

Импульсные твердотельные лазеры

А. Ляшенко, В. Павлович
для батиметрических
и лидарных систем

В статье рассмотрены вопросы оптимизации основных параметров гигантских импульсов излучения твердотельных лазеров, предназначенных для использования в батиметрических и лидарных системах. Обсуждаются возможные пути создания таких лазеров. Проведен сравнительный анализ оптических схем и режимов работы лазеров. Для лазера с "электрооптическим" зеркалом показана возможность управления длительностью импульсов излучения в диапазоне частот повторения импульсов до 400 Гц. Рассмотрены переходные процессы в лазере и некоторые методы стабилизации выходных параметров.

Лазеры, обеспечивающие генерацию излучения в видимом, ультрафиолетовом и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах находят широкое применение в системах лазерной оптической локации, батиметрии, дальнометрии и в системах дистанционного зондирования атмосферы (лидарах). В таких системах используются лазеры с фиксированной или с перестраиваемой длиной волны излучения. При этом наиболее широкое применение получили твердотельные лазеры на неодимосодержащих кристаллических средах, в том числе лазеры с генерацией высших гармоник излучения, работающие в режиме с модуляцией добротности с длительностью импульсов излучения в наносекундном диапазоне с фиксированной длиной волны излучения. Эти лазеры используются как в качестве самостоятельного источника излучения, так и в качестве источника излучения накачки для перестраиваемых лазеров на растворах органических красителей, параметрических генераторов света, генераторов суммарной и разностной частоты.

В большинстве случаев указанные лазеры построены на основе оптических схем с частично отражающим выходным зеркалом. Характерной особенностью лазеров с такой схемой является наличие жесткой связи между параметрами импульсов излучения, прежде всего энергией импульса и его длительностью. Эта связь состоит в уменьшении длительности импульса с одновременным увеличением его энергии по мере роста энергии импульсов накачки. Наличие естественных ограничений, связанных прежде всего с предель-

но допустимой электрической нагрузкой на лампу накачки, не позволяет использовать такие лазеры, например, в батиметрических системах, где требуются короткие по длительности импульсы при большой частоте повторения (сотни герц) и, следовательно, небольшой энергии импульсов накачки (~5 Дж). В работе [1] показана перспективность использования для этой цели оптической схемы лазера с поляризационным выводом излучения в режиме pulse transmission, заключающемся в быстром переключении полезных потерь резонатора в момент достижения максимальной мощности гигантского импульса.

Для накачки перестраиваемых лазеров требуются импульсы лазерного излучения с большой энергией и большой длительностью. Это связано с тем, что для достижения в перестраиваемых лазерах высокой эффективности и максимальной ширины диапазона перестройки длины волны излучения необходимо, чтобы время развития генерации от уровня спонтанной люминесценции не превышало длительности импульса лазерной накачки. Большое время развития импульса генерации является основной причиной снижения эффективности перестраиваемого лазера и даже срыва генерации на краях диапазона перестройки в условиях, когда накачка осуществляется лазером с короткой длительностью импульса [2].

Наиболее простым и эффективным методом увеличения длительности импульса излучения твердотельных лазеров является увеличение длины резонатора, что, однако, приводит к увеличению массы и габа-

ритов. В то же время при работе лазера с большими частотами повторения импульсов сильная термическая линза, возникающая в активном элементе, не позволяет заметно увеличить длину резонатора при сохранении его устойчивости.

Необходимость создания высокоэффективных компактных перестраиваемых лазеров, способных устойчиво работать в условиях ограниченного энергопотребления при достаточно высоких частотах повторения импульсов, заставляет искать новые схемотехнические решения для лазеров накачки со специфическим набором выходных параметров. При этом к лазерам накачки предъявляются также требования по надежности и эффективности в режимах, характеризующихся сильными термооптическими эффектами (термическая линза, наведенное двулучепреломление, температурная зависимость параметров), которые возникают в активном элементе на АИГ:Nd при частотах повторения импульсов сотни герц [3], в активных элементах из ГСГГ:Cr,Nd, ИСГГ:Cr,Nd уже при частотах повторения импульсов десятки герц [4], а также в электрооптических элементах на DKDP при большой средней мощности лазерного излучения [5].

При создании твердотельных лазеров с фиксированной длиной волны излучения, предназначенных для работы в режимах с высокими частотами повторения импульсов, в которых воздействие упомянутых факторов является особенно сильным, был выработан ряд решений, позволивших осуществить эти режимы на практике [6—10]. Углубленное изу-

чение предложенных оптических схем и способов модуляции добротности резонатора показало, что при их использовании появляются возможности управления длительностью импульсов излучения и, более того, их формой при практически неизменной энергии импульсов. Таким образом, появляется возможность создания лазеров накачки, оптимальных по своим параметрам для различных активных сред, используемых в перестраиваемых лазерах. При этом набор выходных параметров лазера накачки может быть "динамически" оптимизирован применительно даже к отдельным спектральным поддиапазонам в общем диапазоне перестройки длины волны перестраиваемого лазера.

Указанная возможность может быть реализована в импульсном твердотельном лазере [8] с оптической схемой, представленной на рис.1. Схема обеспечивает частичную взаимную компенсацию эффектов наведенного двулучепреломления в активном и электрооптическом элементах и включает в себя так называемое управляемое "электрооптическое" выходное зеркало. При изменении характеристик такого зеркала по определенному закону, что эквивалентно изменению коэффициента отражения выходного зеркала, можно замедлять, ускорять или обрывать процесс генерации гигантского импульса в резонаторе. По-

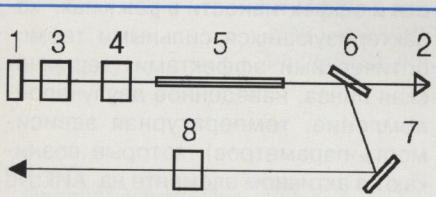


Рис.1. Оптическая схема лазера с "электрооптическим" зеркалом:

1 — глухое зеркало; 2 — призма-крыша; 3 — электрооптический элемент из DKDP; 4 — вращатель плоскости поляризации на 90°; 5 — активный элемент; 6 — поляризатор; 7 — поворотное зеркало; 8 — нелинейный элемент из КТР.

скольку в данном случае имеет место управление полезными потерями резонатора, потери в КПД лазера оказываются минимальными.

Оптическая схема этого лазера имеет своим прототипом схему, подробно описанную в работе [6], но в отличие от последней позволяет лазеру работать в более широком диа-

пазоне частот повторения импульсов.

Представляет интерес сравнение предлагаемого лазера с лазером на основе традиционной оптической схемы с частично прозрачным выходным зеркалом [3], в котором модуляция добротности осуществляется за счет изменения внутренних потерь резонатора при подаче на электроды электрооптического элемента импульса управляющего напряжения. Для сравнения способов модуляции добротности резонатора представим электрооптический элемент в виде эквивалентной двулучепреломляющей пластинки с главными осями под углом 45° к плоскости пропускания поляризатора и рассмотрим зависимость коэффициента потерь резонатора $Kл$, усредненного за два обхода резонатора, от разности фаз γ обыкновенного и необыкновенного лучей после прохождения через электрооптический элемент. Указанные зависимости представлены на рис.2. Коэффициент потерь $Kл$ определяется следующим образом:

$$K_{лтр} = K_r + r + \rho_0,$$

где $K_r = (21)^{-1} \ln r^{-1}$ коэффициент полезных потерь,

r — коэффициент отражения выходного зеркала,

l — длина активного элемента,

ρ — коэффициент внутренних потерь (или коэффициент полезных потерь), зависящий от разности фаз γ ,

ρ_0 — коэффициент потерь внутрирезонаторных элементов, зависящий от коэффициентов поглощения и отражения от просветленных гранией.

Для традиционной схемы лазера после подачи импульсов напряжения на электроды электрооптического элемента коэффициент ρ снижается от максимальной величины до 0 при $\gamma = \pi/2$ при $\gamma = 0$. Величина $Kл$ при $\gamma = 0$ определяется, в основном, значением $K_r (K_r \gg \rho_0)$, которое выбирается оптимальным ($K_r = K_r^*$) по максимуму энергии гигантского импульса излучения (при этом коэффициент отражения зеркала $r = r^*$).

В предложенной схеме лазера $K_r = 0$, так как концевые отражатели полностью отражают излучение, а роль коэффициентов полезных по-

терь играет коэффициент ρ , который в момент генерации гигантского импульса должен быть равен K_r^* .

Из данных, приведенных на рис.2, видно, что в предложенной схеме для модуляции полезных потерь требуется существенно меньшее изменение разности фаз $\Delta\gamma_1$, чем $\Delta\gamma_2$ для модуляции внутренних потерь в тра-

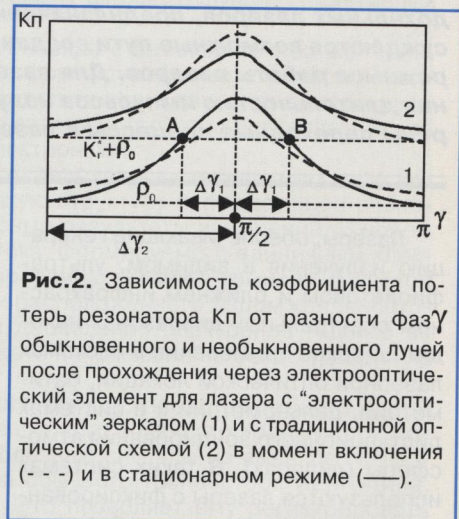


Рис.2. Зависимость коэффициента потерь резонатора $Kл$ от разности фаз γ обыкновенного и необыкновенного лучей после прохождения через электрооптический элемент для лазера с "электрооптическим" зеркалом (1) и с традиционной оптической схемой (2) в момент включения (- -) и в стационарном режиме (—).

диционной схеме. Следовательно, в первой схеме и амплитуда импульса управляющего напряжения требуется значительно меньшая. Более того, так как выходная энергия гигантского импульса имеет максимум при оптимальном коэффициенте отражения зеркала r^* и слабо изменяется при нарушении условия $r = r^*$, то, следовательно, не требуется высокая точность установки амплитуды импульса управляющего напряжения.

Как показано на рис.2, в предложенном лазере может быть применен способ модуляции полезных потерь в области $\gamma > \pi/2$ (зависимость 1, т.В — режим В). В этом случае излучение гигантского импульса внутри резонатора после прохождения области максимального усиления в поперечном сечении активного элемента попадает на область электрооптического зеркала с пониженным коэффициентом отражения. В результате, добротность резонатора в процессе генерации гигантского импульса оказывается несколько выше, а длительность импульса несколько больше, чем в описанном выше случае (рис.2, зависимость 1, точка А — режим А).

Дополнительное увеличение длительности гигантских импульсов (как

в режим тигается чении п способ ляющим раметр измене тическо При сов $F < \Delta$ шает Δ связан ным эн терь ре Основ сов из "электр именн (по ур частот для ре на рис что пр энерги но фор но от (режи

Пр ного и ку осу метод

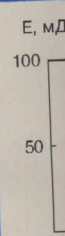


Рис. тельн лучен потер ня и

КТР, фект няя сост имп ник дли на с чив ком го д и э пот Кл эф

в режиме А, так и в режиме В) достигается также при медленном включении полезных потерь резонатора способом, изложенным в [9], позволяющим повысить стабильность параметров гигантских импульсов при изменении температуры электрооптического элемента.

При частотах повторения импульсов $F < 200$ Гц энергия E_H не превышает 9 Дж вследствие ограничения, связанного с конечным максимальным значением коэффициента потерь резонатора (рис.2).

Основные параметры импульсов излучения лазера на АИГ:Nd с "электрооптическим" зеркалом, а именно, энергия E и длительность (по уровню 0,5 в зависимости от частоты повторения импульсов F для режимов А и В представлены на рис.3. Из данных рис.3 следует, что при одной и той же выходной энергии гигантского импульса можно формировать импульсы с заметно отличающейся длительностью (режим А или режим В).

Преобразование частоты лазерного излучения во вторую гармонику осуществлялось внрезонаторным методом на элементе из кристалла

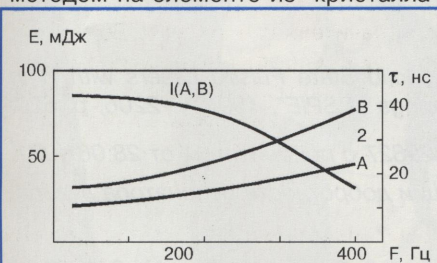


Рис. 3. Зависимости энергии E (1) и длительности τ (2) гигантских импульсов излучения лазера с модуляцией полезных потерь резонатора от частоты повторения импульсов F в режимах А и В.

КТР, помещенном в термостат. Эффективность процесса преобразования излучения во вторую гармонику составляла 30–45%, а длительность импульса излучения второй гармоники составляла примерно 60% от длительности импульсов излучения на основной длине волны.

Оптическая схема лазера обеспечивает лишь частичную взаимную компенсацию эффектов наведенного двулучепреломления в активном и электрооптическом элементах и потому является схемой с функцией $K_H(\gamma)$, зависимой от разбаланса этих эффектов. Наведенное излучением

лампы накачки двулучепреломляется в активном элементе устанавливается через несколько секунд после включения лазера. Наведенное лазерным излучением двулучепреломление в электрооптическом элементе устанавливается через (~10 мин. Эта разница во времени объясняется различными условиями охлаждения: активный элемент охлаждается жидким хладагентом, а электрооптический — конвективным путем. Как правило, в работе каждого лазера имеет место переходный процесс со своими особенностями, характерными для данной оптической схемы.

Переходный процесс в лазере с "электрооптическим" зеркалом сопровождается аномальным изменением функции $K_H(\gamma)$ (рис.2). Это проявляется в том, что за время переходного процесса происходит улучшение "запирающей" способности резонатора в отличие от традиционной схемы, в которой происходит ее ухудшение. Однако в лазере [8] из-за наличия температурной зависимости электрооптического коэффициента эквивалентное выходное зеркало в момент включения лазера обладает слишком высоким коэффициентом отражения. Это, в свою очередь, означает, что в данный момент мощность гигантского импульса излучения внутри резонатора превышает свое значение в стационарном тепловом режиме, вследствие чего все внутрирезонаторные элементы испытывают лучевую перегрузку и могут быть повреждены.

В целях защиты элементов резонатора от лучевой перегрузки был применен метод, связанный с искусственным уменьшением коэффициента усиления в активном элементе за счет использования излучения свободной генерации [10]. Этот режим осуществляется при включении добротности резонатора после окончания свободной генерации, что позволяет стабилизировать коэффициент усиления при увеличении энергии импульса накачки выше порога возникновения свободной генерации, в виде которой излучается избыточная энергия. В случае фиксированной энергии импульса накачки во время переходного процесса меняется максимальный коэффициент потерь резонатора, равный при свободной генерации коэффициенту усиления, который, в свою очередь,

является начальным коэффициентом усиления при развитии гигантского импульса. Следовательно, в момент включения лазера начальный коэффициент усиления имеет величину ниже своего стационарного значения, что приводит к уменьшению лучевой перегрузки элементов резонатора. После прогрева лазера свободная генерация исчезает, а коэффициент усиления и коэффициент отражения "электрооптического" зеркала выходят на свои стационарные значения.

Рассмотренный метод имеет еще одно преимущество: с увеличением энергии импульсов накачки E_H выше номинальной, равной порогу возникновения свободной генерации, не происходит рост локальной плотности энергии в поперечном сечении луча, что повышает надежность лазера и снижает требования к точности установки величины E_H . При этом свободная генерация практически не влияет на эффективность последующих нелинейных процессов генерации высших гармоник. Так, уже после преобразования во вторую гармонику отношение пиковой мощности свободной генерации превышает 10^6 .

Описанный выше лазер с активным элементом из АИГ: Nd, работавший в режиме В, был использован для накачки параметрического генератора света (ПГС) на основе нелинейного кристалла КТР. При параметрах накачки: $\lambda = 1064$ нм, $E = 90$ мДж, $\tau = 18$ нс получена параметрическая генерация с параметрами: $\lambda_c = 1571$ нм, $E = 25$ мДж, $\tau = 13$ нс.

Уменьшение длительности импульса накачки до $\tau = 14$ нс привело к увеличению порога генерации ПГС и снижению энергии импульса излучения на сигнальной длине волны λ_c .

С целью уменьшения длительности импульса излучения на основной длине волны (1064 нм) на электроды электрооптического элемента подавался импульс управляющего напряжения с длительностью спада около 10 нс. При частоте повторения импульсов 200 Гц и параметрах основного излучения $E = 70$ мДж, $\tau = 7$ нс осуществлена генерация вто-

рой гармонике с параметрами: $\lambda=532$ нм, $E=30$ мДж, $\tau = 5$ нс.

На основе предложенной оптической схемы с применением рассмотренных способов модуляции полезных потерь резонатора удается обеспечить высокую эффективность и надежность импульсного твердотельного лазера в широком диапазоне частот повторения импульсов.

Возможности изменения соотношения между основными пара-

метрами гигантских импульсов излучения, такими как энергия, длительность, форма импульса, могут быть дополнительно развиты в случае применения импульса управляющего напряжения специальной формы.

Найденные решения позволяют обеспечивать достаточно малую длительность импульса при малых энергиях накачки, что находит

применение при создании эффективных высокочастотных импульсных лазеров для гидролокации.

В то же время возможность увеличения длительности импульса излучения при больших энергиях накачки и, следовательно, при больших коэффициентах усиления, позволит применять описанный лазер в качестве эффективного источника накачки для перестраиваемых лазеров.

Литература

1. **Rankin M.B., Hall M.J., Ferguson G.D.** Pulse Transmission Mode (PTM) Nd:YAG Laser for Airborne Hydrography. "SPIE. Advance in Laser Engineering and Applications", 1980, v. 247, p. 157
2. **С.М. Копылов, Б.Г. Лысой, С.Л. Серегин, О.Б. Чередниченко.** Перестраиваемые лазеры на красителях и их применение. — М., "Радио и связь", 1991
3. **А.В. Мезенов, Л.Н. Сомс, А.И. Степанов.** Термооптика твердотельных лазеров. — Л., "Машиностроение", 1986
4. **А.Н. Алпатъев, А.А. Данилов, Г.И. Дьяконов и др.** Лазеры на основе редкоземельных скандиевых гранатов с хромом. Труды ИОФАН. — М., "Наука", 1990, т.26, с. 125
5. **I.P. Khristov, I. V. Tomov, S.V. Saltiel.** Self-Heating Effects in Electro-Optic Light Modulators. "Opt. And Quantum Electronics", 1983, v. 15, p. 289
6. **А.И. Ляшенко.** Эффективный высокочастотный импульсный лазер на алюмоиттриевом гранате с неодимом с электрооптической модуляцией полезных потерь резонатора. "Электронная техника. Серия 11. Лазерная техника и оптоэлектроника", 1991, вып. 2(58), с. 17
7. **V. L. Pavlovitch, A.L. Lyashenko, E.V. Raevskii, V.A. Konovalov.** Solid State Pulsed Lasers with High Repetition Rate and Harmonic Generation for Laser Board Systems. "Proceedings of SPIE", 1994, v. 2206, p. 520.
8. **А.И. Ляшенко.** Импульсный твердотельный лазер. Патент РФ № 1829827 с приоритетом от 28.06.1991.
9. **А.Г. Злодеев, А.И. Ляшенко, М.Л. Хайретдинов.** Способ модуляции добротности резонатора лазера. Патент РФ № 1759212 с приоритетом от 4. 12. 1989
10. **А.И. Ляшенко.** Способ модуляции добротности резонатора лазера. Авт. Свидетельство № 646729 от 8.12.1975

Представляем авторов номера

Ляшенко Александр Иванович. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ "Полюс". Окончил физический факультет Московского государственного университета им. Ломоносова в 1971 году. Специалист в области импульсных твердотельных лазеров различного назначения. Автор более 10 изобретений.

Павлович Владимир Леонидович. Кандидат технических наук, начальник лаборатории НИИ "Полюс". Окончил Московский институт электронного машиностроения в 1970 году. Специалист в области импульсных твердотельных лазеров различного назначения. Автор более пяти изобретений.