

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

535.5

МИКРОВОЛНОВАЯ МОДЕЛЬ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ХОЛЕСТЕРИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ *)

Построена пропорциональная модель холестерического жидкого кристалла, пригодная для исследований в микроволновом диапазоне радиоволн. Модель состоит из ряда тонких листов пластика, к которым прикреплены медные проволочки-диполи, малые по сравнению с длиной волны используемого излучения. Направление проволочек на каждой следующей друг за другом пластинке изменяется винтообразно, а расстояние между пластинками, т. е. шаг винта модели, можно варьировать. Модель демонстрирует вращение плоскости поляризации, а также аналог оптического эффекта, типичного для холестерического кристалла, в том случае, когда шаг винта примерно равен длине используемых волн. Именно при круговой поляризации излучения с одним направлением вращения вектора \mathbf{E} имеет место отражение излучения от модели, при круговой поляризации другого направления — излучение проходит сквозь модель. Получено качественное согласие с оптическими экспериментальными данными и для отражения, и для распространения света сквозь холестерический жидкий кристалл.

1. ВВЕДЕНИЕ

Микроволновые модели вращения плоскости поляризации не новы. В хорошо известной «Оптике» Зоммерфельда¹ упоминаются подобные исследования².

В предыдущих экспериментах использовалось большое количество намотанных в одном направлении мелких медных проволочных спиралей, обернутых в папиросную бумагу и беспорядочно насыпанных в коробку. Эта система моделировала жидкость, вращающую плоскость поляризации.

То, что спирали вели себя как несвязанные резонаторы, когда их длина примерно равнялась половине длины волны, делало подобные опыты малопригодными в оптическом диапазоне электромагнитного спектра. Конечно, такая модель неприменима для оптически активных жидкостей и не является реальной моделью холестерического жидкого кристалла³.

Однако если представить молекулы жидкости в виде спиралей, гораздо меньших, чем длина микроволны, то в микроволновом диапазоне эффект вращения плоскости поляризации будет небольшим. Экспериментаторам в первоначальных опытах было удобнее, чтобы число спиралей не превышало сотни, чем применять их тысячи. Но при использовании малого числа спиралей использовалось усиление эффекта при резонансе.

В наших экспериментах, которые в большей степени моделируют явления, происходящие в холестерических жидких кристаллах, чем в жидкостях, несколько двояко-преломляющих пластинок были смонтированы так, что оптические оси в каждой пластинке поворачивались в определенной последовательности и на определенный угол (были выбраны углы 45°). Система в целом обладала винтовой симметрией. Можно было изменять шаг винта, оставляя при этом длину волны излучения постоянной. Когда шаг винта приближался к длине падающей волны, вращение плоскости поляризации, как и предполагалось, изменяло знак⁴. При резонансе излучение с круговой поляризацией одного направления пропускать моделью. Излучение с противоположной циркулярной поляризацией отражалось моделью. Результаты, полученные на микроволновой модели, сравнивались с данными, полученными в случае взаимодействия света с холестерическим жидким кристаллом.

*) Hendrik J. Gerritsen, Richard T. Yamaguchi, A. Microwave Analog of Optical Rotation in Cholesteric Liquid Crystals, Am. J. Phys. 39, 920 (1971). Перевод С. Л. Эльсгольд, под редакцией И. А. Яковлева.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для того чтобы сравнить результаты микроволновой модели с оптическими данными, использовались две установки: одна для проверки микроволновой модели, другая для исследования оптических свойств холестерического жидкого кристалла.

а) Устройство микроволновой модели. В основном модель устроена на основании предложения Фергасона (1966)³, в котором холестерический жидкий кристалл рассматривается как совокупность больших плоских молекул, составляющих ряд плоскостей с направлениями анизотропии, более или менее параллельными в одной плоскости. В каждой плоскости характерное направление изменяется на небольшой угол (обычно порядка градуса), создавая винтообразное расположение направлений «быстрого» и «медленного» распространения электромагнитных волн⁵.

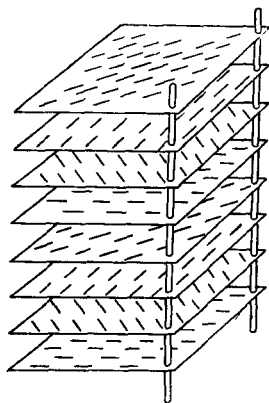


Рис. 1. Микроволновая модель холестерического жидкого кристалла.

Для 3,2-см волны модель представляет собой совокупность тонких 0,75-мм листов пластика акрила, на которых наклеены 5,5-мм, т. е. малые по сравнению с длиной волны, кусочки медной проволоки диаметром 0,2 мм, расположенные с поверхностной плотностью около 5 шт/см². На каждом листке они помещены параллельно друг другу, образуя «анизотропную» пластинку для микроволны. Направление проволочек на каждом следующем листке повернуто влево на угол $\varphi = 45^\circ$. Таким образом, в стопе из 8 листов реализуется поворот ориентации диполей на 360° (рис. 1). Между листками пластика чередуются маленькие прокладки из губчатой резины, служащие опорой для листов пластика и позволяющие изменять расстояние между листками, тем самым моделируя изменение температуры холестерического жидкого кристалла.

б) Техника эксперимента с микроволновой моделью. Источник представляет собой клистрон, излучающий 3,2-см волны. Излучение коллимируется сферическим металлическим зеркалом обычным образом. Вектор E излучаемой волны ориентирован вертикально.

Приемником служил рупор, соединенный с кристаллическим диодом. Выпрямленный ток детектора измерялся микроамперметром. В то же время повороты приемного рупора, т. е. изменения ориентации «анализатора», расположенного между излучателем и приемником, измерялись по градусному лимбу. Без модели максимальные показания получались при вертикальной ориентации рупора, нулевые — при горизонтальной.

Модель помещалась на расстоянии около 2 м от источника и в 5 см от приемника. Приемник вращался до тех пор, пока показания микроамперметра не становились минимальными. Затем «шаг винта» модели изменялся, и приемник вращался до тех пор, пока ток через диод снова не становился минимальным. Таким образом, угол вращения вектора напряженности поля волны наблюдался как функция «шага винта» модели (рис. 2). Оказалось существенным, чтобы листки были параллельны друг другу и эквидистантны, в противном случае зависимость угла поворота от «шага винта» вблизи разрыва кривой была более пологой, чем это показано на рис. 2.

Диэлектрическая проницаемость акрила, используемого в модели, была измерена с помощью интерферометра Майкельсона, который мы сконструировали для микрорадиоволн, используя стеклянную светоразделительную пластинку и две квадратные алюминиевые пластинки в качестве зеркал. Одна из них снабжена подвижным проградуйрованным механизмом⁶. Этот же интерферометр использовался для опре-

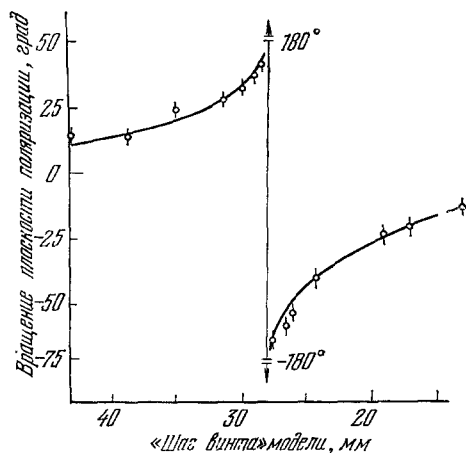


Рис. 2. Зависимость вращения плоскости поляризации микроволны от «шага винта» модели (положительное направление вращения выбрано по часовой стрелке).

деления длины волны излучения в вакууме путем измерения разности между положениями интерференционных минимумов при различных длинах плеч интерферометра.

в) Техника эксперимента с холестерическим жидким кристаллом. Чтобы получить график зависимости угла поворота плоскости поляризации монохроматического света от шага винта в холестерическом жидком кристалле, применялась следующая методика.

Порция холестерических жидких кристаллов использовалась для приготовления на пластинке из проводящего стекла ($25 \times 25 \text{ мм}^2$) пленки жидкого кристалла, которая становилась окрашенной при температуре чуть-чуть выше комнатной. Наносился жидкий раствор, растворитель испарялся, оставляя пленку холестерического жидкого кристалла толщиной около $0,05 \text{ мм}$. После того как растворитель испарялся (в течение двух часов), образец герметизировали покровным стеклом, так как он изменяет свои свойства, если находится открытым в течение нескольких часов. Образец нагревался слабым током порядка 20 мА , пропускаемым через проводящее стекло, а температура образца контролировалась с помощью медно-константовой термпары. При возрастании температуры примерно на каждые 2° образец последовательно изменял окраску от красной до фиолетовой.

В ходе оптических измерений использовался гелий-неоновый лазер ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$), обеспечивающий монохроматичность и параллельность рабочего светового луча.

Для измерения угла вращения плоскости поляризации луч лазера пропускали через линейный поляризатор (если выходные окна разрядной трубки не ориентированы под брестеровским углом к ее оси), холестерический жидкий образец, анализатор, фотодетектор. Фотодетектор был соединен с гальванометром (рис. 3). В отсутствие образца анализатор вращали до тех пор, пока фотодетектор не отмечал минимума интенсивности излучения. Затем то же самое проделывалось при наличии образца при различных температурах. Угол, на который поворачивалась плоскость поляризации падающего света, представлял собой разность между углом, при котором наблюдался минимум излучения, и ранее найденным нулевым отсчетом на лимбе анализатора. Результаты показаны на рис. 4.

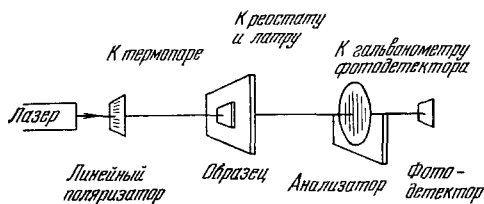


Рис. 3. Схема оптической установки, применявшейся для измерения угла поворота плоскости поляризации в зависимости от температуры для холестерического кристалла.

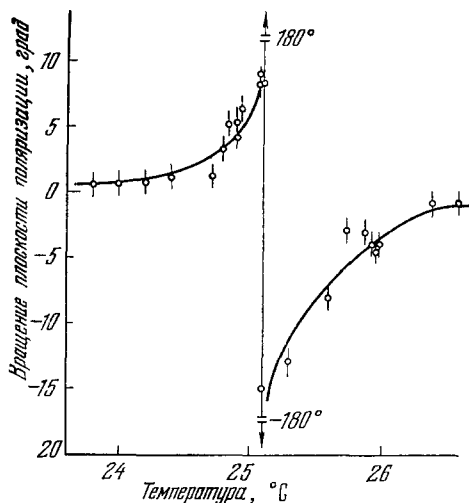


Рис. 4. Зависимость вращения плоскости поляризации света с длиной волны 6328 \AA от температуры (положительное направление вращения выбрано по часовой стрелке).

таким образом, зависимость от «шага винта» показан на рис. 4. При возрастании температуры до «критической» $25,1^\circ \text{C}$ угол вращения плоскости поляризации возрастает в направлении по часовой стрелке. При охлаждении нагретого препарата угол вращения плоскости поляризации возрастает в направлении против часовой стрелки. При «критической» температуре $25,1^\circ \text{C}$ прошедший через препарат свет поляризован по кругу.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

а) Результаты экспериментов с микроволновой моделью. Измерения, произведенные с помощью интерферометра Майкельсона, дали для показателя преломления используемого пластика значение $1,6$, а для длины волны излучения клистрона в вакууме — значение $3,2 \text{ см}$.

б) Результаты эксперимента с холестерическим жидким кристаллом. График зависимости вращения плоскости поляризации от температуры в холестерическом жидком кристалле (и,

4. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

а) Анализ экспериментальных данных для микроволновой модели. Измерения величины «шага винта», при котором вращение изменяет знак, и длины микроволны, преимущественно поляризованной по кругу, дали величину 28 мм, в то время как длина микроволны в вакууме — 32 мм. Эту разницу можно объяснить следующим образом: толщина всех 8 листов пластика, умноженная на 0,6 (разность между показателями преломления пластика и воздуха), равна 3,6 мм. Это — та разность хода, которую надо добавить к полученным 28 мм, чтобы получить ожидаемое значение длины волны 32 мм. С помощью теории де Вриеса ⁴ точную форму кривой, изображенной на рис. 2, нельзя получить, так как в теории де Вриеса предполагается гораздо большее число дипольных плоскостей в модели и меньшие углы между направлениями анизотропии, чем в нашем случае. Кроме того, эта теория не учитывает многократное отражение и поглощение излучения в используемой модели. Поэтому можно говорить только о качественном согласии экспериментов с теорией де Вриеса.

б) Анализ оптических экспериментальных данных для холестерического кристалла. График, показанный на рис. 4, в общем согласуется с полученным Фергасоном ³. Количественную теорию де Вриеса нельзя применить, так как не известны ни зависимость $\lambda_{\text{рез}}$ от температуры, ни величина α . Теория де Вриеса дает для угла поворота плоскости поляризации θ следующее выражение:

$$\theta = \pi \alpha^2 / 4 (\lambda / \lambda_{\text{рез}})^2 [1 - (\lambda / \lambda_{\text{рез}})^2],$$

где $\lambda_{\text{рез}}$ — фактический шаг винта структуры и

$$\alpha = (n_{\parallel} - n_{\perp}) / 0,5 (n_{\parallel} + n_{\perp}).$$

Единственное, что мы знаем из наблюдавшейся последовательности чередования цветов кристаллического слоя, это то, что с возрастанием температуры шаг винта уменьшается. Несколько удивляет на графике рис. 4 то, что, как и в случае микроволн, области малых значений «шага винта» соответствует большая оптическая активность, чем на противоположной ветви графика. Это обстоятельство противоречит и предсказаниям теории. Однако в оптической области это расхождение можно устрани́ть, если подтвердится, что связь между «шагом винта» и температурой нелинейна.

5. ВЫВОДЫ

Наблюдавшиеся с помощью описанной микроволновой модели эффекты вращения плоскости поляризации качественно согласуются с результатами, полученными для холестерически жидких кристаллов, и с теорией де Вриеса. Если мы ведем наблюдения в направлении распространения электромагнитной волны, то при резонансе микроволновая модель, так же как и холестерический жидкий кристалл, отражает свет, поляризованный по кругу против часовой стрелки (последнее уже подтвердилось). Вращение плоскости поляризации изменяет знак как в микроволновой, так и в красной области оптического спектра, чего и следовало ожидать. В обоих случаях мы имеем левовинтовое вращение. Действие волновой модели не может быть описано в деталях с помощью теории де Вриеса, так как в эксперименте не реализованы некоторые допущения этой теории.

Ясно, что для согласования микроволновой модели с теорией де Вриеса в количественном отношении необходимо уменьшить двойное лучепреломление, например используя для изготовления диполей диэлектрические материалы вместо медной проволоки, уменьшить угол между направлениями анизотропии в соседних слоях модели и увеличить число последних.

Г. Герритсен, Р. Ямагути

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. A. S o m m e r f e l d, Optics, N.Y.—L., Academic Press, 1969, p. 165, (см. перевод: А. Зоммерфельд, Оптика, М., ИЛ, 1953, стр. 219).
2. K. F. L i n d m a n, Ann. d. Phys. 63, 621 (1920); 69, 270 (1922).
3. J. L. F e r g a s o n, Mol. Cryst. 1, 293 (1966); Sci. American 211, 77 (1964).
4. H. L. d e V r i e s, Acta Cryst. 4, 219 (1951).
5. F. C. A. P o c k e l s, Lehrbuch der Kristalloptik, Lpz.-B., Teubner, 1906, S. 291.
6. J. S t r o n g, Concepts of Classical Optics, San Francisco, Freeman, 1958.
7. Г. С. Г о р е л и к, Колебания и волны, М., Физматгиз, 1959 *).

*) Добавлено редактором перевода. (Прим. перев.)