

## ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ HCN-ЛАЗЕРЫ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА

М. И. ДЗЮБЕНКО, Ю. Е. КАМЕНЕВ, В. П. РАДИОНОВ

В работе приведены результаты экспериментальных исследований газоразрядных HCN-лазеров терагерцевого диапазона, обобщены многочисленные исследования особенностей их работы. Рассмотрены новые типы лазерных резонаторов и новые разновидности зеркал, а также усовершенствованные способы накачки газоразрядных лазеров. Представлены лазерные резонаторы с плавной регулировкой вывода излучения, и резонаторы, не требующие точной юстировки зеркал. Все это позволило улучшить параметры терагерцевых лазеров и расширить область их применения.

*Ключевые слова:* газоразрядный лазер, терагерцевый диапазон, резонатор, активное вещество.

### ВВЕДЕНИЕ

Терагерцевый (ТГц) диапазон, занимающий область частот от 0,1 до 10 ТГц, которая охватывает коротковолновую часть миллиметрового диапазона, а также весь субмиллиметровый диапазон и часть дальнего инфракрасного диапазона в настоящее время интенсивно осваивается. Это связано с тем, что терагерцевые волны обладают рядом специфических особенностей, делающих их привлекательными для решения широкого круга научных и прикладных исследований. Однако существует острый дефицит источников излучения этого диапазона. Большинство оптических и радиочастотных источников не эффективны в этом диапазоне. Одними из наиболее доступных источников ТГц-излучения являются лазеры субмиллиметрового диапазона длин волн  $\lambda = 1\text{ мм} \dots 0,1\text{ мм}$  (0,3...3ТГц). Субмиллиметровое лазерное излучение является оптимальным для зондирования высокотемпературной плазмы, поскольку мало поглощается в ней. В субмиллиметровом диапазоне существуют «окна прозрачности» атмосферы, что открывает возможности для решения целого ряда задач астрономии, локации и передачи информации. Кроме того большой интерес вызывает использование субмиллиметрового излучения в медицине и биологии для диагностики и лечения заболеваний, исследования различных процессов и биообъектов, а также для решения целого ряда прикладных задач.

Лазерная генерация в субмиллиметровом диапазоне впервые была получена в 1964 году в газоразрядном лазере на соединениях, содержащих группу CN [1]. С того времени работы по развитию ТГц-лазеров проводились во многих странах. Серьезную конкуренцию газоразрядным лазерам составили лазеры с оптической накачкой [2], генерирующие на множестве длин волн в диапазоне от мм до десятков мкм. На сегодняшний день это наиболее перспективные лазерные источники субмиллиметрового диапазона. Однако газоразрядные лазеры также не потеряли своей актуальности, благодаря относительной простоте конструкции и достаточно высокой мощности излучения, достигающей десятков и сотен милливатт в не-

прерывном режиме. Они успешно используются в различных областях науки, техники и медицины [3, 4]. В качестве активных веществ в лазерах субмиллиметрового диапазона могут использоваться молекулы HCN, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, генерирующие в диапазоне 30...1000 мкм. Наибольший практический интерес представляют газоразрядные лазеры на молекулах HCN, обеспечивающих существенную мощность излучения на длинах волн 337 и 311 мкм, и на молекулах DCN (с изотопом водорода) – на длинах волн 190 и 195 мкм.

В данной работе представлен обзор результатов, полученных в Институте радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины в области создания газоразрядных HCN-лазеров, предназначенных для широкого круга научных и биомедицинских исследований.

### 1. СХЕМА ГАЗОРАЗРЯДНОГО HCN-ЛАЗЕРА

Типичная схема газоразрядного ТГц-лазера с высокочастотной накачкой представлена на рис. 1.

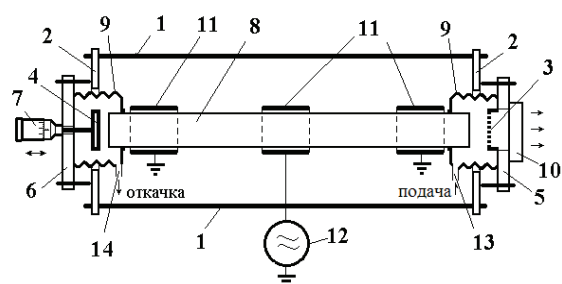


Рис. 1. Схема газоразрядного лазера ТГц-диапазона

Лазер имеет жесткий каркас, образованный стержнями 1 с двумя закрепленными на их торцах диэлектрическими панелями 2. Резонатор образован двумя внутренними зеркалами 3, 4, установленными на юстировочных устройствах 5, 6. Зеркало 3 – частично прозрачное, через него выводится излучение. Зеркало 4 снабжено механизмом перемещения 7. Активное вещество ограничено разрядной трубкой 8, которая одновременно может выполнять функции волновода. Разрядная трубка 8 герметично установлена в сильфонах 9, подсоединенных к юстировочным

узлам 5, 6. Вывод излучения из герметичного резонаторного пространства осуществляется сквозь окно 10. Газовый разряд возбуждается сквозь стенки разрядной трубки при помощи трех цилиндрических электродов 11, установленных снаружи разрядной трубки 8. Центральный электрод подключен к высокочастотному источнику 12, а крайние электроды заземлены. Подача рабочей смеси газов и откачка отработанных веществ производятся через патрубки 13, 14. В HCN-лазере в качестве рабочей среды используется смесь азота и углеводородосодержащих газов при давлении порядка 1 мм рт. ст. Такие лазеры обычно имеют длину резонатора от 0,5 до 3 м, а диаметр зеркал – 40...50 мм, мощность излучения в непрерывном режиме достигает 100 мВт. Расстояние по шкале частот между собственными частотами резонаторов HCN-лазеров обычно больше полосы излучения активного вещества, что предопределяет работу лазера в одномодовом одночастотном режиме. Генерация возможна, когда между зеркалами укладывается целое число полуволн. Поэтому такие лазеры обычно снабжаются механизмом осевого перемещения одного из зеркал.

## 2. СИСТЕМЫ НАКАЧКИ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ТГЦ-ЛАЗЕРОВ

В системах возбуждения импульсным и постоянным током, а также низкочастотным переменным током используются электроды, которые контактируют с разрядным пространством. Такие электроды могут устанавливаться в боковых патрубках разрядной трубки. Для снижения температуры катода используется либо жидкостное охлаждение, либо специальные конструкционные решения, позволяющие снизить его рабочее напряжение и повысить КПД лазера [5, 6]. Могут применяться компактные пленочные электроды, устанавливаемые внутри разрядной трубки [7].

Высокую надежность и компактность имеют наружные коаксиальные электроды [8] (рис. 2). Коаксиальные электроды 2, 3, наружная поверхность которых снабжена воздушным радиатором, герметично установлены на разрядной трубке 1 и подключены к источнику питания 4. Под ними в стенках разрядной трубки имеются отверстия, для возбуждения разряда. Такая система возбуждения применяется в медицинских лазерах [9].

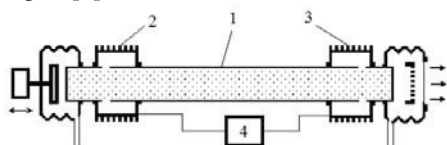


Рис. 2. Схема накачки с коаксиальными наружными электродами, соединенными с внутренним пространством разрядной трубки

Широкое распространение получили системы высокочастотной (ВЧ) накачки (с частотой ВЧ тока несколько единиц или десятков МГц). При ВЧ накачке возбуждение разряда осуществляется сквозь стенки разрядной трубки, что упрощает конструкцию лазера

и повышает его надежность [10]. Для резонаторов длиной до полутора метров обычно применяется схема с тремя цилиндрическими электродами (рис. 1). Крайние электроды заземляются, что предотвращает попадание разряда на зеркала и металлические элементы резонатора. Однако в такой системе может возникать нестабильность газового разряда, вызванная спонтанным перераспределением тока между соседними электродами. Повысить стабильность лазера позволяет система накачки с трансформирующей спиралью [11] (рис. 3).

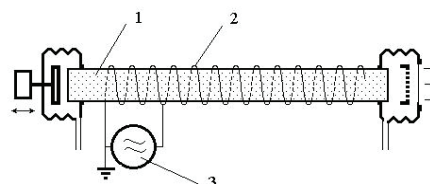


Рис. 3. Система накачки с трансформирующей спиралью

Эта система представляет собой навитую на газоразрядную трубку 1 проволоочную спираль 2, один конец которой заземлен. ВЧ генератор 3 подключен через несколько витков от заземленного конца спирали. Такая система обеспечивает стабильность работы лазера, и позволяет получить генерацию при меньшей мощности накачки. Кроме того, накачку можно осуществлять сквозь рубашку жидкостного охлаждения, что не удается осуществлять при использовании цилиндрических электродов.

Однако существенным недостатком ВЧ накачки является то, что она создает мощные электромагнитные поля, которые вносят помехи в измерительную аппаратуру и превышают нормы, допустимые для медицинского оборудования. Для снижения помех можно использовать переменный ток с частотой 10...100 кГц. Однако на таких частотах происходит интенсивный разогрев разрядной трубки, приводящий к ее пробою под электродами. Устранить эту проблему позволила система накачки с жидкостными электродами [12] (рис. 4). Снаружи цельной разрядной трубки 1 герметично установлены металлические цилиндры 2, 3, заполненные электролитом 4, который служит электродом. К цилиндрам подсоединены расширительные бачки-радиаторы 5, 6 и генератор питания 7. Электролит интенсивно отводит тепло от разрядной трубки, предотвращая ее пробой.

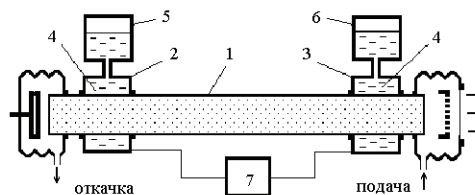


Рис. 4. Схема накачки с жидкостными электродами

Достоинством такой схемы накачки является надежность и отсутствие электромагнитных помех, что позволяет использовать ее в медицинских лазерах.

### 3. ВЛИЯНИЕ ПРОКАЧКИ АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА НА ПРОЦЕСС ГЕНЕРАЦИИ ГАЗОРАЗРЯДНОГО ТГЦ-ЛАЗЕРА

Синтез активного вещества в газоразрядных HCN- и DCN-лазерах происходит в газовом разряде из исходных веществ – азота и углеводородов. При этом образуются побочные вещества, которые необходимо удалять из резонатора. Поэтому в таких лазерах производится прокачка активного вещества, обычно вдоль разрядной трубки. Зависимость мощности излучения от скорости прокачки различна для каждого конкретного лазера, но общим для всех является наличие оптимума прокачки. Рост скорости прокачки до определенных значений вызывает увеличение мощности излучения – происходит интенсивное удаление отработанных веществ, а на смену им поступает свежая рабочая смесь, из которой синтезируются молекулы активного вещества, т. е. возрастает количество активных частиц в резонаторе. Однако с дальнейшим увеличением скорости прокачки происходит снижение мощности. Это можно объяснить удалением из резонатора части активного вещества, а также наличием интервала времени, в течение которого синтезируется молекула активного вещества. За это время частицы вещества перемещаются вдоль резонатора на определенное расстояние, на протяжении которого еще отсутствует активное вещество, хотя имеется и газовый разряд, и рабочая смесь. Исследование влияния этого фактора проведено в работе [13]. Установлено, что средняя продольная скорость частиц активного вещества в условиях газового разряда может достигать 1 м/с при интенсивной прокачке. Время синтеза активного вещества было определено по запаздыванию генерации после включения газового разряда в HCN-лазере с накачкой постоянным током. Перед снятием показаний лазер включался и выводился на стабильный режим. Затем производилось отключение тока накачки на время 10 – 20 с, достаточное для удаления ранее синтезированных молекул активного вещества. На рис. 5 представлены осциллограммы тока накачки и лазерного излучения. Верхний луч осциллографа отображает форму тока накачки (при нарастании тока луч отклонялся вниз), нижний луч отображает форму сигнала лазерного излучения (при нарастании сигнала луч отклонялся вверх). Скорость развертки – 200 мс/дел. Из этих осциллограмм видно, что после включения накачки наблюдалось запаздывание лазерной генерации на время ~ 300 мс (рис. 5). За это время происходит синтез активного вещества.

В лазерах с импульсной накачкой запаздывание генерации может не наблюдаться, если в резонаторе остаются активные вещества, синтезированные во время предыдущих импульсов.

Проведенные исследования показали, что в заполненном газовой смесью резонаторе существует

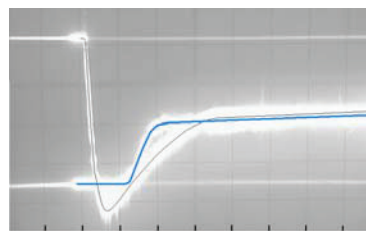


Рис. 5. Осциллограмма тока накачки и интенсивности лазерного излучения при включении лазера

участок, в котором активная среда не создана. Причем с ростом скорости прокачки этот участок приобретает существенный размер, что вызывает снижение мощности и КПД лазера. С целью увеличения мощности излучения лазера этот пассивный участок синтеза активного вещества был выведен нами за пределы резонатора [14]. Проверка данной идеи была выполнена на установке (рис.6,а) с двумя вариантами подачи рабочей смеси: непосредственно в резонатор 1 и в дополнительную разрядную секцию 2.

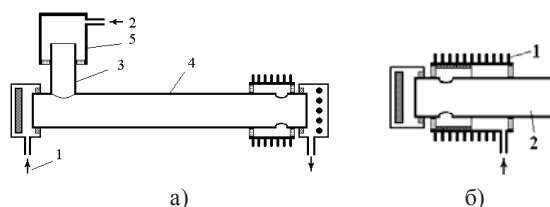


Рис. 6. Схемы резонаторов с дополнительной разрядной секцией

Дополнительной секцией являлся боковой патрубок 3 разрядной трубки 4, на котором установлен электрод 5. Эксперименты показали, что при подаче рабочих веществ в дополнительную разрядную секцию мощность излучения примерно на 20 % выше, чем при подаче непосредственно в резонатор, и эта разница увеличивалась с ростом скорости прокачки. С целью уменьшения габаритов лазера разрядная секция была выполнена в зазоре между коаксиальным электродом 1 (рис. 6, б) и разрядной трубкой 2 [15].

### 4. ВЛИЯНИЕ ПОЛИМЕРНОГО НАЛЕТА НА МОЩНОСТЬ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Существенным фактором, негативно влияющим на долговременную стабильность HCN-лазеров, является оседание на внутренних стенках разрядной трубки полимерного налета, образовавшегося в процессе синтеза рабочего вещества. Как показали исследования, примерно за 200 часов работы лазера такой налет может вдвое снизить его выходную мощность излучения. Продукты испарения полимерного налета изменяют не только давление, но и состава рабочей смеси, поскольку содержат углеводороды. Было установлено, что лазер с загрязненной разрядной трубкой может работать при подаче в нее только воздуха (рис. 7). Повышенная мощность излучения на начальном этапе работы лазера объясняется интенсивным испарением налета, вызванная образованием мно-

жества микротрещин на его поверхности при нагреве. Это увеличивает время выхода лазера на рабочий режим.

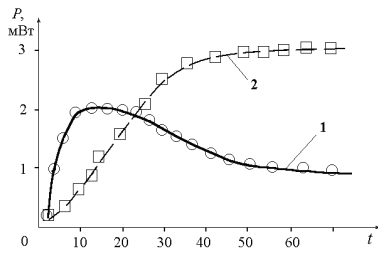


Рис. 7. Экспериментальные зависимости мощности излучения HCN-лазера от времени при использовании полимерного налета в качестве рабочего вещества (1) и штатной рабочей смеси газов (2)

Для устранения проблемы загрязнения полимерным налетом разрядной трубки целесообразно поддерживать ее температуру на уровне 130°C, когда испарение полимерного налета преобладает над его оседанием. Дальнейшее увеличение температуры снижает мощность излучения и отрицательно влияет на элементы конструкции резонатора. Получить нужную температуру можно путем термоизоляции разрядной трубки. Однако поскольку она разогревается неравномерно, то однородная теплоизоляция приводит к перегреву одних участков или не устраняет образование налета на других. Поэтому нами была применена теплоизоляция с избирательной эффективностью. Для изготовления такой теплоизоляции в качестве шаблона использовался предварительно осевший полимерный налет, поскольку его толщина пропорциональна распределению температуры по стенкам разрядной трубки. Толщина теплоизоляции выполнялась пропорциональной толщине полимерной пленки на данном участке. Такой способ термоизоляции позволяет успешно бороться с оседанием полимерного налета без снижения мощности излучения и усложнения конструкции лазера [16].

### 5. ГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОРАЗРЯДНОГО HCN-ЛАЗЕРА

В газоразрядных HCN -лазерах с импульсной накачкой и накачкой переменным током форма импульса излучения зависит не только от формы импульса разрядного тока, но и от настройки резонатора. При перемещении подвижного зеркала может наблюдаться раздвоение импульсов излучения [17]. Это происходит из-за совместного влияния нескольких факторов: длины резонатора, коэффициента усиления активного вещества и влияния разрядного тока на показатель преломления активного вещества. Для получения импульсов излучения требуемой формы необходимо предварительно моделировать их форму. Для этого была разработана графическая методика моделирования формы импульса излучения газоразрядного ТГц-лазера [18]. Исходными данными для моделирования служит группа кривых (рис. 8), построенных

на основании экспериментальных зависимостей мощности излучения от длины резонатора для разных токов накачки (в режиме накачки постоянным током). Максимуму каждой кривой соответствует настройка резонатора на центральную частоту при данном токе накачки.

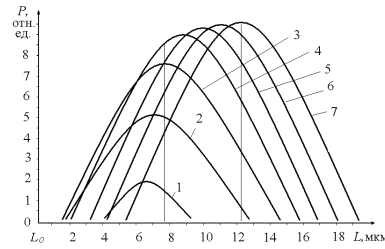


Рис. 8. Группа кривых, построенных на основании экспериментальных зависимостей мощности излучения от изменения положения подвижного зеркала резонатора для различных токов накачки: 1 – 0,15 А, 2 – 0,2 А, 3 – 0,3 А, 4 – 0,4 А, 5 – 0,5 А, 6 – 0,6 А, 7 – 0,7 А

Моделирование осуществляется исходя из формы импульса разрядного тока. На рис. 9 показан пример моделирования для импульса разрядного тока колоколообразной формы (9, а).

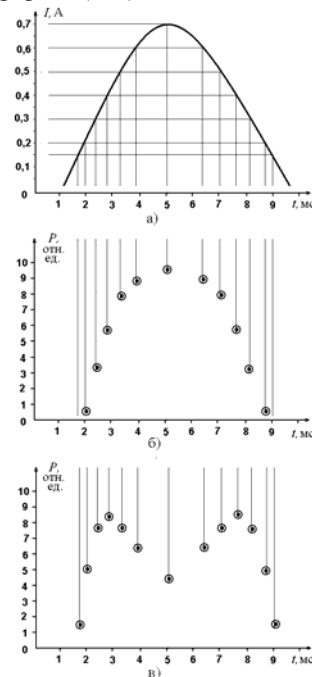


Рис. 9. Импульс тока накачки (а); моделирование импульса излучения, для настройки резонатора при максимальном разрядном токе 0,7А (б) и 0,3А (в)

Мощность излучения в каждый момент времени определяется по пересечению кривых (рис. 8) для текущего значения разрядного тока с вертикальной линией, проходящей через установленную длину резонатора. На рис. 9, б смоделирован импульс излучения, когда резонатор имеет длину  $L_0 + 12$  мкм. На рис. 9, в смоделирован импульс излучения при длине резонатора  $L_0 + 8$  мкм. В этом случае при максимуме импульса тока резонатор оказывается расстроенным, что

приводит к снижению мощности излучения в этой области и раздвоению импульса излучения.

Описанную методику графического моделирования можно использовать для подбора режимов работы импульсных лазеров и лазеров с накачкой переменным током с максимальным КПД. Такое моделирование может быть полезным для внутрирезонаторной амплитудной и частотной модуляции лазерного излучения.

## 6. РЕЗОНАТОРЫ ТГц-ЛАЗЕРОВ

Обычно в ТГц-лазерах применяются резонаторы устойчивой конфигурации, в которых электромагнитная волна совершает замкнутые циклические движения, не покидая резонансную полость. В квазиоптических резонаторах ТГц-лазеров границы устойчивости размыты из-за эффектов, в которых проявляется волновая природа излучения. Часто применяются волноводные резонаторы, в которых разрядная трубка выполняет функции волновода. При этом используются плоские зеркала. Для снижения дифракционных потерь и потерь, вносимых дефектами волновода, одно из зеркал может иметь небольшую вогнутость.

### 6.1. Зеркала ТГц-лазеров

В качестве непрозрачных зеркал в ТГц-лазерах используются металлические зеркала. Частично прозрачными зеркалами обычно служат металлические зеркала с отверстиями и металлические периодические структуры. Металлические зеркала с отверстиями просты в изготовлении и надежны. Периодические структуры обеспечивают малую расходимость выходного пучка и требуемую поляризацию излучения. Наиболее распространены периодические структуры в виде решеток из параллельных проводников [19]. Такие решетки обеспечивают линейную поляризацию излучения, хотя при этом может наблюдаться определенная эллиптичность, обусловленная анизотропией резонатора [20]. Применяются также периодические структуры из отдельных металлических фрагментов или отверстий в металлической фольге [21]. Большой интерес вызывают периодические структуры в виде концентрических металлических колец и радиальных полос [22], которые обеспечивают азимутальную и радиальную поляризацию, придающую ряд полезных свойств лазерному излучению. В частности, излучение, имеющее азимутальную поляризацию легче сфокусировать, с его помощью эффективнее осуществляется сверление и резка материалов. Широкие возможности открывают градиентные периодические структуры [23-25], которые позволяют придать новые свойства традиционным материалам. Нами совместно с коллегами из Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина и Харьковского национального университета радиоэлектроники предложены и разрабатываются градиентные структуры в виде концентрических

металлических колец с изменяющейся в радиальном направлении периодичностью [26]. Такие структуры, выполненные на плоской подложке, обладают свойствами выпуклых или вогнутых зеркал и линз одновременно [27]. Кольцевая периодическая структура, в которой густота колец увеличивается от центра к краям (рис. 10), имеет свойства вогнутого зеркала и фокусирующей линзы.

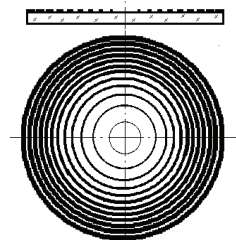


Рис. 10. Кольцевое градиентное частично прозрачное зеркало

Такое выходное зеркало компенсирует дифракционную расходимость излучения внутри резонатора и в выходном пучке.

### 6.2. Зеркала, не требующие точной юстировки

Для стабильности выходных характеристик излучения лазера необходимо, чтобы юстировка зеркал не нарушалась в процессе работы. Эта задача усложняется тем, что в результате газового разряда выделяется большое количество тепла, вызывающее тепловое расширение продольных стержней каркаса лазера. Неравномерность их расширения в пределах нескольких микрон нарушает юстировку и существенно уменьшает интенсивность генерации. Поэтому разработка лазерных резонаторов, зеркала которых не требуют точной юстировки, является актуальной задачей.

В качестве зеркал, не нуждающихся в точной юстировке, нами были использованы трехгранные 90° угольные отражатели, обладающие свойствами возврата излучения строго в обратном направлении. Такие зеркала были выполнены методом гальванического наращивания на металлической оправке (рис. 11).



Рис. 11. Технологическая оправка и зеркало в виде трехгранного 90° отражателя

Резонатор с трехгранными 90° отражателями устойчив к нарушению юстировки [28, 29]. Однако вывод излучения производился с помощью делительной пластины, установленной в резонаторе, что усложняет конструкцию и вносит дополнительные потери. Кроме того, угольные отражатели имеют повышенные

потери за счет трех отражений от их граней. Альтернативой уголкового отражателю стали зеркала в виде отражающей во внутрь  $90^\circ$  конической поверхности [30, 31] (рис. 12). Зеркала могут быть легко изготовлены методом токарной обработки (рис. 12,а,б) либо гальванического наращивания на конической модели (рис. 12,в). Выходное зеркало (рис. 12,а) изготавливалось способом токарной обработки и имеет в центре отверстие для вывода излучения. Как показали измерения применение конических зеркал, изготовленных методом гальванического наращивания (рис.12,в) дают лучшие результаты, что объясняется более качественной отражающей поверхностью.

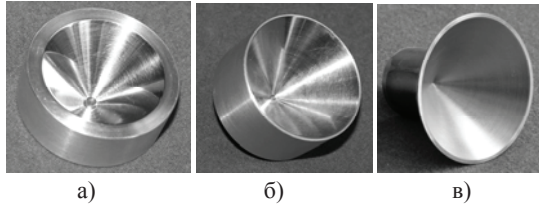


Рис. 12. Конические  $90^\circ$  зеркала

Испытания показали, что перекокс конического  $90^\circ$  зеркала оказывает более чем на порядок меньшее негативное влияние, чем перекокс плоского зеркала (рис. 13).

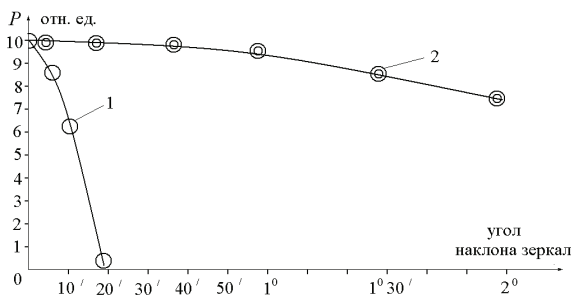


Рис. 13. Экспериментальная зависимость мощности излучения лазера с резонатором, образованным коническим  $90^\circ$  выходным зеркалом и плоским непрозрачным зеркалом, от угла наклона зеркал: 1 – плоского зеркала, 2 – конического  $90^\circ$  зеркала.

Следует отметить, что полезным свойством конических  $90^\circ$  зеркал является также возможность компенсировать дифракционную расходимость пучка излучения, если угол при вершине выполнить несколько меньше  $90^\circ$ .

### 6.3. Комбинированные выходные зеркала резонатора ТГц-лазера

В ТГц диапазоне в качестве линий передачи используются полые диэлектрические волноводы круглого сечения с внутренним диаметром 20 мм. Диаметр разрядной трубки газоразрядных ТГц-лазеров обычно составляет 40...50 мм и такое же сечение имеет пучок лазерного излучения, при использовании периодической структуры в качестве выходного зеркала, либо 5...10 мм при использовании выходного зеркала с отверстием. В обоих случаях возникает проблема согласования лазера с линией передачи. Для решения проблемы согласования нами разработаны

комбинированные выходные зеркала, состоящие из металлического плоского зеркала с отверстием и металлической решетки [32]. Диаметр отверстия соответствует диаметру волновода линии передачи, а шаг решетки обеспечивает оптимальный коэффициент пропускания [33, 34]. Результаты наших исследований по согласованию и фазировке комбинированных отражателей и определения фазового сдвига, вносимого решеткой, представлены в [35]. Показано, что применение комбинированных зеркал, включающих плоское зеркало, весьма эффективно для согласования лазера с линией передачи, однако такие зеркала требуют тщательной юстировки. Поэтому нами было разработано усовершенствованное комбинированное зеркало [36] (рис. 14), состоящее из решетки 1 и конического  $90^\circ$  зеркала 3 с отверстием соосным с осью резонатора 2.

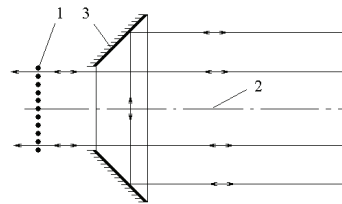


Рис. 14. Комбинированное зеркало лазерного резонатора

Такой комбинированный отражатель проще в юстировке и эксплуатации, кроме того он может компенсировать дифракционную расходимость излучения, если угол при вершине выполнить несколько меньше  $90^\circ$ .

### 6.4. Плавная регулировка обратной связи в резонаторе

Максимальный КПД лазеров достигается только при оптимальной обратной связи, которая обеспечивается путем выбора коэффициента пропускания выходного зеркала. Выходные зеркала имеют постоянные параметры, и подбор оптимальной связи осуществляется путем их замены, что может нарушать юстировку резонатора. К тому же из-за дискретности параметров зеркал трудно точно подобрать оптимум. Но даже тщательно подобранное зеркало не может быть оптимальным на всех режимах работы, т. к. усиление и затухание излучения могут изменяться в процессе работы лазера. Исходя из этого, становится очевидным преимущество плавного изменения обратной связи. Это удалось осуществить в предложенном и детально исследованном ТГц-лазере [37 – 39], схема резонатора которого показана на рис. 15.

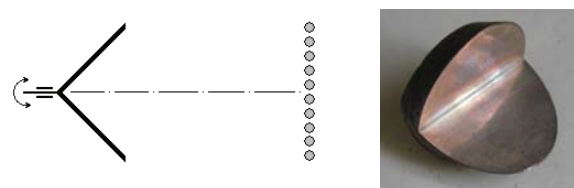


Рис. 15. Схема резонатора ТГц-лазера с регулируемой связью и двугранное  $90^\circ$  зеркало, используемое в нем

Резонатор образован проволочной решеткой и двугранным зеркалом с углом между гранями 90°. Регулирование связи основано на свойстве 90° двугранного зеркала изменять азимут поляризации отраженной волны на угол 2φ, где φ – угол между проволоками решетки и направлением поляризации падающей волны. При осевом повороте двугранного зеркала осуществляется изменение угла между направлением поляризации отраженной волны и направлением проводников решетки. Это позволяет в широких пределах изменять коэффициент пропускания решетки. Угол, обеспечивающий оптимальную связь, равен:

$$\varphi_0 = \frac{1}{2} \arcsin \sqrt{2 \left[ (g_0 L d)^{1/2} - \alpha \right]}$$

где g<sub>0</sub> – коэффициент усиления, α – коэффициент потерь, L – длина активного элемента, d – внутренний диаметр разрядной трубки.

Зависимости мощности лазерного излучения от угла между ребром двугранного отражателя и проволоками представлены на рис. 16.

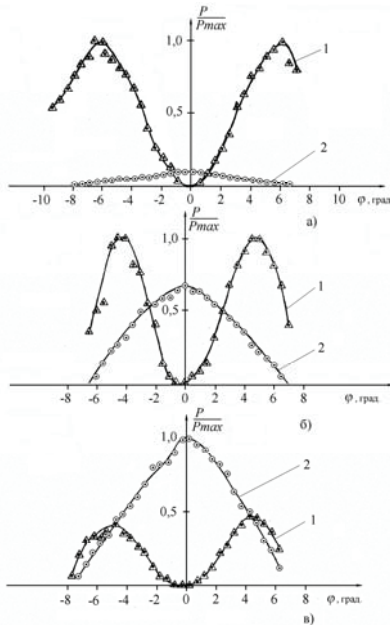


Рис. 16. Графики зависимости мощности лазерного излучения от угла между ребром двугранного зеркала и направлением проволок выходного зеркала (1 – для поляризации, ортогональной проволоке; 2 – для поляризации, параллельной проволоке): а) – шаг решетки 30 мкм, диаметр проволоки 15 мкм; б) – шаг решетки 30 мкм, диаметр проволоки 8 мкм; в) – шаг решетки 60 мкм, диаметр проволоки 15 мкм

Исследования поляризационных характеристик показали, что лазерное излучение содержит два ортогональных компонента и имеет эллиптическую поляризацию.

Предложенная схема резонатора позволяет плавно регулировать обратную связь и может быть применена во всех лазерах, в которых в качестве выходного зеркала используется одномерная решетка.

Наряду с периодическими структурами, в ТГц-лазерах в качестве выходных зеркал используются металлические зеркала с выводными отверстиями. Такие зеркала просты в изготовлении и надежны. Нами предложены и разработаны новые схемы плавной регулировки вывода излучения из резонаторов, содержащих такие зеркала [40 – 44] (рис. 17).

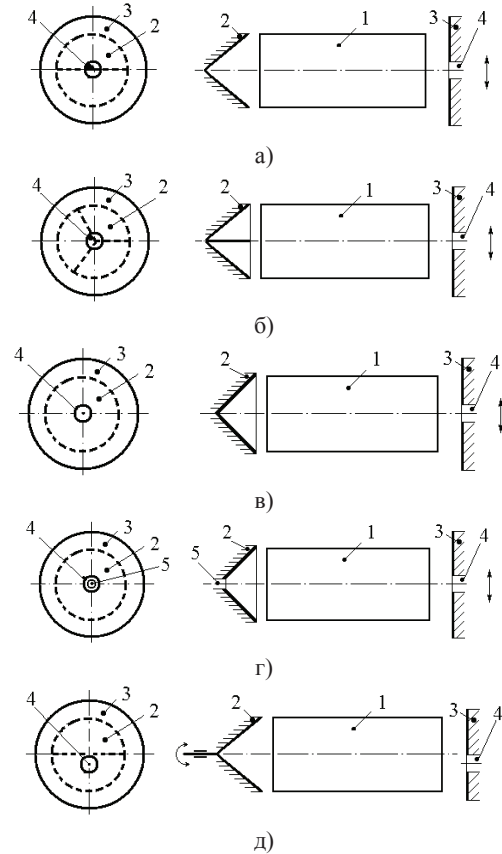


Рис. 17. Схемы резонаторов с плавной регулировкой связи

Активный элемент 1 помещен между зеркалами 2, 3, образующими резонатор. Выходным зеркалом служит металлическое зеркало 3 с отверстием 4. В процессе регулировки выводное зеркало перемещается перпендикулярно оси резонатора (рис. 17, а-г). В качестве второго зеркала в таких резонаторах могут использоваться двугранное 90° (рис. 17, а, д), трехгранное 90° (рис. 17, б) или коническое 90° (рис. 17, в, г) зеркала. Принцип регулировки основан на том, что пучок излучения, попавший на вершину трехгранного и конического, либо на ребро двугранного отражателя возвращается обратно практически по тому же пути. В иных случаях пучок отражается по другому пути, испытывая диаметральный «переворот».

Принцип регулировки показан на примере резонатора с двугранным зеркалом (рис. 18). В случае, когда отверстие 4 проецируется на ребро двугранного зеркала (рис. 18, а), из резонатора выводится только излучение, которое попадает на отверстие 4. Остальная часть излучения многократно отражается от зеркал и усиливается в активной среде. Излучение из зоны многократного отражения попадает в зону вы-

вода вследствие дифракции. Связь между этими зонами может быть увеличена при использовании вогнутого выходного зеркала 3 либо конического зеркала с углом несколько меньше  $90^\circ$ .

Для увеличения доли выводимого излучения необходимо сместить зеркало 3, чтобы центр отверстия 4 сместился относительно ребра зеркала 2 (рис. 18, б). Тогда в зону вывода попадает также некоторая часть излучения, которое находится за пределами отверстия 4. Часть выводимого излучения продолжает расти при дальнейшем смещении зеркала 3 до тех пор, пока оно не сместится на половину диаметра отверстия 4. При таком положении часть выводимого излучения приблизительно удваивается. Это и составляет диапазон регулировки. Сечение выходного пучка излучения при регулировке не изменяется.

При использовании двугранного зеркала регулировку можно осуществлять также путем поворота его вокруг оси резонатора [40], но при этом отверстие 4 должно быть выполнено не в центре зеркала 3 (рис. 17, д).

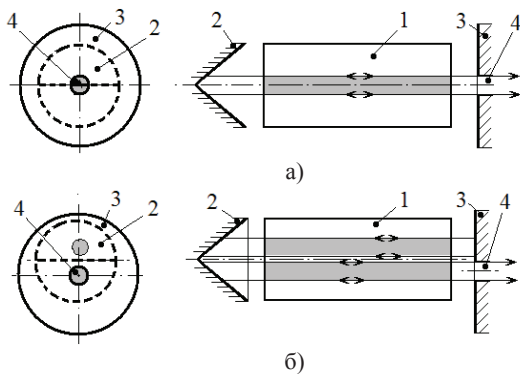


Рис. 18. Пределы регулировки лазерного резонатора, содержащего двугранное  $90^\circ$  зеркало: а) выводится минимальная часть излучения, б) выводится максимальная часть излучения

Резонатор с трехгранным зеркалом более стабилен, чем резонатор с двугранным зеркалом, поскольку нарушение юстировки трехгранного зеркала оказывает меньшее негативное влияние на процесс генерации. Однако в трехгранном зеркале больше потерь излучения, за счет трех отражений от его граней. В обоих этих зеркалах присутствуют потери излучения на ребрах. Это обусловлено волновыми свойствами излучения и не идеальностью исполнения ребер. Схема с коническим зеркалом лишена многих недостатков предыдущих схем. Однако коническое зеркало также имеет в центре зону повышенных потерь. Для устранения этих потерь разработана схема резонатора с двусторонним выводом излучения [49, 50] (рис. 17г). Эта схема отличается тем, что в центре конического зеркала 4 имеется дополнительное отверстие 5 для вывода излучения на устройства контроля и управления лазером. Это позволяет не отвлекать часть излучения от основного выходного пучка на приборы кон-

троля, а использовать для этого примерно ту часть излучения, которая терялась бы на вершине конуса.

Данные схемы регулировки обратной связи могут быть реализованы в действующих ТГц-лазерах без существенного изменения их конструкции. Недостатком данных схем является малый диапазон регулировки.

Регулировку обратной связи в широких пределах можно осуществить с помощью дополнительного подвижного зеркала. При этом важно, чтобы оно не вносило потери в резонатор, а направление выходного пучка излучения не изменялось. Большие перспективы имеют резонаторы с активным элементом кольцевого сечения, обеспечивающие высокую однородность накачки. Регулировку вывода излучения в таких резонаторах удалось осуществить с помощью коаксиальной системы конических зеркал [45] (рис. 19).

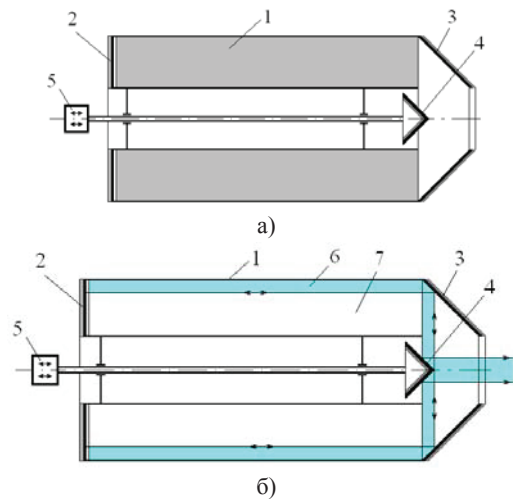


Рис. 19. Схема широкодиапазонного лазерного резонатора с плавной регулировкой вывода излучения (а), ход лучей в резонаторе (б)

В данной схеме на одном торце активного элемента кольцевого сечения 1 расположено плоское кольцевое зеркало 2. На противоположном торце расположено кольцевое  $90^\circ$  коническое зеркало 3. В центре зеркала 3 расположено выводное коническое  $90^\circ$  зеркало 4, снабженное механизмом перемещения 5. Регулировка вывода излучения осуществляется путем перемещения зеркала 4 вдоль оси резонатора. Зеркало 4 разделяет объем активного элемента на две зоны: зону генерации 6 и зону усиления 7. В зоне 6 излучение многократно отражается от зеркал 2, 3, а в зоне 7 – выводится из резонатора. Излучение попадает из зоны 6 в зону 7 вследствие дифракции. Перемещение конического зеркала 4 вдоль оси резонатора меняет соотношение объемов зон 6 и 7, а, следовательно, изменяет долю выводимого излучения. В одном крайнем положении (когда на зеркало 4 совсем не попадает излучение) излучение из резонатора не выводится, во втором крайнем положении (когда на зеркало 4 попадает все излучение) из резонатора выводится все излучение. Оптимальная обратная связь достигается



при среднем положении зеркала 4. Данный резонатор имеет неограниченный диапазон регулирования. Однако он нуждается в тщательной юстировке. Целесообразно, чтобы все зеркала резонатора имели форму  $90^\circ$  конической поверхности, что практически исключило бы юстировку. Такая схема резонатора и была разработана [46, 47] (рис. 20). На одном торце активного элемента кольцевого сечения 1 расположены кольцевые конические зеркала 2, 3, выполненные в виде боковых поверхностей усеченных конусов с углами при вершинах  $90^\circ \pm \Delta$ , где  $\Delta$  – поправка для коррекции дифракционной расходимости излучения. На противоположном торце активного элемента 1 расположено кольцевое  $90^\circ$  коническое зеркало 4. В центре зеркала 4 расположено выводное коническое  $90^\circ$  зеркало 5, снабженное механизмом перемещения 6. Кольцевые конические зеркала 2, 3, 4 не требуют тщательной юстировки, что делает резонатор стойким к тепловым и механическим воздействиям и упрощает его настройку.

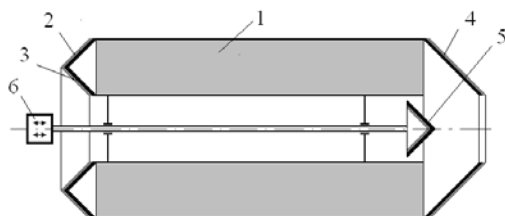


Рис. 20. Схема широкодиапазонного лазерного резонатора с плавной регулировкой вывода излучения и зеркалами, не требующими тщательной юстировки

При отражении от зеркала 4 излучение перебрасывается в диаметрально противоположное место кольцевого активного элемента 1. Благодаря такой геометрии резонатора излучение проходит сквозь активное вещество 1 четырьмя различными путями, что позволяет максимально снизить влияние неоднородностей активного вещества. При многократном отражении от зеркал лазерное излучение смещается к внешним и внутренним краям активного вещества 1. Это происходит вследствие дифракции и наличия поправки  $\Delta$  к конусности зеркал 2, 3.

В данной схеме из резонатора выводится излучение, сместившееся как к внешней, так и к внутренней поверхностям активного элемента, что снижает потери в резонаторе и повышает КПД лазера. Широкий диапазон регулировки позволяет подобрать оптимальную обратную связь, а использование конических зеркал повышают устойчивость резонатора к тепловым и механическим воздействиям и упрощают его настройку. Применять предложенную схему резонатора можно и для лазеров других диапазонов. Плавная регулировка вывода излучения дает возможность получать максимальный КПД лазера на всех режимах его работы.

## 7. МНОГОЧАСТОТНЫЕ ТГц-ЛАЗЕРЫ

Одним из важных применений ТГц-лазеров является использование их в интерферометрах для диагностики плазмы на термоядерных установках. Работа этих систем основана на переносе полезной информации на более низкую промежуточную частоту. Для этого требуется получить разницу между частотами в сигнальном и гетеродинном каналах минимум в несколько десятков килогерц. Стабильную разность частот можно получить, обеспечив двухчастотный режим генерации лазера.

С этой целью нами исследовался режим двухмодовой генерации лазера [48], когда создаются условия для одновременной генерации двух разных поперечных мод с параллельными поляризациями. Однако получаемые при этом излучения разных частот с параллельными поляризациями трудно разделить на два независимых пучка.

Раздельный вывод излучений разных частот был осуществлен в лазере, генерирующем излучения разных частот на ортогональных поляризациях [49]. Такие условия были созданы в резонаторе, имеющем два выходных зеркала в виде расположенных друг за другом взаимно перпендикулярных проволочных решеток (рис. 21). Это фактически два резонатора с общим активным веществом, работающие на взаимно перпендикулярных поляризациях. Разность частот регулируется путем изменения расстояния между проволочными решетками. Максимальная разность составила  $\sim 4,5$  МГц. Флуктуации газового разряда и прочие нестабильности одинаково влияют на изменение оптической длины обоих резонаторов, что практически не изменяет их разностной частоты. Однако наблюдалась конкуренция излучений разных частот, поскольку они распространяются в активном веществе по одному и тому же пути.

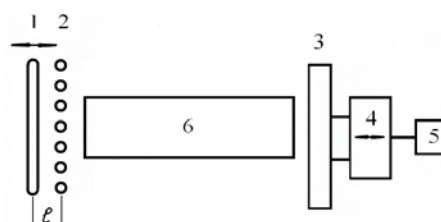


Рис. 21. Схема лазера с трехзеркальным резонатором: 1 – решетка  $30 \times 8$  мкм; 2 – решетка  $50 \times 10$  мкм; 3 – «глухое» зеркало; 4 – пьезокерамическая пластинка; 5 – механизм перемещения зеркала; 6 – активное вещество

В работах [50, 51] предложена схема многочастотного ТГц-лазера с комбинированным резонатором и разработана методика его настройки без использования аппаратуры измерения частоты. Использование подобных схем не имеет ограничений по числу каналов и набору частот, однако наиболее практичным является трехчастотный лазер с одним контрольным и двумя рабочими каналами (рис. 22).

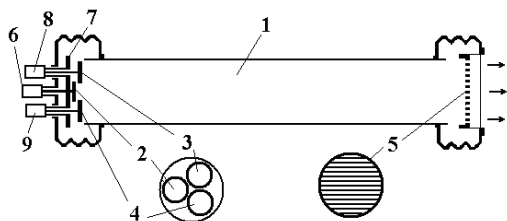


Рис. 22. Схема трехчастотного ТГц-лазера

Лазер содержит разрядную трубку 1 с активным веществом, и три отдельных открытых резонатора, образованных подвижными индивидуальными зеркалами 2, 3, 4 и общим для всех выводным зеркалом 5 в виде периодической структуры. Общий механизм настройки 6, перемещает платформу 7, на которой закреплены зеркало 2 и два отдельных механизма перемещения 8, 9 для зеркал 3 и 4 соответственно. Со стороны выводного зеркала, напротив каждого подвижного зеркала располагаются тракты приема излучения (на рисунке не показаны). Напротив зеркала 2 расположен контрольный тракт, напротив зеркал 3, 4 – рабочие тракты.

Методика настройки лазера следующая. После выхода лазера на стабильный рабочий режим производится последовательная настройка на центральную частоту всех резонаторов. С помощью общего механизма настройки 6 производится настройка на максимум излучения контрольного резонатора, образованного зеркалом 2. Затем производится настройка на максимум излучения рабочих резонаторов, образованных зеркалами 3, 4, с помощью механизмов 8, 9. Настройка на максимум излучения соответствует настройке на центральную частоту излучения активного вещества. Затем с помощью механизмов 8, 9 производится отстройка рабочих резонаторов в разные стороны от центральной частоты до получения заданного смещения частот. После чего в рабочие тракты будут поступать излучения с частотами, отличающимися друг от друга на заданную величину. Контрольный канал служит для поддержания долговременной стабильности настройки всех резонаторов. С помощью общего механизма настройки 6 поддерживается настройка контрольного резонатора на максимум мощности в процессе работы. При стабилизации настройки контрольного канала стабилизируются и настройки на конкретные частоты рабочих резонаторов. Если нарушается настройка контрольного резонатора, то изменяются частоты и уровни мощности в рабочих каналах, но разность частот при этом не изменяется. Для настройки рабочих резонаторов можно использовать механизмы точной частотной настройки [52] которые успешно применяются в ТГц-лазерах рис. 23.

Принцип точной настройки основан на смещении подвижного зеркала резонатора относительно настройки на центральную частоту полосы излучения активного вещества, на величину  $\Delta L$ , соответствующую заданному смещению частоты или длины волны:

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta L\lambda_0}{L}, \quad \Delta f = \frac{\Delta Lf_0}{L},$$

где  $\Delta\lambda$  и  $\Delta f$  – изменение длины волны и частоты лазерного излучения относительно центральной частоты и центральной длины волны ( $\lambda_0$  и  $f_0$ ) линии излучения активного вещества,  $\Delta L$  – перемещение подвижного зеркала лазерного резонатора в пределах генерации на продольной моде,  $L$  – длина резонатора.

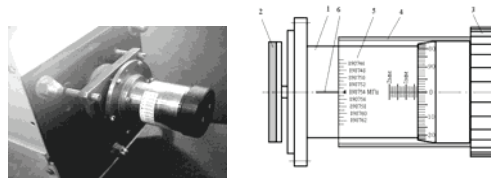


Рис. 23. Механизм точной настройки, снабженный шкалой, отградуированной в мегагерцах, для линии излучения 337 мкм HCN-лазера с резонатором длиной 1,2 м: 1 – корпус механизма перемещения зеркала; 2 – зеркало резонатора; 3 – рукоятка механизма перемещения с микрометрической шкалой; 4 – прозрачная цилиндрическая насадка, свободно вращающаяся на рукоятке механизма перемещения; 5 – частотная шкала, нанесенная на прозрачную насадку; 6 – неподвижный курсор

Для HCN-лазера с резонатором длиной 1,2 м на линии излучения 337 мкм перемещение зеркала на 1 мкм соответствует изменению длины волны на  $2,8 \cdot 10^{-4}$  мкм или изменению частоты на 0,74 МГц. Точность перестройки возрастает с увеличением длины резонатора. Для HCN-лазера с резонатором длиной 3 м перемещение зеркала на 1 мкм соответствует изменению длины волны на  $1,1 \cdot 10^{-4}$  мкм или изменению частоты на 0,3 МГц.

Применение механизмов точной настройки, отградуированных в значениях частоты, позволяет настраивать лазерные резонаторы на требуемые частоты из диапазона излучения активного вещества без использования аппаратуры измерения частоты с точностью до долей мегагерц в интервале полосы усиления активного вещества (~20 МГц).

## 8. ПРИМЕНЕНИЕ ТГц-ЛАЗЕРОВ

Лазеры ТГц-диапазона широко использовались для диагностики плазмы в термоядерных установках типа «Токамак» [3, 10]. На протяжении нескольких десятилетий это было одно из основных направлений их использования. В последнее время сфера их применения существенно расширилась. В данной работе анонсированы лишь некоторые направления их использования.

### 8.1. Лазерно-резонаторные методы измерения показателя преломления в ТГц диапазоне

При разработке и использовании приборов ТГц-диапазона возникает потребность определения показателя преломления (ПП) различных материалов. Однако многие методы измерения ПП, которые успешно применяются в оптике либо в радиочастотных диапа-

зонах, неприемлемы в ТГц-диапазоне. Нами разработаны резонаторные методы, позволяющие производить как оперативные измерения, не требующие высокой точности, так и высокоточные измерения ПП в ТГц-диапазоне [53–55].

Принцип измерения ПП с помощью ТГц-лазера и дополнительного измерительного резонатора показан на рис. 24.

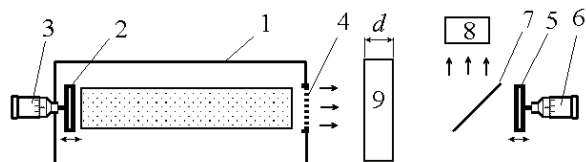


Рис. 24. Схема установки для измерения величины показателя преломления пластины из прозрачного вещества в ТГц-диапазоне

Измерительная установка содержит ТГц-лазер 1, резонатор которого образован зеркалом 2 с механизмом перемещения 3 и частично прозрачным зеркалом 4. В состав измерительной установки входит дополнительный измерительный резонатор, образованный зеркалом 4 лазера и плоским металлическим зеркалом 5 с механизмом перемещения 6. Между зеркалами 4 и 5, под углом 45° установлена делительная пластина 7 для вывода излучения в приемник 8. При настройке измерительного резонатора с помощью перемещения зеркала 5, между зеркалами 4 и 5 укладывается целое число полуволн и происходит накопление энергии лазерного излучения, вызывающее рост сигнала на приемнике 8. При установке в измерительный резонатор пластины из измеряемого образца 9 происходит изменение его оптической длины. Чтобы восстановить настройку в резонанс необходимо переместить зеркало 5 вдоль оси, уменьшив расстояние между зеркалами 4 и 5. Измерив величину перемещения  $\Delta L$  зеркала 5, можно определить величину ПП пластины 9 по формуле:

$$n_2 = \frac{d + \Delta L}{d} n_1,$$

где  $d$  – осевая длина исследуемого материала (геометрическая толщина пластины 9 из исследуемого материала);  $n_1$  – значение ПП воздуха.

На основе данного принципа нами разработан ряд измерительных установок и методик для измерения твердых, жидких и газообразных веществ. Тестовые измерения материалов с известным ПП подтвердили достоверность измерений.

Повышение точности измерения можно получить при увеличении толщины измеряемого образца. Однако при этом происходит увеличение потерь в измерительном резонаторе и снижение его добротности, что сглаживает резонансный пик мощности и не позволяет с достаточной точностью настроиться на него. Эту проблему позволяет устранить измерительная

схема, в которой измеряемый образец помещается в лазерный резонатор [61]. Общий принцип такой установки в варианте измерения газообразных веществ показан на рис. 25.

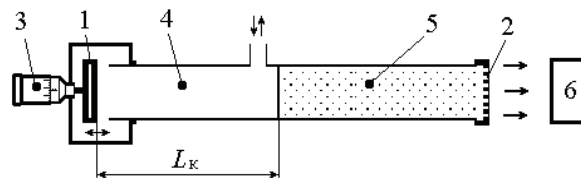


Рис. 25. Схема измерительной установки для определения величины ПП газообразных веществ

Измерительной установкой служит ТГц-лазер с резонатором, образованным зеркалами 1, 2. Зеркало 1 снабжено микрометрическим механизмом перемещения 3. Через частично прозрачное зеркало 2 излучение выводится в приемник 6. Между зеркалами 1 и 2 расположены активный элемент 5 и измерительная кювета 4 с исследуемым веществом.

Последовательность операций в процессе измерения следующая. В измерительной кювете 4 создается вакуум. Перемещая зеркало 1, устанавливают максимум мощности лазерной генерации, что соответствует настройке резонатора на центральную частоту. Затем кювета 4 заполняется исследуемым газообразным веществом, что вызывает изменение ПП в резонаторе и его расстройку. Для восстановления устойчивой генерации необходимо возобновить настройку резонатора, причем синхронно с подачей газа, чтобы резонатор оставался настроенным на один и тот же пик генерации  $N\lambda_0/2$ . Величина перемещения  $\Delta L$  регистрируется по микрометрической шкале механизма 3. Абсолютное значение величины ПП определяют по формуле:

$$n_2 = \frac{L_{\epsilon 1} - \Delta L_{d1}}{L_{\epsilon 1} \pm \Delta L_{d2} - \Delta L},$$

где  $L_{\kappa 1}$  – длина измерительной кюветы 4 до заполнения ее исследуемым веществом;  $\Delta L$  – изменение расстояния между зеркалами 1 и 2 резонатора лазера;  $\Delta L_{p1}$ ,  $\Delta L_{p2}$  – изменение длины кюветы, вызванное изменением давления.

При использовании измерительной кюветы длиной 1 м и микрометрического устройства перемещения с ценой деления 1 мкм расчетная погрешность измерения ПП составляет  $\sim 10^{-6}$ . Погрешность измерения может быть снижена за счет увеличения длины измерительной кюветы и применения более точных механизмов перемещения. Такую измерительную установку можно переоборудовать для исследования твердых или жидких веществ.

## 8.2. Использование ТГц-лазеров в медицине и биологии

На протяжении многих лет исследовалось воздействие ТГц-излучения на различные живые орга-

низмы [56 – 59]. Было выявлено позитивное воздействие низкоинтенсивного ТГц-излучения при заживлении ран и восстановлении костных тканей. Установлено, что лазерное ТГц-излучение ускоряет заживление инфицированных ран, но не оказывает непосредственного бактерицидного воздействия. Непосредственное облучение бактериальных колоний даже ускоряет их рост. Это позволяет предположить, что полезный эффект ТГц-излучения заключается в его положительном влиянии на иммунную систему живых организмов. На основании этого проведены исследования влияния ТГц-излучения на онкологические заболевания, при борьбе с которыми иммунная система играет ключевую роль. Опыты проводились на лабораторных животных [60, 61]. Установлено, что ТГц-излучение оказывает замедляющее воздействие на рост опухолей, приближающееся по эффективности к рентгеновскому излучению. При этом побочных эффектов от воздействия ТГц-излучения не обнаружено. Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности дальнейших исследований в этой области.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы по исследованию и совершенствованию газоразрядных лазеров ТГц-диапазона проводились в ИРЭ АН Украины им. А.Я. Усикова, совместно с другими организациями, на протяжении более 30 лет. В ходе этих исследований было дано объяснение некоторым эффектам и особенностям процесса генерации лазерного излучения. На основании проведенных исследований были разработаны новые пути и технические решения, которые позволили улучшить параметры ТГц-лазеров и расширить область их применения.

Основные результаты проведенных работ заключаются в следующем.

Разработаны и созданы новые типы лазерных резонаторов: резонаторы с плавной регулировкой вывода излучения; резонаторы, не требующие точной юстировки зеркал; многочастотные резонаторы с плавной настройкой частот без использования частотоизмерительной аппаратуры.

Усовершенствованы известные и разработаны новые способы накачки газоразрядных лазеров.

Предложены новые пути повышения мощности и КПД лазеров.

Разработаны новые установки на основе газоразрядных HCN-лазеров для проведения физических и медико-биологических исследований.

### Литература

[1] *Gebbie H. A., Stone X. W., Findlay F. D.* Stimulated Emission Source at 0.34 Millimeter Wave-Length // *Nature*. 1964. vol. 202, no 4933, P. 685.  
 [2] *Свич В.А., Дюбка С.В., Кузмичев В.М., Шульга В.М.* Исследования в рамках проблемы освоения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, выполненных на кафедре радиофизики. *ФИП PSE*. т.2, №1-2. С. 79 -95.

[3] *Горбунов Е.П., Кулешов Е.М., Несеров П.К.* и др. Лазерный интерферометр-поляриметр субмиллиметрового диапазона для измерения пологоидального поля на Токамаке 15. *Физика плазмы*. 1994. Т. 20, вып.1. С. 17-19.  
 [4] *Kiseliov V. K., Makolinets V. I., Mitryaeva N. A., Radionov V. P.* Application of terahertz laser technology to investigate the influence of NHF radiation on the tumor process *Telecommunications and Radio Engineering* 2012, 71(17). P. 1617-1626.  
 [5] *Киселёв В. К., Кулешов Е. М., Лантуй В. К.* Исследование газового HCN-лазера терагерцевого диапазона частот с полым катодом аномальной вторичной эмиссии. *Радиофизика и электроника*, 2005. т.10, №2, С. 315.  
 [6] *Каменев Ю.Е.* HCN лазер с полым катодом. *Кв. эл.-ка*, 1999. – Т.26. – №3, С.269 – 270.  
 [7] *Дахов Н. Ф., Каменев Ю. Е., Киселев В. К., Кулешов Е. М., Радионов В. П.* Субмиллиметровый газоразрядный HCN лазер с внутренними пленочными электродами. *Радиофизика и электроника*. Сб. научн. трудов. Ин-т радиофизики и электроники им А.Я. Усикова. – Харьков, 1998. – Т.3, №2. – С. 64 – 65.  
 [8] Патент України № 60384 від 15.10.2003 «Газоразрядний субміліметровий лазер з зовнішніми електродами.» Авт.: Дахов М.Ф., Кісельов В.К., Кулешов Є.М., Радіонов В.П.  
 [9] *Киселев В. К., Кулешов Е. М., Радионов В. П., Дахов Н. Ф. и др.* Гипервысокочастотная лазерная установка для биомедицинских исследований. *Радиофизика и электроника*. Сб. научн. тр. / НАН Украины. Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова. – Харьков, 2002. – Т. 7, № 1. – С133 – 136.  
 [10] *Дзюбенко М.И. и др.* «Создание лазеров непрерывного действия работающих в диапазоне волн от 0,05 до 0,5 мм с выходной мощностью до 500 мВт для диагностики высокотемпературной плазмы» / Отчет ИРЭ АН УССР по НИР “Дунай”. – Гос. рег. N 77.076.126 – X., 1979.  
 [11] *Кулешов Е. М., Каменев Ю. Е., Радионов В. П.* Индуктивный ВЧ разряд в лазерах субмм диапазона. *Тез. конф. "Высокочастотный разряд в волновых полях"* - Куйбышев, 1989. – С. 242 – 244.  
 [12] Патент України № 55720А від. 15.04.2003 «Газоразрядний субміліметровий лазер» Авт: Дахов М.Ф., Кісельов В.К., Кулешов Є.М, Радіонов В.П.  
 [13] *Kiseliov V. K., Radionov V. P., Dachov N.F.* Influence of synthesis time of the lasant and intensity of on terahertz gas-discharge HCN-laser parameters. *Telecommunication and Radio Engineering*. V.69, i14, 2010. – p.1277 – 1283.  
 [14] *Kiseliov V. K., Radionov V. P.* Terahertz gas-discharge laser with additional discharge section. *Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves: Int. Symp. (MSMW'2007)*. - Kharkov, 2007. – Vol. 1. – P. 272 – 274.  
 [15] Патент України № 86298 від. 10.04.2009: «Газоразрядний субміліметровий лазер» Авт. Кісельов В.К., Радіонов В.П.  
 [16] *Дахов Н. Ф., Киселев В. К., Кулешов Е. М., Радионов В. П.* Биомедицинский гипервысокочастотный лазер с термостабилизацией разрядной трубки. *Материалы XX Междунар. Конф. Применение лазеров в медицине и биологии*. – Ялта, 2003. – С. 123.  
 [17] *Kiseliov V. K., Radionov V. P.* Phenomenon of pulse lasing bifurcation in the alternating current pumped HCN-laser. *Telecommunication and Radio Engineering*, V.69, i14, 2010. – p.1293 – 1299.

- [18] *Kiseliov V. K., Radionov V. P.* Graphical Modeling of THz Gas-Discharge Laser Radiation Pulse Shape. *Telecommunication and Radio Engineering*, V.71, №5, 2012. – p.481 – 486.
- [19] *В.П. Шестопалов, А.А. Кириленко, С.А. Масалов, Ю.К. Сиренко* Резонансное рассеяние волн. Т. 1 Дифракционные решетки / Киев: Наукова думка, 1986. – 227с.
- [20] *Каменев Ю.Е., Кулешов Е.М., Радионов В.П., Филимонова А.А.* Деполяризация излучения в HCN-лазере. *Квантовая электроника*. – 1994.. – Т.21, №10. – С. 941 – 942.
- [21] *Baron T., Euphrasie S., Mbarek Ben S., Vairac P., Cretin B.* Design of metallic mesh absorbers for high bandwidth electromagnetic waves. *Progress In Electromagnetics Research C*, 2009. Vol. 8, P. 135 – 147.
- [22] *Gurin O. V., Degtyarev A. V., Legenkyi M. N., Maslov V. A., Svich V. A., Senyuta V. S., Topkov A. N.* Generation of transverse modes with azimuthal polarization in a terahertz band waveguide laser. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2014, 73 (20): P. 1819 – 1830.
- [23] *Verslegers L., Catrysse P. B., Yu Z. et.al.* Planar lenses based on nanoscale slit arrays in a metallic film. *Nano Lett.* 2009. vol. 9. – p. 235 – 238.
- [24] *Lin H., Huang C. S.*, Linear variable filter based on a gradient grating period guided-mode resonance filter. *IEEE Photonics Technology Letters* 2016, vol. 28, no. 9. – p. 1042 – 1045.
- [25] *Shi H., Wang C., Du C., et al.* Beam manipulating by metallic nano-slits with variant widths. *Optics Express*. 2005, vol. 13. – pp. 6815 – 6820.
- [26] Патент України №115126 від 10.04.2017 «Азимутальне вихідне дзеркало лазерного резонатора» Авт. М.І. Дзюбенко, В.О. Маслов, В.П. Радіонов.
- [27] *Dzyubenko M. I., Maslov V. A., Radionov V. P.* “Applying of the flat circular metal gratings as spherical output mirrors of terahertz lasers,” *Proc. Int. Symp. Physics and Engineering of mm and Sub-mm Waves (MSMW-16)*, Kharkov, Ukraine, June 2016.
- [28] *Кулешов Е.М. Каменев Ю.Е., Радионов В.П., Филимонова А.А.* Субмиллиметровый HCN лазер с уголковыми отражателями. *Межд. симп. "Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых волн"*, Харьков, 1994. Тез. докл. Т.3. – С. 312 – 313.
- [29] *Каменев Ю.Е.* Особенности применения ретрорефлекторов в лазерных резонаторах субмиллиметрового диапазона. // *Каменев Ю.Е., Кулешов Е.М. // Квантовая электроника*, 1995. т. 22, №8. – С. 847 – 848.
- [30] *Радионов В. П., Киселев В. К.* Применение конических 90-градусных отражателей для решения проблемы юстировки зеркал в лазерах терагерцевого диапазона. *Квантовая электроника*. 2014, т.44, №10. – С. 981–983.
- [31] *Radionov V. P., Kiseliov V. K.* Conical 90° Mirrors for Terahertz Laser Resonator. *Telecommunications and Radio Engineering*. (2015). Vol.74, No.4. – P.337 – 343.
- [32] Патент України № 78870 від 25.04.2007, на винахід «Вивідне дзеркало лазерного резонатора» Авт.: Каменев Ю. Ю., Філімонова Г. О.
- [33] *Каменев Ю. Е., Масалов С. А., Филимонова А. А.* Лазер с адаптивным выходным зеркалом. *Квантовая эл-ка*, 2006. т.36, №8. – С.849 – 852.
- [34] *Каменев Ю. Е., Масалов С. А., Филимонова А. А.* HCN-лазер с гибридным выводным зеркалом. *Радиофизика и электроника*. 2006, т.11, №2. – С.270 – 274.
- [35] *Андренко С. А., Каменев Ю. Е.* Применение HCN-лазера для измерения фазовых характеристик одномерных проволочных решеток. *Радиофизика и электроника*, 2011. - Т.16, №1. – С.50 – 53.
- [36] Патент України №111353 від 25.04.2016 на винахід «Вивідне дзеркало лазерного резонатора» Авт. Кісельов В.К., Радионов В.П.
- [37] А.с. № 1111657 СССР. Волноводный газовый лазер. Б.И. №32, 1984г., авт. Ю.Е. Каменев, Е.М. Кулешов, В.К. Киселев, Д.Д. Литвинов, В.Н. Полупанов.
- [38] *Каменев Ю. Е., Кулешов Е. М.* Субмм лазеры с переменной квазиоптической связью. *Квазиоптическая техника мм и субмм диапазонов волн*. - Сб.научн.тр. ИРЭ АН УССР, Харьков, 1989г. – С. 156 – 162.
- [39] *Каменев Ю. Е., Масалов С. А., Филимонова А. А.* Применение субмиллиметрового HCN-лазера для определения электродинамических параметров одномерных проволочных решеток. *Квантовая электроника*. 2005. – Т. 35, № 4. – С. 375 – 377.
- [40] Патент України № 91610 від 10.08.2010 на винахід «Лазер з плавним регулюванням виведення випромінювання з резонатора» авт. Кісельов В.К., Радіонов В.П.
- [41] Патент України №105802 від 25.06.2014 на винахід «Лазер з плавним регулюванням виведення випромінювання з резонатора» авт. Кісельов В.К., Радіонов В.П.
- [42] Патент України № 110672 від 25.01.2016 на винахід «Лазер з плавним регулюванням виведення випромінювання з резонатора» авт. Радіонов В. П., Маслов В. О.
- [43] Патент України №113216 від 04.05.2016 на винахід «Лазер з плавним регулюванням виведення випромінювання з резонатора» авт. Дзюбенко М. І., Маслов В. О., Радіонов В. П.
- [44] *Dzyubenko M. I. Maslov V. A., Radionov V. P.* Terahertz waveguide laser with smooth adjustment of feedback. 7<sup>th</sup> International conference on advanced optoelectronics and lasers (CAOL'2016) September 12-15, 2016 Odessa, Ukraine. –P.94 – 95.
- [45] А.с. СССР №1829832 от 4.01.92, Лазер; авт. А.М. Коробов, В.П. Радионов, Ю.Е. Каменев.
- [46] *Dzyubenko M. I. Maslov V. A., Radionov V. P.* Laser resonator with infinitely adjustable of light output. 13<sup>th</sup> International conference on laser and fiber-optical networks modeling, (LFNM\*2016), September 12-15, 2016 Odessa, Ukraine. –P.51 – 52.
- [47] Патент України №114127 від 25.04.2017 на винахід «Лазер з плавним регулюванням виведення випромінювання з резонатора» авт. Дзюбенко М.І., Маслов В.О., Радіонов В.П.
- [48] *Каменев Ю. Е., Кулешов Е. М., Лебедевка А. Н.* Многочастотное излучение в субмиллиметровых лазерах. *Квантовая электроника*. 1984. – Т. 11, № 1. – С.213 – 214.
- [49] *Каменев Ю. Е., Кулешов Е. М.* Двухчастотная генерация с ортогональными поляризациями в HCN лазере. *Квантовая электроника*. 1987. – 14, №12. – С. 236 – 238.
- [50] Патент України №106643 від 25.09.2014 на винахід «Багаточастотний терагерцевий лазер», авт. Кісельов В. К., Радіонов В. П., Нестеров П. К.
- [51] *Radionov V. P., Kiseliov V. K., Nesterov P. K.* Methods for obtaining multifrequency lasing in resonant cavity of the thz laser. *Telecommunications and Radio Engineering*, (2016), Vol.75, No.4. – P.355 – 361.
- [52] *Radionov V. P.* Submillimeter laser with continuous frequency adjustment within the limits of laser spec-

- trum line. Telecommunications and Radio Engineering. 2005.-V.63, №11. – P.123 – 128.
- [53] Патент України № 103393 від 10.10. 2013 на винахід «Спосіб визначення показника заломлення прозорих речовин». Авт. Кисельов В.К., Дзюбенко М.І., Радионов В.П.
- [54] *Dzyubenko M. I. Kiseliov V. K., Radionov V. P.* Resonator Methods of Measuring Refractive Index of a Transparent Substance in the Terahertz Band. Telecommunications and Radio Engineering. 2015. – Vol.74, No.8. – P. 725 – 733.
- [55] *Дзюбенко М. І. Радионов В. П.* Лазерный метод измерения показателя преломления прозрачных веществ в терагерцевом диапазоне. Український метрологічний журнал. 2017. – № 1. – С.11–14.
- [56] *Каменев Ю. Е., Кулешов Е. М., Киселев В. К.,* и др. О возможности применения когерентного ГВЧ излучения для регулирования интенсивности обменных реакций в организме. Применение радиоволн мм и субмм диапазонов: 1994. – С. 47 – 49.
- [57] *Киселев В. К., Кулешов Е. М., Радионов В. П., Дахов Н. Ф., Яновский М. С.,* и др. Гипервысокочастотная лазерная установка для биомедицинских исследований. Радиофизика и электроника. 2002. – Том 7, №1. – С. 133 – 136.
- [58] *Колесников В.Г., Древаль Н.В., Кондакова А.К., Каменев Ю.Е., Корж В.Г.* Взаимодействие макромолекулярных структур эритроцитов с электромагнитным излучением терагерцевого диапазона радиоволн. Дерматология та венерология. № 2(36). 2007. С. 9 – 14.
- [59] *Сколожабский А. А., Киселев В. К., Мизрахи С. В., Радионов В. П., Тихона Г. С., Безвесильная А. В.* Изучение ультраструктурной морфологии биообъекта в условиях облучения. Загальна патологія та патологічна фізіологія. 2010. – Т. 5, № 4. – С. 80 – 93.
- [60] *Kiseliov V. K., Makolinet V. I., Mitryaeva N. A., Radionov V. P.* Application of terahertz lasers setup for the investigation of the influence of HNF-radiation on the tumor processes. The 37th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). September 23-28, 2012, Wollongong, Australia. P.879-880.
- [61] *Kiseliov V. K., Makolinet V. I., Mitryaeva N. A., Radionov V. P.* Application of terahertz laser technology to investigate the influence of HNF radiation on the tumor process Telecommunications and Radio Engineering 2012, 71(17). – P. 1617 –1626.

Поступила в редколлегию 11.05.2017



**Дзюбенко Михаил Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, заведующий отделом нелинейной оптики и квантовой электроники института радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины. Научные интересы: лазеры, взаимодействие лазерного излучения с различными средами и материалами



**Каменев Юрий Ефимович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела квантовой электроники и нелинейной оптики института Радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова АН Украины. Научные интересы: Лазеры терагерцевого диапазона и их использование в науке и медицине.



**Радионов Владимир Петрович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела квантовой электроники и нелинейной оптики института Радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова АН Украины. Научные интересы: Лазеры терагерцевого диапазона, квазиоптические резонаторы и их применение.

УДК 535.14, 537.862

**Газорозрядні HCN-лазери терагерцевого діапазону /** М. І. Дзюбенко, Ю. Е. Каменев, В. П. Радионов // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2017. –Том 16, № 1, 2. – С. 74 – 87.

В роботі наведено результати експериментальних досліджень газорозрядних HCN-лазерів терагерцевого діапазону, узагальнено численні дослідження особливостей їх роботи. Розглянуто нові типи лазерних резонаторів і нові різновиди дзеркал, а також вдосконалені способи накачування газорозрядних лазерів. Наведено лазерні резонатори з плавним регулюванням виведення випромінювання, і резонатори, які не потребують ретельного юстування дзеркал. Все це дозволило поліпшити параметри терагерцевих лазерів і розширити область їх застосування.

*Ключові слова:* газорозрядний лазер, терагерцевий діапазон, резонатор, активна речовина.

Лл.: 25. Бібліогр.: 61 назв.

UDC 535.14, 537.862

**Gas-discharge HCN-lasers of the terahertz range /** M.I. Dzyubenko, Yu.E. Kamenev, V.P.Radionov // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2017. – Vol. 16, № 1, 2. – P. 74 – 87.

The results of experimental studies of gas-discharge HCN lasers in the terahertz range are presented in this paper. Numerous studies of the features of operation of these lasers have been generalized. New types of laser cavities, new versions of mirrors, and also improved methods for pumping gas-discharge lasers are considered. Laser resonators with a smooth adjustment of radiation output, and resonators that do not require precise alignment of mirrors are presented. All this has made it possible to improve the parameters of terahertz lasers and expand the field of their application.

*Keywords:* gas-discharge laser, terahertz range, resonator, active substance.

Fig.: 25. Ref.: 61 items.