Полупроводниковый дисковый лазер с длиной волны излучения 780 нм на гетероструктуре $Al_xGa_{1-x}As/Al_yGa_{1-y}As$, выращенной методом MOCVD, с оптической накачкой и накачкой электронным пучком

М.Р.Бутаев, Я.К.Скасырский, В.И.Козловский, А.Ю.Андреев, И.В.Яроцкая, А.А.Мармалюк

Исследован импульсный полупроводниковый дисковый лазер на структуре $Al_xGa_{1-x}As/Al_yGa_{1-y}As$ с резонансно-периодическим усилением и встроенным брэгговским зеркалом, излучающий на длине волны вблизи 780 нм. Приведены характеристики лазера как при накачке электронным пучком, так и при оптической накачке излучением лазерного диода с длиной волны 450 нм. В случае накачки электронным пучком достигнута пиковая мощность 4.4 Вт при дифференциальном КПД свыше 10%, тогда как при оптической накачке мощность составила 0.2 Вт при дифференциальном КПД 2.2% и примерно одинаковых параметрах резонатора. Обсуждаются возможные причины более низких мощностей и КПД при оптической накачке.

Ключевые слова: *полупроводниковый дисковый лазер, структура $Al_xGa_{1-x}As/Al_yGa_{1-y}As$, квантовая яма, электронный пучок, оптическая накачка, MOCVD.*

1. Введение

Мощные, перестраиваемые по длинам волн лазерные источники с узкими линиями излучения широко используются в ряде научных и промышленных областей. В частности они необходимы для разработки квантовых технологий на основе холодных атомов с переходами на оптических частотах. Этим требованиям вполне соответствуют полупроводниковые дисковые лазеры (ПДЛ) с оптической накачкой [1]. Так, недавно был продемонстрирован лазер с длиной волны вблизи 689 нм и шириной линии 125 Гц для охлаждения атомов Sr [2]. В этой же работе говорится и о преимуществах ПДЛ перед другими лазерами, используемыми для этих целей, в том числе перед малогабаритными лазерными диодами с внешним резонатором, что обусловлено относительно малым уровнем спонтанного шума и отсутствием релаксационных колебаний в ПДЛ.

В настоящей работе рассматривается возможность создания ПДЛ с длиной волны излучения вблизи 780 нм. Лазер этого диапазона необходим для охлаждения атомов Rb. В работе [3] уже продемонстрирован ПДЛ с данной длиной волны. Была использована относительная новая схема ПДЛ мембранного типа, с активной гетероструктурой (выращивалась методом молекулярно-пучковой эпитаксии) с несколькими квантовыми ямами (КЯ) без встроенного брэгговского зеркала. Технология отделения гетероструктуры от ростовой подложки и помещения ее между двумя хладопроводящими пластинами SiC была достаточно сложной. При этом резонатор формировался двумя внешними зеркалами. Накачка осуществлялась довольно дорогостоящим лазером типа Coherent Verdi-V18 с длиной волны 532 нм, основанным на внутрирезонаторной генерации второй гармоники ПДЛ с оптической накачкой.

Цель настоящей работы заключалась в разработке и выращивании гетероструктуры методом химического газофазного осаждения из металлоорганических соединений (metalorganic chemical vapour deposition (MOCVD)) со встроенным брэгговским зеркалом на длину волны 780 нм и в одновременном сравнении характеристик ПДЛ с оптической накачкой излучением лазерного диода и ПДЛ с накачкой электронным пучком. Актуальность накачки электронным пучком возрастает по мере развития ПДЛ на основе широкозонных гетероструктур, для которых практически нет доступных эффективных источников накачки.

2. Эксперимент

Гетероструктура была выращена методом осаждения из газовой фазы металлоорганических соединений и содержала последовательно нарощенные на подложку GaAs *n*-типа встроенное брэгговское зеркало из 30 пар $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$, 10 КЯ $Al_{0.139}Ga_{0.861}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ толщиной 12 нм с периодом расположения, соответствующим половине длины волны ($\lambda_0/2N(\lambda_0)$, где $\lambda_0 = 780$ нм и $N = 3.47$ – средний показатель преломления, и барьерный для диффузии носителей к поверхности слой $Al_{0.55}Ga_{0.45}As$. Спектры фотолюминесценции и отражения полученной

М.Р.Бутаев, В.И. Козловский. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31;
email: vikoz@sci.lebedev.ru
Я.К.Скасырский. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53
А.Ю.Андреев, И.В.Яроцкая, А.А.Мармалюк. АО «НИИ “Полюс” им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1

Поступила в редакцию 23 декабря 2021 г.

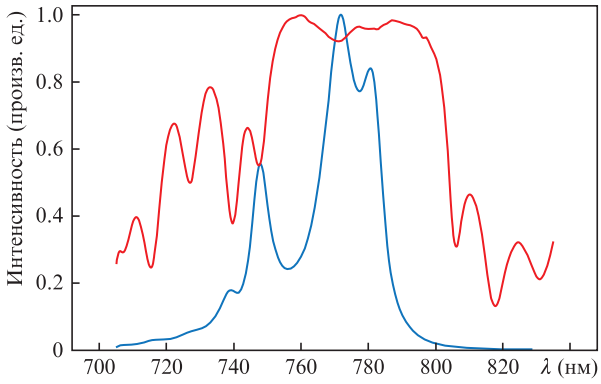


Рис.1. Спектры фотолюминесценции (синяя кривая) и отражения (красная кривая) структуры.

структуры представлены на рис.1. Мы считаем, что два интенсивных пика в спектре люминесценции с максимумами на λ = 772 и 748 нм обусловлены радиационной рекомбинацией электронов и дырок из основных и первых возбужденных уровней в КЯ соответственно. Небольшие пики на λ = 739 и 780 нм можно отнести к модам малодобротного резонатора, образованного брэгговским зеркалом и поверхностью структуры.

Схема лазера представлена на рис.2. Принципиально она одинакова для случаев оптической накачки и накачки электронным пучком. Структура закрепляется на медном хладопроводе с температурой примерно 20 °C и накачивается электронным пучком сбоку под углом 30°, при оптической накачке – под углом 60°. Резонатор формировался встроенным брэгговским зеркалом и внешним вогнутым сферическим зеркалом с радиусом кривизны 30 мм. Коэффициент отражения внешнего зеркала на длине волны 780 нм составлял 98 %. Длина резонатора была равна 27 мм при накачке электронным пучком и 29 мм – при оптической накачке. Схема вывода излучения из вакуумной камеры в случае накачки электронным пучком более подробно описана в [4].

При накачке электронным пучком максимальная мощность достигалась при использовании электронов с энергией 30 кэВ и пятна возбуждения с диаметром примерно равным поперечному размеру основной моды резонатора $2w_0$ = 65 мкм. Юстировка лазера осуществлялась следующим образом. Электронный пучок сканировался импульсно с частотой 50 Гц вдоль строки, которая затем медленно перемещалась в перпендикулярном направлении до пересечения с модой резонатора. Длительность накачки определялась скоростью сканирования и равнялась примерно 100 нс.

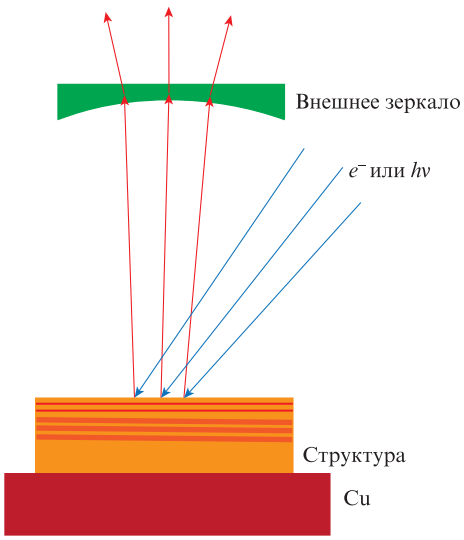


Рис.2. Схема полупроводникового дискового лазера.

Оптическая накачка осуществлялась коммерческим лазерным диодом на основе гетероструктуры InGaN/GaN со встроенной системой фокусировки. С помощью этой системы излучение ЛД фокусировалось в пятно с размерами 70 × 70 мкм. Для запуска ЛД в импульсном режиме использовался самодельный драйвер, который формировал импульс длительностью ~200 нс. Длина волны излучения ЛД в импульсном режиме была равна 450 нм. Характеристики лазера с оптической накачкой измерялись при частоте следования импульсов 250 Гц, с ее увеличением до 3 кГц существенного изменения пиковой мощности не наблюдалось. Пиковые мощности лазера накачки и ПДЛ измерялись калиброванными фотоэлементами коаксиальными ФЭК-29 и ФЭК-22.

3. Результаты экспериментов

3.1. Накачка электронным пучком

Зависимость пиковой мощности излучения лазера от тока электронного пучка представлена на рис.3.

При токе электронного пучка 1.2 мА максимальная выходная мощность составила 4.4 Вт, дифференциальный коэффициент полезного действия лазера был равен 12 %, пороговый ток генерации – 0.1 мА, что при диаметре пятна на структуре 65 мкм соответствует пороговой плотности тока электронного пучка 3 А/см^2 или интенсивности пучка 90 кВт/см^2. Порог генерации по вложенной в активную область структуры мощности накачки заметно меньше, поскольку примерно 25 % энергии электронного пучка не вкладывается в структуру, а уносится отраженными и вторичными электронами, и примерно столько же энергии остается в электронах, которые пролетели активную область структуры, не полностью отдав ей свою энергию.

На рис.4 представлена характерная осциллограмма импульса генерации ПДЛ с длительностью импульса 100 нс по основанию. Длительность и форма импульса зависят от скорости сканирования, диаметра пятна электронного

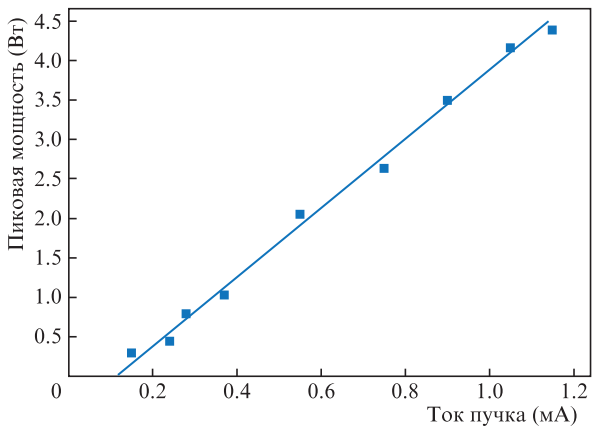


Рис.3. Зависимость импульсной мощности излучения лазера от тока электронного пучка.

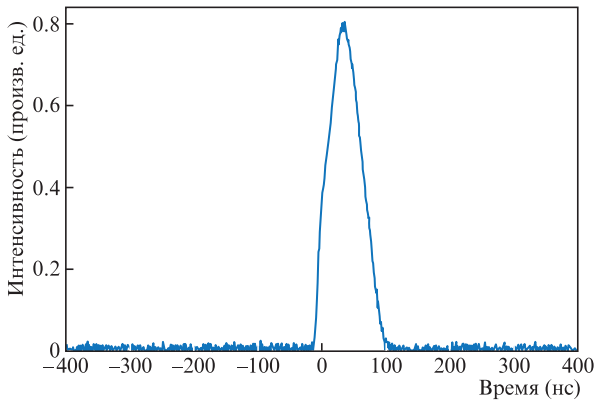


Рис.4. Осциллограмма импульса генерации ПДЛ при токе электронного пучка 1 мА.

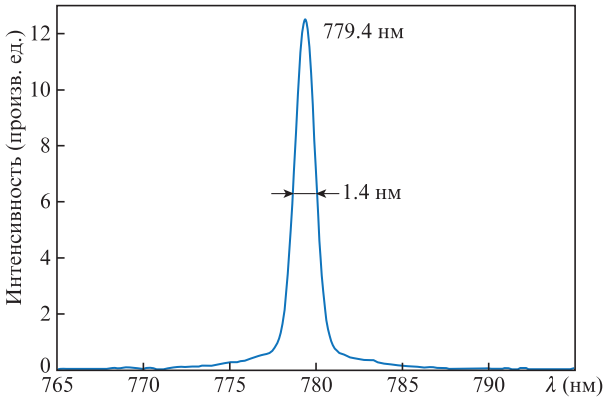


Рис.5. Спектр генерации ПДЛ при токе электронного пучка 1 мА.

Рис.6. Картины поля излучения в дальней зоне при различных юстировках лазера.

пучка и степени совмещения строки сканирования с положением основной моды. С уменьшением скорости сканирования длительность импульса можно увеличить, но при этом пиковая мощность лазера падает.

Спектр генерации ПДЛ представлен на рис.5. Наблюдается одна линия с максимумом при λ = 779.4 нм и шириной на полувысоте 1.4 нм.

Картина дальней зоны излучения сильно зависит от юстировки лазера. На рис.6 представлены примеры распределения поля излучения в дальней зоне. Вблизи порога полный угол расходимости равен ~10 мрад. Следует также отметить, что подложка внешнего зеркала представляет собой рассеивающую линзу, которая увеличивает расходимость излучения, выходящего из близкого к полуконцентрическому резонатора, почти в 1.5 раза.

3.2. Оптическая накачка

Осциллограммы импульсов генерации ПДЛ и излучения ЛД накачки представлены на рис.7. Сложная форма

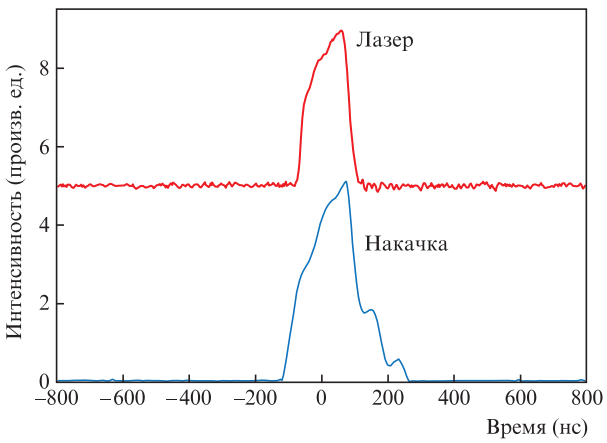


Рис.7. Осциллограммы импульсов генерации ПДЛ и излучения ЛД накачки.

импульса излучения ЛД обусловлена несовершенством использованного драйвера. Ширина импульса генерации на полувысоте была 140 нс.

На рис.8. представлена зависимость пиковой мощности генерации от пиковой мощности излучения накачки, поглощенного структурой (мощность ЛД за вычетом мощности, отраженной от поверхности структуры).

При вложенной мощности накачки 11.5 Вт мощность лазера составила ~0.2 Вт. Порог генерации оценивается в 2.6 Вт (68 кВт/см^2), дифференциальный КПД равен 2.2%. Достигнутые значения мощности и КПД лазера

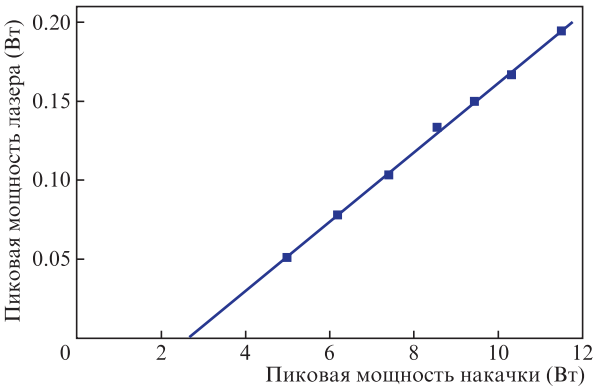


Рис.8. Зависимость пиковой мощности ПДЛ от пиковой мощности излучения накачки, поглощенного структурой.

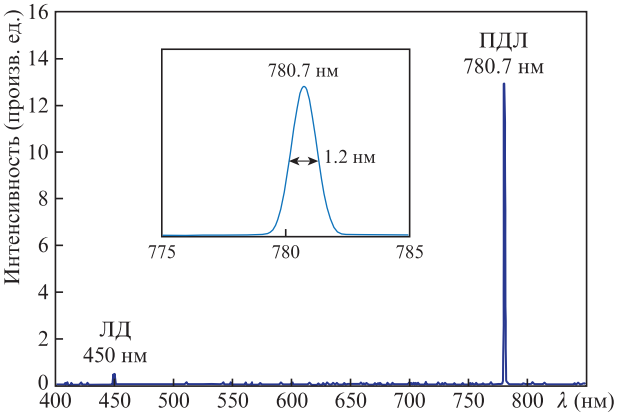


Рис.9. Спектр генерации ПДЛ при оптической накачке.

Рис.10. Картина дальнего поля излучения ПДЛ при оптической накачке.

значительно уступают полученным при накачке электронным пучком, хотя предельный КПД лазера с накачкой электронным пучком имеет физическое ограничение ~30% [5].

На рис.9 представлен спектр генерации ПДЛ при оптической накачке. Максимум линии генерации соответствует $\lambda = 780.7$ нм, а ширина линии на полувысоте составляет 1.2 нм. Эти значения близки к полученным при накачке электронным пучком.

На рис.10 представлена картина дальнего поля излучения ПДЛ при оптической накачке. Расходимость излучения при небольшом превышении порога несколько больше, чем на рис.6, поскольку длина резонатора при оптической накачке ближе к радиусу кривизны внешнего зеркала, что приводит к уменьшению диаметра основной моды.

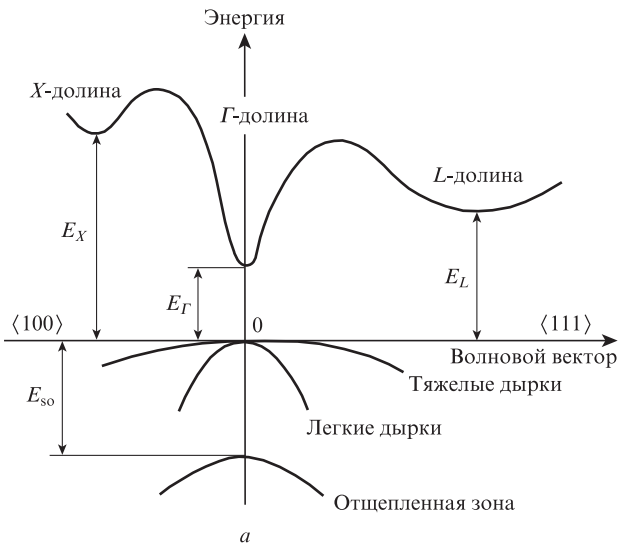
4. Обсуждение результатов

Неожиданным результатом данной работы является низкий КПД лазера при оптической накачке. Мы предполагаем, что это связано с зонной энергетической структурой барьерных слоев $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$, в которых в основном генерируются накачкой неравновесные носители заряда. К сожалению, нам не удалось найти в литературе энергетическую зонную диаграмму $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$. На рис.11,*а* схематично представлена зонная диаграмма $Al_xGa_{1-x}As$ при $x < 0.4$, когда твердый раствор остается еще прямозонным [6]. В зоне проводимости образуются три долины: Γ, X и L. Соответствующие энергетические зазоры от минимумов этих долин до потолка валентной зоны E_Γ, E_X и E_L изменяются с изменением состава твердого раствора в соответствии с рис.11,*б* [7].

Из рис.11 видно, что при поглощении излучения с $\lambda = 450$ нм (2.75 эВ) возможны прямые переходы с образованием электронов не только в Γ-долине, но и в X- и L- долинах. Более того, коэффициент поглощения для переходов в X- и L- долины значительно выше, поскольку плотность состояний в валентной зоне существенно возрастает при увеличении волнового вектора.

Далее, если $x < 0.4$, неравновесные носители из боковых долин достаточно быстро перейдут в глубокую Γ-долину из-за интенсивного электрон-фононного рассеяния [8]. Но даже если $x > 0.45$, неравновесные электроны из боковых долин, сваливаясь в слой $Al_{0.139}Ga_{0.861}As$ квантовой ямы с малым содержанием x, переходят в Γ-долину КЯ [8]. Поэтому даже в случае использования непрямозонного барьерного слоя $Al_{0.58}G_{0.42}As$ в работе [3] достигается достаточно высокая эффективность генерации.

Тем не менее наличие прямых переходов фотовозбуждения неравновесных электронов в боковые долины может привести к ухудшению характеристик лазера вследствие большого коэффициента поглощения. По данным работы [9] коэффициент поглощения для $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ достигает 1.5×10^5 см$^{-1}$ на длине волны накачки 450 нм. Столь высокий коэффициент поглощения приводит к тому, что большая часть энергии накачки поглощается уже в первом барьерном слое, и большинство КЯ остаются слабо накаченными, что и приводит к ухудшению характеристик генерации. Для сравнения, коэффициент поглощения излучения с длиной волны 532 нм в барьерных слоях $Al_{0.58}G_{0.42}As$, использованных в работе [3], оценивается в 3×10^4 см$^{-1}$ [9]. При этом суммарная толщина барьерных слоев в работе [3] была равна примерно 300 нм, что



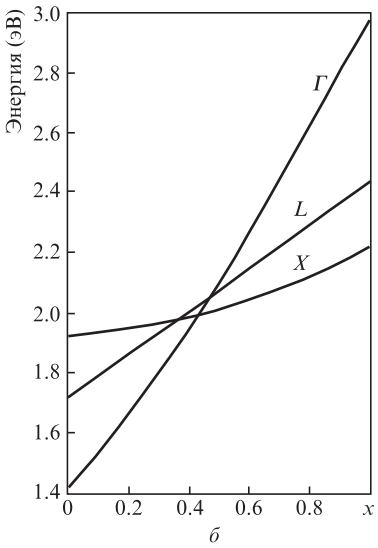


Рис.11. Схематическое изображение энергетической зонной структуры $Al_xGa_{1-x}As$ при $x < 0.4$ [6] (*а*) и зависимости энергетических зазоров E_Γ, E_L и E_X от состава твердого раствора [7] (*б*).

позволяло авторам однородно и эффективно накачать квантовые ямы.

5. Заключение

В настоящей работе реализован импульсный полупроводниковый дисковый лазер на гетероструктуре $Al_xGa_{1-x}As/Al_yGa_{1-y}As$ со встроенным брэгговским зеркалом, излучающий на длине волны вблизи 780 нм. Структура получена методом MOCVD. При накачке электронным пучком достигнута пиковая мощность 4.4 Вт при дифференциальном КПД свыше 10%, тогда как при оптической накачке излучением ЛД с длиной волны 450 нм мощность составила 0.2 Вт при дифференциальном КПД 2.2%. Меньшие значения мощности и КПД при оптической накачке мы объясняем неоднородным возбуждением квантовых ям по глубине структуры из-за большого коэффициента поглощения излучения накачки барьерными слоями. Дальнейшее увеличение энергетических характеристик лазера возможно при увеличении длины волны излучения накачки вплоть до 650 нм и оптимизации параметров структуры.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-32-90022).

1. Guina M., Rantamäki A., Härkönen A. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **50**, 383001 (2017).
2. Moriya P.H., Singh Y., Bongs K., Hastie J.E. *Opt. Express*, **28** (11), 15943 (2020).
3. Kahle H., Penttinen J.-P., Phung H.-M., Rajala P., Tukiainen A., Ranta S., Guina M. *Opt. Lett.*, **44** (5), 1146 (2019).
4. Андреев А.Ю., Багаев Т.А., Бутаев М.Р., Гамов Н.А., Жданова Е.В., Зверев М.М., Козловский В.И., Скасырский Я.К., Яроцкая И.В. *Квантовая электроника*, **49** (10), 909 (2019) [*Quantum Electron.*, **49** (10), 909 (2019)].
5. Попов Ю.М. *Труды ФИАН*, **31**, 3 (1965).
6. Goldberg Yu.A. *Handbook Series on Semiconductor Parameters*. M. Levinshtein, S. Rumyantsev, M. Shur (Eds) (London: World Scientific, 1999, Vol. 2, pp. 1–36).
7. Saxena A.K. *J. Phys. C*, **13** (23), 4323 (1980).
8. Feldmann J., Sattmann R., Peter G., Gobel E.O., Nunnenkamp J., Kuhl J., Hebling J., Ploog K., Cingolani R., Muralidharan R., Dawson P., Foxon C.T. *Surface Sci.*, **229**, 452 (1990).
9. Aspnes D.E., Kelso S.M., Logan R.A., Bhat R. *J. Appl. Phys.*, **60**, 754 (1986).