

число коммутируемых устройств, но и расширить возможности таких систем.

В заключение отметим, что в области вычислительной техники оптоэлектронные системы будут конкурировать в основном с кремниевыми и арсенид-галлиевыми интегральными схемами; перспективность применения оптических устройств будет обоснована лишь при значительно лучших их характеристиках. Однако даже если оптическое устройство позволит осуществить цифровую обработку сигналов гораздо производительнее других устройств, оно не найдет применения в вычислительной технике, пока не будет реализовано в виде встроенного функционального элемента цифровой системы. Поэтому рассмотренные способы и схемы создания устройств на основе интегральной и волоконной оптики весьма перспективны для повышения надежности, производительности и расширения функциональных возможностей вычислительных систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Твердохлеб П. Е. Организация системы для многоканальной параллельной обработки массивов данных // Автометрия.—1981.—№ 1.
2. Вербовецкий А. А., Зимоглядова Е. А. Принципы построения многоканальных ассоциативных оптических корреляторов для вычислительных систем // Автометрия.—1989.—№ 5.
3. Вербовецкий А. А., Зимоглядова Е. А. Схемотехнические вопросы построения многоканальных ассоциативных оптических корреляторов для вычислительных систем // Автометрия.—1990.—№ 5.
4. А. с. 1417037 СССР. Оптический ассоциативный коррелятор для запоминающего устройства /А. А. Вербовецкий.—Заявл. 08.01.87; Оpubл. 15.08.88, Бюл. № 30.
5. ТИИЭР: Малый тематический выпуск: Интегральная оптика и интегральная оптоэлектроника.—1987.—75, № 11.

*Поступила в редакцию 3 сентября 1990 г.*

УДК 534.213

А. А. Аполонский, С. Д. Щebetов

*(Новосибирск)*

### ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТООПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ НА СТОЯЧЕЙ ВОЛНЕ

Представлен материал по исследованию широкоапертурных акустооптических модуляторов на стоячей волне. Такие устройства находят широкое применение в качестве синхронизаторов мод лазера. Исследованы частотные характеристики таких модуляторов: акустооптические (области эффективной дифракции, дифракционные ширины резонансов) и электрические (зависимости модуля импеданса и фазы, электрические ширины резонансов). Экспериментально показано, что, помимо области фундаментальной частоты пьезопреобразователя и областей ее гармоник, существует значительная частотная область эффективной дифракции ниже фундаментальной частоты. Отдельные частотные области эффективной дифракции не соответствуют четным или нечетным гармоникам.

**Введение.** Акустооптический модулятор на стоячей волне широко используется в качестве синхронизатора мод лазера. Помещенное в резонатор лазера такое устройство дважды за период синусоидального управляющего сигнала выключает потери для проходящего света. Таким образом, при согласовании периодов обхода светом резонатора и функции, модулирующей потери, излучение лазера представляет собой последовательность коротких световых импульсов; этот режим назван синхронизацией мод.

В ряде работ (например, [1—3]) исследуются синхронизаторы, работающие, помимо фундаментальной частоты, на ее гармониках. Интерес к таким устройствам связан с возможностью увеличивать частоту следования световых импульсов в лазере с синхронизацией мод с помощью одного синхронизатора. В газовых лазерах работа на гармониках приводит к ряду важных улучшений: увеличению средней мощности излучения и уменьшению длительности световых импульсов [1]. В [2] описана работа синхронизатора на низших нечетных гармониках фундаментальной частоты  $f = \nu/\Lambda/2$ . В [3] впервые сообщено о работе на четной (второй) гармонике при высокой эффективности дифракции. Помимо увеличения частоты следования импульсов света в лазерах с синхронизованными модами, представляет интерес и ее уменьшение с одним универсальным синхронизатором, например, в мощных и потому длинных лазерных системах либо в лазерах, где эта частота синхронизована с внешним периодическим сигналом 1—50 МГц.

В настоящей работе представлен экспериментальный материал по исследованию области управляющих частот, где дифракция эффективна, для ряда синхронизаторов, выполненных на основе кварцевых светозвукопроводов и преобразователей из  $\text{LiNbO}_3$  и соединенных между собой холодной ультразвуковой и термокомпрессионной сварками. Следует заметить, что до сих пор нет расчета частотных характеристик реального модулятора на стоячей волне.

Кроме использования таких модуляторов в качестве синхронизатора мод, известно их применение в методе временной флуориметрии и фосфориметрии. Метод позволяет анализировать кинетику высвечивания флюоресценции [4]. Такие внрезонаторные схемы, безусловно, расширяют область применения подобных модуляторов.

Синхронизаторы и исследуемые характеристики. Мы исследовали по два синхронизатора, сделанных из плавленного и кристаллического кварца. Синхронизаторы 1 из плавленного кварца КВ имели следующие размеры светозвукопровода, выполненного в виде параллелепипеда:  $5 \times 3 \times 2$  см, последний размер определял длину акустического резонатора. Его пьезопреобразователь из  $\text{LiNbO}_3$  (срез  $36^\circ Y$ ) в виде эллипсоида с размерами по осям  $3 \times 1,5$  см был рассчитан на фундаментальную частоту 60 МГц. Синхронизатор из кристаллического кварца 2 имел размеры  $3 \times 1,5 \times 1$  см. Преобразователь также был выполнен в форме эллипсоида размерами  $1,5 \times 1$  см, последний размер — вдоль луча. Его фундаментальная частота равнялась  $f_0 = 50$  МГц. Исследовался и низкочастотный синхронизатор 3 из плавленного кварца (фундаментальная частота 7 МГц) КВ с размерами светозвукопровода  $5 \times 3 \times 2$  см и прямоугольным преобразователем  $3 \times 0,5$  см. Параллельность граней исследуемых акустических резонаторов не хуже  $10''$ .

В работе исследовались как оптические свойства синхронизаторов: эффективность дифракции и ее тип, ширины дифракционных резонансов, так и электрические свойства: модуль импеданса  $|Z|$  и фаза  $\Phi$  (измеритель импеданса и передачи ВМ 538 "Tesla") в диапазоне управляющих частот  $0 \div 110$  МГц. Использовался кабель длиной 10 см. Оптические характеристики измерялись при прохождении луча He — Ne-лазера через модулятор, помещенный в юстируемый по углу держатель. Температура модулятора могла изменяться до  $100^\circ\text{C}$ . Частота управляющего сигнала контролировалась частотомером ЧЗ-54. Использовались ВЧ-генераторы: Г4-118, Г4-119А и Г4-143.

Частотные характеристики. На рис. 1, 2, *a* изображены частотные зависимости  $|Z|$  и  $\Phi$  для двух синхронизаторов при комнатной температуре. Зависимости  $\text{Re}Z$  и  $\text{Im}Z$  ведут себя аналогично. Заштрихованные области содержат тонкую структуру, изображенную на рис. 1, *b* и 2, *b*. Сопоставление электрических и оптических (см. рис. 1, 2, *c*) характеристик свидетельствует, что в области эффективной дифракции синхронизатора на масштабе 500 кГц  $|Z|$  и  $\Phi$  меняются резко (см.

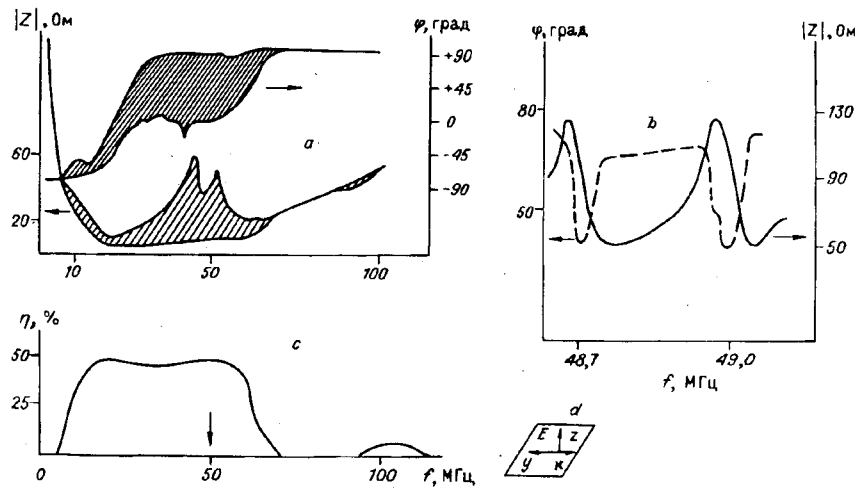


Рис. 1. Электрические (а и б) и акустооптические (с и д) характеристики синхронизатора 2 в зависимости от частоты. Фундаментальная частота преобразователя  $f_0 = 50$  МГц;  $k$  — волновой вектор света;  $E$  — вектор поляризации света;  $y$  и  $z$  — оси кристалла

рис. 1, 2, б), образуя резонансную структуру. Центры частотных зависимостей  $|Z|$  и  $\Phi$  приходятся на максимумы дифракции.

Период резонансных структур (мод), которыми «изрезаны» частотные зависимости, есть период акустического резонатора  $V/2D$  (где  $D$  — длина звукопровода,  $V$  — скорость звука в кварце) и составляет от 90 до 300 кГц для различных устройств. Величина  $|Z|$  в районе резонансов (где эффективность дифракции  $\eta$  имеет максимумы) меняется в 2—5 раз от единиц до  $10^3$  Ом для разных синхронизаторов. На некоторых частотах и при некоторых температурах наблюдаются моды, разделенные меньшим расстоянием, чем  $V_1/2D$ , где  $V_1$  — скорость продольной волны (например, 90 кГц вместо 140 кГц для синхронизатора 1). Как правило, все они имеют различные ширины. Помимо того, что синхронизаторы даже из идентичных заготовок отличаются друг от друга по частотным характеристикам, ширины резонансов для одного синхронизатора различны в области его рабочих частот и составляют 2—60 кГц. Моды с интервалом менее  $V_1/2D$  иногда проявляются лишь при значительных уровнях управляющего сигнала. При частотах ниже фундаментальной частоты пьезопреобразователя в измерении  $|Z|$  и  $\Phi$ , кроме мод с расстоянием  $V_1/2D$ , проявляются моды с интервалом  $f < V_1/2D$ , а при других частотах — преимущественно моды с расстоянием  $V_1/2D$ . Они регистрируются как по периоду повторяющихся дифракционных структур, так и (но не всегда) по периоду электрических структур.

Несмотря на то что синхронизатор, характеристики которого представлены на рис. 1, имеет фундаментальную частоту  $f_0 = 50$  МГц, видно, что он эффективно работает вплоть до частот  $0,1f_0$  в области «субгармоник». Тонкая частотная структура  $|Z|$  и  $\Phi$  также указывают на эту возможность. Подчеркнем еще раз, что в частотных областях, где дифракция отсутствует, импеданс и фаза резко не изменяются.

Для всех исследованных синхронизаторов существует дифракция на нечетных гармониках: до третьей — для 1, пятой — для 2 и 25-й — для синхронизатора 3.

Наблюдаемая дифракция на всех частотах была близка режиму Рамана — Ната. При уровне управляющей мощности 1,5 Вт количество симметричных максимумов дифракции (относительно нулевого) достига-

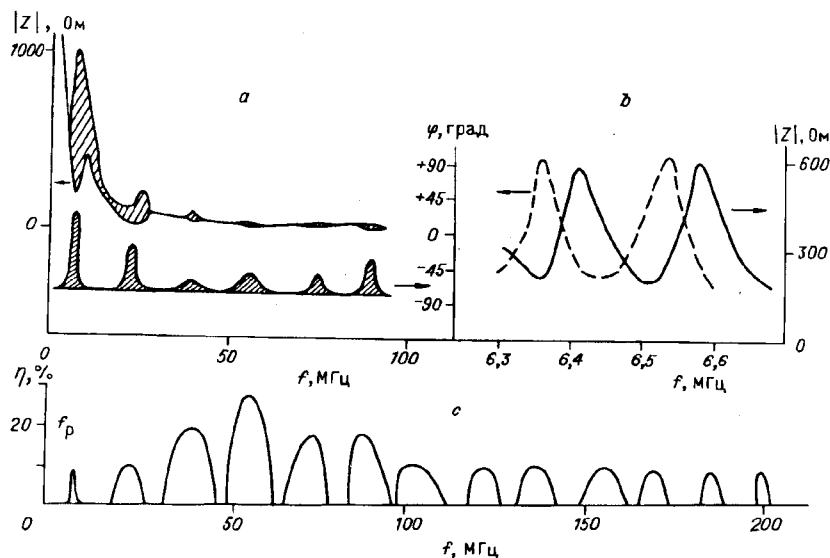


Рис. 2. Электрические (а и б) и акустооптические (с) характеристики синхронизатора 3 в зависимости от частоты.  
 Фундаментальная частота преобразователя  $f_0 = 7$  МГц

ло б. На каждой частоте производилась угловая юстировка синхронизатора для достижения максимума интенсивности дифрагированного света. Оказалось, что с точностью 20 % переюстировка (при оптимальной юстировке) в диапазоне частот  $10 \div 160$  МГц не требовалась.

Температурная зависимость эффективности дифракции при фиксированной управляющей частоте в диапазоне до  $100^\circ\text{C}$  имеет один хорошо определенный максимум. Так, для синхронизатора 1 температурная ширина максимума составила на полувысоте  $1,2^\circ$ , а для синхронизатора —  $2\text{--}6^\circ$ . Температурные и частотные ширины резонансов хорошо согласуются между собой исходя из коэффициентов  $\alpha_\nu = f^{-1} \partial f / \partial T$ , экспериментально полученных путем измерения температурной скорости перестройки резонансной структуры. Для синхронизаторов из плавленного кварца коэффициент  $\alpha_\nu$  равен  $(1 \pm 0,08)10^{-4}$  град $^{-1}$ , для синхронизатора из кристаллического —  $5,5 \cdot 10^{-5}$  град $^{-1}$ . Заметим, что равную ширину имеют зависимости эффективности дифракции от частоты и температуры (с соответствующим пересчетом),  $|Z(T)|$  и  $\Phi(f)$ .

**Обсуждение.** При малых частотах ( $f < 5$  МГц) наблюдается емкостный характер зависимости  $|Z|(f)$ . Частота  $f \sim 5$  МГц может интерпретироваться как частота среза фильтра низких частот, что является хорошей моделью синхронизатора в этом диапазоне. Область минимальных значений  $|Z|$  соответствует резонансу синхронизатора. Как показано экспериментально, в области частот, где синхронизатор осуществляет эффективную дифракцию, присутствует тонкая структура  $|Z|$  и  $\Phi$  (см. рис. 1, б и рис. 2, б). Видимо, в иных случаях звуковая волна не возбуждается. Причин для этого может быть несколько. Во-первых, в данной области частот может не возбуждаться пьезопреобразователь либо из-за симметрии типа колебаний, либо из-за технологии и качества крепления пьезопреобразователя к светозвукопроводу, во-вторых, в области низких частот — из-за частотной характеристики фильтра низких частот (определяемой статической емкостью пластины пьезопреобразователя), каковым можно представить синхронизатор на частотах менее 10 МГц.

Из эксперимента следует, что, помимо работы на нечетных гармониках фундаментальной частоты, все модуляторы эффективно работают на «субгармониках» (а точнее, в нерезонансном режиме пьезопреобразо-

вателя) вплоть до частоты 5 МГц, т. е.  $0,1f_0$  (см. рис. 1). Существование этой области не может быть связано с величиной фундаментальной частоты, а обусловлено только наличием акустического резонатора. Наличие тонкой структуры  $|Z|$  и  $\Phi$  связано как с пьезопреобразователем, так и с акустическим резонатором. области дифракции на данной частоте) не связаны с четностью гармоники фундаментальной частоты преобразователя.

Если считать, что резонансы модулятора 1 с интервалом 90 кГц связаны со сдвиговой (поперечной) волной, имеющей меньшую скорость распространения, различие полученного значения скорости звука  $V$  и известного для кварца составляет 10 %. Насколько известно авторам, одновременное существование эффективной дифракции на сдвиговых и продольных колебаниях в синхронизаторах мод ранее не отмечалось.

#### В Ы В О Д Ы

Традиционная модель модулятора на стоячей волне с полуволновым или четвертьволновым [5] пьезопреобразователем, эффективно работающего в окрестности фундаментальной частоты, является недостаточной для сравнения с экспериментом.

В исследованных модуляторах, помимо области нечетных гармоник фундаментальной частоты пьезопреобразователя, имеет место значительная область эффективной дифракции ниже фундаментальной частоты. Существование этой области возможно при высококачественном (с наименьшими потерями для звука) креплении преобразователя к кварцевому светозвукопроводу и наличии высокочастотного акустического резонатора. Отдельные частотные области эффективной дифракции связаны с возбуждением поперечной акустической волны и ее гармоник.

Предложен простой и удобный метод определения областей дифракции модулятора на стоячей волне с помощью электрических характеристик.

Авторы благодарят И. А. Сидорову, Е. Н. Смирнова, П. М. Шипова, В. И. Секерина за помощь в изготовлении модуляторов, Д. В. Шелопута и П. Н. Шницера за полезное обсуждение рассмотренных в работе вопросов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аполонский А. А., Донин В. И., Тимофеев Т. Т. Мощный ионный лазер с расширенными функциональными возможностями // Квантовая электроника.—1986.—13.—С. 1004.
2. Albrecht G. F., Lund L., Smith D. Building a simple low-cost modelocked system // Appl. Opt.—1983.—22.—P. 1276.
3. Bao X. A standing wave acoustooptical mode locker working on the second harmonic // IEEE J. Quantum Electron.—1989.—QE-25.—P. 1691.
4. Piston D. W., Marriott G., Radivoyevich T. et al. Wide-band acoustooptic light modulator for frequency domain fluorometry and phosphorimetry // Rev. Sci. Instrum.—1989.—60.—P. 2596.
5. Kino G. S. Acoustic Waves: Devices, Imaging, and Analog Signal Processing.— N. J.: Prentice-Hall, Englewood Cliffs., 1987.

Поступила в редакцию 10 октября 1990 г.