

## АКУСТООПТИЧЕСКАЯ МОДУЛЯЦИЯ СВЕТА

# Широкополосный акустооптический сдвигатель частоты лазерного излучения с волоконными вводами

М.М.Мазур, Л.И.Мазур, А.В.Рябинин, В.Н.Шорин

*Разработан и исследован двухкристальный акустооптический сдвигатель частоты лазерного излучения с волоконными вводами. Выбрана оптимальная конфигурация акустооптических ячеек. Описан двухкристальный акустооптический сдвигатель частоты лазерного излучения с длиной волны 785 нм на величину от 156 до 196 МГц с оптическими одномодовыми поддерживающими поляризацию волокнами на входе и на выходе. Даны рекомендации по способам увеличения коэффициента передачи и диапазона сдвига частоты.*

**Ключевые слова:** сдвиг частоты лазерного излучения, акустооптическое взаимодействие, волоконный ввод излучения, анизотропная дифракция.

## 1. Введение

Акустооптические сдвигатели частоты (АОСЧ) широко используются в эталонах частоты типа «Фонтан». Кроме того, самые различные по частотному диапазону и типу дифракции АОСЧ нашли применение в системах стабилизации частоты оптического излучения, при создании реперов частоты оптического излучения, в системах для измерения частоты оптического излучения [1–4].

В настоящее время акустооптические модуляторы лазерного излучения с волоконными вводами выпускаются целым рядом организаций: Brimrose Corporation of America (США), Gooch & Housego PLC (Великобритания), ИРЭ-Полус (Россия) и др. Однако такие акустооптические модуляторы, используемые как АОСЧ, имеют диапазон перестройки сдвига частоты 2–5 МГц. Имеющиеся на сегодняшний день АОСЧ могут работать в широком частотном диапазоне, что обеспечивается механической подстройкой или схемой, где применяются несколько дополнительных оптических элементов, в том числе объектив типа «кошачий глаз», четвертьволновая фазовая пластина и поляризационный разделитель [5].

В представленной работе исследован новый тип АОСЧ – двухкристальный акустооптический сдвигатель частоты (ДАОСЧ), существенно расширяющий диапазон сдвига частоты лазерного излучения при волоконных вводах и выводе излучения.

## 2. Выбор конфигурации сдвигателя частоты

Частотный диапазон АОСЧ с волоконными вводами определяется минимальным из трех частотных диапазонов [6]: диапазона частот согласования ультразвуковой ячейки с ВЧ трактом  $\Delta f_{\text{match}}$ , диапазона частот синхронизма

акустооптического взаимодействия  $\Delta f_{\text{syn}}$  и диапазона частот, за пределами которого коэффициент передачи снижается вследствие смещения светового пятна с торца волокна,  $\Delta f_{\text{shift}}$ . При использовании в качестве ультразвукового преобразователя кристалла ниобата лития и при оптимальном выборе связующего слоя между преобразователем и акустооптической ячейкой (АОЯ)  $\Delta f_{\text{match}}$  может составлять полторы октавы от центральной частоты преобразователя [7]. Диапазон частот синхронизма акустооптического взаимодействия  $\Delta f_{\text{syn}}$  сильно зависит от конфигурации этого взаимодействия и для дефлектора с анизотропной дифракцией достигает значений, превышающих октаву [8]. Для АОСЧ с волоконным выводом излучения диапазон  $\Delta f_{\text{shift}}$  ограничивается тем, что при изменении частоты световой пучок на выходе из АОЯ отклоняется от своего первоначального направления на угол, зависящий от частоты ультразвука. Смещение перетяжки светового пучка на выходе коллиматора относительно сердцевинки волоконного кабеля пропорционально изменению частоты. По уровню –4 дБ [6] получаем

$$\Delta f_{\text{shift}} = \frac{DV}{F\lambda}, \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр сердечника волокна;  $V$  – скорость ультразвуковой волны;  $F$  – фокусное расстояние коллиматора;  $\lambda$  – длина световой волны.

Для ДАОСЧ световой пучок на выходе из второй АОЯ во всем интервале перестройки частоты с высокой точностью сохраняет свое первоначальное направление распространения [9]. Однако он испытывает смещение при перестройке частоты ультразвука вследствие углового отклонения в промежутке между двумя АОЯ. Поскольку параллельный сдвиг светового пучка пропорционален изменению частоты, это приводит к ограничению частотного диапазона  $\Delta f_{\text{shift}}$ . Очевидно, что увеличение  $\Delta f_{\text{shift}}$  возможно за счет максимального сближения АОЯ, что приведет к уменьшению величины сдвига светового пучка, а также за счет выбора выходного коллиматора, наименее чувствительного к параллельному сдвигу пучка относительно оси коллиматора.

М.М.Мазур, Л.И.Мазур, А.В.Рябинин, В.Н.Шорин. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Россия, Московская обл., 141570 Менделеево; e-mail: ryabinin.nn@yandex.ru

Поступила в редакцию 13 мая 2020 г.

Для АОСЧ с волоконными вводами важны не направления входящего и выходящего пучков, а сохранение углового и пространственного положений выходного пучка при перестройке частоты ультразвука. Обеспечение значительной перестройки сдвига частоты лазерного излучения без изменения направления его распространения возможно за счет последовательной дифракции излучения на двух идентичных АОЯ [10].

Необходимо отметить, что такая конфигурация АОСЧ сохраняет направление распространения выходного светового пучка при изменении частоты ультразвука.

Для реализации АОЯ ДАОСЧ удобно использовать анизотропный дефлектор. Конфигурацию неаксиального анизотропного дефлектора в одноосном кристалле можно обеспечить двумя способами [8]. В одном варианте волновой вектор входного оптического пучка находится под меньшим углом к оптической оси, чем волновой вектор выходной обыкновенной волны, в другом варианте – наоборот. Для конфигурации анизотропного дефлектора с использованием оптически положительного кристалла, например  $\text{TeO}_2$ , входной пучок должен быть необыкновенным. На рис. 1 представлена векторная диаграмма этих вариантов акустооптического взаимодействия при одинаковых направлениях распространения ультразвуковой волны.

Для ДАОСЧ на основе кристалла парателлурифта можно использовать оба варианта взаимодействия. Однако если требуется сдвиг частоты лазерного излучения на небольшие величины, угол  $\gamma$  также становится малым, и в результате световые волны будут распространяться в ячейке под небольшим углом к оси [001], что приведет к необходимости учитывать эллиптичность этих волн из-за гиротропии кристалла. В работе [11] показано, что для ДАОСЧ на основе АОЯ из  $\text{TeO}_2$  с диаграммой взаимодействия, соответствующей входной необыкновенной волне с волновым вектором  $\mathbf{K}_{i2}$  (рис. 1), пространственный сдвиг дважды продифрагировавшего пучка, измеренный на базе 3400 мм при сдвиге частоты лазерного излучения на величину от 170 до 256 МГц, составил менее 0.5 мм. Из этого следует, что угловое смещение светового пучка в ДАОСЧ меньше 0.5'. Данное обстоятельство позволило прогнозировать возможность использования та-

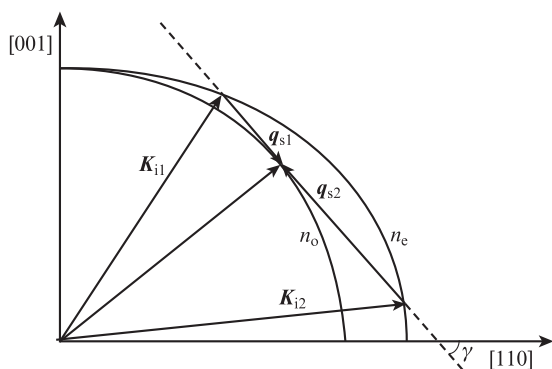


Рис.1. Векторная диаграмма акустооптического взаимодействия для двух конфигураций акустооптического дефлектора:

$\mathbf{K}_{i1}$  и  $\mathbf{K}_{i2}$  – волновые векторы падающей необыкновенной световой волны;  $\mathbf{K}_d$  – волновой вектор дифрагированной обыкновенной световой волны;  $\mathbf{q}_{s1}$  и  $\mathbf{q}_{s2}$  – волновые векторы звуковых волн;  $\gamma$  – угол, характеризующий направление распространения звуковой волны; [001] и [110] – кристаллофизические направления;  $n_o$  и  $n_e$  – показатели преломления кристалла  $\text{TeO}_2$  для обыкновенной и необыкновенной световых волн.

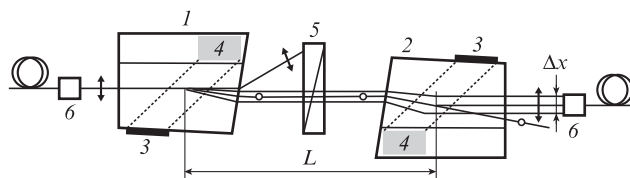


Рис.2. Оптическая схема ДАОСЧ:

1, 2 – АОЯ; 3 – ультразвуковые преобразователи; 4 – поглотители ультразвуковой волны; 5 – поляризатор; 6 – входной и выходной коллиматоры; знаки o и  $\updownarrow$  обозначают состояние поляризации света.

кого ДАОСЧ и для создания волоконного широкодиапазонного сдвигателя частоты.

Макет ДАОСЧ с волоконными коллиматорами на входе и выходе был изготовлен на основе АОЯ из  $\text{TeO}_2$  с геометрией взаимодействия, соответствующей падающей необыкновенной волне с волновым вектором  $\mathbf{K}_{i1}$ . Ячейки были рассчитаны и просветлены для работы с излучением на длине волны 785 нм.

Оптическая схема широкодиапазонного ДАОСЧ лазерного излучения с волоконными вводами представлена на рис.2. Ультразвуковые преобразователи 3 имели длину 3 мм и высоту 2 мм. Для упрощения технологии сдвиговые ультразвуковые преобразователи из кристалла  $\text{LiNbO}_3$  среза  $Y+163^\circ$  были присоединены к светозвукопроводам цианакрилатным клеем без дополнительного слоя для акустического согласования, что ограничивало частотную полосу  $\Delta f_{\text{match}}$  возбуждения ультразвука. Пунктирными прямыми выделены области распространения ультразвуковых пучков. Направление распространения ультразвукового пучка определяется волновым вектором  $\mathbf{q}_{s1}$ , и в изготовленных АОЯ угол  $\gamma = 9.5^\circ$ .

Смещение светового пучка  $\Delta x$  в промежутке между двумя АОЯ, без учета показателей преломления АОЯ и поляризационного делителя, можно описать выражением

$$\Delta x \approx \frac{L \lambda \Delta f}{V_{s1}}, \quad (2)$$

где  $L$  – расстояние между областями акустооптического взаимодействия в АОЯ;  $V_{s1}$  – скорость сдвиговой волны с волновым вектором  $\mathbf{q}_{s1}$ ;  $\Delta f$  – диапазон перестройки ВЧ сигнала. Для исследуемого ДАОСЧ имеем  $L \approx 2$  см,  $V_{s1} = 6.64 \times 10^4$  см/с, что при  $\lambda = 0.785$  мкм и  $\Delta f = 20$  МГц дает смещение  $\Delta x \approx 0.5$  мм.

При использовании варианта ввода необыкновенной волны, соответствующей волновому вектору  $\mathbf{K}_{i1}$ , центральная частота синхронизма составляет около 90 МГц. Оптические грани АОЯ были наклонены таким образом, чтобы для этой частоты продифрагированное в первой АОЯ излучение распространялось параллельно падающему.

### 3. Результаты измерений и их анализ

В качестве излучателя использовался волоконный лазер LP785-SAV50, генерирующий неполяризованное излучение. Для преобразования излучения в поляризованное в U-образную монтажную платформу FBP-B-FC с портами для оптоволокон был помещен поляризационный светоделитель. Через одномодовое волокно, поддерживающее поляризацию, излучение подавалось на входной разъем ДАОСЧ и коллиматором PAF2-7B 6 преобразовывалось в квазипараллельный пучок, который после-

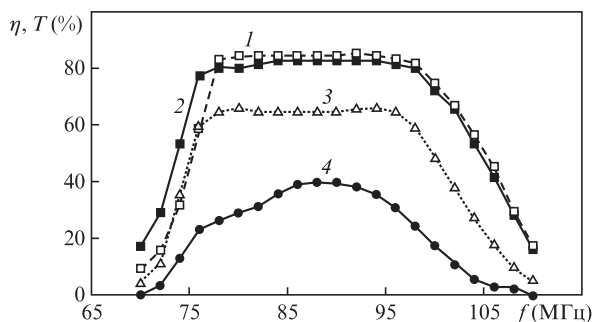


Рис.3. Передаточные характеристики ДАОСЧ и его составных частей в зависимости от частоты ВЧ сигнала  $f$ .

довательно дифрагировал в двух АОЯ (1 и 2), а затем вводился через выходной коллиimator  $b$  в одномодовое волокно, поддерживающее поляризацию.

Результаты измерений эффективности дифракции  $\eta$  в каждой АОЯ и коэффициента передачи  $T$  дважды продифрагировавшего излучения с учетом потерь в поляризационном светоделителе показаны на рис.3. При установке АОЯ в корпус ДАОСЧ максимальная эффективность дифракции в ячейках (кривые 1 и 2) не превышала 80%–84%, что, по-видимому, связано с ошибкой в совмещении по высоте ультразвукового и светового пучков, т. к. при исследовании АОЯ, расположенной вне корпуса, эффективность дифракции достигала 96% при мощности ВЧ сигнала около 100 мВт. Кривая 3 соответствует коэффициенту передачи при прохождении света через входной коллиimator, две АОЯ и поляризатор. Кривая 4 отвечает коэффициенту передачи световой мощности с учетом потерь во входном коллииматоре, потерь в двух АОЯ, потерь в поляризационном светоделителе и потерь при вводе излучения в волокно с помощью выходного коллииматора. Для ДАОСЧ в выбранной симметричной схеме расположения АОЯ диапазон перестройки ВЧ сигнала 20 МГц соответствует сдвигу частоты лазерного излучения на 40 МГц. Из представленных результатов следует, что в рассматриваемом ДАОСЧ в центре указанного диапазона потери в двух ячейках и поляризаторе составляют около 2 дБ и плюс к этому около 2 дБ при выводе излучения через выходной коллиimator. Кроме того, потери увеличиваются еще на 2 дБ по краям диапазона при изменении частоты ВЧ сигнала на  $\pm 10$  МГц относительно центра диапазона, что отвечает сдвигу частоты на  $\pm 20$  МГц.

Возникает закономерный вопрос: есть ли возможность увеличить коэффициент передачи ДАОСЧ? Как уже упоминалось, за счет лучшего совмещения светового и звукового пучков можно уменьшить потери при акусто-

оптической дифракции и, по-видимому, снизить их до величины, не превышающей 1 дБ при прохождении через две АОЯ. Также выбором коллиimators и их правильной юстировкой вполне можно достичь величины потерь менее 1 дБ при передаче света через коллиimator в волокно в центре указанного выше диапазона. Чтобы выяснить, как при этом изменятся потери на краях диапазона и какое максимальное увеличение диапазона перестройки достижимо, требуется дополнительное исследование.

#### 4. Выводы

Разработанный и изготовленный новый тип АОСЧ лазерного излучения с волоконными вводом и выводом – ДАОСЧ на основе последовательной анизотропной дифракции в двух АОЯ – продемонстрировал правильность расчетных предпосылок и подтвердил работоспособность ДАОСЧ.

Достигнута полоса сдвига частоты лазерного излучения 40 МГц без использования механической подстройки и дополнительных оптических элементов (фазовой пластинки и объектива типа «кошачий глаз») при волоконных вводе и выводе излучения.

Авторы выражают благодарность Генеральному директору ФГУП ВНИИФТРИ С.И.Донченко и начальнику НИО-9 А.В.Апрелеву за постановку исследовательской работы по созданию широкополосного АОСЧ с волоконными вводами.

1. Бердасов О.И., Хабарова К.Ю., Стрелкин С.А., Белотелов Г.С., Костин А.С., Грибов А.Ю., Пальчиков В.Г., Колачевский Н.Н., Слюсарев С.Н. *Альманах современной метрологии*, № 1, 13 (2014).
2. Бердасов О.И., Грибов А.Ю., Стрелкин С.А., Слюсарев С.Н. *Альманах современной метрологии*, № 11, 81 (2017).
3. Baryshev V., Epikhin V., Blinov I., Donchenko I. *Proc. 2016 IEEE Int. Frequency Control Symp.* (New Orleans, LA, USA, 2016, pp 205–208).
4. Барышев В.Н., Епихин В.Н. *Квантовая электроника*, **40** (5), 431 (2010) [*Quantum Electron.*, **40** (5), 431 (2010)].
5. Donley E.A., Heavner T.P., Levi F., Tataw M.O., Jefferts S.R. *Rev. Sci. Instrum.*, **76**, 063112 (2005).
6. Епихин В.М. *Доклад на семинаре НИО-9 ФГУП ВНИИФТРИ* (Менделеево, 2020).
7. Дьелесан Э., Руайе Д. *Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов* (М.: Наука, 1982).
8. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. *Физические основы акустооптики* (М.: Радио и связь, 1985).
9. Мазур М.М., Мазур Л.И., Шорин В.Н. Патент на изобретение RU 2648567. Приоритет от 24.05.2017.
10. Мазур М.М. *Докт. дис.* (М., НТЦ уникального приборостроения РАН, 2007).
11. Апрельев А.В., Мазур М.М., Мазур Л.И., Шорин В.Н. *Сб. докл. IX междунар. симп. «Метрология времени и пространства»* (Менделеево, 2018, с. 201–206).