

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

3-11 ; 3-13

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

3-25

Утверждено
редакционно-издательским
советом института
в качестве
методических указаний
к лабораторным работам
№ 3-11, 3-13, 3-25

Как показывает опыт, некоторыми приборами можно ослабить колебания какого-нибудь направления и даже совершенно их устранить. В последнем случае получается свет, в котором колебания вектора напряженности электрического поля \vec{E} совершаются в одной фиксированной плоскости, проходящей через луч (рис. 2). Такой свет называется плоскополяризованным или линейно-поляризованным.

Свет, в котором какое-либо одно направление колебаний вектора \vec{E} является преимущественным (но не единственным), называется частично поляризованным.

Плоскость P , проходящая через направление распространения света и направление колебаний вектора \vec{E} , называется плоскостью колебаний, а плоскость Q , в которой колеблется вектор \vec{H} — плоскостью поляризации.

Приборы, позволяющие получить поляризованный свет, называются поляризаторами, а приборы, позволяющие обнаружить поляризацию света, называются анализаторами. Анализаторами могут служить те же приборы, которые служат поляризаторами.

Естественный свет можно поляризовать различными способами. Для этого используется явление поляризации света при отражении и преломлении, а также при двойном лучепреломлении.

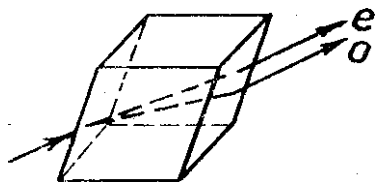


Рис. 3

Свойством двойного лучепреломления обладает, например, кристалл исландского шпата (CaCO_3). Узкий пучок света, проходя через такой кристалл, разделяется на два пучка (рис. 3).

Это явление можно наблюдать даже при перпендикулярном падении луча на грань кристалла.

Лучи, образовавшиеся при двойном лучепреломлении, в случае падения естественного луча обладают следующими свойствами:

1. Один из лучей подчиняется обычным законам преломления, его показатель преломления не зависит от угла падения. Скорость распространения этого луча внутри кристалла во всех направлениях одинакова. Такой луч называется обыкновенным (см. рис. 3, луч o).

2. Другой луч не подчиняется обычным законам преломления, его показатель преломления зависит от направления луча внутри кристалла. Следовательно, скорость распространения этого луча различна в разных направлениях. Этот луч называется необыкновенным (см. рис. 3, луч e).

3. В кристалле существует такое направление, вдоль которого скорость распространения обыкновенного и необыкновенного лучей одинакова. Прямая, проведенная через любую точку кристалла в этом направлении, называется его оптической осью. Плоскость, содержащая оптическую ось и данный луч, называется главным сечением кристалла по отношению к данному лучу.

4. Яркость обыкновенного и необыкновенного лучей одинакова, если кристалл не обладает дихроизмом.

5. Оба луча, обыкновенный и необыкновенный, полностью поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях. Обыкновенный луч поляризован в плоскости соответствующего ему главного сечения, а необыкновенный — перпендикулярно к плоскости соответствующего ему главного сечения.

Для получения плоскополяризованного света достаточно удалить один из лучей, образовавшихся при двойном лучепреломлении.

Некоторые вещества неодинаково поглощают лучи, поляризованные в разных плоскостях. Это явление, называемое дихроизмом, используется для получения поляризованного света при помощи так называемых поляроидов.

Поляроид представляет собой пленку целлулоида или другого прозрачного материала, на которую нанесены тонким слоем ориентированные микроскопические кристаллики сернокислого йодина, называемого герпатитом. Кристаллы герпатита почти полностью поглощают обыкновенный луч. Таким образом, падающий естественный свет, проходя сквозь поляроид, становится линейно поляризованным.

Если на пути частично поляризованного луча, вышедшего из поляризатора, поставить анализатор, то интенсивность света I , прошедшего через анализатор, определится законом Малюса:

$$I = I_1 + I_0 \cos^2 \varphi,$$

где I_1 — интенсивность неполяризованного света, прошедшего через анализатор, равная половине интенсивности неполяризованного света, падающего на анализатор; I_0 — интенсивность поляризованного света, падающего на анализатор; φ — угол между главными сечениями анализатора и поляризатора.

Рассмотрим прохождение поляризованного света через анализатор. Обозначим амплитуду напряженности электрического поля поляризованного луча, прошедшего через поляризатор, буквой E_0 . Пусть плоскость главного сечения анализатора AA' повернута относительно плоскости главного сечения поляризатора PP' на угол φ (рис. 4).

Разложим вектор \vec{E}_0 на две составляющие: параллельную плоскости главного сечения анализатора ($\vec{E}_{||}$) и перпендикулярную

к ней (\vec{E}_\perp). Одна из составляющих (\vec{E}_\parallel) пройдет через анализатор, а другая (\vec{E}_\perp) погасится.

Из рис. 4 видно, что

$$E_\parallel = E_0 \cos \varphi.$$

Отношение интенсивностей пропорционально отношению квадратов амплитуд:

$$\frac{I_0}{I_\parallel} = \frac{E_0^2}{E_\parallel^2} = \frac{1}{\cos^2 \varphi},$$

следовательно, интенсивность поляризованного света, прошедшего через анализатор, $I_\parallel = I_0 \cos^2 \varphi$.

В данной работе в качестве поляризатора и анализатора применяются поляроиды. Поляроиды имеют существенные недостатки: не обеспечивают полной поляризации света, особенно в области коротких волн, и не одинаково прозрачны для лучей разных длин волн. При использовании поляроидов закон Малюса записывают в виде

$$I = I_1 + I_0 \cos^2 \varphi. \quad (1)$$

В предлагаемом упражнении изучается зависимость интенсивности света I от угла φ с помощью фотоэлемента с запирающим слоем. При этом зависимость величины фототока от интенсивности света, падающего на фотоэлемент, считается линейной. Схема установки приведена на рис. 5.

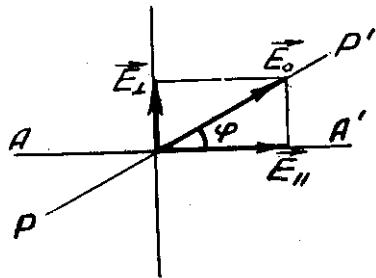


Рис. 4

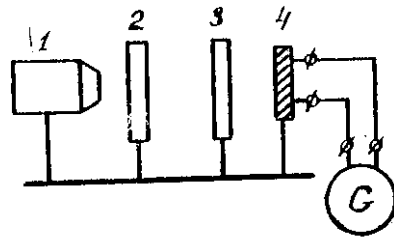


Рис. 5

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ УПРАЖНЕНИЯ

1. Установить приборы на оптической скамье таким образом, чтобы центры источника света 1, поляризатора 2, анализатора 3 и фотоэлемента 4 были на одной прямой. Метку на оправе анализатора совместить с нулем шкалы.

2. Включить лампу 1 и, вращая поляризатор, установить его так, чтобы интенсивность света, прошедшего через оба поляроида,

была максимальной. Фотоэлемент расположить на таком расстоянии от анализатора, чтобы стрелка гальванометра не выходила за пределы шкалы.

3. Вращая анализатор на 360° , отмечать через каждые 15° величину фототока i .

Все результаты измерений записать в табл. 1.

Таблица 1

φ, град.	0	15	30	...
i				

4. Построить график зависимости фототока i от величины угла φ .

Примечание. Величина фототока i пропорциональна интенсивности света I , падающего на фотоэлемент. Поэтому для проверки формулы (1) можно откладывать по оси ординат вместо интенсивности света I величину фототока i .

Упражнение № 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ САХАРА В РАСТВОРЕ

При прохождении линейно-поляризованного света через некоторые вещества плоскость поляризации световых лучей поворачивается. Это явление называется вращением плоскости поляризации. Вещества, вращающие плоскость поляризации, называются оптически активными. К ним относятся кварц, винная кислота, раствор сахара в воде и другие. Свет, прошедший через оптически активное вещество, остается линейно-поляризованным. Некоторые оптически активные вещества поворачивают плоскость поляризации вправо, т. е. по часовой стрелке, если смотреть навстречу лучу (правовращающие вещества), другие — влево (левовращающие вещества).

В растворах оптически активных веществ вращение плоскости поляризации пропорционально длине L пути луча в растворе и концентрации раствора C :

$$\varphi = \varphi_0 CL, \quad (2)$$

где φ_0 называется удельным вращением.

Удельное вращение зависит от длины волны света, рода растворителя, температуры раствора и численно равно углу поворота плоскости поляризации при длине пути в 1 м и объемно-весовой концентрации данного оптически активного вещества, равной 1 кг/м³.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ УПРАЖНЕНИЯ

1. Установить прибор на оптической скамье согласно рис. 6. Между источником света 1 и поляризатором 2 вставить светофильтр 5. Метку на оправе анализатора 3 совместить с делением шкалы 90° . Вращением поляризатора установить минимум интенсивности света. Наблюдение произвести визуально из точки М.

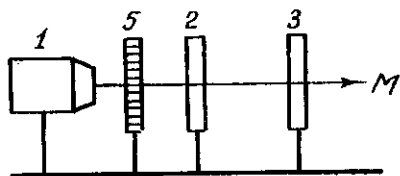


Рис. 6

определить по шкале на оправе анализатора. Отсчеты угла произвести 5 раз и найти среднее арифметическое значение по формуле

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n \varphi_i.$$

4. Измерить толщину слоя раствора L и по формуле (2) рассчитать концентрацию сахара в растворе \bar{C} по среднему значению φ (для зеленых лучей $\varphi_0 = 0,818$ град. м²/кг, для желтых лучей $\varphi_0 = 0,665$ град. м²/кг).

Все результаты записать в табл. 2.

Таблица 2

i	φ_i	$\Delta \varphi_i$	$(\Delta \varphi_i)^2$
1			
2			
3			
4			
5			

5. Оценить погрешность измерения концентрации C :

а) определить среднеквадратичную погрешность результата среднеарифметического $\bar{\varphi}$:

$$S_{\bar{\varphi}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta \varphi_i)^2}{n(n-1)}};$$

б) найти абсолютную погрешность результата серии измерений

$$\Delta \varphi = t_{\alpha, n} S_{\bar{\varphi}},$$

где $t_{\alpha, n}$ — коэффициент Стьюдента, зависящий от числа произведенных измерений n и от величины надежности α ;

в) вычислить относительную погрешность измерения по формуле

$$\varepsilon_{\varphi} = \frac{\Delta \varphi}{\bar{\varphi}} \cdot 100 \%;$$

г) определить относительную погрешность измерения концентрации C по формуле

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta \varphi}{\bar{\varphi}} + \frac{\Delta \varphi_0}{\varphi_0} + \frac{\Delta L}{L}$$

(принять, что $\Delta \varphi_0 = 0,0005$ град. м²/кг);

д) найти доверительные границы погрешности результата измерения

$$\Delta C = \bar{C} \varepsilon_c;$$

е) окончательный результат записать в виде

$$C = \bar{C} \pm \Delta C.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое явление подтверждает поперечный характер световых волн?

2. Какой свет называется естественным, линейно-поляризованным и частично поляризованным?

3. Дайте определение плоскости колебаний и плоскости поляризации.

4. В чем состоит явление двойного лучепреломления?

5. Какими свойствами обладают обыкновенный и необыкновенный лучи?

6. Объясните устройство поляроида.

7. Вывести закон Малюса.

8. Как изменится интенсивность света после прохождения через поляризатор и анализатор, если их главные плоскости взаимно перпендикулярны?

9. Какие вещества называются оптически активными?

10. От чего зависит угол поворота плоскости поляризации одноосным оптически активным веществом?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И. В. Курс общей физики. — М.: Наука, 1982, т. 2, § 134, 136, 141.

2. Ландсберг Г. С. Оптика. — М.: Наука, 1976, § 101, 102, 105, 106, 107, 166.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДНОГО РАСТВОРА САХАРА ПО ВРАЩЕНИЮ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

Приборы и принадлежности: сахариметр типа СУ-2, набор поляриметрических трубок с раствором сахара разной концентрации.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Некоторые вещества при прохождении через них поляризованного света обладают способностью поворачивать плоскость поляризации. Такие вещества называются оптически активными. К оптически активным веществам относятся: кристаллический кварц, скипидар, раствор сахара и другие.

В зависимости от того, в каком направлении со стороны наблюдателя происходит поворот плоскости поляризации (по часовой стрелке или против), различают правовращающие и левовращающие оптически активные вещества. Растворы свекловичного и тростникового сахара являются правовращающими, а раствор фруктового сахара — левовращающим.

Угол поворота плоскости поляризации φ для монохроматического света пропорционален концентрации раствора C и длине пути l , проходимому светом в веществе:

$$\varphi = \alpha_0 l C,$$

где α_0 — удельное вращение;
 l — толщина слоя раствора;
 C — концентрация раствора.

Зная α_0 , l и φ , можно определить концентрацию раствора сахара. Если удельное вращение неизвестно, то определение неизвестной концентрации можно осуществить другим методом. Для этого приготовить эталонные растворы с известной концентрацией сахара и определить угол поворота плоскости поляризации для эталонных растворов. Их должно быть не менее трех. Затем по-

строить градуировочный график в координатах φ и C . Пользуясь графиком, определить неизвестную концентрацию C_x по измеренному углу поворота плоскости поляризации φ_x (рис. 1).

Этот метод используется в данной работе.

Прибор, с помощью которого определяется угол поворота плоскости поляризации, называется поляриметром. Если шкала поляриметра проградуирована в соответствии с концентрацией раствора сахара, то такой поляриметр называется сахариметром.

УСТРОЙСТВО ПРИБОРА

Простейший поляриметр состоит из двух николей: поляризатора и анализатора и кюветы с раствором оптически активного вещества между ними (рис. 2).

Поляризатор Π пропускает свет, у которого колебание вектора \vec{E} происходит в одной определенной плоскости, например, в вертикальной. При отсутствии кюветы с раствором анализатор A повернут так, что его плоскость поляризации перпендикулярна плоскости поляризации поляризатора, т. е. николи скрещены (рис. 3);

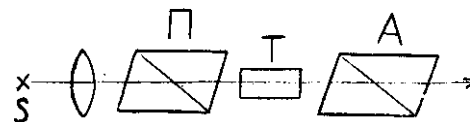


Рис. 2

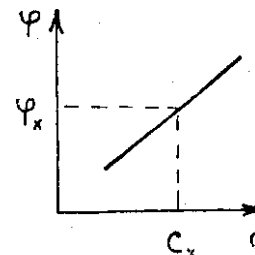


Рис. 1



Рис. 3

свет от источника S не проходит. Такая установка николей называется «установкой на темноту». Если при этом между анализатором и поляризатором поставить кювету с раствором оптически активного вещества, то вследствие поворота плоскости поляризации некоторая часть света пройдет через анализатор и наступит просветление поля зрения. Для того, чтобы восстановить «настройку на темноту», необходимо повернуть анализатор на такой же угол, на который повернулась плоскость поляризации света при прохождении через раствор сахара.

Удельное вращение α_0 зависит от длины волны, поэтому для разных длин волн угол поворота φ будет разным. Таким образом,

если установка освещается белым светом, то путем поворота анализатора на угол φ можно погасить лучи одной какой-то длины волны, лучи же других длин волн частично пройдут через анализатор и поле зрения будет окрашенным. Для того, чтобы этого не происходило, установку освещают либо монохроматическим светом, либо используют светофильтры. Следует отметить, что измерение угла φ путем установки анализатора на полное затемнение поля зрения сначала без трубки, а затем с трубкой с раствором сахара, является недостаточно точным, так как человеческий глаз мало чувствителен к небольшим изменениям абсолютной величины яркости равномерно затемненного поля зрения. Зато глаз очень чувствителен к малейшему различию в яркости смежных частей поля зрения, окрашенных в один и тот же цвет. Это свойство глаза используется в полутеневом поляриметре, который устанавливается не на темноту поля зрения, а на равное освещение двух половин поля зрения.

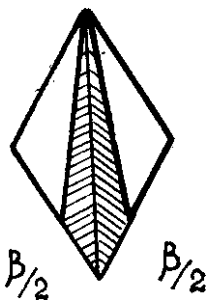


Рис. 4

Полутеневой поляризатор состоит из двух поляризаторов, главные сечения которых образуют между собой малый угол β . Такой поляризатор можно получить, если разрезать николю-поляризатор по диагональному сечению, сошлифовать каждую половинку на угол $\beta/2$ и затем склеить половинки бесцветным клеем (рис. 4). Теперь главные сечения левой P_1 и правой P_2 половинки полученной призмы не совпадают и образуют острый угол β . Поле зрения поляриметра разделено на две половины 1 и 2 диагональю OC , представляющей собой

линию, по которой склеены две призмы (рис. 5). В одной половине колебания вектора \vec{E} световой волны лежат в плоскости OP_1 , а в другой — в плоскости OP_2 . Если анализатор установлен так, что главное сечение его AA перпендикулярно OC , то есть биссектрисе угла β , то обе половины поля зрения прибора без трубки будут одинаково слабо освещены (полутень). В этом случае проекции вектора \vec{E} на пропускное направление анализатора равны по величине (рис. 6).

Действительно, по закону Малюса

$$I_1 = I_2 = I_0 \cos^2 \gamma,$$

где I_0 — интенсивность света, падающего на анализатор, I_1 и I_2 — интенсивность левой и правой половины поля зрения, γ — угол между главными сечениями поляризатора (P_1O и P_2O) и главным сечением AA анализатора.

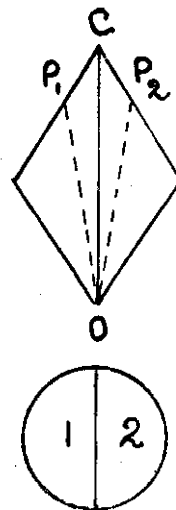


Рис. 5

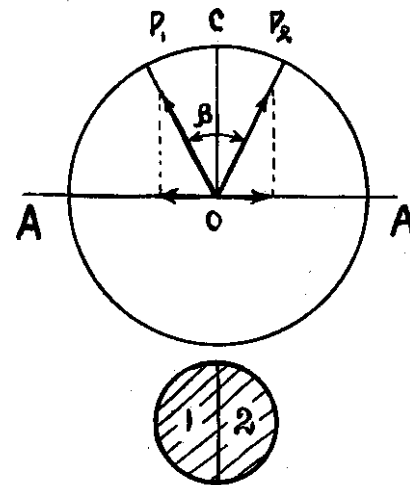


Рис. 6

Точно также будет, и когда $AA \parallel OC$. Только в этом случае будет более яркое освещение обеих половин поля зрения. Положение анализатора $AA \perp OC$, то есть когда обе половины поля слабо освещены (полутень), более выгодно, чем когда $AA \parallel OC$, так как глаз более чувствителен к изменению малых интенсивностей.

Если в камеру сахариметра поместить трубку T с сахарным раствором между поляризатором и анализатором, то происходит поворот плоскости поляризации света на угол φ по часовой стрелке. Проекции вектора \vec{E} на пропускное направление анализатора будут уже не равны (рис. 7). Пунктиром показаны новые положения плоскости поляризации при наличии кюветы с сахаром. В этом случае освещенности половинок поля зрения будут различны. Левая половина поля потемнеет, правая посветлеет, так как

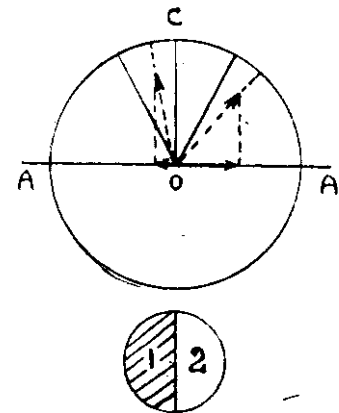


Рис. 7

$$I_1 = I_0 \cos^2 (\gamma + \varphi);$$

$$I_2 = I_0 \cos^2 (\gamma - \varphi);$$

Чтобы восстановить равенство освещенностей обеих половин поля зрения, необходимо повернуть анализатор на угол φ , что и делается в поляриметрах. В сахариметрах анализатор и поляризатор остаются неподвижными, однородность поля зрения восстанавливается с помощью специального устройства — кварцевого компенсатора. В этом устройстве используется свойство кристаллического кварца поворачивать плоскость поляризации света, идущего вдоль оптической оси.

Угол поворота плоскости поляризации

$$\varphi = \alpha l,$$

где α — постоянная вращения, l — толщина пластины.

Для восстановления однородности поля зрения достаточно на пути лучей, прошедших через раствор сахара, поместить пластинку из левовращающего кварца такой толщины, чтобы она вызвала поворот плоскости поляризации влево на тот же угол φ , то есть, чтобы плоскость поляризации вернулась в первоначальное положение.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

На рис. 8 представлена оптическая схема сахариметра СУ-2. Свет от осветительной лампы 1 проходит вдоль оптической оси прибора последовательно через светофильтр 2, 3, конденсор 4, полутеневую призму (поляризатор) 5, защитное стекло 6, поляриметрическую трубку Т, защитное стекло 7, кварцевый компенсатор 8, 9, 10, поляриод (анализатор) 11, зрительную трубу 12.

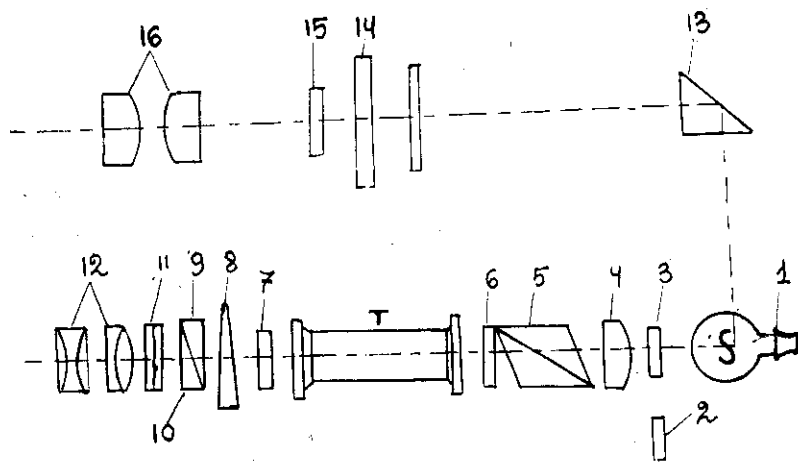


Рис. 8

Отсчет показаний осуществляется по шкале 14 и нониусу 15 через верхнюю двухлинзовую лупу 16. Шкала освещается от лампы 1 с помощью призмы полного внутреннего отражения 13. Зрительная труба фокусируется на выходную грань полутеневой призмы.

Компенсатор сахариметра СУ-2 состоит из подвижного левовращающего кварцевого клина 9 (этот «контрклин» 9 компенсирует отклонение света в кварцевых клиньях).

При нейтральном положении клиньев, когда толщина левовращающей пластины равна толщине правовращающей, компенсатор не вращает плоскость поляризации, проходящего через него света. Нуль шкалы соответствует этому положению компенсатора.

Подвижный клин с помощью микрометрического винта можно перемещать перпендикулярно оси прибора. Меняя толщину подвижного клина и, следовательно, длину пути лучей в этом клине, можно поворачивать плоскость поляризации вправо, если путь луча в правовращающем клине больше, чем в левовращающем, и влево, если левовращающая пластина оказывается толще правовращающей.

Вместе с подвижным клином перемещается линейная шкала, скользящая вдоль неподвижного нониуса.

Восстановив однородность поля, по шкале с нониусом можно отсчитывать угол, на который сахарный раствор поворачивает плоскость поляризации проходящего через него света. Шкала прибора проградуирована в так называемых сахарных градусах (индекс S):

$$1^\circ S = 0,3462 \text{ углового градуса.}$$

Пределы измерения по шкале от 40 до $100^\circ S$. Точность измерения $\pm 0,1^\circ S$.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить осветитель. Вращая окуляр зрительной трубы, сфокусировать зрительную трубу так, чтобы была ясно видна линия раздела поля зрения.

2. Вращением окуляра лупы настроить на резкость лупу шкалы. Оценить точность нониуса.

3. Проверить положение нуля. Для этого при отсутствии трубки с раствором сахара вращать винт компенсатора и получить однородное полутеневое поле зрения.

4. Поместить в камеру прибора поляриметрическую трубку с раствором сахара известной концентрации. Так как раствор повернул плоскость поляризации луча на угол φ , фотометрическое равенство половин поля зрения нарушается, видна четкая граница различно окрашенных полутеней. Вращая винт компенсатора, вос-

становить однородность поля зрения, то есть добиться того, чтобы полутени стали неразличимы. В этот момент записать деление шкалы сахариметра φ в таблицу.

Опыт повторить три раза и вычислить угол поворота $\bar{\varphi}$ как среднее из трех отсчетов.

	Концентрация раствора, %					
	2	6	8	10	12	X
Угол поворота, φ, S						
φ						

5. Провести аналогичные измерения для всех остальных трубок с растворами известной концентрации.

6. По полученным средним значениям угла поворота для каждой концентрации построить график зависимости угла $\bar{\varphi}$ поворота плоскости поляризации сахарным раствором от концентрации сахарного раствора. Такой график называется градуировочным. Он должен быть достаточно точным. Наименьшее расстояние, которое можно отсчитать на графике, должно быть не меньше величины абсолютной ошибки измерений. Поэтому следует до построения графика оценить абсолютную погрешность измерения углов $\Delta\varphi$. Для выполнения этой операции можно воспользоваться методом обработки при прямых измерениях /4/. Правильно выбрав масштаб и построив график, следует полученные погрешности отметить на графике в соответствующих точках в виде отрезков прямой, длина которых равна погрешности (с учетом масштаба). Таким образом, можно указать на графике разброс экспериментальных точек.

7. Измерить угол поворота плоскости поляризации света раствором неизвестной концентрации и определить по градуировочному графику концентрацию этого раствора C_x . Такая математическая операция называется интерполяцией.

8. Оценить погрешность результата C_x .

В данном случае удобно сначала оценить относительную погрешность

$$\varepsilon = \frac{\Delta C_x}{C_x} = \frac{\Delta \varphi_x}{\varphi_x}$$

Затем из этой формулы определить

$$\Delta C_x = \bar{C}_x \varepsilon.$$

9. Записать результат с учетом погрешности измерений $C_x = (\bar{C}_x \pm \Delta C_x)$ с надежностью $\alpha = 0,95$.

Примечание: В данной работе оценить погрешность полученного графического представления $\varphi = f(c)$ можно и графическим усреднением подобно тому, как это рекомендуется в лабораторной работе № 3-25 по данной теме.

10. Сделать выводы по проделанной работе. Оценить примененный метод измерений и сделать замечания по работе установки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем отличается поляризованный свет от естественного?
2. Какие существуют способы получения поляризованного света?
3. Сформулируйте закон Малюса.
4. Каков принцип определения концентрации сахара в растворе?
5. Какие вещества называются оптически активными? Приведите примеры таких веществ.
6. Что значит установка на темноту в поляриметре?
7. Какой поляризатор применяется в сахариметре?
8. Устройство и назначение компенсатора.
9. Практическое использование закона Малюса и явления вращения плоскости поляризации в сахариметре.
10. Полутеневой метод и его преимущество.
11. От чего зависит угол поворота плоскости поляризации света оптически активным раствором?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И. В. Курс общей физики. — М.: Наука, 1971, т. 3, § 28, 32, 34.
2. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Курс общей физики. — М.: Высшая школа, 1971, § 8.1, 8.2, 8.5.
3. Ландсберг Г. С. Оптика. — М.: Наука, 1976, § 101, 102, 105, 106, 163—168.
4. Барвинок В. А., Богданович В. И., Косенко А. И. Математическая обработка результатов эксперимента. — Куйбышев: КуАИ, 1983.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ВЕРДЕ

Цель работы: изучение эффекта Фарадея.

Принадлежности: установка для изучения магнитного вращения плоскости поляризации.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Эффект Фарадея или явление Фарадея — поворот плоскости поляризации линейно-поляризованного света, распространяющегося в веществе вдоль силовых линий магнитного поля. Открыто М. Фарадеем в 1846 году. Значение его открытия в истории физики исключительно велико. Это было первое магнитооптическое явление, т. е. явление, в котором обнаруживалась связь между оптическими и электромагнитными процессами.

В 1896 году Зееманом было обнаружено следующее магнитооптическое явление — расщепление спектральных линий под действием внешнего магнитного поля.

Количественные законы явления были установлены Фарадеем и наиболее полно исследованы Верде.

1. Угол, на который поворачивается плоскость поляризации, пропорционален напряженности магнитного поля H и пути l , пройденному светом в поле:

$$\varphi = V l H. \quad (1)$$

Константа V называется постоянной Верде. V зависит от свойств вещества, частоты света и (обычно слабо) от температуры.

2. Знак угла φ зависит от знака H , так как H входит в уравнение (1) в первой степени. При изменении направления поля H плоскость поляризации поворачивается в другую сторону и величина угла φ удваивается.

Такое же удвоение угла φ имеет место, если свет проходит в поле H дважды — один раз вдоль линий поля, а затем, после нормального отражения от зеркала, — навстречу линиям магнитного поля. Следовательно, направление вращения связано с направлением магнитного поля и не зависит от направления распространения света.

В этом заключается феноменологическое отличие явления Фарадея от естественной оптической активности: в последнем случае, по возвращении света назад, $\varphi = 0$.

За счет многократного отражения от зеркальных поверхностей при постоянной толщине исследуемого вещества (рис. 1), как отметил еще Фарадей, можно значительно увеличить суммарный угол поворота φ .

3. Магнитное вращение обнаруживают все тела, хотя обычно в очень слабой степени. Чрезвычайно сильное вращение наблюдалось в очень тонких прозрачных слоях ферромагнитных металлов (Fe, Ni, Co).

Различают право- и левовращающие вещества. Большинство веществ правовращающие ($V > 0$, положительные). В этом случае поворот плоскости поляризации происходит вправо (по часовой стрелке) для наблюдателя, смотрящего вдоль света, а свет распространяется вдоль направления магнитного поля. Все диамагнетики и некоторые парамагнетики относятся к правовращающим веществам. В левую сторону вращают плоскость поляризации ферромагнетики и большинство парамагнетиков. Для них $V < 0$ (отрицательные вещества).

При внесении в магнитное поле веществ с естественной оптической активностью угол поворота плоскости поляризации для естественной активности складывается с углом поворота, вызванным магнитным полем.

4. Постоянная Верде V зависит от длины волны λ по закону Био:

$$V = A/\lambda^2 + B/\lambda^4,$$

где постоянные вещества A и B слабо зависят от температуры.

5. Особенностью явления Фарадея является его безынерционность. Магнитное вращение плоскости поляризации наступает через весьма малый промежуток времени после включения магнитного поля и через столь же малый промежуток времени пропадает после выключения магнитного поля.

Время запаздывания порядка 10^{-9} секунд (по последним данным 10^{-12} секунды).

Это позволяет применить эффект Фарадея для создания оптического затвора для модуляции света и т. д.

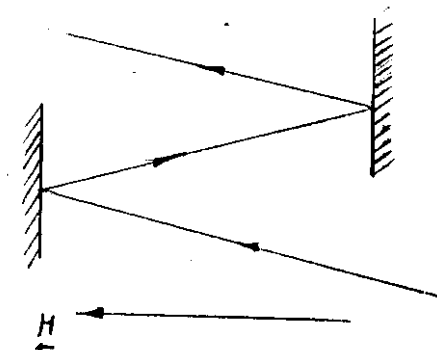


Рис. 1

За последние годы эффект Фарадея широко используется при решении задач, связанных с лазерной техникой.

Были найдены и синтезированы вещества с большим значением постоянной Верде.

Большую роль эффект Фарадея играет при научных исследованиях.

Для объяснения вращения плоскости поляризации Френель предложил рассматривать линейно-поляризованную волну как суперпозицию двух циркулярно поляризованных волн с противоположным направлением вращения вектора \vec{E} .

Напомним, что циркулярно поляризованной или поляризованной по кругу называется такая волна, в которой вектор \vec{E} равномерно вращается по кругу в плоскости R , перпендикулярной направлению распространения волны (рис. 2).

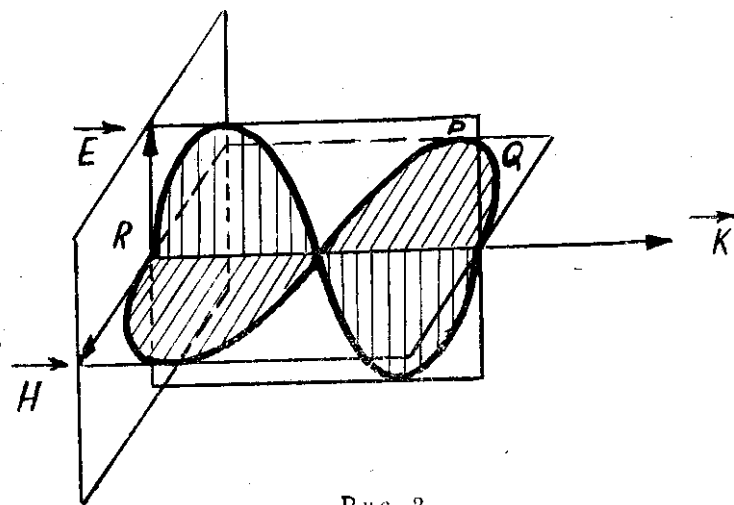


Рис. 2

Если угловая скорость вращения ω лево- и правциркулярно поляризованных волн одинакова, то суммарный вектор $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ всегда будет направлен вдоль оси OO (рис. 3,а), что соответствует оптически неактивному веществу.

Если же угловая скорость вращения векторов \vec{E}_1 и \vec{E}_2 разная, то результирующий вектор \vec{E} повернется на некоторый угол φ вправо или влево относительно своего начального положения (рис. 3,б) Это и соответствует повороту плоскости поляризации при распространении света в оптически активной среде.

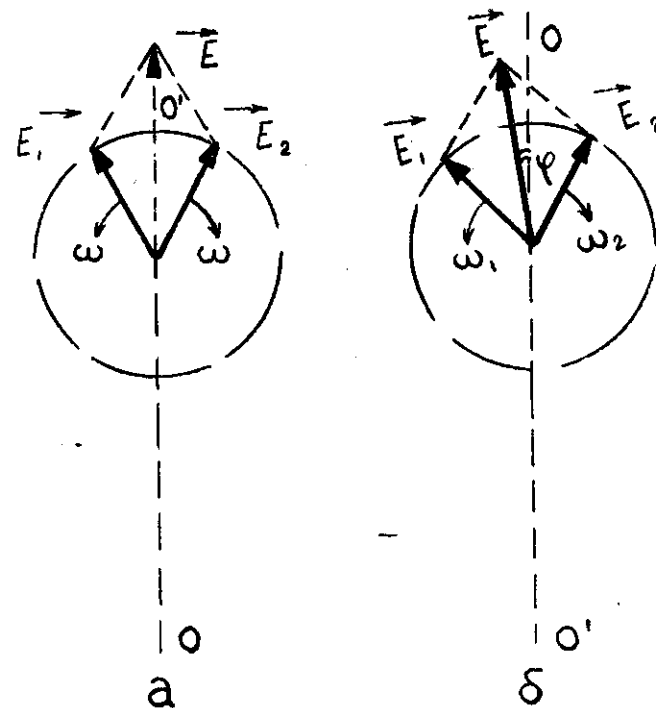


Рис. 3

Существуют элементарная классическая и квантово-механическая теории магнитооптических явлений. Физическое содержание теорий магнитной оптической активности вещества изложено в [1, 2, 3].

Под действием магнитного поля электроны, входящие в состав атомов или молекул вещества, начинают прецессировать. В связи с этим изменяется характер вторичных излучений отдельных электронов, что в конечном счете приводит к вращению плоскости поляризации.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для наблюдения эффекта Фарадея в учебном эксперименте используют прозрачные вещества, не обладающие естественной оптической активностью.

На рис. 4 представлена принципиальная схема установки, где S — источник света, Π и A — поляризатор и анализатор, установленные на темноту; \mathcal{E} — экран; C — соленоид с большим количеством витков. Трубка T с оптически неактивным веществом помещена внутрь соленоида.

Электрическая схема содержит выпрямитель переменного тока ВСА-5К, амперметр для измерения силы тока в цепи соленоида и предусматривает возможность коммутации тока (переключатель К).

В отсутствие тока свет от источника не проходит через систему, что соответствует установке П и А на темноту.

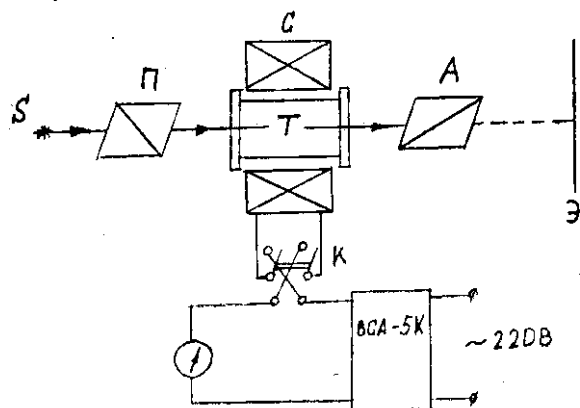


Рис. 4.

При включении электрического тока внутри соленоида возникает продольное магнитное поле, происходит вращение плоскости поляризации света в магнитном поле на угол φ , в результате чего на экране наблюдается светлое пятно (поле просветляется).

Вращением анализатора А можно убедиться, что в данном случае действительно имеет место поворот плоскости поляризации на угол φ , а не какое-либо другое явление. Поворот анализатора на угол φ снова дает темноту и возможность экспериментального определения угла вращения плоскости поляризации φ .

Так как вращение плоскости поляризации зависит от длины волны, при использовании белого света анализатор может гасить последовательно лишь колебания определенных длин волн и полного затемнения получить невозможно. Поэтому в работе используются светофильтры.

Чтобы использовать зависимость направления вращения плоскости поляризации от направления магнитного поля, переключателем К изменим направление тока в цепи соленоида. При том же значении величины тока поворот плоскости поляризации происходит на тот же угол, но в другую сторону.

В настоящей работе определение зависимости φ от H и вычисление постоянной Верде V осуществляется на базе сахариметра типа СУ-2. Магнитное поле создается в соленоиде с $n = 24200 \text{ м}^{-1}$

(витков на метр длины) током от 0,2 до 0,6 А от выпрямителя ВСА-5К. Длина кюветы с исследуемой жидкостью $l = 0,39 \text{ м}$.

Угол поворота плоскости поляризации φ измеряется с помощью полутеневого устройства по равномерной освещенности поля зрения. (Устройство и принцип действия сахариметра изложены в методических указаниях к лабораторной работе 3-13 «Определение концентрации водного раствора сахара по вращению плоскости поляризации света»).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать электрическую схему согласно рис. 4. Установить в обойме сахариметра красный светофильтр. Включить осветитель. Сфокусировать окуляр зрительной трубы на резкое изображение. Затем при отсутствии тока в цепи соленоида с помощью компенсатора добиться равномерной освещенности двойного поля зрения сахариметра.

2. Включить ток в цепи соленоида и установить первое значение тока $I = 0,2 \text{ А}$. С помощью компенсатора добиться снова равномерной освещенности двойного поля и сделать отчет по шкале сахариметра φ в сахарных градусах.

3. Произвести аналогичные измерения для силы тока $I = 0,4 \text{ А}$ и $I = 0,6 \text{ А}$.

Для каждого значения тока измерения проводить трижды.

4. Перекинуть ключ К в другое положение и при тех же значениях силы тока повторить измерения.

Внимание! Во избежание нагрева исследуемой жидкости при токах свыше 0,5 А запрещается держать соленоид под напряжением более 1 мин.

Полученные результаты занести в таблицу:

$I, \text{ А}$	$\varphi, \text{ }^\circ\text{S}$	$I, \text{ А}$	$\varphi, \text{ }^\circ\text{S}$
0,2	1	-0,2	1
	2		2
	3		3
0,4	1	-0,4	1
	2		2
	3		3
0,6	1	-0,6	1
	2		2
	3		3

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИИ

1. По данным таблицы построить график зависимости угла поворота плоскости поляризации $\varphi, ^\circ S$ от величины силы тока I . Каждому значению тока в общем случае будут соответствовать на графике $\varphi, ^\circ S = f(I)$ три точки.

Через экспериментальные точки провести прямую линию так, чтобы отклонения точек по разные стороны от прямой были приблизительно одинаковы и минимальны.

При построении графика необходимо руководствоваться следующими правилами:

прежде всего масштаб графика должен соответствовать той точности, с которой были найдены величины, наносимые на график. Лучше всего брать масштаб таким, чтобы величина абсолютной погрешности соответствовала на графике отрезку не более 1 мм, поэтому графики должны выполняться на миллиметровой бумаге.

Это указание относится как к величинам, откладываемым по оси ординат, так и к величинам по оси абсцисс. Если измерения в студенческих лабораторных работах производятся с точностью до 1%, то общий размер графика будет порядка $100 \times 100 \text{ мм}^2$.

На графике по координатным осям необходимо указывать не только откладываемые величины, но и единицы их измерения.

В данной работе абсолютную погрешность измерения силы тока $(\Delta I)_a$ определяем по классу точности амперметра в амперах А, абсолютную погрешность измерения углов поворота $(\Delta \varphi)_a$ в сахарных градусах — по цене деления шкалы сахариметра.

Значения отдельных отрезков координатных осей обозначаются равномерно через 10–20 мм, промежуточные же значения не указываются.

При выборе начала координат следует руководствоваться тем, чтобы полностью использовалась вся площадь чертежа /4/.

Экспериментальные точки следует отмечать жирными, хорошо выделяющимися точками, сначала карандашом. Зависимость проводят также карандашом, чтобы можно было стереть, используя график для контроля и улучшения эксперимента.

2. В формуле (1) для угла поворота плоскости поляризации выразить напряженность магнитного поля H соленоида и получить расчетную формулу

$$\varphi = V I H = V n I l. \quad (2)$$

Из формулы (2) постоянная Верде

$$V = \frac{\varphi}{n I l}.$$

При изменении тока на величину ΔI угол поворота плоскости поляризации изменится на $\Delta \varphi$, и окончательно получим

$$V = \frac{1}{n l} \left(\frac{\Delta \varphi}{\Delta I} \right). \quad (3)$$

3. Величину $\Delta \varphi / \Delta I$ определить из графика $\varphi, ^\circ S = f(I)$, переводя сахарные градусы в угловые градусы:

$$1^\circ S = 0,3462 \text{ угловых градуса.}$$

4. Вычислить постоянную Верде V по формуле (3). Так как мы пользовались графически усредненной прямой, то вычисленное значение V представляет собой усредненное для данного интервала токов и углов значение V .

5. Оценить погрешность результата.

Из выражения для постоянной Верде (3) относительная ошибка результата

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta(\Delta \varphi)}{\Delta \varphi} + \frac{\Delta(\Delta I)}{\Delta I}$$

складывается из относительной ошибки измерения изменения силы тока ΔI и относительной ошибки определения изменения угла $\Delta \varphi$, соответствующего этому ΔI .

В данной работе $\Delta I = I_1 - I_2$, где $I_1 = +0,6 \text{ А}$, $I_2 = -0,6 \text{ А}$, т. е. $\Delta I = 1,2 \text{ А}$. Величину $(\Delta I) = 2 (\Delta I)_a$ определяем из класса точности прибора (при выборе масштаба графика уже должна быть оценена).

Величину $\Delta(\Delta \varphi)$ определяем из графика для всей полосы погрешностей в интервале углов $\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ (рис. 5).

Полученные погрешности следует отметить на графике в соответствующих точках в виде отрезков прямой, длина которых равна погрешности (с учетом масштаба). Такой способ представления погрешностей дает возможность обнаружить ошибки эксперимента и указать на графике разброс экспериментальных точек.

6. Записать значение постоянной Верде с учетом погрешности измерений

$$V = (V \pm \Delta V) \text{ угл. град / А}$$

с надежностью $\alpha = 0,95$.

По таблице значений постоянной Верде для разных веществ определить, какая жидкость находится в кювете.

7. Сделать выводы по проделанной работе. Рекомендуются проанализировать достоинства и недостатки примененного метода измерений и сделать замечания по работе установки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается эффект Фарадея? Перечислите его основные закономерности.

2. В чем причина возникновения оптической активности вещества при воздействии на него внешнего магнитного поля?

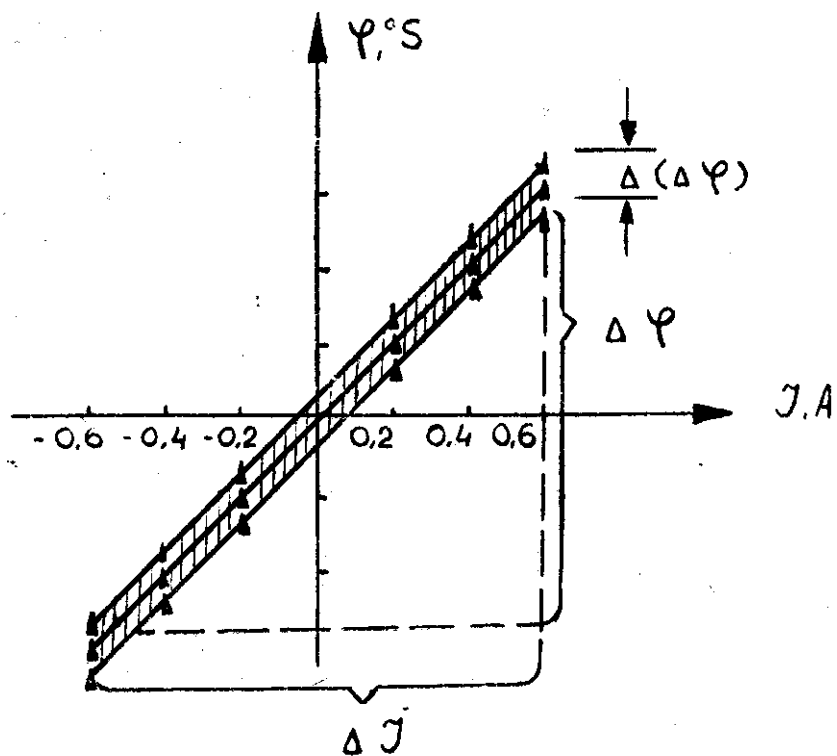


Рис. 5

3. Опишите полутеневой метод измерения угла поворота плоскости поляризации.

4. Почему при работе с сахариметром необходимо применять светофильтр?

5. Какая картина будет наблюдаться, если через соленоид пропустить переменный ток?

6. С какой целью изменяют направление тока в соленоиде?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И. В. Курс общей физики. — М.: Наука, 1982, т. 2, § 57, 140.
2. Калитневский Н. И. Волновая оптика. — М.: Наука, 1971, гл. VI, § 6.5.
3. Матвеев А. Н. Оптика. — М.: Высшая школа, 1985, § 44.
4. Барвинок В. А., Богданович В. И., Косенко А. И. Математическая обработка результатов эксперимента. — Куйбышев: КуАИ, 1983.

Составители: Дмитрий Федорович Китаев,
Мargarита Александровна Левченко,
Татьяна Сергеевна Соломина,
Иван Андреевич Соломин

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Редактор Т. К. Кретьнина
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор Т. И. Пайкина

Сдано в набор 31.10.86 г. Подписано в печать 10.12.86 г.
Формат 60×84 1/16. Печать высокая. Гарнитура литературная.
Усл. п. л. 1,6. Уч.-изд. л. 1,5. Т. 2000 экз.
Заказ 1043. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт им. академика С. П. Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Тип. ЭОЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.