

УДК 621.378.325

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ НА РАБОТУ КОЛЬЦЕВОГО ЛАЗЕРА

И. А. Андропова, И. Л. Берштейн

Рассматриваются обратные отражения в кольцевых лазерах и их воздействие на процессы в системе. Приводятся результаты опытов, проведенных с гелий-неоновым кольцевым лазером на волне 0,63 мк при одноподовом режиме генерации.

Работе газового лазера с кольцевым резонатором (ЛКР) к настоящему времени посвящено большое число работ (см., например, обзор [1]). Однако есть ряд вопросов, которые до сих пор нельзя считать вполне выясненными; в частности, это относится к влиянию обратных отражений волн внутри резонатора, которые, по-видимому, с неизбежностью присутствуют даже в наиболее совершенных конструкциях, на различные характеристики ЛКР.

Задача данной работы заключалась в более детальном рассмотрении вопросов, связанных с паразитными обратными отражениями в ЛКР, и экспериментальном исследовании влияния этих отражений на характеристики ЛКР при перестройке частоты генерации по контуру усиления активной среды. Полученные экспериментальные результаты по возможности сравнивались с расчетами, проведенными в работах [2, 3].

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРАЗИТНЫХ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ

В теории процессов в ЛКР обратные отражения встречных волн 1 и 2 характеризуют величиной $r_j \exp(i\varepsilon_j)$ ($j = 1, 2$), где ε_j определяет фазу отраженной волны, а $r_j = (c/L) \sqrt{R_j}$ — ее величину; здесь c — скорость света, L — длина периметра резонатора, R_j — коэффициент отражения по мощности (разумеется, речь идет об отраженной мощности в рабочую моду, в занимаемый ею телесный угол).

Причиной обратного отражения волн могут быть многие объекты на пути волн в резонаторе (вплоть до пылинок в воздухе). Можно, однако, предположить, что основными источниками этого эффекта являются зеркала резонатора. Ниже будет описан эксперимент, свидетельствующий в пользу такого предположения. В дальнейшем будем рассматривать случай треугольного резонатора.

Обратное отражение от каждого из трех зеркал можно характеризовать величиной $r_{jm} \exp(i\varepsilon_{jm})$ ($j = 1, 2; m = 1, 2, 3$). Для определения результирующих значений $r_j \exp(i\varepsilon_j)$ (фигурирующих в уравнениях первого приближения для процессов в ЛКР), необходимо просуммировать паразитные отражения с учетом соответствующих набегов фаз. Приводя результат сложения к зеркалу 1, обозначая оптические длины прилегающих к нему плеч резонатора l_2 и l_3 , получим

$$r_1 \exp(i\varepsilon_1) = r_{j1} \exp(i\varepsilon_{j1}) + r_{j2} \exp[i(\varepsilon_{j2} \mp 2kl_2)] + r_{j3} \exp[i(\varepsilon_{j3} \pm 2kl_3)]. \quad (1)$$

Здесь знаки \pm соответствуют волнам 1, 2, а $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; его значение для случая поляризации волн перпендикулярно плоскости падения на зеркала определяется соотношением

$$kL = k(l_1 + l_2 + l_3) = 2\pi N + \pi \quad (N — \text{целое число}).$$

В дальнейшем полагаем $l_1 \approx l_2 \approx l_3$.

Ширина лучка излучения d много больше λ . Поэтому при строго параллельном перемещении зеркала на несколько λ поверхность рассеяния практически остается неизменной, и можно принять, что значения r_{jm} и ϵ_{jm} при этом примерно постоянны. Небольшой поворот зеркала и изменение частоты также не повлияют на их значения, если изменение величины $kd \operatorname{tg} \varphi$ будет $\ll \pi/2$; здесь φ — угол падения излучения на зеркало ($\approx 30^\circ$). При $\lambda = 0,63 \text{ мк}$, $d = 1 \text{ мм}$ это будет иметь место для изменений угла и частоты $\Delta\varphi \ll 1'$, $\Delta\nu \ll 10^{11} \text{ гц}$.

Сказанное выше относилось к параметрам отражения от отдельно-го зеркала. Какие-либо закономерности результирующих величин r_j , ϵ_j , определяемых (1), в общем случае указать невозможно. Рассмотрим два частных случая.

Положим, что все плечи резонатора изменяются пропорционально (например, из-за равномерного температурного прогрева). В пределах зоны генерации kl_1 , kl_2 , kl_3 при этом остаются постоянными, а следовательно, остаются постоянными и величины r_j , ϵ_j . При изменении периметра L точно на λ значение N изменяется на ± 1 , величины $2kl_2$, $2kl_3$ изменяются скачком на $\mp 2\pi/3$; значения $r_j \exp(i\epsilon_j)$, вообще говоря, изменятся и повторятся лишь при изменении L на 3λ (N — на ± 3).

Положим теперь, что изменение L происходит путем параллельного перемещения лишь зеркала 1 на величину h . Исходя из того, что источник рассеяния можно считать жестко связанным с определенной областью поверхности зеркала, нетрудно показать, что при этом значения l_2 и l_3 в формуле (1) изменятся на величину $h \cos 30^\circ = (\sqrt{3}/2)h$ (а значение L — на $\sqrt{3}h$). При таком способе изменения L значения r_j и ϵ_j изменяются в пределах зоны, но повторяются при каждом цикле изменения L на величину λ , т. е. для каждой последующей зоны генерации. Плавное изменение в пределах зоны компенсируется скачком при переходе с N -й на $(N \pm 1)$ -ю моду*.

Таким образом, от способа изменения периметра существенно зависит характер изменения паразитных отражений при изменении частоты генерации. Лишь в том случае, если рассеяние от одного из зеркал значительно больше, чем от остальных, способ изменения L несуществен, и значения r_j , ϵ_j можно считать постоянными.

2. ВЛИЯНИЕ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ НА РАБОТУ ЛКР

Связи между встречными волнами через рассеяние приводят к ряду эффектов, которые не могут иметь места в их отсутствие. Рассмотрение процессов при наличии обратных связей проводилось в ряде работ. Для дальнейшего сравнения с экспериментом проанализируем имеющиеся результаты.

Наличие связей вызывает явление синхронизации (захвата) частот встречных волн. Полоса захвата, согласно [3], равна

$$B = \{(1 + \alpha^2)(r_1^2 + r_2^2) + 2r_1r_2[(1 - \alpha^2) \cos 2\epsilon + 2\alpha \sin 2\epsilon]\}^{1/2}, \quad (2)$$

где $\epsilon = (\epsilon_1 + \epsilon_2)/2$. Параметр α в этой формуле появился в результате взаимосвязи через активную среду амплитуд и частот волн; для случая одноизотопной активной среды он приближенно равен

* Если перемещение зеркала будет сопровождаться некоторым его поворотом, повторение картины при изменении L на λ не будет иметь места.

$$\alpha \approx \frac{\Delta \nu_N}{2(\nu - \nu_n)}, \quad (3)$$

где $\Delta \nu_N$, ν_n и ν — естественная ширина линии перехода среды (с учетом столкновений), частота ее центра и частота генерации соответственно. При малых значениях $\nu - \nu_n$ имеет место резко выраженное явление «конкуренции волн» (о нем будет идти речь дальше). Выражения (2) и (3) справедливы вне этой области (практически при условии $|\nu - \nu_n| > 30 \div 40 \text{ МГц}$).

Если разность собственных частот «пустого резонатора» для встречных волн δ меньше B , то имеет место захват, и разность фаз встречных волн ψ определяется из соотношения [3]

$$\sin(\psi + \theta) = \frac{\delta}{B}, \quad \cos(\psi + \theta) > 0, \quad (4)$$

где

$$\theta = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{2} + \arctg \frac{(r_2 - r_1)(\sin \epsilon - \alpha \cos \epsilon)}{(r_2 + r_1)(\cos \epsilon + \alpha \sin \epsilon)}. \quad (5)$$

Из (4) следует, что значение δ и его изменения в принципе можно определять на опыте по изменениям величины ψ (такое предложение содержится в работе [4]). Однако зависимости значений B и θ от многих параметров делают это практически невозможным. Это предложение было бы реализуемым при идеальной стабильности всех плеч резонатора (и др. параметров системы).

Величина ψ сложным образом изменяется в пределах зоны генерации; отметим, однако, одну закономерность, которая выявляется при анализе выражения (5) для θ . При прохождении частоты ν через значение ν_n (малый интервал частот вблизи ν_n исключаем из рассмотрения по вышеуказанной причине) величина ψ может изменяться как плавно, так и резко, «скачком». Это зависит от значения $\epsilon = (\epsilon_1 + \epsilon_2)/2$. Если, например, $\epsilon = \pm \pi/2$, то имеет место «скачок» ψ ; величина его при $r_1 = r_2$ равна π , при $r_1 \neq r_2$ — меньше π . При других значениях ϵ наличие и величина «скачка» зависит от соотношения r_1 и r_2 . Резкие изменения ψ связаны с тем, что величина α изменяет свой знак при изменении знака $\nu - \nu_n$.

Паразитные обратные связи вызывают также неравенство интенсивностей встречных волн. При захвате разность интенсивностей зависит от δ , что также в принципе можно было бы использовать для определения значения δ . Однако зависимость этой разности и от других параметров (r_j , ϵ_j , α) приводит к тому, что такую возможность также можно реализовать лишь при стабильности всех плеч резонатора (и др. параметров системы).

Кроме описанных явлений связь приводит к тому, что положение области устойчивости однонаправленной генерации, имеющей место при работе с одноизотопной активной средой, также зависит от соотношения между коэффициентами связи (см. условие (8) работы [2]); только в частном случае $\epsilon_1 + \epsilon_2 = 0, \pi$ (в наших обозначениях) это условие совпадает со случаем отсутствия связи.

При наличии связи, кроме одно- и двухнаправленного режима, возможен режим автомодуляционный, т. е. режим, при котором амплитуды и фазы волн совершают колебания. Положение области автомодуляции по зоне генерации и частота автомодуляции зависят также от обратных связей.

* Полагаем, что ϵ плавно и незначительно изменяется в небольшом интервале частот.

При выходе из режима синхронизации ($|\delta| > B$) частота расщепления оказывается зависящей от величин и фаз обратных связей (эффект частичного увлечения частоты).

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Работа проводилась на волне $0,63 \text{ мк}$ при одномодовом режиме генерации. Схема установки приведена на рис. 1. Гелий-неоновая разрядная трубка РТ диаметром $1,5 \text{ мм}$ имела один анод и два катода (для компенсации эффекта Ленгмюра), брюстеровские окна, наполненные изотопами Ne^{20} и Ne^3 в отношении $1:6$ при общем давлении $2,5 \text{ тор}$. Зеркала A, B, C (две сферы с $R = 1,2 \text{ м}$ и одно плоское) образовывали резонатор с $L \approx 75 \text{ см}$. Зеркало A укреплено на пьезоцилиндре для управления частотой лазера. Вблизи зеркал расположены равнорасположенные интерферометры I_A, I_B, I_C ; одно из зеркал каждого интерферометра укреплено на пьезоцилиндре. Для расщепления частот встречных волн применялся продув воздуха через трубку T .

В то или иное плечо резонатора вводилась под углом Брюстера плоскопараллельная пластинка D из стекла (толщиной 3 мм). Эта пластинка укреплялась либо на пьезоцилиндре, что позволяло смещать ее вдоль оси резонатора, либо на биполярном пьезоэлементе, что давало возможность ее слегка поворачивать и тем самым несколько изменять оптическую длину плеча резонатора.

Наблюдение велось при помощи фотодиодов, выходы которых после усиления подводились к осциллографу.

Из-за недостаточной механической стабильности установки

большинство опытов проводилось при сканировании периметра ЛКР путем подачи на пьезоцилиндр зеркала A переменного напряжения с частотой 50 гц , а наблюдение велось на экране осциллографа, развертка которого осуществлялась также с частотой 50 гц .

Прежде всего заметим, что эффекты на выходе разных интерферометров неидентичны. Легко видеть, например, что $|\Delta\Phi_A - \Delta\Phi_B| = 2|\Delta(kl)|$, где $\Delta\Phi_A$ и $\Delta\Phi_B$ — изменения разности фаз волн, отмечаемые интерферометрическими схемами I_A и I_B , а $\Delta(kl)$ — изменение величины kl , где l — длина плеча между зеркалами A и B . Разность показаний $2\Delta(kl)$ зависит от способа изменения периметра резонатора. Так, например, при пропорциональном изменении всех плеч резонатора значение $2kl$ не изменяется в пределах зоны, но терпит скачок при переходе к соседней моде, и повторение будет лишь при изменении L на 3λ .

Если изменение периметра производится параллельным перемещением зеркала A (или B), то значение l изменяется по тому же закону, который был указан выше для изменения плеч в формуле (1). При этом величина $2kl$ изменяется по зоне, но при изменении L на λ ее значение изменяется на 2π , т. е. разность восстанавливается при переходе от N -й моды к $(N \pm 1)$ -й моде. Однако при самом переходе $2kl$ изменяется скачком (вследствие изменения k) на 120° *

* Сказанное относится к случаю примерно равноплечих интерферометров. Для других типов интерферометров закон изменения будет другой.

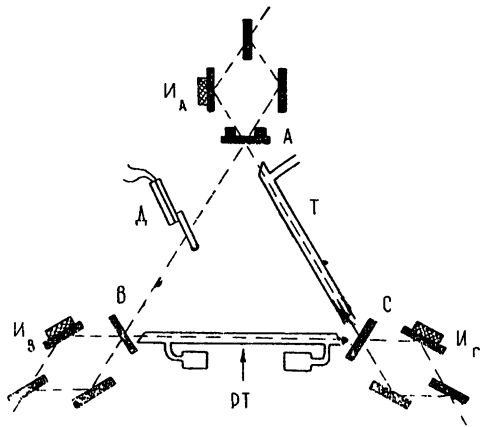


Рис. 1.

Справедливость сказанного была подтверждена следующим опытом. Частоты волн расщеплялись и сигналы разностной частоты (~ 5 кГц) с выходов I_A и I_B подавались на пластины осциллографа для образования фигуры Лиссажу. При сканировании периметра резонатора в весьма малых пределах ($\ll \lambda$) вблизи перехода с N -й моды на $(N + 1)$ -ю моду на экране осциллографа была получена картина, приведенная на рис. 2; на ней отчетливо можно наблюдать скачок разности фаз, примерно равный ожидаемому.



Рис. 2.

Проведенное рассмотрение показывает, в частности, что, если на выходе одного интерферометра наблюдается неизменность частоты расщепления, это не будет иметь места на выходе другого при колебании («дрожании») длины плеча l .

Перейдем к описанию других экспериментов. Ход разности фаз ψ двух волн при отсутствии расщепления частот и при сканировании периметра L перемещением зеркала A наблюдался на выходе I_C . Для получения простой и наглядной картины был применен метод, описанный в работе [5]: одно из зеркал интерферометра колебалось с частотой 3 кГц, причем амплитуда колебания подбиралась такой, чтобы разность хода лучей в интерферометре изменялась на $\pm \lambda/2$. При этом на экране осциллографа получается интерферограмма, на которой средняя («жирная») линия показывает изменение значения ψ в пределах $\pm \pi/2$ (постоянным напряжением на пьезоцилиндре можно изменять среднее значение ψ).

Опыт показал, в согласии с вышесказанным, что картина хода ψ полностью повторяется при переходе на соседние моды; это следует из рис. 3, на котором виден результат сканирования в пределах примерно трех мод.

Перемещение пластинки D вдоль оси резонатора (на $\pm \lambda$) не дало заметных изменений картины ψ по зоне генерации. Отсюда следует, что такая пластинка не дает заметного обратного рассеяния (по сравнению с рассеянием от зеркал).

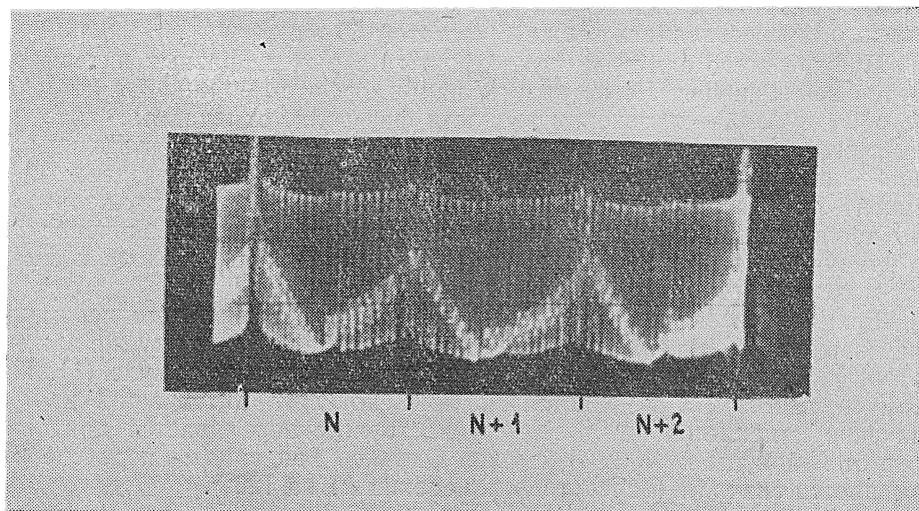


Рис. 3.

Небольшой поворот пластинки, изменяя оптическую длину плеча, существенно влияет на картину изменения ψ по зоне*. Это согласуется с вышесказанным: изменение длины плеча резонатора меняет результат сложения отражений от зеркал (см. (1)). Работая с различными зеркалами, в отдельных случаях наблюдали, что при помещении пластинки D в одно плечо резонатора ее поворот почти не изменял картины ψ , в то время, как ее поворот в другом плече существенно изменял картину. Отсюда следует, что рассеивающие свойства зеркал могут быть весьма различны.

Влияние изменения длины одного из плеч резонатора при повороте D было проверено и таким способом: частоты волн расщеплялись с небольшой разностной частотой (~ 3 кГц)**; поворотом D можно было получить захват («пропадание» расщепления) в том или ином участке зоны генерации. Это иллюстрируется фотографиями, приведенными на рис. 4 а, б, в, полученными при сканировании периметра при трех разных поворотах пластинки D . Верхние фото показывают результат интерференции волн; на них видны участки зоны генерации с наличием расщепления частот и с его отсутствием (захват частот). Нижние фото показывают соответствующие изменения мощности одной из волн. На фото отмечены значения ν_d . Приведенные рисунки показывают лишь качественную сторону явления, так как они получены при сканировании длины периметра, тем не менее они отчетливо демонстрируют

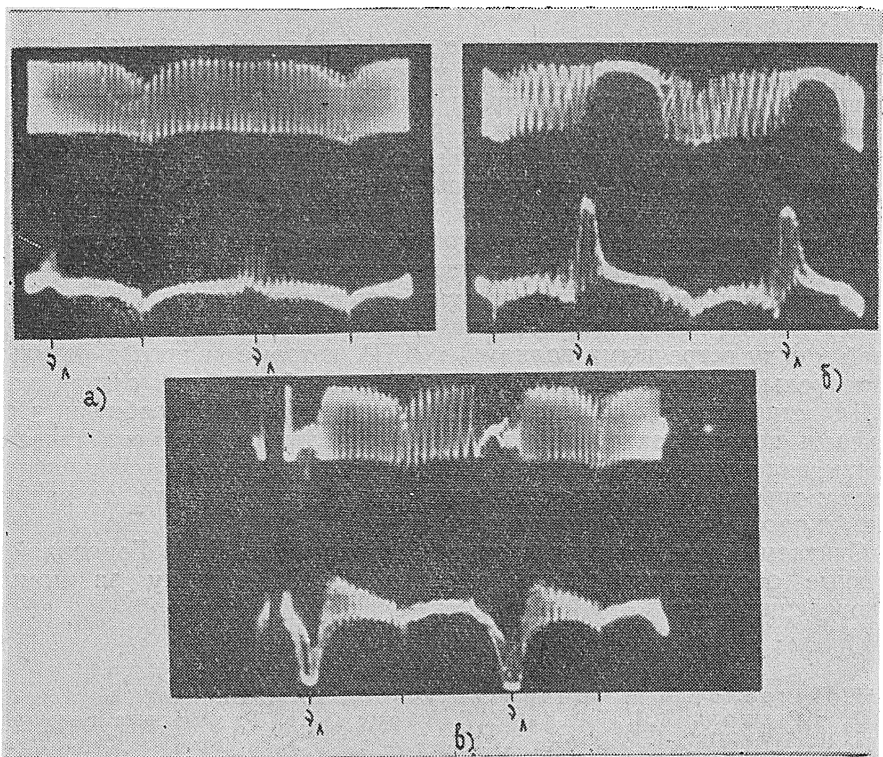


Рис 4.

* Разумеется, изменение длины плеча на λ поворотом пластинки приводило к повторению картины.

** Полоса захвата в наших опытах была в пределах $0,8 \div 2,5$ кГц.

существенную роль небольших изменений длины одного из плеч резонатора.

Выше отмечалось, что вблизи середины спектральной линии активной среды значение ψ при захвате может изменяться и плавно, и резко в зависимости от значения ϵ . Это иллюстрируется рис. 5а, б, полученными описанным выше методом колебания одного из зеркал интерферометра. На рис. 5а изменение ψ плавное, на рис. 5б — «скачок» примерно на π . Переход от одного случая к другому получен поворотом пластинки Д.

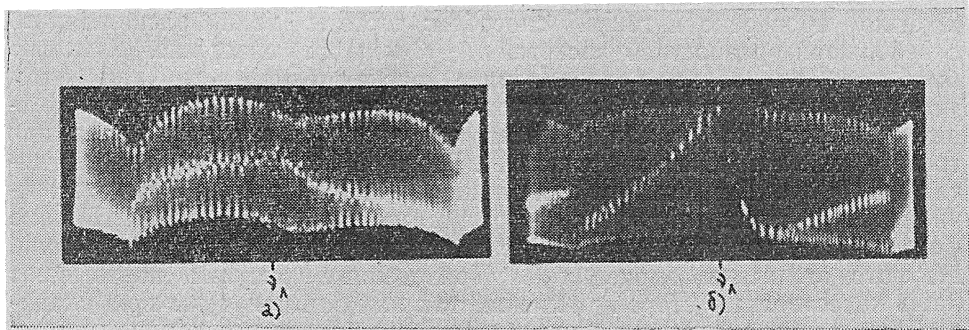


Рис. 5.

Проводились также опыты с дополнительной внешней связью (значительно превышающей внутренние связи между волнами) при помощи внешнего обратно отражающего зеркала, укрепленного на пьезоцилиндре. Опыты показали, в соответствии с результатами работы [2], что изменение фазы обратной связи приводит к ряду явлений, таких как перемещение (относительно середины линии перехода) области однонаправленной генерации и области автоколебаний интенсивностей встречных волн. Частота этих автоколебаний зависит не только от величины обратной связи, что отмечалось в работе [6], но и от ее фазы; в наших опытах значение частоты было в пределах от 0 до ~ 17 кГц.

Результаты настоящей работы показывают, что закономерности связей между встречными волнами в ЛКР, которые являются результатом нескольких паразитных обратных отражений, в общем случае сложны. Для стабильности частоты расщепления волн ЛКР необходима стабильность полосы захвата. Из изложенного следует, что стабилизация частоты колебаний не обеспечит, вообще говоря, постоянства полосы захвата: требуется стабильность всех плеч резонатора или, по крайней мере, их пропорциональное малое изменение.

Считаем своим долгом выразить благодарность К. А. Горониной за полезные обсуждения работы, а также Ю. К. Казарину за помощь в проведении опытов.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Е. Привалов, В. А. Фридрихов, УФН, **97**, 377 (1969).
2. С. А. Бидихов, П. С. Ланда, Е. Г. Ларионцев, Радиотехника и электроника, **15**, 529 (1970)
3. И. Л. Берштейн, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, **14**, № 2, 252 (1971).
4. Н. Н. Розанов, Г. Н. Винокуров, О. Б. Данилов, Оптика и спектроскопия, **23**, 624 (1967).
5. И. А. Андропова, Ю. И. Зайцев, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, **9**, № 5, 942 (1966).
6. В. Н. Лисицын, Б. И. Трошин, Оптика и спектроскопия, **22**, 666 (1967).

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE FEEDBACK EFFECT UPON
RING LASER OPERATION

I. A. Andronova, I. L. Bershtein

Backward reflections in ring lasers and their influence on the processes in the system are considered. The results of the experiments made with He-Ne ring laser at the 0.63μ wavelength in a single mode generation regime are given.
