

*М.И. ДЗЮБЕНКО, д-р физ.-мат. наук, В.А. МАСЛОВ, д-р физ.-мат. наук,
В.П. РАДИОНОВ, канд. физ.-мат. наук, А.А. ФОМИН*

СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВКИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В ЛАЗЕРАХ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА

Введение

Оптимальный коэффициент обратной связи является важным условием высокой эффективности лазерной генерации. Максимальная эффективность лазера, как и любого генератора, достигается только при оптимальной обратной связи. При увеличении доли излучения, выводимого из резонатора, снижается доля стимулированного излучения и увеличивается доля спонтанного излучения, вплоть до того, что лазерная генерация может вообще не возникать. Уменьшение доли выводимого излучения может привести к насыщению активного вещества и к увеличению потерь в резонаторе. Оптимум обратной связи зависит, прежде всего, от усиления и потерь в резонаторе и от его размеров. В большинстве схем лазерных резонаторов обратная связь обеспечивается подбором коэффициента пропускания выходного зеркала путем его замены, что чревато нарушением юстировки резонатора. К тому же, из-за дискретности параметров зеркал трудно точно подобрать оптимум. Но даже тщательно подобранное зеркало не может быть оптимальным на всех режимах работы, поскольку усиление и потери в резонаторе могут изменяться в процессе работы лазера. Становится очевидным преимущество плавного изменения обратной связи, что позволяет обеспечить максимальную эффективность генерации на всех режимах работы лазера. В лазерах терагерцевого (ТГц) диапазона имеется ряд особенностей, которые необходимо учитывать при выборе схем регулировки обратной связи. В качестве выходных зеркал в них используются металлические решетки и металлические зеркала с отверстиями. Для компенсации высокой дифракционной расходимости в ТГц лазерах широко используются волноводные резонаторы с диэлектрическими волноводами круглого сечения.

Цель работы - сравнительный анализ лазерных резонаторов ТГц диапазона с плавной регулировкой обратной связи и выработка рекомендаций по их использованию.

Схемы открытых резонаторов с плавной регулировкой обратной связи

Простейшим способом регулировки обратной связи в лазере является использование дополнительного подвижного зеркала, помещенного на пути излучения в резонаторе под углом к направлению его распространения [1]. Поворотом зеркала изменяется вывод излучения из резонатора. Однако элементы механизма перемещения зеркала вносят потери в резонатор, а направление выходного пучка излучения изменяется при регулировке, что затрудняет коммутацию лазера с трактом передачи излучения.

Оригинальная схема регулировки применена в ТГц лазере с выходным зеркалом в виде одномерной металлической решетки [2]. В качестве второго зеркала резонатора использовано двугранное 90° зеркало, типа призмы полного внутреннего отражения ПВО (рис.1). Ребро двугранного зеркала расположено перпендикулярно к оси резонатора. Одно из зеркал снабжено механизмом поворота вокруг оси резонатора. С помощью поворота этого зеркала осуществляется регулировка вывода излучения из резонатора. Принцип регулировки связи основан на известном свойстве двугранного 90° отражателя изменять поляризацию падающего на него излучения. Если на двугранный отражатель падает линейно поляризованное излучение, вектор напряженности электрического поля которого расположен под углом $+\alpha$ к ребру отражателя, то вектор напряженности отраженного

излучения будет расположен под углом $-a$ к ребру отражателя, следовательно, повернут на угол $2a$ относительно вектора напряженности падающего излучения.

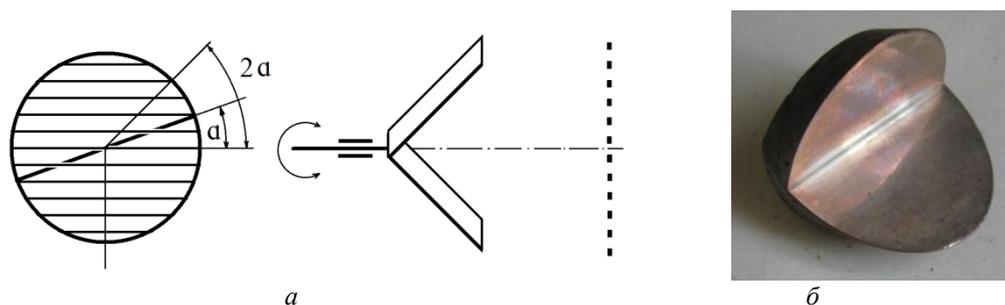


Рис. 1. Схема лазерного резонатора с плавной регулировкой вывода излучения – a ; внешний вид двугранного зеркала – b

В положении, когда ребро двугранного зеркала параллельно проводникам решетки (или перпендикулярно, но при этом потери на зеркале несколько выше), излучение линейно поляризовано, а вектор напряженности электрического поля перпендикулярен проводникам решетки. В этом случае из резонатора выводится минимальная часть излучения, задаваемая коэффициентом пропускания решетки. При повороте двугранного отражателя лазерное излучение приобретает эллиптическую поляризацию, в нем появляется ортогональная составляющая, для которой решетка практически прозрачна – вывод излучения из резонатора увеличивается. Возрастание вывода излучения происходит до положения, когда ребро двугранного зеркала окажется под углом 45° к проводникам решетки. Таким образом, можно изменять обратную связь в широких пределах и получать оптимальную обратную связь. Следует отметить, что для получения оптимума связи необходимо подбирать такую решетку, чтобы в положении минимального вывода излучения через нее выводилось излучения несколько меньше, чем требуется для оптимальной связи.

Регулировку вывода излучения в такой схеме можно осуществлять либо поворотом двугранного зеркала, либо поворотом решетки. Поворот двугранного зеркала, казалось бы, осуществлять технически проще. Однако при этом следует учитывать, что ось поворота должна быть строго перпендикулярна к ребру двугранного зеркала и расположена строго под углом 45° к обоим его граням. Не соблюдение этих требований приводит к нарушению юстировки резонатора в процессе регулировки.

Такая схема лазерного резонатора может использоваться как измерительный инструмент для сравнения потерь, вносимых решетками, которые являются выходным зеркалом [3], а также для определения коэффициентов пропускания этих решеток и вносимого ими фазового сдвига [4]. Критерием оценки вносимых потерь является мощность лазерного излучения в режиме оптимальной связи. Чем выше мощность излучения, тем меньшие потери вносит решетка, используемая в качестве выходного зеркала. Коэффициент пропускания, вносимый решеткой, рассчитывается на основании экспериментальных зависимостей мощности ортогональных составляющих лазерного излучения от угла поворота двугранного зеркала, а фазовый сдвиг - на основании снятых поляризационных диаграмм.

Однако недостатком резонаторов, содержащих решетки, является то, что они имеют существенные ограничения по мощности излучения. В мощных лазерах целесообразно использовать металлические зеркала, которые способны выдерживать высокие мощности излучения.

Для резонаторов с металлическими зеркалами разработаны оригинальные способы регулировки обратной связи. Например, в резонаторе, образованном двугранным 90° зеркалом типа призмы ПВО и зеркалом с выводным отверстием, удастся осуществить регулировку связи путем смещения одного из зеркал [5]. Для этого можно перемещать зеркало с отверстием в направлении перпендикулярном оси резонатора или поворачивать двугранное зерка-

ло вокруг оси резонатора (в этом случае требуется, чтобы отверстие в выходном зеркале было выполнено не по центру, а со смещением). На рис. 2 приведена схема регулировки путем перемещения выходного зеркала.

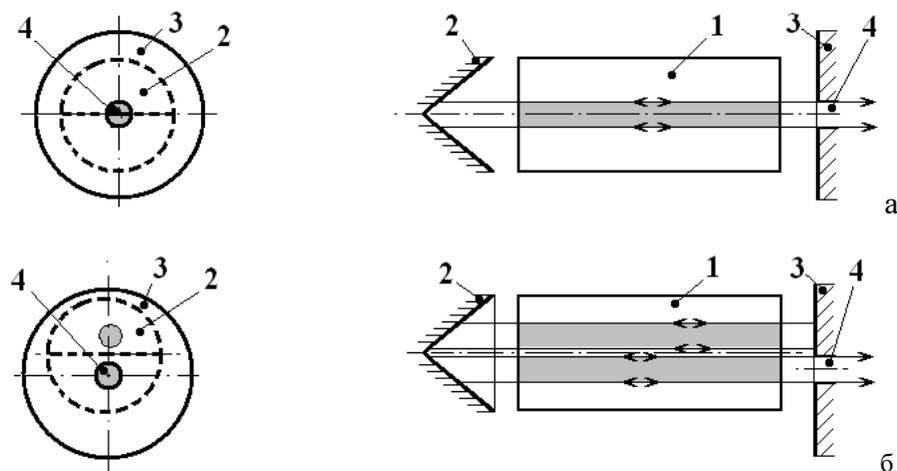


Рис. 2. Схема резонатора, содержащего двугранное 90° зеркало, с плавной регулировкой вывода излучения путем перемещения выходного зеркала с отверстием

В лазерном резонаторе используется активный элемент 1 круглого сечения. Резонатор образован двумя зеркалами 2, 3, размещенными по обе стороны от активного элемента 1. Зеркало 2 является двугранным с углом между гранями 90° . Зеркало 3 имеет плоскую или слегка вогнутую отражающую поверхность, и в нем имеется отверстие связи 4. Регулировка вывода излучения осуществляется путем перемещения зеркала 3 перпендикулярно оси резонатора. В случае, когда центр отверстия 4 находится напротив ребра двугранного зеркала 2 (рис. 2, а), из резонатора выводится минимальная часть излучения, попадающая в заштрихованную зону. Эта зона ограничена цилиндром, имеющим основание, равное контуру отверстия 4 в зеркале связи 3, и высоту, равную расстоянию между зеркалами резонатора. Излучение, не попадающее в зону отверстия 4, испытывает многократные переотражения и усиливается в активном веществе 1. В случае, когда зеркало 3 является плоским, излучение из зоны многократного отражения попадает в зону вывода в результате дифракционной расходимости. Дифракционная связь между двумя этими зонами пропорциональна площади границы между ними, т.е. боковой поверхности цилиндра с основанием, равным контуру отверстия 4 в зеркале 3. В случае применения вогнутого зеркала 3, излучение концентрируется к оси резонатора. При этом увеличивается плотность излучения в зоне отверстия и вывод энергии через него.

При смещении отверстия связи 4 относительно ребра двугранного зеркала 2 увеличивается объем зоны, попав в которую, излучение выводится из резонатора. Одновременно увеличивается площадь границы между зоной вывода и зоной многократного отражения. Это вызывает увеличение дифракционной связи между двумя этими зонами, а следовательно, увеличивается доля выводимого из резонатора излучения. Максимальная доля излучения выводится из резонатора в случае, когда отверстие полностью проецируется на одну из граней двугранного зеркала 2 (рис. 2, б). В этом случае объем зоны вывода излучения увеличивается примерно в два раза по сравнению с вариантом, изображенным на рис. 2, а. Пропорционально увеличивается связь резонатора с внешним пространством, а следовательно, и доля выводимого излучения. Нагруженная добротность резонатора при этом уменьшается, причем потери увеличиваются в основном за счет потерь на связь, т.е. за счет увеличения «полезного» излучения. Энергетически это эквивалентно увеличению сечения выводного отверстия, но сечение выводного пучка излучения при всех положениях зеркал не изменяется и остается

равным сечению выводного отверстия 4. Естественно, что для получения оптимума связи необходимо, чтобы через выводное отверстие 4 в положении минимального вывода излучения (рис. 2, а) выводилось несколько меньше энергии, чем требуется для получения оптимальной связи.

Однако при перемещении зеркал может нарушаться юстировка резонатора, особенно если регулировка осуществляется поворотом двугранного зеркала.

Проблема нарушения юстировки резонатора при регулировке связи существенно нивелирована в резонаторе [6], в котором вместо двугранного зеркала использован трехгранный 90° уголкового отражателя. Благодаря известным свойствам такого отражателя возврат луча в обратном направлении не зависит от угла падения. Такой отражатель практически не требует юстировки. Схема регулировки аналогична схеме, изображенной на рис. 2. Однако в волноводных резонаторах регулировку можно осуществлять только путем смещения плоского зеркала. Вершина трехгранного зеркала (для минимизации потерь в резонаторе) должна быть расположена строго на оси круглого сечения волновода. Принцип регулировки не изменяется – минимальная часть излучения выводится, когда центр выводного отверстия проецируется на вершину трехгранного зеркала. При смещении центра выводного отверстия относительно вершины трехгранного зеркала происходит увеличение вывода излучения. Увеличение происходит при перемещении до расстояния, равного примерно радиусу отверстия связи. Однако потери излучения на трехгранном зеркале несколько выше, вследствие трех отражений от его граней. Кроме того, вблизи его ребер (как и у двугранного отражателя) присутствует зона повышенных потерь. Это обусловлено неидеальностью изготовления граней и волновыми свойствами излучения.

Значительно уменьшить потери излучения позволяет применение в резонаторе конического зеркала с углом при вершине 90° [7]. Коническое зеркало (рис. 3), так же как и трехгранный уголкового отражатель, не требует тщательной юстировки и вносит меньше потерь в резонатор благодаря отсутствию ребер и благодаря тому, что имеет всего лишь два отражения от его поверхности. Схема регулировки при использовании конического зеркала аналогична схеме, изображенной на рис. 2. Регулировка осуществляется путем смещения плоского зеркала с отверстием в направлении перпендикулярно оси резонатора. Вершина конического зеркала должна быть расположена на оси резонатора. Особенно это актуально для волноводных резонаторов.

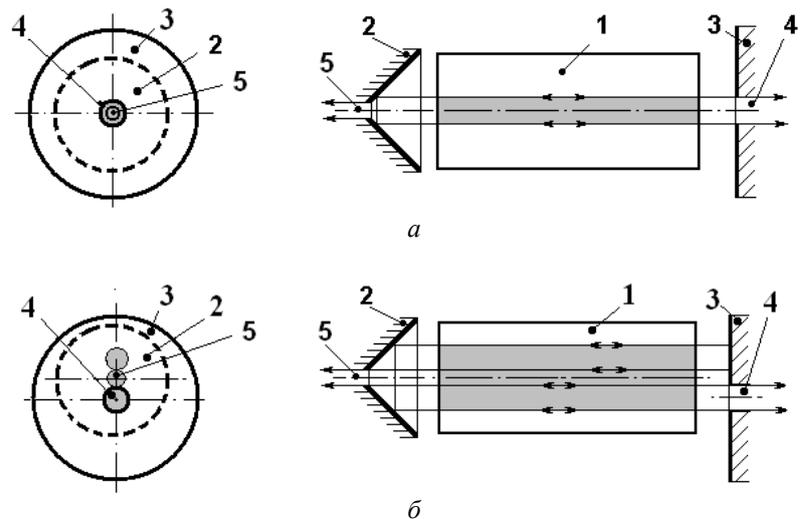
Существенным достоинством конического зеркала является то, что если угол при его вершине выполнить несколько меньше 90° , такое зеркало приобретает фокусирующие способности. Это позволяет снизить дифракционные потери в резонаторе и повысить концентрацию излучения в зоне выводного отверстия. Следовательно, в резонаторе не нужно использовать второе вогнутое зеркало, оно может быть плоским, что значительно проще в изготовлении.



Рис. 3. Коническое зеркало с углом при вершине 90°

Однако на вершине конического зеркала все же имеется зона повышенных потерь, обусловленная неидеальностью изготовления зеркала и волновыми свойствами излучения. Устра-

нить эти потери позволяет резонатор с двухсторонним выводом излучения (рис. 4), в котором использовано 90° коническое зеркало с центральным выводным отверстием [8]. В лазерном резонаторе используется активный элемент 1 круглого сечения. Резонатор образован двумя зеркалами 2 и 3, размещенными по обе стороны от активного элемента 1. Зеркало 2 является коническим с углом при вершине 90° или несколько меньше. Оно размещено строго по оси активного элемента 1, а зеркало 3 имеет плоскую отражающую поверхность, и в нем имеется отверстие связи 4. В такой схеме основной регулируемый вывод излучения осуществляется через отверстие 4 в подвижном плоском зеркале 3, которое перемещается перпендикулярно оси резонатора. Через отверстие 5 в коническом зеркале 2 вывод излучения не регулируется, а это излучение подается на приборы контроля и управления лазером. Излучение в зону отверстий 4, 5 попадает благодаря дифракции. Если коническое зеркало 2 имеет угол при вершине меньше 90° , то это повышает концентрацию энергии в зоне отверстий и одновременно снижает дифракционные потери в резонаторе. Отверстие 5 в центре конического зеркала 2 позволяет устранить зону повышенных потерь. Часть излучения, которая бы имела повышенные потери, теперь выводится через отверстие и используется для контроля и управления лазером. В предыдущих схемах для контроля и управления лазером используется часть энергии, отобранная от основного лазерного пучка. Таким образом, дополнительный канал вывода излучения позволяет повысить общий КПД лазерной установки. Естественно, что для обеспечения оптимальной связи требуется, чтобы в положении минимального вывода излучения (рис. 4, а) из резонатора через оба отверстия выводилось немного меньше энергии, чем требуется для обеспечения оптимума.



б

Рис. 4. Схема резонатора с плавной регулировкой, содержащая коническое 90° зеркало с дополнительным каналом не регулируемого вывода излучения (а, б). Внешний вид конического зеркала с отверстием (в)

Выводы

Приведен краткий обзор и сравнительный анализ открытых резонаторов лазеров ТГц диапазона длин волн с плавной регулировкой связи с внешним пространством. Рассмотрены как давно известные и широко используемые, так и новейшие схемы лазерных резонаторов. Плавную регулировку обратной связи можно реализовать при использовании в качестве выходных отражателей резонатора как металлических зеркал с отверстиями, так и одномерных проволочных решеток. Проведен анализ преимуществ и недостатков каждой из рассмотренных схем. Показано, что их применение позволяет получать оптимальную обратную связь в процессе работы лазеров и добиваться высокой эффективности лазеров на всех энергетических режимах. Особенно это полезно для лазеров на активных средах, имеющих несколько линий излучения с различными коэффициентами усиления. Существенным преимуществом приведенных схем является их относительная простота изготовления, что позволяет переоборудовать лазеры, которые уже используются.

Список литературы:

1. Свейн Д. Устройство для регулирования связи на выходе лазера в дальней ИК области // Приборы для научных исследований. 1972. №7. С.86.
2. Каменев Ю.Е., Кулешов Е.М. Волноводный HCN лазер с регулируемой связью // Квантовая электроника. 1990. Т.17, №1. С. 58-59.
3. Дзюбенко М.И., Каменев Ю.Е., Радионов В.П., Литвина З.Ю. Резонаторный способ определения потерь в одномерных металлических решетках в терагерцевом диапазоне // Радиофизика и электроника. 2018. Т. 23. № 2. С. 69-75.
4. Дзюбенко М.И., Каменев Ю.Е., Масалов С.А., Радионов В.П. Измерение электродинамических характеристик металлических ленточных решеток в терагерцевом диапазоне // Радиофизика и электроника. 2019, 24(2). С. 78-85.
5. Патент на винахід України № 91610 від 10.08.2010 «Лазер з плавним регулюванням випромінювання з резонатора»: авт. Кісельов В.К., Радіонов В.П.
6. Патент на винахід України №105802 від 25.06.2014 «Лазер з плавним регулюванням виведення випромінювання з резонатора»: авт. Кісельов В.К., Радіонов В.П.
7. Патент на винахід України №110672 від 25.01.2016 «Лазер з плавним регулюванням виведення випромінювання з резонатора»: авт. Радіонов В.П., Маслов В.О.
8. Патент на винахід України №114127 від 25.04.2017 «Лазер з плавним регулюванням виведення випромінювання з резонатора»: авт. Дзюбенко М.І., Маслов В.О. Радіонов В.П.

Поступила в редколлегию 11.10.2020

Сведения об авторах:

Дзюбенко Михаил Иванович – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий отделом, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины; профессор кафедры физических основ электронной техники, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина; e-mail: mid41@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9227-5604>

Маслов Вячеслав Александрович – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой квантовой радиофизики, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Украина; e-mail: v.a.maslov@karazin.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7743-7006>

Радионов Владимир Петрович – канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Украина; e-mail: radsvet@ukr.net

Фомин Александр Александрович – аспирант, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина; e-mail: oleksandr.fomin@nure.ua