

В Е Д Е Н И Е

Одной из наиболее важных тенденций в развитии систем обработки информации является непрерывное увеличение объема и скорости обработки данных. Современная электроника на базе интегральных микросхем достигла в этом отношении значительных успехов. Дальнейшее радикальное улучшение основных показателей информационных систем связывается с привлечением оптических методов обработки информации.

Оптическая обработка информации предполагает использование ряда принципиально новых элементов и средств. К их числу прежде всего относятся быстродействующие модуляторы света, с помощью которых осуществляется введение информации в световую волну. Как и в радиотехнике, введение информации заключается в изменении (модуляции) одной или нескольких характеристик электромагнитной волны под воздействием информационного сигнала. Изменяться могут амплитуда, фаза, частота, направление распространения волны, ее поляризация. Поскольку используемые в оптоэлектронике фотоприемники обычно реагируют только на интенсивность света, модуляцию частоты, фазы и поляризации, как правило, преобразуют в амплитудную.

Наиболее удобно и просто модуляция интенсивности осуществляется в случае светоизлучающих диодов и полупроводниковых лазеров путем изменения величины возбуждающего тока. Такая модуляция, при которой необходимое изменение оптического излучения осуществляется непосредственно в процессе его генерирования в самом источнике, называется **прямой** или **внутренней**. Однако часто, особенно при работе с интенсивными световыми потоками, возникает необходимость производить модуляцию уже вышедшего из источника излучения, т.е.

внешнюю модуляцию

. В этом случае также обеспечиваются более высокие частоты по сравнению с частотами, достигаемыми при внутренней модуляции.

Модуляторы оптического излучения, используемые в системах обработки и передачи информации, работают на основе различных физических явлений, таких как

электрооптический и акустооптический эффекты, магнитооптический эффект и другие. Наиболее быстродействующими и перспективными считаются электрооптические модуляторы.

Целью данной лабораторной работы является ознакомление с устройством и принципом работы электрооптического модулятора и принципом построения оптической линии связи.

Основные теоретические сведения

Прежде чем приступить к рассмотрению принципа работы амплитудного электрооптического модулятора, следует вспомнить и уяснить ряд положений, касающихся таких понятий и явлений, как поляризация, двойное лучепреломление и электрооптический эффект.

Поляризация электромагнитной волны определяется характером изменения во времени пространственной ориентации векторов напряженности электрического и магнитного полей. Поскольку эти векторы взаимно перпендикулярны (и перпендикулярны к направлению распространения волны), то, говоря о различных видах поляризации, обычно оперируют только вектором напряженности электрического поля E .

Если положение плоскости, в которой лежат вектор E и направление распространения волны, не изменяется во времени, волна называется **линейно** или **плоско поляризованной**.

Эллиптически поляризованной является волна, у которой в каждой точке пространства вектор E вращается в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны, одновременно изменяясь периодически по модулю так, что его конец описывает эллипс.

Частным случаем эллиптической поляризации является **круговая** поляризация, когда величина вектора E при вращении не изменяется и его конец описывает окружность.

Эллиптически поляризованную волну можно разложить на сумму двух линейно поляризованных волн с ортогональными направлениями поляризации. На рис.1 в качестве примера, иллюстрирующего это положение, изображен результат сложения двух взаимно перпендикулярных векторов E_1 и E_2 , изменяющихся во времени по синусоидальному закону с одинаковыми амплитудами и некоторым фазовым сдвигом $\Delta\varphi$.

Изменение характера поляризации электромагнитной волны в зависимости от разности фаз этих колебаний показано на рис.2. При отсутствии фазового сдвига ($\Delta\varphi=0$) волна остается плоско поляризованной. При $\pi/2 >$

$\Delta\varphi$

>0 результирующий вектор описывает эллипс, при

$\Delta\varphi$

$= \pi/2$ – окружность, при $\pi >$

$\Delta\varphi$

$> \pi/2$ – снова эллипс, главная ось которого повернута на 90 градусов. Когда фазовый сдвиг достигает π , эллипс сжимается до главной оси; волна снова становится линейно поляризованной.

Явление двойного \square лучепреломления наблюдается в оптически анизотропных средах, т.е. средах, оптические свойства которых зависят от направления распространения волны и ее поляризации. Оптическая анизотропия кристаллов вытекает соответственно из анизотропии (неодинаковости по различным направлениям) поля сил, связывающих атомы кристаллической решетки. Все кристаллы, кроме кубических, оптически анизотропные.

При падении электромагнитной волны (светового луча) на поверхность анизотропной среды в ней в общем случае будут распространяться две линейно поляризованные компоненты (два луча). Плоскости их поляризации взаимно перпендикулярны. Поскольку реакция атомов анизотропной среды на воздействие электромагнитного поля зависит от его направления, условия прохождения этих лучей через среду будут различными. В общем случае они будут распространяться в разных направлениях с разными скоростями и испытывать разное поглощение. В электрооптических модуляторах используются, естественно, оптически прозрачные среды, поэтому поглощением и тем более его различием для двух волн можно пренебречь. Скорость волны в таких средах $v = c/n$, где c

- скорость света,

n

– показатель преломления, различный для двух лучей.

В любой анизотропной среде имеются одно или два направления, при распространении вдоль которых скорость волны не зависит от ее поляризации, т.е. двойное лучепреломление отсутствует. Эти направления называются **оптическими осями**. По числу таких направлений кристаллы делятся на одноосные и двухосные. В электрооптических модуляторах используются, как правило, одноосные кристаллы.

Применительно к одноосному кристаллу один из распространяющихся в нем лучей принято называть **обыкновенным**, другой - **необыкновенным**. Обыкновенный луч поляризован в направлении, перпендикулярном к плоскости, в которой лежат оптическая ось и направление распространения. Необыкновенный же луч поляризован в этой плоскости. Поведение обыкновенного луча не отличается от поведения луча в изотропной среде. Для него выполняется хорошо известное соотношение:

$$\sin \alpha / \sin \beta = n$$

, где

α

и

β

- углы падения и преломления луча,

n

- показатель преломления изотропной среды или же показатель преломления анизотропной среды для обыкновенного луча. И в том и другом случаях этот показатель не зависит от направления распространения луча. Показатель же преломления для необыкновенного луча зависит от направления и изменяется в пределах между

n_o

и

и некоторым значением

n_e

, которые называются

главными показателями преломления

одноосного кристалла.

Электрооптический эффект заключается в изменении оптических характеристик среды под воздействием внешнего электрического поля. Различают **квадратичный электрооптический эффект (эффект Керра)**

и

линейный электрооптический эффект (эффект Поккельса)

. Первый наблюдается в аморфных, жидких и газообразных средах, в центросимметричных кристаллах, т.е. средах, изотропных в отсутствие электрического поля. Под воздействием поля эти среды становятся анизотропными с оптической осью, ориентированной вдоль направления поля. При этом разность показателей преломления

n

o

и

n

e

изменяется пропорционально квадрату напряженности поля.

Эффект Поккельса имеет место исключительно в нецентросимметричных кристаллах (пьезоэлектриках). Наиболее известными среди них являются кристаллы дигидрофосфата аммония ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), или сокращенно ADP, дигидрофосфата калия (KH_2PO_4), или KDP, хлорида меди (CuCl), ниобата лития (LiNbO_3) и др. Воздействие электрического поля изменяет направления оптических осей анизотропных кристаллов. Значения главных показателей преломления изменяются при этом пропорционально напряженности поля. Благодаря линейному характеру данной зависимости, эффект Поккельса получил наиболее широкое практическое применение и используется почти во всех созданных модуляторах света. Нелинейные искажения в этих модуляторах относительно невелики. Другое важное свойство эффекта Поккельса – его малая инерционность позволяет осуществлять модуляцию света до частот порядка 10^{13}

Гц.

Линейный электрооптический эффект наблюдается как при продольном, так и поперечном (по отношению к световому лучу) направлении вектора напряженности внешнего поля. В соответствии с этим различают продольный и поперечный эффекты Поккельса.

Устройство и принцип работы

амплитудного электрооптического модулятора

Типичная схема амплитудного электрооптического модулятора для случая продольного эффекта Поккельса представлена на рис.3. Он состоит из электрооптического элемента 1 и двух скрещенных поляризаторов 2,3.

Электрооптический элемент вырезан из анизотропного кристалла таким образом, чтобы направление оптической оси в отсутствие внешнего электрического поля совпадало с осью x , а разрешенные направления поляризации двух лучей при возникновении двойного лучепреломления - с осями y и z .

Внешнее электрическое поле в кристалле создается приложением напряжения U к полупрозрачным электродам, нанесенным на торцы элемента. Следует подчеркнуть, что напряженность внешнего поля

E

вн

$$= U/$$

l

в этом случае определяется как величиной

U

, так и протяженностью кристалла l в направлении оси

x

.

Линейный поляризатор 2 на входе модулятора пропускает в направлении x только ту компоненту падающего излучения, плоскость поляризации которой ориентирована по направлению P

1

под углом 45 градусов к осям

z

и

y

. В этом случае амплитуды составляющих напряженности электрического поля

E

z

и

E

y

этой компоненты в кристалле будут одинаковыми. Поляризатор 3 на выходе пропускает составляющую электромагнитной волны, прошедшей через электрооптический элемент, вектор напряженности которой ориентирован в направлении P

2

перпендикулярном к P

1

.

При отсутствии внешнего электрического поля свет, распространяясь вдоль оптической оси кристалла, не испытывает двойного лучепреломления: показатели преломления среды для направлений поляризации z и y равны. Составляющие E_z и E_y распространяются через кристалл с одинаковыми скоростями, поэтому складываются без фазового сдвига, и характер поляризации света, проходящего через кристалл, не изменяется: свет остается плоско поляризованным (рис.2). Поскольку плоскость поляризации перпендикулярна к направлению P

2

, свет через модулятор не проходит.

Воздействие внешнего электрического поля $E_{вн}$ изменяет направление оптической оси. Возникает двойное лучепреломление. Показатели преломления кристалла для лучей

E

z

и

E

y

становятся различными, изменяясь в различных направлениях на величину, пропорциональную

E

$вн$

:

$$n_z = n_0 + kE_{вн}, n_y = n_0 - kE_{вн}. \quad (1)$$

Здесь n_0 – показатель преломления в отсутствие внешнего поля, k - электрооптический коэффициент, зависящий от природы кристалла. При смене полярности прикладываемого напряжения направления изменений

n

z

и

n

y

становятся противоположными.

Лучи распространяются с разными скоростями $v_z = c/n_z$ и $v_y = c/n_y$ и, поскольку частота колебаний в у них

одинакова, имеют различные длины волн:

λ

z

=

v

z
/
v
=
 λ
/
n
z
и
 λ
y
=
v
y
/
v
=
 λ
/
n
y
.

Между колебаниями, как это поясняется на рис.4, появляется фазовый сдвиг

$$\Delta\varphi_x = 2\pi x/\lambda_z - 2\pi x/\lambda_y = 2\pi x(n_z - n_y)/\lambda, (2)$$

нарастающий по мере продвижения волны.

На выходе из кристалла

$$\Delta\varphi_l = 4\pi l kE_{вн} / \lambda = 4\pi kU/\lambda. (3)$$

Выходящий из кристалла свет приобретает эллиптическую поляризацию, появляется составляющая электромагнитной волны, пропускаемая выходным поляризатором.

По мере увеличения напряжения и соответственно сдвига фаз величина этой составляющей растет, интенсивность света на выходе модулятора увеличивается. При величине фазового сдвига $\Delta\varphi = \pi$ выходящий из кристалла свет снова становится плоско поляризованным с плоскостью поляризации, повернутой на 90 градусов относительно положения на входе в кристалл. Интенсивность света достигает максимального значения. Напряжение, обеспечивающее этот фазовый сдвиг, называется

полуволновым

. Его величина

$$U_{\pi} = \lambda / 4k. \quad (4)$$

Следует подчеркнуть, что полуволновое напряжение не зависит от длины электрооптического элемента и может рассматриваться как параметр вещества. При длине волны 0,6 мкм оно составляет, например, 7,5 кВ для KDP и 8,5 кВ для ADP. Необходимость использования столь высоких управляющих напряжений является серьезным недостатком рассматриваемого модулятора, использующего продольный эффект Поккельса.

Существенное снижение управляющего напряжения может быть получено, если в качестве электрооптического элемента использовать стопу из N пластин, подключенных параллельно к источнику напряжения. В этом случае фазовые сдвиги пластин суммируются и полуволновое напряжение стопы оказывается в N раз меньше, чем для одной пластины. Такой прием, однако, не получил широкого применения по причине более сложной технологии изготовления электрооптического элемента и существенного увеличения потерь интенсивности светового потока при его прохождении через множество электродов.

Более широкое применение в связи с этим получил модулятор с поперечным эффектом Поккельса (рис.5). Необходимость использования в этом случае двух элементов поясняется ниже. Оптическая ось кристалла здесь ориентирована вдоль оси z перпендикулярно к направлению света, поэтому в отличие от продольного эффекта уже в отсутствие электрического поля имеет место двойное лучепреломление.

Показатель преломления

n

z
для луча, поляризованного в направлении оптической оси, является главным показателем преломления для необыкновенного луча

n

e
и при изменении электрического поля (поскольку оно параллельно оптической оси) в отличие от

n

x

,
остаётся постоянным.

Разность фаз между компонентами E_z и E_y на выходе элемента

$$\Delta\varphi_l = 2\pi l [n_e - (n_o - kE_{вн})] / \lambda = 2\pi l (n_e - n_o) / \lambda + 2\pi k E_{вн} l / \lambda. \quad (5)$$

Первое слагаемое отражает сдвиг фаз, обусловленный естественной анизотропией кристалла, второе - воздействие приложенного поперечного электрического поля. Напряжение прикладывается к электродам, нанесенным на боковые грани элемента, поэтому напряженность электрического поля $E_{вн} = U/d$ определяется размером кристалла в направлении поля и от длины

 d

l
не зависит. На величину
 π
фазовый сдвиг изменяется при полуволновом напряжении

$$U_{\pi} = \lambda d / 2kl. \quad (6)$$

Из сопоставления этого выражения с (4) видно, что при поперечном эффекте Поккельса по сравнению с продольным полуволновое напряжение снижается в $l/2d$ раз: при реальных размерах элемента (l

l
= 50 ...100 мм,

d
= 3 ...5 мм) - почти на порядок. Важным преимуществом модулятора, использующего поперечный эффект, является также отсутствие электродов на пути светового потока.

Одиночные элементы с поперечным управляющим полем почти не применяются, так как величина фазового сдвига, обусловленного естественным двойным лучепреломлением, сильно зависит от температуры. При указанных выше размерах элемента фазовый сдвиг может изменяться в пределах нескольких радиан при изменении температуры на 1°C .

Температурную нестабильность компенсируют, пропуская луч через два одинаковых элемента, установленные так, что направления их оптических осей взаимно перпендикулярны (рис.5). Действительно, если, например, составляющая E_z в первом элементе, поляризованная в направлении оптической оси, опережает компоненту

E

y

, то во втором элементе её поляризация перпендикулярна к оптической оси и ситуация изменяется на противоположную. В результате фазовые сдвиги, обусловленные естественным двойным лучепреломлением, и соответственно их температурные изменения взаимно компенсируются. Разности же фаз, обусловленные электрическим полем при соответствующем выборе его направлений в элементах, как это отмечено на

рисунке, суммируются. Величина полуволнового напряжения по сравнению с одиночным элементом при этом уменьшается ещё в два раза.

Зависимость интенсивности света I_2 , прошедшего через модулятор, от величины напряжения описывается следующим выражением:

$$I_2 = I_1 \sin^2(\Delta\varphi/2) = I_1 \sin^2(\pi U/2U_\pi), \quad (7)$$

где I_1 - интенсивность света на входе модулятора.

Графическое изображение этой зависимости представлено на рис.6,а. Как видно из рисунка, с помощью модулятора обеспечивается практически 100%–я модуляция светового потока. Это позволяет использовать электрооптический модулятор в качестве быстродействующего оптического затвора: при отсутствии напряжения на кристалле затвор закрыт, при подаче полуволнового напряжения – открывается. Время срабатывания затвора не превышает 10^{-9} с. Затворы такого типа применяются, например, для быстрого включения добротности оптического резонатора с целью получения коротких и гигантских по мощности импульсов лазерного излучения.

В системах оптической связи, где важно обеспечить минимальные искажения при

передаче информации, используется, естественно, только средний участок характеристики электрооптического модулятора, наиболее близкий к линейному. Смещение рабочей точки на середину этого участка обеспечивается либо приложением половины полуволнового на-

пряжения, либо введением дополнительной пластины, вырезанной из кристалла, обладающего естественным двойным лучепреломлением, и обеспечивающей фазовую задержку $\pi / 2$. Такие пластины обычно называются четвертьволновыми. Статическая характеристика модулятора в этом случае имеет вид, показанный на рис.6,б.

писание экспериментальной установки

Структурная схема экспериментальной установки для исследования амплитудного электрооптического модулятора представлена на рис.7. Она содержит источник излучения 1, исследуемый модулятор 2 и фотоприемное устройство 3.

В качестве источника излучения используется гелий-неоновый лазер. В электрооптическом модуляторе на основе кристалла KDP используется поперечный эффект Поккельса. Фотоприемное устройство состоит из фотодиода и усилителя. Постоянное напряжение на модулятор подается от выпрямителя 4. Источником переменного напряжения 5 служит генератор синусоидальных колебаний. Постоянная составляющая сигнала с фотодиода регистрируется с помощью микроамперметра фотоприемника, переменная – с помощью осциллографа 8 и милливольтметра 9.

Установка для исследования модулятора в общих чертах представляет не что иное, как оптическую линию связи, и может быть использована для передачи различного рода информации (речи, музыки и т.д.). В данной работе предусмотрена возможность передачи по этому каналу связи звукового (речевого) сигнала. Модулирующее напряжение в этом случае снимается с микрофона 7 и через усилитель 6 поступает на модулятор. Выход фотоприемника подключается через усилитель низкой частоты 10 к звуковой колонке 11.

Порядок выполнения работы

1. Включить блок питания лазера и фотоприемник. Визуально убедиться, что лазерный луч после прохождения через модулятор попадает на фотодиод.
2. Наблюдая за показаниями микроамперметра фотоприемника, убедиться в том, что интенсивность луча, прошедшего через модулятор, изменяется при повороте поляризатора на выходе модулятора в ту или другую сторону. Установить поляризатор в

положение, соответствующее минимальным показаниям прибора.

3. Снять статическую характеристику модулятора, действуя в следующей последовательности:

а) убедиться в том, что источник постоянного напряжения подключен к модулятору;

б) поставить регулятор напряжения источника в крайнее левое положение и включить источник;

в) изменяя напряжение, снять показания микроамперметра;

г) вывести высокое напряжение, изменить его полярность и повторить предыдущий пункт.

4. Построить статическую характеристику для двух полярностей напряжения. Определить величину полуволнового напряжения.

5. Снять амплитудно-частотную характеристику оптической линии связи. Для этого:

а) соединить модулятор с генератором переменного напряжения, включить генератор, осциллограф и милливольтметр;

б) установить напряжение смещения, обеспечивающее положение рабочей точки на середине линейного участка статической характеристики модулятора;

в) регулируя амплитуду переменного напряжения, добиться неискаженной передачи синусоидального сигнала, контролируя его форму по экрану осциллографа;

г) при постоянной амплитуде напряжения, изменяя частоту генератора во всем диапазоне значений, зафиксировать показания милливольтметра;

д) выключить генератор и милливольтметр.

6. Построить амплитудно-частотную характеристику канала связи в полулогарифмическом масштабе.

7. Проверить работу канала связи при передаче звукового (речевого) сигнала. Для этого:

а) подключить к модулятору вместо генератора усилитель с микрофоном;

б) включить усилитель;

в) убедиться в прохождении сигнала, добиться его неискаженной передачи.

8. Выключить все приборы и источники напряжений.

Контрольные вопросы

1. Виды поляризации электромагнитных волн.
2. Явление двойного лучепреломления.
3. Электрооптический эффект.
4. Устройство и принцип работы модулятора.
5. Достоинства модулятора с поперечным эффектом Поггеля.
6. Изобразите и поясните, как будет изменяться статическая характеристика модулятора при повороте выходного поляризатора вокруг своей оси на 45 и 90 градусов.

Библиографический список

1. Ярив А. Введение в оптическую электронику. М.: Высшая школа, 1983. С. 231 - 246.
2. Смирнов А.Г. Квантовая электроника и оптоэлектроника. Мн.: Высшая школа, 1987. С. 105 - 110.
3. Пахомов И.И., Рожков О.В., Рождествен В.И. Оптико-электронные квантовые приборы. М.: Радио и связь, 1982. С. 302 - 304, 307 - 323.

4. Пихтин А.Н. Квантовая и оптическая электроника. М.: Высш. школа, 2001.