

## ЛАЗЕР С ПОПЕРЕЧНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ, ГЕНЕРИРУЮЩИЙ В НЕСКОЛЬКИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНАХ

С. С. Шавель\*, В. А. Горобец, С. Б. Бушук, И. Н. Пучковский

УДК 621.375.826

ГНПО “Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника”, Минск, Беларусь;  
e-mail: shavel\_s07@mail.ru

(Поступила 8 сентября 2023)

Представлены результаты по получению в ТЕА-лазерной системе с улучшенной конструкцией лазерной генерации с пиковой выходной мощностью  $\geq 10 \text{ кВт}$  в нескольких спектральных диапазонах за счет использования комбинированной газовой смеси, содержащей помимо молекул  $\text{CO}_2$  инертные газы, в которых реализуется генерация на электронных переходах.

**Ключевые слова:** ТЕА-лазер, инертный газ, одновременная генерация.

Results are presented on obtaining in a TEM laser system with an improved design of lasing having a peak output power of  $\geq 10 \text{ kW}$  in several spectral ranges through the use of a combined gas mixture containing, in addition to  $\text{CO}_2$  molecules, inert gases in which lasing is realized on electronic transitions.

**Keywords:** TEM laser, inert gas, simultaneous lasing.

**Введение.** Разработка лазерных систем, работающих в спектральных диапазонах, где ранее не были получены лазерные источники, генерирующие лазерное излучение “высокого” качества, всегда оставалось приоритетной задачей лазерной физики и техники. Несмотря на большие успехи, достигнутые в создании лазерных систем на базе полупроводниковых лазеров с преобразованием частоты генерации, которые дали возможность получать практически плавную перестройку по длинам волн в видимом, ближнем и среднем ИК-диапазонах, создание лазеров с “высоким” качеством излучения остается актуальной задачей. В полной мере требованиям к качеству излучения для многих практических приложений отвечают газовые лазеры. Они имеют спектрально узкие линии генерации, высокую пиковую мощность, короткие по времени световые импульсы и отличаются простотой конструкции. Важно, что инертные газы не деградируют в разряде. Это позволяет получать генерацию в каждом диапазоне без ухудшения условий для генерации в другом диапазоне при высокой частоте повторения импульсов. В настоящее время существует устойчивый интерес к разработке лазерных систем, обеспечивающих одновременную генерацию в двух и более спектральных областях среднего ИК-диапазона [1, 2]. Одним из путей решения проблемы освоения новых спектральных диапазонов с помощью газовых лазеров может стать использование электронных переходов инертных газов ( $\text{Xe}$ ,  $\text{Kr}$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{Ne}$ ) в широко используемых ТЕА-лазерных системах.

Лазеры низкого давления на электронных переходах атомов инертных газовых, например гелий-неоновый лазер, достаточно просты, надежны и незаменимы для ряда приложений. Однако этот тип лазерных источников имеет невысокую ( $\leq 30 \text{ мДж}$ ) энергию импульсов, что недостаточно для многих применений, например, в лидарах. При достижении большей концентрации активных частиц за счет разработки новых, более сложных методов накачки мощность генерации может возрасти значительно (на порядки) для импульсных систем с высоким давлением. Для эффективного заселения лазерных уровней и создания инверсии необходимо также реализовать быстрый ввод энергии в активную среду и оптимизировать ее состав [3]. Этот подход применен для таких сложных специфических систем, как электроионизационные лазеры [4], лазерные устройства с накачкой электронным пучком [5] и ТЕА-лазеры с очень быстрым (несколько наносекунд) вводом энергии в активную среду [6, 7]. Од-

---

LASER WITH TRANSVERSE EXCITATION GENERATING IN SEVERAL SPECTRAL RANGES  
S. S. Shavel\*, V. A. Gorobets, S. B. Bushuk, I. N. Puchkovsky (SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”, Minsk, Belarus; e-mail: shavel\_s07@mail.ru)

нако получение мощных импульсов излучения в инертных газах на электронных переходах генерации возможно и в простой системе с самостоятельным разрядом, конструктивно похожей на типичный ТЕА CO<sub>2</sub>-лазер, однако практически это не реализовано до настоящего времени.

**Конструкция лазера.** ТЕА CO<sub>2</sub>-лазерная система с автоматизированной перестройкой по спектру излучения для спектроскопических исследований и дистанционного газоанализа разработана в ГНПО “Оптика, оптоэлектроника и лазерная физика” (Минск, Беларусь). Предварительный анализ ее конструктивных особенностей и режимов работы показывает, что при проведении соответствующих доработок и напуске в аналогичную систему вместо стандартной газовой смеси CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He инертных газов можно относительно просто получать генерацию в диапазоне 1—4 мкм на многих спектрально узких линиях, характерных для газового лазера, с энергией и пиковой выходной мощностью ~10 мДж и 0.2 МВт [4]. Следует отметить, что ТЕА-лазерная система имеет ряд особенностей, в частности, применена концепция цельнометаллической конструкции, пригодной для серийного производства.

Схема излучателя разработанного ТЕА-лазера приведена на рис. 1. Использование предложенной конструкции позволяет обеспечить работу лазера не только при низких, но и при повышенных (несколько атмосфер) давлениях активной среды, что важно как для плавной перестройки на CO<sub>2</sub>, так и для генерации на инертных газах, выходная мощность которых сильно зависит от давления активной среды. Для ТЕА-лазера разработана новая система электропитания с малой индуктивностью. Упрощенная электрическая схема ТЕА-лазера приведена на рис. 2. Система электропитания основана на новой концепции формирования и подачи высоковольтного импульса напряжения на шины электропитания ТЕА-лазера только на короткий момент времени, предшествующий импульсу генерации. В остальное время, в отличие от ранее применявшимся схем, на шинах электропитания отсутствует напряжение, что существенно повышает безопасность работы с лазером.

Возбуждение активной среды, как и в ТЕА-лазере, описанном в [8, 9], происходит между профилированными электродами длиной 70 см и шириной 3 см. Межэлектродный промежуток 2 см. Питание цепи основного и вспомогательных разрядов осуществляется от батареи малоиндуктивных конденсаторов общей емкостью 0.2 мкФ, заряжаемых до ~20 кВ.

В реализованной ТЕА-системе применена эффективная УФ-предыонизация за счет боковых искровых разрядов, которая позволяет получать импульсы высокого напряжения с крутым передним фронтом, а также способна гораздо быстрее (со скоростью  $\geq 300$  Дж/мкс) вводить энергию при высокой однородности разряда. Эти принципиально важно для создания инверсии в инертных газах для достижения устойчивого разряда в широком диапазоне варьирования состава активной среды при напуске их в качестве активных частиц вместо стандартных смесей CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He для CO<sub>2</sub>-лазера.

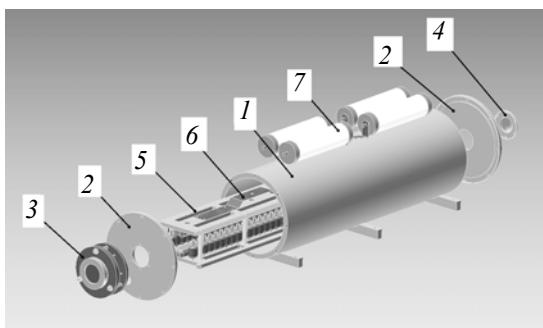


Рис. 1. Схема излучателя разработанного ТЕА-лазера: 1 — цельнометаллический корпус; 2 — торцевые крышки; 3 — узел выходного зеркала; 4 — крышка с размещенным “глухим” зеркалом; 5 — электродная группа; 6 — подводящая низкоиндуктивная шина электропитания; 7 — батарея накопительных конденсаторов

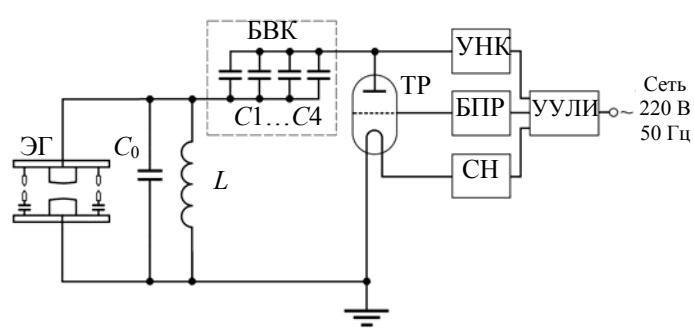


Рис. 2. Упрощенная электрическая схема ТЕА-лазера: УУЛИ — устройство управления лазерным излучением; УНК — устройство накачки конденсаторов; БПР — блок поджига разряда; СН — стабилизатор напряжений; ТР — тиратрон ТГИ1-1000/25; БВК — батарея высоковольтных конденсаторов; C1—C4 — конденсаторы К75-74 (40 кВ, 0.047 мкФ); L — дроссель (40 кВ, 1 нГн); C<sub>0</sub> — конденсатор (40 кВ, 50 нФ); ЭГ — электродная группа

### Оптимизация параметров электропитания для получения коротких световых импульсов.

Для выбора вида оптимальных накопительных конденсаторов проведены сравнительные измерения формы электрического высоковольтного импульса в зависимости от доступной номенклатуры конденсаторов. В частности, проведены измерения с батареями высоковольтных конденсаторов (БВК) общей емкостью 0.2 мкФ, состоящими из двух конденсаторов КМК50-0.1 (40 кВ, 0.1 мкФ) и КМЧ50-0.1 (40 кВ, 0.1 мкФ) (ЛПИ им. М. И. Калинина, Санкт-Петербург, Россия) и четырех конденсаторов К75-74 (40 кВ, 0.047 мкФ) ("Позитрон", Санкт-Петербург, Россия). Осциллограммы полученных электрических импульсов приведены на рис. 3. В разрядной камере использована газовая смесь Xe:He=1:75 при общем давлении 1 атм. Видно, что длительность электрического импульса в основном определяется передним и задним фронтами. Все длительности электрических импульсов как на полувысоте, так и на передних и задних фронтах относительно короткие и не превышают 200 нс, однако наилучшие показатели с точки зрения уменьшения длительности импульсов достигнуты при применении конденсаторов К75-74. Следует отметить, что процесс обеспечения УФ-предъонизации разрядной области и лазерной генерации в целом чрезвычайно чувствителен к длительностям электрических импульсов [5]. В частности, в случае конденсаторов КМЧ50-01 длительность переднего фронта немного больше, чем при использовании в конструкции других исследуемых емкостей, однако этого достаточно, чтобы процесс генерации в смесях с инертными газами был неустойчивым, с частым появлением стримеров, разрушающих электроды и делающих невозможным получение лазерной генерации вообще.

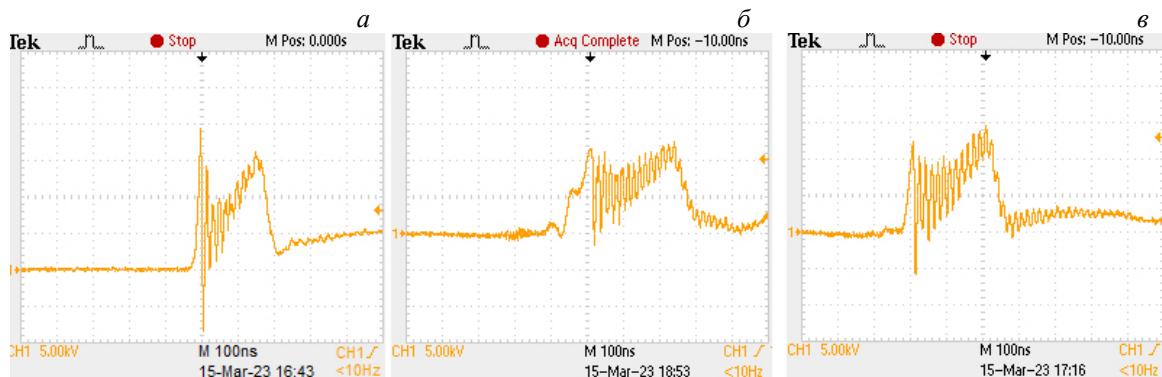


Рис. 3. Осциллограммы высоковольтных электрических импульсов возбуждения ТЕА-лазера при применении конденсаторов К75-74 (a), КМК50-01 (б) и КМЧ50-01(в)

Для оптимальной электрической схемы на базе накопительных конденсаторов К75-74 измерены зависимости длительности на полувысоте  $t_{0.5}$  электрического импульса возбуждения от напряжения на электродах  $U$  (рис. 4). Видно, что длительность  $t_{0.5}$  связана с подаваемым напряжением слабой зависимостью, которая при превышении некоторого напряжения (в нашем случае для используемой смеси 18 кВ) переходит к "стримерной" стадии. На этой стадии ухудшается однородность разряда, длительность электрических импульсов возрастает и резко увеличивается вероятность появления стримеров в разряде, вплоть до появления дуг и срыва генерации.

При применении оптимальной электрической схемы возбуждения в газовой смеси Xe:He = 1:75 при общем давлении 1 атм световые лазерные импульсы имеют длительность на полувысоте <100 нс. Измерения проведены с использованием осциллографа "Tektronix TDS 2022B" (Tektronix Inc., Beaverton, США) и фотоприемника ФПУ-500 (полоса частот 500 МГц).

Для инертных газов генерация на всех линиях происходит на переднем фронте импульса тока накачки. В работах по генерации в инертных газах [3, 4] выделены два механизма создания инверсии: за счет разряда с крутым передним фронтом (его длительность должна соизмеряться с излучательным временем жизни верхнего уровня); вследствие рекомбинационных процессов, приводящих к заселению верхнего уровня в послесвечении (промежуток времени по окончанию импульса тока). Отсюда для смеси Xe:He = 1:75 ( $\lambda = 2.026$  мкм) длительность импульса излучения мала ( $t_{0.5} \sim 80$  нс), поэтому ответственным за генерацию можно считать первый механизм. Учет механизма образования инверсии важен при оптимизации разрядных характеристик ТЕА-лазера, состава активной среды и параметров резонатора.

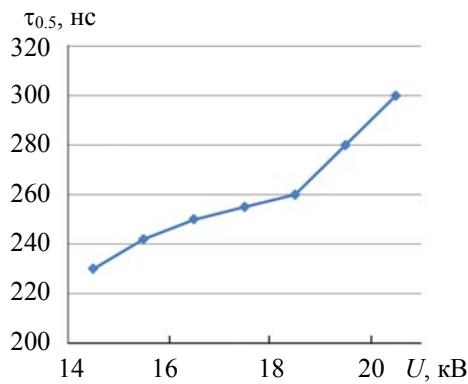


Рис. 4. Зависимости длительности (на полувысоте) электрического импульса возбуждения от напряжения на электродах

**Спектральный состав излучения ТЕА-лазера.** Для проверки возможности получения одновременной генерации в ТЕА-лазерной системе в диапазонах 1.0—4.0 и 9.2—10.8 мкм за счет использования комбинированной газовой смеси, например Xe:CO<sub>2</sub>:He, исследован спектральный состав излучения ТЕА-лазера при генерации на инертных газах в неселективном режиме. В неселективном режиме резонатор лазера образован глухим вогнутым зеркалом ( $R = 10$  м) с золотым покрытием и выходным зеркалом в виде германиевого эталона с коэффициентом отражения 55 % в диапазоне 2—15 мкм. Энергия выходного излучения измерена измерителем мощности ИМО-2Н (“Эталон”, Волгоград, Россия), его спектральный состав проанализирован с использованием призменного монохроматора SPM-2 (Carl Zeiss, Йена, Германия). В качестве приемника излучения на выходе монохроматора установлен фотоприемник МГ-30. Для обеспечения работы фотоприемника во всем исследуемом диапазоне у него удалялось входное окно, что позволяло не учитывать особенности краев полосы пропускания материала окна, а также возможное влияние просветляющего покрытия. Сигнал с фотоприемника подавался на осциллограф “Текtronикс TDS 2022B”.

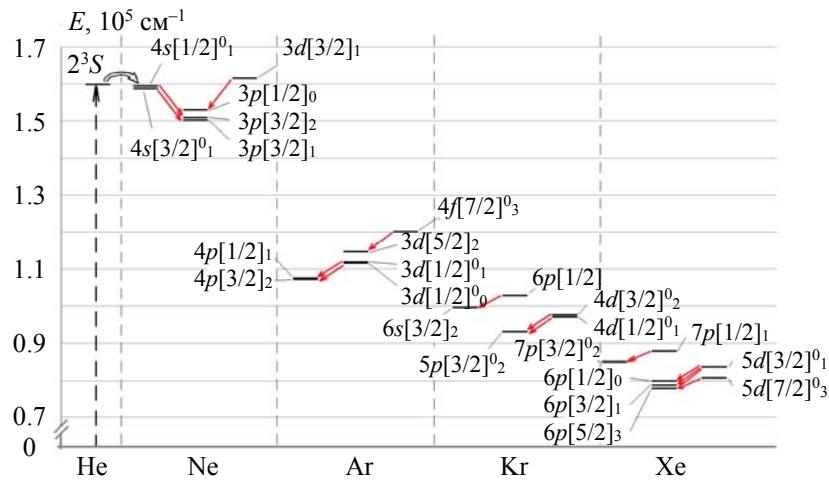


Рис. 5. Схема энергетических уровней и лазерных переходов инертных газов

Полученный при тщательном подборе и оптимизации состава активной среды и условий возбуждения для генерации на инертных газах спектральный состав излучения приведен в табл. 1 и на рис. 5. Наилучшие параметры выходной энергии получены для ксенона. В неселективном резонаторе генерация на Xe наблюдалась для пяти линий с распределением энергии между линиями генерации  $\lambda = 1.731, 2.026, 2.652, 3.508$  и  $3.652$  мкм — 6, 51, 1, 34 и 8 % соответственно. Аналогичные результаты получены для криптона и аргона. Для неона после замены германиевого эталона на селективно отражающее в ближнем ИК-диапазоне зеркало на стеклянной подложке получена только одна линия с  $\lambda = 1.152$ . Анализ данных показывает, что при этом генерируют линии  $4s[1/2]₀₁ - 3p[3/2]₂$ ,

$4s[3/2]^0_1-3p[3/2]_1$  и  $3d[3/2]^0_1-3p[1/2]_0$ . Длины волн этих линий различаются в четвертом знаке после запятой, поэтому разрешить их используемым монохроматором SPM-2 не удалось. Из рис. 5 и табл. 1 видно, что процесс генерации в инертных газах в основном происходит по схеме, при которой верхний лазерный уровень заселяется вследствие прямого возбуждения электронным ударом, а нижний расселяется в результате столкновения со стенками разрядной камеры. В случае генерации на неоне присутствует также подкачка верхнего уровня через метастабильный уровень гелия  $2^3S$ . Однако подкачка вследствие относительно низкой эффективности возбуждения в электрической схеме TEA-лазера (длинные фронты электрических импульсов) не является основным процессом в обеспечении генерации.

**Т а б л и ц а 1. Распределение выходной энергии между линиями генерации на инертных газах (100 % соответствует общей энергии на каждом из газов)**

Газ	Линия	Длина волны, мкм	Энергия импульса, МДж	Доля в общей энергии при генерации на линиях указанного газа, %
Xe	$5d[3/2]^0_1-6p[5/2]_2$	1.731	1.1	6
	$5d[3/2]^0_1-6p[3/2]_1$	2.026	9.2	51
	$5d[3/2]^0_1-6p[1/2]_0$	2.652	0.2	1
	$5d[7/2]^0_3-6p[5/2]_2$	3.508	6.1	34
	$7p[1/2]_1-7s[3/2]_2$	3.652	1.4	8
	Всего в газе	1.7—3.7	18	100
Kr	$4d[3/2]^0_2-5p[3/2]_2$	2.191	0.1	6
	$4d[1/2]^0_1-5p[3/2]_2$	2.524	0.7	47
	$6p[1/2]_1-6s[3/2]_2$	3.07	0.7	47
	Всего в газе	2.1—3.1	1.5	100
Ar	$4f[7/2]_3-3d[5/2]_2$	1.782	0.1	10
	$3d[1/2]^0_1-4p[3/2]_2$	2.208	0.5	50
	$3d[1/2]^0_0-4p[1/2]_1$	2.397	0.4	40
	Всего в газе	1.7—2.5	1.0	100
Ne	$4s[1/2]^0_1-3p[3/2]_2$			
	$4s[3/2]^0_1-3p[3/2]_1$	1.152	0.2	100
	$4s[3/2]^0_1-3p[1/2]_0$			
	Всего в газе	1.152	0.2	100

Проведены эксперименты с селективным резонатором, в котором “глухое” зеркало заменилось дифракционной решеткой 100 штр./мм. Выходное зеркало (Ge-эталон) не заменилось. В диапазоне генерации 1.15—3.65 мкм решетка могла работать по автоколлимационной схеме с неоптимальными углами блеска, что значительно ухудшало ее характеристики и коэффициент отражения не превышал 90 %. Даже в таких условиях для Xe осуществлена перестройка по всем линиям генерации, причем энергия на линиях с  $\lambda = 1.731$  и 2.652 мкм значительно (для первой линии более чем на порядок) выросла. Это объясняется высвечиванием энергии, запасенной в активной среде, только через одну линию, тем более что для линий с  $\lambda = 1.731$ , 2.026 и 2.652 мкм верхний лазерный уровень  $5d[3/2]$  общий. Естественно предположить, что в оптимальных условиях и при использовании дифракционных решеток более высокого качества выходная энергия увеличится и могут быть получены дополнительные линии генерации.

**Одновременная генерация в двух спектральных диапазонах.** Газовая смесь, обычно используемая в TEA CO<sub>2</sub>-лазере (прототипе описанного лазера), сходна по составу со смесью, применяемой для получения генерации в инертных газах в диапазоне 1.0—4.0 мкм, наличием большого количества гелия. Известно [9, 10], что присутствие небольшого количества инертных газов в рабочей смеси CO<sub>2</sub>-лазера улучшает выходные параметры генерации за счет лучшего расселения нижнего лазерного уровня и смещения в оптимальную сторону параметра  $E/N$ . Удаление азота из смеси уменьшает выходные параметры (мощность и энергию импульсов), тем не менее часто используется на практике для уменьшения длительности импульсов за счет ликвидации так называемого “азотного хвоста”. Таким образом, очевидна возможность получения одновременной генерации в диапазонах 1.0—4.0 и 9.2—10.8 мкм за счет использования комбинированной газовой смеси, включающей в себя неболь-

шое количество излучающих инертных газов и молекул углекислого газа и много гелия (например, Xe:CO<sub>2</sub>:He = 1:1:100). Указанная возможность проверена экспериментально.

При получении одновременной генерации в двух спектральных диапазонах выходные параметры импульсов в диапазоне 9.2—10.8 мкм значительно уменьшались по сравнению со стандартным режимом работы TEA CO<sub>2</sub>-лазера вследствие намного меньшего относительного количества молекул CO<sub>2</sub>. При этом они сравнимы с параметрами генерации на инертных газах в диапазоне 1—4 мкм. Отметим, что энергия генерации на инертных газах также несколько уменьшалась в комбинированной газовой смеси, содержащей молекулы CO<sub>2</sub>. Небольшие добавки молекулярных газов CO<sub>2</sub> и/или N<sub>2</sub> приводят к падению выходной энергии на инертных газах. Вследствие этого спектр одновременной генерации в неселективном резонаторе в диапазоне 1—4 мкм ограничивался в основном мощной линией ксенона 5d[3/2]<sub>1</sub><sup>0</sup>—6p[3/2]<sub>1</sub> ( $\lambda = 2.026$  мкм), на которой высвечивалось  $\geq 90\%$  энергии, при этом остальные 10 % приходились на линию 5d[7/2]<sub>3</sub><sup>0</sup>—6p[5/2]<sub>2</sub> ( $\lambda = 3.508$  мкм), а генерация на CO<sub>2</sub> в неселективном режиме развивалась на линии 10P(20) полосы 00<sup>0</sup>1—10<sup>0</sup>0 с  $\lambda = 10.59$  мкм. Повышение давления активной среды до нескольких атмосфер кроме существенного увеличения выходной мощности генерации также показало, что в рассмотренном ранее режиме одновременной генерации в двух спектральных диапазонах в оптимальной смеси Xe:CO<sub>2</sub>:He усиление как на Xe, так и на CO<sub>2</sub> формируется на переднем фронте импульса тока накачки. В результате импульсы генерации на молекулах Xe и CO<sub>2</sub> следуют практически одновременно, что важно для многих практических приложений, например газоанализа. Это связано с тем, что влияние различных механизмов заселения лазерных уровней в инертных газах (преимущественно прямое возбуждение при столкновении с электронами) и в CO<sub>2</sub> (через квазистабильные уровни CO<sub>2</sub>) существенно нивелируется при больших давлениях активной среды.

**Влияние вида буферного газа и давления активной среды на энергию генерации.** В работе [3] исследовано влияние вида буферного газа на параметры энергии генерации электроионизационного лазера на инертных газах и установлено, что замена буферного газа He на Ar приводит к резкому (5-кратному) увеличению энергии генерации. Так как использовались газовые смеси, аналогичные рассматриваемым в данной работе, изучено влияние аналогичной замены буферного газа и в исследуемом лазере. Результаты приведены на рис. 6. В отличие от данных [3], использование в качестве буферного газа аргона не увеличивает, а уменьшает выходную энергию по сравнению с буферным газом гелием в ~1.5 раза. Это можно объяснить более длительными импульсами электрической накачки в TEA-системе по сравнению с электроионизационным лазером, что приводит к неэффективной работе по расселению нижних лазерных уровней более тяжелого буферного газа. Отметим, что замена буферного газа гелия на аргон приводит к существенному перераспределению энергии между линиями генерации. Так, линия 5d[3/2]<sub>1</sub><sup>0</sup>—6p[5/2]<sub>2</sub> ( $\lambda = 1.731$  мкм) (см. табл. 1) становится самой сильной генерирующей линией. Из рис. 6 также видна довольно сильная зависимость выходной энергии от общего давления активной среды лазера. Применение новой конструкции TEA-лазера позволяет использовать давление рабочей смеси в несколько атмосфер, что приводит к увеличению выходной энергии более чем в 2 раза по сравнению с обычно используемым “доатмосферным” режимом.

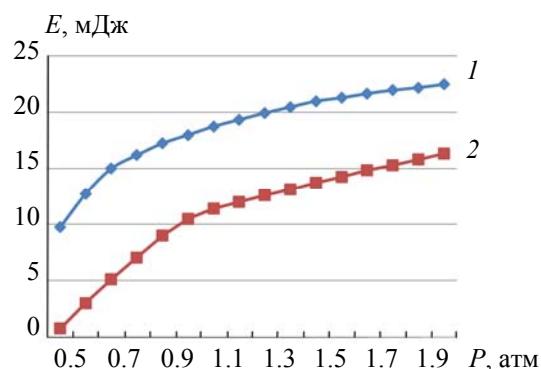


Рис. 6. Зависимости выходной энергии лазерных импульсов на линиях Xe от общего давления для смесей, содержащих в качестве буферного газа Не (1) или Ar (2)

**Возможность применения ТЕА-лазера, генерирующего в нескольких спектральных диапазонах, для зондирования атмосферы.** С использованием даже достаточно ограниченного спектра линий генерации ТЕА-лазера на инертных газах можно создать чувствительный газоанализатор, работающий по угловому отражателю на средних трассах. С использованием базы данных HITRAN проведены расчеты спектра пропускания атмосферы вблизи линий генерации ксенона с наибольшей выходной энергией (рис. 7). Видно, что линия  $5d[3/2]_1^0-6p[5/2]_2$  ( $\lambda = 1.731$  мкм) может быть использована в качестве off-линии, так как не имеет совпадений с линиями поглощения присутствующих в атмосфере газов. Вместе с тем линия  $5d[3/2]_1^0-6p[3/2]_1$  ( $\lambda = 2.026$  мкм) может быть использована как on-линия для измерения концентрации  $\text{CO}_2$ , а линия  $7p[1/2]_1-7s[3/2]_2^0$  ( $\lambda = 3.652$  мкм) — как оп-линия для измерения больших концентраций метана ( $\text{CH}_4$ ), которые возможны вблизи газопроводов. Линия  $5d[7/2]_3^0-6p[5/2]_2$  ( $\lambda = 3.508$  мкм) используется для диагностики оксида азота ( $\text{NO}_2$ ). Соответствующие минимально обнаружимые концентрации приведены в табл. 2.

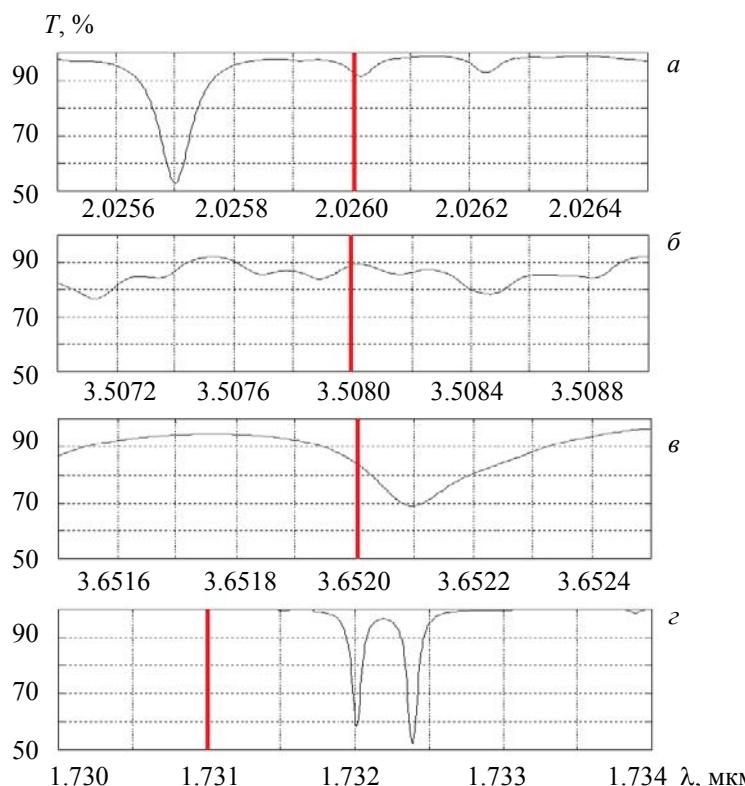


Рис. 7. Результаты расчета пропускания атмосферы вблизи линий генерации  $\text{Xe}$ :  $5d[3/2]_1^0-6p[3/2]_1$ ,  $\lambda = 2.026$  мкм (a);  $5d[7/2]_3^0-6p[5/2]_2$ ,  $\lambda = 3.508$  мкм (b);  $7p[1/2]_1-7s[3/2]_2^0$ ,  $\lambda = 3.652$  мкм (c);  $5d[3/2]_1^0-6p[5/2]_2$ ,  $\lambda = 1.731$  мкм (d); условия расчета: длина трассы  $2L = 1000$  м,  $T = 296$  К, давление 765 мм рт. ст., содержание молекул  $\text{H}_2\text{O}$  7750 ppm,  $\text{CO}_2$  400 ppm,  $\text{NO}_2$  50 ppm,  $\text{CH}_4$  100 ppm; вертикальными линиями обозначены линии генерации

**Таблица 2. Оптимальные пары линий и предельно обнаружимые концентрации для углекислого газа и метана (длина трассы  $2L = 1000$  м)**

Газ	on-line		off-line		$C_{\min}$ , ppm
	Линия	$\lambda$ , мкм	Линия	$\lambda$ , мкм	
$\text{CO}_2$	$5d[3/2]_1^0-6p[3/2]_1$	2.026	$5d[3/2]_1^0-6p[5/2]_2$	1.731	200
$\text{NO}_2$	$5d[7/2]_3^0-6p[5/2]_2$	3.508	$5d[3/2]_1^0-6p[5/2]_2$	1.731	25
$\text{CH}_4$	$7p[1/2]_1-7s[3/2]_2^0$	3.652	$5d[3/2]_1^0-6p[5/2]_2$	1.731	30

**Заключение.** Продемонстрирована возможность получения в реализованной ТЕА-лазерной системе с улучшенной конструкцией генерации в диапазонах 1.0—4.0 и 9.2—10.8 мкм, в том числе одновременной, за счет использования комбинированной газовой смеси, включающей в себя небольшое количество инертных газов, молекул углекислого газа и буферного газа (Хе:СО<sub>2</sub>:Не). Условия возбуждения, применяемые обычно для ТЕА СО<sub>2</sub>-лазера, позволяют эффективно возбуждать и инертные газы, а используемые материалы позволяют организовать оптический резонатор, эффективный для диапазонов 1.0—4.0 и 9.2—10.8 мкм. Получение мощных импульсов лазерного излучения на линиях инертных газов в системе с самостоятельным разрядом, конструктивно похожей на типичный ТЕА СО<sub>2</sub>-лазер, открывает большие возможности по созданию многоволнового лазера, генерирующего в нескольких сильно различающихся спектральных диапазонах, что представляет собой перспективное направление в лазерной технике.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф21-050 “Одновременная генерация в ТЕА лазерной системе на электронных переходах инертных газов и молекулы СО<sub>2</sub>”).

- [1] **В. Л. Козлов, М. М. Кугейко.** Приборы и методы измерений, № 2-3 (2011) 5—12
- [2] **А. Я. Паюров, В. В. Кюн, А. А. Сипайло, Г. А. Симонова.** Перестраиваемый двухволновый СО<sub>2</sub> лазер, патент RU185425U1 (2006)
- [3] **Н. Г. Басов, В. А. Данилычев.** УФН, **148** (1986) 55—96
- [4] **V. F. Losev, S. V. Mel'chenko, V. F. Tarasenko, E. N. Tel'mirov.** Opt. Commun., **46**, N 3 (1983) 213—216
- [5] **К. М. До, Б. А. Козлов.** Вестн. Рязанского гос. радиотехн. ун-та, **66**, № 2 (2018) 69—76
- [6] **Н. Г. Басов, В. В. Баранов, В. А. Данилычев, А. Ю. Дудин, Д. А. Заярный, Л. В. Семенова, Н. Н. Устиновский, И. В. Холин, А. Ю. Чугунов.** Квант. электрон., **13**, № 3 (1986) 488—492
- [7] **А. Р. Сорокин.** ЖТФ, **49**, № 8 (1979) 1673—1677
- [8] **V. O. Petukhov, V. A. Gorobets.** Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Advanced Optoelectronics and Lasers, September 12–17, 2005 Yalta, Crimea, Ukraine (2005) 120—122
- [9] **Ю. М. Андреев, В. Г. Воеводин, П. П. Гейко, В. А. Горобец, О. Г. Ланская, В. О. Петухов, Н. П. Солдаткин, А. А. Тихомиров.** Лидарные системы и их оптико-электронные элементы, под ред. М. В. Кабанова, Томск, Институт оптики атмосферы СО РАН (2004)
- [10] **V. V. Churakov, V. A. Gorobets, V. O. Petukhov.** Infrared Phys., **29**, N 2-3 (1989) 339—341