

Обеспечение энергетических и временных характеристик лазерного резонатора

А.И.Филипов

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ, г. Набережные Челны, Россия
SPIN-код: 7133-0718*

Аннотации. В статье рассмотрены вопросы обеспечения различных характеристик лазерного резонатора, применяемого при обработке лазерным излучением листовых металлов. Рассмотрены различные режимы генерации, определены граничные условия применения этих режимов в производстве. Определены и обоснованы основные требования, предъявляемые к лазерным резонаторам с учетом их области применения.

Ключевые слова. Лазерный резонатор, режим генерации,

Одним из основных требований, предъявляемых к лазерному резонатору, является обеспечение обратной связи фотонов с лазерной средой. Чем больше продолжительность жизни фотона в лазерной среде, тем больше вероятность вынужденного испускания. Для описания лазерного излучения в резонаторе требуются данные, относящиеся к следующим параметрам: распределение интенсивности в зависимости от длины волны, геометрическое распределение интенсивности излучения в резонаторе.

Общие потери резонатора: потери на излучение, потери на зеркалах резонатора, дифракционные потери, потери на торцах активной среды, рассеяние на неоднородностях активной среды.

Существующие методы управления общими потерями в резонаторе получили название «режимы генерации». Среди этих режимов следует выделить основные: непрерывная генерация, свободная генерация, модуляция добротности резонатора, синхронизация мод.

Непрерывная генерация

В режиме непрерывной генерации время жизни верхнего лазерного уровня больше времени жизни нижнего лазерного уровня. На практике лазеры, которые в принципе могут работать в непрерывном режиме генерации, иногда используют для работы в режиме импульсной генерации. К этому прибегают, например, в том случае, если интенсивность накачки при работе в непрерывном режиме генерации настолько высока, что это вызывает серьезные ограничения срока службы системы накачки.

Для непрерывной генерации требуется, чтобы механизм накачки обеспечивал стационарную во времени инверсию(перестановку) населённости уровней рабочего перехода. Для этого необходимо эффективное возбуждение верхнего и быстрый распад(опустошение) нижнего уровней.

Свободная генерация

Под термином свободная обычно понимают режим работы лазера в отсутствие каких-либо внешних целенаправленных воздействий на динамику его генерации. Такая генерация типична для всех твердотельных лазеров. Она состоит из хаотической последовательности пучков короткой длительности. Различают три режима генерации: свободная генерация, генерация моноимпульсная при модуляции добротности резонатора и синхронизация аксиальных мод.

Модуляция добротности резонатора

Добротность – это параметр резонатора, характеризующий, во сколько раз накопленной в системе энергии больше, чем величина потерь энергии за один полный проход резонатора.

добротность равна:

$$Q = \nu_p / \Delta\nu_p$$

где ν_p - резонансная частота;

$\Delta\nu_p$ - полуширина резонансной кривой. [2]

Управление добротностью резонатора дает возможность генерировать не только одиночные импульсы (моноимпульсы), но и серии импульсов. [2]

Лазеры с модулированной добротностью могут работать либо в импульсном режиме, либо в импульсно-периодическом режиме. В зависимости от режима работы лазера применяют активный или пассивный методы модуляции. Модуляторы добротности, в которых используются управляющие устройства, являются активными, а модуляторы, которые не содержат внешних управляющих устройств, называются пассивными.

Для активной модуляции используются: 1) оптико-механические затворы; 2) акустооптические затворы; 3) электрооптические затворы.

1. Оптико-механические затворы

Наиболее распространенным способ модуляции добротности. Модуляция проходит с вращение одного из зеркал резонатора вокруг перпендикулярной оси. В таком случае высокая добротность достигается в тот момент, когда вращающееся зеркало приходит в положение, в котором оно параллельно второму зеркалу резонатора. Модуляторы добротности с вращающейся призмой являются простыми и недорогими устройствами и могут быть изготовлены для любой длины волны. [1]

2. Акустооптические модуляторы добротности

Принцип действия акустооптического модулятора основан на изменении коэффициента преломления среды при распространении в ней ультразвуковой волны. В качестве таких сред применяют оптически прозрачные материалы, имеющие большие значения акустооптических постоянных (плавленый кварц для видимого диапазона, германий для инфракрасного диапазона). Если акустооптический модулятор поместить в резонатор лазера, то до тех пор, пока к преобразователю приложено электрическое напряжение, в резонаторе будут

дополнительные потери. При выключении электрического напряжения на преобразователе, лазер возвращается в состояние с высокой добротности. (рис.1)

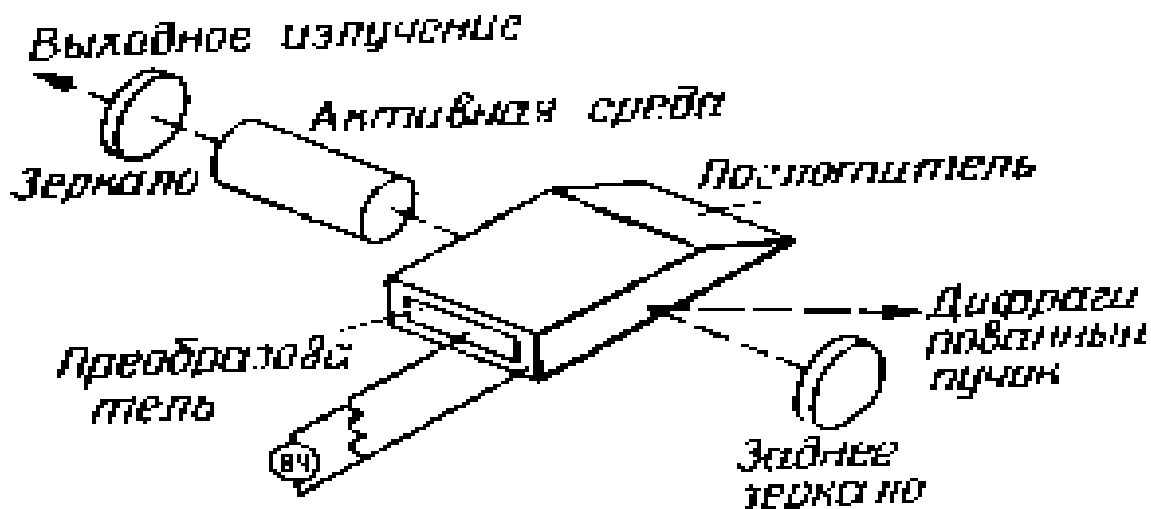


Рисунок 1. Акустооптические модуляторы добротности

3. Электрооптические модуляторы

Основаны на электрооптическом эффекте Поккельса. Ячейка Поккельса представляет собой нелинейный кристалл, показатель преломления которого изменяется под действием внешнего электрического поля. В ячейке Поккельса линейно-поляризованный световой луч, падающий под углом плоскость xu кристалла разлагается на две компоненты: E_x и E_y . На выходе кристалла обе компоненты приобретают различные фазовые набеги, разность между которыми определяется соотношением:

$$\Delta\varphi = k_0 \Delta n L$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ – волновое число;

$\Delta n = n_x - n_y$ – величина наведенного двулучевого преломления;

L – длина кристалла. [2]

Если приложенное внешнее напряжение таково, что $\Delta\varphi = \pi/2$, то две компоненты будут отличаться по фазе на $\pi/2$, так, что когда компонента достигает максимума, компонента u равна нулю и наоборот, т. е. волна становится поляризованной по кругу. Таким образом, когда компонента x положительна и максимальна, компонента u достигает своего максимального отрицательного значения. Следовательно, это излучение не пропускается поляризатором, а отражается из резонатора наружу. Такое состояние соответствует закрытому режиму. Модулятор открывается, когда внешнее напряжение выключается, при этом исчезает наведенное двулучевого преломление и луч света проходит без изменения поляризации.

Пассивные модуляторы

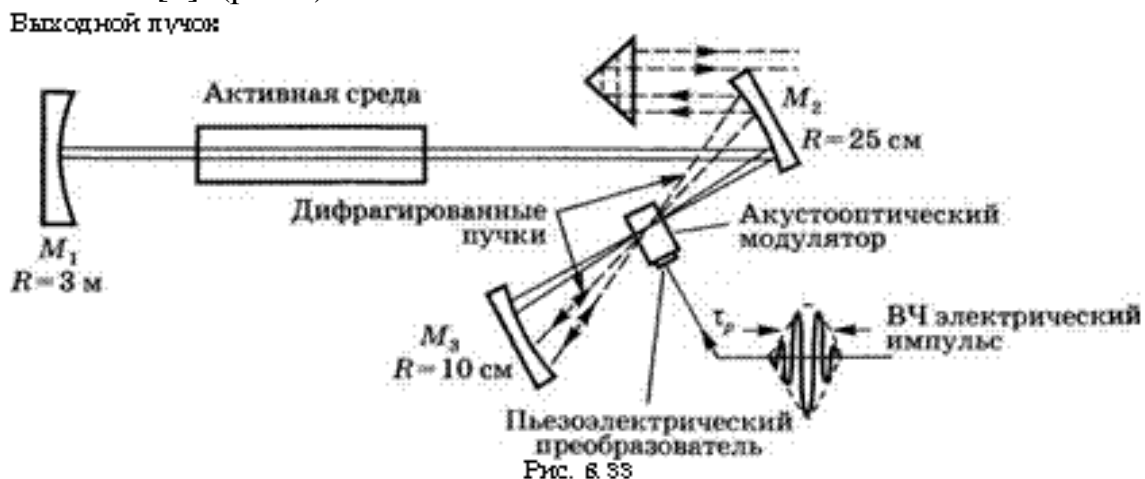
Модуляторы добротности, для управления параметров которых не требуются дополнительные устройства, называются пассивными.

Принцип действия пассивных модуляторов основан на эффекте насыщения поглощения на длине волны лазерного излучения. В качестве пассивного модулятора используются различные поглощающие материалы в газовом, жидкостном или твердом агрегатном состоянии, в зависимости от длины волны лазерного излучения. [3]

Если поместить насыщающийся поглотитель в резонатор лазера, длина волны которого совпадает с максимумом поглощения затвора, то в начальный момент времени происходит линейное поглощение падающего света. Вследствие поглощения, лазерная генерация отсутствует, при этом критическая инверсия населенностей оказывается очень высокой. После просветления инверсия населенностей значительно превышает потери в резонаторе лазера, и как следствие этого, на выходе лазера появляется излучение в виде короткого интенсивного светового импульса. [4] Следует заметить, что за время достижения падающим светом максимального значения происходит многократное прохождение света внутри резонатора. Для сравнения с активной модуляцией, полное число проходов при пассивной модуляции превышает почти 100 раз[1].

Разгрузка резонатора

Метод разгрузки резонатора позволяет вывести энергию, накопленную в лазере, за время, равное времени полного прохода резонатора. Разгрузка резонатора является общим методом, который можно с успехом применять в лазере с синхронизацией мод, непрерывном лазере и лазере с модулированной добротностью[5]. (рис.2)



Типичная схема устройства разгрузки резонатора в лазере с непрерывной накачкой (например от Кс1:УАО или Ag⁺ лазера):

Рисунок 2.Разгрузка резонатора

Синхронизация мод – это такой процесс, при котором амплитуды и разности фаз произвольных мод резонатора остаются постоянными, т. е. синхронизованными. [6]

Метод синхронизации мод позволяет получить генерацию лазерных импульсов сверхкороткой длительности (~10–14 с) и очень высокой пиковой мощности (~1010 Вт). Различают два вида синхронизации: активная и пассивная. (Рис.3)

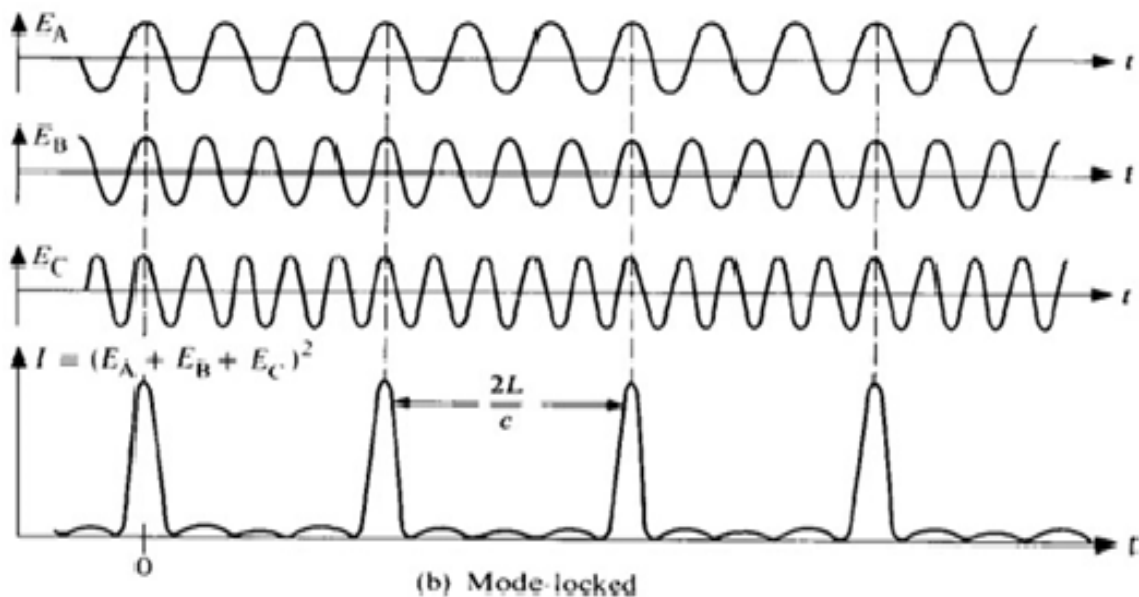


Рисунок 3. Синхронизация мод

Активная синхронизация

Лазер с активной синхронизацией мод содержит амплитудный или фазовый модулятор, размещаемый вблизи одного из зеркал резонатора, при этом частота модуляции соответствует межмодовой частоте. [7]

Амплитудная модуляция осуществляется акустооптическим или электрооптическим модуляторами. Изменение во времени коэффициента пропускания амплитудного модулятора возбуждает в каждой моде боковые составляющие $\omega_0 \pm \Delta\omega$, совпадающие по частотам с соседними аксиальными модами, которые усиливаются и модулируются внутри резонатора. В результате возникают боковые составляющие частоты $\omega_0 \pm 2\Delta\omega$. Этот процесс продолжается до тех пор, пока все аксиальные моды не оказываются взаимно связанными, т. е. синхронизованными.

Пассивная синхронизация мод

Осуществляется при помощи насыщающегося поглотителя, который вводится в резонатор вблизи плотного зеркала. Насыщающийся поглотитель должен иметь очень малое ($\sim 10-12$ с) время релаксации и возможно большее сечение поглощения на резонансной частоте. В момент развития генерации в резонаторе лазерное излучение вызывает насыщение поглощающего фильтра. Случайно возникший из спонтанного излучения короткий световой импульс, достигнув пассивного затвора, просветляет и насыщает его за счет поглощения энергии переднего фронта импульса. [7] Укороченный импульс проходит затвор, отражается от зеркала и без потерь проходит в обратном направлении. Если время обхода резонатора больше времени релаксации, то при новом подходе к затвору импульс взаимодействует с ненасыщенным фильтром и снова укорачивается [2].

Вывод

Таким образом, обеспечение обратной связи фотонов с лазерной средой является главным требованием к лазерному резонатору в условиях действующего производства. Именно продолжительность жизни фотона в лазерной среде обеспечивает долгосрочную и бесперебойную работу лазерного оборудования. Потери на излучение, потери на зеркалах резонатора, дифракционные потери, потери на торцах активной среды, рассеяние на неоднородностях активной среды являются управляемыми видами потерь и требуют постоянного контроля со стороны оператора установки для обеспечения качества обработки и снижения себестоимости обработки.

Знание режимов генерации является необходимым условием обеспечения процесса обработки лазерным излучением листовых металлов в условиях действующего производства.

Научный руководитель: к.т.н., доцент Шапарев А.В.

Библиографический список

1. http://know.sernam.ru/book_ter.php?id=94
2. <http://www.ssc-ras.ru/files/files/Zinchenko.pdf>
3. A.V. Shaparev and I. Savin, "Calculation of the Amount of the Reduction Required for the Formation of Compound Layers during Cold Rolling of Bimetals", Materials Science Forum, Vol. 870, pp. 328-333, 2016
4. Савин И.А., Марков В.В., Нищенков А.В., Плохов С.В. Методика теоретического расчета поверхностного натяжения металлических расплавов на основе физической модели энергетического состояния жидкости // "Справочник. Инженерный журнал" (с приложением) М.-2014. -№ 5. с.48-52
5. Savin I.A. Determination of the effectiveness of the use of robotic systems in mechanical engineering//European Journal of Natural History. 2016. № 3. С. 94-97
6. Сафронов Н.Н., Савин И.А., Мингалеева Л.Б. Оптимизация состава шихты процесса СВС при получении ферросилида из дисперсных отходов машиностроения//Черные металлы. 2018, №2. с.53-59
7. Шапарев А.В., Савин И.А., Птичкин С.Н. Производство кронштейнов грузовых автомобилей с использованием лазерных технологий: монография/ Шапарев А.В., Савин И.А. Птичкин С.Н. Курск: Из-во «Университетская книга», 2018г. -258с.