

# Спектрокинетические свойства гетероструктур с квантовыми ямами на основе GaAsSb/InGaAs/GaAs, излучающих в области 1.0–1.2 мкм

© С.В. Морозов<sup>+¶</sup>, Д.И. Крыжков<sup>+‡</sup>, В.Я. Алешкин<sup>+‡</sup>, Б.Н. Звонков<sup>\*</sup>, О.И. Вихрова<sup>\*</sup>

<sup>+</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>‡</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>\*</sup> Научно-исследовательский физико-технический институт  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 22 апреля 2013 г. Принята к печати 30 апреля 2013 г.)

Проведено исследование спектрокинетических свойств с пикосекундным и наносекундным временным разрешением гетероструктур с квантовыми ямами на основе GaAs/GaAsSb и GaAsSb/InGaAs/GaAs, излучающих в области 1.0–1.2 мкм. В структуре GaAsSb/InGaAs/GaAs наблюдалась интенсивная фотолюминесценция вплоть до комнатной температуры, а также увеличение сигнала фотолюминесценции в 2.5 раза и сдвиг положения максимума пика ( $\sim 100$  мэВ) в длинноволновую область по сравнению со структурой-спутником GaAsSb/GaAs. Установлено, что с увеличением молярной доли Sb и толщины слоя InGaAs энергия основного перехода уменьшается на 140 мэВ по отношению к структуре GaAsSb/InGaAs/GaAs с меньшим содержанием Sb и меньшей толщиной слоя InGaAs. При 300 К длина волны излучения такой структуры составляла 1.18 мкм. Кроме того, увеличение толщины слоя InGaAs привело к увеличению интенсивности фотолюминесценции при комнатной температуре в 60 раз, что связано с уменьшением энергии основного состояния для электронов в слое InGaAs, и, следовательно, к большей локализации электронов и меньшему температурному гашению фотолюминесценции.

## 1. Введение

Исследования оптических свойств гетеросистемы GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/GaAs при различных уровнях мощности возбуждения и в широком интервале температур, от комнатной до температуры жидкого гелия, на протяжении последнего десятилетия в основном связано с перспективой создания излучателей в области окон прозрачности оптического волокна 1.3 и 1.5 мкм (см., например, [1,2]). Такие лазеры для телекоммуникационных применений могли бы найти свою нишу наряду с лазерами на гетероструктурах InGaAs/InP с квантовыми ямами и InAs/GaAs-лазерами с квантовыми точками. Несмотря на довольно интенсивный сигнал фотолюминесценции (ФЛ) при комнатной температуре, VCSEL (vertical-cavity surface-emitting laser) высокой мощности и низким пороговым током на основе квантовой ямы (КЯ) GaAsSb/GaAs еще не реализован [1,2]. Одной из причин, осложняющих получение качественных структур, является большое различие периодов кристаллических решеток GaAs и GaSb, которое составляет 7.8% [3]. Несмотря на то что для твердого раствора GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> с долей сурьмы  $x$  от 0.25 до 0.7 существует зона несмешиваемости [4], за счет изменения температуры в процессе роста удается получать структуры с достаточно эффективной люминесценцией с содержанием сурьмы в твердом растворе GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> вплоть до 40%. Хорошо известно, что при содержании сурьмы  $\sim 36\%$  пик фотолюминесценции от квантовой ямы GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/GaAs при комнатной температуре располагается в обла-

сти 1.3 мкм, т.е. в первом окне прозрачности кварцевого волокна. Однако, как показали наши исследования [5], при таком содержании сурьмы в реальном пространстве образуется гетеропереход II рода, т.е. гетеропереход с непрямыми оптическими переходами. Такая квантовая яма GaAsSb, ограниченная барьерами GaAs, может рассматриваться как система с сильно локализованными дырками (в слое GaAsSb) и слабо локализованными (или делокализованными) электронами, в особенности при комнатной температуре, когда тепловая энергия носителей  $k_B T$  ( $T$  — температура,  $k_B$  — постоянная Больцмана) может быть сравнима с величиной разрыва в зоне проводимости. Задача усиления электронной локализации в данной гетеросистеме может быть решена использованием в качестве обкладочного слоя между GaAsSb и GaAs слоя материала с сильной электронной локализацией. В частности, перспективной, на наш взгляд, является гетеросистема с двойной КЯ GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs<sub>y</sub>Sb<sub>1-y</sub>/GaAs [6–10]. В этом случае электроны эффективно локализованы в слое InGaAs, а дырки в слое GaAsSb. Это может привести к увеличению эффективности межзонной излучательной рекомбинации за счет более сильной электронной локализации и, кроме того, к уменьшению энергии основного перехода в такой КЯ относительно структуры GaAsSb с тем же содержанием сурьмы за счет увеличения эффективной ширины двойной КЯ. Таким образом, основной проблемой, решению которой посвящена работа, является задача формирования и диагностики эффективных светоизлучающих GaAs-структур с квантовыми ямами из твердых растворов GaAsSb и InGaAs.

<sup>¶</sup> E-mail: more@ipm.sci-nnov.ru

## 2. Методика эксперимента

Исследованные структуры выращивались как классическим методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС), так и с помощью лазерного распыления. В таких методах роста, как молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и ГФЭ МОС, Sb попадает на поверхность роста в виде отдельных атомов, что способствует подвижности и соответственно неоднородности распределения и сегрегации сурьмы. В случае лазерного распыления на ростовую поверхность попадают молекулы GaSb, что приводит к лучшему встраиванию сурьмы в решетку. Полученные таким образом слои GaAsSb могут быть более однородными по составу и лучшего оптического качества.

В настоящей работе проведено исследование спектрокинетических фотолюминесцентных свойств с пикосекундным и наносекундным временным разрешением гетероструктур с КЯ на основе GaAs/GaAsSb и GaAsSb/InGaAs/GaAs, излучающих в области длин волн 1.0–1.2 мкм.

Для определения профилей сурьмы в структурах и определения их качества были выполнены исследования структур методом вторично-ионной масс-спектрометрии (с помощью масс-спектрометра TOF.SIMS 5) и рентгеновской дифракции (с помощью рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Discover). Для определения оптического качества, однородности слоев КЯ, типов оптических переходов (прямой, непрямой) и определения времен жизни носителей в основных состояниях в имеющихся и вновь выращенных структурах GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/GaAs и InGaAs/GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/GaAs проведены спектральные и кинетические измерения ФЛ. Для исследования процессов релаксации фотовозбужденных носителей в полученных структурах использован такой богатый метод исследования, как спектроскопия с временным разрешением, которая позволяет получать прямую информацию о динамике релаксации фотовозбужденных неравновесных носителей заряда.

Для возбуждения ФЛ в непрерывном режиме использовался Nd:YAG-лазер (длина волны излучения  $\lambda = 532$  нм, максимальная плотность мощности  $10^2$  Вт/см<sup>2</sup>). Для анализа спектров ФЛ использовались решеточные монохроматоры (Acton-2300, TriVista Acton Research) или фурье-спектрометр BOMEM DA3. В качестве приемника использовался Ge-детектор, охлаждаемый жидким азотом.

Кинетика релаксации ФЛ во временном интервале от 5 до 100 нс исследовалась с использованием оптического параметрического осциллятора Spectra-Physics MPO SL, длина волны возбуждения перестраивалась в диапазоне 800–940 нм, частота повторений составляла 10 Гц, длительность импульса  $\sim 5$  нс, максимальная мощность в импульсе  $10^6$  Вт. Излучение ФЛ разлагалось решеточным монохроматором и регистрировалось фотоэлектронным умножителем Hamamatsu H10330-75 (время отклика  $\sim 1$  нс). Временное разрешение составляло  $\sim 5$  нс, что достаточно при исследовании межзонной

рекомбинации, обусловленной непрямыми оптическими переходами.

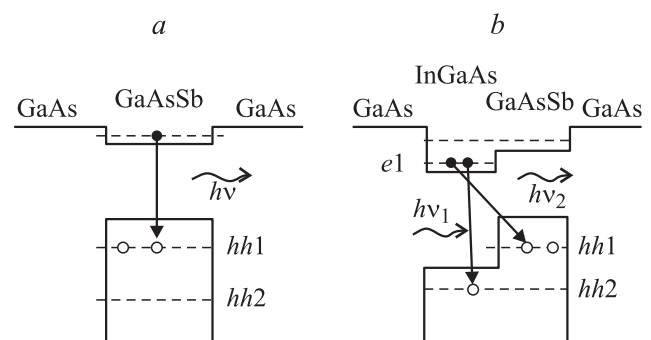
При исследовании процессов межзонной рекомбинации с временами релаксации  $< 5$  нс для возбуждения ФЛ применялся Ti:Sapphire-лазер „Tsunami“ (длительность импульса 130 фс, частота повторений 80 МГц, длина волны 700–950 нм, энергия в импульсе  $> 0.1$  мкДж).

Для измерения кинетики ФЛ использовалась методика коррелированного счета фотонов системой OCOPRS-001 на основе сверхпроводникового детектора, находящегося в криомодуле, поддерживающем температуру 1.8 К. Временное разрешение, определяемое джиттером (флуктуациями), составляет  $\sim 40$  пс [11,12]. Измерения спектров и временной зависимости интенсивности ФЛ (кинетики ФЛ) проводились при температурах  $T = 4.2, 77$  и 300 К.

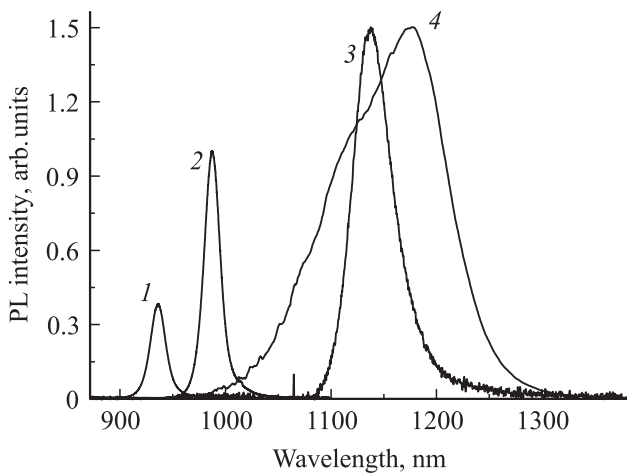
## 3. Результаты и обсуждение

В данной работе для усиления локализации электронов в зоне проводимости на подложке GaAs выращены гетероструктуры с двойной квантовой ямой (рис. 1, *b*) InGaAs/GaAsSb/GaAs — #6534 и 6854, а также для сравнения была выращена структура с квантовой ямой GaAsSb — #6533 (рис. 1, *a*). Параметры структур следующие: в структуре #6533 GaAsSb/GaAs содержание Sb  $\sim 15\%$ , ширина ямы 5 нм; в структуре #6534 InGaAs/GaAsSb/GaAs содержание Sb  $\sim 15\%$ , содержание In  $\sim 15\%$ , толщины слоев квантовых ям по 5 нм; в структуре #6854 InGaAs/GaAsSb/GaAs содержание Sb  $\sim 20\%$ , содержание In  $\sim 15\%$ , толщины слоев квантовых ям 6 и 10 нм.

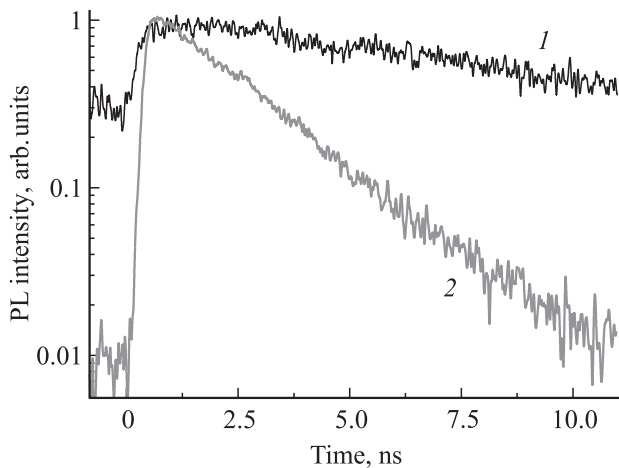
В структуре #6534 наблюдалась интенсивная люминесценция вплоть до комнатной температуры. В структуре #6534 (рис. 2, кривая 2) было обнаружено увеличение сигнала ФЛ в 2.5 раза и сдвиг положения максимума пика ФЛ ( $\sim 100$  мэВ) в длинноволновую область по сравнению со структурой-спутником GaAsSb/GaAs (рис. 2, кривая 1). Исследование спектров структуры #6854, с большим содержанием Sb и большей толщиной слоя



**Рис. 1.** Зонная диаграмма и оптические переходы в исследуемых структурах: *a* — гетероструктура GaAsSb/GaAs (I типа); *b* — гетероструктура InGaAs/GaAsSb/GaAs (II типа). Показаны уровни размерного квантования электронов (*e1*) и тяжелых дырок (*hh1*, *hh2*).



**Рис. 2.** Спектры фотолюминесценции (PL) исследуемых структур #6533 (1), #6534 (2), #6854 (3,4). Длина волны возбуждающего излучения 532 нм.  $T = 77$  К (1–3) и 300 К (4).



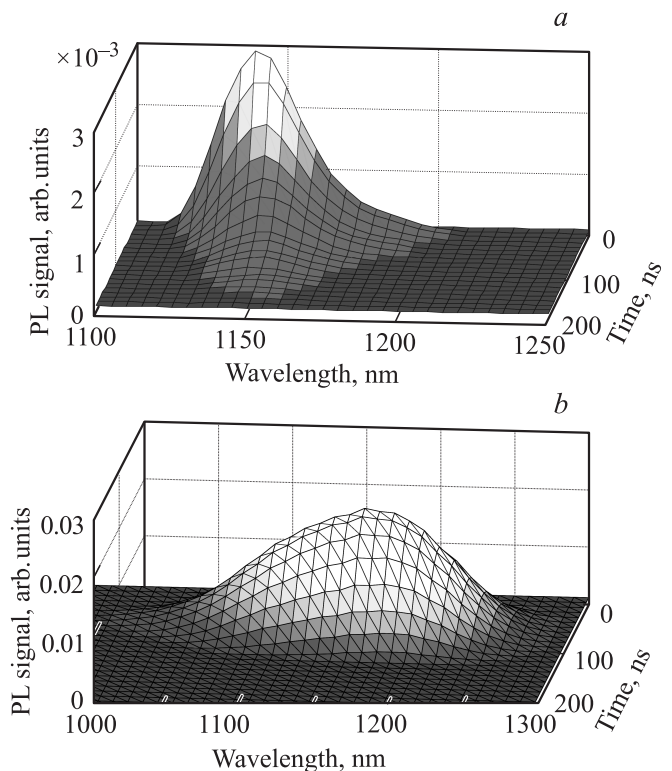
**Рис. 3.** Кинетика спада фотолюминесценции (PL): 1 — структура #6534 InGaAs/GaAsSb/GaAs, 2 — структура #6533 GaAsSb/GaAs.  $T = 4.2$  К. Длина волны возбуждающего излучения 700 нм.

InGaAs, показало, что с увеличением молярной доли Sb и толщины слоя InGaAs энергия основного перехода уменьшается на 140 мэВ по отношению к структуре #6534 (рис. 2, кривая 3). При  $T = 300$  К длина волны излучения в такой структуре составляла 1.180 мкм (рис. 2, кривая 4). Кроме того, увеличение толщины слоя InGaAs привело к увеличению интенсивности ФЛ при комнатной температуре в 60 раз, что связано с уменьшением энергии основного состояния для электронов в слое InGaAs и, следовательно, к более сильной локализации электронов и меньшему температурному гашению ФЛ.

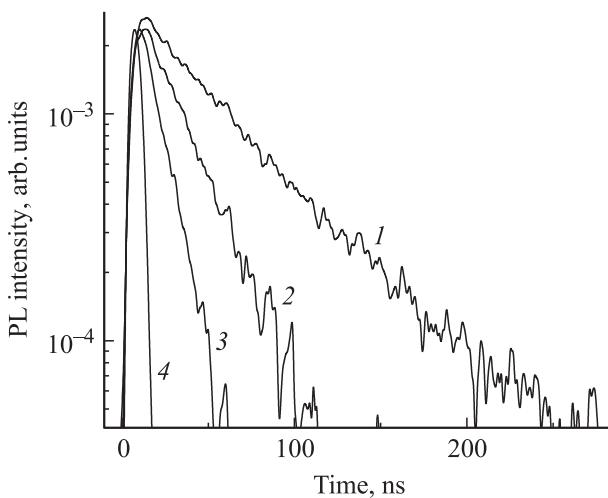
Была измерена кинетика ФЛ структур при 4.2 К. Время спада сигнала ФЛ для структур #6534 и 6533 составляло 8 и 2 нс (рис. 3) соответственно. Это соответствует временам непрямых (структура #6534) и прямых (структура #6533) в пространстве излучательных

переходов. Время спада ФЛ структуры #6854 при 4.2 К составляло 40 нс, что связано с усилением локализации электронов в слое InGaAs и, следовательно, с уменьшением перекрытия волновых функций электронов и дырок, локализованных в слое GaAsSb.

Для структуры #6854 при 20 и 300 К были проведены исследования ФЛ с временным разрешением (рис. 4, a, b). При 20 К наблюдается пик ФЛ с максимумом в районе 1150 нм при ширине линии  $\sim 30$  нм (рис. 4, a). Во всей области пика кинетика ФЛ имеет моноэкспоненциальный вид с временем спада  $\sim 40$  нс, что соответствует основному непрямому в пространстве переходу  $e1-hh1$  (см. рис. 1, b). При 300 К наблюдается пик ФЛ с максимумом в районе 1180 нм при ширине линии  $\sim 150$  нм (рис. 4, b). В пределах всего пика ФЛ от КЯ время спада сигнала ФЛ составляет 5 нс и определяется временным разрешением регистрирующей системы. Чтобы проследить эволюцию кинетики спада ФЛ структуры #6854 в области максимума линии была исследована зависимость времени спада сигнала для разных температур при фиксированной интенсивности накачки (рис. 5). Обнаружено, что с увеличением температуры время спада сигнала ФЛ уменьшается от 40 нс при 20 К до 5 нс при 150 К. При дальнейшем увеличении температуры вплоть до 300 К время спада остается равным 5 нс и определяется временным разрешением измерительной установки. Энергия температурного га-



**Рис. 4.** Время-разрешенные спектры фотолюминесценции (PL) гетероструктуры II типа #6854 InGaAs/GaAsSb/GaAs с толщинами слоев InGaAs и GaAsSb 10 и 6 нм соответственно при 20 (a) и 300 К (b). Длина волны возбуждающего излучения 620 нм.



**Рис. 5.** Кинетика спада фотолуминесценции структуры #6854 InGaAs/GaAsSb/GaAs при температурах  $T$ , К: 1 — 20, 2 — 50, 3 — 100, 4 — 300. Длина волны возбуждающего излучения 620 нм.

шения ФЛ, определенная из зависимости времени спада ФЛ от температуры в диапазоне от 20 до 150 К, составляет 5 мэВ, что значительно меньше энергии ионизации уровней (как электронных, так и дырочных) в КЯ. Это не позволяет интерпретировать уменьшение интенсивности сигнала ФЛ с ростом температуры термическим выбросом носителей из КЯ в континуум. Такое поведение, на наш взгляд, может быть связано с наличием областей эффективной безызлучательной рекомбинации непосредственно в КЯ InGaAs/GaAsSb, например, в дефектной области на гетерогранице, связанной с сегрегацией Sb.

#### 4. Заключение

Таким образом, в работе методом спектроскопии ФЛ с временным разрешением было изучено влияние степени локализации носителей на темп излучательной рекомбинации в структурах InGaAs/GaAsSb/GaAs с пространственно непрямыми переходами в зависимости от толщин и состава слоев InGaAs и GaAsSb.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (№ 13-02-01314 и 11-02-00645-а), РФ НШ-4756.2012.2 при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 8578. В работе было использовано оборудование „Центра коллективного пользования ИФМ РАН“ (ЦКП ИФМ РАН).

#### Список литературы

- [1] T. Anan, M. Yamada, K. Tokutome, S. Sugou, K. Nishi, A. Kamei. *Electron. Lett.*, **35**, 903 (1999).
- [2] P. Dowd, S.R. Johnson, S.A. Feld, M. Adamcyk, S.A. Chaparro, J. Joseph, K. Hilgers, M.P. Horning, K. Shiralagi, Y.-H. Zhang. *Appl. Electron. Lett.*, **39**, 987 (2003).

- [3] I. Vurgaftman, J.R. Meiyer, L.R. Ram-Mohan. *J. Appl. Phys.*, **89**, 5815 (2001)
- [4] J.R. Pesetto, G.B. Stringfellow. *J. Cryst. Growth*, **62**, 1 (1983).
- [5] Ю.Г. Садофьев, N. Samal, Б.А. Андреев, В.И. Гавриленко, С.В. Морозов, А.Г. Спиваков, А.Н. Яблонский. *ФТП*, **44** (3), 422 (2010).
- [6] J.-B. Wang, S.R. Johnson, S.A. Chaparro, D. Ding, Y. Cao, Yu.G. Sadofyev, Y.-H. Zhang, J.A. Gupta, C.Z. Guo. *Phys. Rev. B*, **70**, 195 339 (2004).
- [7] J.F. Klem, O. Blum, S.R. Kurtz, I.J. Fritz, K.D. Choquette. *J. Vac. Sci. Technol.*, **18** (3), 1605 (2000).
- [8] Y.K. Su, C.T. Wan, R.W. Chuang, C.Y. Huang, W.C. Chen, Y.S. Wang, H.C. Yu. *J. Cryst. Growth*, **310**, 4850 (2008).
- [9] T.S. Wang, J.T. Tsai, K.I. Lin. *Mater. Sci. Engin. B*, **147**, 131 (2008).
- [10] K. Hild, S.J. Sweeney, S. Wright. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 173 509 (2006).
- [11] G. Gol'tsman, A. Korneev, I. Rubtsova, I. Milostnaya, G. Chulkova, O. Minaeva, K. Smirnov, B. Voronov, W. Slysz, A. Pearlman, A. Verevkin, R. Sobolewski. *Phys. Status Solidi C*, **2** (5), 1480 (2005).
- [12] M.J. Stevens, R.H. Hadfield, R.E. Schwall, S.W. Nam, R.P. Mirrin, J.A. Gupta. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 031 109 (2006).

Редактор Л.В. Шаронова

#### Photoluminescence spectra and kinetics of QW heterostructures based on GaAsSb/InGaAs/GaAs, emitting at 1.0–1.2 $\mu\text{m}$

S.V. Morozov<sup>+</sup>, D.I. Kryzhkov<sup>+</sup>, V.Ya. Aleshkin<sup>+</sup>, B.N. Zvonkov<sup>\*</sup>, O.V. Vihrova<sup>\*</sup>

<sup>+</sup> Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences, 603950 Nizhni Novgorod, Russia,  
<sup>≠</sup> Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, 603950 Nizhni Novgorod, Russia

<sup>\*</sup> Physical-Technical Research Institute, Nizhni Novgorod State University, 603950 Nizhni Novgorod, Russia

**Abstract** This paper focuses on the properties of spectra and kinetics with picosecond and nanosecond time resolution of QW based GaAs/GaAsSb and GaAsSb/InGaAs/GaAs structures emitting in the 1.0–1.2  $\mu\text{m}$ . The GaAsSb/InGaAs/GaAs structure showed intense photoluminescence up to room temperature, increase in the photoluminescence signal by 2.5 times and shift of the maximum of the photoluminescence peak ( $\sim 100$  meV) to longer wavelengths compared to the reference GaAsSb/GaAs structure. It has been shown that with increasing of Sb fraction and InGaAs layer thickness the energy of ground transitions decreased by 140 meV relative to the structure GaAsSb/InGaAs/GaAs with less Sb content and less InGaAs layer thickness. At 300 K, the emission wavelength was 1.18  $\mu\text{m}$ . In addition, increasing of the InGaAs layer thickness increased the photoluminescence intensity at room temperature by 60 times that was related with decrease in the ground state energy for electrons in the InGaAs layer, and consequently a better localization of electrons and a smaller temperature photoluminescence quenching.