

Фотолюминесцентные и электролюминесцентные свойства спонтанно формирующихся периодических InGaAsP-структур

© Л.С. Вавилова, В.А. Капитонов, Д.А. Лившиц, А.В. Лютецкий, А.В. Мурашова,
Н.А. Пихтин, Г.В. Скрынников, И.С. Тарасов[†]

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

(Получена 16 сентября 1999 г. Принята к печати 22 сентября 1999 г.)

Методами фото- и электролюминесценции исследованы спонтанно формирующиеся периодические InGaAsP-структуры, представляющие собой чередующиеся домены двух твердых растворов с различным составом и разными постоянными решеток. Экспериментально установлено, что объем доменов узкозонного твердого раствора меньше объема доменов широкозонного материала. В структурах присутствуют неупругие деформации, вызванные сильным рассогласованием решеток двух соседних доменов ($2 \div 3\%$). В лазерных диодах, изготовленных с использованием спонтанно формирующихся периодических InGaAsP-структур в активной области, получена лазерная генерация в длинноволновой полосе электролюминесцентного спектра, соответствующей излучательной рекомбинации в доменах узкозонного твердого раствора. В лучших образцах генерация наблюдалась при пороговых плотностях токов 70 A/cm^2 при 77 K и 700 A/cm^2 при 300 K .

1. Введение

В наших предыдущих работах [1,2] был предложен метод получения спонтанно формирующихся периодических InGaAsP-структур. Метод основан на использовании спиноподобного распада многокомпонентных твердых растворов полупроводников $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ [3–14]. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования [15,16] спонтанно формирующихся InGaAsP-структур, возникающих вследствие спиноподобного распада твердых растворов, показали, что они представляют собой периодически повторяющиеся в направлениях наименьшего сжатия кристалла [100] и [010] домены различного состава с разными ширинами запрещенных зон (E_{g1} и E_{g2}). Исследования таких структур при помощи просвечивающего электронного микроскопа позволяют определять размеры доменов, которые находятся в диапазоне $200 \div 600 \text{ \AA}$ для различных структур [2,15].

В настоящей работе проведено исследование фотолюминесцентных и электролюминесцентных свойств спонтанно формирующихся периодических InGaAsP-структур.

2. Исследуемые образцы

Для исследования фотолюминесцентных и электролюминесцентных свойств спонтанно формирующихся периодических InGaAsP-структур способом жидкостной эпитаксии на подложках GaAs(001) были выращены изотипные и анизотипные двойные гетероструктуры с такими слоями в качестве активной области. Толщины активных областей составляли $0.2 \div 0.3 \text{ мкм}$. Исследуемые образцы схематически показаны на рис. 1.

Для исследования электролюминесцентных свойств из анизотипных гетероструктур изготавливались лазер-

ные диоды скалыванием по 4 плоскостям (4-сколотые лазерные диоды). Люминесцентные свойства образцов исследовались с использованием стандартных методик измерения фото- и электролюминесценции.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Фотолюминесценция спонтанно формирующихся периодических InGaAsP-структур

Характерные спектры фотолюминесценции спонтанно формирующихся периодических InGaAsP-структур при азотной и комнатной температурах имеют коротковолновую (λ_1) и длинноволновую (λ_2) полосы, соответствующие излучательной рекомбинации в доменах с различным составом твердой фазы и с ширинами запрещенных зон E_{g1} и E_{g2} [1,15]. Это видно из рис. 2, *a, b*, на которых изображены фотолюминесцентные спектры одного из исследуемых образцов. В этой статье мы представляем экспериментальный материал для образцов, которые были выращены в абсолютно идентичных условиях и у которых максимумы полос при температуре

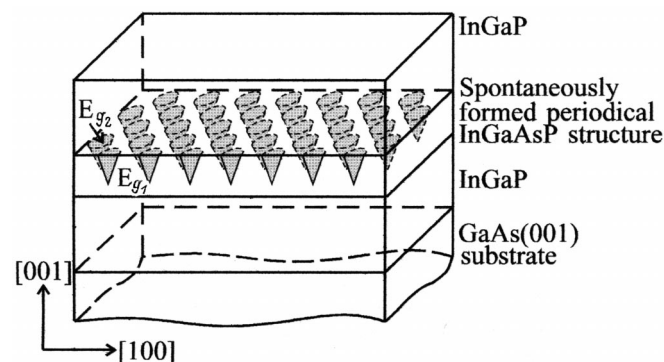


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемого образца.

[†] Факс: (812) 2478038

E-mail: tarasov@hpld.ioffe.rssi.ru

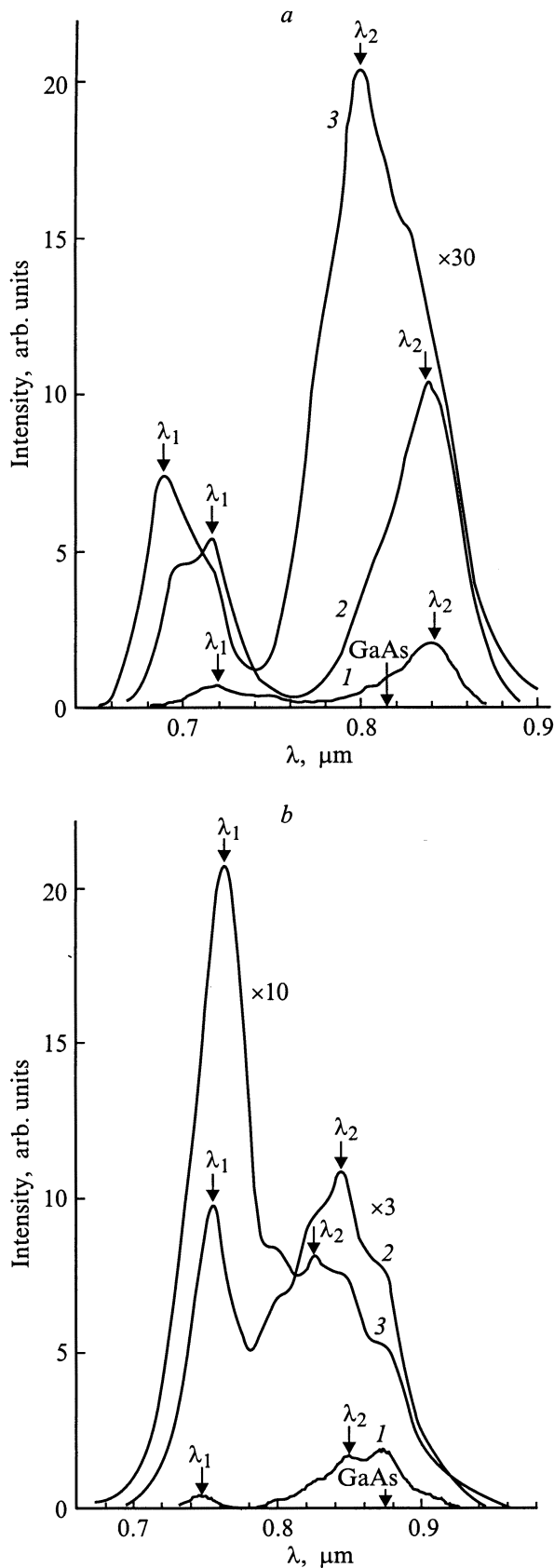


Рис. 2. Фотолуминесцентные спектры спонтанно формирующейся периодической InGaAsP-структуры. *a* — $T = 77$ К; P , кВт/см²: 1 — 0.06, 2 — 0.14, 3 — 3.7. *b* — $T = 300$ К; P , кВт/см²: 1 — 0.17, 2 — 1.4, 3 — 8.0.

$T = 77$ К и малых уровнях возбуждения лежат вблизи значений длин волн $\lambda_1 \approx 0.72$ мкм ($E_{g1} \approx 1.72$ эВ) и $\lambda_2 \approx 0.85$ мкм ($E_{g2} \approx 1.46$ эВ). При температуре 300 К наблюдается небольшой сдвиг максимумов полос в длинноволновую область. На спектрах фотолуминесценции рис. 2, *a, b* не показана полоса, соответствующая InGaP. Дополнительные пики вблизи длин волн $\lambda = 0.816$ мкм (при $T = 77$ К) и $\lambda = 0.877$ мкм (при $T = 300$ К) связаны с излучательной рекомбинацией в подложке GaAs.

Нами была исследована фотолуминесценция спонтанно формирующихся периодических InGaAsP-структур в зависимости от уровня возбуждения при азотной и комнатной температурах. Интенсивность возбуждения (P) при этом варьировалась в пределах от 60 Вт/см² до 8 кВт/см².

При температуре 77 К с увеличением уровня возбуждения соотношение интенсивностей длинноволновой и коротковолновой полос не изменялось (рис. 2, *a*). Наблюдалось уширение длинноволновой полосы, что может быть связано с разбросом состава твердого раствора в доменах, отвечающих за это излучение.

При температуре 300 К с увеличением уровня возбуждения было обнаружено насыщение интенсивности длинноволновой полосы (рис. 2, *b*). По нашему мнению, это связано с меньшим объемом доменов, отвечающих за длинноволновое излучение, по сравнению с объемом доменов, отвечающих за коротковолновое излучение.

Исследование температурной зависимости фотолуминесцентных спектров показало, что при увеличении температуры квантовая эффективность люминесценции длинноволновой полосы падает существенно, чем коротковолновой (рис. 3). Самым простым объяснением этого явления может быть наличие дефектов вследствие неупругой деформации доменов при их сопряжении [15]. Неупругая деформация возникает из-за несоответствия параметров решеток двух различных твердых растворов, образующих домены. Действительно, теоретиче-

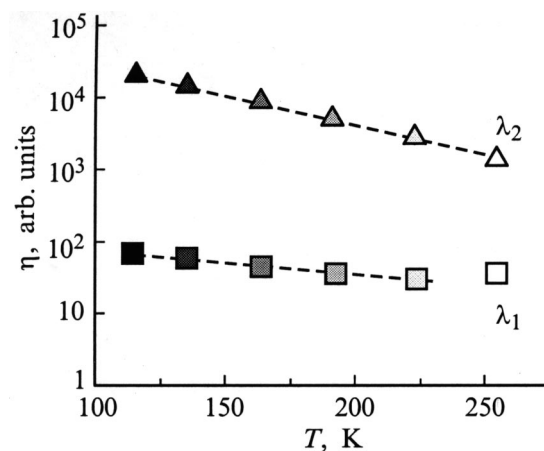


Рис. 3. Зависимость квантовой эффективности люминесценции (η) коротковолновой (λ_1) и длинноволновой (λ_2) полос в фотолуминесцентных спектрах спонтанно формирующейся периодической InGaAsP-структуры от температуры.

ские оценки несоответствия параметров решеток доменов $(a_2 - a_1)/a_1$ для изучаемых структур составляют $2 \div 3\%$ [8], что в случае объемных эпитаксиальных пленок полупроводниковых твердых растворов приводит к неупругим деформациям кристаллической решетки [17].

Мы привели экспериментальный материал для конкретной спонтанно формирующейся периодической InGaAsP-структуры. Однако при используемой температуре роста образцов ($T_G = 750^\circ\text{C}$) существует целая область составов четверных твердых растворов InGaAsP, которые невозможно вырастить как однородные твердые растворы [8,15]. Эпитаксиальные слои таких твердых растворов также представляют собой спонтанно формирующиеся периодические InGaAsP-структуры, но с другими составами твердых фаз доменов и, следовательно, с другими максимумами в люминесцентных спектрах [1]. Поэтому следует отметить, что описанные фотолюминесцентные свойства присущи всем спонтанно формирующимся периодическим InGaAsP-структурам.

3.2. Электролюминесценция спонтанно формирующихся периодических InGaAsP-структур

При азотной и комнатной температурах (рис. 4, *a, b*) в спектрах электролюминесценции 4-сколотых лазерных диодов с активной областью в виде спонтанно формирующейся периодической InGaAsP-структуры, наблюдались коротковолновая и длинноволновая полосы спонтанного излучения. На рис. 4 показаны спектры электролюминесценции лазерного диода при достаточно низких уровнях накачки, так что коротковолновая полоса спонтанного излучения отчетливо не различима. Это соответствует фотолюминесцентным спектрам изотипной гетероструктуры (рис. 2, *a, b*). С увеличением уровня накачки достигался порог генерации в длинноволновой полосе спектра электролюминесценции. Плотности пороговых токов для 4-сколотых лазерных диодов составляли: $J_{th} = 70 \div 250 \text{ A/cm}^2$ при $T = 77 \text{ K}$ и $J_{th} = 0.7 \div 1.3 \text{ kA/cm}^2$ при $T = 300 \text{ K}$.

Из анизотипных двойных гетероструктур также были изготовлены полосковые лазеры с ширинами полосков $W = 20, 50, 100 \text{ мкм}$ и длиной резонатора $L = 510 \text{ мкм}$. В электролюминесцентных спектрах таких лазерных диодов длинноволновая полоса спонтанного излучения наблюдалась только при низких уровнях накачки (до плотностей токов $J = 300 \text{ A/cm}^2$ при $T = 77 \text{ K}$ и $J = 1 \text{ kA/cm}^2$ при $T = 300 \text{ K}$). С увеличением уровня накачки интенсивность длинноволновой полосы быстро насыщалась и возникала коротковолновая полоса. При дальнейшем увеличении накачки достигалась лазерная генерация в коротковолновой полосе электролюминесцентного спектра. Плотности пороговых токов для полосковых лазерных диодов составляли $J_{th} = 2.9 \div 6.3 \text{ kA/cm}^2$ при $T = 300 \text{ K}$. Дифференциальная квантовая эффективность таких лазеров была мала: $10 \div 20\%$.

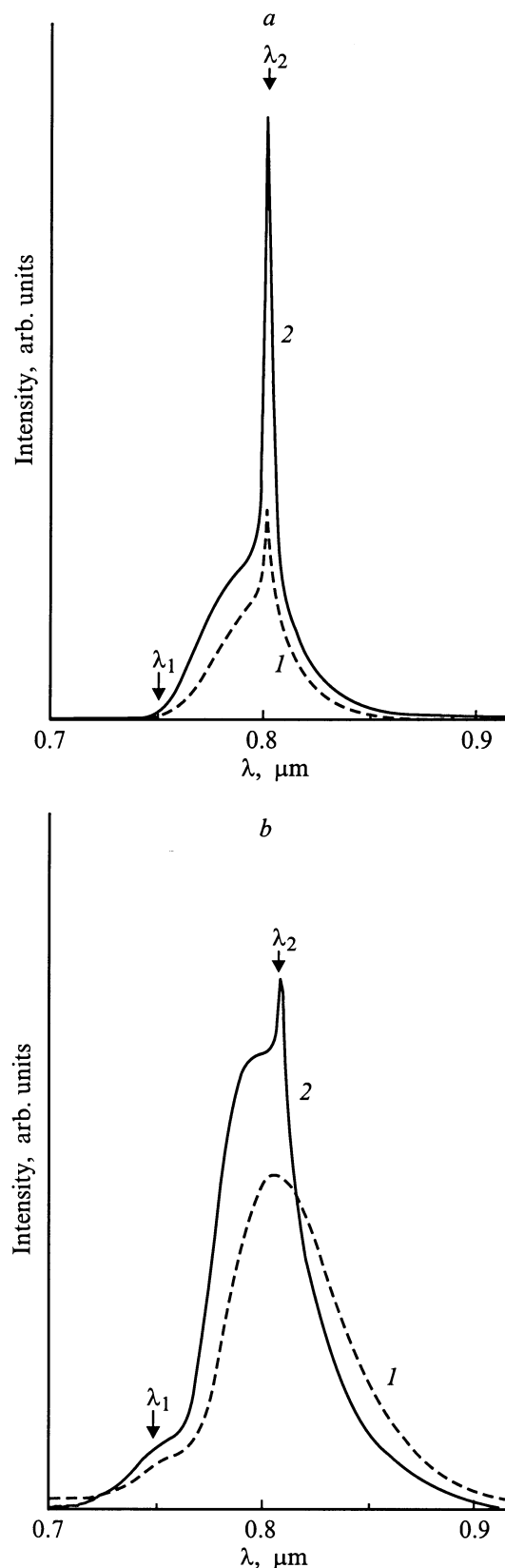


Рис. 4. Электролюминесцентные спектры 4-сколотого лазерного диода со спонтанно формирующейся периодической InGaAsP-структурой в активной области. *a* — $T = 77 \text{ K}$; *1* — $J = J_{th} = 75 \text{ A/cm}^2$, *2* — $J = 110 \text{ A/cm}^2$. *b* — $T = 300 \text{ K}$; *1* — $J = 375 \text{ A/cm}^2$, *2* — $J = J_{th} = 1100 \text{ A/cm}^2$.

4. Обсуждение результатов

1. Исследования фотолюминесцентных и электролюминесцентных свойств спонтанно формирующихся периодических InGaAsP-структур, состоящих из чередующихся доменов двух твердых растворов различного состава, показали: а) объем доменов узкозонного материала меньше по сравнению с объемом доменов широкозонного материала; б) в структуре присутствуют неупругие деформации, по-видимому, возникающие в процессе сопряжения двух доменов различного состава с разными постоянными решетки; этот результат предполагает сильное различие в параметрах решеток двух доменов ($2 \div 3\%$).

2. В 4-склоотых лазерных диодах, изготовленных из анизотипных двойных гетероструктур со спонтанно формирующейся периодической InGaAsP-структурой в качестве активной области, была получена лазерная генерация в длинноволновой полосе электролюминесцентного спектра. В лучших образцах генерация наблюдалась при пороговых плотностях тока $J_{th} = 70 \text{ A/cm}^2$ ($T = 77 \text{ K}$, $\lambda = 0.81 \text{ мкм}$) и $J_{th} = 700 \text{ A/cm}^2$ ($T = 300 \text{ K}$, $\lambda = 0.82 \text{ мкм}$). Эти параметры соответствуют экспериментальным величинам пороговых токов для анизотипных двойных гетероструктур с активной областью толщиной 0.3 мкм в виде однородного твердого раствора с $E_g = 1.51 \text{ эВ}$ ($\lambda = 0.82 \text{ мкм}$).

Таким образом, значительного снижения пороговых плотностей токов в 4-склоотых лазерных диодах с активной областью в виде спонтанно формирующейся периодической InGaAsP-структуры не отмечено, хотя наличие в активной области доменов широкозонного твердого раствора, окружающих узкозонный материал, позволяло этого ожидать. Если такую лазерную структуру рассматривать в модели асимметричной двойной гетероструктуры с активной областью, имеющей запрещенную зону E_{g2} узкозонного материала, и асимметричным волноводом, имеющим запрещенную зону E_{g1} широкозонного материала, то теоретически вычисленные пороговые плотности тока составляют $J_{th} = 20 \text{ A/cm}^2$ при $T = 77 \text{ K}$ и $J_{th} = 90 \text{ A/cm}^2$ при $T = 300 \text{ K}$. Однако в этих теоретических оценках не учитывались каналы безызлучательной рекомбинации. В реальных лазерных структурах существуют дефекты, вызванные неупругой деформацией в активной области, которые являются каналами безызлучательной рекомбинации и не позволяют достигать расчетных значений пороговых токов.

5. Заключение

В заключение следует отметить, что существующее качество спонтанно формирующихся периодических InGaAsP-структур не позволяет эффективно использовать их в светоизлучающих приборах, хотя потенциальные возможности к этому имеются. По нашему мнению, решение проблемы заключается в получении структур

с размерами доменов $50 \div 150 \text{ \AA}$. Это позволит избежать возникновения дефектов на границах доменов при их сопряжении, несмотря на сильное рассогласование параметров решеток доменов ($2 \div 3\%$), снизить безызлучательную рекомбинацию в таких слоях и сохранить высокий квантовый выход в лазерных диодах со спонтанно формирующимися периодическими InGaAsP-структурами в активных областях.

Авторы благодарят И.П. Ипатову за плодотворные обсуждения при подготовке статьи.

Работа была выполнена при поддержке грантов РФФИ 97-02-18105 и МНТП "Физика твердотельных наноструктур".

Список литературы

- [1] I.S. Tarasov, L.S. Vavilova, I.P. Ipatova, A.V. Lyutetskiy, A.V. Murashova, N.A. Pikhtin, V.A. Shchukin, Zh.I. Alferov. *23th Int. Symp. Compound Semiconductors, ISCS-23* [St. Petersburg, 1996] (1997) p. 117.
- [2] Л.С. Вавилова, А.В. Иванова, В.А. Капитонов, А.В. Мурашова, И.С. Тарасов, И.Н. Арсентьев, Н.А. Берт, Ю.Г. Мусихин, Н.А. Пихтин, Н.Н. Фалеев. *ФТП*, **32** (6), 658 (1998).
- [3] J.W. Cahn. *Trans. Met. Soc.*, **242**, 166 (1967).
- [4] B. de Cremoux. *J. Physique*, **43**, C5-19 (1982).
- [5] K. Onabe. *Japan. J. Appl. Phys.*, **21**, L323 (1982).
- [6] G.B. Stringfellow. *J. Cryst. Growth*, **58**, 194 (1982).
- [7] A.G. Khachaturyan. *Theory of structural transformations in solids* (John Wiley and Sons, N.Y., 1983).
- [8] И.П. Ипатов, В.Г. Малышкин, А.Ю. Маслов, В.А. Шукин. *ФТП*, **27**, 285 (1993).
- [9] I.P. Ipatova, V.G. Malyshekin, V.A. Shchukin. *Phil. Mag.*, **70**, 557 (1994).
- [10] Д. Бимберг, И.П. Ипатов, П.С. Копьев, Н.Н. Леденцов, В.Г. Малышкин, В.А. Шукин. *УФН*, **167** (3), 552 (1997).
- [11] A. Zunger, S. Mahajan. In: *Handbook on semiconductors*, ed. by T.S. Moss (Elsevier, 1994) v. 3, p. 1399.
- [12] S. Mukai. *J. Appl. Phys.*, **54** (5), 2635 (1983).
- [13] A. Behres, M. Heuken, C. Mendorf, H. Lakner, E. Kubalek, K. Heime. *EW MOVPE VII* (Berlin, 1997) A13.
- [14] C. Mendorf, G. Brockt, Q. Liu, F. Schulze, E. Kubalek, I. Rechenberg, A. Knauer, A. Behres, M. Heuken, K. Heime, H. Lakner. *Microsc. Semicond. Mater. Conf. Ser.*, N 157 (Oxford, 1997) p. 25.
- [15] Н.А. Берт, Л.С. Вавилова, И.П. Ипатов, В.А. Капитонов, А.В. Мурашова, Н.А. Пихтин, А.А. Ситникова, И.С. Тарасов, В.А. Шукин. *ФТП*, **33** (5), 544 (1999). [*Semiconductors*, **33** (5), 510 (1999)].
- [16] А.А. Ситникова, Н.А. Берт, А.В. Мурашова, Н.А. Пихтин, I.S. Tarasov. *Int. Symp. Electron. Microscopy ICEM 14* (Cancun, Mexico, 1998) p. 199.
- [17] Н.А. Берт, А.Т. Гореленок, А.Г. Дзигасов, С.Г. Конников, В.Н. Мдивани, И.С. Тарасов, А.С. Усиков. *ФТП*, **16** (1), 60 (1982).

Редактор Л.В. Шаронова

Photoluminescence and electroluminescence properties of spontaneously formed periodical InGaAsP structures

L.S. Vavilova, V.A. Kapitonov, D.A. Livshits,
A.V. Lyutetskiy, A.V. Murashova, N.A. Pikhtin,
G.V. Skrynnikov, I.S. Tarasov

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

Abstract Spontaneously formed periodical InGaAsP structures consisting of interchanged domains of two solid solutions with different compositions and lattice constants were investigated by photoluminescence and electroluminescence methods. It has been found experimentally that a volume of domains of the narrow energy band material is less than that of the high energy band one. There are inelastic deformations caused by a pronounced lattice mismatch (2–3%) of two neighbouring domains in InGaAsP structures. Four-cleaved laser diodes were fabricated from anisotype InGaAsP structures. Lasing has been observed in the long-wavelength side of the electroluminescence spectrum, which corresponds to radiative recombination in domains of the narrow energy band solid solution. In most perfect samples lasing was obtained at the current densities of 70 A/cm^2 (77 K) and 700 A/cm^2 (300 K).