В.А. Горобец, Б.Ф. Кунцевич, В.О. Петухов

ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова» НАН Беларуси, Минск, Беларусь

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ CO_2-ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Введение

Известно, что спектр излучения CO_2-лазеров, генерирующих на линиях обычных, секвенционных, горячих и других переходов, представляет собой набор дискретных спектральных линий, которые соответствуют отдельным колебательно-вращательным переходам [1]. Для преобразования излучения этих лазеров из одной спектральной области в другую с целью решения задач селективного воздействия на вещество используются нелинейные кристаллы.

ТЕА CO_2-лазеры обычно излучают импульсы, состоящие из мощного (с амплитудой $\geq$ 1 МВт) лидирующего пика, длительностью ~100 нс, и «хвоста» длительностью $\geq$ 1 мкс, содержащего обычно $\geq$ 50 % энергии импульса. Известно, что хвост импульсов практически не преобразуется во вторую гармонику из-за низкой интенсивности и, более того, существенно снижает эффективность удвоения частоты излучения из-за последствий, к которым приводят эффекты теплового нагрева. Поэтому для эффективной генерации второй гармоники (ГВГ) и других нелинейно-оптических преобразований принципиально важно использовать короткие высокоинтенсивные импульсы [1].

Расширение спектра излучения CO_2-лазеров в коротковолновую область спектра можно осуществить за счет нелинейного

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

преобразования частоты их излучения в оптических кристаллах, в частности генерации 2-ой гармоники (ГВГ). Для преобразования излучения CO_2-лазеров в длинноволновую область спектра можно использовать принцип генерации разностных частот (ГРЧ) с помощью нелинейных кристаллов

Данная работа посвящена исследованию возможностей управления параметрами излучения импульсных CO_2-лазеров применительно к эффективному решению задач нелинейного преобразования частоты излучения (прежде всего получение мощных коротких импульсов).

1. Численное моделирование временных параметров излучения

Предполагается, что имеется двухволновая CO_2-лазерная система, когда в одном и том же объеме активной среды генерация может осуществляться одновременно на двух колебательно-вращательных линиях. В данном разделе главное внимание уделяется выяснению путем численного моделирования условий, при которых удается получить два максимально интенсивных лазерных импульса приблизительно одинаковой пиковой мощности с разными длинами волн излучения, временные интервалы высвечивания которых максимально перекрываются. Такие одновременно генерируемые лазерные импульсы (двухволновой режим генерации) за счет ГРЧ могут быть преобразованы в излучение с большей длиной волны. Для определенности рассматривается случай генерации лазерного излучения одновременно на двух колебательно-вращательных переходах в полосе $00^01–10^00$ молекулы CO_2. В качестве первого канала генерации используется линия $10P36$ (частота ν_1 = 929,017 см$^{-1}$), а в качестве второго – линия $10P4$ (ν_2 = 957,800 см$^{-1}$). Поскольку $\nu_1 - \nu_2 = 28{,}783$ см$^{-1}$, то при ГРЧ будет получено излучение с длиной волны ~ 347 мкм. Для определенности задавались следующие параметры ТЕ CO_2-лазерной системы: состав активной смеси CO_2:N_2: He = 0,2:0,2:0,6 при давлении 100 Торр, температура активной смеси T_a = 300 К; длительность переднего фронта импульса накачки t_m = 0,35 мкс, а характерное время экспоненциального затухания заднего фронта t_x = 0,4 мкс; $N_e^m = 1\cdot10^{13}$ см$^{-3}$ – максимальное значение плотности свободных электронов, достигаемое в момент времени t_m,. Более подробное описание используемой модели и параметров приведено в [2].

Результаты расчетов временной зависимости интенсивности излучения I_i в i-ом канале (i = 1,2) приведены на рисунке 1. Путем подбора коэффициентов потерь для обоих каналов 0,00080 см$^{-1}$ и 0,00084 см$^{-1}$ создавались условия, когда пиковые интенсивности лазерных импульсов в первом I_1^m и втором каналах I_2^m были примерно

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

одинаковые. В данном случае: $I_1^{m} \approx I_2^{m} \approx 2{,}3$ МВт/см^2. При этом моменты времени, соответствующие максимумам импульсов излучения в первом и втором каналах, несколько отличаются: $t_1^{m} = 0,\ 558$ мкс и $t_2^{m} = 0,\ 503$ мкс. Временной сдвиг (отличие) максимумов импульсов излучения составляет $\Delta t_{1\text{-}2}^{m} = t_1^{m} - t_2^{m} = 0{,}055$ мкс. Отметим, что длительности импульсов на полувысоте для первого и второго каналов равны: $\Delta t_1^{0,5} = 0{,}41$ мкс и $\Delta t_2^{0,5} = 0{,}26$ мкс. В качестве некоторой относительной величины, характеризующей величину временной отстройки максимумов интенсивностей излучения для обоих каналах может служить отношение минимальной из временных ширин на полувысоте $\Delta t_2^{0,5}$ к $\Delta t_{1\text{-}2}^{m}$: $r_{\Delta t}^{m} = \Delta t_2^{0,5}/\Delta t_{1\text{-}2}^{m}$. В данном случае $r_{\Delta t}^{m} = 4{,}7$. Представляется, что это вполне удовлетворительное значение, соответствующее сравнительно хорошему временному перекрытию импульсов излучения.

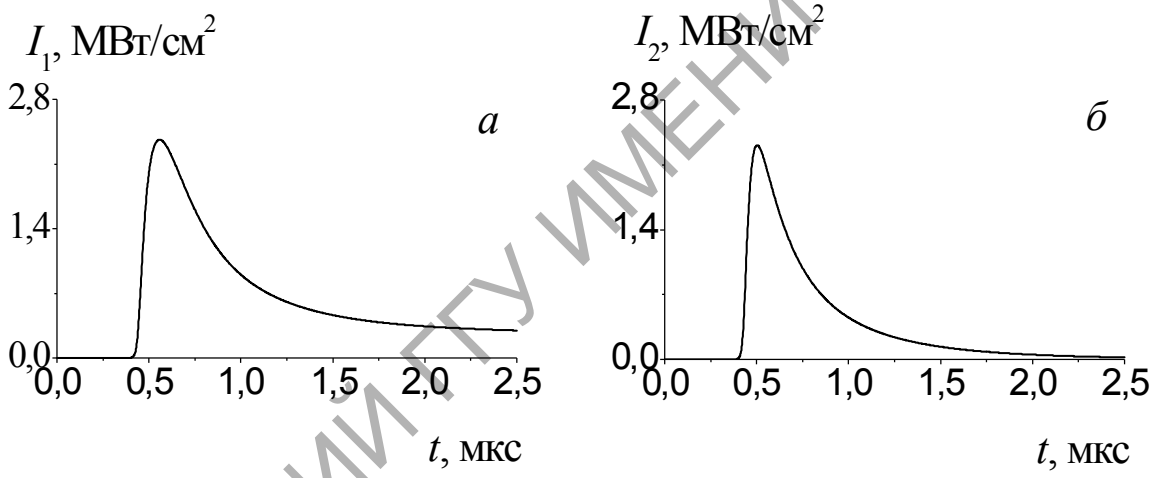

Рисунок 1 – Зависимости величин I_1 и I_2 от времени

Целесообразно отметить, что моменты времени, соответствующие уровню $0{,}1I_i^{m}$ на переднем фронте для первого и второго каналов равны: $t_1^{0,1} = 0{,}44$ мкс и $t_2^{0,1} = 0{,}42$ мкс. Поскольку $t_1^{0,1} > t_2^{0,1}$ и $t_1^{m} > t_2^{m}$, то временное перекрытие импульсов на переднем фронте определяется процессом высвечивания лазерного излучения в первом канале. Из сравнения рисунков 1,а и 1,б следует, что временное перекрытие импульсов на заднем фронте ограничивается вторым каналом.

Более раннее высвечивание излучения во втором канале на переднем фронте и более короткий задний фронт импульса во втором канале являются основными факторами, ограничивающими длину временного интервала перекрытия импульсов.

Комбинация линий 10*P*36 и 10*P*4 специально подбиралась из

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

условия, что при T_a = 300 К населенности верхних лазерных вращательных подуровней приблизительно одинаковы и для этой пары линий ненасыщенные коэффициенты усиления также близки. Дополнительные расчеты проводились для двухволновой генерации на линиях секвенционных и горячих переходов, а также их комбинаций. Установлено, что для максимального перекрытия во времени обоих импульсов с приблизительно одинаковой пиковой интенсивностью необходимо выбирать пары линий с максимально близкими значениями ненасыщенных коэффициентов усиления.

2. Оптимизация активной среды и накачки ТЕА CO_2-лазера для эффективного преобразования в нелинейных кристаллах

Наиболее простым методом укорочения длительности импульсов излучения CO_2 лазеров является их формирование в активной среде путем подбора состава рабочей смеси и соответствующей оптимизации резонатора. Однако негативным последствием такого подхода является значительное, порой на порядок и выше, снижение энергетических параметров ТЕА CO_2-лазера, по сравнению с обычным режимом генерации.

В данном разделе рассматривается возможность формирования укороченных импульсов излучения ТЕА CO_2-лазеров сравнительно простым методом – путем выбора и оптимизации количества вводимых в активную среду легкоионизируемых присадок, ранее используемых для повышения эффективности работы лазеров. К их числу, например, можно отнести, три-н-пропиламин (ТПА) и ксенон. В экспериментальных исследованиях, проведенных с использованием ТЕА CO_2-лазера с УФ предионизацией активной среды, определены оптимальные концентрации ТПА и Xe для ряда смесей. Было показано, что в оптимальных условиях добавки легкоионизируемых присадок приводят к значительному сокращению длительности лазерного импульса без уменьшения его энергии. Для активной среды с ТПА оптимальная рабочая смесь газов имела состав CO_2:N_2:He:ТПА = 1:1:3:0,01. В такой среде лазерное излучение формируется раньше, а импульсы излучения имеют примерно в два раза меньшие полную длительность и длительность на полувысоте по сравнению с импульсами, генерируемыми смесью без ТПА. При этом выходная энергия импульсов не изменяется, а их пиковая мощность возрастает более чем в два раза. Использование укороченных и более интенсивных лазерных импульсов для накачки удвоителей частоты позволило примерно в 3 раза повысить эффективность ГВГ, по сравнению с типичными импульсами накачки. Это дало возможность использовать для решения различных задач существенно более дешевые, в 1,5–2 раза меньшей длины, нелинейные кристаллы $AgGaSe_2$ (L = 10 мм) и $ZnGeP_2$

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

(L = 7 мм).

Основным механизмом укорочения импульсов в данном случае является увеличение, при добавлении в активную среду ТПА, скорости релаксации колебательной энергии, запасаемой в «резервуаре» асимметричная мода $CO_2 + N_2$.

ТЕА CO_2-модуль изготавливался из стеклоэпоксидного цилиндра и образовывал электроразрядную герметизированную камеру для активной среды [1]. Основной разряд поджигается между электродами длиной 70 см (ширина – 3,5 см, межэлектродный промежуток – 2,1 см). Питание цепи основного разряда и разряда УФ предыонизации происходит от одной батареи (два малоиндуктивных (~ 20 нГн) сильноточных (~ 80 кА) конденсатора типа КМК 50-01). Их общая емкость – 0,2 мкФ, а оптимальное напряжение заряда – ~ 20 кВ. Для повышения эффективности системы накачки была разработана оригинальная система предыонизации активной среды, состоящая из большого количества тонких (диаметр ~ 0,5 мм) металлических проволочек, укрепленных на изолирующих подставках. Они располагаются с равномерным шагом (5,5 мм) параллельно катоду по всей его длине. Их расстояние от поверхности катода составляет примерно 2,5 мм. При этом важно, что каждая проволочка соединена последовательно с отдельным ограничивающим ток малогабаритным и малоиндуктивным конденсатором. Экспериментальные исследования показали значительное преимущество разработанной системы предыонизации по сравнению с «боковой» системой УФ-предыонизации [3], прежде всего, по энергетическим параметрам. Она обеспечивает работу лазера с гораздо большей частотой повторения импульсов, вплоть до 100 Гц без прокачки активной среды. Ресурс работы лазера без замены активной среды также значительно увеличивается. Кроме того, «боковая» система предыонизации значительно (в 2–3 раза) уступает по скорости введения импульсной энергии накачки в активную среду.

Аналогичные исследования были проведены и для малых добавок ксенона в активную среду ТЕА CO_2-лазера, которые также подтвердили перспективность предлагаемой методики укорочения лазерных импульсов для последующего эффективного излучения в нелинейных кристаллах.

Заключение

Выполненные исследования показывают, что для осуществления двухволнового режима генерации в импульсных CO_2-лазерах с максимально возможной степенью перекрытия импульсов во времени и приблизительно одинаковой пиковой интенсивностью необходимо подбирать пары линий с максимально близкими значениями

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

ненасыщенных коэффициентов усиления.

Для формирования укороченных импульсов излучения ТЕА CO_2-лазеров можно добавлять в активную среду легкоионизируемые присадки (например, три-н-пропиламин и ксенон). При этом выходная энергия импульсов не изменяется, а их пиковая мощность возрастает более чем в два раза.

Литература

1. Лидарные системы и их оптико-электронные элементы / Ю.М. Андреев, В.Г. Воеводин, П.П. Гейко, В.А. Горобец, О.Г. Ланская, В.О. Петухов, Н.П. Солдаткин, А.А. Тихомиров. – Томск: Издательство Института оптики атмосферы СО РАН, 2004. – 526 с.

2. Кунцевич, Б.Ф. Влияние отстройки частоты на параметры излучения импульсных CO_2-лазеров // Журнал прикладной спектроскопии. – 2011. – Т. 78. – С. 571–579.

3. ТЕА CO_2-лазер с укороченными импульсами для генерации второй гармоники в нелинейных кристаллах / В.О. Петухов, В.А. Горобец, Ю.М. Андреев, Г.В. Ланский // Вестник СПБО АИН. – 2007. – Вып. 3. – С. 65–82.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ