

В. П. КОРОНКЕВИЧ, В. А. ХАНОВ
(Новосибирск)

ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫХ ЛАЗЕРОВ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ПО ПРОВАЛУ ЛЭМБА

Первые промышленные стабилизированные лазеры, предназначенные для целей интерферометрии, были исследованы Энгельгардом [1]. Низкая технология их активных элементов не позволила получить высокую воспроизводимость частоты. Для лазеров модели 119 фирмы «Spectra-Physics» она равнялась $1 \cdot 10^{-7}$ за 800 часов работы. Более поздние исследования [2, 3] показали, что длина волны излучения гелий-неонового лазера, стабилизированного по провалу Лэмба, зависит от давления и состава рабочей смеси, конфигурации газоразрядной трубки, скорости диффузии гелия через стенки трубки и без проведения специальной аттестации ей можно приписать значение $0,6329942$ мкм с погрешностью $2 \div 3 \cdot 10^{-7}$. Уточнение длины волны по величине давления гелия и неона в активном элементе по графику Энгельгарда [4] не учитывает влияния конфигурации газоразрядной трубки. Это положение наглядно подтверждает рис. 1, на котором точками отмечены результаты измерений длин волн различными авторами. Горизонтальными линиями показаны значения длин волн, вычисленные по значениям давления рабочей смеси и соотношения компонентов (приведенным на рисунке) по формулам Энгельгарда. Поэтому каждая конструкция лазера требует тщательных исследований спектральных характеристик излучения, построения градуировочного графика и привязки этого графика к первичному эталону путем аттестации лазера в целом.

Цель предлагаемой работы — определение основных спектральных характеристик излучения гелий-неоновых лазеров, стабилизированных по провалу Лэмба и предназначенных для использования в качестве источника когерентного излучения в устройствах для измерения преци-

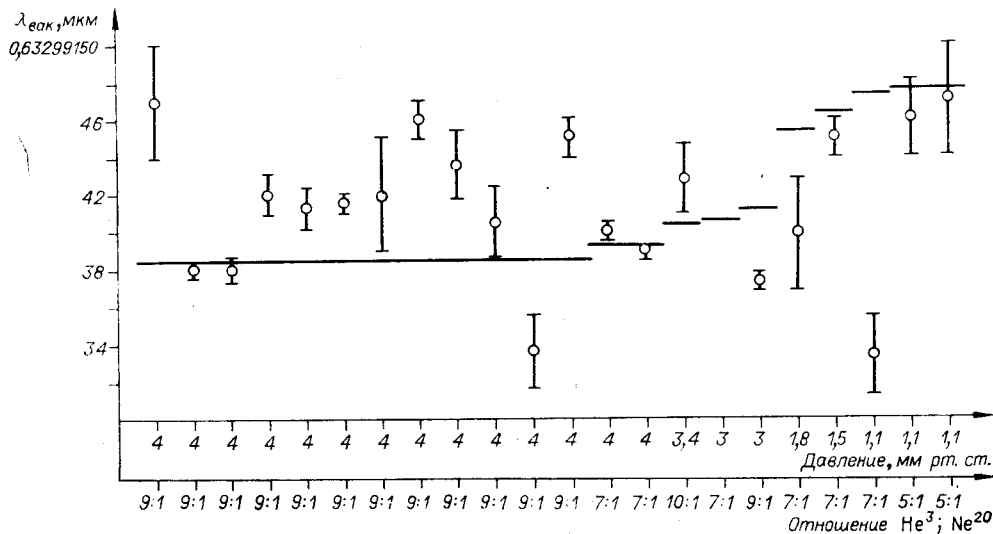


Рис. 1.

зирных линейных перемещений в звуковом диапазоне времени. Из-за нестабильности частоты исследуемых лазеров, проводить сравнение их длин

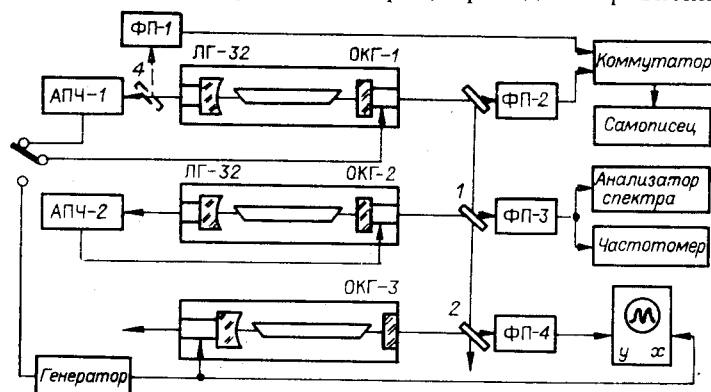


Рис. 2.

волн, изучать смещение частоты излучения при изменении параметров резонатора и схемы АПЧ.

Для выделения разностной частоты излучения ОКГ-1 и ОКГ-2 смешивались на полупрозрачной пластине 1 и направлялись на фотоприемник ФП-3. С его выхода сигнал поступал на частотомер и анализатор спектра. Последний использовался для визуального наблюдения за мгновенным значением и шириной спектра разностной частоты, а частотомер — для измерения нестабильности частоты излучения.

Излучения гетеродина и исследуемых лазеров смешивались на полупрозрачной пластине 2 и направлялись на фотоприемник ФП-4, выход которого подключался к осциллографу. Сканирование частоты излучения гетеродина и горизонтальной развертки осциллографа производилось синусоидальным сигналом от низкочастотного генератора.

Часть луча, отраженная от передней грани прозрачной пластины 3, регистрировалась фотоприемником ФП-1, выходное напряжение которого поступало через коммутатор на самописец поочередно с сигналом от ФП-2.

Нестабильность частоты излучения исследуемых лазеров измерялась по стандартной методике [5]. Результаты измерений сведены в таблицу. Наблюдаемое увеличение нестабильности частоты при больших временах усреднения связано с увеличением вклада медленных флуктуаций частоты в зоне нечувствительности схемы АПЧ и с дрейфом разностной частоты исследуемых лазеров.

Для выявления причин дрейфа разностной частоты были проведены измерения, в которых в качестве опорного лазера использовался лазер, разработанный в Институте автоматики и электрометрии СО АН СССР [6]. Длина волны опорного лазера была аттестована путем сличения с Государственным специальным эталоном единицы длины для спектро-

* Технические характеристики исследуемых лазеров: длина волны генерации 0,63 мкм; спектральный состав излучения одночастотный; мощность излучения не менее 0,1 мВт; гарантийная долговечность 1500 ч; габариты лазера без схемы АПЧ и блока питания 313×77×85 мм; прибор рассчитан на эксплуатацию в нормальных климатических условиях.

Время усреднения, с	10^{-1}	10^0	10^1	10^2
Время измерения, мин	5	10	30	60
Среднеквадратичное отклонение, МГц	1,59	0,74	0,86	1,65
Нестабильность частоты излучения	$3,4 \cdot 10^{-9}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$3,5 \cdot 10^{-9}$

скопии во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Измерения показали значительные (до 90 МГц) отклонения частоты излучения исследуемых лазеров от частоты аттестованного лазера и непрерывный дрейф значения разности частот в течение первых 2,5—3 часов. После 3 часов дрейф частоты практически прекращался, но установившееся значение разностной частоты при повторных экспериментах не воспроизводилось. Проверка стабильности частоты излучения аттестованного лазера показала, что уходы разностной частоты не превышали 1 МГц за 8 часов непрерывной работы.

Анализ полученных результатов позволил выявить основные причины, вызывающие значительный дрейф и уходы частоты излучения исследуемых лазеров: присутствие в спектре излучения поперечной моды TEM_{01} ; влияние обратных отражений от нерабочей поверхности плоского зеркала; статическая и динамическая ошибка схемы АПЧ.

Ниже более подробно рассматривается влияние этих факторов. Исследование имеющихся образцов показало, что при точной настройке зеркал резонатора исследуемые лазеры работают в режиме генерации как основной продольной моды TEM_{00} , так и моды с поперечным индексом TEM_{01} . Наличие в спектре излучения поперечной моды, частота которой на 180 МГц выше частоты основной, приводит к появлению в мощности излучения дополнительной переменной составляющей с частотой поискового сигнала схемы АПЧ. Так как амплитуда и фаза суммарного переменного сигнала будут зависеть от взаимного расположения мод, то стабилизируемое значение частоты основной моды будет смещено относительно центра линии усиления. Величина смещения будет зависеть от уровня генерируемой поперечной моды. На рис. 3 показано положение меток нулевых биений, возникающих при совпадении частот гетеродина ОКГ-3 и стабилизируемого исследуемого ОКГ-1 по отношению к центру провала Лэмба.

Таким образом, если не принимать специальных мер для исключения генерации поперечной моды, то частота излучения основной моды может быть смещена до 90 МГц от номинального значения.

При дальнейших измерениях отсутствие поперечной моды контролировалось по методу, предложенному в [7]. Для этого перед ФП-2 (см. рис. 2) устанавливалась диафрагма, выделяющая центральную часть пучка. Выходы фотоприемника ФП-1, регистрирующего полный поток излучения, и фотоприемника ФП-2 подключались ко входам двухкоординатного самописца и разъюстировкой одного из зеркал резонатора добивались линейности изменений сигналов с выходов обоих фотоприемников (рис. 4).

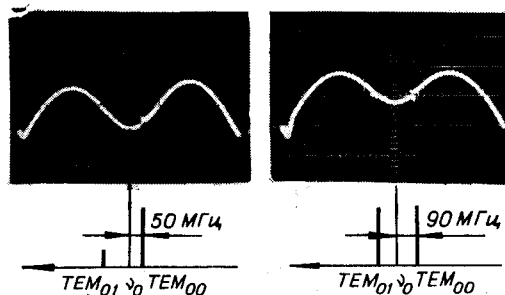


Рис. 3.

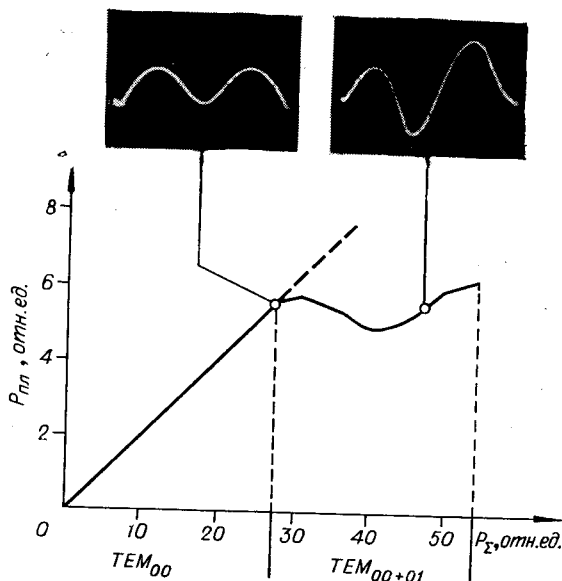


Рис. 4.

Такое зеркало можно рассматривать как пассивный интерферометр, оптическая длина которого увеличивается с повышением температуры. Пропускание зеркала будет зависеть не только от оптической толщины подложки, но и от частоты излучения лазера. Наличие в резонаторе зависящих от частоты потерь приводит к деформации контура мощности излучения и смещению его минимума. Поскольку схема АПЧ подстраивает частоту излучения по минимуму мощности, то стабилизируемое значение частоты будет смещено по отношению к центру линии усиления активной среды. Величина и знак смещения определяются как оптической толщиной подложки (меняющейся при изменении ее температуры), так и параметрами лазера (полными потерями в резонаторе, усилением активного элемента, пропусканием отражающего покрытия плоского зеркала). Измерение величины смещения частоты излучения для конкретных параметров исследуемых лазеров проводилось на установке рис. 2 и заключалось в регистрации изменений частоты и мощности ОКГ-1 при нагревании подложки плоского зеркала (рис. 5). Измерения показали, что нагревание подложки плоского зеркала на 6°C приводит к изменению пропускания плоского зеркала $T_{пл}$ от его максимального значения $T_{пл. max}$ до минимального $T_{пл. min}$. При этом изменение мощности со стороны плоского зеркала $P_{пл}$ и со стороны сферического $P_{сф}$ носит разный характер. Это связано с тем, что при изменении пропускания плоского зеркала от $T_{пл. max}$ до $T_{пл. min}$ $P_{пл}$ вначале увеличивается, проходит максимум, соответствующий оптимальному коэффициенту пропускания плоского зеркала, а затем уменьшается. При этом мощность излучения со стороны сферического зеркала $P_{сф}$ непрерывно увеличивается до своего максимального значения, соответствующего $T_{пл. min}$, а затем при увеличении $T_{пл}$ начинает уменьшаться. Форма провала Лэмба в экстремальных точках изменений пропускания плоского зеркала $T_{пл}$ симметричная и при отклонении $T_{пл}$ от этих точек значительно искажается (см. рис. 5). Это, в свою очередь, приводит к сдвигу частоты, достигающему ± 28 МГц.

В связи с влиянием обратных отражений от нерабочей поверхности плоского зеркала на параметры излучения были измерены стабильность мощности излучения и время установления ее номинального значения

Было установлено, что работа исследуемых лазеров на основной моде происходит при мощности, составляющей 40—50% от максимальной, а начальная разъюстировка зеркал приводит к большей чувствительности резонатора к угловому положению зеркал и предполагает постоянный контроль наличия поперечной моды.

Не менее важным фактором является влияние обратных отражений от нерабочей поверхности плоского зеркала на частоту излучения. Это влияние вызвано тем, что подложки зеркал у исследуемых образцов лазеров выполнены без клина.

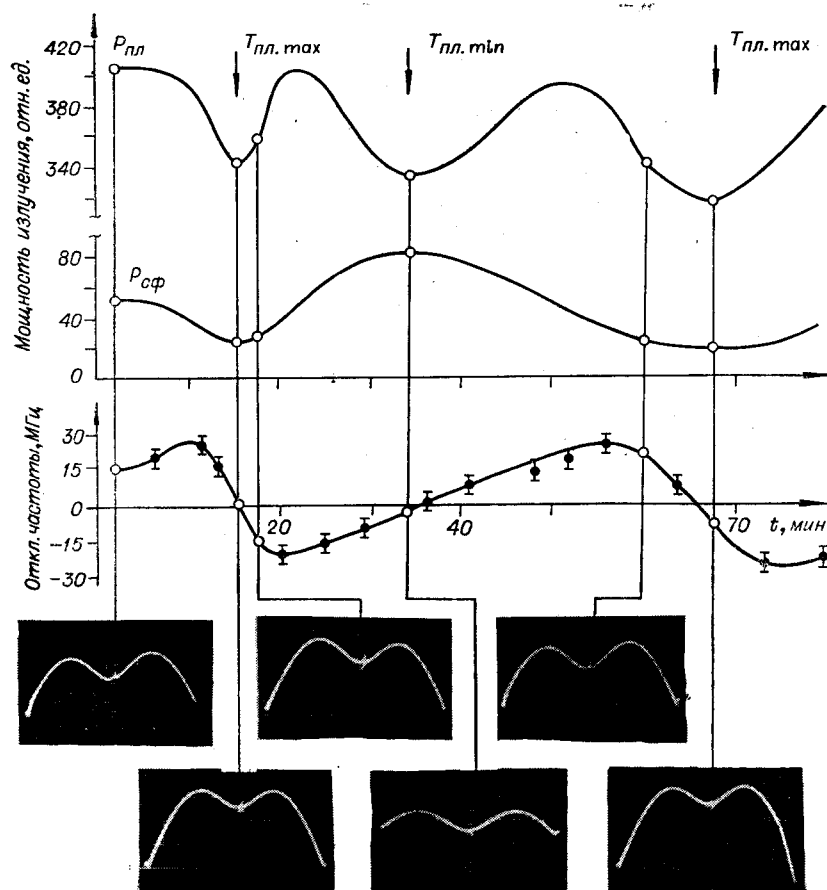


Рис. 5.

с момента включения прибора. Результаты измерений приведены на рис. 6. На этом рисунке, кроме изменений мощности излучения ΔP , приведенных к начальной мощности P_0 , показано изменение длины резонатора Δl и температуры воздуха Δt за первые 3 часа после включения.

Анализ кривых рис. 6 показывает, что все исследуемые лазеры имеют значительную нестабильность мощности излучения (до 60%), а время установления ее номинального значения и прекращения процесса теплового расширения резонатора составляет 1,5 часа.

Схема АПЧ исследуемых лазеров представляет собой экстремальный регулятор с периодическим поисковым сигналом. Принцип работы схемы аналогичен описанным ранее (например, в [8]), а точность характеризуется статической ошибкой, вызываемой конечным усилением звеньев цепи регулирования, неидеальностью характеристик интегратора и наличием зоны нечувствительности. Статическая ошибка измеря-

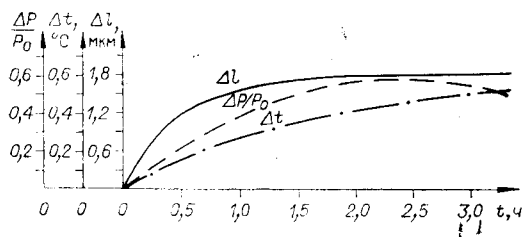


Рис. 6.

лась как максимальный уход частоты излучения исследуемых лазеров при компенсации схемой АПЧ принудительного изменения длины резонатора. При этом измерение смещения частоты проводилось на установке рис. 2, а изменение длины резонатора осуществлялось с помощью источника напряжения в цепи модулирующей пьезоке-

рамики. Измерения проводились при амплитуде девиации частоты излучения, вызванной поисковым сигналом схемы АПЧ, в диапазоне от 5 до 15 МГц, так как уменьшение девиации частоты ниже 5 МГц приводит к заметному увеличению статистической ошибки, а значительное увеличение — к неустойчивой работе схемы АПЧ и ее возбуждению.

Измерения показали, что принудительное смещение резонансной частоты резонатора на 1000 МГц схема АПЧ компенсирует с ошибкой в 3 МГц. Исходя из диапазона компенсируемых изменений резонансной частоты резонатора $\Delta\nu_p = \pm 4000$ МГц (что соответствует изменению напряжения на управляющей пьезокерамике ± 320 В), легко подсчитать максимальную статическую ошибку, равную ± 12 МГц (относительное отклонение частоты излучения от номинального значения $\pm 2,5 \cdot 10^{-8}$). Способность схемы АПЧ отслеживать периодические возмущения измерялась путем принудительного сканирования длины резонатора исследуемого лазера и измерения на анализаторе спектра уходов частоты излучения, вызванных этим воздействием. Сканирование осуществлялось подачей на свободный вход управляющего дифференциального усилителя схемы АПЧ ОКГ-1 известного сигнала от низкочастотного генератора. Коэффициент ослабления схемой АПЧ периодических возмущений вычислялся по величине возмущающего электрического сигнала, при которой амплитуда периодических смещений частоты излучения достигала определенной величины (20 МГц), и коэффициенту передачи пьезокерамики, равному отношению амплитуды изменений частоты излучения лазера (при разомкнутой схеме АПЧ) к амплитуде возбуждающего электрического сигнала.

Результаты измерений приведены на рис. 7, где кривая 1 соответствует девиации частоты излучения $\Delta\nu_m = 9$ МГц и минимальной постоянной времени интегратора $\tau_{\text{и min}}$, а кривая 2 — $\Delta\nu_m = 5$ МГц и $\tau_{\text{и}} = 2\tau_{\text{и min}}$.

Из рис. 7 видно, что диапазон частот, компенсируемых схемой АПЧ, задается коэффициентом усиления в замкнутой цепи регулирования и постоянной времени $\tau_{\text{и}}$. При малой $\tau_{\text{и}}$ схема АПЧ работает неустойчиво и возбуждается на критической частоте, а при слишком большой $\tau_{\text{и}}$ эффективно реагирует только на медленные уходы частоты (менее 0,1 Гц).

Помимо основных функциональных узлов, схема АПЧ содержит вспомогательный релейный каскад, предназначенный для упрощения ее эксплуатации.

В момент включения или при резком некомпенсированном уходе частоты излучения из зоны провала Лэмба схема АПЧ будет стремиться увести ее дальше, пока не установится режим одновременной генерации двух частот. Ввиду конкуренции этих частот такой режим работы лазера является неустойчивым, что приводит к возникновению в цепи регулирования автоколебаний с частотой ~ 80 Гц и появлению на выходе избирательного усилителя большого остаточного сигнала. Исключение одновременной генерации ОКГ двух частот должен обеспечить релейный

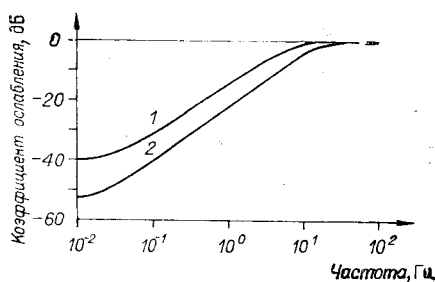


Рис. 7.

каскад, подключенный к выходу избирательного усилителя и содержащий амплитудный детектор, генератор тактовой частоты и триггер со счетным входом. Сигнал с выхода избирательного усилителя, соответствующий двухчастотному режиму генерации, детектируется амплитудным детектором и запускает генератор тактовой частоты ($\sim 1,5$ Гц). Первый же импульс тактовой частоты переводит счетный триггер в новое состояние. Контакты реле, включен-

ного в одно из плечей счетного триггера, изменяют напряжение на модулирующей пьезокерамике. Скачок напряжения выбран таким, чтобы изменение длины резонатора происходило на $\lambda/4$, что соответствует смещению резонансных частот резонатора на половину их интервала. Таким образом, если после скачкообразного изменения длины резонатора частота излучения оказывается в зоне провала Лэмба, то сигнал ошибки уменьшается, генератор тактовых импульсов перестает работать и схема АПЧ подстраивает частоту излучения лазера к центру провала Лэмба.

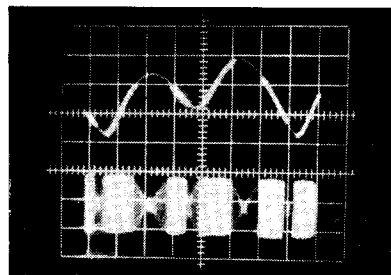


Рис. 8.

Амплитудный признак выявления режима генерации лазером двух частот, положенный в основу работы релейного каскада, справедлив только при малой глубине провала Лэмба (т.е. при малой выходной мощности излучения). Это связано с тем, что с увеличением глубины провала крутизна его склонов становится сравнимой с крутизной склонов контура мощности в области двухчастотной генерации и амплитуды сигналов на выходе избирательного усилителя в этих точках становятся примерно равными. Кроме того, из-за малого динамического диапазона избирательного усилителя сигнал на его выходе значительно ограничивается. Это хорошо видно из рис. 8, где приведены осциллограммы изменения мощности излучения исследуемого лазера и соответствующего изменения сигнала на выходе избирательного усилителя. Так как модуляция яркости луча осуществлялась выходным сигналом генератора тактовой частоты схемы АПЧ, то более яркие участки осциллограммы соответствуют срабатыванию релейного каскада. На рис. 8 показано, что при номинальной мощности излучения исследуемых лазеров работа релейного каскада становится ненадежной, а его ложные срабатывания при небольших отклонениях частоты излучения от центра провала делают лазеры практически не пригодными к эксплуатации. Положение усложняется тем, что в исследуемой схеме АПЧ отсутствует индикатор, регистрирующий наличие в ней сбоев.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Исследуемые лазеры непригодны для интерференционных измерений длины, где требуется долговременная стабильность и воспроизводимость частоты излучения порядка $5 \cdot 10^{-8}$.
2. Аттестация длины волны этих лазеров путем сравнения с первичным эталоном нецелесообразна, так как их спектральные и энергетические характеристики излучения зависят от индивидуального исполнения резонатора и схемы АПЧ.
3. Улучшение параметров излучения исследуемых лазеров возможно за счет изменения конструкции резонатора, устранения ошибок в изготовлении прибора и совершенствования схемы АПЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Engelhard. Wellenlängenstabilität eines He-Ne Laser.—“Zeitschrift für angewandte Physik”, 1966, Bd 20, № 5.
2. K. D. Mielenz. Reproducibility of He-Ne laser wavelengths at 633 nm.—“Appl. Opt.”, 1968, vol. 7, № 2.
3. И. А. Калинин, Е. И. Латышева, Ю. П. Ефремов. Смещение частоты генерации лазеров на постоянном токе.—«Опт. и спектр.», 1970, т. 29, № 5.
4. E. Engelhard, Kamal Abdel-Nady Mohamed. Pressure-wavelength relationship of the 6328Å He-Ne laser emission.—“J. Opt. Soc. Amer.”, 1971, vol. 61, № 2.
5. И. М. Бетеров, Ю. А. Матюгин, Г. А. Милушкин, Б. И. Трошин,

- В. П. Чеботаев, Высокостабильный газовый лазер на основе нелинейного поглощения ($\lambda=0,63$ мкм). Ч. 5.— «Автометрия», 1974, № 6.
6. Научно-технический отчет по теме: «Разработка и исследование новых методов интерференционного преобразования одночастотного и многочастотного излучения». Гос. регистрация № 71075724. (ВНЦТИ № Б353457). Новосибирск, Изд. ИАЭ СО АН СССР, 1973.
7. Ю. В. Троицкий. Осциллографическая регистрация появления внеосевых мод в газовом ОКГ.— «ПТЭ», 1973, № 2.
8. А. И. Лохматов, В. А. Ханов. Система стабилизации частоты газового лазера по провалу Лэмба.— «Автометрия», 1971; № 1.

Поступила в редакцию 10 апреля 1975 г.

УДК 621.317.77:531.7

В. П. БЕССМЕЛЬЦЕВ, В. Н. БУРНАШОВ, В. В. ВОРОБЬЕВ
(Новосибирск)

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ДАЛЬНОСТИ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМИ ИНТЕРФЕРОМЕТРАМИ

Измерение сдвигов фаз* двух сигналов в настоящее время, за редкими исключениями [1], производится при одинаковых частотах сигналов, а пределы однозначного измерения составляют $0 \div 360^\circ$. Такие измерения выполняются, например, с помощью триггерных или компенсационных фазометров. Однако для измерения перемещений системами, использующими в качестве датчика двухчастотный интерферометр (а также поворотный или линейный индуктосины), или для измерения расстояний в различного рода дальномерах необходимы кумулятивные фазометры, позволяющие однозначно и с точностью до малых долей периода опорного сигнала измерять сдвиг фаз двух сигналов (опорного — постоянной частоты и информационного — в общем случае переменной частоты) в широком диапазоне его изменения, на много порядков превосходящем период опорного сигнала. В настоящее время возможности таких фазометров полностью не используются: в двухчастотных лазерных измерителях перемещений измерение сдвига фаз опорного и информационного сигналов осуществляется с точностью только до периода опорного сигнала, а в лазерных дальномерах используется «набор» фиксированных частот сигнала и гетеродина, что позволяет косвенно определять кумулятивный сдвиг фаз опорного и информационного сигналов. По этой причине в современных лазерных измерителях перемещений и дальномерах используются разнородные блоки электронной обработки сигналов. Применение кумулятивных фазометров позволяет устранить указанную разнородность и совместить функции измерения перемещения и расстояния в одном устройстве. С этой целью рассмотрим в обобщенном виде зависимость выходной величины этих измерителей — сдвига фаз — от измеряемого и паразитных параметров. Простейшая схема измерения перемещения или расстояния по величине сдвига

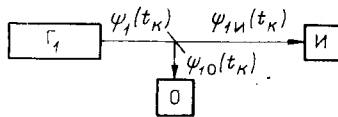


Рис. 1.

* Определения «разность фаз» и «сдвиг фаз» в литературе используются как синонимы одного и того же понятия. Здесь же определение «разность фаз» будет использоваться в обычном смысле, а определение «сдвиг фаз» — для обозначения приращения разности фаз.