

АКУСТООПТИКА

Авторы: В. В. Проклов

АКУСТООПТИКА, раздел [акустоэлектроники](#), изучающий взаимодействие электромагнитных волн (как правило, оптич. диапазона) с когерентными акустич. (звуковыми) волнами в твёрдых телах и жидкостях, на основе которого разрабатываются разл. приборы и устройства. Осн. механизм акустооптического (АО) взаимодействия обусловлен упругооптич., или фотоупругим, эффектом среды, в результате которого механич. деформации, создаваемые звуковой волной, вызывают модуляцию оптич. свойств светозвукопровода. Распространение акустич. волны в среде приводит к периодич. изменению диэлектрич. проницаемости (обычно показателя преломления света) среды, что эквивалентно возникновению в ней движущейся со скоростью звука [дифракционной решётки](#) с периодом, равным длине акустич. волны.

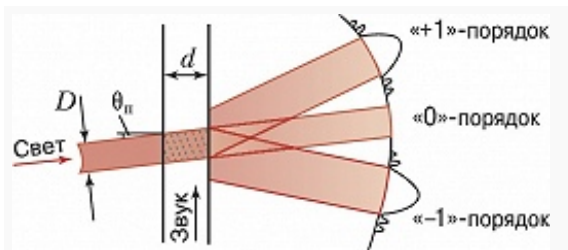


Рис. 1. Акустооптическая дифракция широкого оптического луча ($D \gg \Lambda$): D – ширина светового пучка; d – ширина звукового пучка; θ_p – угол падения света на звуковой пучок (Λ – длина акустической волны).

При большой ширине оптич. луча

D , когда

$D \gg \Lambda$ (

Λ – длина акустич. волны), и определённом угле

падения света имеет место акустооптическая

дифракция. Характеристики

дифрагированного света (направление

распространения, поляризация, частота, фаза

и интенсивность) зависят от параметров оптич.

и акустич. волн, а также от угла между

направлениями распространения этих волн

(рис. 1). Различают акустооптич. брэгговскую

дифракцию и дифракцию Рамана – Ната.

Брэгговская дифракция имеет место при большой «толщине» дифракц. решётки,

когда параметр Кляйна – Кука

$$Q \gg 1 ($$

$$Q \approx \lambda d / \Lambda^2, \text{ где}$$

λ – длина световой волны в среде,

d – ширина акустич. пучка). Обычно брэгговская дифракция происходит при достаточно больших

d (~ 1 см) и высоких частотах звука (ок. 100 МГц и выше), при строго определённом угле падения света на звуковой пучок

$\theta_{\text{п}}$, близком к брэгговскому углу

$\theta_{\text{В}}$, т. е. при

$\theta_{\text{п}} \approx \theta_{\text{В}} = \arcsin(\lambda/2\Lambda)$ (см. [Брэгга – Вульфа условие](#)); причём на выходе помимо проходящего света (нулевой порядок) возникает только один (первый) дифракц. порядок со сдвигом частоты света на частоту звука

Ω соответственно вверх или вниз. При

$Q \ll 1$ имеет место дифракция Рамана – Ната, которая возникает в достаточно широком диапазоне углов падения света вблизи нормального угла и характеризуется одновремен. появлением множества сравнимых по интенсивности дифракц. порядков ($m = \dots -2, -1, 0, +1, +2 \dots$) и соответствующими сдвигами частоты, равными $m\Omega$.

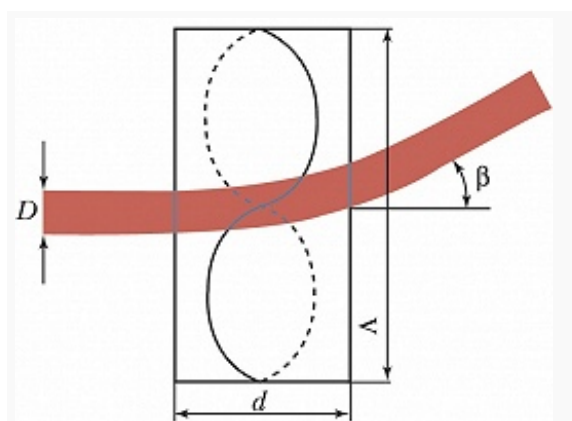


Рис. 2. Акустооптическая рефракция тонкого оптического луча ($D \ll \Lambda$): D – ширина светового пучка; d – ширина звукового пучка; β – угол отклонения светового

При ширине оптич. луча

$D \ll \Lambda$ (рис. 2) возникает акустооптическая рефракция (изменение хода световых лучей в неоднородной деформируемой среде), при которой световая волна после прохождения акустич. пучка отклоняется от своего первоначального направления на угол β , пропорциональный длине пути светового луча в звуковом поле и градиенту показателя преломления среды. При достаточно большой интенсивности оптич. излучения характер АО взаимодействия

пучка; Λ – длина акустической волны.

зависит также от величины этой интенсивности; в частности, при интенсивности более 50–100 МВт/см² может происходить

усиление слабых акустич. волн или их генерация в результате вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна.

Акустооптич. взаимодействие широко используется как при физич. исследованиях, так и в технике. АО дифракция позволяет измерять локальные характеристики акустич. волн (напр., амплитуду, диаграмму направленности, спектральный состав), что может быть использовано для определения мн. параметров вещества – скорости и коэф. поглощения звука, модулей упругости 2-го и более высоких порядков, упругооптич. постоянных и др. Анализ эффективности дифракции в разл. точках образца даёт возможность восстановить картину пространственного распределения интенсивности звука и осуществить визуализацию акустич. полей.

Акустооптические устройства. На основе АО дифракции и рефракции создаются активные оптич. элементы, позволяющие управлять всеми параметрами оптич. лучей, а также обрабатывать информацию, носителем которой может быть как световая, так и акустич. волна. Основу всех устройств составляет акустооптич. ячейка (АОЯ), состоящая из светозвукопровода с пристыкованным к нему электроакустическим преобразователем (обычно пьезоэлектрическим).

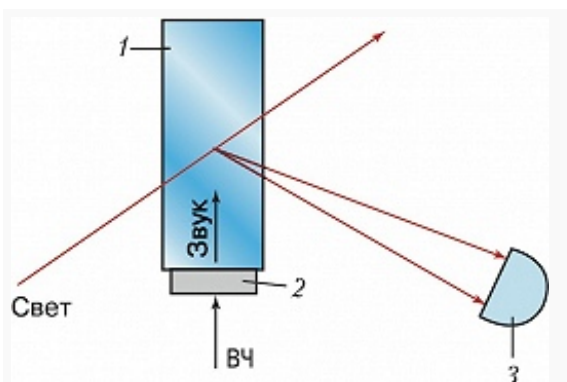


Рис. 3. Схема акустооптического дифракционного модулятора: 1 – светозвукопровод; 2 – пьезопреобразователь; 3 – коллимирующая линза для

Акустооптический модулятор предназначен для модуляции интенсивности (иногда фазы) оптич. излучения; принцип действия основан на перераспределении световой энергии между проходящим и дифрагированным на акустич. волне светом. Обычно используются модуляторы дифрагированного света. Такой модулятор представляет собой АОЯ, в которой с помощью высокочастотного (ВЧ) электрич. напряжения, подаваемого на пьезопреобразователь, возбуждается бегущая

выходного луча света.

амплитудно-модулир. звуковая волна.

Падающий на АОЯ относительно узкий

световой луч претерпевает АО дифракцию, и отклонённый луч (первый дифракц.

порядок) поступает на выход устройства (рис. 3). Осн. характеристики модулятора:

дифракц. эффективность

η – доля мощности дифрагированного света по отношению к падающему;

быстродействие

τ (определяется временем прохождения акустич. волны со скоростью

V_0 через апертуру светового пучка,

$\tau \sim D/V_0$); динамич. диапазон – отношение макс. мощности света на выходе

устройства к мощности рассеянного света в отсутствие ВЧ-сигнала. В совр. АО

модуляторах света быстродействие лежит в диапазоне 10^{-7} – 10^{-8} с, динамич.

диапазон в пределах 30–50 дБ,

η ок. 100%.

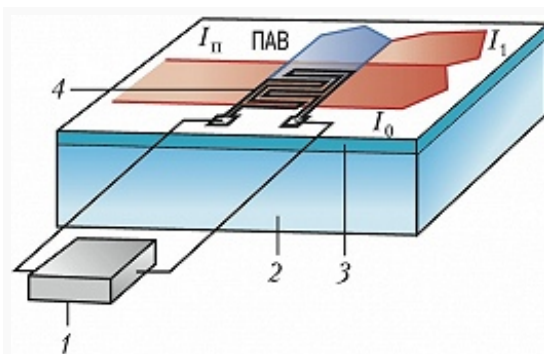


Рис. 4. Схема волноводного акустооптического дифракционного модулятора на поверхностных акустических волнах: 1 – ВЧ-генератор; 2 – подложка; 3 – оптический волновод; 4 – встреч...

Выделяют планарные акустооптич. модуляторы (рис. 4), работа которых основана на

взаимодействии волноводных оптических мод с поверхностными акустическими волнами (ПАВ).

Планарные модуляторы применяются в качестве активных элементов интегрально-оптич. схем.

Акустооптические дефлекторы и сканеры – устройства для управления отклонением

светового луча в пространстве на основе АО дифракции или рефракции. Сканеры служат

для непрерывной развёртки луча,

дефлекторы – для адресации луча в пределах фиксир. числа направлений, в которые может

отклоняться световой луч. В дифракц. АО дефлекторе (наиболее распространены) угол отклонения света

θ изменяют путём изменения частоты звука

f . Два соседних состояния луча «разрешаются» по критерию Рэлея, если угол между ними

$$\delta\theta = \delta f / V_0 \cos\theta_B, \text{ связанный с изменением частоты}$$

δf , превышает угол расходимости луча света

$\delta\theta_{св} \approx \lambda/D$. Осн. характеристики таких дефлекторов: число разрешимых состояний светового луча (в пределах макс. углового перемещения $\Delta\theta$)

$$N = \Delta\theta / \delta\theta; \text{ быстродействие}$$

τ , определяемое как время перехода из одного состояния в другое; потери пропускания света

$$\alpha = P_{вх} / P_{вых} \text{ (в дБ), где}$$

$$P_{вх},$$

$P_{вых}$ – мощность соответственно падающего и отклонённого луча.

Существуют дифракц. АО дефлекторы, осуществляющие двухкоординатное отклонение светового луча. В этом случае используются два скрещённых одномерных дефлектора, как правило, совмещённых в одной АОЯ, в которой акустич. волны возбуждаются в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Совр. дефлекторы позволяют получать до 10^4 разрешимых состояний со временем перехода τ порядка 1–30 мкс и потерями пропускания в неск. десятков процентов при потребляемой электрич. мощности порядка 1 Вт.

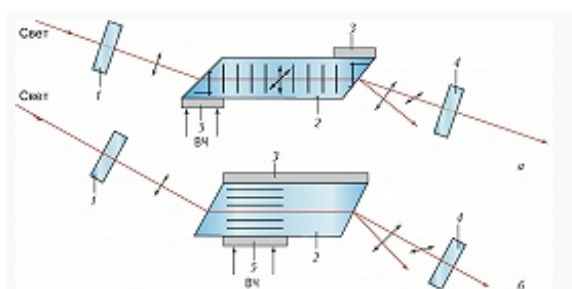


Рис. 5. Схемы акустооптического перестраиваемого фильтра на основе коллинеарного (а) и неколлинеарного (б) АО взаимодействия: 1 – поляризатор;

Акустооптический фильтр – частотно-селективный оптич. фильтр, свойства которого обусловлены резонансным характером синхронизма анизотропной брэгговской дифракции. Такая АО дифракция в виде простого поворота плоскости поляризации дифрагированного излучения на угол 90° позволяет выделять из широкого спектра падающего оптич. излучения достаточно узкий интервал длин волн

2 – светозвукопровод; 3 – акустический поглотитель; 4 – п...

$\delta\lambda$, а при изменении частоты звука перемещать этот интервал по оптич. спектру

(перестраивать фильтр) в достаточно широких

пределах

$\Delta\lambda$. Различают АО фильтры с коллинеарным (направления распространения света и звука совпадают или противоположны) и с неколлинеарным взаимодействием (рис. 5).

Осн. характеристики фильтров: ширина полосы пропускания

$\Delta\lambda$, разрешающая способность

$\delta\lambda/\lambda$, быстродействие

τ и потери пропускания света

α . В видимом диапазоне длин волн (

$\lambda \approx 0,6 \text{ мкм}$) для совр. АО фильтров

$\delta\lambda \geq 1 \text{ \AA}$,

$\tau \leq 15 \text{ нс}$ и

$\alpha \leq 3 \text{ дБ}$ при управляющей мощности

$\sim 1\text{--}5 \text{ Вт}$. Область перестройки может перекрывать весь оптич. и ближний ИК-диапазоны.

Внутриполостные АО модуляторы и фильтры служат для управления процессом генерации и параметрами излучения оптич. квантового генератора.

Высокопрозрачная АОЯ, будучи помещённой внутрь оптич. резонатора, может модулировать его добротность и обеспечивать импульсную работу лазера за счёт синхронизации его собств. мод или перестраивать встроенный фильтр и контролировать длину волны лазерного излучения.

Акустооптический процессор – аналог оптич. процессора, в котором АОЯ используется в качестве пространственно-временного модулятора света. В АО процессоре акустич. сигнал изменяет свои амплитудно-фазовые характеристики в течение времени прохождения по звукопроводу, образуя движущееся одномерное «изображение» сигнала; когерентный и хорошо коллимированный световой луч, дифрагируя на таком изображении, переносит на оптич. несущую всю информацию входного ВЧ-сигнала, что обуславливает применение таких устройств для оптич. обработки информации. Различают аналоговые функциональные и цифровые АО

процессоры. Первые осуществляют над входным сигналом операции преобразования Фурье, нахождение функции неопределённости или взаимной корреляции входного сигнала с заданной опорной функцией, задержку, генерирование сигналов заданной формы и т. д. Вторые могут осуществлять скалярное, векторное и матричное умножение цифровых операндов.

Наибольшее применение получили аналоговые АО спектроанализаторы и АО корреляторы сигналов. Для высокоскоростной работы в режиме реального времени применяют схему оптич. пространственного интегрирования свёртки движущегося изображения сигнала с неподвижным (опорным) оптич. изображением (транспарантом); не слишком быстрые процессы обрабатывают по схеме с временны м интегрированием. Одноканальные АО спектроанализаторы коротких импульсных сигналов имеют спектральное разрешение до 30 кГц; для более длительных процессов на базе временного интегрирования может быть достигнуто разрешение порядка 30 Гц. В обоих случаях эквивалентная операц. скорость обработки в устройствах составляет ок. 10^{10} – 10^{12} аналоговых операций в секунду.

Достаточно высокая производительность, присущая АО процессору как аналоговому вычислит. устройству, может быть использована в целях обработки цифровой информации, в частности для разл. операций линейной алгебры (скалярное умножение векторов, умножение вектора на матрицу, матрицы на матрицу и т. п.). Умножение цифровых операндов осуществляется методом их свёртки в аналоговом АО процессоре. Оценки вычислит. скорости для векторно-матричного умножения в одном процессоре на базе совр. АО технологии показывают принципиальную возможность достижения скорости умножения до 10^{10} операций сложения и умножения в секунду при 16 битовых операндах.

Материалы для АО устройств характеризуются высокой прозрачностью в соответствующей области оптич. спектра и малым затуханием акустич. волн в диапазоне рабочих частот. Важнейшей характеристикой таких материалов является показатель акустооптич. качества

M , который определяет эффективность дифракции η при заданной мощности звука

$P_{ак} : \eta \sim MP_{ак} / \lambda^2$. Для осн. типов АО устройств установлены характерные показатели их акустооптич. качества:

$M_1 = \rho n^7 / \rho V$ – для широкополосных однокоординатных модуляторов и дефлекторов;

$M_2 = \rho^2 n^6 / \rho V^3$ – для узкополосных модуляторов и фильтров и

$M_3 = \rho^2 n^7 / \rho V^2$ – для двухкоординатных дефлекторов (здесь

n – показатель преломления материала,

ρ – эффективная упругооптич. константа,

ρ – плотность материала,

V – фазовая скорость акустич. волны). Наиболее распространёнными АО

материалами, используемыми в видимом и ближнем ИК-диапазонах, являются спец.

стёкла, а также монокристаллы парателлурита

β – ТеО и ниобата лития

LiNbO_3 ; для дальнего ИК-диапазона наибольшее применение получил монокристаллич. германий.

Литература

Лит.: Гуляев Ю. В., Проклов В. В., Шкердин Г. Н. Дифракция света на звуке в твердых телах // Успехи физических наук. 1978. Т. 124. Вып. 1; Магдич Л. Н., Молчанов В. Я.

Акустооптические устройства и их применение. М., 1978; Яковкин И. Б., Петров Д. В.

Дифракция света на акустических поверхностных волнах. Новосиб., 1979;

Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. М.,

1985; Бондаренко В.С., Зоренко В. П., Чкалова В. В. Акустооптические модуляторы

света. М., 1988.