

МОДУЛЯЦИЯ СВЕТОВОГО ПОТОКА ЯЧЕЙКОЙ LCD (TFT)

Мухин И.А., СПб ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Основные вопросы

1. Что представляет из себя закрученное в спирали нематическое жидкокристаллическое (ЖК) вещество с точки зрения преобразования поляризации плоско поляризованного света (ППС): **одноосный кристалл**, которому присуще явление двулучепреломления, или **изотропное оптически активное вещество**, которому присуще явление вращения плоскости поляризации?
2. Почему изотропное оптически активное вещество способно вращать свет?

В разных источниках для объяснения модуляции светового потока ячейкой LCD применяется два принципиально разных подхода. Например, в [1] это двулучепреломление, когда ППС преобразуется в эллиптически поляризованный свет. А, например, в [2] – это вращение плоскости поляризации.

Управление двулучепреломлением с помощью электрического поля рассмотрено на примере ячейки Керра (раздел «**Ячейка Керра**»). Устройство ячейки ЖК-монитора принципиально отличается от устройства ячейки Керра. В разделе «**Ячейка ЖК-монитора**» указаны эти различия и приведены доводы, порождающие сомнения в правильности теории, объясняющей модуляцию света двулучепреломлением.

В разделе «**Вращение плоскости поляризации ППС оптически активными веществами**» приведено формальное общепринятое объяснение процесса вращения плоскости поляризации, а также приведены доводы, противоречащие этой теории.

Ячейка Керра

Ячейка Керра – это устройство, в котором используется эффект Керра для модуляции пропускаемого светового потока (рис.1, а).

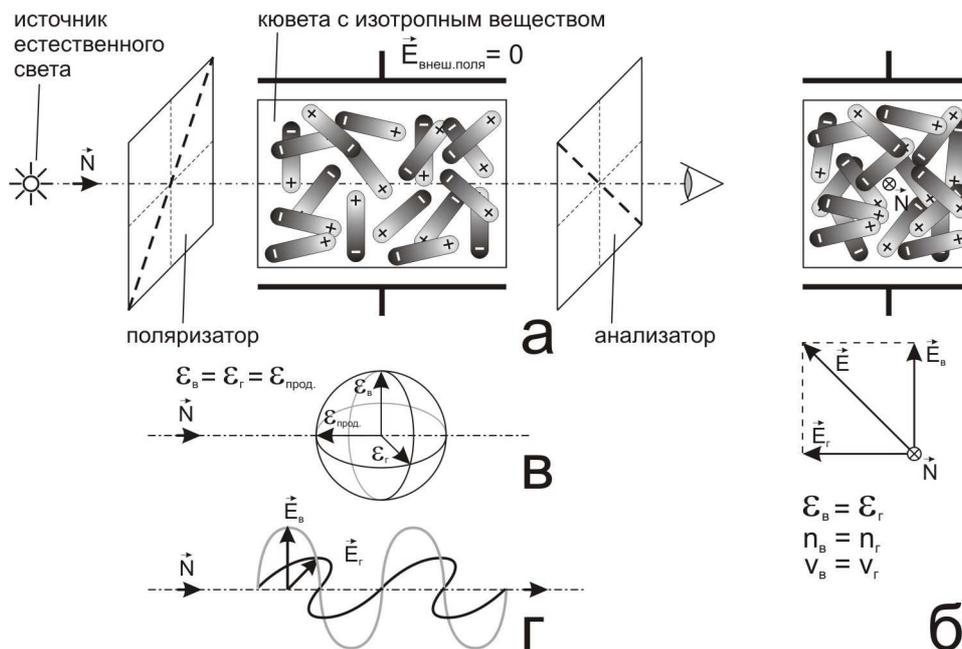


Рис.1. а – ячейка Керра при отсутствии внешнего электрического поля; б – вид на ячейку Керра по ходу светового луча; в – эллипсоид (в данном случае сфера) диэлектрических проницаемостей в различных направлениях; г – распространение ортогональных колебаний в кювете с веществом.

Примечание. **Эффект Керра** (явление Керра или электрооптический эффект) – возникновение двулучепреломления в изотропных средах под действием внешнего электрического поля.

Конструктивно ячейка Керра представляет собой кювету с изотропной средой (жидкостью или газом), сверху и снизу которой находятся обкладки плоского конденсатора, а слева и справа, по ходу луча, – поляризаторы, плоскости поляризации которых ортогональны. Обкладки конденсатора и поляризаторы ориентируют в пространстве таким образом, чтобы:

1. направление распространения света, проходящего сквозь кювету, было ортогонально направлению силовых линий электрического поля, создаваемого обкладками плоского конденсатора;
2. Плоскость поляризации входного поляризатора составляла с направлением силовых линий электрического поля угол 45° .

Принцип действия ячейки Керра

Для простоты рассмотрим случай, когда в качестве изотропной среды используется жидкость из полярных молекул.

Пусть напряженность внешнего электрического поля, создаваемого обкладками плоского конденсатора, равна нулю. В этом случае дипольные моменты полярных молекул, а значит и длинные оси самих молекул, ориентированы хаотически (вследствие теплового движения). Следовательно, среда в кювете изотропна.

Естественный свет от источника излучения проходит через входной поляризатор и становится плоско поляризованным. Далее этот плоско поляризованный свет (ППС) проходит сквозь кювету с изотропной средой, которая не оказывает никакого влияния на его плоскость поляризации, поэтому ППС задерживается анализатором (выходным поляризатором). Ячейка «закрыта».

Пусть напряженность внешнего электрического поля, создаваемого обкладками плоского конденсатора, не равна нулю. В этом случае молекулы среды, находящейся в кювете, выстроятся в определенном порядке, так как их дипольные моменты взаимодействуют с внешним электрическим полем (рис.2).

Примечание. Степень упорядоченности дипольных моментов молекул, а значит, и длинных осей молекул, пропорциональна напряженности внешнего электрического поля и обратно пропорциональна температуре.

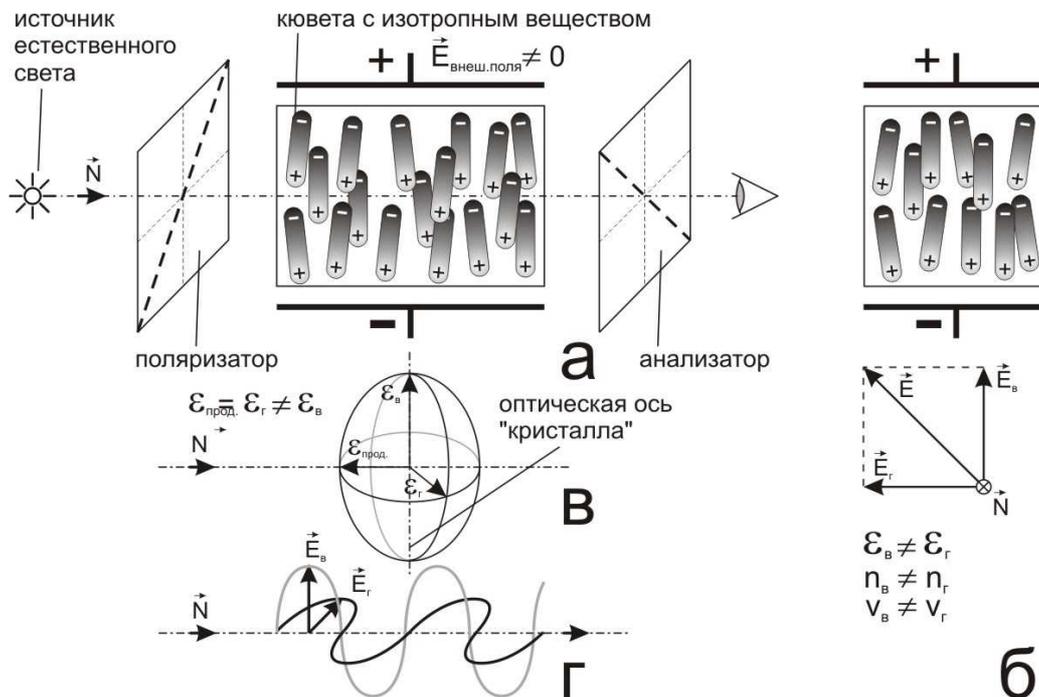


Рис.2. а – ячейка Керра при наличии внешнего электрического поля; б – вид на ячейку Керра по ходу светового луча; в – эллипсоид диэлектрических проницаемостей в различных направлениях; г – распространение ортогональных колебаний в кювете с веществом.

Как видно из рисунка, условия распространения ППС в плоскости силовых линий внешнего электрического поля и в перпендикулярном направлении различны. Среда в кювете ведет себя как одноосный анизотропный кристалл (рис.2, в). Попадающий в среду луч плоско поляризованного света с напряженностью E расщепляется на два луча $E_{\text{б}}$ и $E_{\text{г}}$, поляризованных в ортогональных плоскостях (рис. 2, б). Диэлектрические проницаемости среды $\epsilon_{\text{б}}$ и $\epsilon_{\text{г}}$ в направлениях колебаний векторов $E_{\text{б}}$ и $E_{\text{г}}$ различны, следовательно, различны коэффициенты преломления среды в этих направлениях и,

следовательно, различны фазовые скорости распространения колебаний. Различие в фазовых скоростях приводит к появлению фазового сдвига между векторами E_v и E_r (рис. 2, г). На выходе из среды колебания E_v и E_r складываются. Поляризация суммарного колебания зависит от сдвига фаз между колебаниями E_v и E_r и в общем случае является эллиптической.

Примечание. Максимальный сдвиг фаз $\Delta\varphi_{\max}$ между колебаниями E_v и E_r зависит от длины пути, который проходит свет в среде, и от степени различия в фазовых скоростях V_v и V_r , которая, в свою очередь, зависит от свойств среды и напряженности внешнего электрического поля. Варьируя любой из этих параметров, можно получить различные виды поляризации суммарного колебания на выходе из кюветы (рис.3).

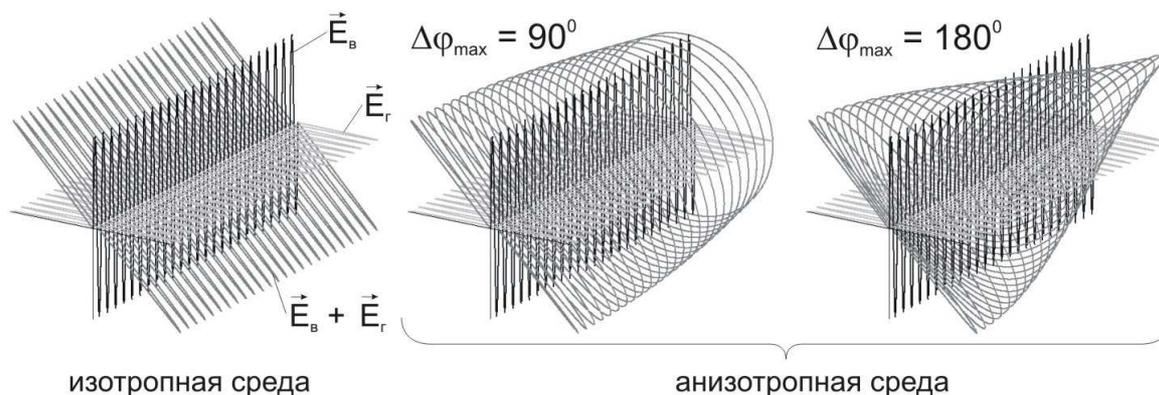


Рис.3. Влияние среды на поляризацию ППС (рисунки получены с помощью программы Lissajous3D)

Ячейка ЖК матрицы

Ячейка ЖК матрицы конструктивно отличается от ячейки Керра тем, что направление света, проходящего сквозь ячейку, и направление линий внешнего электрического поля, управляющего положением кристаллов, не перпендикулярны, а параллельны (рис.4, а).

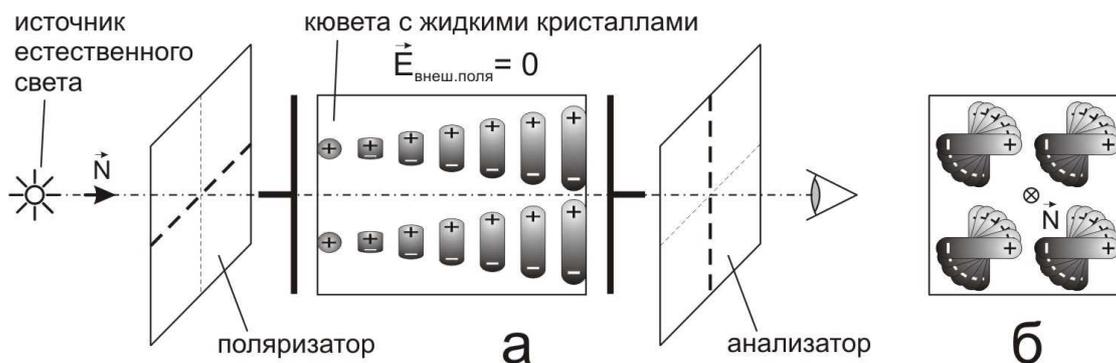


Рис.4 Ячейка ЖК-матрицы при отсутствии внешнего электрического поля

Вместо изотропной среды применяется нематическое жидкокристаллическое вещество. Для достижения его однородности («однодоменности») стенки ограничивающих жидкие кристаллы поверхностей подвергаются специальной обработке – скрайбированию (нанесение царапин) или напылению молекул специальных веществ-ориентантов. Например, в матрицах типа TN (Twisted Nematic) на одну из поверхностей наносятся горизонтальные царапины, а на другую – вертикальные. В результате длинные оси молекул жидких кристаллов крайних слоев, соприкасающихся с направляющими поверхностями, ориентированы ортогонально. Молекулы промежуточных слоев за счет сил межмолекулярного взаимодействия перестраиваются от слоя к слою из горизонтального положения в вертикальное, образуя закрученные спирали (отсюда название - «twisted»).

Принцип действия ячейки ЖК-матрицы

Обратим внимание на рис.4 б. В отличие от случая, показанного на рис. 2 б, нельзя однозначно утверждать, что диэлектрические проницаемости среды в горизонтальном и вертикальном направлениях (ϵ_v и ϵ_r) различны. Следовательно, нельзя утверждать, что в данном случае возможен электрооптический эффект, вызывающий преобразование плоско поляризованного света в эллиптически поляризованный.

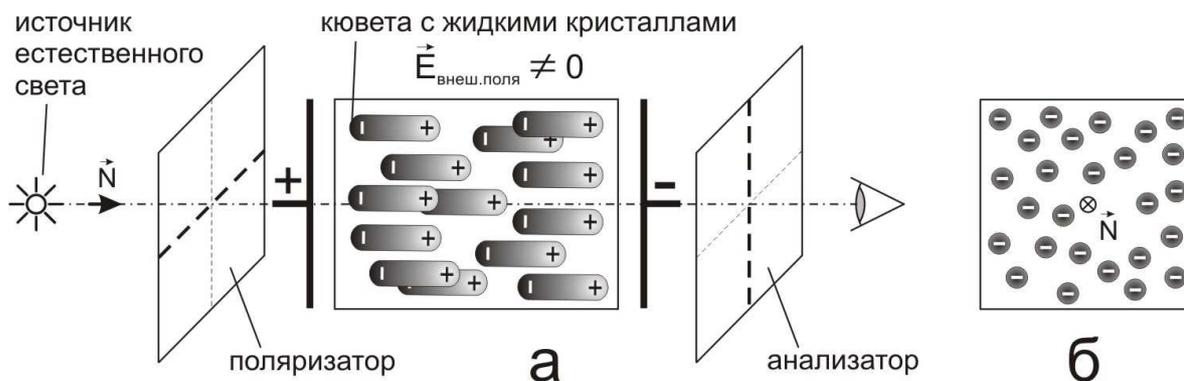
Примечание. Необходимо отметить следующее. Если предположить, что ϵ_v и ϵ_r одинаковы, то скрученное в спирали жк вещество представляет собой одноосный анизотропный кристалл. Однако электрооптический эффект (появление разности фаз между ортогональными плоско поляризованными колебаниями) в этом случае невозможен, так как направление распространения света совпадает с направлением оптической оси этого одноосного анизотропного кристалла.

Однако, как известно, ячейка с закрученным в спирали нематическим ЖК изменяет плоскость поляризации проходящего сквозь нее ППС. Учитывая сказанное выше, можно предположить, что закрученные в спирали нематические жидкие кристаллы представляют собой оптически активное вещество, которое способно вращать плоскость поляризации ППС.

Примечание. Отметим еще раз различия между одноосным анизотропным кристаллом и оптически активным веществом. В **одноосном анизотропном кристалле** наблюдается различие диэлектрических проницаемостей в различных направлениях, благодаря чему, при соблюдении некоторых условий, можно добиться электрооптического эффекта и, в итоге, преобразования плоско поляризованного света в эллиптически поляризованный. **Оптически активное вещество** вращает плоскость поляризации плоско поляризованного света. То есть на входе в оптически активное вещество и на выходе свет является плоско поляризованным, но углы наклона плоскостей поляризации могут быть разными.

По мере увеличения напряженности внешнего электрического поля от нуля до некоторого максимального значения молекулы жидких кристаллов разворачиваются таким образом, чтобы их дипольные моменты были направлены вдоль линий силового поля – спиральная структура разрушается. Интенсивность света, пропускаемого анализатором, при этом уменьшается. Можно предположить, что при разрушении спиральной структуры интенсивность «закрученного» ППС уменьшается, а «незакрученного» - увеличивается.

При увеличении напряженности внешнего электрического поля до некоторого максимального значения, все жидкие кристаллы, (за исключением тех, которые вплотную примыкают к направляющим поверхностям), разворачиваются вдоль линий электрического поля (рис. 5).



Как видно из рисунка, жидкокристаллическое вещество в этом случае по структуре аналогично одноосному анизотропному кристаллу. Однако на поляризацию проходящего ППС этот «кристалл» никакого влияния не оказывает, так как направление света (N) параллельно оптической оси «кристалла».

Примечание В этом и предыдущих случаях рассматривались только такие ситуации, когда вектор направления световых лучей строго ортогонален плоскости поляризаторов. Однако на практике матричный дисплей имеет, как правило, достаточно большие размеры, так что наблюдатель видит часть ячеек не под прямым углом. Нетрудно заметить, что степень преобразования плоскости поляризации ППС зависит от угла падения светового луча по отношению к нормали к входному поляризатору. Таким образом, интенсивность лучей, пропускаемых ячейкой под разными углами, будет разной. Отсюда – искажение цветопередачи изображения, формируемого матричным жидкокристаллическим дисплеем, при больших углах обзора.

Вращение плоскости поляризации ППС оптически активными веществами

Вращение плоскости поляризации оптически активными веществами (ОАВ) объясняется следующим образом. Плоско поляризованный свет можно представить в виде суммы колебаний, распространяющихся в одном направлении, поляризованных по кругу и имеющих противоположные направления вращения (рис. 6).

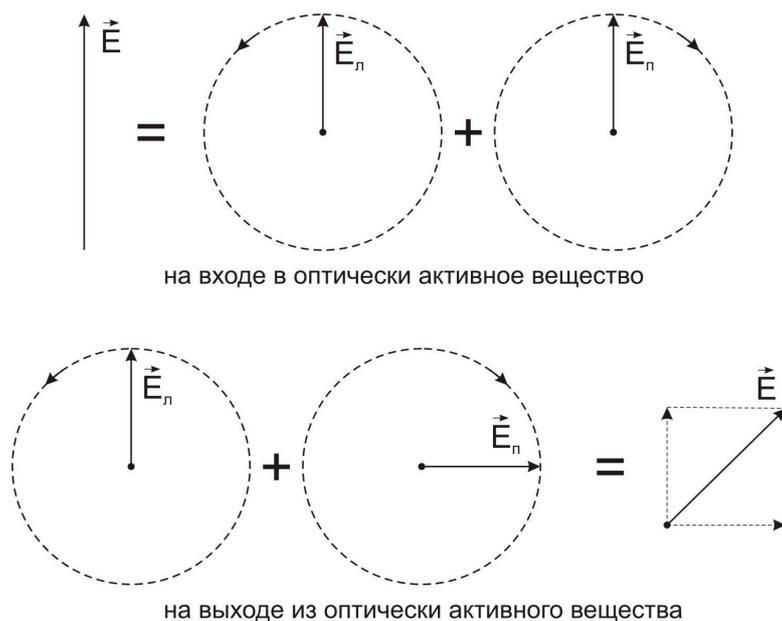


Рис. 6. Вращение ППС оптически активным веществом

Предполагается, что фазовые скорости распространения правовращающего и левовращающего колебаний в оптически активном веществе различаются, что приводит к повороту плоскости поляризации суммарного колебания.

Однако не понятно, как объяснить тот факт, что лево- и правовращающие колебания распространяются в ОАВ с различными фазовыми скоростями. Более того, можно привести доводы, свидетельствующие о том, что это невозможно.

Представим левовращающее колебание в виде суммы двух плоско поляризованных колебаний, совершающихся во взаимно перпендикулярных плоскостях, и отличающихся по фазе на 90^0 (рис. 7).

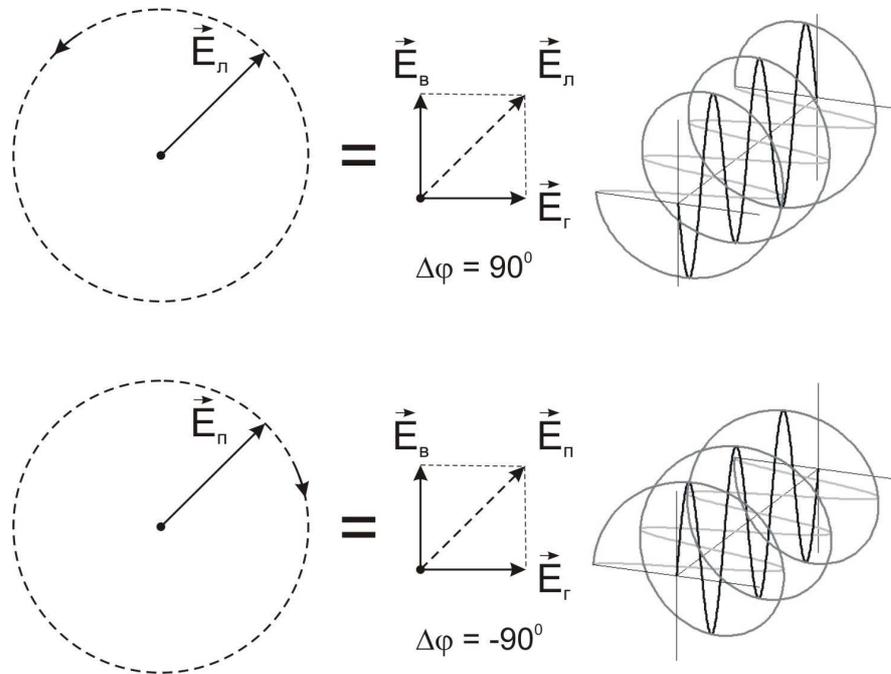


Рис.7. Представление право- и левовращающих колебаний в виде суммы двух плоско поляризованных колебаний

Аналогичным образом представим правовращающее колебание, только сдвиг фаз между суммируемыми колебаниями должен быть уже не 90° , а -90° . Допустим, что фазовая скорость распространения, например, левовращающего колебания ниже, чем правовращающего. Отсюда следует, в частности, что фазовая скорость компоненты E_{rl} (горизонтальная компонента левовращающего колебания) ниже, чем E_{rn} (горизонтальная компонента правовращающего колебания). Как это объяснить? Почему в одном и том же веществе, в одном и том же направлении, в одной и той же плоскости два идентичных колебания (по частоте, фазе и амплитуде) распространяются с разными фазовыми скоростями? То же самое можно отнести и к паре E_{vl} и E_{vn} . (Эти два колебания отличаются друг от друга исключительно разницей в фазе на 180° , но это не может влиять на фазовую скорость распространения).

Таким образом, появляется сомнение в правильности формального объяснения причин вращения ППС оптически активным веществом.

Список литературы

1. Чикров Леонид Жидкие кристаллы. <http://rus.625-net.ru/archive/0497/crystall.htm>,

Цитата из статьи: «Коэффициенты преломления анизотропной среды для волн с поляризациями P_1 и P_2 различны, соответственно различны и фазовые скорости этих волн. В итоге одна из компонент отстает от другой по фазе. На выходе ячейки компоненты объединяются в один поток (интерферируют). При этом из-за приобретенного сдвига фаз функции поляризации меняется и становится эллиптической. Приборов, способных регистрировать фазовые сдвиги или функцию поляризации, в принципе, нет, и приходится прибегать к косвенным методам - преобразованию фазового сдвига в изменение интенсивности потока. Вот эту функцию и выполняет анализатор. Он просто вырезает из эллиптически поляризованной волны компонент, поляризация которого задана анализатором. Интенсивность этой компоненты пропорциональна косинусу удвоенного фазового сдвига. График соответствующей зависимости при скрещенных поляризаторе и анализаторе показан на рис. 4.»

2. *Lueder Ernst Liquid crystal displays, Addressing schemes and electro-optical effects.* John Wiley and Sons LTD, 2001, с. 30-31.

3. *Даршт Максим Яковлевич, диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, специальность – оптика.*
<http://csc.ac.ru/grants/VA01/pdf/dis/dis2.pdf>

Цитата из работы: «Поляризационное состояние света имеет две степени свободы и может быть всегда представлено в виде линейной комбинации двух линейно независимых векторов.»