

УДК 621.373.826 : 535.241.13 : 534

В. И. Дашкевич, Б. Н. Тюшкевич, Ю. М. Щербак

*(Минск, Беларусь)***ДИНАМИКА И СПЕКТР ГЕНЕРАЦИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ  
МОНОИМПУЛЬСОВ ИЗ ЗАТРАВОЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
В ЛИНЕЙНОМ РЕЗОНАТОРЕ РУБИНОВОГО ЛАЗЕРА  
С МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ  
БЕГУЩЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНОЙ**

На основании экспериментальных исследований показано, что узкополосное затравочное излучение свободной генерации может быть достаточно эффективно использовано для сужения спектральной полосы гигантских импульсов в режиме  $TEM_{002}$ -моды при модуляции добротности резонатора лазера акустооптическим затвором с бегущей акустической волной. При участии в генерации поперечных типов колебаний более высоких порядков и более сложной структуры затравочного излучения необходимо учитывать возможность проявления эффекта внутрирезонаторного пространственно-временного преобразования лазерного излучения, приводящего к увеличению длительности и к многоимпульсному характеру генерации при включении добротности.

Для сужения спектральной полосы излучения моноимпульсного лазера с активным затвором весьма эффективным является метод, основанный на создании в резонаторе узкополосного затравочного излучения, предшествующего генерации мощного гигантского импульса.

Для осуществления подобного режима генерации использован так называемый метод сверхрегенеративного усиления [1, 2]. В качестве задающего применялся одночастотный беспичковый рубиновый лазер. Реализованы трех- и четырехзеркальные линейные схемы сверхрегенеративного усиления [1]. В четырехзеркальной схеме между задающим и исполняющим лазерами устанавливалась электрооптическая развязка. В схеме сверхрегенеративного усиления [2] для устранения воздействия гигантского импульса исполняющего лазера на задающий в исполняющем лазере был использован кольцевой резонатор. При этом во всех схемах в качестве активного элемента в исполняющем лазере использованы рубиновые стержни, а модуляция добротности осуществлялась электрооптическим затвором.

Подобный режим генерации реализован в рубиновом лазере с одним активным элементом и двумя связанными через электрооптический затвор (ЭОЗ) резонаторами, один из которых (дополнительный) служит для получения узкополосного затравочного излучения свободной генерации к моменту включения затвора [3]. Теоретическим исследованиям этого режима генерации посвящены работы [4—7]. Там же приведены результаты экспериментальных исследований рубинового лазера такого типа с различными конструкциями ЭОЗ. Проведенные позднее теоретические и экспериментальные исследования показали [8, 9], что лазер с линейным составным резонатором обладает преимуществом в сравнении с лазером с двумя связанными через ЭОЗ резонаторами [3].

В настоящей работе экспериментально исследованы особенности формирования гигантских импульсов из узкополосного затравочного излучения свободной генерации и их спектральный состав в линейном составном резонаторе

рубинового лазера с акустооптическим затвором (АОЗ). Оптимизация режима генерации в лазере такого типа представляет интерес, особенно с учетом того, что акустооптические затворы в отличие от электрооптических не требуют высоковольтного управления, обеспечивают эффективную модуляцию неполяризованного излучения, могут быть выполнены из оптических стекол, имеющих достаточно высокую однородность, более низкую стоимость по сравнению с электрооптическими кристаллами, к недостаткам которых можно еще отнести их гигроскопичность.

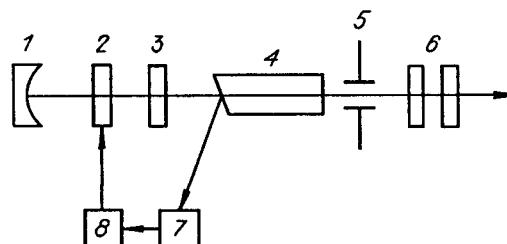
Блок-схема исследуемого лазера представлена на рис. 1. Поскольку эффективность дифракции в АОЗ меньше 100 %, дополнительный резонатор для получения узкополосного затравочного излучения свободной генерации при выключенном АОЗ и составной резонатор лазера для формирования моноимпульсной генерации при включении затвора образованы одними и теми же отражателями 1, 3, 6. В качестве отражателя 1 использовано сферическое зеркало с радиусом кривизны  $\sim 2,5$  м и коэффициентом отражения, близким к 1, а в качестве полупрозрачного отражателя 3 применялась плоскопараллельная подложка толщиной 10 мм. Выходным отражателем 6 являлась стопа из двух кварцевых подложек толщиной  $\sim 5$  мм каждая, разделенных воздушным промежутком  $\sim 3$  мм. Селекция основной поперечной моды осуществлялась диафрагмой диаметром  $\sim 1,5$  мм. Оптическая длина  $l_1$  между отражателями 3, 6 составляла  $\sim 77$  см, общая длина  $L$  составного основного резонатора равнялась  $\sim 100$  см. Схема лазера удовлетворяла условию ( $l_1/L \geq 0,5$ ), полученному при теоретическом анализе [7] и позволяющему даже при значительном несовпадении собственных частот основного и дополнительного резонаторов генерировать одночастотные импульсы. В лазере использован рубиновый стержень РЛС  $8 \times 120/180$  среднего оптического качества.

В работе применялись АОЗ, выполненные из оптического стекла марки ТФ7 с пьезопреобразователями продольных акустических волн из кристалла ниобата лития, повернутого на  $35^\circ$  Y-среза. Пластина пьезоэлектрика крепилась к светозвукопроводу методом диффузной сварки в вакууме [10]. После сварки пластины подвергались шлифовке до толщины 45 мкм, что соответствует резонансной частоте пьезопреобразователя  $\sim 80$  МГц.

Высота акустического пучка в АОЗ определялась шириной металлического пленочного электрода, напыляемого на пьезоэлектрик, и для разных образцов модулятора находилась в пределах от 0,8 до 4 мм. Длина светозвукопровода значительно превосходила поперечный размер лазерного резонатора. Противоположная к пьезопреобразователю сторона светозвукопровода составляла угол  $5^\circ$  к плоскости преобразователя, что исключало возникновение стоячих акустических волн. Минимальное время включения (выключения) добротности резонатора лазера можно определить по формуле  $t_{\min} = s/v$ , где  $s$  — поперечный размер излучения в резонаторе лазера вдоль направления акустических волн, в данном случае задаваемый диафрагмой, используемой в резонаторе для выделения  $TEM_{00q}$ -моды;  $v$  — скорость звука в материале светозвукопровода. Для стекла ТФ7  $v = 3,73$  км/с.

Блок управления АОЗ, содержащий генератор несущей частоты, импульсный модулятор и широкополосный усилитель мощности, выполнен на транзисторах и интегральных схемах. Управление блоком осу-

Рис. 1. Блок-схема лазера:  
1 — глухое сферическое зеркало, 2 — АОЗ, 3 — вспомогательный отражатель, 4 — активный элемент, 5 — диафрагма, 6 — выходной отражатель, 7 — фотоприемное устройство, 8 — блок управления АОЗ



ществлялось сигналами ТТЛ-уровней. Блок обеспечивал на рабочей частоте модулятора 80 МГц выходную мощность 4 Вт на согласованной нагрузке, длительность нарастания фронта управляющего радиочастотного импульса  $\leq 30$  нс, спада — 45 нс. Блок питается от стабилизированного источника питания  $27 \text{ В} \pm 10 \%$ , потребляемая мощность  $\leq 20$  Вт.

Исследования проведены при использовании различных типов АОЗ, отличающихся высотой  $h$  активной области (от 0,8 до 4 мм). Генерация осуществлялась с участием излучения нулевого порядка дифракции. В процессе накачки активного элемента на АОЗ подавался управляющий сигнал, который при традиционной модуляции добротности прерывался на время  $\sim 10$  мкс с определенной задержкой относительно импульса поджига. Тем самым производилось включение добротности резонатора лазера. При акустической модуляции добротности моноимпульсы независимо от используемого типа АОЗ на выходе лазера практически не отличались ни по характеру модуляции излучения, ни по спектральному составу. Параметры одного из таких моноимпульсов в режиме  $\text{TEM}_{00q}$ -моды проиллюстрированы на рис. 2, а, d. Следует отметить, что используемый блок управления АОЗ с уменьшением высоты акустического пучка обеспечивал более высокую эффективность дифракции, и это позволяло получать моноимпульсы при большем превышении накачки над порогом генерации. В частности, при использовании АОЗ с шириной пленочного электрода 4 мм в резонаторе без вспомогательного отражателя 3 удалось достичь превышения накачки над порогом генерации лишь в равном 1,35, а АОЗ с электродом шириной 0,8 мм обеспечивал накачку рубинового стержня с превышением до 2,15 над пороговым значением. При этом, наряду с увеличением энергии генерации от  $\sim 6$  до  $\sim 12,5$  мДж, наблюдалось некоторое сокращение длительности моноимпульсов.

Реализуемая эффективность дифракции в используемых АОЗ позволяла формировать гигантские импульсы из затравочного излучения свободной генерации и без полупрозрачного отражателя 3 в резонаторе. В этом случае затравочное излучение при соответствующей накачке активного элемента формировалось в линейном резонаторе, образованном отражателями 1, б частично включенной добротности. Часть затравочного излучения, отраженного от скошенного торца рубинового стержня, поступала на фотоприемное устройство 7, собранное на базе модуля ЛФДП-3 и обеспечивающее включение добротности с помощью блока управления АОЗ 8 в процессе развития любого по счету вперед заданного пичка свободной генерации. При этом сигнал, подаваемый на АОЗ, прерывался на время  $\sim 500$  нс, добротность резонатора воз-

растала и из узкополосного затравочного пичка свободной генерации развивался гигантский импульс. Исследуемый лазер обеспечивал достаточно надежную генерацию одночастотных моноимпульсов в режиме  $\text{TEM}_{00q}$ -моды даже при включении АОЗ в процессе развития первого пичка свободной генерации (см. рис. 2, b,

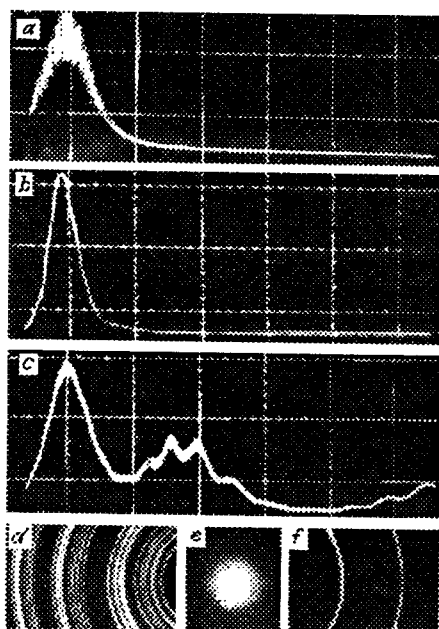


Рис. 2. Осциллограммы (а—с), интерферограммы (d, f) и поле (e) генерации лазера с АОЗ: режим  $\text{TEM}_{00q}$ -моды (а, b, d, f), генерация без селекции поперечных мод (с); длительность развертки 100 нс/см (а—с); дисперсия интерферометра Фабри — Перио 5,77 ПГц

*e, f*). Процент выхода одночастотных импульсов составлял ~95 % при энергии ~10 мДж и длительности на уровне половинной интенсивности ~50 нс. Осциллограммы получены с использованием фотоэлемента ФК-19 и скоростного осциллографа С7-19. Измерение энергии осуществлялось измерителем средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н.

В случае более сложной поперечной структуры затравочного излучения при включении добротности наблюдались импульсы, характер модуляции которых не соответствовал времени обхода излучения по резонатору. Одна из осциллограмм, отражающих подобный режим генерации, представлена на рис. 2, *c*. Наблюдаемое явление можно объяснить своеобразным эффектом внутрирезонаторного пространственно-временного преобразования лазерного излучения. В случае использования при формировании затравочной генерации излучения нулевого порядка дифракции прерывание акустического цуга в АОЗ в первом приближении можно рассматривать как воздействие движущегося со скоростью звука отверстия, ширина которого  $d$  зависит от длительности  $\Delta t_{\text{бл}}$  блокирующего цуг импульса (при  $\Delta t_{\text{бл}} \approx 10$  мкс  $d \approx 37,3$  мм, а при  $\Delta t_{\text{бл}} \approx 500$  нс  $d \approx 1,86$  мм). Проходящее через АОЗ затравочное лазерное излучение, дифрагирующее на акустическом цуге, прекращает дифрагировать при прерывании цуга. При этом в каждый момент времени прекращают дифрагировать лучи лишь от тех участков АОЗ, где отсутствует бегущая упругая волна. Таким образом, кратковременное прерывание акустического сигнала эквивалентно движению диафрагмы, последовательно в поперечном сечении резонатора от одного конца светозвукопровода к другому увеличивающего пропускание АОЗ и соответствующим образом изменяющего добротность резонатора. Наблюдаемые в этом случае модуляция излучения и многоимпульсный режим генерации лазера при включении добротности, на наш взгляд, являются следствием пространственной поперечной неоднородности затравочного излучения.

На рис. 3, *a—d* представлены осциллограммы и вид поля генерации на выходе лазера при использовании в его резонаторе вместо круглой диафрагмы 5 щели шириной ~1,5 мм, ориентированной по направлению светозвукопровода АОЗ. Включение добротности осуществлялось в процессе развития затравочного излучения свободной генерации. Включение добротности при переходе к более поздним по счету пикам свободной генерации, когда в генерацию вовлекались более отдаленные от центра участки рубинового стержня, сопровождалось увеличением общей длительности генерации, которая, как правило, носила многоимпульсный характер. Следует отметить, что конфигурация резонатора, относительная точность его юстировки, неоднородность рубинового стержня, достаточно большая расходимость лазерного излучения не поз-

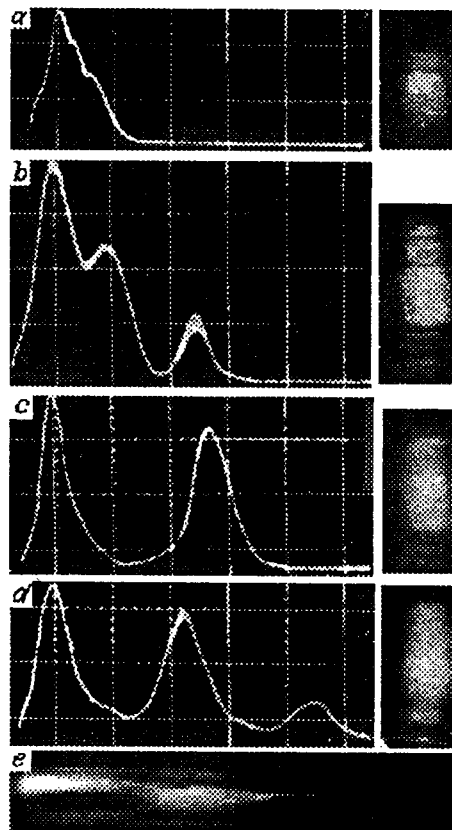


Рис. 3. Осциллограммы и поле генерации лазера при включении АОЗ излучением первого (*a*) и четвертого (*b—e*) пиков свободной генерации: длительность развертки осциллографа 100 нс/см (*a—d*), фотоэлектронного регистратора 250 нс/см (*e*)

воляют достаточно четко судить по полученным результатам о характере распределения затравочного излучения в плоскости АОЗ к моменту включения добротности. Для более детального изучения наблюдаемого явления необходимы дополнительные эксперименты. Однако и динамика поля генерации на выходе лазера подтверждает сделанное предположение. Исследования проведены с использованием фотоэлектронного регистратора ФЭР-7 с размером рабочего поля экрана  $\varnothing$  47 мм, работающего в режиме щелевой развертки. Щель регистратора ФЭР-7 шириной 0,2 мм совпадала с направлением щелевой диафрагмы в резонаторе лазера. Запуск развертки регистратора осуществлялся излучением того же пика свободной генерации, с помощью которого производилось включение АОЗ в резонаторе лазера. Один из результатов получаемой щелевой развертки поля выходного лазерного излучения представлен на рис. 3, е. Задержка запуска регистратора ФЭР-7 при длительности развертки 0,25 мкс/см составляла 0,5 мкс, что затрудняло наблюдение переднего фронта импульсной генерации при включении добротности. Однако перемещение генерации от одного края щели к другому, соответствующее описанному выше механизму модуляции добротности резонатора лазера бегущей акустической волной, наблюдалось достаточно четко.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что узкополосное затравочное излучение свободной генерации может быть достаточно эффективно использовано для сужения спектральной полосы гигантских импульсов в режиме  $TEM_{00q}$ -моды при модуляции добротности резонатора лазера АОЗ с бегущей акустической волной. В случае более сложной поперечной структуры затравочного излучения необходимо учитывать возможность модуляции выходного излучения лазера, приводящего в ряде случаев к увеличению длительности и к многоимпульсному характеру генерации при включении добротности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анциферов В. В., Держи Н. М., Пивцов В. С. и др. Селекция и перестройка частоты рубинового лазера в режиме гигантского импульса // Автометрия. 1972. № 5.
2. Анциферов В. В., Искольдский А. М., Кучьянов А. С. и др. Мощный одночастотный кольцевой рубиновый лазер с плавной перестройкой частоты излучения // Автометрия. 1974. № 6.
3. А. с. 533257 СССР. Оптический квантовый генератор /В. А. Пилипович, А. А. Ковалев, Б. Н. Тюшкевич и др. Оpubл. 1985, Бюл. № 32.
4. Ковалев А. А., Кабаев Н. И., Тюшкевич Б. Н., Юревич В. И. Сужение спектра излучения в ОКГ с электрооптическим затвором // Журн. прикл. спектр. 1979. 30, № 4.
5. Ковалев А. А., Тюшкевич Б. Н., Садовский В. Н. Влияние фазовых эффектов на процесс формирования узкополосного излучения лазера с электрооптическим затвором // Журн. прикл. спектр. 1980. 32, № 2.
6. Ковалев А. А., Тюшкевич Б. Н., Садовский В. Н. Динамика поля при формировании моноимпульсной лазерной генерации из затравочного излучения // Журн. прикл. спектр. 1981. 35, № 4.
7. Ковалев А. А., Тюшкевич Б. Н., Садовский В. Н., Усова Н. А. Влияние затравочного излучения на динамику моноимпульсной лазерной генерации // Журн. прикл. спектр. 1982. 37, № 5.
8. Тюшкевич Б. Н., Дашкевич В. И. Влияние фазовых эффектов на процесс формирования узкополосного излучения в составном резонаторе лазера с электрооптическим затвором // Журн. прикл. спектр. 1990. 52, № 2.
9. Тюшкевич Б. Н., Дашкевич В. И. Динамика и спектр моноимпульсной генерации в составном резонаторе лазера с электрооптическим затвором // Журн. прикл. спектр. 1990. 53, № 4.
10. Варенов Ю. И., Ковалевский В. И., Щербак Ю. М. Устройство для диффузной сварки ультразвуковых пьезопреобразователей // ПТЭ. 1990. № 2.

*Поступила в редакцию 12 июля 1994 г.*