

УДК: 534:535

Исследование неколлинеарного акустооптического фильтра с линейной частотной модуляцией ультразвука

Табачкова К.И., аспирант

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Опτικο-электронные приборы научных исследований»*

Научный руководитель: Пустовойт В.И., профессор

Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана

vlad_pst@yahoo.com

Акустооптические (АО) устройства давно сформировались как класс современной оптической техники. Они основаны на дифракции света на периодических структурах, создаваемых в среде акустической волной вследствие упругооптического эффекта. Такой механизм формирования дифракционных решеток обеспечивает множество важных свойств АО устройств: перестраиваемость, нечувствительность к механическим помехам, быстроедействие, компактность, что в свою очередь определяет широкую область их применения.

Наряду с множеством замечательных свойств АО фильтры имеют и недостатки, одним из которых является фиксированная полоса пропускания $\Delta \omega$, которая определяется конструктивными параметрами устройства (прежде всего длиной АО взаимодействия). Однако АО фильтры имеют некоторые уникальные особенности, которые до сих пор не задействованы в полной мере. Прежде всего, это возможность формировать акустическую волну сложного спектрального состава, а соответственно и дифракционную решетку сложного профиля [1,2]. Такие решетки, которые вполне могут создаваться с помощью современных генераторов высокочастотных (ВЧ) электрических сигналов, имеют особенные передаточные характеристики [3]. В частности, таким способом может быть в принципе решена задача управления шириной окна пропускания, если использовать решетку с изменением периода в большом интервале [4-6].

В приближении однократного рассеяния мгновенная передаточная характеристика для каждого падающего луча представляет собой Фурье-образ распределения ультразвука по его траектории

$$w_{\text{луч}}(y, z, t, \Delta k) = \int A(t, l, z, y) \cdot e^{i \vec{\Delta k} \cdot \vec{l}} dl, \quad (1)$$

где $\Delta k = \Delta k(\omega, \Omega_0)$ - волновая расстройка света ω относительно центральной частоты ультразвука Ω_0 , l - координата вдоль траектории лучей в плоскости дифракции, $A(t) = a(t) e^{i \Delta \Omega(t) t + i \varphi(t)}$ - мгновенная величина модулированной ультразвуковой волны, $a(t)$ - переменная амплитуда акустической волны, $\varphi(t)$ - фаза акустической волны, $\Omega(t)$ - меняющаяся частота акустической волны, $\Delta \Omega(t) = \Omega(t) - \Omega_0$ - отклонение частоты ультразвука от средней.

Фотоприёмник интегрирует все дифрагированные волны по сечению и по времени так, что выходной сигнал является суммой всех волн, взятых со своей фазой в каждый момент времени, усредненный по периоду модуляции

$$S_{\Phi\P}(t, \Omega_0) \approx \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} I(\omega) \cdot T(\Delta k(\omega, \Omega_0)) d\omega$$

$$T(\Delta k) \approx \int_0^{T_{\text{mod}}} dt \int_S dy dz w(y, z, t, \Delta k) \cdot e^{i \psi(z, \Delta k)} \quad (2).$$

Следует отметить, что формула (2) носит качественный характер, так как для учета относительного набег фазы каждой компоненты ψ необходимо рассмотреть детально область взаимодействия и геометрию дифракции.

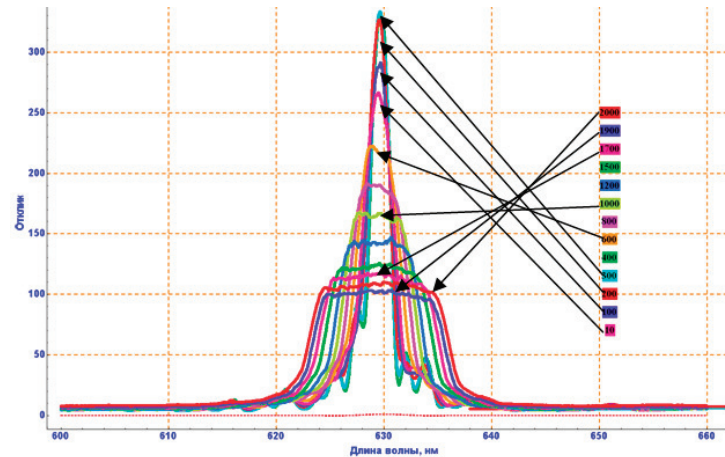
В работе исследована зависимость от трех параметров ультразвуковой волны: девиации частоты, периода модуляции и мощности.

Зависимость от девиации

Ожидалось, что при увеличении девиации ширина окна пропускания передаточной функции будет линейно расти, а при уменьшении будет ограничена минимальной шириной передаточной функции [4-6], которая составляет $\Delta \lambda \sim 1.5$ нм, что по частоте ультразвука составляет $\Delta f_{\min} \equiv \Delta \Omega_{\min} / 2\pi \sim 200$ кГц.

При медленной модуляции ($T_{\text{mod}} \sim 100$ мкс) влияние модуляции пренебрежимо мало $1/T_{\text{mod}} \sim 10$ кГц $\ll df$. Как видно из рис. 1 с ростом девиации df от 10 до 2000 кГц передаточная функция меняется от классической формы $\text{sinc}^2 x$ до прямоугольного окна. При этом коэффициент передачи падает, а площадь окна остается постоянной. Достаточно ровный характер зависимости связан с тем, что мгновенная передаточная характеристика

фактически медленно дрейфует по спектру и результирующая кривая – результат усреднения по времени. Такой режим дает квазипрямоугольную передаточную характеристику, но не позволяет получать высокую эффективность дифракции, т.к. каждая часть передаточной кривой «работает» только часть времени, т.е. с неполной эффективностью. (С этим собственно и связано уменьшение коэффициента передачи при увеличении времени сканирования.)



Зависимость от периода модуляции

Ожидалось, что при увеличении периода свыше времени пробега звука по кристаллу среднее значение частоты ультразвука будет периодически варьироваться, а передаточная функция будет усредняться по времени, размазываясь по спектру. При уменьшении периода в апертуре светового пучка укладывается несколько периодов и усреднение происходит еще и по апертуре. В любом случае изменение периода не должно было бы оказывать сильного влияния.

При малой девиации $df < 300$ кГц передаточные функции имеют вид близкий к классическому $\text{sinc}^2 x$ (рис. 3). При большей девиации полоса расширяется (рис. 4). При этом с ростом периода модуляции высота окна уменьшается, что объясняется колебаниями положения по спектру, сопровождающимися снижением эффективности из-за усреднения по времени.

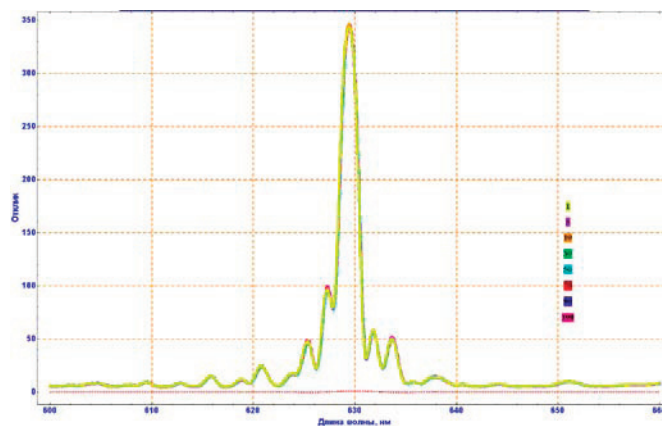


Рис. 3. Функция передачи ЛЧМ АОФ в зависимости от периода модуляции $T_{\text{мод}}$ (мкс) при девиации частоты $df = 10$ кГц и мощности $P = 50$

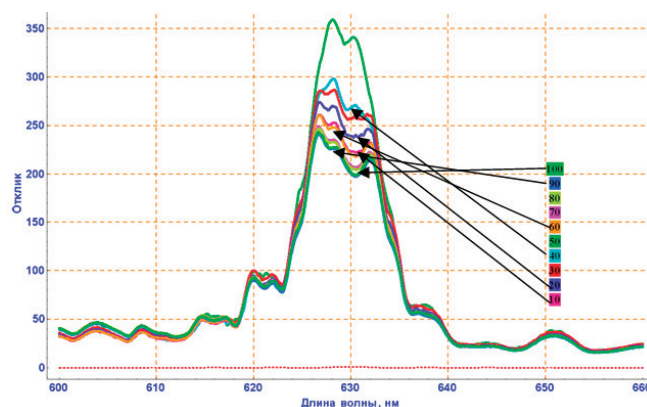


Рис. 4. Функция передачи ЛЧМ АОФ в зависимости от периода модуляции $T_{\text{мод}}$ (мкс) при девиации частоты $df = 600$ кГц и мощности $P = 100$

Зависимость от мощности

Ожидалось, что при увеличении мощности будет происходить монотонный рост отклика до тех пор пока коэффициент передачи достигнет максимума, после чего в области малой эффективности рост продолжится, а в области большой эффективности – возникнет или стабилизация сигнала (эффект насыщения) или даже уменьшение (так называемый эффект «перемодуляции»).

Измерения показали, что могут проявляться оба эффекта. При малой девиации частоты (рис. 5), когда передаточная характеристика имеет вид близкий к классическому $\text{sinc}^2 x$, величина основного максимума растет с ростом мощности и достигает пика (при $P = 50$)¹, а затем начинает уменьшаться, тогда как боковые максимумы продолжают расти, так что функция может принимать двугорбую форму с провалом посередине ($P = 100$). Это соответствует зависимости от мощности ультразвука ($P_{\text{ак}} \sim \Gamma^2$) классической передаточной функции

$$T(\Delta k) = \Gamma^2 L^2 \frac{\sin^2 \sqrt{\Gamma^2 L^2 + \frac{\Delta k^2 L^2}{4}}}{(\Gamma^2 L^2 + \frac{\Delta k^2 L^2}{4})} . \quad (3)$$

Иной характер имеет зависимость мощности при большой девиации частоты (рис. 6), когда ее форма близка к прямоугольной. В этом случае коэффициент передачи постепенно возрастает приближаясь к «потолку» и фактически «упираясь» в него ($P = 80$, $P = 100$). При этом склоны передаточной характеристики продолжают расти, так что функция немного уширяется, а ее интегральный коэффициент передачи (площадь максимума) существенно возрастает.

¹ Мощность задавалась цифровым кодом и монотонно менялась от 0 до 100 условных единиц (у.е.).

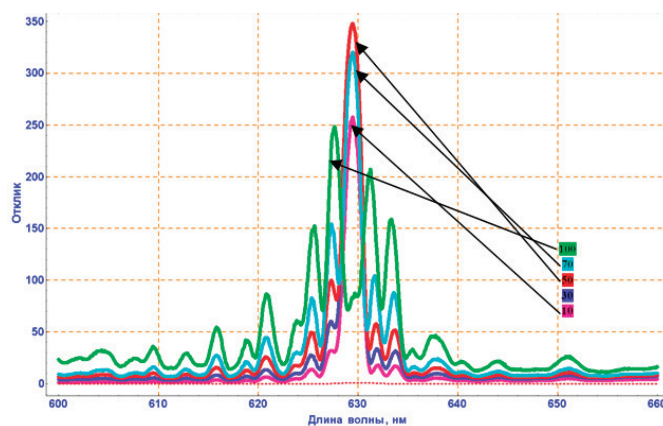


Рис. 5. Функция передачи ЛЧМ АОФ в зависимости от мощности P ультразвука при периоде модуляции $T_{\text{мод}} = 100 \text{ мкс}$ и девиации частоты $df = 10 \text{ кГц}$

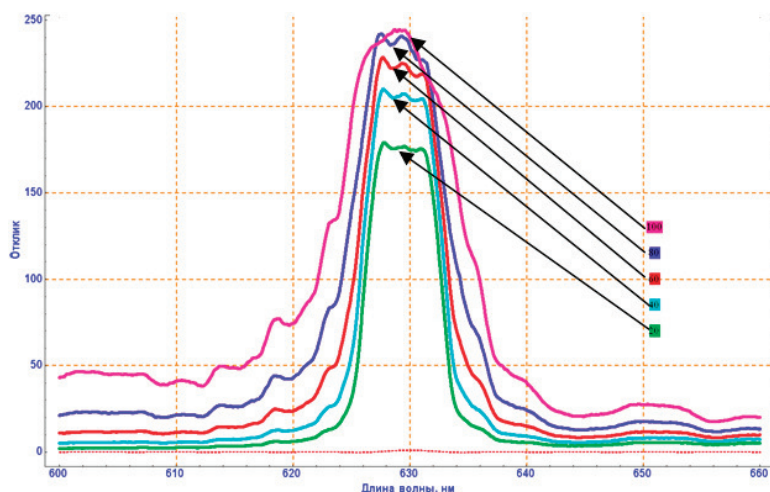


Рис. 6. Функция передачи ЛЧМ АОФ в зависимости от мощности P ультразвука при периоде модуляции $T_{\text{мод}} = 50 \text{ мкс}$ и девиации частоты $df = 1000 \text{ кГц}$

Таким образом, в целом ожидаемый характер зависимости передаточной характеристики ЛЧМ-АОФ от параметров подтвердился, а эксперименты позволили уточнить особенности поведения этой характеристики.

Заключение

В работе была исследована возможность расширять передаточную функцию АО фильтра посредством ЛЧ модуляции ультразвука. Было показано, что в режиме неколлинеарной дифракции в кристалле TeO_2 с усреднением по времени и по сечению пучка ширина окна пропускания растёт с увеличением девиации частоты df . При этом форма меняется существенным образом, принимая форму от трапецеидального окна

(близкого к прямоугольному) до окна с значительно изрезанным профилем. Изрезанность связана с эффектом перемодуляции (см. ниже), но также может объясняться тем, что отдельные дифрагированные спектральные компоненты складываются в разных фазах, создавая «интерференционную» картину в пределах окна пропускания.

Было также показано, что в выбранных условиях регистрации, а именно с усреднением по времени, другой фактор, период модуляции не оказывает существенного влияния на форму передаточной функции.

Что касается зависимости от мощности ультразвука, проведенное исследование показало качественное соответствие модели дифракции. В частности, с ростом мощности имеет место рост коэффициента дифракции, наблюдался и эффект снижения коэффициента дифракции в основном максимуме при одновременном росте величины боковых максимумов, обусловленный подачей избыточной (свыше оптимальной) мощности ультразвука (эффект «перемодуляции»). Однако точные численные зависимости коэффициента дифракции от мощности получить не удалось ввиду отсутствия полноценной калибровки использованного ЛЧМ АО фильтра, что проявлялось в том, что мощность, возбуждаемая в АО ячейке нелинейным образом зависела от мощности, подаваемой на пьезопреобразователь, а последняя нелинейным (и неравномерным) образом зависела от управляющего цифрового кода Р.

С ростом мощности наблюдался также и эффект перенасыщения, когда величина основного максимума достигала предела и далее не возрастала. Для получения ответа на вопрос можно ли достичь эффекта дифракции близкой к 100% в режиме ЛЧМ необходимо провести дополнительные исследования, обеспечив воспроизводимое управление мощностью ультразвука в широких пределах, для чего требуется доработка ВЧ генератора ЛЧМ АО фильтра.

Таким образом, данное исследование экспериментально подтвердило возможность расширения полосы пропускания (до 10 раз) с увеличением интегрального коэффициента передачи неколлинеарного ЛЧМ АО фильтра. (Аналогичные результаты для коллинеарных АОФ в режиме ЛЧМ были получены ранее теоретически [7,8].) Несмотря на осцилляции передаточная функция нигде не достигает «нуля» и даже не опускается ниже 35%, так что АОФ с такой характеристикой может использоваться в светосильных спектрометрах в случае регистрации относительно гладких (по сравнению с полосой пропускания АОФ) спектров. Это означает, что неколлинеарный АО фильтр такого типа может обеспечить управление светосилой спектральных устройств на его основе.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Кадры» П-721 и гранта РФФИ - проект N 11-02-12157_офи-м-2011.

Список литературы

1. Магдич Л.Н. Аппаратная функция акустооптического фильтра при перестройке частоты // Оптика и спектроскопия, 1980. - т.49. - вып.2. - с. 387-390.
2. Магдич Л.Н. Аппаратная функция акустооптического фильтра с неколлинеарным взаимодействием/ Л.Н. Магдич, В.Я. Молчанов, И.П. Понамарев // Оптика и спектроскопия, 1984.- т.56.- вып. 4.- с.736-739.
3. Пожар В.Э. Исследование коллинеарной дифракции света на модулированных акустических волнах в кристаллах: дис. канд. физ.-мат. наук.- Менделеево: ВНИИФТРИ, 1986.
4. Палавандишвили Л.С. Коллинеарный акустооптический фильтр с линейной модуляцией частоты ультразвука/Л.С. Палавандишвили, В.Э. Пожар, В.И. Пустовойт, В.Н. Шорин //Тезисы доклада на XIII Всесоюзной конференции по акустоэлектронике и квантовой акустике.-Черновцы.-1986.-часть 1.-с. 229-230.
5. Пожар В.Э. Акустооптический дисперсионный элемент для сжатия ультракоротких импульсов света/ В.Э. Пожар, В.И. Пустовойт// Тезисы доклада на XIII Всесоюзной конференции по акустоэлектронике и квантовой акустике. – Черновцы. – 1986. - часть 1. - с. 227-228.
6. Пустовойт В.И., Управление характеристиками коллинеарного акустооптического фильтра путем модуляции ультразвука/ В.И. Пустовойт, В.Э. Пожар // Радиотехника и электроника. – 1998. - т.43. - в.1. - с.121-127.
7. Пустовойт В.И. Об эффективности коллинеарной дифракции на линейно частотно-модулированной акустической волне/В.И. Пустовойт, К.И. Табачкова, В.Э. Пожар//Вестник МГТУ. - серия «Приборостроение».-спец. вып.«Современные проблемы оплотехники»: 2011. - с.228-234.
8. В.И. Пустовойт О коллинеарной дифракции света на линейно частотно-модулированной ультразвуковой волне / В.И. Пустовойт, К.И. Табачкова, В.Э. Пожар //Всерос. Конференция по фотонике и информационной оптике: труды. – М.: Изд-во НИЯУ МИФИ, 2011.- С.60-61.