

МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
МИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ ИНСТИТУТ
КАФЕДРА МЕДИЦИНСКОЙ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

В.Г. ЛЕЩЕНКО, З.В. МЕЖЕВИЧ, А.А. ИВАНОВ

**ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН.
МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН.**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ПО МЕДИЦИНСКОЙ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ
ФИЗИКЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ МЕДИЦИНСКИХ ВУЗОВ.

МИНСК, 1999 г.

Рецензент - старший преподаватель кафедры гистологии, цитологии и эмбриологии **И.А. Мельников.**

В.Г. ЛЕЩЕНКО, З.В. МЕЖЕВИЧ, А.А. ИВАНОВ
ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН.
УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ПО МЕДИЦИНСКОЙ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ ФИЗИКЕ ДЛЯ
СТУДЕНТОВ МЕДИЦИНСКИХ ВУЗОВ. МИНСК, 1999 г., 25 стр.

В учебном пособии рассмотрены общие свойства электромагнитных волн, но основное внимание уделено их поляризационным характеристикам. Приведены основные виды поляризации электромагнитных волн, методы получения линейно поляризованного света и соответствующие поляризационные устройства, рассмотрены оптические свойства анизотропных сред, явления двулучепреломления, дихроизма поглощения, оптической активности, Рассмотрены основные методы использования поляризованного света в медико-биологических исследованиях.

Данное учебное пособие предназначено для студентов медицинских Вузов, но может быть полезно и студентам технических Вузов, изучающих аппаратуру для медико-биологических исследований.

Утверждено: ЦМК МГМИ

© Минский государственный
медицинский институт, 1999 г.

1. ОБЩИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН.

Электромагнитная волна представляет собой распространяющиеся в пространстве переменные электрическое и магнитное поля, изменяющиеся с одинаковой частотой:

$$E = E_0 \sin \omega(t - \frac{x}{V}) , \quad B = B_0 \sin \omega(t - \frac{x}{V}) , \quad (1)$$

где v (м/с) – скорость распространения волны, $\omega = 2\pi\nu$ (рад/с) – круговая частота волны. Характеристиками волны являются также следующие величины: линейная частота волны $\nu = 1/T$ ($1/\text{с} = \text{Гц}$), период волны T (с), длина волны $\lambda = \nu T$ (м) – расстояние, проходимое волной за один период колебания.

Теория электромагнитных волн была развита Максвеллом и в ее основе лежат два экспериментально установленных факта:

1. *переменное электрическое поле создаёт в окружающем пространстве переменное магнитное поле той же частоты.*
2. *переменное магнитное поле создаёт в окружающем пространстве вихревое электрическое поле той же частоты.*

При распространении электромагнитной волны ее энергия периодически переходит из электрической формы с плотностью энергии $w_{эл} = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2$ в магнитную

$w_m = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}$ и наоборот. При этом их максимальные значения одинаковы и равны

полной энергии электромагнитной волны. Это позволяет установить связь между

амплитудами электрического и магнитного полей: $\sqrt{\epsilon\epsilon_0} E_0 = \frac{B_0}{\sqrt{\mu\mu_0}}$, (2).

Электромагнитные волны могут распространяться в любых средах, но в хорошо проводящих средах (металлах) они быстро затухают из-за сильного поглощения.

По теории Максвелла скорость распространения электромагнитных волн определяется электрическими ($\epsilon\epsilon_0$) и магнитными ($\mu\mu_0$) свойствами среды:

$V = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}}$, где: ε и μ - относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, а $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ и $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ - соответственно электрическая и магнитная постоянные.

В вакууме $\varepsilon = \mu = 1$ и поэтому скорость электромагнитной волны в вакууме максимальна и равна $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = 2,98 \cdot 10^8 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)$ независимо от частоты ν волны.

В любых других средах скорость v электромагнитной волны меньше, чем в вакууме.

В оптическом диапазоне отношение $n = \frac{c}{v} = \sqrt{\varepsilon\mu}$ называют **абсолютным показателем преломления** среды и для всех сред, кроме вакуума $n > 1$.

1.1. ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН.

Все электромагнитные волны независимо от частоты имеют общую природу и, как уже отмечалось, представляют собой распространяющиеся в пространстве переменные электрические и магнитные поля одинаковой частоты.

Однако методы и устройства генерирования и регистрации этих волн, области их технического применения, а также характер воздействия на биологические объекты, в том числе и на человека, существенно зависят от частоты (длины волны) электромагнитной волны.

Поэтому всю шкалу электромагнитных волн принято делить на шесть крупных диапазонов, в пределах которых свойства этих волн, методы их получения, применения и регистрации, степень воздействия на человека примерно одинаковы. В зависимости от длины волны (частоты)

электромагнитные волны подразделяют на следующие диапазоны:

1. $\lambda > 10^{-3} \text{ м}$ – радиоволны,
2. $10^{-3} \text{ м} > \lambda > 0,76 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ – инфракрасное (тепловое) излучение,
3. $760 \text{ нм} > \lambda > 400 \text{ нм}$ – видимый диапазон (760 нм – его красная граница, а 400 нм – фиолетовая граница),
4. $400 \text{ нм} > \lambda > 80 \text{ нм}$ – ультрафиолетовое излучение,

5. $80\text{нм} > \lambda > 10^{-5}\text{нм}$ – рентгеновское излучение,

6. $\lambda < 10^{-5}\text{нм}$ – гамма-излучение.

Длинные электромагнитные волны вплоть до видимого диапазона при существующих в природе интенсивностях **мало опасны** для человека.

В очень небольшом по величине *видимом диапазоне* благодаря зрению человек получает более 90% информации об окружающем его мире – этот диапазон электромагнитных волн **наиболее полезен и важен** для человека и других биологических организмов.

Вредное воздействие на биосистемы начинается уже с *короткого ультрафиолетового излучения*, еще более опасными для живых организмов являются *рентгеновское и гамма-излучения*.

Напомним также, что электромагнитные волны обладают как волновыми, так и корпускулярными свойствами. Причем на больших частотах (малых длинах волн) более сильно выражены их корпускулярные (квантовые) свойства, а на малых частотах (больших длинах волн) – волновые свойства.

Однако, несмотря на различия в длине волны, в действии на вещество и на живой организм, электромагнитным волнам всех диапазонов присущи и общие свойства. Одним из них является поляризация волн.

1.2. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН.

В любой электромагнитной волне векторы напряженности электрического поля **E**, индукции магнитного поля **B** и вектор скорости волны **v** образуют взаимно перпендикулярную тройку векторов: $\mathbf{E} \perp \mathbf{B} \perp \mathbf{v}$. Элементарная структура электромагнитной волны представлена на Рис.1

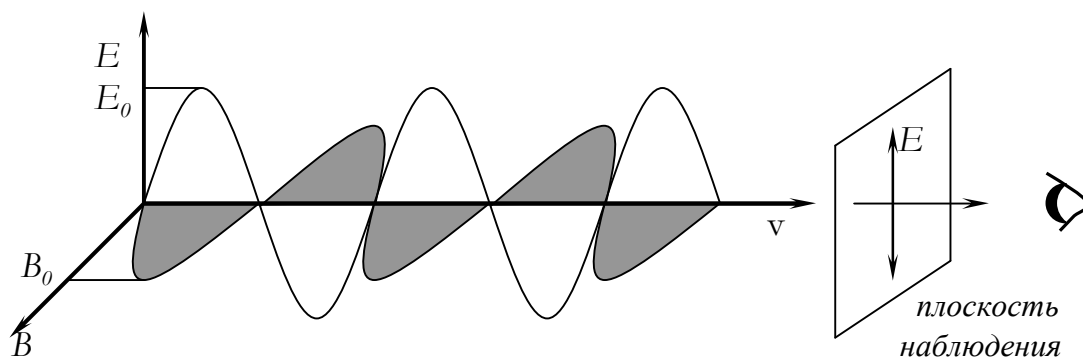


Рис.1

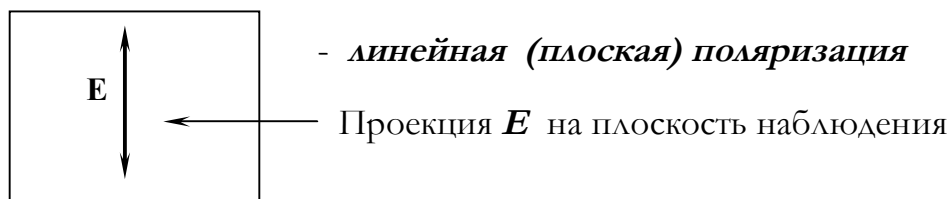
Поскольку при распространении волны вектора \mathbf{B} и \mathbf{E} всегда взаимно перпендикулярны, то они изменяются в пространстве одинаковым образом, описывая одинаковые по форме кривые, но во взаимно перпендикулярных плоскостях. Поэтому достаточно знать, как изменяется в пространстве один из этих векторов, а поведение другого будет аналогичным.

Специальными опытами установлено, что действие электромагнитной волны на глаз, фотоприемники и многие другие объекты оказывает электрический вектор \mathbf{E} волны, который поэтому называют также световым вектором волны.

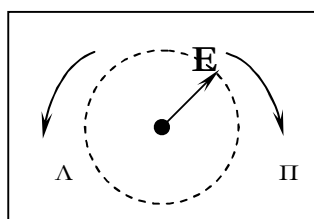
Вид поляризации волны определяется видом той кривой, которую описывает электрический вектор \mathbf{E} волны за один период колебания в плоскости наблюдения. При этом свет должен распространяться к наблюдателю. *Плоскость наблюдения* – это плоскость, перпендикулярная направлению распространения волны (см. Рис.1). Ясно, что магнитный вектор \mathbf{B} волны описывает такую же по форме кривую, что и вектор \mathbf{E} .

1.3. ВИДЫ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН.

1. **Линейная (плоская) поляризация:** - в процессе распространения волны вектор \mathbf{E} колеблется все время в одной и той же пространственной плоскости (см. Рис.1), которую называют плоскостью колебаний вектора \mathbf{E} (иногда также плоскостью поляризации волны). Проекция вектора \mathbf{E} на плоскость наблюдения в этом случае будет иметь вид отрезка прямой линии, в связи с чем эту поляризацию и называют *линейной* или же *плоской*. Отметим, что плоскость колебания магнитного вектора волны будет перпендикулярна плоскости колебаний вектора \mathbf{E} .

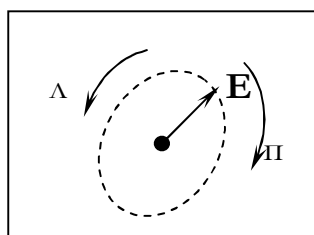


2. **Круговая (циркулярная) поляризация:** - при такой поляризации вектор \mathbf{E} волны за один период волны делает полный оборот вокруг направления распространения волны, при этом его длина остается постоянной. В плоскости наблюдения проекция вектора \mathbf{E} описывает круг, что и определяет название такой поляризации. Если вектор вращается по часовой стрелке (волна должна распространяться к наблюдателю), то поляризация называется правой круговой, а если против часовой стрелки – то левой круговой поляризацией.



- **Круговая правая (П) и левая (Л) поляризация.**
Длина вектора \mathbf{E} постоянна.

3. **Эллиптическая поляризация:** - при этой поляризации вектор \mathbf{E} волны за один период волны тоже делает полный оборот вокруг направления распространения волны, но длина вектора \mathbf{E} при этом изменяется таким образом, что конец его описывает в плоскости наблюдения эллипс. . Если вектор \mathbf{E} вращается по часовой стрелке, то поляризация называется правой, а если против – левой эллиптической.

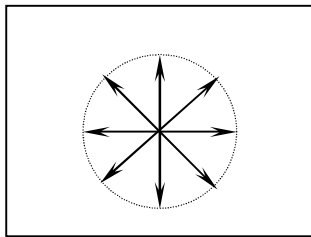


**эллиптическая правая (П)
и левая (Л) поляризация**

Это виды полной поляризации света. Любую из них можно перевести в другую с помощью специальных поляризационных приборов.

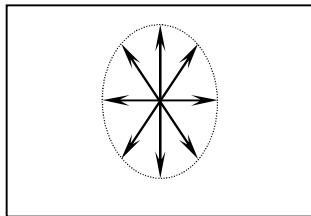
Однако свет, испускаемый обычными источниками – солнцем, пламенем, электрической лампочкой и др. – **является неполяризованным** и называется **естественным светом**.

4. **Естественный свет** можно рассматривать как совокупность линейно-поляризованных волн со всеми возможными направлениями колебаний вектора **E**, причем амплитуда этих векторов одинакова во всех направлениях, так что концы их лежат на окружности:



Этот свет полностью **неполяризован**, и по своим поляризационным свойствам существенно отличается и от линейно-поляризованного и от циркулярно-поляризованного света.

5. **Частично поляризованный свет** представляет собой совокупность линейно-



поляризованного и естественного света. Его можно рассматривать также как совокупность линейно-поляризованных волн с различными направлениями колебаний вектора **E**, но амплитуда его не одинакова в различных направлениях, поэтому концы этих векторов

лежат не на окружности (как у естественного света), а на эллипсе.

Форма эллипса может быть разной: от почти круговой (такой свет по своим свойствам близок к естественному), до сильно вытянутой (такой свет уже близок к линейно-поляризованному). Поэтому для более точной характеристики частично поляризованного света вводится специальный безразмерный параметр: степень поляризации **p**, который может принимать значения от нуля до единицы:

$$p = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \begin{cases} 0 - \text{естественный свет (неполяризованный): } I_{\max} = I_{\min} \\ 1 - \text{линейно поляризованный свет, } I_{\min} = 0. \\ < 1 - \text{частично поляризованный свет} \end{cases}$$

Здесь I_{\max} и I_{\min} - интенсивности линейно поляризованных волн вдоль большой и малой осей эллипса.

Полностью поляризованный свет можно преобразовать с помощью специальных поляризационных приборов (компенсаторов и фазовых пластинок) из одной его формы в другую, например линейно поляризованный свет в циркулярно – или эллиптически поляризованный, либо наоборот, но преобразовать полностью поляризованный свет в частично–поляризованный или естественный свет таким прибором невозможно. Но именно такой, неполяризованный, свет излучают обычные источники: солнце, пламя, электрические лампочки и др., и на практике приходится решать обратную задачу - из неполяризованного света получать полностью поляризованный, прежде всего линейно поляризованный свет.

2. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА.

ОСНОВЫ ОПТИКИ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД.

2.1. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ ДИЭЛЕКТРИКА. ЗАКОН БРЮСТЕРА.

Хорошо известно, что при падении электромагнитной волны на границу раздела двух диэлектриков возникают отражённая и преломлённая волны, подчиняющиеся законам отражения и преломления. Поляризация этих волн в общем случае будет различной.

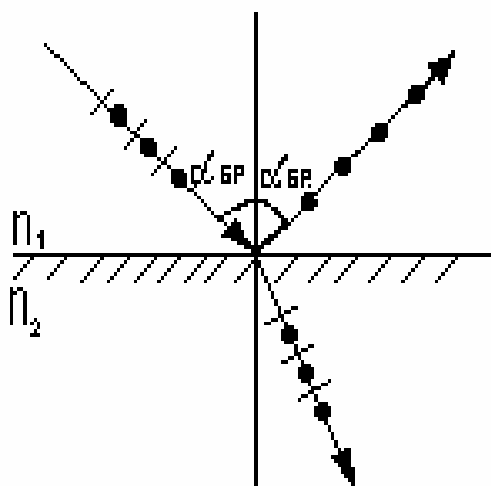


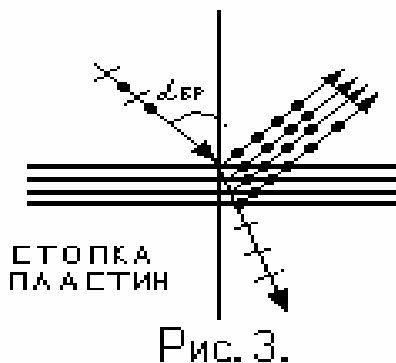
Рис 2.

Если падающий свет естественно поляризован, то отражённая и преломлённая волны будут поляризованы частично. Степень их поляризации будет зависеть от угла падения α : по мере его увеличения степень поляризации отраженного света растёт и **при**

определённом угле падения α_{Br} , называемом углом Брюстера (или углом полной поляризации) отражённая волна будет полностью линейно

поляризована. При этом ее электрический вектор будет перпендикулярен плоскости падения. Угол Брюстера находится из соотношения:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{брюст.}} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3).$$



Преломлённая волна будет поляризована частично, причем максимальная составляющая ее электрического вектора будет параллельна плоскости падения. Это значит, что при таком угле падения частично отражается свет только с такой линейной поляризацией. А если падающая волна линейно поляризована параллельно плоскости падения, то при падении под углом Брюстера она не отражается, а полностью проходит во вторую среду. Поэтому, чтобы полностью поляризовать прошедшую волну и получить максимально возможный выход линейно поляризованного света (до 50%), используют **стопку плоскопараллельных пластинок**. (см. Рис.3), где за счет многократного отражения одной поляризации на выходе получают практически линейно поляризованный свет.

2.2. ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИКИ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД

Среды, свойства которых одинаковы по всем направлениям, называются **изотропными**.

Анизотропными называются среды, свойства которых не одинаковы в различных направлениях. *Анизотропия характерна для кристаллов.* Анизотропией обладают и биологические ткани, например, костная и мышечная ткани.

Оптическая анизотропия кристаллов проявляется в том, что в разных направлениях в кристалле скорость света различна и, кроме того, даже в одном и том же направлении она различна для волн разной поляризации.

Однако в кристаллах всегда есть одно или два направления, в которых скорость света одинакова для волн любой поляризации. Эти направления называют

оптическими осями кристалла. Если в кристалле только одно такое направление, то он называется **одноосным**, а если два – то **двуосным**. Других видов анизотропных кристаллов в природе не существует. Ниже мы будем рассматривать свойства только одноосных кристаллов.

В таких кристаллах, независимо от поляризации падающего на них света, всегда распространяются только две линейно поляризованные волны, плоскости поляризации которых взаимно перпендикулярны.

Для одной из этих волн скорость распространения в одноосном кристалле одинакова во всех направлениях (как в изотропной среде) – такая волна называется **обыкновенной** и характеризуется постоянной скоростью распространения v_o и соответствующим показателем преломления $n_o = c/v_o$.

Для другой волны скорость распространения v_e и показатель преломления $n_e = c/v_e$ будут различны в разных направлениях, – такая волна называется **необыкновенной**.

Таким образом независимо от поляризации волны, падающей на кристалл, в кристалле будут распространяться одновременно две линейно поляризованные волны – обыкновенная и необыкновенная, -- у которых плоскости колебаний светового вектора ***E*** будут взаимно перпендикулярны.

У обыкновенной волны плоскость колебаний электрического вектора ***E*** всегда перпендикулярна **главной плоскости кристалла**, а у необыкновенной волны – параллельна ей.

Главная плоскость кристалла – это плоскость, содержащая оптическую ось кристалла и световой луч, распространяющийся в нем (например, на Рис.4 – это плоскость листа).

2.2.1 Явление двулучепреломления.

Из-за различия в показателях преломления обыкновенной и необыкновенной волн в кристаллах, как правило, возникают два преломленных луча, в полном соответствии с законом преломления света (см. Рис.4):

$$\sin \beta_o = \frac{\sin \alpha}{n_o} , \quad \sin \beta_e = \frac{\sin \alpha}{n_e}$$

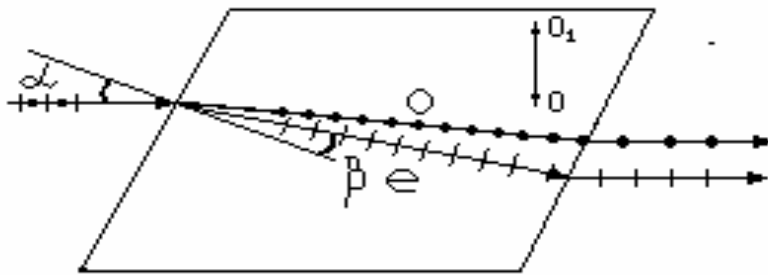


Рис.4. Двулучепреломление в кристалле.

Это явление, называемое **двулучепреломлением**, широко используется для создания поляризационных призм, основная задача которых состоит в том, чтобы пропустить через кристалл только одну из линейно поляризованных волн и не пропустить другую. Примером такой призмы является призма Николя.

ПРИЗМА НИКОЛЯ Эта призма изготавливается из кристалла исландского шпата, имеющего наибольшую известную разность между показателями преломления обыкновенной и необыкновенной волн. Призма, вырезанная определенным образом из этого кристалла, распиливается по меньшей диагонали и затем склеивается по месту распила специальным оптическим клеем – канадским бальзамом (см. Рис. 5)

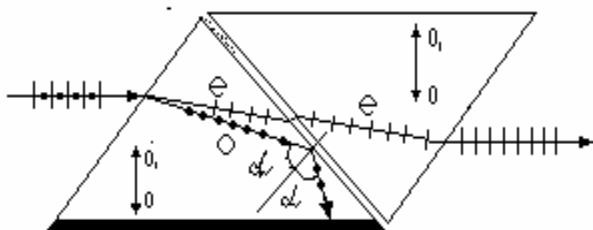


Рис.5.

Показатель преломления канадского бальзама занимает промежуточное положение между n_o и n_e :

$$n_o > n_b > n_e$$

Неполяризованный свет, падающий на призму, распадается при

преломлении в кристалле на два линейно поляризованных луча, которые падают на склейку под разными углами (см. Рис. 5).

Обыкновенный луч падает на склейку из более плотной среды на менее плотную ($n_o > n_b$). При таких условиях возможно полное внутреннее отражение света и геометрия призмы рассчитывается именно таким образом, чтобы

обыкновенный луч полностью отразился от склейки. Затем он поглощается черной краской, нанесенной на нижнюю грань призмы.

Необыкновенный луч, напротив, падает из менее плотной среды на более плотную ($n_e < n_o$) и практически полностью проходит через склейку. В результате **через призму Николя проходит всегда только линейно поляризованный свет**. Плоскость колебаний вектора E этого луча всегда параллельна плоскости, в которой лежит оптическая ось кристалла, поэтому при вращении призмы Николя вокруг падающего луча, плоскость колебаний вектора E прошедшей волны тоже будет поворачиваться вместе с призмой. Таким образом, призма Николя является **поляризатором** – устройством, которое независимо от поляризации падающего света пропускает только линейно поляризованные волны с определенной ориентацией плоскости колебания светового вектора.

2.2.2. Дихроизм поглощения.

В поглощающих средах интенсивность света уменьшается с пройденным расстоянием x по закону Бугера:

$$I = I_0 \exp(-kx) \quad (4),$$

где I_0 - интенсивность падающего света, k – показатель поглощения среды.

Для кристаллов характерно различие в показателях поглощения среды для обыкновенной и необыкновенной волн: ($k_o \neq k_e$).

Это явление – **зависимость показателя поглощения света от поляризации волны** - называется **дихроизмом поглощения**.

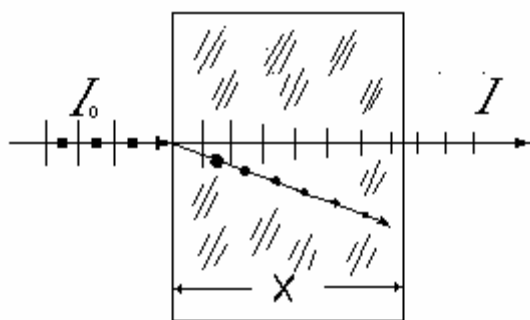


Рис. 6

Поэтому в поглощающих кристаллах обыкновенная и необыкновенная волны затухают по-разному, и можно подобрать такую толщину кристалла x , что одна этих волн практически полностью поглотится кристаллом, а другая волна пройдет через него (см. Рис.6)..

В результате, независимо от поляризации падающей волны, через такой кристалл пройдет только линейно поляризованная волна, плоскость колебаний которой жестко связана с кристаллом и при вращении кристалла вокруг падающего луча плоскость колебания вектора E выходящей линейно поляризованной волны будет вращаться вместе с ним.

Из природных кристаллов большим дихроизмом (т.е. большой разностью показателей поглощения $/k_o - k_e /$) обладает **турмалин**. Пластинка из турмалина толщиной около 1мм практически полностью поглощает обыкновенный луч, а необыкновенный луч поглощается значительно слабее и проходит через пластинку. Наибольшим известным дихроизмом обладает искусственно выращиваемый кристалл **герапатит**, который при толщине около 0,1мм пропускает уже только линейно поляризованный свет. Такие кристаллы выращиваются на целлулоидной или стеклянной подложке и могут покрывать большие площади, образуя поляризаторы (их называют **поляроидами**) для широких световых пучков.

В заключение отметим, что плоскость поляризатора, параллельная плоскости колебаний электрического вектора проходящей через него линейно поляризованной волны, называется **плоскостью пропускания поляризатора**.

Отметим, что при падении на поляризатор естественного света интенсивностью I_0 на выходе из него получим линейно поляризованный свет, интенсивность которого будет не выше половины падающего и в лучшем случае =

$$I_{\text{прош}} = \frac{1}{2} I_0 .$$

3. ПРОХОЖДЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА ЧЕРЕЗ ПОЛЯРИЗАТОР. ЗАКОН МАЛЮСА

Рассмотрим случай **падения на поляризатор линейно поляризованной волны**, причем плоскость колебания вектора E_0 этой волны составляет с плоскостью пропускания AA_1 поляризатора угол φ (см.Рис.7). Поляризатор пропустит только линейно поляризованную волну, амплитуда колебаний которой равна

проекции вектора E_0 на плоскость пропускания поляризатора:
 $E_{\text{прош.}} = E_0 \cos \varphi$, (см. Рис.7).

Так как интенсивность волны пропорциональна квадрату амплитуды волны, то после возведения в квадрат последнего соотношения получаем **закон Малюса**:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi \quad (5)$$

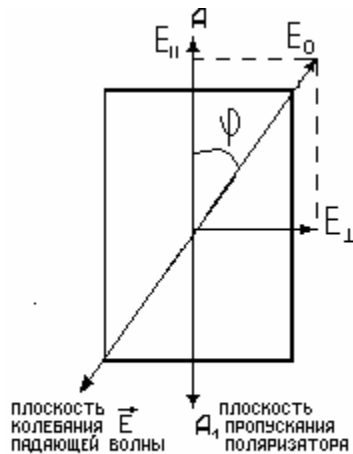


Рис. 7.

-- **Интенсивность света, прошедшего через поляризатор, пропорциональна квадрату косинуса угла между плоскостью пропускания поляризатора (AA_1) и плоскостью колебания вектора E падающей волны.**

Если эти плоскости параллельны, то свет проходит через поляризатор полностью ($\varphi=0$, $\cos 0 = 1$ и $I=I_0$), а если они перпендикулярны, то свет не проходит через поляризатор ($\varphi=90^0$, $\cos 90^0 = 0$ и $I = 0$). При других значениях угла φ интенсивность прошедшего света будет определяться законом Малюса (5).

4. ОПТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ.

Оптическая активность – это **явление поворота плоскости поляризации линейно поляризованного света при его прохождении через вещество**. Среды, способные поворачивать плоскость поляризации света, называются **оптически активными**.

Угол поворота α плоскости поляризации прошедшего света всегда прямо пропорционален длине пути l света в веществе (см Рис.8) и определяются формулами:

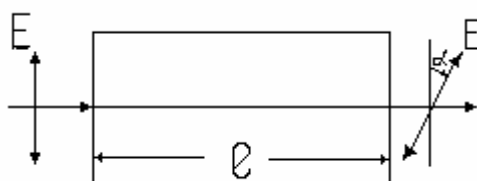


Рис.8.

- для твердых сред: $\alpha = [\alpha_0] \cdot l$,

где величина $[\alpha_0]$ измеряется в град/мм и называется **постоянной вращения**.

- для растворов: $\alpha = \alpha_0 \cdot c \cdot l$,

где c – концентрация растворенного оптически активного вещества, величина α_0 называется **удельным вращением**, является характеристикой этого оптически активного вещества и имеет размерность *град/мм·ед.концентрации*.

Последнее соотношение является основой для определения концентрации оптически активных веществ путем измерения угла поворота плоскости поляризации света, прошедшего через раствор.

У многих органических соединений, в том числе у аминокислот, имеются зеркально симметричные пространственные изомеры, которые различаются направлением вращения плоскости поляризации света и обозначаются как D (правовращающие)- и L (левовращающие)- изомеры. Установлено, что эти изомеры по-разному усваиваются живыми организмами. Смесь D- и L- изомеров, не вращающая плоскость поляризации света, называется **рацемической** смесью.

5. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ

Поляризованный свет широко используется для измерения концентраций оптически активных веществ (поляриметрия), для исследования биологических тканей в поляризованном свете (поляризационная микроскопия), в гигиенических исследованиях, при оптических исследованиях механических напряжений, возникающих в костных тканях. Рассмотрим эти методы исследования несколько подробнее.

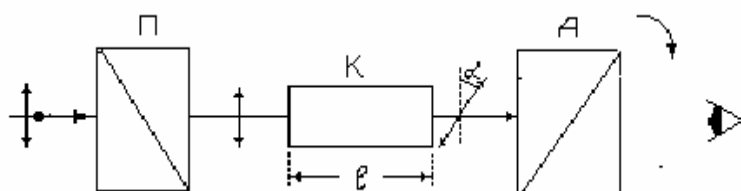
5.1. ПОЛЯРИМЕТРИЯ

Поляриметрия – это совокупность физических методов исследования, основанных на определении угла поворота плоскости поляризации света, прошедшего через оптически активную среду.

К таким средам относятся растворы многих органических соединений – сахара, кислоты, алкалоиды и др. Поляриметрию применяют не только для определения

концентрации оптически активных сред, но и как метод исследования структурных превращений молекул, в частности в молекулярной биофизике .

Измерение угла поворота плоскости поляризации света проводится с помощью специального прибора – поляриметра, действие которого основано на



использовании закона Малюса.

Поляриметр состоит из двух поляризаторов П и А (см. Рис.9), между которыми помещается кювета К с раствором

оптически активного вещества.

Рис. 9. Схема устройства поляриметра

На поляризатор П падает монохроматический неполяризованный свет, который после прохождения через поляризатор будет линейно поляризован. В отсутствие кюветы плоскости пропускания первого П и второго поляризатора А (его называют анализатором) устанавливают перпендикулярно друг другу, так что свет через них не проходит : $I_{\text{прош}} = I_0 \cdot \cos 90^\circ = 0$.

При внесении между поляризаторами кюветы К с раствором оптически активного вещества плоскость поляризации света, падающего на анализатор, повернется на угол $\alpha = \alpha_0 c l$. Чтобы измерить этот угол, анализатор поворачивают вокруг луча до тех пор, пока интенсивность прошедшего света опять не станет минимальной, и регистрируют угол поворота анализатора (это и будет угол α) по специальной шкале, связанной с анализатором.

Измерив угол α и зная длину кюветы l и удельное вращение α_0 , нетрудно найти концентрацию c растворенного оптически активного вещества.

Поляриметрия – основной метод контроля концентрации сахара в сахарной промышленности, поэтому **поляриметры** часто называют **сахариметрами**.

Поляриметрия находит широкое применение в санитарно-гигиенических, клинических и физиологических исследованиях. Методами поляриметрии определяют наличие и концентрацию углеводов в растительном сырье, белков и аминокислот в растворах, исследуют активность ферментов, расщепляющих углеводы и т.д., используют для анализа эфирных масел, алкалоидов, антибиотиков и других соединений.

Одним из важных методов исследования строения вещества является **спектрополяриметрия**, основанная на определении зависимости удельного вращения (или постоянной вращения) от длины волны падающего света (дисперсия оптического вращения). Эта зависимость для каждого вещества индивидуальна, поэтому спектрополяриметрия используется для проведения качественного анализа растворов, а также для уточнения конформации растворенных органических соединений.

5.2. ОПТИЧЕСКИЙ КРУГОВОЙ ДИХРОИЗМ

Наряду с вращением плоскости поляризации оптически активные вещества по-разному поглощают световые волны, поляризованные по кругу влево и вправо, т.е. обладают оптическим круговым дихроизмом. Спектры кругового дихроизма изучают с помощью специальных приборов, называемых дихрографами.

Методы измерения дисперсии (зависимости от длины волны) оптического вращения и кругового дихроизма широко применяют для изучения структуры многих биологически важных соединений, в частности для изучения вторичной и третичной структур молекул белков в растворах при изменении условий среды или при их взаимодействии с другими молекулами. Этими методами изучаются структуры ферментов, пептидных гормонов, мембранных белков, различных белковых комплексов (напр., антиген-антитело), сложных комплексов (хроматина, рибосом, вирусов, фагов и др.), процессы нуклеиново-белкового узнавания и др..

5.3. ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ МИКРОСКОПИЯ

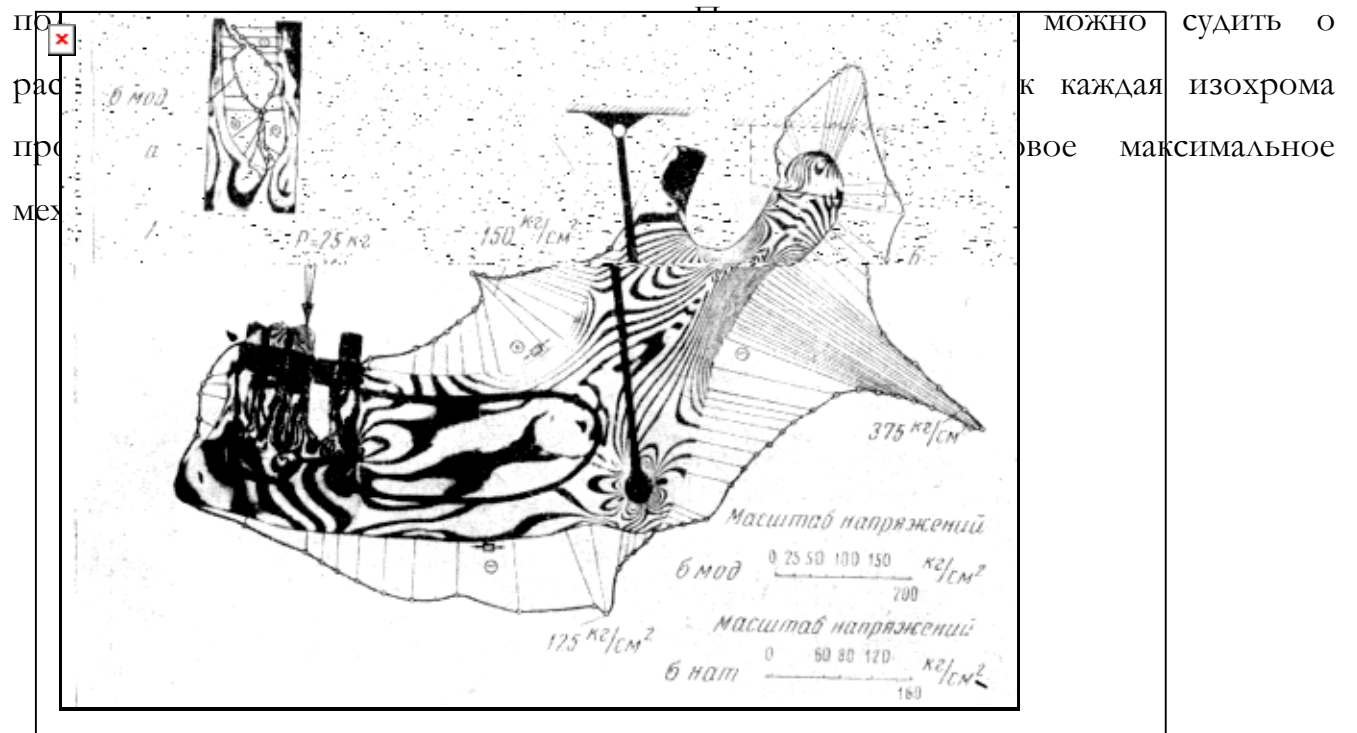
Поляризованный свет широко применяется при исследовании оптически анизотропных биологических тканей. Во многих случаях при этом можно установить расположение и строение анизотропных элементов биоструктуры, которые не выявляются при микроскопировании в естественном свете. Оптическая анизотропия наблюдается у костных, мышечных и соединительных (коллагеновых) тканей, у нервных волокон. Само название скелетных мышц – поперечнополосатые – связано с тем, что при микроскопировании в естественном свете волокно кажется состоящим из чередующихся темных **A**- и светлых **I**- участков, что и придает ему поперечную исчерченность. Исследование этих волокон в поляризованном свете показывает, что более темные участки **A** являются анизотропными, тогда как более светлые **I** – изотропными, что и является причиной их различия в естественном свете.

Для гистологического исследования структур применяется поляризационный микроскоп. Он аналогичен обычному биологическому микроскопу, но имеет поляризатор перед конденсором и анализатор в тубусе между объективом и окуляром. Предметный столик может вращаться вокруг оптической оси микроскопа. Таким образом, предмет освещается поляризованным светом и рассматривают через анализатор. Если скрестить поляризатор и анализатор, то в отсутствие объекта поле зрения будет темным. При помещении на предметный столик препарата с изотропной структурой поле зрения останется темным. Если же препарат имеет анизотропную структуру, то в поле зрения анизотропные участки будут выглядеть более светлыми на общем темном фоне из-за изменения поляризации света после прохождения анизотропной среды.

5.4. ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ (МЕТОД ФОТОУПРУГОСТИ).

При создании в изотропном образце механических напряжений он становится анизотропным. Поэтому явление двойного лучепреломления можно наблюдать и в изотропных веществах, если их подвергнуть деформации. Это явление, получившее

название искусственного двойного лучепреломления, лежит в основе оптического метода исследования распределения механических напряжений в деформированном твердом теле, который называется методом фотоупругости. Он нашел широкое применение в медицине при изучении механических напряжений и деформации в различных костных тканях и ортопедических конструкциях. Метод фотоупругости рассчитан, прежде всего, на использование модели. Из подходящего прозрачного изотропного материала - обычно для этого применяют такие материалы, как оргстекло, эпоксидная и полиэфирные смолы - изготавливается модель, геометрически аналогичная натуре, которая затем подвергается таким же условиям нагрузки, как и натура. При просвечивании поляризованным монохроматическим светом нагруженной модели каждый ее элемент ведет себя подобно кристаллу с двойным лучепреломлением. Если поместить модель между поляризатором и анализатором, то можно создать условия, необходимые для интерференции когерентных обыкновенных и необыкновенных лучей, возникающих при двойном лучепреломлении. Поэтому при наблюдении через анализатор такой модели на ее поверхности видна система темных и светлых интерференционных полос. Темные



На рис.10 приведена картина интерференционных полос в модели челюсти при наличии лунки между 3-м и 5-м зубами. Нагружен клык.

Рис. 10.

На рисунке 11 приведена картина интерференционных полос при нагрузке бедренной кости.

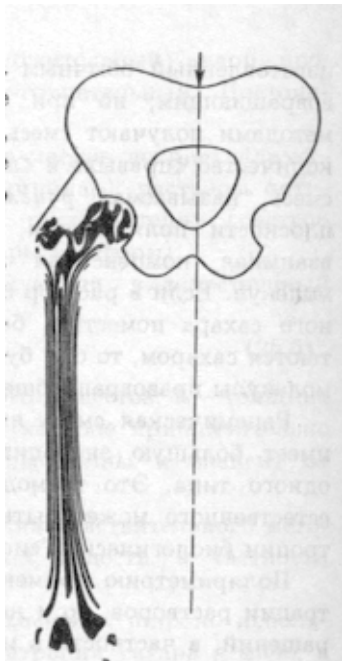


Рис.11

Так как исследование напряжений ведется на моделях, то оно заканчивается переходом от напряжений в модели к напряжениям в реальных конструкциях. Модель в механическом отношении подобна образцу. Поэтому, как правило, распределение напряжений в модели будет таким же, как и в образце.

Таким образом важнейшим достоинством метода фотоупругости является то, что с его помощью можно получить наглядную картину распределения механических напряжений в сложных сооружениях и конструкциях, когда применение вычислительных методов математической теории упругости затруднено или невозможно.

Рассмотрим, в качестве примера, интерференционную картину, полученную при просвечивании поляризованным светом модели нагруженного зуба с различной геометрией формирования полости (Рис.12, - предоставлен доцентом

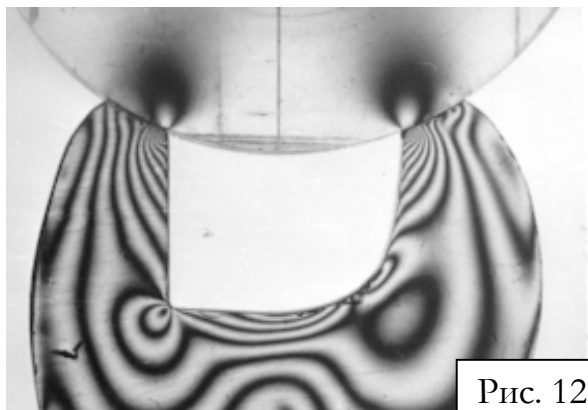


Рис. 12

Полонейчиком Н.М.). Из рисунка видно, что формирование округленного перехода со стенки полости на его дно позволяет значительно уменьшить максимальные касательные напряжения по сравнению с прямоугольным переходом. Из этого следует, что в случаях, когда полость сформирована с

прямым углом, усилие при котором происходит скол, значительно меньше по сравнению с усилием необходимым для облома стенки с округленным переходом на дно полости. Это особенно важно в тех случаях, когда стенки полости истончены. Для того, чтобы подтвердить этот вывод модель доводили до перелома. Перелом происходил со стороны стенки с прямым углом. Следовательно, метод фотоупругости наглядно показывает, что в полостях с истонченными стенками во избежание концентрации напряжений следует формировать округлый переход стенки полости на ее дно.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Включить осветитель поляриметра, при пустой кюветной камере добиться равномерно освещенного поля зрения в поляриметре и снять отсчет φ_0 по шкале анализатора.
2. Вставить в поляриметр кювету с раствором **известной концентрации** c_0 , выравнять освещенность поля зрения в поляриметре путем поворота анализатора на некоторый угол α_1 и снять отсчет φ_1 по шкале анализатора.
3. Вычислить угол поворота плоскости поляризации $\alpha_1 = \varphi_1 - \varphi_0$, и, зная длину l кюветы, найти удельное вращение для исследуемого раствора:

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_1}{c_0 l}$$

4. Вставить в поляриметр кювету с раствором **неизвестной концентрации** c_x , выравнять освещенность поля зрения в поляриметре, снять отсчет φ_2 по шкале анализатора и вычислить угол поворота $\alpha_2 = \varphi_2 - \varphi_0$.
Зная длину кюветы l и удельное вращение α_0 , вычислить неизвестную концентрацию оптически активного вещества:

$$c_x = \frac{\alpha_2}{\alpha_0 l}$$

5. Аналогичным путем найти неизвестную концентрацию другого раствора.

Результаты измерений занести в таблицу.

Контрольные вопросы:

1. Что представляет собой электромагнитная волна, какая связь между амплитудами электрического и магнитного полей, их взаимоположение с вектором скорости, скорость распространения волны, шкала электромагнитных волн.
2. Виды поляризации электромагнитных волн
3. Полная поляризация волны при отражении от диэлектрика
4. Оптические свойства кристаллов, явление двулучепреломления, призма Николя.
5. Явление оптического дихроизма, поляроиды.
6. Прохождение линейно поляризованного света через поляризатор, закон Малюса.
7. Оптическая активность, поляриметрия. Использование поляризованного света в медико-биологических исследованиях.

Решить задачи:

1. А.Н.Ремизов, Н.Х.Исакова. Сборник задач по физике для мединститутков, 1978 г., №№ 16.21, 16.25, 16.29, 16.35, 16.39, 16.41.

Литература:

1. А.Н. Ремизов. Медицинская и биологическая физика, М., Высш. школа.

Содержание

1. Общие свойства электромагнитных волн.	3
1.1. Шкала электромагнитных волн	4
1.2. Поляризация электромагнитных волн	5
1.3. Виды поляризации электромагнитных волн	6
2. Методы получения поляризованного света. Основы оптики анизотропных сред.	9
2.1. Поляризация при отражении от диэлектрика	9
2.2. Элементы оптики анизотропных сред	10
2.2.1. Явление двулучепреломления	11
2.2.2. Дихроизм поглощения	13
3. Прохождение поляризованного света через поляризатор. Закон Малюса.	14
4. Оптическая активность.	15
5. Методы исследования в поляризованном свете	16
5.1. Поляриметрия	16
5.2. Оптический круговой дихроизм	18
5.3. Поляризационная микроскопия	18
5.4. Поляризационно – оптический метод исследования механических напряжений (метод фотоупругости)	19
Порядок выполнения лабораторной работы	22
Контрольные вопросы	23
Литература	23

Учебное издание

Лещенко Вячеслав Григорьевич, Межевич Зоя Васильевна,
Иванов Александр Аркадьевич

**ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН.
МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН**

Учебно-методическое пособие
по медицинской и биологической физике
для студентов медицинских ВУЗов

Ответственный за выпуск: профессор С.Д.Денисов

Подписано в печать

Уч.-изд. л.

Усл. печ. л.

Форма 60 x 84 / 16

Заказ

Бумага писчая.

Тираж

экз.

Отпечатано в МГМИ. г. Минск, ул. Ленинградская, 6