

Твердые растворы InGaAsSb на основе InAs, легированные гадолинием, для светодиодов в спектральной области 3 ÷ 5 мкм

© Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 2 декабря 1998 г. Принята к печати 8 декабря 1998 г.)

Исследовано влияние примеси гадолиния на электрические и люминесцентные характеристики эпитаксиальных структур на основе узкозонных твердых растворов n -InGaAsSb, выращенных методом жидкофазной эпитаксии на подложках InAs. Введение в раствор–расплав гадолиния в интервале концентраций $0 < X_{Gd}^I \leq 0.14$ ат% приводит к уменьшению концентрации электронов в слоях InGaAsSb от $(3 \div 6) \cdot 10^{16}$ до $(7 \div 8)10^{15} \text{ см}^{-3}$ и росту подвижности носителей от 32 000 до 61 500 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ($T = 77 \text{ К}$). Обнаружено также уменьшение полуширины спектров фотолюминесценции от 25 до 12 мэВ и рост их интенсивности до 10 раз ($T = 77 \text{ К}$). Интенсивность электролюминесценции светодиодов на основе легированных гадолинием эпитаксиальных структур n -InGaAsSb/ p -InAs ($T = 300 \text{ К}$) увеличивалась в ~ 2 раза по сравнению с нелегированными образцами.

1. Введение

Известно, что возможности жидкофазной эпитаксиальной технологии (ЖФЭ) в создании эффективных оптоэлектронных приборов, в том числе на основе твердых растворов $A^{III}B^V$, часто ограничиваются присутствием в расплаве остаточных примесей кремния, углерода и кислорода. В связи с этим представляют интерес работы, в которых сообщается о возможности очистки полупроводниковых материалов при легировании их редкоземельными элементами Yb, Gd, Sc, Sm и др. [1–7].

Цель настоящей работы состояла в получении и исследовании электрических и люминесцентных свойств узкозонных твердых растворов n -In $_{1-x}$ Ga $_x$ As $_{1-y}$ Sb $_y$ и светодиодов на их основе, излучающих в спектральном диапазоне $\lambda = 3 \div 5$ мкм ($T = 300 \text{ К}$), выращенных методом ЖФЭ из раствора–расплава, легированного гадолинием.

2. Образцы и методика эксперимента

Образцы представляли собой эпитаксиальные слои твердого раствора n -In $_{1-x}$ Ga $_x$ As $_{1-y}$ Sb $_y$ толщиной $d = 10 \div 20$ мкм, выращенные методом ЖФЭ при температуре $T = 635 \div 654^\circ\text{C}$ из: а) нелегированной жидкой фазы; б) из раствора, легированного Gd в интервале концентрации $0 < X_{Gd}^I \leq 0.14$ ат%. Подложками служили монокристаллические пластины n - и p -InAs промышленной чистоты с концентрацией носителей тока $n, p(77 \text{ К}) = (1 \div 3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, подвижностью $U_n(77 \text{ К}) = (4 \div 5) \cdot 10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $U_p(77 \text{ К}) = (0.7 \div 1.0) \cdot 10^3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и плотностью дислокаций $5 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$. Согласно интерполяционной оценке на основании данных о составе слоев, имело место достаточно хорошее согласование периодов решеток эпитаксиальных пленок и подложки InAs (см. табл. 1). Эпитаксиальные слои n -InGaAsSb обладали достаточно совершенной морфологией (планарность, качество поверхности и плоскости скола (110)) и плотностью дислокаций

$10^4 \div 10^5 \text{ см}^{-2}$, причем резкого увеличения плотности дислокаций не наблюдалось вплоть до $X_{Gd}^I = 0.14$ ат%.

Измерение электрических параметров эпитаксиальных пленок n -InGaAsSb, выращенных на подложках p -InAs, проводилось на прямоугольных образцах с шестью индиевыми контактами по стандартной методике на постоянном токе в магнитном поле 4.9 кЭ при $T = 77 \text{ К}$. По результатам измерения электропроводности (σ) и коэффициента Холла (R) вычислялись концентрация (n_{77}) и подвижность (U_{77}) носителей заряда.

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) ($T = 77 \text{ К}$) измерялись в геометрии "на отражение" (возбуждение и регистрация излучения осуществлялись с поверхности слоя n -InGaAsSb). Источником возбуждения служил полупроводниковый лазер ЛПИ-14 ($\lambda = 0.8$ мкм, $P_{\text{imp}} \sim 50 \text{ Вт}$).

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Электрические параметры исследованных образцов приведены в табл. 2. Результаты измерения показали, что с ростом содержания Gd в растворе–расплаве в интервале $0 < X_{Gd}^I \leq 0.14$ ат%, в эпитаксиальных слоях n -InGaAsSb происходит уменьшение концентрации свободных носителей заряда n_{77} . Наиболее резкое уменьшение от $n_{77} = (3 \div 6) \cdot 10^{16}$ до $n_{77} = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ наблюдается в интервале $0 < X_{Gd}^I \leq 0.005$ ат%. При дальнейшем увеличении содержания Gd в растворе–расплаве до

Таблица 1.

№	X_{Gd}^I , ат%	Состав твердого раствора	$\bar{\alpha}$, Å	$\delta\bar{\alpha}$
H ₂₃ -2	0.0022	In _{0.935} Ga _{0.065} As _{0.94} Sb _{0.06}	6.057	$-1.6 \cdot 10^{-4}$
HN-4	0.0030	In _{0.951} Ga _{0.049} As _{0.946} Sb _{0.054}	6.061	$+4.9 \cdot 10^{-4}$
H ₁₈ -2	0.022	In _{0.93} Ga _{0.07} As _{0.939} Sb _{0.061}	6.054	$-4.9 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2.

№	X_{Gd}^l , ат%	$n \cdot 10^{-16}$, см ⁻³	U , см ² /В·с	$N_I \cdot 10^{-16}$, см ⁻³	$N_D \cdot 10^{-16}$, см ⁻³	$N_A \cdot 10^{-16}$, см ⁻³	K
H7-1	0	4.5	32000	6.81	5.66	1.15	0.20
H22-1	0	3.6	40000	4.85	4.23	0.62	0.15
H7-2	0.0017	2.9	40400	4.54	3.72	0.82	0.22
H4-3	0.0037	1.5	52000	2.45	1.98	0.47	0.23
H7-3	0.0042	0.81	50000	2.14	1.48	0.66	0.45
H22-3	0.0051	1.3	61500	2.0	1.65	0.35	0.21
H22-4	0.0074	1.6	52000	2.62	2.11	0.51	0.24
H22-5	0.0160	0.8	44000	2.70	1.8	0.9	0.50
H22-6	0.030	0.69	38000	2.57	1.63	0.94	0.58
H21-6	0.140	0.69	33000	3.0	1.85	1.15	0.62

$X_{Gd}^l = 0.14$ ат% зависимость $n_{77} = f(X_{Gd}^l)$ рис. 1 выходит на насыщение, достигая значений $n_{77} = (7 \div 8) \cdot 10^{15}$ см⁻³. Одновременно с этим при $X_{Gd}^l \cong 0.005$ ат% подвижность электронов (U_{77}) увеличилась в 1,5 ÷ 1.8 раз по сравнению с подвижностью в нелегированных образцах, достигая величины $U_{77} = 61\,500$ см²/(В·с) при $n_{77} = 1.3 \cdot 10^{16}$ см⁻³ (рис. 1).

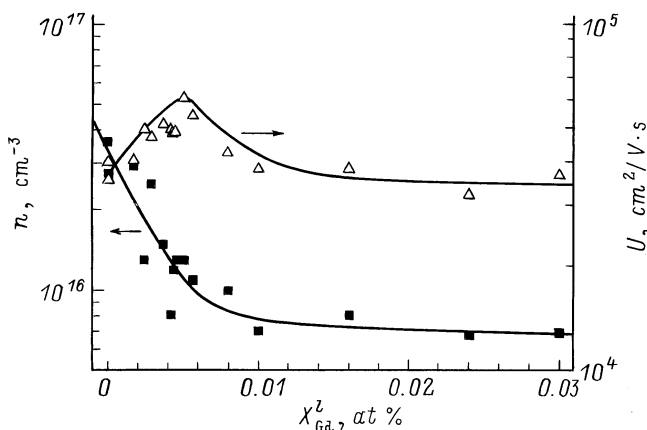


Рис. 1. Зависимость концентрации n и подвижности носителей U от содержания гадолиния X_{Gd}^l в растворе-расплаве ($T = 77$ К).

Используя результаты холловских измерений и полагая, что величина подвижности носителей тока определяется в основном рассеянием на оптических фонах и ионах примеси, была вычислена концентрация ионов примеси (N_I), доноров (N_D), акцепторов (N_A) и степень компенсации $K = N_A/N_D$.

Анализ полученных результатов показал, что концентрации ионов примеси (как N_A , так и N_D) с увеличением содержания Gd в растворе-расплаве заметно уменьшаются, достигая минимальных значений $N_D = (1 \div 2) \cdot 10^{16}$ см⁻³, $N_A = (3 \div 5) \cdot 10^{15}$ см⁻³ при $X_{Gd}^l = 0.004 \div 0.005$ ат% (рис. 2). При дальнейшем увеличении X_{Gd}^l вплоть до 0.14 ат% концентрация N_D практически не изменяется, а N_A и N_I несколько возрастают

при $X_{Gd}^l = 0.005 \div 0.013$ ат% и выходят на насыщение при уровнях легирования $X_{Gd}^l = 0.01 \div 0.14$ ат%.

Уменьшение концентрации доноров по мере роста содержания Gd в жидкой фазе можно объяснить уменьшением фоновой концентрации примеси элементов VI группы, связанным с их взаимодействием с гадолинием и образованием тугоплавких соединений [3]. В то же время насыщение зависимости $N_d = f(X_{Gd}^l)$ свидетельствует о наличии в пленке твердого раствора InGaAsSb примеси другого сорта на уровне $1.5 \cdot 10^{15}$ см⁻³, не вступающей во взаимодействие с гадолинием.

Подобная зависимость концентрации N_A от содержания гадолиния в жидкой фазе говорит о сложном характере взаимодействия Gd с неконтролируемыми примесями. В частности, возрастание N_A при $X_{Gd}^l = 0.005$ ат% может быть связано с проявлением акцепторных свойств самого Gd (подобно тому, как это наблюдалось в [4] для GaAs (Sc)) или образующихся с его участием соединений, либо с распадом комплексов, связывающих акцепторы. Последнее, по-видимому, может происходить при $X_{Gd}^l > 0.005$ ат%, когда предполагаемые выше процессы начнут доминировать над основным, экстрагирующим действием Gd.

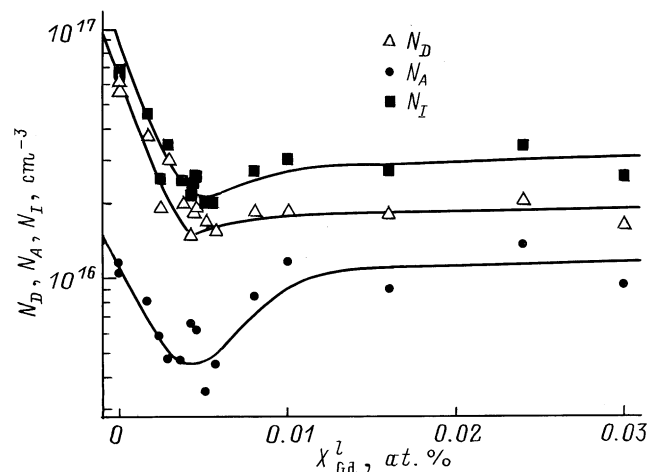


Рис. 2. Зависимость концентраций N_D , N_A , N_I от содержания гадолиния в растворе-расплаве ($T = 77$ К).

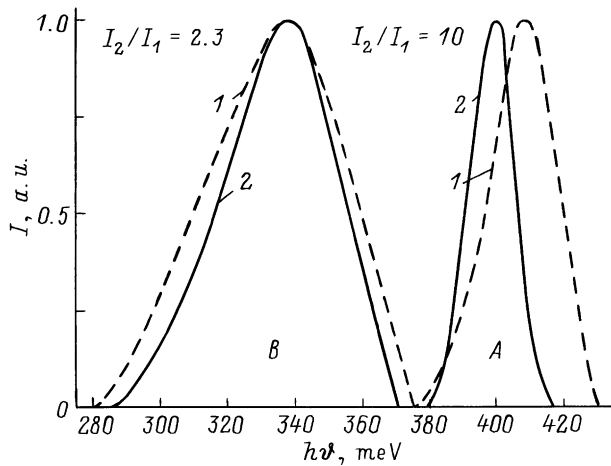


Рис. 3. А) Спектры ФЛ ($T = 77$ К) n -InGaAsSb: $X_{\text{Gd}}^{\text{I}} = 0$ (1), $X_{\text{Gd}}^{\text{I}} = 0.005$ ат% (2). В) Спектры ЭЛ ($T = 300$ К) n -InGaAsSb/ p -InAs: $X_{\text{Gd}}^{\text{I}} = 0$ (1), $X_{\text{Gd}}^{\text{I}} = 0.005$ ат% (2).

Из проведенного анализа результатов холловских измерений можно сделать вывод о том, что общая концентрация носителей заряда эффективно снижается при введении Gd до уровня $X_{\text{Gd}}^{\text{I}} = 0.005$ ат% за счет уменьшения фоновой концентрации как доноров, так и акцепторов. Дальнейшее снижение концентрации носителей заряда при введении Gd свыше 0.005% обусловлено ростом степени компенсации примесей $K = N_{\text{A}}/N_{\text{D}}$.

На рис. 3 представлены типичные спектры ФЛ образцов. Их коротковолновые, длинноволновые части и полуширина подобны характеристикам спектра однородного совершенного кристалла, например InAs. Для легированных и нелегированных гетероструктур наблюдалась только краевая линия фотолуминесценции. Положение максимума спектра $h\nu_m$ в зависимости от степени легирования изменяется в интервале $h\nu_m = 397 \div 405$ мэВ. Для концентрации $n_{77} = 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ положение уровня Ферми в слое n -InGaAsSb совпадает с дном зоны проводимости, так что величина $h\nu_m$ соответствует оптическим переходам "зона-зона". Таким образом, полученное из спектров ФЛ наименьшее значение $h\nu_m = 397$ мэВ, с точностью до $1/2$ кТ, можно считать соответствующим ширине запрещенной зоны исследуемого твердого раствора $\text{In}_{0.935}\text{Ga}_{0.065}\text{As}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$. Возрастание $h\nu_m$ до величины $h\nu_m = 405$ мэВ обусловлено изменением положения уровня Ферми в зоне проводимости, связанным с ростом концентрации основных носителей заряда в исследованных образцах.

Измерения показали, что с ростом содержания Gd наблюдается возрастание интенсивности ФЛ, которая достигает максимального значения при концентрации $X_{\text{Gd}}^{\text{I}} = 0.004 \div 0.005$ ат%. В качестве I_0 в соответствующих сериях образцов принималась интенсивность ФЛ контрольных образцов, выращенных в тех же условиях, но не легированных Gd. Для иллюстрации зависимости $(I/I_0) = f(X_{\text{Gd}}^{\text{I}})$ на рис. 4 приведены кривые для образцов, выращенных на подложках n -InAs (1), и образ-

цов стандартной серии H_{22} , выращенных на подложках p -InAs (2). Как видно из рис. 4, повышение концентрации до $X_{\text{Gd}}^{\text{I}} = 0.016$ ат% сопровождается уменьшением интенсивности излучения, которое связано, по-видимому, с возрастанием в процессах рекомбинации роли безызлучательных каналов, обусловленных ростом концентрации акцепторов (N_{A}) и степени компенсации ($K = N_{\text{A}}/N_{\text{D}}$).

Полуширина спектров ФЛ $\Delta h\nu_{0.5}$ уменьшается в $1.3 \div 1.8$ раза (см. вставку к рис. 4) с ростом содержания гадолиния, достигая насыщения при концентрации $X_{\text{Gd}}^{\text{I}} \cong 0.005$ ат%, что повторяет характер изменения концентрации носителей заряда в легированных Gd образцах (рис. 1). Необходимо отметить, что наблюдалось двукратное уменьшение интенсивности ФЛ в гетероструктурах n -InGaAsSb/ p -InAs по сравнению с контрольными образцами, выращенными на подложках n -InAs (рис. 4, кривая 1). Это свидетельствует о возможном загрязнении эпитаксиальных слоев акцепторами, содержащимися в подложках p -InAs.

Таким образом, результаты анализа спектральных характеристик исследованных образцов на основе твердого раствора $\text{In}_{0.935}\text{Gd}_{0.065}\text{As}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$ подтверждают выводы о наличии эффекта очистки, сделанные на основании гальваномагнитных измерений.

В процессе работы были измерены также электролюминесцентные (ЭЛ) характеристики макетов светодиодов ($\lambda = 3.7$ мкм при $T = 300$ К), полученных на основе легированного Gd материала. Для

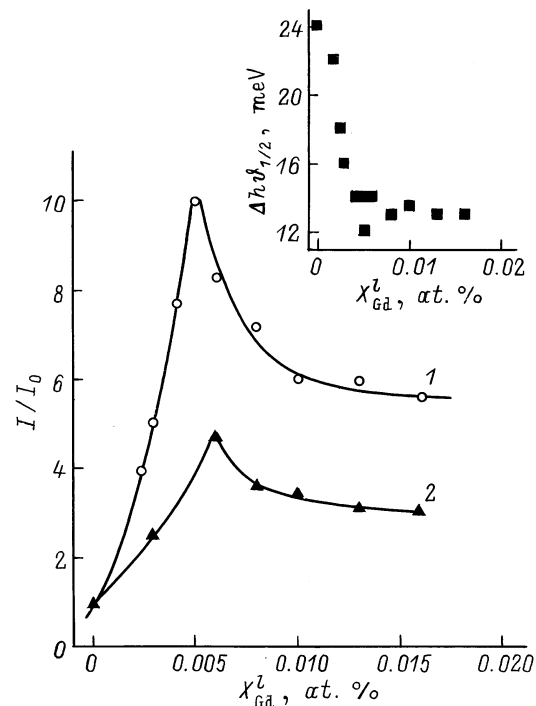


Рис. 4. Зависимость интенсивности ФЛ I/I_0 и полуширины спектров ФЛ $\Delta h\nu_{0.5}$ (на вставке) от содержания гадолиния в растворе-расплаве ($T = 77$ К). Подложки: 1 — n -InAs, 2 — p -InAs.

Таблица 3.

N_0	X_{Gd}^l , ат%	$h\nu(300\text{ K}),$ мэВ	$\Delta h\nu_{0.5},$ мэВ	$\lambda(300\text{ K}),$ мкм	I/I_0	Структура
H ₂₂ -1	0	333	39	3.72	1	<i>n</i> -InGaAsSb / <i>p</i> -InAs
H ₂₂ -2	0.0029	329	39	3.77	2.3	<i>n</i> -InGaAsSb / <i>p</i> -InAs
H ₂₁ -3	0.022	332	51	3.73	2.1	<i>n</i> -InGaAsSb / <i>p</i> -InAs
СД-1	0	336	41	3.69	1	<i>n-p</i> -InGaAsSb / <i>p</i> -InAs
СД-2	0.005	339	39	3.66	1.8	<i>n-p</i> -InGaAsSb / <i>p</i> -InAs

этой цели были использованы исследованные образцы *n*-InGaAsSb/InAs, представляющие собой диодные структуры с гетеро-*p'*-*n*-переходом, расположенным на границе раздела "слой-подложка", и структуры с гомо-*p*-*n*-переходом в слое твердого раствора *n*-InGaAsSb / *p*-InGaAsSb / *p*-InAs. Спектры ЭЛ представлены на рис. 3. В табл. 3 приведены спектральные характеристики светодиодов, полученных на основе легированного и не легированного гадолинием материала. Как видно из таблицы, имеет место примерно двукратное увеличение интенсивности излучения у приборов, собранных на основе легированных Gd структур.

Заключение

В работе установлено, что легирование раствора-расплава гадолинием до концентраций $X_{Gd}^l = 0.004 \div 0.005$ ат% приводит к снижению концентрации электронов в слоях до $n_{77} \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и увеличению из подвижности до $U \approx 6 \cdot 10^4 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$. При этом снижение концентрации остаточных примесей происходит за счет уменьшения концентрации как доноров, так и акцепторов. С увеличением содержания Gd в жидкой фазе от 0.005 до 0.010 ат% происходит дальнейшее снижение концентрации электронов до $n_{77} = (7 \div 8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ за счет возрастания концентрации акцепторов и перекомпенсации примесей, при этом подвижность носителей уменьшается до $U = (3 \div 4) \cdot 10^4 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$. Начиная с $X_{Gd}^l = 0.01$ ат%, зависимости n , N_i , N_D , N_A от X_{Gd}^l выходят на насыщение, практически не изменяясь до $X_{Gd}^l = 0.14$ ат%.

При легировании Gd в интервале концентраций $X_{Gd}^l = 0.004 \div 0.005$ ат% наблюдается увеличение интенсивности ФЛ в (4 ÷ 10) раз и уменьшение полуширины спектров ФЛ в (1.3 ÷ 1.8) раз по сравнению с нелегированными образцами. Дальнейший рост содержания Gd от 0.005 до 0.14 ат% приводит к уменьшению интенсивности ФЛ, тогда как полуширина спектров остается неизменной, принимая значение $\Delta h\nu_{0.5} \approx 12$ мэВ.

Наблюдалось увеличение в 1.8 ÷ 2.3 раза интенсивности ЭЛ макетов светодиодов на основе гетеродиодных *n*-InGaAsSb / *p*-InAs и гомодиодных *n*-InGaAsSb / *p*-InGaAsSb / *p*-InAs структур с длиной волны излучения $\lambda \sim 3.7$ мкм ($T = 300$ К), легированных гадолинием, по сравнению с источниками излучения на основе не легированного гадолинием материала. Это свидетельству-

ет о перспективности использования легированного Gd материала для создания эффективных оптоэлектронных приборов в спектральной области 3 ÷ 5 мкм.

Список литературы

- [1] К.А. Гацоев, А.Т. Гореленок, С.А. Карпенко, В.В. Мамутин, Р.П. Сейсян. ФТП, **17**, 2148 (1983).
- [2] Н.Т. Баграев, Л.С. Власенко, К.А. Гацоев, А.Т. Гореленок, А.В. Каманин, В.В. Мамутин, Б.В. Пушный, В.К. Тибилов, Ю.П. Толпаров, А.Е. Шубин. ФТП, **18**, 83 (1984).
- [3] А.Т. Гореленок, В.Г. Груздов, Р. Кумар, В.В. Мамутин, Т.А. Полянская, И.Г. Савельев, Ю.В. Шмарев. ФТП, **22**, 35 (1988).
- [4] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, Б.Е. Саморуков, Н.А. Стругов. ФТП, **22**, 147 (1988).
- [5] В.В. Воробьева, М.В. Егорова, Л.М. Крещук, С.В. Новиков, И.Г. Савельев. ФТП, **23**, 1699 (1989).
- [6] А.Н. Баранов, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.А. Сиповская, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **27**, 421 (1993).
- [7] А.Т. Гореленок, М.В. Шпаков. ФТП, **30**, 488 (1996).

Редактор В.В. Чалдышев

Gadolinium-doped InAs-based InGaAsSb solid solutions for light diodes in a spectral region of $\lambda = 3 \div 5 \mu\text{m}$

N.V. Zotova, S.A. Karandashev, B.A. Matveev, M.A. Remenny, N.M. Stus', G.N. Talalakin

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

Abstract Gd doping and its influence on electrical and luminescent properties of the InGaAsSb layers grown by LPE onto InAs substrate are investigated. The free electron concentration in InGaAsSb is reducing from $(3 \div 6) \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ down to $(7 \div 8) \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and electron mobility is increasing from $3200 \text{ cm}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ up to $61500 \text{ cm}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ at 77 K on an increase of Gd concentration in the melt up to ~ 0.14 (at.). The above phenomena are accompanied by the 10-fold photoluminescence intensity increase and the FWHM decrease from 25 to 12 meV (77 K). Gd influence manifests itself also in a 2-fold increase of electroluminescence intensity of Gd-doped *n*-InGaAsSb / *p*-InAs heterostructures at room temperatures.

E-mail: bmat@iropt3.ioffe.rssi.ru
Fax: +7(812) 247 43 24