ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ И АКУСТООПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА МОДУЛЯЦИИ И СКАНИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ю. В. Пичугина

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург

Одной из серьезных проблем, стоящих перед разработчиками разнообразных систем с использованием оптического квантового генератора (ОКГ), является проблема создания высокоскоростных функциональных устройств управления пространственно-временными параметрами лазерного излучения, а именно пространственным положением луча, его интенсивностью, поляризацией, частотой, амплитудой и фазой [1].

В связи с активным развитием волоконно-оптических систем связи (BOCC), а с другой стороны созданием сверхмощных источников лазерного излучения актуальными задачи являются внутрирезонаторное и внерезонаторное управление параметрами лазерного излучения. Например, для технологических установок резки материалов лазерного локатора, а также для дистанционного зондирования воздушных и водных сред оптическим локатором.

Как наиболее предпочтительные методы для решения данных проблем были рассмотрены электрооптические и акустооптические методы.

Цель моей работы состояла в разработке устройства управления пространственно-временными параметрами лазерного излучения, что потребовало решения ряда промежуточных задач:

– выявление преимуществ электрооптических и акустооптических методов при решении конкретных задач;

– обоснование наиболее удобного и практичного метода в реализации управления параметрами лазерного излучения;

– экспериментальная реализация лабораторной модели функционального устройства, сравнение результатов измерений с расчетными.

Рассмотрение возможностей сканирования лазерным пучком с большим (>100) числом разрешимых точек электрооптическими методами требует больших (> кВ) управляющих напряжений, что сопряжено с техническими сложностями, особенно при необходимости модуляции управляющего сигнала (напряжения) [2].

Для реализации управления направления оптических лучей наиболее удобным и практичным оказывается акустооптический метод, поскольку:

- не требует высоких управляющих напряжений;

- акустооптические устройства имеют малые габариты и массу (рис. 1);

- а также требует наименьших технических и экономических затрат.



Рис. 1. Электрооптические и акустооптические дефлекторы

Базовыми функциональными устройствами любой акустооптической системы являются акустооптические ячейки [3]. Под действием механических напряжений в среде взаимодействия (звукопровод) акустической и световой волн, возникают области с различными показателями преломления, т. е. формируется аналог дифракционной решетки, следовательно, при прохождении света через таким образом возмущенную среду возникает дифракция световой волны на акустической (рис. 2).



Рис. 2. Ход лучей при дифракции Брэгга

На практике более предпочтителен акустооптический дефлектор (АОД) в режиме дифракции Брэгга, поскольку он позволяет достичь наиболее высоких рабочих характеристик [4]. В области Брэгга увеличение разрешающей способности дефлектора за счет расширения диапазона рабочих частот возможно при управлении угловым положением акустического поля при изменении его частоты.

При противофазном возбуждении соседних элементов преобразователя акустическое поле распадается на две диаграммы, которые при увеличении акустической частоты направление распространения поля S₊₁ и S₋₁ будут поворачиваться навстречу друг другу, при уменьшении частоты – удаляться друг от друга (рис. 3).



Рис. 3. Решетка преобразователей, излучающих звук в противофазе (a), и ее полярная диаграмма направленности (б)

В соответствии с вышесказанным, была поставлена задача: разработать функциональное управляющее акустооптическое устройство с максимальной скоростью переключения оптического луча, обеспечивающего наибольшее число разрешимых положений при заданной центральной частоте преобразователя, которая составляет 100 МГц, поскольку создание устройств с более высокой частотой является сложной технической задачей и удорожает стоимость устройства. В связи с этим была предпринята попытка создания устройства при помощи сканирования акустического пучка, взяв за основу АОД на основе молибдата свинца с секционированным преобразователем длиной L = 5 мм (4 секции по 1 мм + зазоры ~300 мкм) и центральной частотой $f_0 = 180$ МГц.

Был проведен сравнительный расчет основных характеристик АОД с секционированным преобразователем со сканированием акустооптического поля и без:

- полоса рабочих частот:

$$\Delta F|_{L=5\,\text{mm}} = \frac{1.8v_{ak}^2 n}{f_0 \lambda L} = 105 \,(MHz),\tag{1}$$

полоса рабочих частот при сканировании:

$$\Delta F_{ck}\Big|_{L=5\,\mathrm{mm}} = 3,8\Delta F = 400 \;(MHz),\tag{2}$$

- разрешение дефлектора по частоте:

$$f_{\min} = \frac{v_{ak}}{D} = 0,36 \ (MHz), \ D = 10 \ \text{mm},$$
 (3)

- количество разрешимых элементов без сканирования:

$$N = \frac{\Delta F}{f_{\min}} = 290,\tag{4}$$

- количество разрешимых элементов при сканировании:

$$N_{ck} = \frac{\Delta F_{ck}}{f_{\min}} = 1110,\tag{5}$$

- интенсивность света в дифракционном порядке:

$$I_1 \sim I_0 \sin^2 \sqrt{M^2 \frac{L}{2H} P_{ak}} = 274 \ (mW), \tag{6}$$

угол дифракции:

$$\sin \varphi = \frac{\lambda}{2\Lambda_{3B}} = 88 \cdot 10^{-6}.$$
(7)

В результате расчета основных параметров показана, что полоса рабочих частот со сканированием акустического поля превосходит полосу рабочих частот без сканирования практически в 4 раза, так и число разрешимых элементов оказалось при сканировании почти в 3 раза больше, чем без сканирования света.

Для исследования характеристик акустооптической ячейки (АОЯ) был разработан и изготовлен лабораторный стенд (рис. 4), состоящий из 3 частей: оптической, регистрирующей распределения светового поля в фокальной плоскости с помощью телевизионной камеры с ПЗС, и регистрирующей интенсивность дифракционного пучка для определения полосы частот и интенсивности в дифракционном порядке от мощности.

На стенде возможно измерение всех основных характеристик АОЯ: полосы рабочих частот, распределения акустического поля, частотного разрешения, эффективности дифракции.

Было изготовлено две АОЯ, работающие в двух режимах (рис. 5):

– стоячей акустической волны со сканированием акустического поля (АОЯ № 1);

– бегущей акустооптической волны (АОЯ № 2).



Рис. 4. Схема установки и ее реализация: 1 – ОКГ; 2 – расширитель луча ОКГ; 3, 4, 7, 8 – зеркала; 5 – АОД; 6 – линза; 9 – поляризатор; 10 – ПЗС ТВ; 11 – монитор; 12 – щелевая диафрагма; 13 – линза; 14 – ФД; 15 – вольтметр: 16, 20 – генераторы; 17 – вольтметр; 19 – блок питания; 21 – осциллограф



Рис. 5. Внешний вид АОЯ № 1 и АОЯ № 2

Среди характеристик АОЯ одной из основных является амплитудно-частотная (АЧХ). Измеренные характеристики АОЯ № 1 и АОЯ № 2 приведены на рис. 6, 7 соответственно.

Звукопровод АОЯ № 1 изготовлен из кристалла молибдата свинца (PbM₀O₄), преобразователь – полуволновая пластина на кристалле ниобата лития (LiNbO₃ Y+36° среза), управляющий электрод – решетка из четырех секций возбуждаемых в противофазе.

Измеренная полоса рабочих частот по уровню половинной интенсивности дифракционного порядка составляет не менее 300 МГц. Расчетная полоса для АОЯ без фазировки управляющего электрода (L = 3,5 мм) составляет ~120 МГц. Т. о. результат прогнозируемый расчетом подтверждается.

Второй особенностью конструкции АОЯ № 1 является использование в ее работе режима стоячей акустической волны, что позволяет заметно повысить ее дифракционную эффективность, что согласуется с расчетным прогнозом.

Конструкция АОЯ № 2 соответствует традиционной конфигурации (рис. 5).



f, МГцРис. 7. Амплитудно-частотная характеристика АОЯ № 2

150

200

250

300

0,4

0,2

0

50

100

Звукопровод АОЯ № 2 – кристалл PbM₀O₄, преобразователь – полуволновая пластина из (LiNbO₃ Y+36° среза), управляющий электрод – прямоугольной формы (L = 8 мм, H = 0,9 мм). Центральная частота $f_0 \approx 120$ МГц. Расчетные значения нижней частоты дифракции Брэгга – $F_{\rm H.Бp} \approx 75$ МГц, полосы рабочих частот $\Delta F_{\rm pa6} \approx 85$ МГц, т. е. верхняя граничная частота АОЯ № 2 $F_{\rm верх} \approx 160$ МГц. Расчетные значения хорошо совпадают с измеренными (рис. 7). Необходимость разработки модуляторов (внутрирезонаторных) света большой световой апертуры возникает при создании ОКГ с активной средой большого сечения.

В случае применения электрооптических модуляторов (ЭОМ) задача решается созданием большеразмерных кристаллов DKDP и изготовлением соответствующего модулятора. При этом необходимо решать проблемы формирования управляющих сигналов и быстродействия ЭОМ. В целом задача создания большеапертурного ЭОМ достаточно сложна и дорогостоящая. Анализ литературных материалов показывает, что задача построения широкоапертурного модулятора потенциально может быть решена методами акустооптики.

Применение пространственно-многоканального акустооптического модулятора (AOM) рис. 8 позволяет реализовать устройство с рабочей (световой) апертурой не менее (10*10) см².



Рис. 8. Пространственно-многоканальный АО модулятор

Звукопровод такого модулятора изготавливается из стекла: ТФЗ, ТФ10, SiO₂, пьезопреобразователь изготавливается из кристалла ниобата лития (LiNbO₃ Y+36° среза). Внешний вид такого AOM (размер 80×30×17 мм) представлен на рис. 9.



Рис. 9. АОМ: пьезопреобразователь – кристалл ниобата лития (LiNbO₃ Y+36° среза), звукопровод – плавленный кварц (SiO₂)

В процессе работы управляющий сигнал на электроды модулятора подается синфазно от одного источника через электрически согласованный делитель мощности (например, экспоненциальный полосковый делитель мощности) – рис. 10.



Рис. 10. Экспоненциальный полосковый делитель мощности

Глубина модуляции зависит от числа каналов AOM, акустооптического качества материала звукопровода, мощности управляющего сигнала.

Быстродействие AOM, зависящее от времени распространения упругой волны через рабочую апертуру, может быть достигнуто за счет введения в звукопровод второй упругой волны, распространяющейся навстречу первой. Внешний вид возможной реализации такого AOM приведен на рис. 11.



Рис. 11. АОМ с высоким быстродействием

Проведенное рассмотрение возможности построения большеапертурного AOM для внутрирезонаторной модуляции лазерного излучения носит концептуальный характер, но базируется на достоверных результатах ранее выполненных разработок.

Подводя итоги работы, поставленные нами цель и задачи в ходе работы были выполнены: разработано устройство управления пространственно-временными параметрами лазерного излучения - акустооптический дефлектор на основе молибдата свинца. В частности, были выявлены преимущества электрооптических и акустооптических методов при решении конкретных задач, а также обоснован выбор акустооптического метода для реализации управления направлением оптических лучей. Полученные экспериментальные результаты достаточно хорошо совпали с расчетными данной структуры. Следовательно, можно утверждать, что поставленная задача управления может быть решена разными техническими способами, но на наш взгляд более практично и целесообразно проблема решается с помощью акустооптики, дающей ожидаемые результаты. Кроме того, разработка практических схем, базирующихся на дефлекторах с качанием пучка представляет собой перспективное техническое решение.

Список литературы

1. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света / Главная редакция физ.-мат. литературы издательства «Наука», 1970. 297 с.

2. Ребрин Ю. К. Управление оптическим лучом в пространстве. – М.: Сов. радио, 1977. 336 с.

3. Аксенов Е. Т., Петраков А. Г., Розов С. В. Основы квантовой электроники (акустооптический дефлектор). Лабораторный практикум: учебное пособие / Санкт-Петербург, издательство С-ПбГПУ, 2007. 27 с.

4. Магдич Л. Н., Молчанов В. Я. Акустооптические устройства и их применение. – М.: Сов. радио, 1978. 112 с.