

Сдвиги частоты стабилизированного лазера из-за отражения излучения от внерезонаторных оптических элементов

А.К.Дмитриев, А.С.Дычков, А.А.Луговой

Приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния отраженного от внешнего оптического элемента излучения на работу стабилизированного лазера с внутрирезонаторной поглощающей ячейкой с учетом нелинейного затягивания частоты к центру линии поглощения.

Ключевые слова: стабилизация частоты, внутрирезонаторная поглощающая ячейка, узкие резонансы.

1. Введение

При стабилизации частоты лазеров по узким оптическим резонансам одним из факторов, ограничивающих стабильность частоты, является отражение (рассеяние) излучения от внешних оптических элементов в резонатор лазера. Как правило, таким элементом является фотодетектор, фоточувствительная площадка которого устанавливается под углом к оси лазера, близким к нормальному. Вопросам влияния дополнительного зеркала на параметры излучения лазера было посвящено много работ (см., напр., [1]). Теория сдвигов частоты лазеров, стабилизированных по резонансам поглощения и дисперсии в присутствии дополнительного зеркала, приведена в работе [2]. Результаты расчетов находились в согласии с модельными экспериментами, проведенными при использовании двухмодового He-Ne/CH₄-лазера.

В настоящей работе выполнены детальные исследования влияния отраженного от внешнего оптического элемента излучения на стабильность частоты лазера, стабилизированного по первой гармонике мощности излучения с учетом нелинейного затягивания частоты к центру линии поглощения. Предложена упрощенная модель, позволяющая объяснить полученные экспериментальные результаты.

2. Интенсивность и частота излучения лазера с дополнительным зеркалом

Эквивалентная оптическая схема лазера с дополнительным («паразитным») отражающим зеркалом показана на рис.1. Для однородного уширения линии усиления и однородного по сечению светового пучка выражение для так называемой приведенной мощности излучения лазера со стороны зеркала 2 имеет вид [3]

$$\kappa = \frac{[g_0 l_g + \ln(R_1 R_2')^{1/2}] T_2 (R_1)^{1/2}}{[R_1^{1/2} + (R_2')^{1/2}] [1 - (R_1 R_2')^{1/2}]} \quad (1)$$

А.К.Дмитриев, А.С.Дычков, А.А.Луговой. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: dak@laser.nsc.ru

Поступила в редакцию 21 июня 2004 г., после доработки – 18 января 2005 г.

Здесь l_g – длина усиливающей среды; R_{1-3} – коэффициенты отражения зеркал 1–3; R_2' – эффективный коэффициент отражения зеркала 2, зависящий от R_3 и расстояния между зеркалами 2 и 3; T_2 – пропускание зеркала 2; g_0 – коэффициент ненасыщенного усиления. При слабом отражении излучения от зеркала 3, когда $T_2 R_3^{1/2} \ll R_2'^{1/2}$, можно учитывать только первое отражение от зеркала 3, пренебрегая многократным прохождением светового луча между зеркалами 2 и 3. При выполнении этого условия имеем

$$R_2' = R_2(1 + \theta)^2, \quad (2)$$

где

$$\theta = T_2 \left(\frac{R_3}{R_2} \right)^{1/2} \cos \varphi; \quad \varphi = \frac{4\pi L\nu}{c} \quad (3)$$

– разность фаз между световыми волнами, отраженными в резонатор лазера от зеркал 2 и 3; L – длина внешнего резонатора; ν – частота излучения лазера.

Выражение (1) при подстановке в него соотношения (2) преобразуется к виду

$$\kappa = \kappa_0 \times \quad (4)$$

$$\frac{1 + \theta [g_0 l_g + \ln(R_1 R_2)^{1/2}]^{-1}}{[1 + \theta R_2^{1/2} (R_1^{1/2} + R_2^{1/2})^{-1}] \{1 - \theta (R_1 R_2)^{1/2} [1 - (R_1 R_2)^{1/2}]^{-1}\}}.$$

Здесь κ_0 – приведенная мощность излучения лазера со стороны зеркала 2 в отсутствие зеркала 3. Величина κ_0

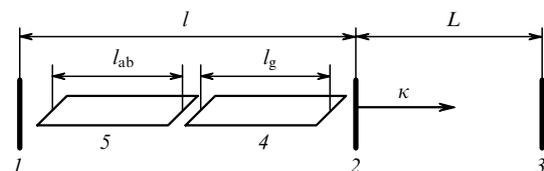


Рис.1. Эквивалентная оптическая схема лазера с «паразитным» зеркалом:

1 – глухое зеркало; 2 – выходное зеркало; 3 – дополнительное («паразитное») зеркало; 4 – усиливающая среда; 5 – поглощающая среда.

определяется выражением (1), где коэффициент отражения R_2' заменяется на R_2 . В случае слабой зависимости мощности генерации от наличия или отсутствия зеркала 3, когда $\theta \ll [1 - (R_1 R_2)^{1/2}]$, выражение (4) приобретает вид

$$\kappa = \kappa_0(1 + A \cos \varphi), \tag{5}$$

где

$$A = \left\{ \frac{1}{g_0 l_g + \ln(R_1 R_2)^{1/2}} + \frac{(R_1 R_2)^{1/2}}{1 - (R_1 R_2)^{1/2}} - \frac{R_2^{1/2}}{R_1^{1/2} + R_2^{1/2}} \right\} \times \left(\frac{R_3}{R_2} \right)^{1/2} T_2.$$

Видно, что в рассматриваемом приближении зависимость мощности от разности фаз φ имеет косинусоидальный характер, а амплитуда A пропорциональна $R_3^{1/2}$. Заметим, что при приближении к порогу генерации амплитуда модуляции мощности A возрастает.

С другой стороны, изменение фазы отраженного сигнала можно интерпретировать как изменение длины резонатора l , что приводит к сдвигу частоты излучения лазера $\Delta\nu_0$, причем фаза колебаний частоты смещена на $\pi/2$ относительно фазы флуктуации мощности:

$$\Delta\nu_0 = - \left(\frac{R_3}{R_2} \right)^{1/2} T_2 \frac{c}{2l} \sin \varphi. \tag{6}$$

Однако следует отметить, что в режиме стабилизации лазера этот сдвиг будет компенсироваться точно так же, как и изменение длины резонатора лазера, например за счет дрейфа температуры.

3. Стабилизация частоты лазера по первой гармонике мощности излучения

Стабилизация частоты лазера с нелинейно-поглощающей ячейкой сопровождается, как правило, модуляцией частоты излучения синусоидальным пробным сигналом. При малых по сравнению с полушириной резонанса Γ частоте модуляции Ω и девиации частоты $\delta\nu$ ($\delta\nu, \Omega \ll \Gamma$) сигнал ошибки $\Delta\kappa_s$ на частоте пробного сигнала для лоренцевской формы нелинейного оптического резонанса с амплитудой B вблизи центра линии поглощения ($\Delta \ll \Gamma$) в отсутствие зеркала 3 линейно зависит от смещения частоты лазера Δ относительно центра линии поглощения:

$$\Delta\kappa_s = -2B \frac{\Delta}{\Gamma^2} \delta\nu \cos \Omega t. \tag{7}$$

Обратная связь «принуждает» смещаться частоту лазера в сторону нулевого сигнала, так что среднее значение этой частоты совпадает с частотой центра линии поглощения.

При наличии зеркала 3 наряду с сигналом ошибки на частоте модуляции будет возникать «паразитная» модуляция, знак и величина которой зависят от разности фаз φ и девиации фазы. Разность фаз φ при изменении L на половину длины волны излучения изменяется на 2π .

При слабой модуляции фазы ($\Delta\varphi \ll 2\pi$) выражение для переменной составляющей мощности излучения ла-

зера, связанной с наличием отражения от зеркала 3, имеет вид

$$\Delta\kappa = -\Delta\varphi A \sin \varphi. \tag{8}$$

Из выражения (3) следует, что изменение фазы

$$\Delta\varphi = \varphi \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta\nu}{\nu} \right), \tag{9}$$

где ΔL и $\Delta\nu$ – отклонения длины внешнего резонатора L и частоты излучения лазера ν от их начальных значений.

Если модуляция частоты осуществляется зеркалом 1, то модуляция расстояния между зеркалами 2 и 3 отсутствует, т. е. $\Delta L = 0$, и изменение фазы

$$\Delta\varphi_1 = \varphi \frac{\delta\nu \cos \Omega t}{\nu}. \tag{10}$$

Подставляя (10) в (8), получаем величину «паразитной» амплитудной модуляции на частоте пробного сигнала Ω

$$\Delta\kappa_1 = -A \sin \varphi \frac{\varphi \delta\nu}{\nu} \cos \Omega t. \tag{11}$$

При синхронном детектировании, которое используется для получения управляющего сигнала, «паразитный» сигнал складывается с сигналом ошибки. Суммарный сигнал на частоте модуляции

$$S_1 = - \left(2B \frac{\Delta_1}{\Gamma^2} + A \frac{\varphi}{\nu} \sin \varphi \right) \delta\nu \cos \Omega t. \tag{12}$$

Поскольку система регулирования стремится установить частоту излучения лазера такой, чтобы амплитуда сигнала ошибки стремилась к нулю, выражение для смещения частоты лазера Δ_1 относительно центра линии поглощения с учетом выражения (3) будет иметь вид

$$\Delta_1 = - \frac{2\pi A \Gamma^2 L}{Bc} \sin \varphi. \tag{13}$$

Следует отметить, что в реальных схемах стабилизации частоты произведение AL мало изменяется при изменении L , поскольку с увеличением расстояния между выходным зеркалом 2 и рассеивающей поверхностью (зеркалом 3) уменьшается эффективный коэффициент отражения R_3 , а вместе с ним и амплитуда модуляции мощности A .

Модуляция частоты лазера зеркалом 2 приводит одновременно и к модуляции длины между зеркалами 2 и 3. В отсутствие затягивания частоты к центру линии поглощения выполняется соотношение $\Delta\nu/\nu = -\Delta l/l$, причем $\Delta l = -\Delta L$. Отсюда получаем $\Delta L = l\Delta\nu/\nu$ и, исходя из (9), имеем

$$\Delta\varphi_2 = \varphi \frac{\delta\nu}{\nu} \left(1 + \frac{l}{L} \right) \cos \Omega t. \tag{14}$$

Подставляя соотношение (14) в (8), получаем

$$\Delta\kappa_2 = -A \sin \varphi \frac{\varphi \delta\nu}{\nu} \left(1 + \frac{l}{L} \right) \cos \Omega t. \tag{15}$$

В этом случае суммарный сигнал

$$S_2 = - \left[2B \frac{A_2}{F} + A \frac{\varphi}{v} \sin \varphi \left(1 + \frac{l}{L} \right) \right] \delta v \cos \Omega t. \quad (16)$$

Повторяя процедуры, используемые для нахождения соотношения (13), при модуляции частоты зеркалом 2 для сдвига частоты A_2 получим выражение

$$A_2 = - \frac{2\pi A \Gamma^2 L}{Bc} \left(1 + \frac{l}{L} \right) \sin \varphi. \quad (17)$$

Сравнивая выражения (13) и (17), можно сделать вывод, что из-за наличия отражения от зеркала 3 амплитуда флуктуации частоты лазера при модуляции частоты излучения зеркалом 1 в $1 + l/L$ раз меньше, чем при модуляции зеркалом 2. Этот эффект тем больше, чем ближе рассеивающий (отражающий) объект к выходному зеркалу.

При учете затягивания частоты лазера ситуация становится несколько более сложной. В этом случае $q\Delta v/v = -\Delta l/l$, где q – коэффициент нелинейного затягивания частоты к центру линии поглощения [4], и выражение (14) с учетом затягивания преобразуется к виду

$$\Delta \varphi'_2 = \varphi \frac{\delta v}{v} \left(1 + \frac{lq}{L} \right) \cos \Omega t. \quad (18)$$

Подстановка соотношения (18) в (8) дает

$$\Delta \kappa'_2 = -A \sin \varphi \frac{\varphi \delta v}{v} \left(1 + \frac{lq}{L} \right) \cos \Omega t. \quad (19)$$

Выражение для флуктуаций частоты стабилизированного лазера при модуляции частоты выходным зеркалом 2 с учетом затягивания частоты будет выглядеть следующим образом:

$$A'_2 = - \frac{2\pi A \Gamma^2 L}{Bc} \left(1 + \frac{lq}{L} \right) \sin \varphi. \quad (20)$$

Видно, что из-за наличия отражения от зеркала 3 амплитуда флуктуации частоты лазера при модуляции зеркалом 1 уменьшается в $1 + lq/L$ раз по сравнению с амплитудой флуктуации при модуляции зеркалом 2.

4. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на установке, схема которой приведена на рис.2. Исследуемый лазер 3 с длиной волны $\lambda = 3.39$ мкм состоял из усилительной He–Ne-трубки и внутренней метановой поглощающей ячейки. Стабилизация частоты этого лазера осуществлялась с помощью блока автоподстройки частоты (АПЧ) 14 по максимуму резонанса насыщенного поглощения на линии метана $F_2^{(2)}P(7)v_3$. С выхода фотодетектора 13 сигнал ошибки на частоте 15 кГц поступал на вход синхронного детектора (на схеме не показан) системы АПЧ. Длина резонатора лазера 1 была равна 150 см, а длина внешнего резонатора L составляла 60 см. В качестве дополнительного «паразитного» зеркала использовалась стеклянная пластинка 9, имеющая небольшой клин для предотвращения одновременного попадания в резонатор двух пучков, отразившихся от передней и задней плоскостей пластинки.

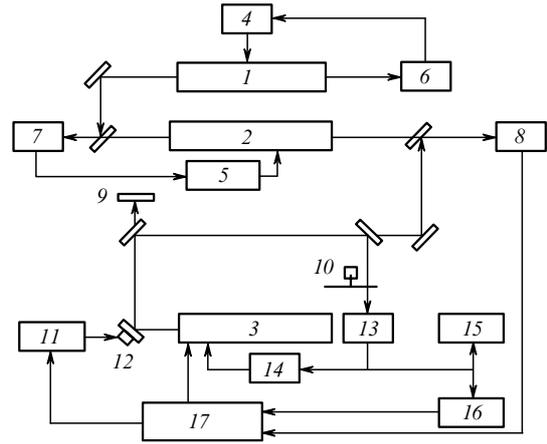


Рис.2. Схема экспериментальной установки:

1 – стабилизированный по частоте лазер; 2 – вспомогательный лазер-гетеродин; 3 – исследуемый лазер; 4, 14 – блоки автоподстройки частоты; 5 – блок частотно-фазовой автоподстройки; 6–8, 13 – фотодетекторы; 9 – стеклянная пластинка (дополнительное зеркало); 10 – механический прерыватель светового пучка; 11 – блок управления пьезоэлементом; 12 – поворотное зеркало на пьезоэлементе; 15 – осциллограф; 16 – селективный нановольтметр; 17 – измерительно-вычислительный комплекс.

Для измерения сдвигов частоты применялась стандартная схема. Частота излучения исследуемого лазера 3 определялась относительно частоты гетеродинного лазера 2. Система частотно-фазовой автоподстройки 5 позволяла привязать частоту гетеродинного лазера с отстройкой 1 МГц к частоте стабильного лазера 1. Сигнал биений между гетеродинным лазером 2 и стабилизированным лазером 1 выделялся фотодетектором 7. Частота лазера 1 стабилизировалась по резонансу насыщенного поглощения $F_2^{(2)}P(7)v_3$ -линии метана с использованием блока АПЧ 4. Сигнал ошибки на первой гармонике мощности излучения лазера выделялся фотодетектором 6.

Длина внешнего резонатора изменялась с помощью пьезоэлемента, на котором было закреплено поворотное зеркало 12. Выходное излучение лазера поступало на InSb-фотодетектор 13, охлаждаемый жидким азотом. При записи резонанса и модуляции мощности из-за влияния дополнительного зеркала 3 пучок излучения исследуемого лазера модулировался механическим прерывателем 10 на частоте ~ 150 Гц, на которую был настроен селективный нановольтметр 16. Оперативный контроль осуществлялся осциллографом 15. Запись резонансов насыщенного поглощения и нелинейной дисперсии осуществлялась в отсутствие дополнительного зеркала 9. При этом частота исследуемого лазера 3 привязывалась к частоте гетеродинного лазера 2 с помощью блока частотно-фазовой привязки (на схеме не показан). Сигнал обратной связи определялся путем регистрации зависимости мощности излучения лазера от длины внешнего резонатора L , для чего на пьезоэлемент поворотного зеркала 12 подавалось пилообразное напряжение от блока управления 11.

Для управления экспериментом и автоматизированного сбора данных применялся измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) 17, на вход которого поступали сигналы с выхода фотодетектора 8 для измерения разности частот между гетеродинным и исследуемым лазерами и, кроме того, сигнал с выхода селективного нановольтметра 16, пропорциональный мощности излуче-

ния исследуемого лазера. В состав ИВК входили также частотомер и частотный детектор для анализа разностной частоты (частоты биений) между гетеродинным и исследуемым лазерами (на схеме не показаны).

5. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В наших экспериментах мощность излучения, попадающего в резонатор исследуемого лазера после отражения от стеклянной пластинки, устанавливалась на уровне $\sim 10^{-4}$ от выходной мощности лазера и выбиралась такой, чтобы, с одной стороны, обеспечить достаточную величину сигнала, а с другой стороны, избежать «перескоков» между соседними продольными модами лазера. Мощность излучения лазера измерялась фотодетектором при 100 %-ной модуляции светового пучка механическим прерывателем.

Интенсивность излучения лазера и давление метана поддерживались постоянными в течение всего эксперимента, что обеспечивало неизменность амплитуды резонанса B и его полуширины Γ . На рис.3 представлена запись нелинейного резонанса в метане. Форма нелинейного резонанса близка к лоренцевской, некоторые отклонения связаны, по-видимому, с влиянием квадратичного эффекта Доплера. Полуширина резонанса Γ составляла 78 кГц, а его амплитуда – 400 мВ, что соответствовало контрасту, равному $\sim 10\%$. Частота исследуемого лазера указана относительно частоты стабильного лазера.

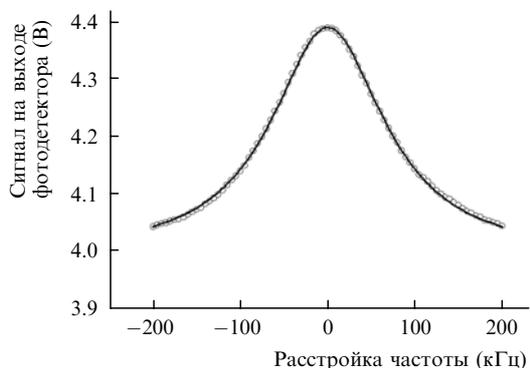


Рис.3. Запись резонанса насыщенного поглощения на $F_2^{(2)}P(7)v_3$ -линии метана. Точки – экспериментальные данные, сплошная кривая – подогнанная под экспериментальные значения методом наименьших квадратов лоренцевская кривая.

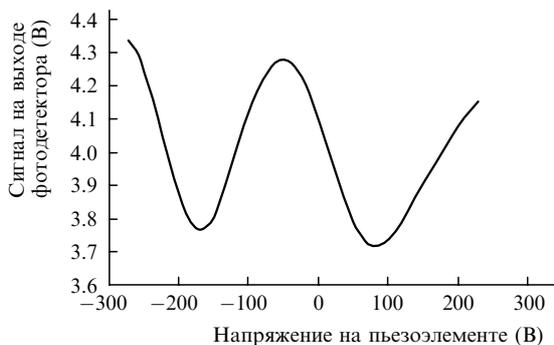


Рис.4. Зависимость сигнала на выходе фотодетектора (пропорционального мощности излучения лазера) от напряжения на пьезоэлементе (длины внешнего резонатора L).

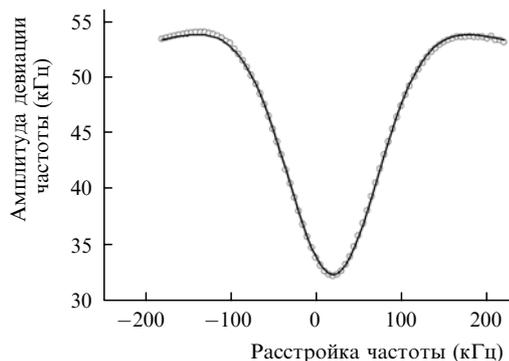


Рис.5. Запись резонанса насыщенной дисперсии (амплитуды девиации частоты) на $F_2^{(2)}P(7)v_3$ -линии метана. Точки – экспериментальные данные, сплошная кривая – расчет с подгонкой под экспериментальные значения методом наименьших квадратов.

Сдвиг частоты стабилизированного лазера связан с величиной и фазой сигнала, отраженного от внешнего оптического элемента. Фаза сигнала менялась за счет изменения расстояния L путем подачи на пьезоэлемент поворотного зеркала пилообразного напряжения. При этом можно было наблюдать, что сигнал, отраженный от внешнего оптического элемента, при изменении длины между выходным зеркалом и стеклянной пластинкой приводит к синусоидальной модуляции мощности излучения (рис.4). Амплитуда модуляции мощности составила 300 мВ, что в относительных величинах меньше 10^{-1} . Изменение напряжения на ~ 270 В соответствовало изменению длины внешнего резонатора L , равному половине длины волны излучения лазера.

Коэффициент затягивания частоты q измерялся при модуляции частоты лазера зеркалом 2 и оказался равным 1.54 (рис.5). При этом амплитуда девиации частоты в центре линии поглощения составила 32.5 кГц.

На рис.6 представлены результаты измерений зависимости сдвигов частоты стабилизированного лазера от длины внешнего резонатора (напряжения на пьезоэлементе поворотного зеркала). Кривая 2 с большей амплитудой модуляции частоты, равной 460 Гц, соответствует случаю, когда пробный сигнал подается на пьезоэлемент выходного зеркала 2, а кривая 1 с амплитудой 187 Гц – случаю, когда пробный сигнал подается на пьезоэлемент глухого зеркала 1. Начальные фазы отраженных сигналов различны, поэтому фазы синусоидальных зависимостей тоже отличаются друг от друга. Имел место

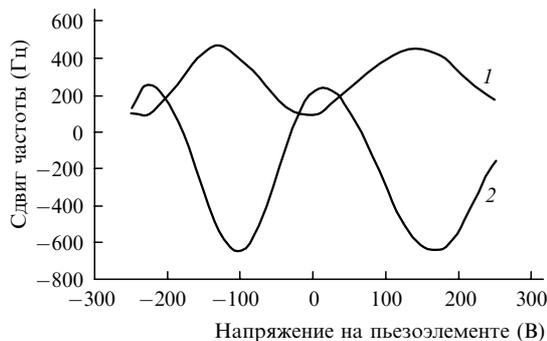


Рис.6. Сдвиг частоты стабилизированного по первой гармонике мощности излучения лазера от напряжения на пьезоэлементе (длины внешнего резонатора L) при модуляции частоты зеркалами 1 (I) и 2 (2).

также сдвиг среднего значения частоты исследуемого лазера при модуляции частоты зеркалами 1 и 2, который был равен 400 Гц. Экспериментально полученное отношение амплитуд флуктуации частоты лазера составило ~ 2.5 . Амплитуда девиации частоты в обоих случаях устанавливалась равной 32.5 кГц.

Амплитуда сдвига частоты стабилизированного лазера при подаче пробного сигнала на зеркало 1, рассчитанная по формуле (13) при параметрах, указанных выше, равна 57 Гц. При модуляции частоты зеркалом 2 расчетная амплитуда сдвига увеличивается до 278 Гц. Отношение этих амплитуд, равное 4.85, немного больше экспериментально полученного значения.

Количественное различие экспериментальных и расчетных значений, прежде всего, можно объяснить используемым в вычислениях приближением, а именно: девиация частоты $\delta\nu = 32.5$ кГц и частота модуляции $\Omega = 15$ кГц не являются пренебрежимо малыми по сравнению с полушириной резонанса $\Gamma = 78$ кГц.

6. Заключение

Выполненные исследования показали, что отрицательное влияние отражения лазерного излучения от внешних оптических элементов на стабильность частоты при модуляции глухим зеркалом меньше, чем при модуляции полупрозрачным зеркалом, которое примыкает к внешнему оптическому элементу. Это различие подчеркивается тем, что имеет место нелинейное затягивание частоты к центру линии поглощения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02-02-17876а).

1. Перель В.И., Рогова И.В. *Оптика и спектроскопия*, **25**, 716 (1968).
2. Крылова Д.Д., Шелковников А.С., Петрухин Е.А., Губин М.А. *Квантовая электроника*, **34**, 554 (2004).
3. Rigrod W.W. *J. Appl. Phys.*, **36**, 2487 (1965).
4. Bagayev S.N., Vasilenko L.S., Gol'dort V.G., Dmitriyev A.K., Skvortsov M.N., Chebotayev V.P. *Appl. Phys.*, **10**, 231 (1976).