

53  
A-17



ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

В. А. ДИАНОВА

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
СВЧ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель кандидат физико-математических наук  
доцент Е. Р. МУСТЕЛЬ

53  
A 17

Работа выполнена на кафедре физики колебаний физического факультета МГУ.

Защита диссертации состоится на заседании Ученого совета отделения радиофизики физического факультета МГУ.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого совета или прислать свои отзывы. О дне и часе защиты будет сообщено за 10 дней в газете «Вечерняя Москва».

Ориентировочная дата защиты . . . . . 1967 г.

Ученый секретарь Совета  
кандидат физико-математических наук  
доцент И. И. Минакова

Появление принципиально новых источников когерентных монохроматических электромагнитных колебаний ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов воли открывает широкие возможности в развитии средств связи в оптическом диапазоне. Использование световой несущей позволяет получить чрезвычайно широкий частотный канал для передачи информации. Для целей широкополосной оптической связи, для измерения расстояний с высокой точностью, для создания светодетекторов требуются модуляторы света, работающие на частотах порядка 100 мгц - 10000 мгц. Такие модуляторы могут быть созданы на основе ряда физических явлений в жидкостях и в кристаллах, связанных или с изменением реактивных параметров среды (показателя преломления  $n$ ) или с изменением поглощения. Наиболее перспективные методы модуляции основаны на использовании линейного электрооптического эффекта. Широкое применение линейного электрооптического эффекта для целей модуляции связано, прежде всего, с наличием целого ряда кристаллов, обладающих значительным электрооптическим эффектом и прозрачных в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях. Малая инерционность электрооптического эффекта позволяет осуществлять модуляцию до частот порядка сотен Гц.

Темой данной работы является экспериментальное изучение модуляторов света, работающих в диапазоне сверхвысоких частот на основе линейного электрооптического эффекта в кристаллах  $ADP$  и  $KDP$ . Такие модуляторы могут

296231

Центральная научная  
БИБЛИОТЕКА  
Академии наук Киргизской ССР

быть применены для создания многоканальных систем связи, быстродействующих затворов, для исследования инерционности фотоприемников, для создания дальномеров и светолокаторов с высокой разрешающей способностью и т.д.

## II

В первой главе диссертации рассмотрен линейный электрооптический эффект в оптически анизотропных кристаллах классов  $D_{2d}$ ,  $C_{6v}$ ,  $D_3$  и оптически изотропных кристаллах симметрии  $T_d$  и  $T$ . Указанные кристаллы обладают достаточно высокими электрооптическими константами и находят широкое применение для целей модуляции света.

Дана сравнительная оценка различных типов модуляторов, созданных на основе линейного электрооптического эффекта.

## III

Вторая глава диссертации содержит результаты экспериментального исследования линейного электрооптического эффекта в кристаллах  $ADP$ ,  $KDP$  в статическом режиме.

При изучении продольного электрооптического эффекта изучено влияние формы электродов на величину действующего поля.

Исследован поперечный электрооптический эффект в кристаллах  $ADP$ , вырезанных под углом  $45^\circ$  к осям  $x$  и  $y$ . В эксперименте были использованы кристаллические стержни, имеющие длину порядка  $l \approx 100$  см и толщину  $a \sim 4-6$  мм. Получен выигрыш в полуволновом напряжении равный  $\frac{l}{2a} \approx 11$  по сравнению с продольным эффектом. Дополнительный выигрыш в два раза получен при использовании двух последовательно стоящих кристаллов  $ADP$ ,

каждый из которых имел длину 94 мм.

Проведенные исследования показали, что на основе поперечного электрооптического эффекта могут быть созданы оптические модуляторы, работающие на сравнительно низких напряжениях. Однако, при амплитудной модуляции света с помощью поперечного электрооптического эффекта на  $ADP$  интенсивность света на выходе системы меняется с течением времени из-за изменения показателя преломления кристалла вследствие температурных уходов. Поэтому при работе с такими модуляторами необходимо термостатирование кристаллов или использование систем температурной компенсации. Дополнительные трудности при использовании поперечного эффекта создают требования высокой монохроматичности источника света, к качеству юстировки и обработки кристаллов.

## IV

Третья глава диссертации посвящена экспериментальному изучению модуляторов света резонаторного типа. Основной составной частью исследуемого модулятора является тороидальный резонатор, емкостной зазор которого заполнен электрооптической средой.

Дана оценка эффективности оптического модулятора с использованием тороидального резонатора. Исследован модулятор света на кристалле  $ADP$  на частоте  $f_m = 204$  мГц. Для уменьшения эффекта нагрева модуляция света осуществлялась в импульсном режиме с большой скважностью (длительность импульсов  $3 \mu$ сек, частота повторения импульсов 800 гц).

Осуществлено двукратное прохождение света через

кристалл. С этой целью за исследуемым резонатором помещалось подвижное зеркало. При двукратном прохождении света получено значение фазового набегга  $\Gamma \approx 84^\circ$  при модулирующей мощности 400 вт в импульсе.

Большие значения мощности, необходимые для модуляции света, обусловлены большой емкостью зазора ( $C \approx 13$  пкф)

С целью увеличения эффективности системы был создан модулятор на частоте  $f_M \sim 700$  мгц с емкостью зазора  $C \approx 0,2$  пкф.

В импульсном режиме с большой скважностью ( $q=80$ ) при уровне модулирующего сигнала  $P_M = 10,5$  вт глубина модуляции составляла 46%, при мощности 27 вт  $m \approx 67\%$ , что соответствует качеству системы  $\eta = \frac{\Gamma^2}{P_M} = 4 \cdot 10^{-2} \frac{\text{рад}^2}{\text{вт}}$

Уменьшение емкости зазора позволило осуществить модуляцию со скважностью, равной двум, при модулирующей мощности 100 мвт.

Полоса такой системы соответственно нагруженной добротности 500 примерно равна 1,4 мгц. Полученные результаты значительно лучше данных, приведенных в зарубежной литературе для модуляторов аналогичного типа.

Исследована зависимость глубины модуляции от величины модулирующей мощности.

Проведенные исследования показали, что оптические модуляторы с тороидальными резонаторами достаточно эффективны в диапазоне от 200 мгц до тех частот, на которых целесообразно применение тороидальных резонаторов ( $\sim 2000$  мгц). Достоинство таких модуляторов состоит в том, что они могут работать с немонахроматическими источниками света, расчет таких модуляторов прост и достаточно хорошо подтверждается экспериментом.

В четвертой главе диссертации изложены результаты экспериментального исследования модуляторов света с асинхронным взаимодействием волны света с модулирующей волной. При создании оптических модуляторов на длину кристалла при невыполнении условий синхронизма накладывалось ограничение, обусловленное тем, что время прохождения света через электрооптическую среду становится сравнимым с периодом модулирующего колебания. Так, для модуляции света трехсантиметровым сигналом при использовании однородного поля оптимальная длина не превышает 1 см.

Для уменьшения потерь на СВЧ и увеличения эффективности модулятора использовалось частичное заполнение резонатора электрооптической средой.

В проводимом эксперименте в качестве источника СВЧ сигнала использовалась радиолокационная станция, работающая на фиксированной длине волны. Поэтому для модуляции света был применен прямоугольный резонатор (тип волны  $E_{110}$ ) с одной подвижной стенкой, позволяющей осуществлять настройку резонатора на частоту модуляции.

Получено дисперсионное уравнение для прямоугольного резонатора, с колебаниями типа  $E_{110}$  частично заполненного диэлектриком.

Осуществлена амплитудная модуляция света трехсантиметровым сигналом при использовании прямоугольного резонатора с кристаллом  $ADP$ . При уровне модулирующего сигнала  $P_M = 9$  вт глубина модуляции равна 13%, что соответствует качеству системы  $\eta \approx 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ рад}^2/\text{вт}$ .

Полоса такой системы равна 46 мГц соответственно нагруженной добротности резонатора  $Q = 200$ .

Исследован аналогичный модулятор света на длине волны 3,2 см с использованием образцов из *KDP*. При величине модулирующей мощности  $P_m = 5$  вт получена глубина модуляции  $m = 20\%$ , при  $P_m = 100$  вт,  $m = 76\%$ . Качество такой системы равно  $\eta \approx 7,25 \cdot 10^{-3} \text{ рад}^2/\text{вт}$  ( $Q = 250$ ).

Изучено двукратное прохождение света через кристалл. Качество системы с двукратным прохождением света в 3,75 раза больше по сравнению с однократным прохождением.

Исследованы оптические модуляторы с накапливающимся взаимодействием оптической и модулирующей волн. В одном из типов таких модуляторов увеличение эффективности системы было получено при прохождении света через последовательность двух резонаторов, возбуждаемых полем СВЧ соответствующей фазы. Длина каждого кристалла составляла  $\lambda_{\text{опт}}$ . При коррекции фазы модулирующего сигнала в указанной системе получен выигрыш в фазовой задержке, равный 1,75 по сравнению с модулятором с одним резонатором. В другом случае накапливающееся взаимодействие осуществлено в модуляторе при использовании в резонаторе двух кристаллов *KDP*, каждый длиной  $\lambda_{\text{опт}}$  и ориентированных соответствующим образом друг относительно друга. Эффективность такого модулятора в 1,8 раза выше по сравнению с системой с одним кристаллом ( $\eta = 13 \cdot 10^{-3} \text{ рад}^2/\text{вт}$ ).

## VI

Преобразование частоты при использовании двойной модуляции света посвящена V глава диссертации. В работе

показано, что если световой поток дважды промодулирован на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , то на выходе такой системы интенсивность света будет промодулирована комбинационными частотами вида  $(m\omega_1 \pm n\omega_2)$ , где  $m, n = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Практический интерес представляет наименьшая разностная частота  $(\omega_1 - \omega_2)$ . Этот принцип преобразования частоты может быть использован для создания приемного устройства оптического диапазона. В этом случае система, осуществляющая прием модулированного света, должна состоять из электрооптического кристалла, который играет роль преобразователя частоты, анализатора и фотодетектора. Достоинством такого приемного устройства является то, что оно позволяет производить усиление принимаемого сигнала на промежуточной частоте  $\omega_{\text{пр}} = \omega_1 - \omega_2$ . Кроме того, для приема света, модулированного СВЧ сигналом, могут быть использованы фотодетекторы с относительно большой постоянной времени. В отличие от супергетеродина приема указанная система не требует применения местного источника. В связи с этим отпадают трудности, связанные с ограничением на временную и пространственную когерентность и на параллельность сигнального луча и луча гетеродина. Система с двойной модуляцией света может быть использована как для приема света, модулированного по интенсивности, так и для приема света, модулированного по поляризации.

В работе проведено теоретическое и экспериментальное изучение системы, осуществляющей прием света, модулированного по поляризации. Получено выражение для средней интенсивности света на выходе системы, содержащее члены с разностными комбинационными частотами, представляющими

практический интерес. Определены условия для оптимального выделения наименьшей разностной частоты. Эффективность преобразования в такой системе в два раза выше по сравнению с системой, осуществляющей прием света, модулированного по интенсивности.

В проводимом эксперименте в качестве преобразователя использовался электрооптический кристалл *KDP*, помещенный в емкостный зазор торондального резонатора. Резонатор с кристаллом возбуждался на частоте 691 мгц. Модуляция светового луча по поляризации осуществлялась на кристалле *KDP* на частоте 700 мгц. В исследуемой системе выделен сигнал разностной частоты  $(f_1 - f_2) = 9$  мгц. По величине полезного сигнала были определены фазовые задержки, создаваемые в модуляторе и преобразователе. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с теоретическими оценками.

В лабораторных условиях один и тот же кристалл может быть одновременно использован для целей модуляции и преобразования частоты. Такой модулятор, находящийся под воздействием двух сигналов с близкими частотами, был исследован экспериментально. Модуляция света осуществлялась на частотах  $\sim 700$  мгц, лежащих в <sup>резонансной</sup> полосе. Выделен полезный сигнал разностной частоты. Таким образом, исследуемая система с двойной модуляцией позволяет использовать для приема света, модулированного СВЧ сигналом, фотодетекторы с относительно большой постоянной времени, например ФЭУ-35, ФЭУ-31, ФЭУ-22 и т.д.

В диссертации 142 стр. Библиография содержит 154 названия.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. В. А. Дианова, Е. Р. Мустель, В. Н. Паргян.  
Радиотехника и электроника, 1965 г., т. X № 4, стр. 770
2. В. А. Дианова, Е. Р. Мустель, В. Н. Паргян.  
Радиотехника и электроника, 1966 г., т. XI, № 5, стр. 947.
3. В. А. Дианова, Е. Р. Мустель, А. П. Фишук,  
Радиотехника и электроника, 1966 г., т. XI, № II,  
стр. 1292.

24