных исследований характеристик гетеропереходов на основе GaInAsSb/InAs и их зонных энергетических диаграмм.

В данной работе представлены результаты исследования электрических и фотоэлектрических свойств гетероструктур GaInAsSb/InAs, полученных методом ЖФЭ, а также обсуждены зонные энергетические диаграммы гетеропереходов GaInAsSb/InAs.

1. Изготовление структур и методика эксперимента

Изопериодные структуры $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ ($x = 0.17$, $y = 0.22$) *n*- и *p*-типов выращивались методом ЖФЭ при температуре 600 °С на подложках InAs (100) *n*- и *p*-типов проводимости с использованием In с чистотой 99.9999%. Концентрация носителей заряда в подложке составляла $n = 1.2 \cdot 10^{16}$ см⁻³, $p = 5 \cdot 10^{16}$ см⁻³ соответственно. Трудность выращивания четверных твердых растворов, $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$, обогащенных (Ga, Sb), на подложке InAs связана с большой разницей в коэффициентах расширения решетки слоя и подложки в зависимости от температуры. Нам удалось преодолеть эту трудность. Морфология слоев в нашем случае была хорошей; рассогласование параметров решетки не превышало $\Delta a/a \leq 2 \cdot 10^{-4}$, как было установлено рентгеноструктурными исследованиями. Состав твердого раствора определялся с помощью количественного рентгеноспектрального анализа. Слои твердого раствора *n*-типа легировались Te в процессе выращивания до концентрации $n = 9.7 \cdot 10^{16}$ см⁻³, слои *p*-типа легировались Zn ($p = 3 \cdot 10^{17}$ см⁻³) либо получались нелегированными. Толщины выращенных слоев были порядка 2 мкм. Ширина запрещенной зоны твердого раствора $Ga_{0.83}In_{0.17}As_{0.22}Sb_{0.88}$ была определена из измерений спектров фотолюминесценции при $T = 2$ и 77 К и составила величины $E_g = 650$ мэВ ($T = 2$ К) и 630 мэВ ($T = 77$ К) соответственно. Полуширина спектра ФЛ была $\Delta \varepsilon = 15$ мэВ ($T = 2$ К), что свидетельствовало о хорошем качестве полученных структур (рис. 1).

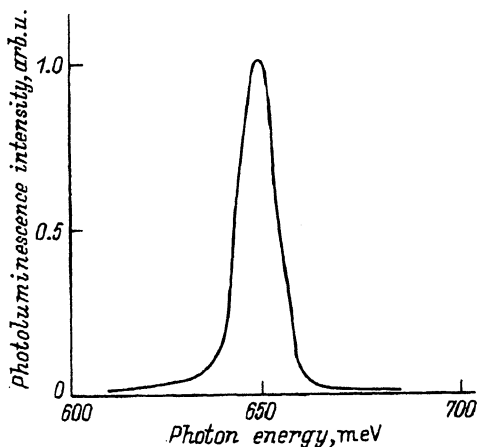


Рис. 1. Спектр фотолюминесценции твердого раствора $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ ($x = 0.17$, $y = 0.22$) при $T = 2\text{ K}$. $E_g = 650\text{ мэВ}$, $\Delta\varepsilon = 15\text{ мэВ}$.

Нами были созданы и изучены 4 типа гетероструктур GaInAsSb/InAs : $N-n$ -, $P-p$ -, $P-n$ - и $N-p$ -переходы (заглавные буквы относятся к твердому раствору). Для исследования электрических, вольт-емкостных и фотоэлектрических характеристик из структур были изготовлены с помощью стандартной фотолитографии меза-диоды диаметром 300 мкм. Контакты к n - и p -слоям твердого раствора и подложке InAs были изготовлены напылением и вжиганием сплавов Au:Te и Au:Zn соответственно. При этом контакт на подложке был сплошным, на твердом растворе — точечным.

Спектральные характеристики гетероструктур исследовались с помощью монохроматора SPM-2 с призмой LiF и глобаром в качестве источника излучения. Для регистрарации спектров применялась техника синхронного детектирования.

Измерения вольт-амперных (ВАХ) вольт-емкостных (ВЕХ) характеристик всех типов гетероструктур были выполнены при $T = 77$ и 300 К. На рис. 2 и 3 представлены ВАХ и ВЕХ характеристики при температуре жидкого азота. Для $N-n$ -, $P-p$ - и $N-p$ -структур ВАХ были выпрямляющими (рис. 2,а), а вольт-емкостные характеристики в области малых напряжений удовлетворительно описывались линейной зависимостью вида $C^{-2} \sim f(V)$, характерной для резких переходов (см., например, рис. 3, где представлена $C-V$ -характеристика $N-n$ -структуры). В то же время вольт-амперная характеристика структуры $p\text{-GaInAsSb}/n\text{-InAs}$ носила омический характер в широком диапазоне токов (вплоть до 30 мА) в интервале температур 77–300 К (рис. 2,б). Такое необычное омическое поведение гетероперехода наблюдалось нами ранее на примере гетероструктуры $p\text{-GaSb}/n\text{-GaInAsSb}$, где узкозонный слой четверного раствора содержал 89% In ($E_g = 0.26\text{ эВ}$, $T = 300\text{ K}$) [12]. Это позволило сделать вывод о том, что такой гетеропереход II типа является разьединенным.

По отсечкам прямых ветвей ВАХ и вольт-емкостных характеристик (см. рис. 2, 3) были определены значения контактных разностей потенциала V_D , которые составили: $V_D = 0.60\text{ В}$ для $N-n$ -, 0.42 В для $P-p$ - и 1.0 В для $N-p$ -гетеропереходов на основе GaInAsSb/InAs соответственно.

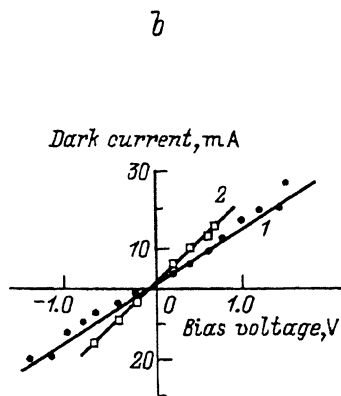
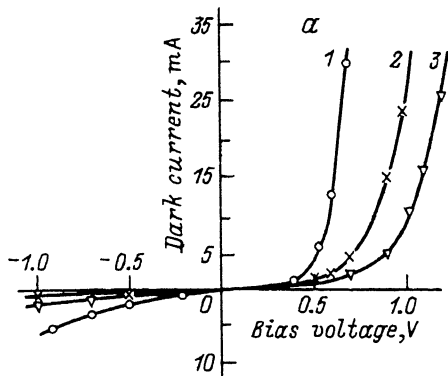
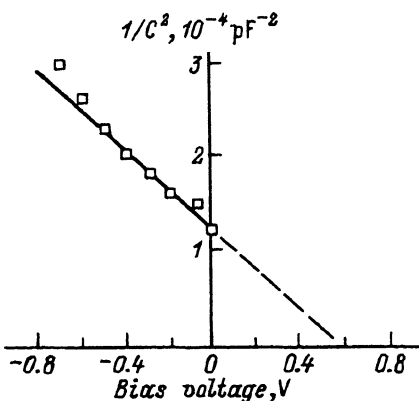


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики четырех типов гетероструктур $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{InAs}$ ($x = 0.17$, $y = 0.22$) при $T = 77$ К: а) 1 — P - p , 2 — N - n , 3 — N - p ; б) ВАХ гетероструктуры P - $\text{GaInAsSb}/n$ - InAs : 1 — 77 К, 2 — 300 К.

Рис. 3. Зависимость емкости гетероструктуры N - $\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}_{0.22}\text{Sb}_{0.78}/n$ - InAs от напряжения смещения при $T = 77$ К.



Были проведены исследования гальваномагнитных свойств (коэффициента Холла R_H , электропроводности σ и подвижности μ в интервале температур 77–300 К) в твердых растворах GaInAsSb как нелегированных, так и легированных Te и Zn , выращенных на слабо легированных подложках p - $\text{InAs}:\text{Zn}$ ($p_{77} \cong 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\sigma_{77} \cong 0.01 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$).

Наиболее поразительным фактом является anomalно высокая подвижность носителей заряда, наблюдаемая нами в преднамеренно не легированных слоях твердых растворов GaInAsSb при $T = 77$ К: $\mu = 50000$ – $70000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Заметим, что в твердых растворах GaInAsSb того же состава, но выращенных на подложках GaSb , нами были получены образцы p -типа с минимальной концентрацией дырок $p \sim 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью $\mu_p^{77\text{К}} = 3000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. По литературным данным подвижность электронов в таких твердых растворах должна быть порядка 7000 – $10000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [13]. По нашему мнению, столь высокое наблюдаемое значение подвижности, вероятно, связано с подвижностью электронов в одиночной гетероструктуре $\text{GaInAsSb}/\text{InAs}$ и свидетельствует о наличии квазидвумерного электронного канала на гетерогранице между нелегированным слоем GaInAsSb и подлож-

кой p -InAs. Этот факт подтверждает также хорошее качество гетерограницы в исследованных структурах, полученных методом ЖФЭ. Отметим, что и в нелегированных образцах твердого раствора, и в образцах с примесью Te, введенного в раствор-расплав в количестве 0.001–0.01 мол%, или Zn, введенного в количестве до 0.01 мол%, подвижность, определяемая из гальваномангнитных измерений, остается высокой и определяется свойствами электронного канала. И лишь при более высоких уровнях легирования начинают проявляться свойства самого эпитаксиального слоя твердого раствора GaInAsSb.

2. Результаты и обсуждение

Величины скачков потенциала на границе раздела двух полупроводников ΔE_c , ΔE_v являются важными параметрами гетероперехода, определяющими электронные свойства гетероструктур, а также характеристики приборов на их основе. В работе [14] был предложен метод расчета разрывов зон на гетерогранице для гетеропереходов на основе четверных твердых растворов $A^{III}B^V$ и выведены соотношения для расчета относительного положения краев зоны проводимости E_c и валентной зоны E_v , ширины запрещенной зоны и величины спин-орбитального расщепления в зависимости от состава для ненапряженных и напряженных слоев методом интерполяции параметров бинарных и тройных соединений.

Мы провели расчет значений E_g , Δ_0 , а также энергетического положения валентной зоны E_v и зоны проводимости E_c для исследуемых твердых растворов GaInAsSb ($x = 0.17$) по [14] и определили значения ΔE_c и ΔE_v для гетероперехода GaInAsSb/InAs. Были получены следующие значения положения края валентной зоны и зоны проводимости, отсчитанные от уровня вакуума $E_v = -6.34$ эВ, $E_c = -5.52$ эВ, $\Delta E_v = -0.42$ эВ, $\Delta E_c = -0.66$ эВ. Расчетные значения ширины запрещенной зоны и величины спин-орбитального расщепления для этого твердого раствора $E_g = 0.602$ эВ, $\Delta_0 = 0.642$ эВ при $T = 300$ К.

Отметим, что в [15] приведено более высокое расчетное значение отсечки в валентной зоне для гетероперехода GaInAsSb/InAs при содержании In в твердом растворе 17% $\Delta E_v = 0.58$ эВ. Величина $\Delta E_v = 0.42$ эВ, рассчитанная нами по [14], лучше согласуется с нашими экспериментальными данными, полученными из I - V - и C - V -характеристик. Учитывая значения $E_g(\text{InAs}) = 0.36$ эВ при $T = 300$ К и величины $\Delta E_v = 0.42$ эВ, мы получили величину зазора между валентной зоной твердого раствора и зоной проводимости InAs $\Delta \approx 60$ мэВ. С учетом омического поведения P - n -гетероструктуры исследуемый гетеропереход GaInAsSb/InAs можно считать разьединенным гетеропереходом II типа.

Мы построили приближенные зонные энергетические диаграммы четырех типов исследуемых гетеропереходов GaInAsSb/InAs: N - n , P - p , P - n и N - p . При этом были использованы найденные из эксперимента значения контактной разности потенциалов и уровни легирования слоев структуры, а также расчетные значения электронного сродства. Зонные диаграммы представлены на рис. 4. Как видно из рисунка, для всех выпрямляющих структур (P - p , N - n , и N - p) характерно наличие на гетерограницах больших областей пространственного заряда. Значительное перекрытие энергетических зон на

интерфейсе в структурах $N-n$ -, $P-p$ - и $N-p$ -GaInAsSb/InAs приводит к истощению носителей заряда и, отсюда, к выпрямляющим характеристикам. Когда перекрытие исчезает, наблюдается накопление носителей по обе стороны перехода, что приводит к омическому (металлическому) поведению структуры, как это имеет место для структур P -GaInAsSb/ n -InAs.

Для $N-n$ -гетероперехода высота барьера по оценкам из отсечек по ВЕХ и ВАХ близка к ширине запрещенной зоны твердого раствора GaInAsSb ($E_g = 0.63$ эВ при $T = 77$ К), а в случае $P-p$ -структуры — величине запрещенной зоны InAs (0.42 эВ при 77 К). Для структуры N -GaInAsSb/ p -InAs наблюдалась аномально большая отсечка: контактная разность потенциалов была порядка $V_D \sim 1$ В (как по $I-V$ -, так и $C-V$ -характеристикам), что близко к сумме энергий запрещенных зон двух материалов ($E_{g\text{InAs}} + E_{g\text{GaInAsSb}} + \Delta \approx 1.1$ эВ при $T = 77$ К). Плотность поверхностных состояний на гетерогранице N_{ss} , была низкой благодаря хорошему согласованию постоянных решетки двух материалов. Оценка, проведенная по соотношению $N_{ss} = 8\Delta/a^3$ на эВ, приведенному в [16], дает величину $N_{ss} \sim 4.3 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$ при $\Delta/a = 2 \cdot 10^{-4}$.

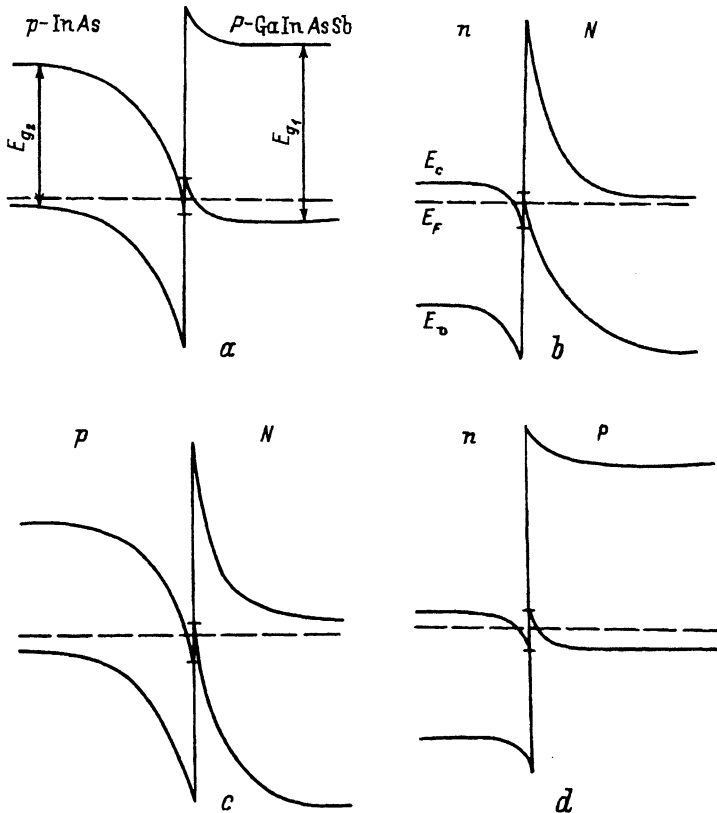


Рис. 4. Зонные энергетические диаграммы четырех типов исследованных гетеропереходов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{InAs}$ ($x = 0.17$, $y = 0.22$): a — $P-p$, b — $N-n$, c — $N-p$, d — $P-n$.

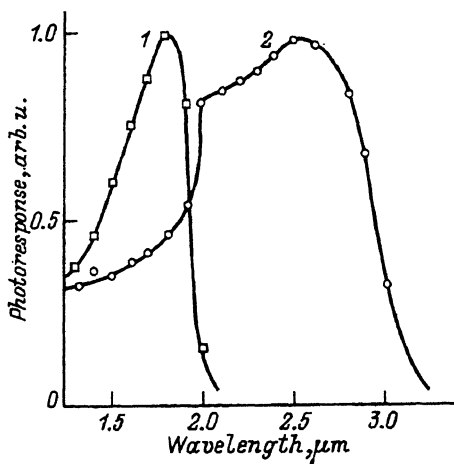


Рис. 5. Спектральное распределение фотоответа двух гетероструктур $\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}_{0.22}\text{Sb}_{0.78}/\text{InAs}$ при $T = 77\text{ K}$: 1 — $N-n$, 2 — $P-p$.

Характер приближенных зонных энергетических диаграмм, представленных на рис. 4, подтверждается также данными фотоэлектрических измерений. На рис. 5 представлены кривые спектрального распределения фоточувствительности для двух типов гетероструктур при $T = 77\text{ K}$ (1 — для $N-n$ -структуры, 2 — для $P-p$ -структуры). Как видно из рис. 5, красная граница фотоответа для $P-p$ -структур определяется шириной запрещенной зоны узкозонного материала (InAs , $E_g = 0.42\text{ эВ}$, $T = 77\text{ K}$). В то же время спектр фотоответа $n-N$ -структуры лежит в более коротковолновой области и соответствует широкозонному твердому раствору GaInAsSb . В $P-p$ -структуре значительная часть объемного заряда расположена в узкозонном материале, что определяется характером легирования слоев структуры. При освещении структуры со стороны GaInAsSb фотоны малых энергий проходят через широкозонный слой без поглощения, но интенсивно поглощаются в InAs вблизи гетерограницы, где разделяются электрическим полем и дают вклад в фотоответ. В изотипной $N-n$ -структуре слой пространственного заряда расположен почти целиком в широкозонной области твердого раствора. На гетерогранице имеется высокий барьер, препятствующий эффективному разделению неравновесных носителей и их рекомбинации в InAs . В этом случае спектр фотоответа определяется главным образом поглощением в слое GaInAsSb . Из спектров фотоответа в интервале температур $77-300\text{ K}$ была также оценена температурная зависимость изменения ширины запрещенной зоны твердого раствора GaInAsSb , которая составила $\Delta E_g/\Delta T = -3.8 \cdot 10^{-4}\text{ эВ/K}$. Учитывая это значение, из эксперимента можно оценить значение ширины запрещенной зоны твердого раствора GaInAsSb при комнатной температуре $E_g = 0.56\text{ эВ}$, что несколько ниже, чем рассчитанная по [14] ($E_g = 0.602\text{ эВ}$).

Вся совокупность полученных нами результатов, а также сходство наблюдаемых характеристик гетеропереходов $\text{GaInAsSb}/\text{InAs}$ с экспериментальными данными, полученными нами ранее для узкозонных разьединенных гетеропереходов II типа на основе $\text{GaInAsSb}/\text{GaSb}$ [8,12], а также другими авторами для гетероструктур $\text{InAsSb}/\text{GaAsSb}$ [17], $\text{InAsSb}/\text{GaSb}$ [18], подтверждает наш вывод о том, что гетеропереход $\text{GaInAsSb}/\text{InAs}$ является разьединенным.

В заключение отметим, что в разьединенном гетеропереходе в равновесии благодаря взаимному перераспределению носителей заряда из контактирующих материалов вблизи гетерограницы возникают близко расположенные квантовые ямы для электронов и дырок. В узкозонных материалах такие ямы могут быть достаточно глубокими и проявляться вплоть до температур $T \geq 77 \text{ K}$ [8,12]. Приложение внешнего электрического поля к таким гетеропереходам позволяет управлять изгибами зон на гетерогранице и их относительным расположением, что приводит к изменению заселенности квантовых ям [19]. При этом легко создать как большую плотность электронов в двумерном канале, так и обеспечить сильное перекрытие волновых функций электронов и дырок. При определенных условиях это должно привести к возможности наблюдения излучательной рекомбинации пространственно разделенных носителей в разьединенных гетеропереходах II типа при приложении внешнего электрического поля.

Работа частично поддержана Международным научным фондом, грант № R46000.

Список литературы

- [1] J.C. de Winter, M.A. Pollack, A.K. Srivastava, J. L. Zyskind. *J. Electron. Mater.*, **14**, 729 (1985).
- [2] А.Н. Баранов, Б.Е. Джуртанов, А.Н. Именков, А.А. Рогачев, Ю.М. Шерняков, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **20**, 2217 (1986).
- [3] Е.А. Бочкарев, Л.М. Долгинов, А.Е. Дракин, Л.В. Дружинина, П.Г. Елисеев, Б.Н. Свердлов, В.А. Скрипкин. *Квантовая электроника*, **16**, 1397 (1986).
- [4] И.А. Андреев, М.А. Афраилов, А.Н. Баранов, В.Г. Данильченко, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев. *Письма ЖТФ*, **12**, 1311 (1986).
- [5] A.I. Nadezhdinsky. *Proc. SPIE*, **1724**, 3 (1992).
- [6] M. Kavaya, *Laser Focus World*, **1**, 27 (1991).
- [7] R. Sarkaran, G.A. Antipas. *J. Cryst. Growth*, **36**, 198 (1976).
- [8] M.P. Mikhailova, A.N. Titkov. *Semicond. Sci. Techn.*, **9**, 1279 (1994).
- [9] M. Astles, M. Hill, D.J. Williams, P.J. Wriгht, M.L. Young. *J. Electron. Mater.*, **15**, 14 (1986).
- [10] X. Gong, H. Kan, T. Yamaguchi, I. Susuki, M. Aoyama, M. Kumagava, N.L. Rowell, A. Wang, R. Rinfert. *Japan. J. Appl. Phys.*, **33**, 1740 (1994).
- [11] Л.М. Долгинов, Л.В. Дружинина, И.В. Крюкова, А.Н. Лапшин, В.И. Лескович, Е.В. Матвеевко, М.Г. Мильвидский. *Квантовая электрон.*, **8**, 66 (1978).
- [12] М.А. Афраилов, А.Н. Баранов, А.П. Дмитриев, М.П. Михайлова, Ю.П. Сморокова, В.В. Шерстнев, И.Н. Тимченко, Ю.П. Яковлев, И.Н. Ясиевич. *ФТП*, **24**, 1397 (1990).
- [13] A.G. Milnes, A.Y. Polyakov. *Sol. St. Electron. B*, **36**, 803 (1992).
- [14] M.P.S. Krijn. *Semicond. Sci. Technol.*, **6**, 27 (1991).
- [15] G. Dohler. *Surf. Sci.*, **98**, 108 (1980).
- [16] M. Mebarki, D. Boukredimi. *J. Appl. Phys.*, **73**, 2360 (1993).
- [17] H. Sakaki, L.L. Chang, R. Iudeke, Chin Au Chang, G.A. Sai-Haldz, L. Esaki. *Appl. Phys. Lett.*, **31**, 211 (1977).
- [18] M. Mebarki, A. Kadri, H. Mani. *Sol. St. Commun.*, **72**, 795 (1989).
- [19] N. Nakao, S. Yoshida, S. Gonda. *Sol. St. Commun.*, **49**, 663 (1984).

Редактор В.В. Чалдышев

Type II GaInAsSb/InAs heterojunctions

M.P.Mikhailova, I.A.Andreev, T.I.Voronina, T.S.Lagunova, K.D.Moiseev, Yu.P.Yakovlev

A.F.Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St.Petersburg, Russia

We present first investigation of the heterojunctions based on a quaternary $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ ($x = 0.17$; $y = 0.22$) lattice-matched with InAs (100) substrates. Four type of GaInAsSb/InAs heterostructures ($N-n$, $P-p$ and $P-n$ ones) were made and studied. Band-offsets ΔE_c , ΔE_v were determined by using current-voltage and capacity-voltage characteristics of the heterojunctions and approximate energy band schemes were established. We found that $\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}_{0.22}\text{Sb}_{0.78}$ /InAs heterojunction is a type II broken-gap one. A high electron mobility was first observed ($\mu_n = 70\,000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ at $T = 77 \text{ K}$) in GaInAsSb/InAs single heterostructure by growing a un doped quaternary alloy on a low-doped p -InAs substrates.
