

©1994 г.

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЩНЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ ГЕТЕРОЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ ЧЕТВЕРНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ InGaAsP

Н.А.Пизтин, И.С.Тарасов, М.А.Иванов

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 22 апреля 1994 г. Принята к печати 10 мая 1994 г.)

Исследованы спектры спонтанной и когерентной электролюминесценции зарощенных одномодовых гетеролазеров InGaAsP/InP , InGaAsP/GaAs и AlGaAs/GaAs раздельного ограничения с тонкими активными областями (200–300 Å) при уровне возбуждения до 60 кА/см^2 . Обнаружено неоднородное уширение спектра излучения в четверных твердых растворах InGaAsP . Установлена корреляция между неоднородными уширением спектра излучения и аномальным широким спектром генерации при отсутствии полной стабилизации квазиуровня Ферми в одномодовых зарощенных гетеролазерах, содержащих четверные твердые растворы InGaAsP в активной области. Предложено объяснение явления неоднородного уширения спектров излучения четверных твердых растворов InGaAsP за счет их спинодального распада.

Инжекционные гетеролазеры на базе четверных твердых растворов InGaAsP , излучающие в диапазонах $\lambda = 0.75\text{--}0.86 \text{ мкм}$ и $\lambda = 1.15\text{--}1.65 \text{ мкм}$, являются основными источниками излучения для систем считывания, обработки и передачи информации. На протяжении последних двух десятков лет ведутся работы по оптимизации конструкции и улучшению пороговых, мощностных и излучательных характеристик [1–6]. В лазерах InGaAsP/InP и InGaAsP/GaAs на двойной гетероструктуре с раздельным ограничением (РО ДГС) и тонкой активной областью получены рекордные значения излучаемой мощности в одномодовом и многомодовом непрерывном режимах генерации [4,7,8]. Однако, как это уже нами отмечалось [1,3,9], такие лазеры обладают аномально широкими (20–25 мэВ) спектрами генерации при высоких уровнях инжекции, что не находит простого физического объяснения и сужает область их применения.

Цель данных исследований — выяснение природы аномального расширения спектров после порога генерации при увеличении тока накачки квантово-размерных полосковых зарощенных одномодовых РО ДГС

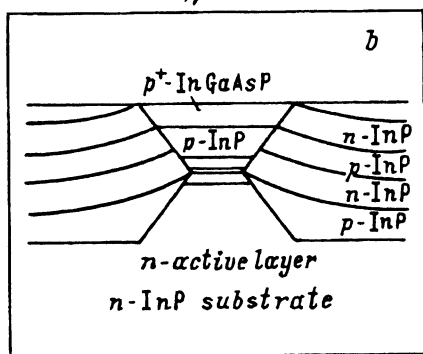
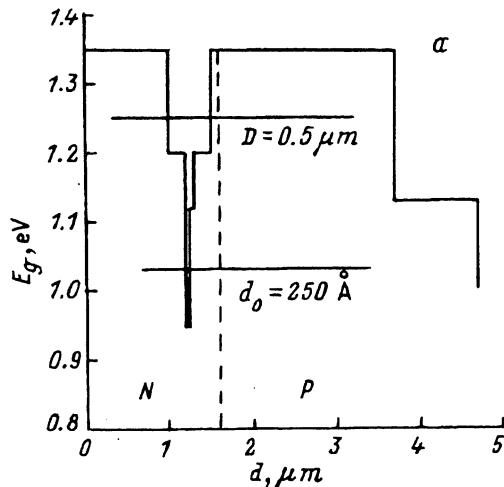


Рис. 1. Схема зонной диаграммы с указанием толщин слоев (а) и схематическое изображение скола зарощенного РО ДГС гетеролазера InGaAsP/InP (b).

гетеролазеров с активной областью на основе четверных твердых растворов InGaAsP.

Нами были исследованы зависимости спектра генерации от тока накачки гетеролазеров с разным составом твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ активной области ($\lambda = 1.3$ и 0.8 мкм), выращенных разными эпитаксиальными методами. На рис. 1 приведены энергетическая зонная диаграмма и схематическое изображение InGaAsP/InP ($\lambda = 1.3$ мкм) РО ДГС полоскового зарощенного одномодового гетеролазера, выращенного модифицированным методом жидкофазной эпитаксии (LPE) [1,3,4]. Аналогичную конструкцию и толщины слоев имели квантово-размерные полосковые зарощенные одномодовые РО ДГС гетеролазеры InGaAsP/GaAs ($\lambda = 0.8$ мкм), выращенные модифицированным методом LPE, а также РО ДГС гетеролазеры InGaAsP/InP ($\lambda = 1.3$ мкм) и РО ДГС гетеролазеры AlGaAs/GaAs ($\lambda = 0.85$ мкм) с бинарным GaAs в активной области, выращенные методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (MOCVD). Все гетероструктуры были выращены на подложках с ориентацией [100]. Концентрация доноров в нелегированной активной области и волноводных слоях во всех исследуемых структурах составляла 10^{17} см $^{-3}$. Исследования проводились при комнатной температуре в импульсном возбуждении с длительностью импульса 50 нс и частотой повторения 5 кГц,

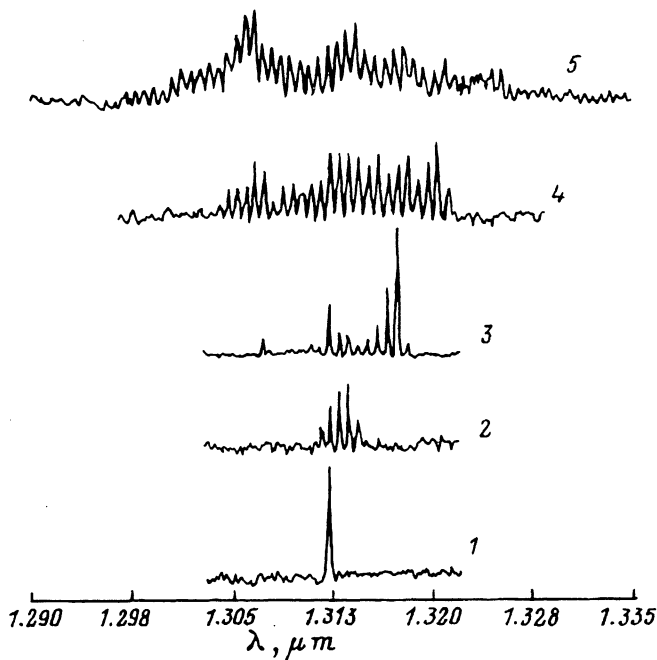


Рис. 2. Типичный спектр генерации одномодового зарощенного лазера InGaAsP/InP при различных плотностях тока накачки J , kA/cm^2 : 1 — 1.2, 2 — 2, 3 — 3, 4 — 7, 5 — 15.

что практически исключало разогрев активной области гетеролазера. Это было проверено путем увеличения длительности импульса. Нагрев начинал сказываться при $\tau > 100$ нс.

На рис. 2 представлено изменение спектра генерации InGaAsP/InP ($\lambda = 1.3$ мкм) РО ДГС полосткового зарощенного одномодового гетеролазера, выращенного модифицированным методом LPE, в зависимости от тока накачки. На пороге генерации спектр гетеролазера состоит из одной продольной моды. По мере увеличения тока накачки происходит расширение спектра как в коротковолновую, так и в длинноволновую сторону. Как правило, наиболее быстрое расширение спектра происходит до плотностей тока равных $10\text{--}15I_{tr}$, когда ширина спектра достигает 20 мэВ ($\Delta\lambda = 280 \text{ \AA}$). С дальнейшим увеличением тока расширение спектра генерации происходит заметно медленнее. Аналогичное поведение спектров генерации от плотности тока накачки (рис. 2) наблюдалось в полостковых зарощенных одномодовых гетеролазерах InGaAsP/GaAs ($\lambda = 0.8$ мкм), выращенных модифицированным методом LPE, и гетеролазерах InGaAsP/InP ($\lambda = 1.3$ мкм), выращенных методом MOCVD. В гетеролазерах AlGaAs/GaAs с GaAs-активной областью расширение спектра генерации с увеличением тока накачки заметно меньше, чем в лазерах с InGaAsP-активной областью (рис. 3).

Существует несколько моделей, объясняющих явление расширения спектра генерации с увеличением тока накачки [10–16]. Наиболее известной является спектральное выжигание носителей [10–12]. Другой причиной, приводящей к расширению спектра генерации, является

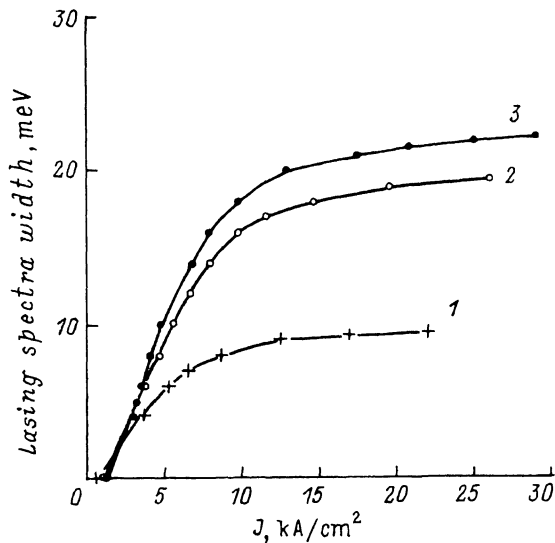


Рис. 3. Зависимость ширины спектра генерации одномодовых зарощенных лазеров от плотности импульсного тока накачки. 1 — гетеролазер AlGaAs/GaAs, 2 — гетеролазер InGaAsP/GaAs, 3 — гетеролазер InGaAsP/InP.

пространственное выжигание носителей по длине резонатора лазерного диода [13,14]. При высоких уровнях накачки в лазерных диодах также наблюдается эффект разогрева инжектированных носителей [17,18], что приводит к расширению спектра излучения и снижению межмодового дефицита усиления, что является также причиной расширения спектра генерации. В [15,16] рассмотрена еще одна модель, объясняющая расширение спектра генерации лазерного диода, возникающего за счет нелинейного межмодового взаимодействия, приводящего к перераспределению энергии между соседними продольными модами. Все эти модели применялись для объяснения наблюдавшегося расширения спектра генерации в лазерах с квазиоднородным уширением спектра излучения. Приведенные далее экспериментальные результаты позволили нам предположить о существовании дополнительной причины, объясняющей аномальное расширение спектра генерации гетеролазеров на основе четверного твердого раствора InGaAsP.

На рис. 3 показана зависимость ширины спектра генерации от плотности импульсного тока накачки исследуемых типов гетеролазеров. Несмотря на то что все лазеры имели одинаковую зарощенную конструкцию и были изготовлены из однотипных лазерных гетероструктур, полученных с помощью технологий MOCVD и LPE, видно, что в лазерах, имеющих четверной твердый раствор InGaAsP в активной области, наблюдается аномальное расширение спектра генерации по сравнению с лазерами, содержащими GaAs в активной области. Подчеркнем, что лазеры с твердым раствором InGaAsP в активной области, излучающие на длине волны, близкой к спектру излучения GaAs, также имели аномальное расширение спектра генерации с увеличением тока накачки (рис. 3). Это дает основание предположить, что в лазерах, содержащих четверной твердый раствор InGaAsP в активной области, должна присутствовать дополнительная причина, обуславливающая аномальное расширение спектра генерации в сравнении с лазерами на основе бинарных соединений в активной области.

В последнее время в литературе появился ряд теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию неустойчивости однородных четверных твердых растворов полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$. В частности, в работах Ипатовой с соавт. [19,20] развита теоретическая модель, показывающая, что спинодальный распад неустойчивых твердых растворов в интервале температур, соответствующих их эпитаксиальному росту, приводит к возникновению устойчивых квазипериодических структур, состоящих из доменов с разным составом твердого раствора. Характерный период доменов составляет 100–500 Å. Этот факт подтверждает данные работ [21–25], где были экспериментально обнаружены модуляции состава (с периодами 50–2000 Å) InGaAsP эпитаксиальных слоев, выращенных методами LPE [21–23], VPE [24], MBE [23] и MOCVD [25]. Можно предположить, что в гетеролазерах, имеющих InGaAsP-активную область, существуют микрофлуктуации состава по площади с характерным размером порядка сотен ангстрем. Это приводит к неоднородному уширению спектра излучения из InGaAsP-активной области лазерной гетероструктуры, что в свою очередь является причиной, приводящей к аномально большому уширению спектра генерации.

Для подтверждения выдвинутого нами предположения были исследованы спектры спонтанной электролюминесценции различных типов гетеролазеров. На рис. 4 представлены зависимости полуширины спектров спонтанной электролюминесценции гетеролазеров с активной областью на основе твердых растворов InGaAsP и GaAs. Исследования проводились при комнатной температуре при импульсном возбуждении ($\tau = 50\text{--}200$ нс). Излучение выводилось из окна в р-контакте лазерного диода, что исключало влияние перепоглощения на форму спектров спонтанной электролюминесценции [1]. При малых уровнях возбуждения (~ 1 А/см²) полуширины спектров спонтанного излучения всех типов гетеролазеров практически одинаковы и составляют 45 мэВ. Такая полуширина спектра спонтанного излучения

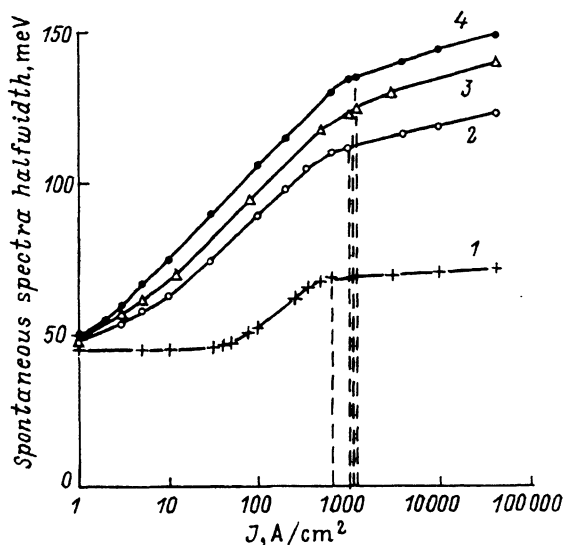


Рис. 4. Зависимость полуширины спектра спонтанного излучения одномодовых зарощенных лазеров от плотности импульсного тока накачки. Пунктир — пороговые плотности тока. 1 — гетеролазер AlGaAs/GaAs ($L = 800$ мкм), 2 — гетеролазер InGaAsP/GaAs ($L = 800$ мкм), 3 — гетеролазер InGaAsP/InP ($L = 800$ мкм), 4 — гетеролазер InGaAsP/InP ($L = 300$ мкм).

хорошо согласуется с величиной $1.8 kT$, указывая на межзонный или квазимерзонный характер излучательных переходов. По мере увеличения тока накачки полуширина спектров спонтанного излучения гетеролазеров с InGaAsP-активной областью непрерывно растет. Полуширина спектра спонтанной электролюминесценции гетеролазеров с бинарной GaAs-активной областью при увеличении тока возбуждения до 50 А/см^2 остается постоянной (рис. 4). Такое расширение спектра спонтанного излучения гетеролазеров InGaAsP свидетельствует о начале вырождения, связанного с наличием квазипериодических неоднородных по составу твердых растворов InGaAsP в активной области. Другими словами, это приводит к тому, что уже при уровнях возбуждения $< 50 \text{ А/см}^2$ квазиуровень Ферми находится в зоне проводимости в некоторых участках по площади активной области, т.е. активная область, имеющая концентрацию неконтролируемых доноров $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$, становится локально вырожденной уже при малых уровнях возбуждения. Это свидетельствует о неоднородном уширении спектра спонтанного излучения даже при низких плотностях тока накачки. Особо отметим, что данный эффект наблюдается в лазерах, полученных как с помощью модифицированного метода жидкостной эпитаксии, так и с помощью технологии MOCVD, сводящей к минимуму возникновение макронеоднородностей в выращенных слоях.

Как видно из рис. 4, полуширина спектра спонтанного излучения на пороге генерации в лазерах с InGaAsP-активной областью составляет 140 мэВ для InGaAsP/InP и 120 мэВ для структур InGaAsP/GaAs. Такой широкий спектр спонтанного излучения означает, что квазиуровень Ферми находится глубоко в зоне проводимости активной области вблизи порога генерации. При тех же условиях гетеролазеры AlGaAs/GaAs имеют меньшую полуширину спонтанного излучения ($\sim 70 \text{ мэВ}$), чем гетеролазеры InGaAsP. Это приводит к тому, что в лазерах одного конструктивного типа с InGaAsP-активной областью наблюдается увеличение пороговой плотности тока по сравнению с лазерами с GaAs-активной областью, объясняя несовпадение экспериментальных данных по гетеролазерам InGaAsP с теоретическими оценками, проведенными с помощью простой модели [26]. Таким образом, полуширина спектра спонтанной электролюминесценции гетеролазеров InGaAsP характеризует степень неоднородного уширения спектра излучения гетеролазеров InGaAsP и определяет ширину спектра генерации этих лазеров. Это наблюдение подтверждает и экспериментальная зависимость полуширины спектра генерации при импульсном токе накачки 10 кА/см^2 от длины резонатора L лазерных диодов InGaAsP/InP. Как видно из рис. 5, лазерные диоды с «малой» длиной резонатора, обладающие большими оптическими потерями и большей пороговой плотностью тока [27], а следовательно, и большей полушириной спонтанного излучения на пороге генерации (рис. 4), имеют более широкий спектр генерации, чем лазеры с «большой» L .

Факт наличия микрообластей с разным составом четверного твердого раствора в активной области, приводящий к неоднородному уширению спектральной линии излучения, подтверждает и наблюдаемый заметный рост полуширины и интенсивности спектра спонтанного излучения в лазерах с четверной InGaAsP-активной областью после порога генерации. Как видно из рис. 4, при увеличении тока накачки до

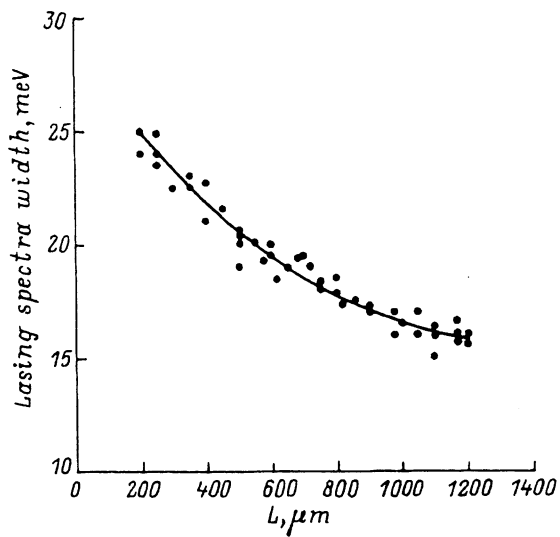


Рис. 5. Зависимость ширины спектра генерации при токе накачки 10 кА/см^2 от длины резонатора одномодовых зарощенных РО ДГС гетеролазеров InGaAsP/InP .

40 кА/см^2 полуширина спонтанного излучения активной области увеличивается на $15\text{--}20 \text{ мэВ}$ по сравнению с пороговым значением. Этот факт свидетельствует о том, что стабилизация уровня Ферми после порога генерации не наступает, и концентрация инжектируемых носителей в активной области продолжает расти. Аналогичное явление наблюдается и в лазерах, содержащих GaAs -активную область лазерной гетероструктуры, но полуширина спонтанного излучения возрастает в таких образцах на $3\text{--}4 \text{ мэВ}$, что объясняется известными причинами, характерными для квазиоднородного уширения спектра излучения [10–18]. Эффект выжигания носителей значительно сильнее сказывается в неоднородно уширенных линиях и поэтому в лазерах с InGaAsP -активной областью он преобладает над эффектом выжигания носителей в полупроводниковых материалах с однородно уширенной линией. Это объясняет аномальное расширение спектра генерации ($\sim 20 \text{ мэВ}$) в лазерах с твердым раствором InGaAsP в активной области, неоднородное уширение в которых обусловлено спиновальным распадом четверных твердых растворов.

Таким образом, в результате проведенных исследований обнаружено и экспериментально подтверждено неоднородное уширение спектра излучения в четверных твердых растворах InGaAsP . Предложено объяснение явления неоднородного уширения спектров излучения за счет спиновального распада четверных твердых растворов InGaAsP . Установлена корреляция неоднородного уширения спектра излучения с аномально широким спектром генерации и отсутствием стабилизации квазиуровня Ферми после наступления порога генерации в лазерах с твердым раствором InGaAsP в активной области.

В заключение авторы благодарят А.Н. Пихтина, В.Б. Халфина за плодотворное обсуждение результатов, И.Э. Беришева, А.Л. Станкевича, Ю.В. Ильина за предоставленные образцы, Н.Д. Ильинскую, Н.Ф. Кадошук за помощь в подготовке образцов, а также Ж.И. Алферова за постоянное внимание к работе.

Список литературы

- [1] Ж.И. Алферов, Д.З. Гарбузов, С.В. Зайцев, А.Б. Нивин, А.В. Овчинников, И.С. Тарасов. ФТП, **21**, 824 (1987).
- [2] Zh.I. Alferov, D.Z. Garbuzov. Proc. XVIII. *Int. Conf. Phys. Semicond.* (Stokholm, 1986), v. 1, p. 203.
- [3] Д.З. Гарбузов, И.Э. Беришев, Ю.В. Ильин, Н.Д. Ильинская, Н.А. Пихтин, А.В. Овчинников, И.С. Тарасов. Письма в ЖТФ, **17**, 17 (1991).
- [4] Д.З. Гарбузов, И.Э. Беришев, Ю.В. Ильин, Н.Д. Ильинская, Н.А. Пихтин, А.В. Овчинников, И.С. Тарасов. ФТП, **25**, 1414 (1991).
- [5] D.Z. Garbuzov, I.E. Berishev, Yu.V. Ilyin, N.D. Ilyinskaya, A.V. Ovchinnikov, N.A. Pikhtin, I.S. Tarasov. *J. Appl. Phys.*, **72**, 319 (1992).
- [6] D.Z. Garbuzov, N.Yu. Antonishkis, S.N. Zhigulin, N.D. Ilyinskaya, A.V. Kochergin,
- [7] Д.З. Гарбузов, С.В. Зайцев, В.И. Колышкин, М.М. Кулагина, И.А. Мокина, А.Б. Нивин, А.В. Овчинников, И.С. Тарасов. Письма в ЖТФ, **14**, 99 (1988).
- [8] Ж.И. Алферов, Д.З. Гарбузов, Н.Ю. Давидюк, С.В. Зайцев, А.Б. Нивин, А.В. Овчинников, Н.А. Стругов, И.С. Тарасов. Письма в ЖТФ, **13**, 552 (1987).
- [9] D.Z. Garbuzov, S.E. Goncharov, Yu.V. Ilyin, A.V. Mikhailov, A.V. Ovchinnikov, N.A. Pikhtin, I.S. Tarasov. *SPIE's Symposium on High Power Lasers* (20-25 January, 1991, OE/LASE, Los-Angeles USA, California, 1991).
- [10] Y. Nishimura, Y. Nishimura. *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-9**, 1011 (1973).
- [11] B. Zee. *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-14**, 727 (1978).
- [12] M. Asada, Y. Suematsu. *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-21**, 434 (1985).
- [13] J. Manning, R. Olshansky, D.M. Fye, W. Powazinik. *Proc. 9th Int. Semicond. Laser Conf* (Rio de Janeiro, Brazil, 1984) p. 150.
- [14] J. Manning, R. Olshansky, D.M. Fye, W. Powazinik. *Electron. Lett.*, **21**, 496 (1985).
- [15] A.P. Bogatov, P.G. Eliseev, B.N. Sverdlov. *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-11**, 510 (1975).
- [16] H. Ishikawa, M. Yano, M. Takusagawa. *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 553 (1982).
- [17] T. Honc, J. Zavadil. *J. Appl. Phys.*, **73**, 7978 (1993).
- [18] M.P. Kesler, C.S. Harder, E.E. Latta. *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 2775 (1991).
- [19] I.P. Ipatova, V.G. Malyshkin, V.A. Shchukin. *J. Appl. Phys.*, **74**, 7198 (1993).
- [20] В.Г. Малышкин, В.А. Шукин. ФТП, **27**, 1931 (1994).
- [21] P. Henoc, A. Izrael, M. Quilicq, H. Launois. *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 963 (1982).
- [22] S. Mahajan, B.V. Dutt, H. Temkin, R.J. Cava, W.A. Bonner. *J. Cryst. Growth*, **68**, 589 (1984).
- [23] T.L. McDevitt, S. Mahajan, D.E. Laughlin, W.A. Bonner, V.G. Keramidas. *Phys. Rev. B*, **45**, 6614 (1992).
- [24] S.N.G. Chu, S. Nakahara, K.E. Sturge, W.D. Johnston. *J. Appl. Phys.*, **57**, 4610 (1985).
- [25] O. Ueda, M. Takechi, J. Komeno. *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 2312 (1989).
- [26] Д.З. Гарбузов, В.П. Евтихийев, С.Ю. Карпов, З.Н. Соколова, В.Б. Халфин. ФТП, **19**, 449 (1985).
- [27] Д.З. Гарбузов, А.В. Овчинников, Н.А. Пихтин, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов, В.Б. Халфин. ФТП, **25**, 928 (1991).

Редактор В.В. Чалдышев