

УДК 535.621.373.8

СЕЛЕКТИВНЫЕ СВОЙСТВА КОЛЬЦЕВЫХ ДИСПЕРСИОННЫХ РЕЗОНАТОРОВ

В. И. Кравченко, Ю. Н. Пархоменко, В. А. Соколов

На примере резонатора с двухлинзовым телескопом, в общей фокальной точке которого расположена диафрагма, моделирующая апертурные свойства активной среды, исследованы селективные свойства кольцевых резонаторов с произвольной системой диафрагмирующих и фокусирующих элементов. Сформулированы условия активного управления чувствительностью селективных свойств к взаимному размещению элементов дисперсионного резонатора.

Дисперсионные резонаторы широко используются для селекции спектра и перестройки длины волны лазерного излучения [1]. В перестраиваемых лазерах на конденсированных средах наибольшее распространение получили резонаторы с угловой дисперсией, что обусловлено достаточно высоким уровнем технологии изготовления дисперсионных элементов — призм и дифракционных решеток. В [2–5] развит метод расчета линейных дисперсионных резонаторов, основанный на применении функций преобразования (функций Грина) дисперсионных элементов и произвольных оптических систем. В настоящей работе этот метод обобщается на кольцевые резонаторы. Впервые проанализированы селективные свойства резонатора с оптической системой из двух линз, в окрестности общего фокуса которых расположена диафрагма, моделирующая апертурные эффекты в активной среде. Практический интерес к лазерам с резонаторами такого типа — линейным [6] и кольцевым [7–9] — вызван возможностью достижения высоких значений селективности и КПД.

Учет апертурных эффектов в приближении гауссовых диафрагм позволяет свести задачу к исследованию аналитического выражения для предельной полосы. Это, в свою очередь, дает возможность рассмотреть закономерности поведения полосы, анализ которых путем решения интегральных уравнений практически невозможен. Рассмотрение этой модели особенно актуально для наиболее широкого класса перестраиваемых лазеров с лазерной накачкой (растворы органических соединений, F -центры и т. д.), где апертурные свойства узкой зоны возбуждения в активной среде с высокой точностью аппроксимируются гауссовой диафрагмой. Отметим, что в случае накачки короткими лазерными импульсами ($\tau \sim 10^{-8}$ с) расчетное значение полосы резонатора совпадает с экспериментально наблюдаемой шириной спектра генерации [4].

В работе исследованы возможности активного управления селективными свойствами дисперсионного резонатора, в частности изменения в широких пределах чувствительности к смещению оптических элементов резонатора с целью создания лазеров с легко регулируемой шириной спектра или лазеров с повышенной стабильностью параметров.

1. Определение полосы кольцевого резонатора. Рассмотрим кольцевой резонатор, содержащий один дисперсионный элемент (решетку) и произвольную оптическую систему без дисперсии, свойства которой характеризуются матрицей преобразования с элементами A, B, C, D . В таком представлении недисперсионная оптическая система может

содержать элементы типа линз, гауссовых диафрагм, участков волноводной среды и т. д. Функция преобразования полной оптической системы, включающей в себя также и решетку, является сверткой функций преобразования недисперсионной оптической системы [10] и решетки [3] и имеет вид [2]

$$G(x, x') = \frac{\Gamma}{2} \sqrt{\frac{-ik_0}{\pi L}} \exp \left\{ i \left[kL_0 + \frac{\xi^2 d_p b^2}{2L_p k_0} \left(l_p - \frac{d_p B b^2}{L} \right) \right] \right\} \times \quad (1)$$

$$\times \exp \left\{ i \xi \frac{b}{L} [(l_p D + B)x - d_p b x'] + \frac{ik_0}{2L} [b^2 D x^2 + (CL_p + A)x'^2 + 2x x'] \right\},$$

где k — волновой вектор; k_0 — волновой вектор, для которого резонатор съюстирован точно (отсутствуют aberrации, вносимые дифракционной решеткой); Γ — комплексный коэффициент передачи решетки в рабочий дифракционный порядок; $\xi = (k - k_0)\eta$ — параметр расстройки решетки, где $\eta = (\sin \theta - \sin \alpha) / \cos \theta$, θ — угол падения волны на решетку, α — угол дифракции; $b = \cos \theta / \cos \alpha$ — коэффициент телескопичности; $L_0 = \int n(z) dz$ — оптическая длина недисперсионной системы; $d_p(l_p)$ — расстояние от входной (выходной) плоскости недисперсионной системы до решетки; $L_p = l_p + d_p b^2$; $L = L_p D + B$. Функция преобразования (1) является ядром интегрального уравнения

$$\Delta u(x) = \int_{+\infty}^{-\infty} G(x, x') u(x') dx' \quad (2)$$

для мод волн кольцевого дисперсионного резонатора.

Если апертурные эффекты резонатора описываются гауссовыми диафрагмами, то решение (2) может быть получено в аналитическом виде аналогично [2]. При этом выражение для собственного значения моды с произвольным продольным и нулевым поперечным индексом имеет для волн обоих направлений одинаковый вид:

$$\Lambda = \frac{-i\Gamma}{\sqrt{b(g + \sqrt{g^2 - 1})}} \exp \left\{ i \left[kL_0 + \frac{l_p d_p b^2}{2L_p k_0} \xi^2 - \frac{b^2}{2Lk_0} \left[\frac{d_p B b^2}{L_p} + \frac{(l_p D - d_p b + B)^2}{2b(1 - g)} \right] \xi^2 \right] \right\}, \quad (3)$$

где g — эквивалентный параметр конфигурации резонатора,

$$g = -(A + b^2 D + L_p C) / (2b).$$

Из (3) можно получить формулу, которая связывает предельную полосу пропускания резонатора Π с его параметрами (количественные характеристики селективности дисперсионных резонаторов, в том числе предельная полоса, введены в [4]):

$$\Pi = \frac{2}{|\eta|} \sqrt{-(\text{Im } S)^{-1}}, \quad (4)$$

где

$$S = \frac{k_0 b^2}{L} \left[\frac{d_p B b^2}{L_p} + \frac{(l_p D - d_p b + B)^2}{2b(1 - g)} \right]. \quad (5)$$

В кольцевом резонаторе без невзаимных элементов полоса для волн обоих направлений должна определяться одинаковым выражением. Если это условие не выполняется, то определение полосы как меры частотной селективности резонатора нельзя считать корректным.

Отметим, что выражение (4) данному требованию удовлетворяет, а определение полосы по расходимости и угловой дисперсии (такая оценка часто используется в литературе [1]) — не удовлетворяет. Наглядно и без дополнительных вычислений в этом можно убедиться при анализе неустойчивого кольцевого резонатора с симметричным дисперсионным элементом (например, призмой). В этом случае дисперсия призмы для встречных волн одинакова, а расходимость этих волн может существенно различаться.

Исследование влияния параметров резонатора на селективные свойства сводится к анализу выражений (4), (5), причем особый интерес представляет окрестность области $\text{Reg} \simeq 1$, в которой достигается максимальная селективность. Ниже мы покажем эффективность предложенного подхода в применении к анализу конкретного резонатора.

2. Селективность резонатора с линзовой телескопической системой.

1) Рассмотрим кольцевой резонатор (рис. 1), который содержит телескоп, состоящий из двух положительных линз L_1 и L_2 , четное число плоских зеркал бесконечной апертуры, узкую диафрагму $D_{\Phi 1}$, расположенную в окрестности общего фокуса L_1 и L_2 , а также широкую $D_{\Phi 2}$. Первая моделирует апертурные свойства активной среды, вторая — ограничивающее влияние других элементов. Количество зеркал выбирается из условия, чтобы общее число отражений с учетом поворота поля в линзовом телескопе и отражения от решетки было четным. Действительные и мнимые части элементов матрицы преобразования (A' , B' , D' и A'' , B'' , D'') недисперсионной оптической системы имеют вид

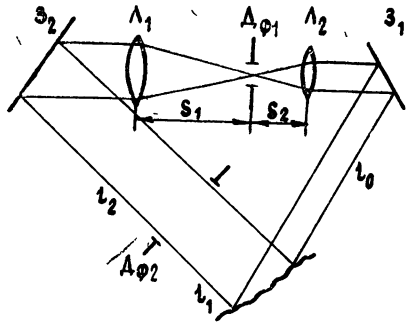


Рис. 1.

$$A' = 1 - \frac{l_T}{f_1} + l_0 \frac{l_T - f_1 - f_2}{f_1 f_2} - P_1 P_2 \left(s_1 + l_2 - \frac{s_1 l_2}{f_1} \right) \times \\ \times \left(s_2 + l_0 - \frac{s_2 l_0}{f_2} \right),$$

$$B' = l_T + l_1 + l_2 - l_T \frac{l_1 + l_2}{f_1} + l_0 \left(1 - \frac{l_T}{f_2} \right) + l_0 (l_1 + l_2) \frac{l_T - f_1 - f_2}{f_1 f_2} - \\ - P_1 P_2 l_1 \left(s_1 + l_2 - \frac{s_1 l_2}{f_1} \right) \left(l_0 + s_2 - \frac{l_0 s_2}{f_2} \right),$$

$$D' = 1 - \frac{l_T}{f_1} + (l_1 + l_2) \frac{l_T - f_1 - f_2}{f_1 f_2} - P_1 P_2 l_1 \left(1 - \frac{s_2}{f_2} \right) \times \\ \times \left(s_1 + l_2 - \frac{s_1 l_2}{f_1} \right), \quad (6)$$

$$A'' = P_2 \left[l_2 + l_T - \frac{l_2 l_T}{f_1} + l_0 + l_0 \frac{l_2 (l_T - f_1 - f_2) - f_1 l_T}{f_1 f_2} \right] + \\ + P_1 \left(1 - \frac{s_1}{f_1} \right) \left(s_2 + l_0 - \frac{s_2 l_0}{f_2} \right),$$

$$B'' = P_2 l_1 \left[l_T + l_2 - l_2 \frac{l_T}{f_1} + l_0 \left(1 - \frac{l_T}{f_1} + \frac{l_T - f_1 - f_2}{f_1 f_2} l_2 \right) \right] +$$

$$+ P_1 \left(s_2 + l_0 - \frac{s_2 l_0}{f_2} \right) \left(s_1 + l_1 + l_2 - s_1 \frac{l_1 + l_2}{f_1} \right),$$

$$D'' = P_2 l_1 \left(1 - \frac{l_T}{f_2} + l_2 \frac{l_T - f_1 - f_2}{f_1 f_2} \right) + P_1 \left(1 - \frac{s_2}{f_2} \right) \times$$

$$\times \left(s_1 + l_1 + l_2 - s_1 \frac{l_1 + l_2}{f_1} \right),$$

где f_j — фокусное расстояние линзы L_j ($j=1,2$); $P_j = \lambda / (\pi \omega_j^2)$ (ω_j — полуширина диафрагмы $D_{\Phi j}$); s_1 (s_2) — расстояние между диафрагмой $D_{\Phi 1}$ и линзой L_1 (L_2); l_0 — расстояние между решеткой и линзой L_2 ; l_1 (l_2) — расстояние между диафрагмой $D_{\Phi 2}$ и решеткой (линзой L_1); $l_T = s_1 + s_2$.

Выражение (4) с учетом (6) обладает настолько большим числом параметров, что его анализ в произвольном случае можно проводить на ЭВМ лишь при дополнительных ограничениях. Чтобы выяснить их, исследуем простые случаи, допускающие аналитическое рассмотрение.

Будем считать, что линзовый телескоп съюстирован. Диафрагма $D_{\Phi 1}$ находится в общем фокусе линз L_1 и L_2 ($s_1 = f_1$; $s_2 = f_2$), а $D_{\Phi 2}$ — на решетке ($l_1 = 0$). В этом случае выражение для полосы, характеризующее влияние отличия поперечного увеличения линзового телескопа $\beta = f_2/f_1$ от b , имеет вид

$$\Pi = \frac{2}{|\gamma| b} \left[\frac{P_2}{k_0} + \frac{(\beta - b)^2}{\beta} \left(P_1 P_2 f_1 f_2 + \frac{P_2^2 s^2}{P_1 P_2 f_1 f_2 + (\beta - b)^2 / \beta} \right)^{-1} \right]^{1/2}, \quad (7)$$

$$\text{где} \quad s = l_T - \beta(l_1 + l_2) - l_0 / \beta \quad (8)$$

— параметр, который, как будет ясно из дальнейшего, оказывает существенное влияние на свойства резонатора. Физический смысл его будет выяснен ниже. Минимальное значение полосы, которое имеет место при $\beta = b$, равно

$$\Pi_0 = \frac{2 \cos \alpha}{|\sin \theta - \sin \alpha|} \sqrt{\frac{P_2}{k_0}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{D_\varphi \omega_2} \quad (9)$$

и не зависит от телескопичности. Здесь $D_\varphi = |\sin \theta - \sin \alpha| / \lambda \cos \alpha$ — угловая дисперсия решетки. Выражение (9) совпадает с аналогичным, приведенным в [4] и справедливым для узкоапертурных резонаторов. Но так как при получении (9) не было использовано никаких ограничений, то оно применимо к резонаторам произвольной апертуры и является более общим.

В дальнейшем будем считать, что коэффициент поперечного увеличения телескопа β в съюстированном положении равен телескопичности решетки.

Перейдем к исследованию влияния отклонений параметров резонатора на величину полосы. Как показал анализ, с экспериментальной точки зрения к наиболее важным следует отнести: 1) один из параметров расстройки линзового телескопа (например, отклонение фокусного расстояния линзы L_j $\delta f_j = f'_j - f_j$, $j=1,2$); 2) смещение диафрагмы $D_{\Phi j}$ относительно общего фокуса линз телескопа L_j ($\Delta = s_1 - f_1 = f_2 - s_2$); 3) параметр s , определенный выражением (8) и характеризующий расположение элементов резонатора вне телескопа. Вначале рассмотрим влияние каждого из этих параметров в отдельности.

2) Исследование выражений (4)–(6) при $\Delta = 0$ показывает, что зависимости $\Pi(\delta f_j)$ имеют резонансный характер, причем их поведение практически не зависит от ширины диафрагмы $D_{\Phi 1}$. Для случая, когда выполняется условие $P_1 l_T \gg 1$, а также учитывая, что при реаль-

ных апертурах элементов резонатора ($\omega_2=1$ см) величины P_2l_j и P_2s_j существенно меньше единицы, можно получить следующее приближенное выражение:

$$\Pi = \Pi_0 \sqrt{1 + \frac{(1+b)^2}{P_2l_T} (\delta f_1 + \delta f_2)^2}, \quad (10)$$

которое хорошо коррелирует в области небольших расстроек с результатами в общем случае. Из (10) следует, что несмотря на различие f_1 и f_2 отклонения δf_1 и δf_2 влияют на полосу резонатора одинаковым образом. Ширина зависимости $\Pi(\delta f_j)$ на уровне $2\Pi_0$ определяется выражением

$$\overline{\delta f_j} = 2\sqrt{3} P_2 \left(\frac{l_T}{1+b} \right)^2, \quad (11)$$

из которого следует, что $\overline{\delta f_j}$ увеличивается с уменьшением b . Это увеличение, быстрое при $b \approx 1$, выходит на насыщение при $b \ll 1$, достигая в пределе четырехкратного.

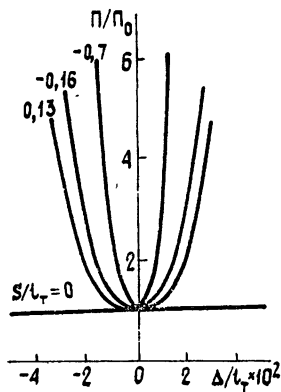


Рис. 2.

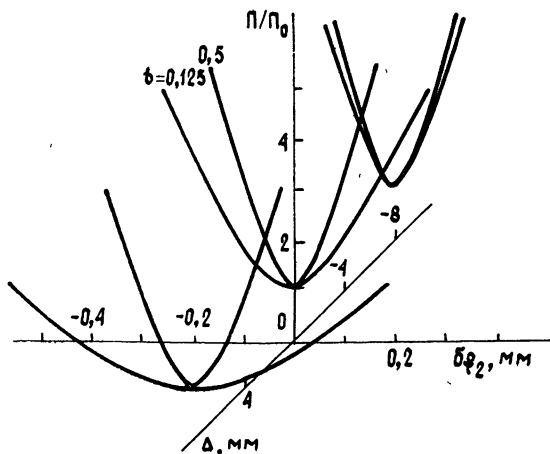


Рис. 3.

Исследуем зависимость полосы от смещения Δ диафрагмы $D_{\Phi 1}$ при сфокусированном телескопе ($\delta f_1 = \delta f_2 = 0$). На рис. 2 представлено семейство рассчитанных на ЭВМ при $\omega_1 = 25$ мкм зависимостей $\Pi(\Delta)$, параметром которого является определенная выражением (8) величина s . В настоящей работе при конкретных вычислениях для $l_T, l_0, l_1, l_2, \omega_2$ выбраны следующие, близкие к реальным параметрам значения: $l_T = 20$ см, $l_0 = 2$ см, $l_1 = 16,5$ см, $l_2 = 15,5$ см, $\omega_2 = 1$ см.

Видно, что по мере приближения $|s|$ к нулю кривая $\Pi(\Delta)$ трансформируется в прямую линию, т. е. при $s = 0$ чувствительность полосы к смещению диафрагмы $D_{\Phi 1}$ практически исчезает. Этим определяется важность параметра s , который имеет размерность длины и представляет собой линейную комбинацию l_T, l_1, l_2, l_0 .

Чтобы качественно пояснить физический смысл параметра s , рассмотрим «внешнюю» по отношению к диафрагме $D_{\Phi 1}$ упрощенную оптическую систему, состоящую из линзы L_1 , решетки и линзы L_2 (рис. 1). При $s = 0$ она представляет собой афокальную систему с единичным коэффициентом поперечного увеличения, особенность которой состоит в том, что расстояние между сопряженными плоскостями есть величина постоянная. Для кольцевого резонатора это означает, что при $s = 0$ диафрагма $D_{\Phi 1}$ изображается сама на себя в любой точке между линзами L_1 и L_2 , а само значение s характеризует отклонение резонатора от указанной конфигурации. Анализ конфигурации мод показал, что при смещении диафрагмы ($\Delta \neq 0, s = 0$) происходит перестройка структуры поля таким образом, что каустика поля проходит внутри диафрагмы $D_{\Phi 1}$.

3) Исследуем влияние на полосу одновременного отклонения фокусных расстояний и смещения диафрагмы $D_{\Phi 1}$. Вначале остановимся на случае, когда условие $s=0$ выполнено. Численный анализ зависимостей $\Pi(\delta f_1)$ и $\Pi(\delta f_2)$ показывает, что, когда диафрагма $D_{\Phi 1}$ смещена ($\Delta \neq 0$), одна из этих зависимостей становится шире, а другая уже, чем при $\Delta=0$ (см. рис. 3, где $\omega_1=25$ мкм). Перемена знака Δ приводит к обратной ситуации. Наиболее подвержены расширению и сужению семейства кривых, соответствующие меньшему фокусному расстоянию (в данном случае — $\Pi(\delta f_2)$). Например, при $b=0,125$ изменение Δ от -1 до 1 см приводит к увеличению δf_1 от $0,16$ до $0,18$ мм и уменьшению δf_2 от $0,95$ до $0,16$ мм.

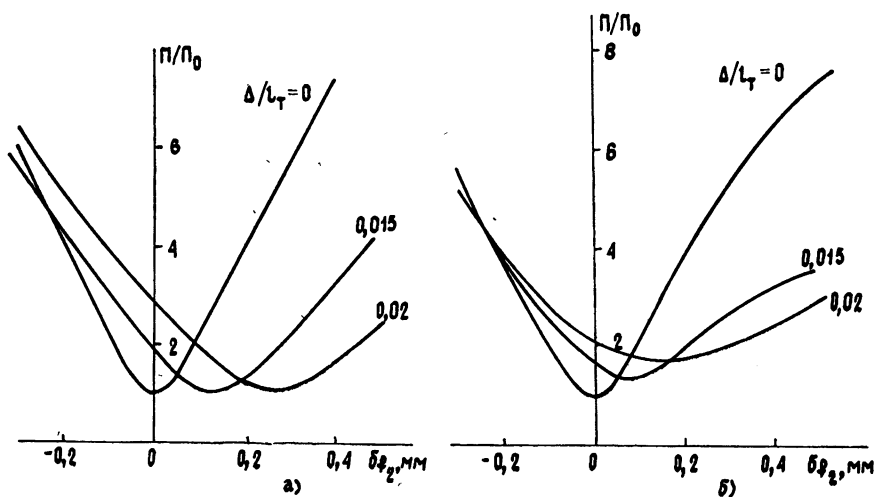


Рис. 4.

Теперь рассмотрим влияние на полосу одновременной разъюстировки телескопа и смещения диафрагмы $D_{\Phi 1}$, когда условие $s=0$ не выполняется. На рис. 4 приведены зависимости $\Pi(\delta f_2)$, рассчитанные на ЭВМ при $\omega_1=25$ мкм (а), $\omega_2=100$ мкм (б) и $b=0,1$. Как и при $s=0$, минимальное значение полосы наблюдается при совмещении диафрагмы со своим изображением, создаваемым системой линза L_1 , решетка, линза L_2 . Однако в отличие от предыдущего случая здесь, во-первых, имеет место не равное единице увеличение, приводящее к возрастанию полосы, и, во-вторых, минимум полосы достигается при разъюстированном телескопе. Анализ показывает, что величина необходимой разъюстировки $\delta f_{j \min}$ определяется выражением

$$\delta f_{j \min} = - \frac{\Delta^2 s}{L_T} \frac{(1+b)^2}{b} \quad (12)$$

Отметим, что при увеличении размера диафрагмы $D_{\Phi 1}$ ($P_1 L_T < 1$) смещение сопровождается существенным расширением зависимостей и, следовательно, снижением чувствительности полосы к разъюстировке δf_j . Такая особенность является важной и может быть использована для управления свойствами резонатора.

3. Сопоставление характеристик линейных и кольцевых дисперсионных резонаторов. В заключение сравним селективность и закономерности ее поведения при изменении параметров в рассмотренном резонаторе и линейном дисперсионном резонаторе [11], в котором гауссова диафрагма, моделирующая активную среду, также расположена в окрестности общего фокуса двух фокусирующих элементов, образующих телескопическую систему.

У этих резонаторов имеется ряд общих свойств. Во-первых, минимальные значения полосы в них определяются функционально одинаковыми выражениями, что говорит об общем механизме селективности. Во-вторых, в обоих резонаторах определяющее влияние на полосу ока-

зывают аналогичные расстройки: 1) расстройка телескопа, воздействие которой имеет ярко выраженный резонансный характер; 2) смещение диафрагмы $D_{\phi 1}$, приводящее в общем случае к возрастанию полосы по закону, близкому к параболическому.

Отметим, что в линейном резонаторе минимальное значение полосы в два раза меньше, чем в кольцевом, что связано с двукратной дифракцией волны на решетке. Кроме того, в закономерностях поведения полосы рассматриваемых резонаторов имеется ряд отличий, связанных с качественно различным характером формирования поля в них. Так, в линейном резонаторе ширина $\bar{\delta f}_j$ кривой $\Pi(\delta f_j)$ пропорциональна b^{-2} , что позволяет достигнуть гораздо меньшей чувствительности полосы к расстройкам телескопа. В свою очередь, в кольцевом резонаторе при $s=0$ смещение диафрагмы $D_{\phi 1}$ вообще не оказывает влияния на селективность, что является особенностью кольцевых резонаторов, в линейных аналога не имеет и важно для практических применений.

Различно также поведение полосы резонаторов при одновременной разъюстировке телескопа и смещении диафрагмы $D_{\phi 1}$. Так, в линейном резонаторе кривая $\Pi(\delta f_j)$ в этом случае асимметрична, а минимальное значение полосы наблюдается при съюстированном телескопе независимо от положения диафрагмы. В кольцевом резонаторе в аналогичных условиях минимальное значение полосы имеет место при разъюстированном телескопе, а кривые $\Pi(\delta f_j)$ своего характера не изменяют, но существенно расширяются либо сужаются. Это позволяет и в кольцевом резонаторе при правильном выборе параметров b, s, Δ, ω_1 регулировать чувствительность полосы к расстройкам телескопа при незначительном изменении селективности (см. рис. 4), хотя и в меньших пределах, чем в линейном резонаторе. Отметим также, что резкий характер зависимостей $\Pi(\delta f_j)$ может быть использован для плавной регулировки ширины спектра генерации, как и в линейном резонаторе [41]. Согласно результатам п. 3 предыдущего раздела эту регулировку можно осуществлять как изменением фокусного расстояния одной линзы, почти полностью исключив влияние другой, так и изменением фокусных расстояний обеих линз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анохов С. П., Марусий Т. Я., Соскин М. С. Перестраиваемые лазеры — М.: Радио и связь, 1982.
2. Кравченко В. И., Пархоменко Ю. Н. — Квантовая электроника, 1985, 12, № 6, с. 1220.
3. Препринт Института физики АН УССР № 20, 1979.
4. Воронцов В. И., Кравченко В. И., Пархоменко Ю. Н., Опанасюк Ю. Д. — Квантовая электроника, 1980, 9, № 8, с. 1586.
5. Воронцов В. И., Кравченко В. И., Пархоменко Ю. Н. — Письма в ЖТФ, 1980, 6, № 18, с. 1105.
6. Вартапетов С. К., Поливанов Ю. Н., Савельев А. Д. и др. — Квантовая электроника, 1986, 13, № 3, с. 653.
7. Magowski G — Appl Phys. Lett. 1975. 26. № 11
8. Демтредер В. Лазерная спектроскопия: основные принципы и техника эксперимента — М.: Наука, 1985, с. 307.
9. Каппе Д. М., Дуппе М. Н. — Optics Communications, 1984, 48 № 5, p. 295.
10. Джерард А., Берч Дж. М. Введение в матричную оптику. — М.: Мир, 1979, с. 98.
11. Кравченко В. И., Пархоменко Ю. Н., Соколов В. А. — Квантовая электроника, 1986, 13, № 10, с. 2038.

Институт физики
АН УССР

Поступила в редакцию
24 декабря 1985 г.

SELECTIVE PROPERTIES OF THE RING DISPERSIVE RESONATORS

V. I. Kravchenko, Yu. N. Parkhomenko, V. A. Sokolov

Selective properties of the ring dispersive resonators with arbitrary optical systems are studied. A resonator including two-lens telescope with a diaphragm in caustics which simulates the diaphragming effect of the active medium is considered in details. The conditions for the active control of selective sensitivity properties to the reciprocal positioning of resonator elements are considered.