

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ ЛАЗЕРА НА CO_2

*Л. С. Василенко, М. Н. Скворцов, В. П. Чеботаяев,
Г. И. Шершнева и А. В. Шишаев*

В работе осуществлена стабилизация частоты CO_2 лазера методом внутренней нелинейно-поглощающей ячейки, наполняемой CO_2 при температуре 1000°K и давлении 0.1 тор. Получена относительная стабильность частоты $1 \cdot 10^{-10}$ за 1 час при времени усреднения 1 сек. Графическое усреднение записей частоты биений с периодом усреднения 30 сек. дало значение стабильности $4.2 \cdot 10^{-11}$ за 1 час. Изучено влияние изменения давления в поглощающей ячейке, температуры ячейки и разрядного тока на частоту генерации лазера на CO_2 .

Исследованию стабилизации частоты газовых лазеров посвящено большое число работ, в которых были реализованы различные физические принципы частотной дискриминации [1, 2]. Стабилизация частоты лазера на CO_2 представляет большой интерес в связи с возможностями, которые открываются при использовании высокостабилизированного излучения в различных областях науки и техники. В работах [3, 4] сообщалось о стабилизации частоты лазера на CO_2 . В первой из них стабилизация частоты была осуществлена по провалу Лэмба [2] в центре линии усиления. Однако прямые измерения стабильности частоты излучения в [3] не приводились. Авторы [4] провели пассивную стабилизацию частоты CO_2 лазера. Недавно в работах [5, 6] сообщалось о достижении высокой стабильности частоты He—Ne лазеров на $\lambda=0.63$ и 3.39 мкм с внутренними поглощающими ячейками с Ne и CH_4 соответственно. Результаты этих работ убедительно показали эффективность этого метода, основанного на использовании лэмбовского провала в линии насыщенного поглощения. Этот новый метод был предложен в [5, 7, 8]. Настоящая работа посвящена стабилизации частоты CO_2 лазера на $\lambda=9.6$ мкм с помощью нелинейно поглощающей ячейки с CO_2 .

Чувствительность частотного дискриминатора при стабилизации методом нелинейно поглощающей ячейки зависит от ширины и амплитуды пика мощности генерации. Поэтому желательно применять поглотитель с возможно большим коэффициентом поглощения, чтобы иметь возможность работать при низких давлениях газа в поглощающей ячейке и получить малое ударное уширение. Амплитуда и ширина пика существенно зависят также от соотношения параметров поглощения вещества в усиливающей и поглощающей средах. Большая разница в параметрах насыщения может привести к значительному уширению пика и уменьшению его амплитуды в случае, если параметр насыщения поглощающего вещества существенно меньше усиливающего.

Применение в качестве поглотителя молекулярных сред [5, 6] в принципе позволит получить узкие резонансы, ширина которых ограничена лишь пролетными эффектами, так как радиационные времена жизни колебательно-вращательных уровней очень велики (10^{-3} сек.). Удовлетворение перечисленным требованиям в каждом конкретном случае представляет далеко не простую задачу. В основу этой работы были положены наши ранние исследования эффектов насыщения с поглощающей ячейкой в CO_2 [9, 10]. К настоящему времени известно довольно много веществ, поглощающих

излучение CO_2 лазера [11–15]. Как правило, это молекулы типа симметричного, либо асимметричного волчка, которые обладают сложным спектром. Детальное изучение спектра поглощения лазерного излучения проведено лишь для молекулы SF_6 [16], в спектре поглощения которой получены узкие резонансы на некоторых переходах CO_2 лазера. Важное преимущество поглотителя CO_2 заключается в возможности осуществления стабилизации на любом из переходов полос $00^0_1-10^0_0$ и $00^0_1-02^0_0$. Использование линий насыщенного поглощения CO_2 в целях стабилизации затруднено из-за малости коэффициента поглощения. Этот недостаток в некоторой степени компенсируется тем, что параметры насыщения в активной и пассивной ячейках не очень сильно различаются [9]. Исследования, проведенные в [9], показали, что характер насыщения колебательно-вращательных переходов молекул в значительной мере определяется столкновениями. Влияние столкновений состоит в том, что неравновесное распределение по скоростям, возникающее при взаимодействии с сильным полем, эффективно сглаживается. Возникает так называемая однородная подкладка [17, 18]. Для CO_2 давление, при котором провал в центре линии практически исчезает, составляет ~ 1 тор. Малый коэффициент поглощения и замывание провала при сравнительно высоких давлениях вынуждает основную часть длины резонатора отводить под поглощающую ячейку. С другой стороны, при достижении поглощения определенной величины возникают пульсации излучения лазера [9, 11, 12]. Исследованию причин возникновения пульсаций посвящена работа [19]. В этой работе экспериментально определены границы области существования пульсаций и построена качественная теория, позволяющая учесть влияние коэффициентов усиления и поглощения, добротности резонатора, а также констант релаксации усиливающей и поглощающей сред на положение границы устойчивости. Приведенные выше соображения определили конструкцию экспериментальной установки.

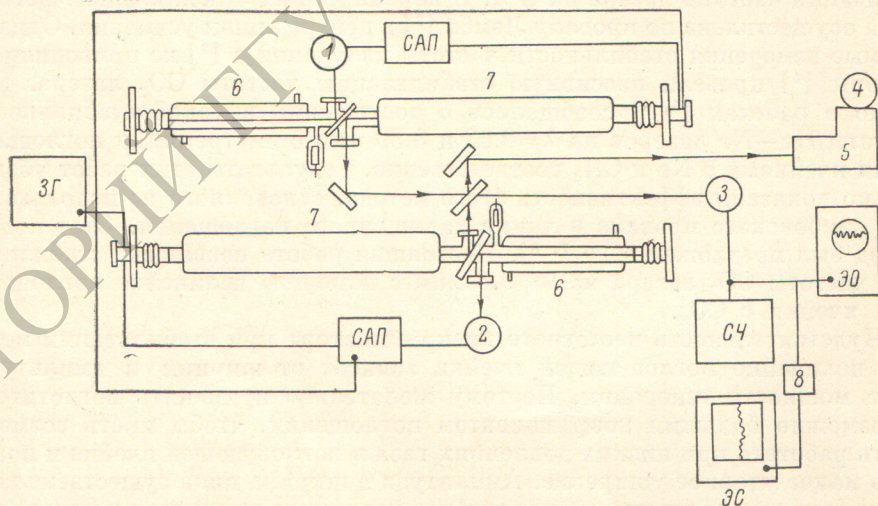


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

1–4 — фотосопротивления $\text{Ge}+\text{Au}$, 5 — монохроматор ИКС-11, 6 — разрядные трубки, 7 — поглощающие ячейки, 8 — линейный преобразователь частота—напряжение, 3Г — звуковой генератор, САП — системы автоподстройки частоты лазеров, СЧ — цифровой частотомер, ЗО — осциллограф, ЭС — самописец.

Конструкция установки и методика эксперимента

Экспериментальная установка состояла из двух аналогичных лазеров, излучение которых сбивалось на фотосопротивлении.

На рис. 1 показана блок-схема экспериментальной установки. Установка была собрана на массивной плите весом в 1 т. Чтобы по возможности развязать систему от вибрационных помех (эксперименты проводились на втором этаже здания), плита была подвешена на пружинах. Борьба

с быстрыми возмущениями, связанными с акустическими помехами, осуществлялась путем звукоизоляции. Для уменьшения температурного дрейфа длины резонаторов лазеров использовались инваровые стержни диаметром 4 см и длиной 183 см (эффект магнитострикции в инваровых стержнях применялся для грубой настройки лазеров на нужную линию полосы). Резонатор каждого из лазеров имел внутренние зеркала и был образован сферическим зеркалом с радиусом 4 м и плоским зеркалом. Одно из зеркал крепилось на пьезоэлектрической керамике. Разрядная трубка имела активную длину 60 см и наполнялась смесью CO_2 , N_2 , He при общем давлении 5 тор. Стенки разрядной трубки охлаждались проточной водой. Поглощающая ячейка была соединена с вакуумной системой, что позволяло наполнять ячейку CO_2 , He, N_2 . Нагреваемые части нелинейно поглощающих ячеек имели длину 80 см. При измерении стабильности частоты излучения стенки ячейки нагревались до температуры 1000°K , и давление CO_2 в них равнялось 10^{-1} тор. При этих условиях и при выходной мощности излучения порядка 1 вт параметры пика были близки к оптимальным. Пик в мощности излучения лазера имел ширину 1.5 Мгц и контрастность $\sim 2\%$. Конструкция лазера показана на рис. 2. Излучение лазера выводилось от окна, разделявшего разрядную трубку и поглощающую ячейку. Окно было изготовлено из BaF_2 , наклон окна к оси трубки отличался на 8° от угла Брюстера. Фтористый барий намного лучше обрабатывается, чем NaCl и, что для нас особенно существенно, имеет большее поглощение в области 10.6 мкм. Это давало возможность подобрать такие режимы работы лазеров, при которых излучение возникает на переходах в области 9.6 мкм без дополнительного селективного элемента. В этой области поглощение CO_2 несколько больше, чем в области 10.6 мкм [20] и выше чувствительность фотодетекторов Ge+Au.

Для каждого из фотоспротивлений 1, 2, 3 тщательно подбирался режим работы, чтобы улучшить отношение сигнала к шуму. В итоге шум определялся флуктуациями в плазме разряда, а отношение амплитуды пика к напряжению шумов в полосе 1 кгц $\sim 3 \cdot 10^3$. Максимальная величина шума плазмы лежала на частоте 1.5–2 кгц.

Лазеры излучали на продольных типах колебаний. Поперечные типы колебаний подавлялись диафрагмами, смонтированными в массивные фланцы лазеров.

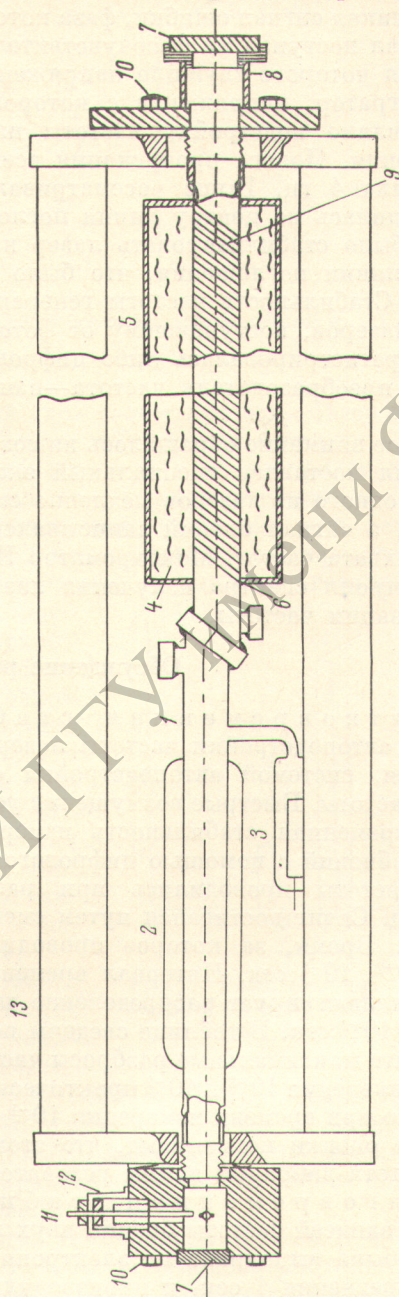


Рис. 2. Конструкция лазера.

1 — разрядная трубка, 2 — кожух водяного охлаждения, 3 — катод, 4 — теплоизоляция, 5 — тепловой экран, 6 — кварцевый резонатор, 7 — зеркало резонатора, 8 — пьезокерамика, 9 — нагревательная спираль, 10 — нагревательная спираль, 11 — винт вакуумной диафрагмы, 12 — сильфон, 13 — инваровый стержень.

Автоподстройка частот излучения лазеров осуществлялась двумя подобными экстремальными системами авторегулирования. Кратко остановимся на работе одной из них. На пьезокерамику лазера подавалось пробное напряжение от звукового генератора (ЗГ) с частотой 10 кгц и амплитудой 0.7 в, что соответствовало амплитуде девиации частоты лазера 40—50 кгц. При расстройке частоты генерации от центра линии поглощения возникал сигнал ошибки, фаза которого зависела от знака расстройки.

Сигнал поступал на фазочувствительный детектор, опорным напряжением для которого служило напряжение от ЗГ. Далее сигнал подавался на интегратор, напряжение с которого поступало на пьезокерамику и осуществляло подстройку частоты излучения лазера к центру линии поглощения. Полоса пропускания всей системы автоподстройки частоты составляла 4 гц. Выше рассматривался случай, когда автоподстройка производилась по центру линии поглощения. Смещая нуль интегратора, можно было стабилизировать лазер на частоте, сдвинутой относительно центра линии поглощения, что было желательно в некоторых экспериментах. Стабильность частоты генерации измерялась по сигналу биений частот лазеров, поступавшему от фотосопротивления Э. Частота сигнала биений регистрировалась либо цифровым частотометром, либо через линейный преобразователь частота—напряжение электронным самописцем (ЭС).

Особое внимание обращалось на возможность захвата частот двух лазеров. Был поставлен специальный эксперимент, состоявший в том, что частота одного из лазеров медленно сканировалась относительно частоты другого, а сигнал биений записывался ЭС. Эксперимент показал отсутствие захвата частот. Монохроматор ИКС-11 и фотодетектор 6 служили для контроля спектра излучения лазеров в процессе настройки систем стабилизации частоты.

Обсуждение результатов

Кратковременная стабильность. Ввиду того что система автоподстройки частоты лазера имела очень узкую полосу пропускания, системой автоподстройки отрабатывались только медленные уходы частоты. Быстрые возмущения устранялись пассивными средствами. Кратковременная стабильность измерялась по распределению отсчетов частоты биений с помощью цифрового частотометра. Измерения стабильности частоты проводились при разности между частотами лазеров ~80 кгц. Сдвиг достигался путем смещения нуля интегратора одного из лазеров. Время, за которое проводились отсчеты частоты, составляло 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} сек. Интервал времени между отсчетами порядка 2 сек. Рис. 3 иллюстрирует распределение частоты биений при времени отсчета частоты 10^{-3} сек. В таблице сведены полученные результаты. Из таблицы видно, что максимальные разбросы частоты биений на один лазер при временах измерения 10^{-3} и 10^{-2} практически совпадают и составляют ~50 кгц. И только при времени измерения 10^{-1} сек. разброс уменьшается до 21 кгц. Простые оценки показывают, что этому случаю соответствует характерная частота вибраций длины резонатора порядка 10 гц.

Долговременная стабильность. На рис. 4 приведена одна из записей частоты биений двух лазеров в зависимости от времени. Запись была выполнена на электронном самописце при постоянной времени усреднения 1 сек. и производилась при расстройке частот лазеров ~40 кгц. В таблице сведены основные результаты обработки полученных данных. При постоянной времени интегрирования 1 сек. получено относительное среднеквадратичное отклонение частоты на один лазер $\Delta\nu/\sqrt{2\nu} \approx 10^{-10}$ за время 10 мин. При длительности измерения 1 час. $\Delta\nu/\sqrt{2\nu}$ составляет $1.5 \cdot 10^{-10}$. Максимальное отклонение частоты на один лазер от средней частоты равно 7 кгц за 10 мин. и 20 кгц за 1 час. Графическое усреднение записей типа, приведенной на рис. 3 с периодом усреднения 30 сек., дает следующие значения: $3.6 \cdot 10^{-11}$ за 10 мин. и $4.2 \cdot 10^{-11}$

Постоянная времени усреднения, сек.	Интервал времени усреднения, мин.	Максимальный уход частоты на один лазер	Относительное среднеквадратичное отклонение частоты на один лазер
10^{-3}	5	$\frac{50}{17^*}$	$5 \cdot 10^{-10}$
10^{-2}	5	$\frac{50}{16^*}$	$5 \cdot 10^{-10}$
10^{-1}	5	$\frac{21}{7^*}$	$3 \cdot 10^{-10}$
1	{	7	$1 \cdot 10^{-10}$
60		20	$1.5 \cdot 10^{-10}$
30	{	2	$3.6 \cdot 10^{-11}$
60		3.1	$4.2 \cdot 10^{-11}$

* Значение ширины распределения отсчетов частоты биений на один лазер, взятое на полувывоте.

за 1 час. В этом случае максимальный уход частоты на один лазер от среднего значения составляет 2 кгц за 10 мин. и 3.1 кгц за 1 час.

Воспроизводимость частоты. На воспроизводимость частоты лазера на CO_2 , стабилизированного методом внутренней нелинейно поглощающей ячейки, оказывают существенное влияние ряд факторов. Одним из наиболее важных и физически интересных из них является сдвиг частоты центра пика в мощности излучения от давления газа в ячейке. На рис. 5 приводятся результаты измерений разности частот двух лазеров при изменении давления CO_2 , He, N_2 в одной из поглощающих ячеек. Сдвиг пика мощности от давления CO_2 составляет в среднем 22 кгц на 0.1 тор. Сдвиг пика мощности от давления азота, наиболее весомой компоненты воздуха, равен в среднем 28 кгц на 0.1 тор. Сдвиги частоты от давления N_2 и He измерялись при $P_{\text{CO}_2} = 0.1$ тор. Предварительные измерения показали, что сдвиги имеют одинаковые знаки и направлены в высокочастотную сторону.

Сдвиг частоты центра пика мощности от давления газа в ячейке не является чистым сдвигом центра линии поглощения из-за столкновений. Это связано с тем, что затягивание частоты излучения к центру линии усиления было в условиях эксперимента того же порядка, что и сдвиг центра линии поглощения из-за столкновений. По нашему мнению, именно затягиванием объясняется нелинейный характер зависимости сдвига пика мощности от давления газа в поглощающей ячейке.

Кроме того, было изучено влияние температуры ячейки и плотности тока разряда на частоту генерации лазера. С помощью многоканальной самописца проводилась одновременная запись температуры стенок ячейки и частоты биений при изменении температуры ячейки одного из лазеров. Обработка полученных записей дает сдвиг частоты ~ 7.5 кгц при изменении температуры ячейки на 100°K .

Сдвиг частоты генерации при изменении тока разряда на ± 2 ма от оптимального (~ 10 ма) лежал за пределами экспериментальной точности (1—2 кгц). Связано это, по-видимому, с тем, что мощность излучения лазера очень слабо зависит от тока разряда вблизи его оптимального значения.

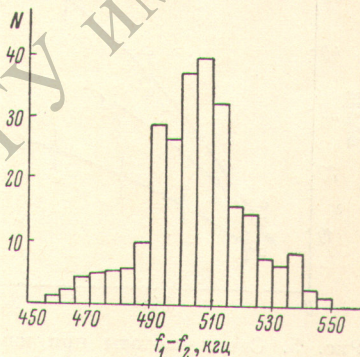


Рис. 3. Распределение отсчетов частоты биений. Время измерения 10^{-3} сек.

Проведенные измерения позволяют рассчитать воспроизводимость частоты лазера. Если поддерживать давление в поглощающей ячейке с точностью 20%, т. е. $\pm 2 \cdot 10^{-2}$ тор, и температуру стенок ячейки с точно-

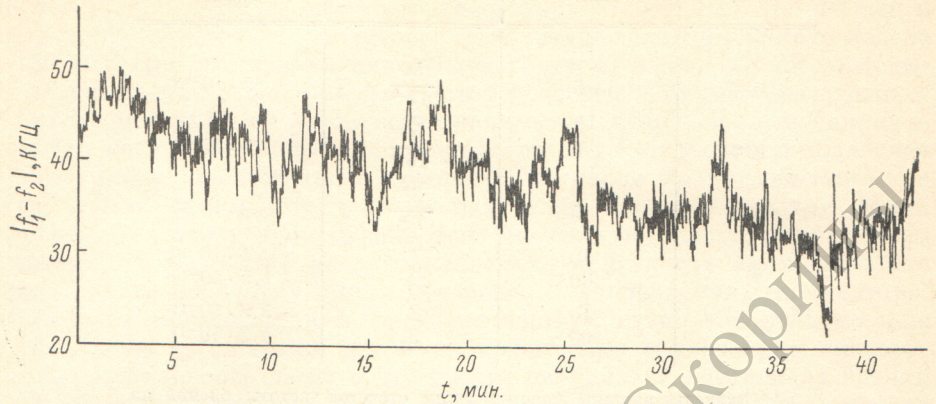


Рис. 4. Запись частоты биений. Постоянная времени интегрирования 1 сек.

стью $\pm 10^\circ \text{C}$, воспроизводимость частоты лазера на CO_2 составит $2-3 \cdot 10^{-10}$. Экспериментально частота лазеров воспроизводилась с точностью не хуже ± 7 кгЦ, что соответствует $\sim 2.3 \cdot 10^{-10}$. Описанные в данной работе эксперименты открывают большие возможности как с точки зрения создания стандарта частоты в инфракрасном диапазоне, так и с точки зрения использования таких лазеров в качестве спектральных приборов, имеющих высокую разрешающую способность.

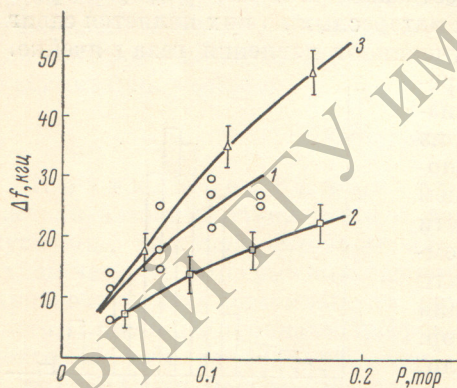


Рис. 5. Сдвиг частоты при изменении давления в ячейке.

1 — CO_2 , 2 — He, 3 — N_2 .

В заключение хотелось бы отметить, что достигнутые значения стабильности целиком определялись качеством используемой электронной аппаратуры. Увеличение полосы пропускания системы автоподстройки и уменьшение дрейфа нуля интеграторов, по-видимому, без особых трудностей позволит на порядок улучшить кратковременную и долгосрочную стабильность.

В заключение хотелось бы отметить, что достигнутые значения стабильности целиком определялись качеством используемой электронной аппаратуры. Увеличение полосы пропускания системы автоподстройки и уменьшение дрейфа нуля интеграторов, по-видимому, без особых трудностей позволит на порядок улучшить кратковременную и долгосрочную стабильность.

Литература

- [1] Н. Г. Басов, В. С. Летохов. Усп. физ. наук, 96, 585, 1968.
- [2] A. D. White. IEEE J. Quantum Electronics, 1, 349, 1965; G. Birnbaum. Proc. IEEE, 55, 1015, 1967.
- [3] C. Borde, L. Henry. Proc. IEEE, QE-4, 874, 1968.
- [4] C. Freed. Proc. IEEE, QE-4, 404, 1968.
- [5] В. Н. Лисицын, В. П. Чеботаев. ЖЭТФ, 54, 419, 1968; S. N. Vagaev, Ju. D. Kolomnikov, V. N. Lisitsyn, V. P. Chebotaev. Proc. IEEE, QE-4, 868, 1968.
- [6] R. L. Barger, J. L. Hall. Phys. Rev. Lett., 22, 4, 1969.
- [7] В. С. Летохов. Письма в ЖЭТФ, 6, 597, 1967.
- [8] P. H. Lee, M. L. Skolnick. Appl. Phys. Lett., 10, 303, 1967.
- [9] Ю. В. Бржазовский, Л. С. Василенко, В. П. Чеботаев. ЖЭТФ, 54, 2095, 1968; Ju. V. Brzhazovskiy, V. P. Chebotaev, L. S. Vasilenko. Proc. IEEE, QE-5, 146, 1969.
- [10] С. Н. Багаев, Л. С. Василенко, В. Н. Лисицын, В. П. Чеботаев, Г. И. Шершнева, А. В. Шишаев. Всес. симп. по физике газовых лазеров, тезисы, Новосибирск, 1969; Л. С. Василенко, Г. И. Шершнева, В. П. Чеботаев. Опт. и спектр., 29, 204, 1970.
- [11] O. R. Wood, S. E. Schwars. Appl. Phys. Lett., 11, 88, 1967.

- [12] Н. В. Карлов, Г. П. Кузьмин, Ю. И. Петров, А. М. Прохоров. Письма в ЖЭТФ, 7, 175, 1968.
- [13] T. I. Chong. C. N. Wang. Appl. Phys. Lett., 15, 157, 1969.
- [14] S. Marcus. Appl. Phys. Lett., 15, 369, 1969.
- [15] I. Ohtsuka, H. Joshinaga. Japan J. Appl. Phys., 8, 1919, 1969.
- [16] Н. Г. Басов, О. Н. Компанец, В. С. Летохов, В. В. Никитин. Препринт ФИАН, № 37, 1970.
- [17] А. Г. Казанцев, Г. И. Сурдутович. Тр. Симп. по нелинейной оптике, 118. Новосибирск, 1966.
- [18] А. П. Кольченко, С. Г. Раутиан. ЖЭТФ, 54, 959, 1968.
- [19] Ю. В. Бржазовский, Л. С. Василенко, Г. С. Попова, С. Г. Раутиан, В. П. Чеботаев. ЖЭТФ, 61, 500, 1971.
- [20] A. D. David, H. P. Orpenheim. Appl. Opt., 8, 2121, 1969.

Поступило в Редакцию 16 сентября 1970 г.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скоринны