

03;05;07;12

## ЭФФЕКТ ВРАЩЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ КРИСТАЛЛИЗИРУЮЩИЙСЯ СЛОЙ

© Л.Г.Качурин, В.В.Лобачев, А.В.Триллс, И.Е.Писарев

Балтийский государственный технический университет им. Д.Ф. Устинова,  
198005 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 25 октября 1994 г.)

В окончательной редакции 20 марта 1995 г.)

Представлены результаты экспериментального исследования трансформации поляризационных характеристик света при прохождении его через термодинамически необратимо кристаллизующийся слой воды. Причиной последнего является, по-видимому, наведенное через кристаллизационный потенциал двулучепреломление во льду.

Результатом взаимодействия светового излучения с веществом может являться изменение поляризационных характеристик излучения. Такой способностью обладают, например, некоторые естественноактивные вещества [1]. В работе же [2] описано новое оптическое явление, выражающееся в трансформации поляризационных характеристик света при прохождении его через термодинамически необратимо кристаллизующийся слой воды. Там же высказано предположение об электрооптической [3] природе нового эффекта, основанное на том, что при быстрой кристаллизации имеется зависимость между скоростью вращения поляризации проходящего излучения и величиной межфазного электрокинетического потенциала. Напряженность электрического поля в процессе кристаллизации может достигать величин порядка  $1 \text{ кВ/см}$  [2], что может быть достаточным для наведения двулучепреломления в кристаллах и, как следствие, трансформации поляризации проходящего света.

В работе [4] предложено теоретическое объяснение данного эффекта, построенное на основе теории эффекта Погкельса. Основное отличие связано с тем, что процесс трансформации поляризации может наблюдаться в изначально изотропной среде при воздействии на нее сильно неоднородного электрического поля. Согласно [4], причиной этой трансформации поляризации оптического сигнала в кристаллизующемся веществе должна являться порождаемая необратимостью фазового перехода продольная дисперсия собственной частоты колебаний молекулярного осциллятора в сильно неоднородном электрическом поле.

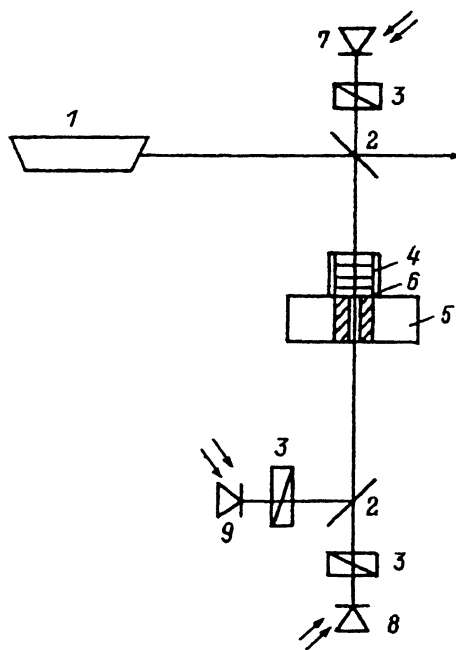


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — источник зондирующего излучения, 2 — делительные пластины, 3 — поляризаторы, 4 — кювета с водой, 5 — хладогенератор с медным хладопроводом, 6 — полупрозрачное зеркало — подложка кристаллизации, 7 — фотоприемник I, 8 — фотоприемник II, 9 — фотоприемник III.

Реально информации о механизме протекания этого явления накоплено мало, а теоретическое объяснение, предложенное в работе [4], пока остается гипотезой и требует детальной проверки. Не следует также забывать, что кристалл льда имеет гексагональную структуру и является оптически одноосным, поэтому обладает естественными двулучепреломляющими свойствами [5] (для длины волны 0.589 мкм лед имеет обыкновенный показатель преломления 1.309 и необыкновенный 1.313). В связи с этим необходимы комплексные экспериментальные исследования, целью которых является получение всесторонней информации о данном физическом проявлении, а также выявление основных факторов, влияющих на него.

Для этого разработана экспериментальная установка, включающая в себя систему формирования зондирующего излучения, кювету с исследуемым веществом, хладогенератор и регистрирующую аппаратуру (рис. 1). В качестве источников зондирующего излучения использовались He-Ne лазер, обеспечивающий линейно поляризованный свет с длинами волн 0.632 и 1.15 мкм, Ag лазер с длиной волны 0.51 мкм и ртутная лампа — источник "белого" света. Боковые стенки кюветы имели стеклянные окна для визуализации процесса, а также измерения скорости перемещения фронта кристаллизации. Температура основания кристаллизации фиксировалось медь-капелевой термомпарой. Кристаллизация льда обеспечивалась использованием в качестве хладогенетов спирта, охлажденного твердой углекислотой, или жидкого азота, что обеспечивало скорость охлаждения подложки кристаллизации в различных опытах в пределах 0.02–0.2 град/с, а скорость перемещения границы кристаллизации составляла 0.01–0.09 мм/с. Регистрация всех световых сигналов осуществлялась фотодиодами ФД-7.

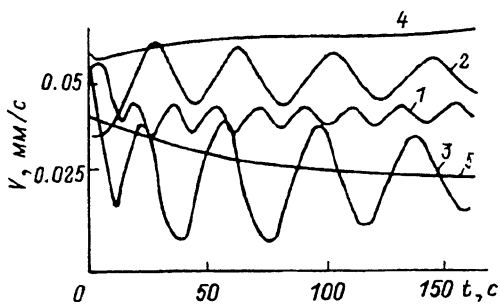


Рис. 2. Осциллограмма синхронного изменения сигналов на фотоприемниках. 1-3 — кривые модуляции интенсивности на фотоприемниках I, II, III соответственно, 4 — температура основания кристаллизации, 5 — скорость движения фронта кристаллизации.

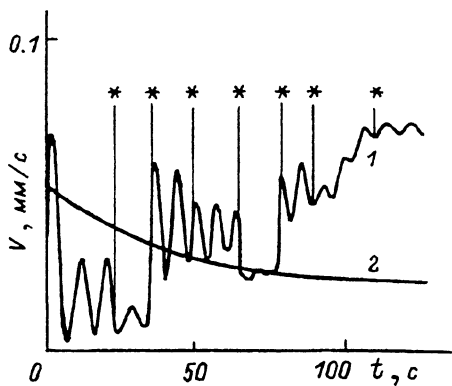


Рис. 3. Осциллограмма процесса совместно с вращением поляроида. Звездочкой обозначен момент поворота поляроида зондирующего излучения на угол  $30^\circ$ ; 1 — кривая модуляции интенсивности на фотоприемнике, 2 — скорость движения фронта кристаллизации.

На рис. 2 представлена характерная экспериментальная осциллограмма. На осциллограмму наложен график скорости перемещения фронта кристаллизации. В начальный момент заморозки происходит сильное рассеяние света (фотодиоды регистрируют сигналы, соответствующие темновому току), после чего происходит просветление слоя льда на подложке кристаллизации и фотодиоды начинают прописывать затухающую синусоиду с уменьшающейся частотой колебаний. При этом отраженный сигнал, который дважды проходил слой кристаллизации, имел удвоенную частоту колебаний в сравнении с сигналом, однократно прошедшим слой кристаллизации. Поляроиды перед фотодиодами I и II обеспечивали максимальные значения сигналов, а поляроид фотодиода III ослаблял сигнал приблизительно в два раза, что достигалось соответствующим поворотом поляроида против часовой стрелки, если смотреть по ходу луча. В результате зарегистрировано запаздывание колебаний кривой 2 по отношению к кривой 3, что свидетельствует о вращении поляризации вправо по ходу луча. Повторение данного опыта не дало изменения направления вращения, что исключает простые колебания поляризации, а также показывает, что реализуемые условия в диагностической кювете, а возможно, и исходная ориентация поляризации зондирующего излучения, обеспечивают строго определенное направление вращения.

Известно, что образование льда при неравновесной кристаллизации сопровождается большим спектром электрокинетических процессов [6]. Для выявления корреляции изучаемого оптического эффекта с индуцированным электрокинетическим потенциалом проведены опыты, где в процессе регистрации вращения плоскости поляризации в кювету добавлялся слабый раствор соляной кислоты. Согласно [6,7], увеличение pH раствора, например, добавлением небольшого количества кислоты должны приводить к уменьшению кристаллизационного потенциала. Если бы вращение поляризации вызывалось наведенным потенциалом, как это предполагалось в [2,4], то быстрое исчезновение последнего привело бы к резкой остановке регистрируемых

осцилляций. При этом изменение знака временной производной потенциала должно было бы приводить к изменению направления вращения плоскости поляризации зондирующего излучения (если причина вращения — эффект Поггеля). В экспериментах после добавления раствора кислоты кристаллизирующийся лед быстро мутнел, что, скорее всего, связано с возникновением большого числа мелких кристаллов, интенсивно рассеивающих свет. Последнее, к сожалению, не дало возможность четко зарегистрировать остановку осцилляций и сделать вывод о прямой связи вращения плоскости поляризации с электрокинетическим потенциалом.

Зондирование излучением He-Ne лазера (0.63 мкм) быстро кристаллизующегося льда полностью подтвердило наличие эффекта, описанного в работах [2,4]. Небольшая модернизация оптической схемы позволила экспериментально подтвердить наличие эффекта при зондировании излучением с длинами волн 0.51 (Ar лазер), 1.15 мкм (He-Ne лазер), а также при просвечивании белым светом ртутной лампы с различными широкополосными светофильтрами и без них. Характерной особенностью данной серии экспериментов явилось полное исключение влияния когерентных эффектов благодаря установке в оптической схеме за источником света специального рассеивателя. Различная чувствительность используемых приемников излучения для разных длин волн не позволила провести сравнение абсолютных значений интенсивностей, но при этом было однозначно установлено, что с увеличением длины волны зондирующего излучения происходит уменьшение скорости вращения вектора поляризации, выражающееся в увеличении периода колебаний интенсивности на осциллограмме.

В диагностической кювете цилиндрической формы отсутствуют особые направления в плоскости фронта кристаллизации, которые имели бы преимущество перед остальными направлениями. Оптическая ось, возникающая при кристаллизации воды, может ориентироваться случайным образом в определенных пределах. При зондировании кристаллизации льда ориентированным относительно кюветы линейно поляризованным излучением случайность ориентации оптической оси приводила в разных опытах к различным амплитудам осцилляции сигнала, а в некоторых случаях и к их отсутствию. Для изучения этого факта схема диагностики дополнялась четвертьволновой пластиной так, чтобы в ходе эксперимента можно было априори ориентировать (и даже поворачивать в процессе эксперимента) плоскость поляризации зондирующего излучения.

На рис. 3 представлена осциллограмма процесса с вращением поляроида. На осциллограмму также наложен график скорости перемещения фронта кристаллизации. Поворот поляроида приводил к изменению амплитуды колебаний интенсивности рабочего сигнала, причем при повороте на  $90^\circ$  амплитуда колебаний практически восстанавливалась. Это обстоятельство может быть объяснено наличием оптической оси двулучепреломления в зондируемой области, размер которой составлял 3 мм. При зондировании же лазерным пучком всей площади подложки кристаллизации (диаметр пучка 30 мм) такое характерное направление для всего нарастающего поликристалла льда не столь выражено, что, по-видимому, связано с интегральной самокомпенсацией воздействий от всех двулучепреломляющих участков и тем самым сглаживанием модуляции интенсивности при вращении поляроида.

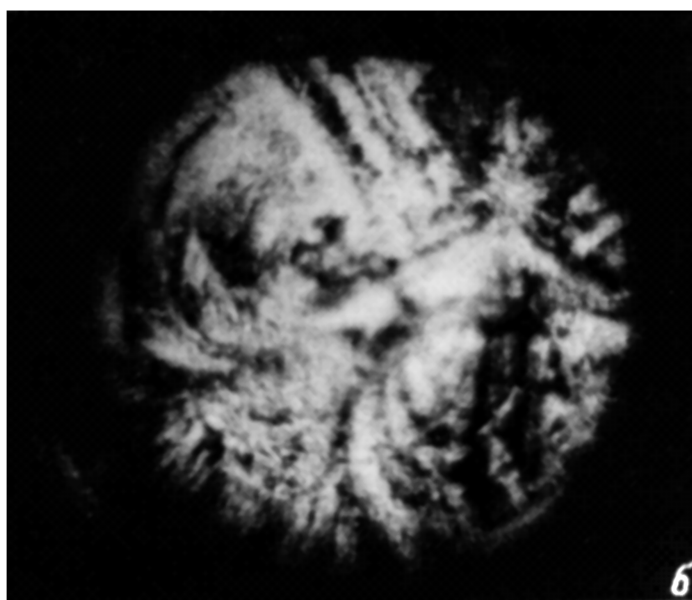
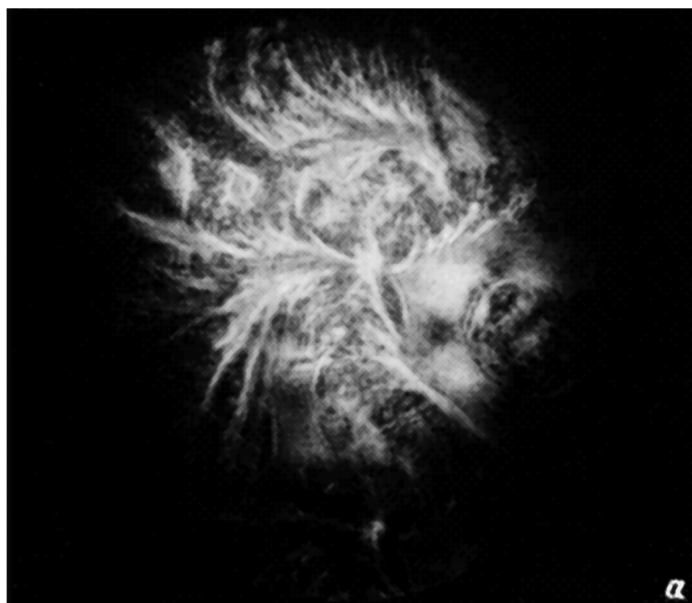


Рис. 4. Полярископogramмы кристаллизующегося льда.  
а — в когерентном свете He-Ne лазера, б — в рассеянном свете Ar лазера.

Для подробного изучения этого свойства необходима прямая визуализация всей кристаллизационной структуры и ее исследование с точки зрения возникающего двулучепреломления в направлении зондирования (перпендикулярно фронту кристаллизации). Для этих целей на установке собирался плоский полярископ [8], который позволял регистрировать во времени состояние двулучепреломления кри-

сталлизирующегося льда в исследуемой области. Для подсветки использовалось излучение Ar лазера с рассеивателем, He-Ne лазера и ртутной лампы. На рис. 4 представлены две полярископogramмы от He-Ne и Ar лазера. Так как первая полярископogramма получена в когерентном свете, то прослеживаются интерференционные взаимодействия, которые, несомненно, усложняют правильное восприятие исследуемого процесса. В рассеянном же освещении картина более адекватна, хотя свою неопределенность начинает вносить зерно дисперсного рассеивателя.

Наибольшую информативность обеспечили полярископogramмы, полученные при использовании белого света. В этом случае цветность изохром определяет уровень разности фаз обыкновенной и необыкновенной составляющих поляризованного света. На полярископogramмах удалось зафиксировать изменение во времени цвета некоторых участков поверхности заморозки, что говорит о наличии двулучепреломления на этих участках в растущем поликристалле льда. Временное изменение разности фаз и является причиной вращения плоскости поляризации. Вместе с тем на полярископogramмах обнаружены зоны, где отсутствует изменение двулучепреломления, что доказывает и отсутствием осцилляций интенсивности в ряде экспериментов. В опытах с регистрацией отраженного сигнала со всей площади кюветы результирующее изменение двулучепреломления носит интегральный характер и зависит от величины двулучепреломления и ориентации оптических осей всех растущих кристаллов в исследуемой области. Результатом последнего может являться возникновение поликристаллического образования характеризующегося эллипсоидом показателей преломления и собственной интегральной оптической осью. Временная последовательность полярископogramм показала, что по мере увеличения толщины льда размер зон с одинаковым двулучепреломлением уменьшается, следствием чего являются деполяризация излучения и исчезновение модуляций интенсивности зондирующего излучения.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования полностью подтвердили наличие эффекта вращения плоскости поляризации излучения, проходящего через термодинамически необратимо кристаллизующийся слой воды. В настоящей работе установлено: 1) при двукратном прохождении слоя кристаллизации частота вращения поляризации в два раза больше в сравнении со случаем однократного прохождения кристаллизационного слоя; 2) с увеличением длины волны зондирующего излучения частота вращения поляризации уменьшается; 3) полярископическая диагностика показала, что не весь лед по поверхности кюветы обладает двулучепреломляющими свойствами, следовательно, при диагностике изменения поляризации со всей поверхности кюветы, возникает состояние интегрального двулучепреломления от всех участков; 4) детальное объяснение эффекта вращения следует искать, видимо, в неравновесности процесса кристаллизации, который либо наводит через кристаллизационный потенциал двулучепреломление во льду, либо обеспечивает построение поликристаллической структуры с двулучепреломляющими свойствами, отличными от естественных.

## Список литературы

- [1] *Волькенштейн М.В.* Молекулярная оптика. М.; Л., 1951.
  - [2] *Качурин Л.Г., Петков В.Х.* // ДАН. 1991. Т. 318. № 3. С. 586–589.
  - [3] *Келих С.* Молекулярная нелинейная оптика. / Пер. с польского. М., 1981.
  - [4] *Качурин Л.Г.* Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. № 4. С. 349–353.
  - [5] *Справочник по химии* / Под ред. Б.П. Никольского. М.: Химия, 1971. 1168 с.
  - [6] *Качурин Л.Г., Бекряев В.И., Псаломщиков В.Ф.* // ДАН. 1967. Т. 174. № 5. С. 1122–1125.
  - [7] *Качурин Л.Г.* Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеоиздат, 462 с.
  - [8] *Дюрелли А., Райли У.* Введение в фотомеханику. М.: Мир, 1970. 484 с.
-