_____ ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ _____ ТЕХНИКА

УДК 535.241.13:534

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ДЕФЛЕКТОРЫ НА КРИСТАЛЛЕ ПАРАТЕЛЛУРИТА. МЕТОДЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И РАСШИРЕНИЯ УГЛА СКАНИРОВАНИЯ

© 2019 г. С. Н. Антонов

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1 e-mail: olga-ant@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.08.2018 г. После доработки 20.08.2018 г. Принята к публикации 10.10.2018 г.

Рассмотрены дефлекторы на основе брэгговской неаксиальной анизотропной дифракции в кристалле парателлурита. Получены практически значимые соотношения, определены факторы, ограничивающие эффективность дифракции и угловой диапазон сканирования. Представлен обзор нескольких новых, реализованных в устройствах методов увеличения основных функциональных параметров дефлекторов, в частности, рассмотрена двухкристальная схема дефлектора, позволяющая существенно повысить эффективность дифракции, расширить диапазон сканирования и создать поляризационно-нечувствительный дефлектор. Показана возможность использования режима дифракции во втором по амплитуде звука брэгговском максимуме для расширения полосы. Предложено использовать двухэлементный оптимально фазированный пьезопреобразователь для расширения частотного диапазона сканирования.

DOI: 10.1134/S0032816219020174

1. ВВЕДЕНИЕ

Акустооптические (а.о.) устройства используются для управления параметрами оптического излучения ультразвуковыми волнами в прозрачных средах. На практике акустический диапазон составляет от единиц до нескольких сотен мегагерц, оптический — от ультрафиолета до десятков микрон. Акустооптические приборы обеспечивают работу с интенсивным лазерным излучением с плотностью мощности несколько киловатт на квадратный сантиметр, имеют высокое быстродействие, вплоть до сотен наносекунд, характеризуются отсутствием механически перемещаемых элементов, малыми вносимыми световыми потерями, небольшими габаритами и массой.

Изучались разнообразные возможности практического применения а.о., например, при создании анализаторов радиосигналов, приборов спектральной обработки изображений, оптических процессоров, модуляторов интенсивности света.

Данная работа посвящена а.о.-дефлекторам (а.о.д), которые применяются для лазерного вывода изображений, в системах переключения оптических каналов связи, в устройствах навигации и позиционирования элементов конструкций. Так, а.о.д., описанные в данной работе, используются в настоящее время в установках для изготовления (прожигания) оригинальной страницы всех заграничных паспортов РФ.

Основные параметры а.о.д.: максимальный угол сканирования, эффективность дифракции в рабочей полосе частот, апертурные, угловые, поляризационные характеристики, быстродействие. Одна из основных проблем а.о.д. состоит в следующем противоречии — чем шире угол сканирования, тем ниже интегральная эффективность дифракции. Основная направленность данной работы — преодоление этого противоречия.

Расчеты, измерения и характеристики устройств приводятся для длины волны света $\lambda = 1.06$ мкм, поскольку такие лазеры находят наибольшее применение в промышленности.

2. АНИЗОТРОПНЫЙ ДЕФЛЕКТОР НА ПАРАТЕЛЛУРИТЕ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Основным материалом а.о.д. является парателлурит (TeO₂). Кристалл обладает феноменально большой величиной а.о.-качества M_2 и высокой прозрачностью в диапазоне длин волн света 0.35-5 мкм. Развита технология выращивания и обработки больших однородных образцов (куб до 20 мм³) этого кристалла. Оптическая и акустиче-



Рис. 1. Векторная диаграмма анизотропного а.о.д. **К** – волновой вектор звука; **К**_t и **K**_d – векторы падающего и дифрагированного света соответственно; n_o и n_e – поверхности показателей преломления кристалла; Δ **K** – изменение модуля вектора звука при перестройке его частоты.

ская анизотропия кристалла TeO₂ определяет важные особенности а.о.-взаимодействия.

Теория анизотропных а.о.д. на основе кристалла TeO_2 и ряд практических использований изучены весьма полно [1–7].

Наибольшее распространение получили а.о.д. в режиме брэгговской неаксиальной анизотропной дифракции. Медленная сдвиговая акустическая волна распространяется в плоскости (001) под некоторым углом к направлению [110]. Векторная диаграмма такого вида а.о.-дифракции (неаксиальный анизотропный дефлектор, характеризующийся сменой поляризационной моды света при дифракции) приведена на рис. 1.

Волновой вектор звука направлен под углом α к оси [110] и является касательной к поверхности показателей преломления дифрагированного света. Несовпадение волновых векторов описывает величина χ – расстройка брэгговского синхронизма:

$$\chi = |K_d - K_t - K|.$$

Видно, что расстройка брэгговского синхронизма обеспечивает два максимума, поскольку точный синхронизм реализуется при двух значениях частоты. Благодаря этому дифракция происходит в широкой полосе частот. Варьируя угол падения светового луча на а.о.-ячейку, можно найти компромисс между шириной полосы и глубиной снижения эффективности в центре полосы между двумя максимумами. Заданная предельная расстройка χ_{max} определяет максимальную частотную полосу:

$$\Delta f = V_s \frac{\Delta K}{2\pi} = V_s \sqrt{\frac{8\chi_{\max}n_o}{\pi\lambda}},$$



Рис. 2. Расчетная зависимость эффективности дифракции от частоты звука.

где V_s — скорость звука; n_o — показатель преломления обыкновенной световой моды; λ — длина волны света в вакууме.

Расчет проведем для следующих экспериментальных условий: угол $\alpha = 6^{\circ}$, длина преобразователя 6 мм, высота 4 мм. Параметры лазера: длина волны света $\lambda = 1.06$ мкм, апертура 0.6 мм, полная расходимость 2.4 мрад.

На рис. 2 представлен результат расчета — зависимость от частоты звука f эффективности дифракции η — отношения интенсивности дифрагированного светового луча к падающему.

Пунктирная линия соответствует углу точного брэгговского синхронизма, когда волновой вектор звука в единственной центральной точке "соприкасается" с волновой поверхностью дифрагированного света. Непрерывная кривая - это и есть широкополосный режим дефлектора: пересечение вектора звука с волновой поверхностью света осуществляется в двух точках (см. рис. 1). Расчет был сделан на основе уравнений связанных волн, учитывающих высшие дифракционные порядки. Для учета угловой расходимости излучения эффективность, полученная для плоских волн, усреднялась по угловому спектру излучения, который считался гауссовым, максимум искался вблизи индекса фазовой модуляции $\gamma = \pi$ отдельно для каждой частоты.

Рис. 2 иллюстрирует вышеуказанную тенденцию (противоречие) — увеличение частотного диапазона приводит к большему провалу эффективности.

Рассмотрим зависимости центральной частоты дефлектора и полосы частот (углового диапазона сканирования) от угла α.

В практически работающих дефлекторах используют скос звуковой грани (величина угла α) от 4° до 6°. На рис. 3 представлены три частотные характеристики дефлекторов с разным направлением звука: $\alpha = 4^{\circ}, 5^{\circ}$ и 6° соответственно.

Расчет проводился таким образом, чтобы в каждом случае минимальная эффективность была равна 80%. Видно, что при $\alpha = 4^{\circ}$ центральная частота равна 25 МГц, при 5° – 32 МГц и при 6° – 37 МГц.

Кристалл TeO₂ имеет значительную величину акустической анизотропии: угол сноса энергии в плоскости дифракции примерно в 10 раз больше угла α . Следовательно, чем больше α , тем объемнее требуется кристалл и тем ниже M_2 . Однако при этом расширяется диапазон сканирования и увеличивается средний угол отклонения, что повышает контраст в зоне записи изображения. Тем самым, выбор величины α при разработке а.о.д. является самостоятельной инженерной задачей.

3. ДВУКРИСТАЛЬНАЯ СХЕМА ДЕФЛЕКТОРА

Использование оптической схемы с двумя последовательно включенными а.о.-кристаллами позволяет расширить функциональные возможности дефлектора.

3.1. Дефлектор с подстройкой брэгговского угла

Расширение угловой полосы сканирования при сохранении высокой эффективности дифракции может быть достигнуто использованием дополнительного а.о.д. в одной оптической схеме [8].

Принципиальная оптическая схема разработанного дефлектора представлена на рис. 4.

Функционирование двухкристального а.о.д. следующее. Вектор поляризации входного излучения ориентирован так, чтобы в первом дефлекторе реализовывался режим дифракции в соответствии с рис. 1. В процессе дифракции вектор поляризации дифрагированного луча меняет направление на 90°, а фазовая пластина возвращает его поляризацию в исходную "рабочую" для второго дефлектора. При этом частота первого дефлектора изменялась (подстраивалась) таким образом, чтобы в любой точке частотного диапазона второго дефлектора выполнялось условие $\chi = 0$.

Измерения проводились с волоконным лазером с управляемой мощностью до 20 Вт и линейной поляризацией. Прибор состоял из двух идентичных а.о.д. и кварцевой фазовой пластины, расположенной вблизи выходной поверхности первого дефлектора. Фотография устройства представлена на рис. 5.

В дефлекторах применена технология акустического контакта пьезопреобразователя и кристалла TeO₂, обеспечивающая эффективное широкополосное преобразование [9].

Результаты измерений представлены на рис. 6. Видно, что подстройка угла падения позволила



Рис. 3. Частотные характеристики дефлекторов с разным направлением α звука.



Рис. 4. Принципиальная оптическая схема разработанного дефлектора. РР $\lambda/2$ – полуволновая фазовая пластина; $\mathcal{A}\Gamma$ – двуканальный генератор, управляемый компьютером. Оптические лучи: *I* – входное поляризованное излучение постоянного направления, I_1 – угловое поле на выходе первого дефлектора с угловым диапазоном $\Delta\Phi$, I_2 – рабочее поле на выходе второго дефлектора с диапазоном $\Delta\theta$.



Рис. 5. Внешний вид дефлектора. Фазовая пластина закреплена на выходной поверхности а.о.д.



Рис. 6. Зависимости частоты f_1 первого дефлектора (1) и суммарной эффективности дифракции η (2) от частоты f_2 второго дефлектора.

стабилизировать суммарную эффективность на уровне около 90% во всем частотном диапазоне – 32 МГц. При этом необходимая девиация частоты на первом дефлекторе не превысила 4 МГц, что обеспечило сохранение его эффективности на уровне 95%.

Из измеренных частотных значений и дифракционных параметров (скорость звука в TeO₂ равна $0.65 \cdot 10^6$ мм/с, длина волны света 1 мкм) получим абсолютные углы девиации: на первом дефлекторе $\Delta \Phi = 6$ мрад, на втором – $\Delta \theta = 50$ мрад.

Для сравнения приведем параметры современного функционально аналогичного дефлектора фирмы Gooch & Housego, модель MD035-3S2B53-5-6.5DEG [10]: а.о.-кристалл TeO₂, частотный диапазон 25–45 МГц, эффективность 70%, спад эффективности в рабочей полосе 2 дБ.

Таким образом, преимущества предлагаемого дефлектора очевидны.

3.2. Дефлектор неполяризованного лазерного излучения

Значительная часть мощных промышленных лазеров являются неполяризованными. Таким образом, однокристальный дефлектор на основе TeO₂ (одноактовая дифракция) в принципе не может обеспечить эффективность дифракции более 50%.

Двухкристальная схема (рис. 5) позволяет создать поляризационно-нечувствительный дефлектор на TeO_2 с потенциальной эффективностью до 100% [11]. На рис. 7 показан ход лучей в таком дефлекторе.

Входное неполяризованное излучение *I* в кристалле первого дефлектора "расщепляется" на две ортогонально поляризованные световые мо-



Рис. 7. Иллюстрация дифракции неполяризованного излучения. Обозначения соответствуют рис. 4.

ды. Одна из мод соответствует брэгговскому синхронизму (см. рис. 1), образует угловое поле I_1 с угловым диапазоном Φ_1 и поворотом вектора поляризации на 90°. Вторая мода дифракцию не испытывает. После фазовой пластины оба луча меняют поляризацию на 90°, и вторая, не испытавшая дифракцию мода отклоняется в поле I_2 с угловым диапазоном Φ_2 . Границы угловых секторов "соприкасаются". Работа дефлекторов независима друг от друга.

Ход лучей на рис. 7 соответствует прибору, в котором первый а.о.д. изготовлен с углом $\alpha = 4^{\circ}$, а второй – с $\alpha = 6^{\circ}$. В результате первый и второй а.о.д. имеют различные центральные частоты: 25 МГц для $\alpha = 4^{\circ}$ и 37 МГц для $\alpha = 6^{\circ}$ – и, следовательно, различные угловые секторы сканирования (см. рис. 3).

В данном разделе описаны эксперименты, проведенные с использованием неполяризованного волоконного лазера.

На рис. 8 представлены результаты измерений частотной зависимости эффективности дифракции для первого "высокочастотного" и второго "низкочастотного" дефлекторов.

Частотный диапазон определяется выбранной величиной минимальной эффективности дифракции η_{min} , которую зададим на уровне 70%, тогда в диапазоне частот 16–25 МГц (точка *A*) сектор сканирования обеспечивается первым дефлектором, а до конечной частоты 48 МГц – вторым. Это дает суммарную полосу частот 32 МГц и полный угол сканирования 50 мрад.

Отметим еще одну возможность использования двухкристального дефлектора для управления неполяризованным излучением. Если оба дефлектора идентичны, установлены под одинаковыми углами к входному лучу и на них подаются одни и те же частоты RF-сигнала, то образуется



Рис. 8. Результаты измерений частотной зависимости эффективности дифракции двухкристального дефлектора. *1* – первый "высокочастотный" дефлектор, *2* – второй "низкочастотный" дефлектор.

одно угловое поле неполяризованного дифрагированного света [12].

4. ДЕФЛЕКТОР В РЕЖИМЕ ИНДЕКСА ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ γ = 3π

В работе [13] показано, что при индексе фазовой модуляции брэгговской дифракции $\gamma = 3\pi$ (второй максимум эффективности как функция мощности звука) проявляется интересная особенность а.о.-дифракции — модификация углового спектра дифрагированного излучения.

Ниже рассмотрена возможность повышения эффективности а.о.д. при использовании режима индекса фазовой модуляции $\gamma = 3\pi$ [14].

Максимумы эффективности дифракции как функции мощности звука наблюдаются при:

$$\gamma = \frac{\pi}{\lambda \cos \theta} \sqrt{M_2 P_s \frac{L}{H}};$$
$$\eta = \frac{\gamma^2}{\gamma^2 + \gamma^2} \sin^2 \sqrt{\frac{\gamma^2 + \chi^2}{4}},$$

где M_2 — акустооптическое качество материала; P_s — мощность звука; L, H — соответственно длина и высота преобразователя; θ — угол падения света на границу звукового поля.

Максимумы брэгговской дифракции будут наблюдаться при: $\gamma = \pi$, $\gamma = 3\pi$ и т.д.

На рис. 9 приведены расчетные зависимости эффективности дифракции а.о.д. для режима $\gamma = \pi$, штриховой линией показана амплитуда звука, увеличенная в 3 раза, $\gamma = 3\pi$.

Согласно рис. 9, высокая эффективность (почти 100%) сохраняется в значительной полосе частот, 25–50 МГц, что соответствует частотному диапазону 40 мрад. Отметим существенный мо-



Рис. 9. Расчетные зависимости эффективности дифракции: сплошная линия – для режима $\gamma = \pi$, штриховая – для режима $\gamma = 3\pi$.

мент — для устранения влияния тепловых эффектов в а.о.-ячейке измерения проводились в импульсном режиме: скважность равна 20, соответственно подводимая к ячейке средняя RF-мощность не превышала 200 мBт во всех режимах.

На рис. 10 приведены экспериментальные зависимости максимальной эффективности дифракции от частоты ультразвука, пересчитанные для непрерывного RF-сигнала.

Согласно рис. 10, в режиме $\gamma = 3\pi$ исчезает провал эффективности в центральной частотной области и расширяется весь частотный диапазон.

На рис. 11 представлен итоговый результат, полученный при последовательном включении на различных участках частотного диапазона режимов $\gamma = \pi$ и $\gamma = 3\pi$.



Рис. 10. Экспериментальные зависимости эффективности дифракции: 1 -режим $\gamma = \pi$ (мощность RF-сигнала около 400 мВт), $2 - \gamma = 3\pi$ (мощность около 4 Вт).



Рис. 11. Результат работы совместных режимов: $\gamma = \pi$ и $\gamma = 3\pi$. $T_1 - T_4 - узловые точки переключения режимов.$

С начала частотного диапазона до узловой точки T_1 мощность RF-сигнала соответствует режиму $\gamma = 3\pi$, затем до точки T_2 – режиму $\gamma = \pi$, до точки $T_3 - \gamma = 3\pi$, до точки $T_4 - \gamma = \pi$, а с точки T_4 и до конца диапазона – $\gamma = 3\pi$.

Таким образом, в полосе частот около 25 МГц реально достигнутая эффективность составила более 85%.

Данный метод имеет и негативное свойство требуется существенное повышение мощности звука, поскольку величина у пропорциональна амплитуде звука. В большинстве случаев предельные параметры а.о.д. ограничены именно тепловыми эффектами в ячейке. В нашем конкретном случае в дефлекторе, работающем в классическом режиме $\gamma = \pi$, мощность звука составляет около 400 мВт, а в режиме $\gamma = 3\pi$ – около 4 Вт. Однако в силу того что в половине диапазона используется то один, то другой режим, достигается суммарное увеличение уже не в 10, а в 5 раз. Таким образом, средняя потребляемая мощность составляет около 2 Вт, что, как установлено практически, позволяет работать в непрерывном режиме. Тепловая проблема отсутствует, если возможен импульсный режим RF-сигнала, что, например, реализуется при работе с импульсными лазерами.

5. ДЕФЛЕКТОР С ДВУХЭЛЕМЕНТНЫМ ФАЗИРОВАННЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Для расширения углового диапазона сканирования а.о.д. применяются многоэлементные пьезопреобразователи, когда его элементы возбуждаются на одной частоте, но с определенным сдвигом фаз. Это позволяет отклонять основной лепесток диаграммы направленности акустического поля и поддерживать брэгговский синхронизм а.о.-взаимодействия в большей полосе звуковых частот.



Рис. 12. Схема дефлектора с двумя преобразователями P_1 и P_2 . K_t – нулевой порядок дифракции, K_d – дифракционный.

Известны различные способы управления сдвигом фаз: противофазное включение соседних элементов [15], установка элементов на "ступеньки", выточенные в кристалле, в котором происходит а.о.-взаимодействие [16], путем сдвига фаз управляющих электрических сигналов многоэлементного преобразователя [17]. Однако эти решения достаточно технически сложны.

В [18] показана возможность расширения диапазона сканирования однокристального а.о.д. при использовании только двухэлементного пьезопреобразователя (рис. 12). Использовался цифровой двухканальный генератор с управляемой разностью фаз сигналов в зависимости от частоты.

Измеренные зависимости эффективности дифракции от частоты приведены на рис. 13. Кривая 1 соответствует синфазному сигналу на обоих элементах пьезопреобразователя. На каждой частоте был найден максимум зависимости эффективности от управляющей мощности. Максимальная полученная эффективность ограничена расходимостью света [5] и составила 95%, в центре частотной полосы эффективность падает до 87%. Согласно кривой 1, в синфазном режиме полоса составила 15 МГц. Режим управления разностью фаз между преобразователями отображает кривая 2. Видно, что частотная полоса расширилась до 31 МГц, что в два раза больше полосы в синфазном режиме, при этом эффективность дифракции составила 95%.



Рис. 13. Измеренные зависимости эффективности дифракции: *1* – для синфазного сигнала на обоих элементах пьезопреобразователя; *2* – в режиме управления разностью фаз между преобразователями.

6. ВЫВОДЫ

Представлены способы расширения частотной полосы а.о.-дефлекторов и повышения эффективности дифракции.

1. Рассмотрены общие положения дефлекторов на основе брэгговской неаксиальной анизотропной дифракции в кристалле парателлурита. Проведены расчеты основных характеристик дефлектора при различной ориентации кристалла относительно падающего света, а также зависимости центральной частоты и частотной полосы от угла наклона "звуковой" плоскости (001).

2. Разработана двухкристальная схема дефлектора и создан базовый экспериментальный макет и промышленный прибор на его основе.

Показано, что данная схема позволяет:

– существенно повысить эффективность дифракции в случае, когда первый дефлектор осуществляет подстройку угла падения света на второй (основной) дефлектор таким образом, чтобы во всем диапазоне сканирования выполнялось условие "чисто" брэгговского взаимодействия; на длине волны света 1.06 мкм достигнута эффективность дифракции ≥95% в угловом диапазоне сканирования 50 мрад;

— создать поляризационно-нечувствительный дефлектор на TeO_2 с потенциальной эффективностью, близкой к 100%, в случае, когда первый дефлектор отклоняет одну поляризационную компоненту, а второй — ортогонально ориентированную.

3. Предложен и экспериментально подтвержден новый способ существенного повышения эффективности а.о.-дефлекторов при сохранении и расширении частотной полосы. Суть метода в том, что в режиме второго по амплитуде звука брэгговсгого максимума происходит существенное повышение эффективности дифракции. Объединение в одном частотном диапазоне режимов первого и второго дифракционных максимумов позволяет снизить управляющую мощность до приемлемого уровня с повышением эффективности дифракции. Практически достигнута эффективность >85% в полосе частот около 25 МГц.

4. Показано, что использование оптимально фазированного двухэлементного пьезопреобразователя в дефлекторе позволяет расширить частотный диапазон сканирования до 17—48 МГц на длине волны 1.06 мкм (более чем в два раза по сравнению с синфазным режимом) при эффективности дифракции 95% без увеличения управляющей RF-мощности.

Автор выражает благодарность А.В. Вайнеру за помощь в расчетах и графическом отображении результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Warner A.W., White. D.L., Bonner W.A. // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. P. 4489.
- Yano T., Kawabuichi M., Fukumoto A., Watanabe A. // Appl. Phys. Letters. 1975. V. 26. № 12. P. 689.
- Dixon R.W. // IEEE J. Quant. Electron. 1967. V. 3. Issue 2. P. 85.
- 4. Lean. E.G.H., Quate C.F., Shaw H.J. // Appl. Phys. Lett. 1967. V. 10. P. 48.
- Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. М.: Советское радио, 1978.
- 6. *Семенков В.П.* // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 10. С. 2090.
- 7. Антонов С.Н., Котов В.М., Сотников В.Н. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 1. С. 168.
- 8. Антонов С.Н. // Акустический журнал. 2018. Т. 64. № 4. С. 432. doi 10.1134/S0320791918040019
- 9. Антонов С.Н. // Акустический журнал. 2017. Т. 63. № 4. С. 364. doi 10.7868/S0320791917030017
- 10. Проспект Gooch & Housego. http://www.goochandhousego.com
- 11. Антонов С.Н. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 1. С. 136.
- 12. Антонов С.Н. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 10. С. 84.
- 13. *Антонов С.Н., Козлов М.Р., Проклов В.В.* // Оптика и спектроскопия. 1981. Т. 50. Вып. 4. С. 805.
- 14. Антонов С.Н. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 10. С. 155.
- 15. Gordon E.I. // Appl. Opt. 1966. V. 5. № 10. P. 1629.
- 16. Voshol C.P.L., Spiekerman A.J.G. // IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics. 1975. V. 22. № 2. P. 143.
- Aboujeib J., Perennou A., Quintard V., Bihan J.L. // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2007. V. 9. P. 463.
- Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В., Резвов Ю.Г. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 9. С. 108.