

УДК 534:535

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ЖИДКОМ КРИСТАЛЛЕ

О. А. Капустина, В. Н. Лупанов

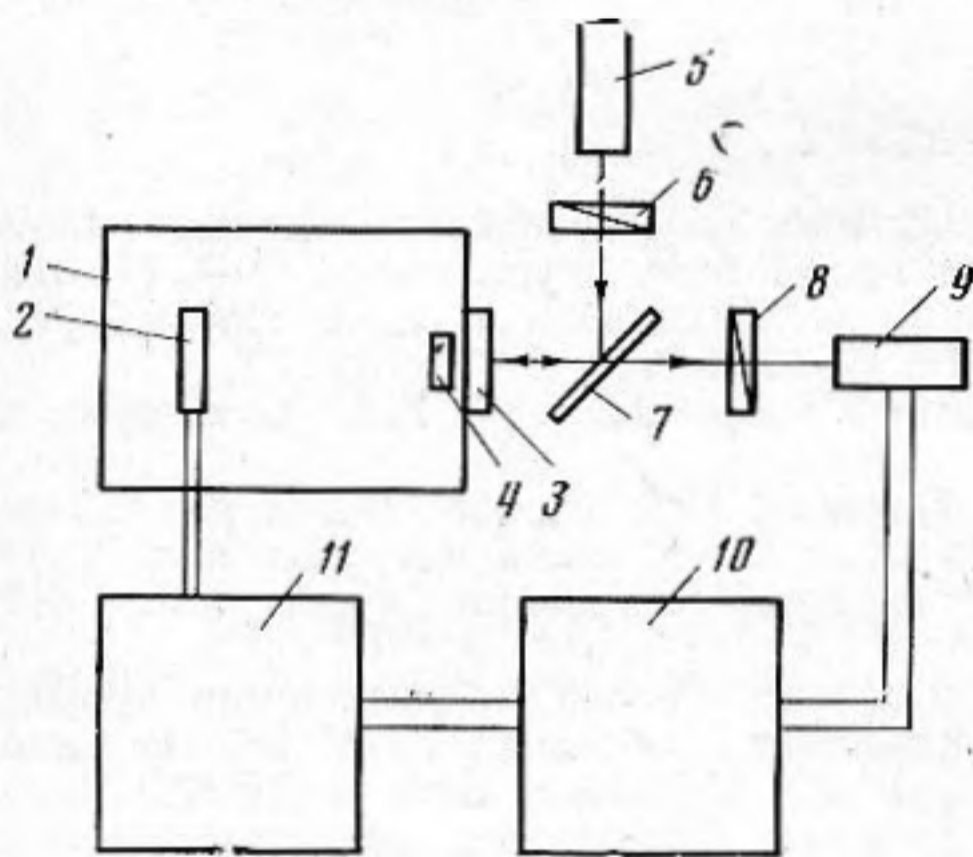
Разработан и исследован преобразователь с жидким нематическим кристаллом, основанный на явлении рассеяния света и предназначенный для визуализации акустических изображений. Получены амплитудные характеристики преобразователя при толщинах кристаллического слоя 10—100 мк. Показано, что при увеличении толщины слоя чувствительность повышается. Приведены фотографии акустических изображений ряда объектов, находящихся в жидкой среде, полученные с помощью разработанного преобразователя.

Акустические колебания позволяют управлять структурно-чувствительными свойствами ориентированного слоя жидкого кристалла и вызывают различные акустооптические эффекты [1, 2]. Одна из возможных областей использования этих эффектов — создание преобразователей на жидких кристаллах для визуализации акустических изображений. В работе [3] описан акустооптический преобразователь, в котором используется изменение двулучепреломления слоя нематического кристалла с гомеотропной ориентацией при воз-

действии акустических колебаний.

Нами исследованы оптические свойства слоя с гомеотропной ориентацией молекул нематического кристалла при воздействии акустических колебаний и выяснена возможность создания акустооптического преобразователя, основанного на эффекте рассеяния света таким слоем.

Активным элементом акустооптического преобразователя является ячейка в виде тонкого слоя ориентированного нематического вещества 4'-метоксибензилиден-4-бутиланилин, заключенного между звукопрозрачной пленкой из лавсана толщиной 80 мкм с отражаю-



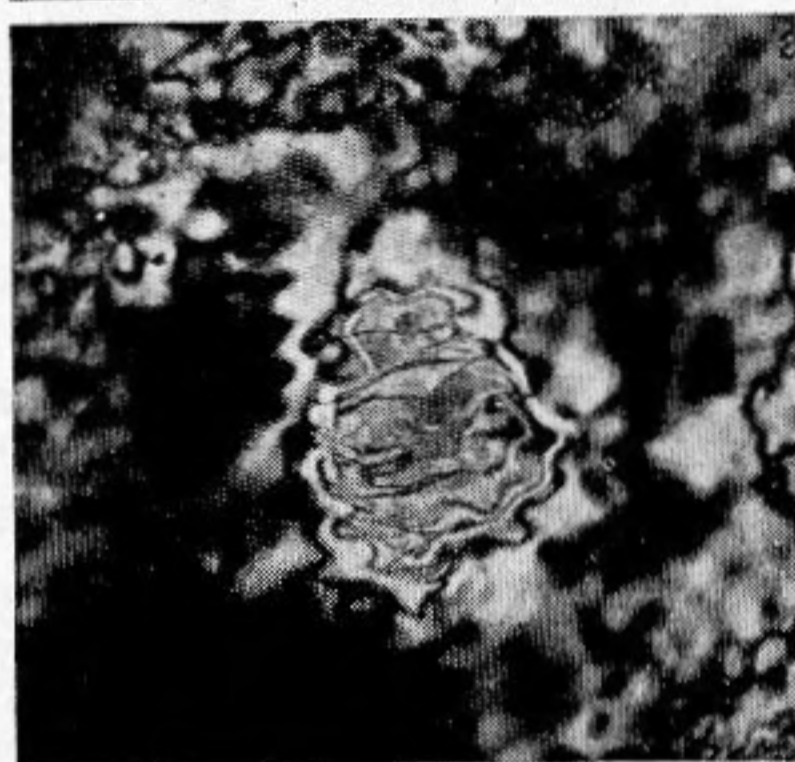
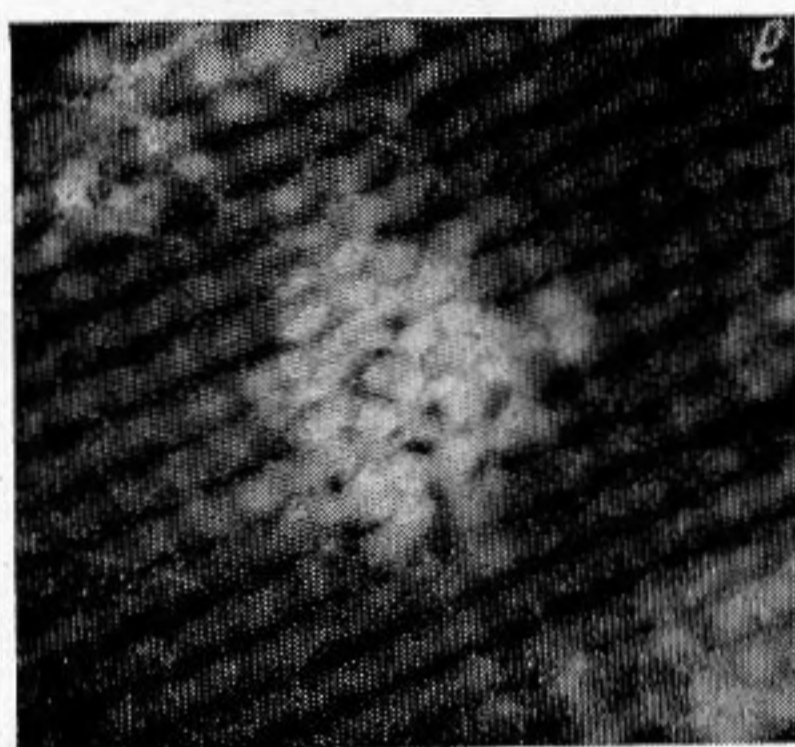
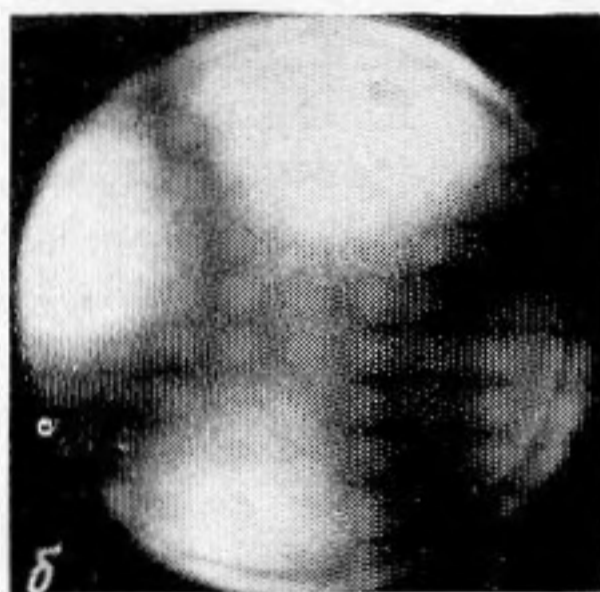
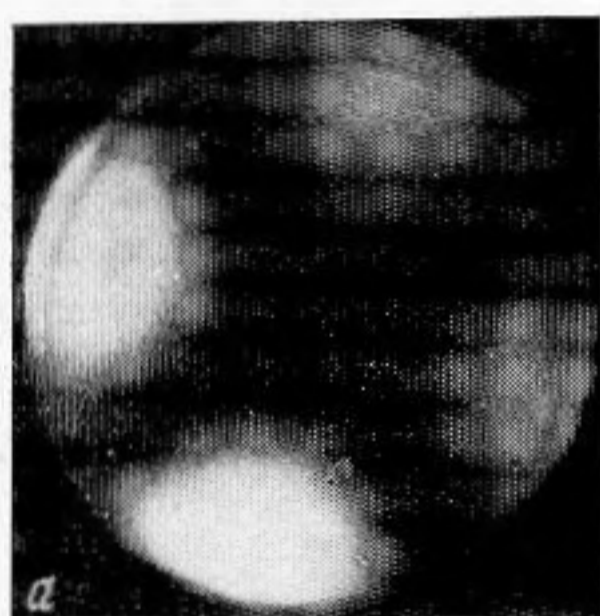
Фиг. 1. Блок-схема экспериментальной установки

щим свет покрытием и оптически прозрачной пластиной из стекла толщиной 2 мм и диаметром 60 мм. Толщина слоя задавалась прокладками из фторопласта. Гомеотропная ориентация слоя создавалась путем обработки поверхности пленки лецитином. Ячейка монтировалась в торце наполненной водой кюветы 1 так, что ее звукопрозрачная поверхность была обращена к акустическому излучателю 2 (фиг. 1); расстояние между излучателем и ячейкой 3 составляло 200 мм. Объект 4 помещался на оси зву-

кового пучка вблизи ячейки. Исследования проводились на частоте 3,2 Мгц при комнатной температуре, измерение интенсивности звука производилось с помощью радиометра.

Оптическая часть установки предполагает работу ячейки в отраженном свете и состоит из источника света 5 (He—Ne-лазер или лампа накаливания), полупрозрачного зеркала 7 и поляроидов 6, 8. Луч света, отра-

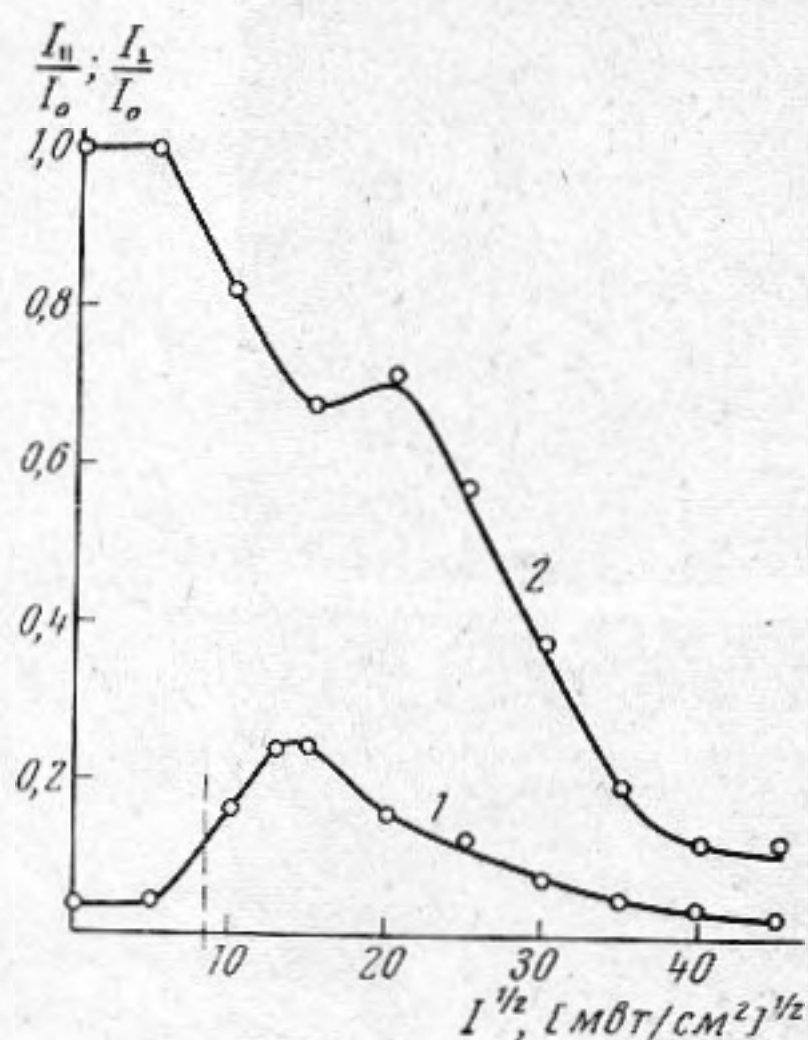
Фиг. 2. Динамика изменения структуры в акустическом поле при наблюдении в сходящемся свете: *а* — $\mathcal{I}=0$, *б* — $\mathcal{I}=50$ мвт/см²; и в параллельном свете: *в* — 60, *г* — 196; *д* — 1600 мвт/см²



жившись от полупрозрачного зеркала, падает на слой в направлении нормали к отражающей поверхности, дважды его проходит, а затем регистрируется фотоумножителем 9. Сигнал с фотоумножителя поступает на вход двухкоординатного самописца 10, ко второму входу которого прикладывается линейно-возрастающее напряжение, пропорциональное электрическому напряжению, подводимому от генератора 11 к излучателю 2. Была предусмотрена возможность поворота фотоумножителя относительно нормали к поверхности слоя.

При опытах исследовались слои толщиной 10, 40 и 90 мкм с первоначальной ориентацией длинных осей молекул в направлении нормали к

поверхности слоя. По своим оптическим свойствам такой слой подобен пластине одноосного кристалла, вырезанной перпендикулярно оптической оси. Воздействие акустических колебаний изменяет структуру слоя. Наблюдения в сходящемся поляризованном свете показали, что при превышении некоторой акустической интенсивности \mathcal{U}' характерная для одноосной структуры интерференционная картина в виде темного креста (фиг. 2, а) принимает вид гиперболы (фиг. 2, б), что указывает на синхронную переориентацию ансамбля молекул в слое. Это приводит к изменению двулучепреломления, так что прошедший через слой линейно поляризованный луч изменяет свою поляризацию, вследствие чего наблюдается так называемое просветление слоя, сопровождаемое в ряде случаев изменением его окраски. Характерный для этой стадии деформации слоя вид структуры, наблюдаемой в параллельных лучах поляризованного света при интенсивности 60 мвт/см², представлен на фиг. 2, в для слоя толщиной 40 мкм. Неравномерность просветления слоя можно отнести на счет неравномерности поля излучателя. Величина интенсивности \mathcal{U}' характеризует чувствительность структуры к акустическому воздействию. По мере повышения интенсивности в некотором интервале значений \mathcal{U} интерференционная картина не изменяется, а лишь увеличивается расстояние между вершинами гиперболы, что свидетельствует об увеличении отклонения молекул от направления нормали к слою.



Фиг. 3. Поляризационные характеристики слоя толщиной 40 мкм на частоте 3,2 Мгц

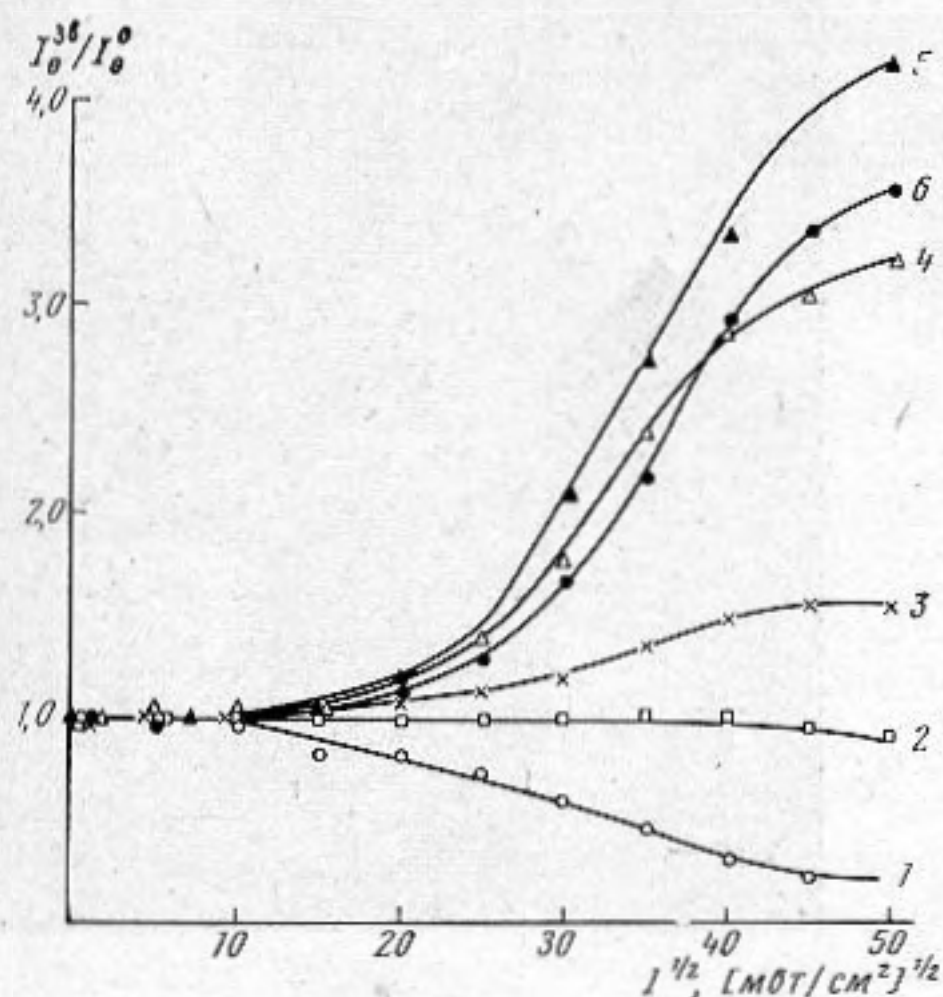
С дальнейшим увеличением интенсивности слой, по-видимому, перестает существовать как монокристалл (исчезает описанная выше интерференционная картина) и в нем развиваются потоки. Скорость, область распространения и масштаб этих потоков при данной толщине слоя и частоте колебаний определяются интенсивностью \mathcal{U} . С ее увеличением все большие участки слоя вовлекаются в движение и изменяется структура потоков. Представленные на фиг. 2, г и д фотографии показывают вид структуры при интенсивностях 196 и 1600 мвт/см² соответственно. Мелкомасштабные течения, развивающиеся при большой интенсивности, отчетливо видны на фиг. 2, д.

Следует отметить, что, согласно данным группы японских авторов [4], появлению в слое потоков предшествует образование системы доменов. Нами это явление обнаружено не было.

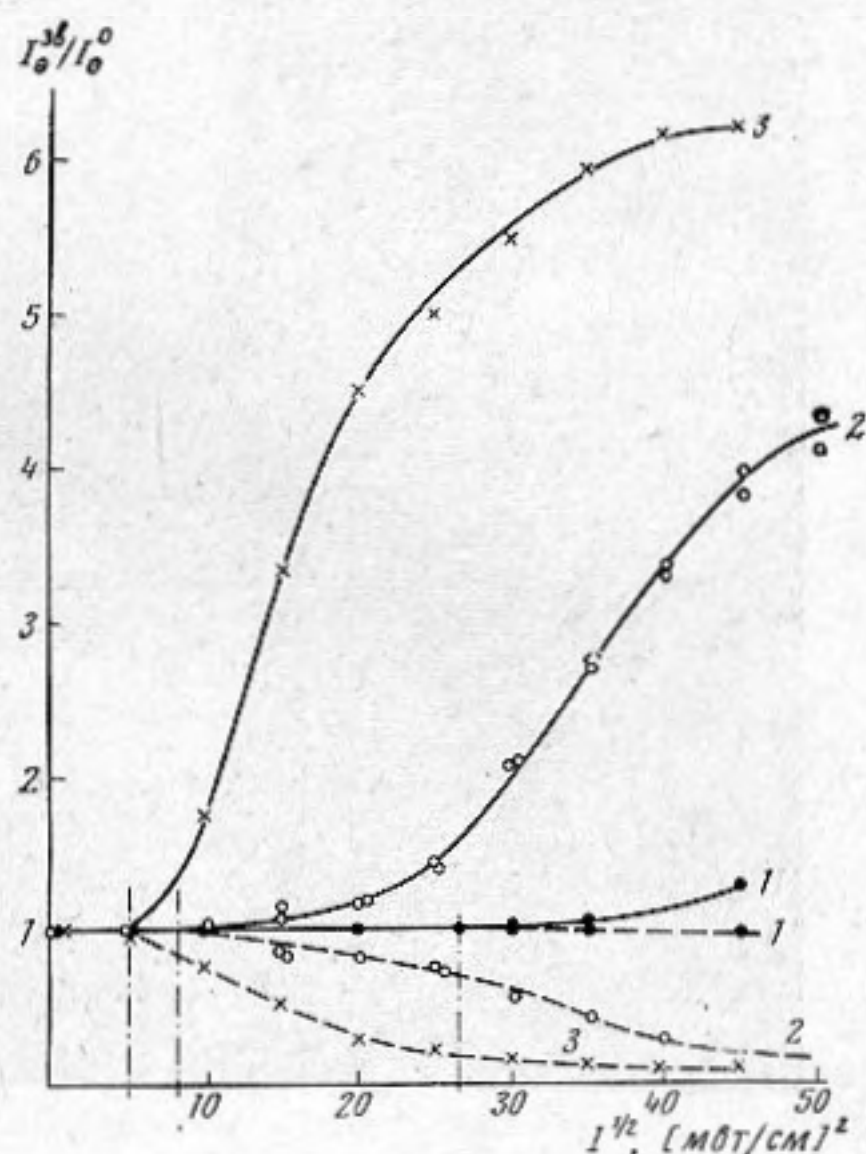
Для удобства дальнейшего изложения материала выделим две области деформации слоя: «нормальную» (изменение ориентации ансамбля молекул с сохранением однородности структуры) и «аномальную» (образование доменов и потоков) и соотнесем их с определенными интервалами акустической интенсивности соответственно $\mathcal{U}' \leq \mathcal{U} < \mathcal{U}''$ и $\mathcal{U} > \mathcal{U}''$. Так как первую фазу аномальной деформации (образование доменов) мы не наблюдали, а установить точное значение \mathcal{U}'' , соответствующее возникновению потоков, весьма затруднительно, в качестве величины \mathcal{U}'' принята интенсивность, при которой наблюдаемая в сходящемся свете интерференционная картина, характеризующая нормальную деформацию, исчезает. Истинное значение \mathcal{U}'' эту величину несколько превышает.

Изменение толщины слоя не вносит существенных отличий в картину изменения структуры и оказывает влияние лишь на величины \mathcal{U}' и \mathcal{U}'' . Так, толщинам слоя 10, 40 и 90 мкм соответствовали значения \mathcal{U}' : 460; 25; 9,3 мвт/см² и \mathcal{U}'' : 750; 65; 25 мвт/см² соответственно.

Вызванная действием акустических колебаний деформация одноосной структуры изменяет условия прохождения через слой светового потока, что выражается в изменении его поляризации и рассеяния. Рассмотрим эти эффекты на примере слоя толщиной 40 мкм. На фиг. 3 представлены типичные поляризационные характеристики. Кривые 1 и 2 отображают изменение относительной интенсивности компоненты с исходной поляризацией I_{\parallel}/I_0 и противоположной ей I_{\perp}/I_0 в прошедшем слое световом потоке при повышении акустической интенсивности. Величина I_0 — интенсивность светового потока, проходящего через систему в отсутствие звука



Фиг. 4



Фиг. 5

Фиг. 4. Характеристики рассеяния слоя толщиной 40 мкм. Кривые 1—6 соответствуют углам θ : 0; 3; 6; 9; 12 и 15°

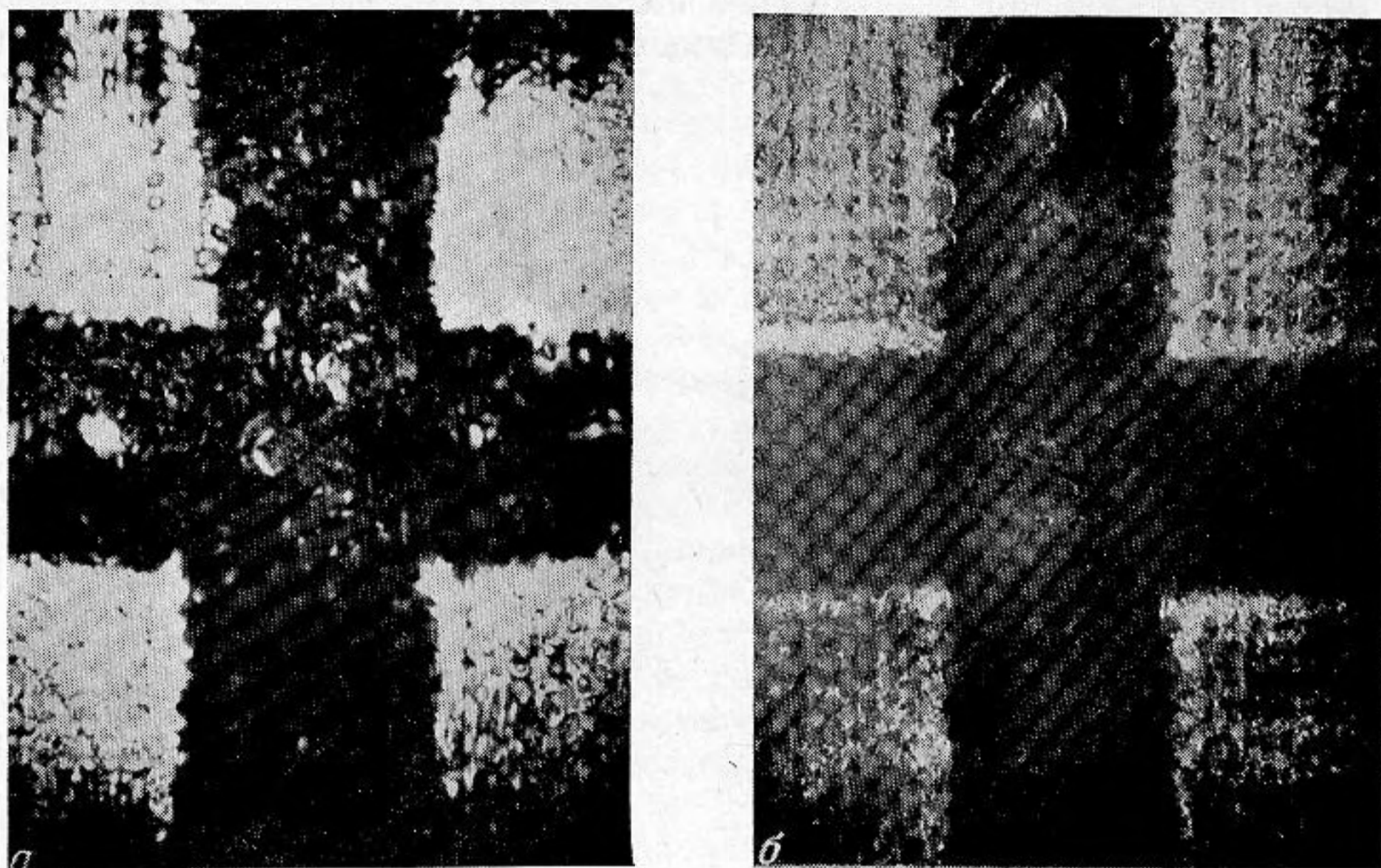
Фиг. 5. Характеристики рассеяния слоев толщиной 10; 40 и 90 мкм (кривые 1—3) под углами 0 и 12° (пунктирные и сплошные линии соответственно)

при параллельных поляроидах. Селекция той или иной компоненты осуществляется поворотом поляроида — анализатора. Штриховая вертикальная линия на фиг. 3 разделяет интервалы интенсивностей, соответствующих, согласно данным исследования структуры, областям нормальной и аномальной деформации. Как видно, компонента с поляризацией, противоположной падающей, появляется при той же интенсивности, которая соответствует при визуальном наблюдении существованию нормальной деформации. Это обстоятельство еще раз показывает, что причиной изменения поляризации светового потока на этой стадии деформации является переориентация ансамбля молекул.

При переходе в область аномальной деформации ($\mathcal{J} > \mathcal{J}''$) начальная тенденция хода кривой 1 в некотором интервале интенсивностей сохраняется, а затем изменяется на противоположную. При этом уменьшение интенсивности одной компоненты не компенсирует увеличение интенсивности другой, что обусловлено, как мы покажем ниже, интенсификацией бокового излучения. Было установлено, что изменение толщины слоя не оказывает влияния на общий ход поляризационных кривых, тогда как величина акустической интенсивности, соответствующей изменению поляризации, растет с уменьшением толщины слоя.

Как уже упоминалось, наряду с изменением поляризации светового потока, действие акустических колебаний приводит к изменению углового распределения рассеянного излучения. Представленное на фиг. 4 семейст-

во кривых 1—6 иллюстрирует изменение величины относительной интенсивности света $I_{\theta}^{zv}/I_{\theta}^0$, рассеянного слоем толщиной 40 мк в направлении, обратном падению, и под углом θ (3; 6; 9; 12 и 15°, соответственно) с повышением акустической интенсивности. Здесь I_{θ}^0 и I_{θ}^{zv} — значения интенсивности света, рассеянного под данным углом θ , в отсутствие звука и в звуковом поле соответственно. При измерениях поляризатор — анализатор из



Фиг. 6. Акустическое изображение объектов, визуализированное с помощью преобразователя на жидком кристалле за счет изменения поляризации (а) и рассеяния (б). Частота 3,2 Мгц

приемной системы устранялся. Из приведенных данных следует, что характер изменения величины $I_{\theta}^{zv}/I_{\theta}^0$ зависит от угла наблюдения. Как видно, световой поток, проходящий через слой в прямом направлении $\theta=0$ (кривая 1), уменьшается при превышении акустической интенсивностью величины, весьма близкой к значению \mathcal{I}'' , соответствующему переходу в стадию аномальной деформации. Ослаблению прямого пучка ($\theta=0$) сопутствует отклонение некоторой части светового потока от его первоначального направления, т. е. интенсификация бокового излучения (кривые 3—6 на фиг. 4). С повышением интенсивности акустических колебаний относительная интенсивность бокового излучения растет и происходит перераспределение излучения в сторону больших углов, причем в рассмотренном интервале углов θ (0—15°) наибольший эффект соответствует углу 12°.

Следует отметить, что с изменением толщины слоя общий ход кривых рассеяния сохраняется. Это подтверждается представленным на фиг. 5 семейством кривых 1—3 изменения относительной интенсивности излучения под углами 0 и 12° (штриховые и сплошные линии) для слоев толщиной 10, 40 и 90 мк соответственно. Нетрудно заметить, что с уменьшением толщины слоя крутизна его оптических характеристик падает, но увеличиваются значения интенсивности \mathcal{I}'' (они отмечены на фиг. 5 штрихпунктирными вертикальными линиями), при которых происходит интенсификация рассеяния.

Инерционные свойства слоя жидкого кристалла при аномальной деформации изучались при ступенчатом изменении акустической интенсивности путем регистрации выходного сигнала с фотоумножителя на самописце. Установлено, что при различных значениях интенсивности время переход-

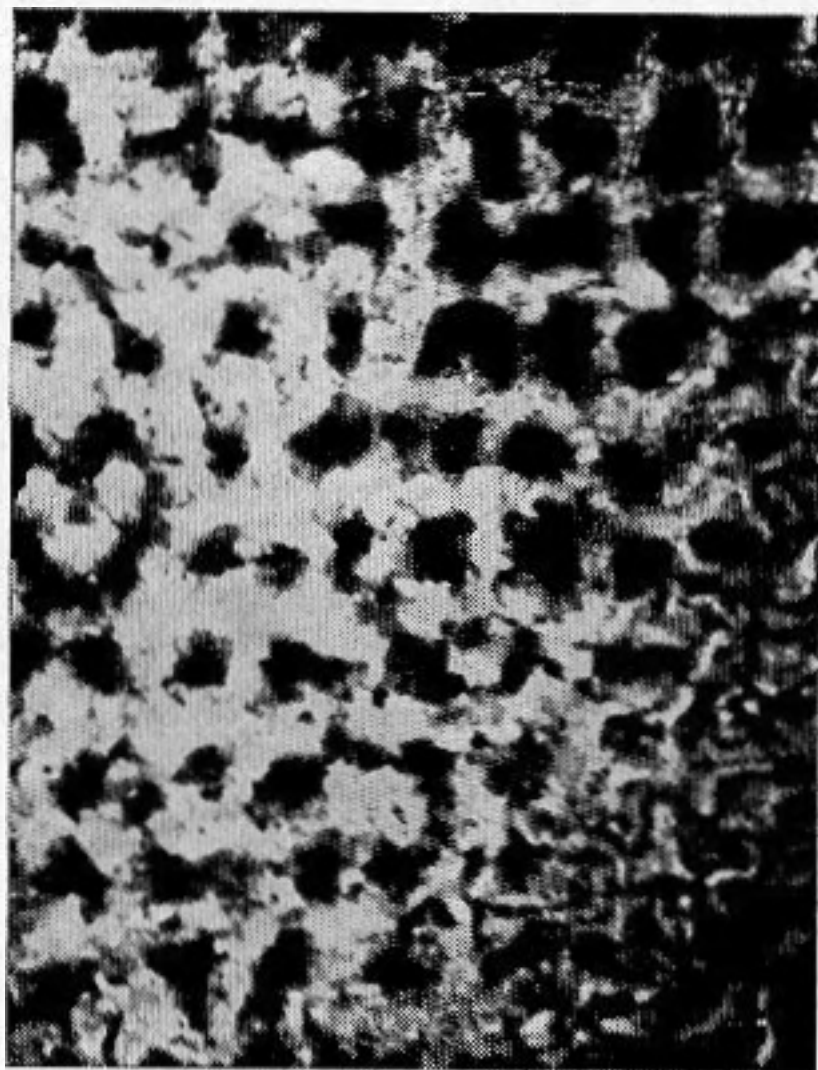
ного процесса в слоях толщиной 10—90 мкм изменяется в пределах 0,5—1 сек. Время возвращения слоя к исходному состоянию превышало время отклика на акустическое воздействие и составляло единицы секунды.

Таким образом проведенные опыты показали, что изменение той или иной оптической характеристики слоя данной толщины определяется акустической интенсивностью. Это может быть использовано с целью создания воспроизводящего устройства для преобразования акустической информации в эквивалентную ей оптическую, в частности для визуализации акустических изображений. Анализ описанных выше оптических характеристик слоя показывает, что это преобразование в равной степени может быть осуществлено с использованием как изменения поляризации проходящего через слой светового потока, так и интенсификации рассеяния света.

Чувствительность такого преобразователя, его акустический и оптический динамические диапазоны существенно образом зависят от толщины слоя и принципа работы активного элемента. Это позволяет визуализировать акустические изображения, контрастность которых изменяется в широких пределах.

В проводившихся нами опытах по визуализации акустического изображения объекта последний помещался в жидкости на оси звукового пучка вблизи преобразователя. В качестве примера на фиг. 6, а представлено акустическое изображение объекта в виде полой крестообразной коробки, полученное, как и в работе [3], на основе эффекта изменения поляризации с помощью преобразователя со слоем толщиной 40 мкм. Заметим, что волновое сопротивление объекта значительно превышало волновое сопротивление жидкой среды. Это обеспечивало необходимый для наблюдения изображения перепад акустической интенсивности за объектом в плоскости приемного слоя. На фиг. 6, б приведено изображение объекта из плексигласа, полученное с тем же преобразователем, но уже с использованием эффекта рассеяния. Хотя в этом случае перепад акустической интенсивности в плоскости слоя, обусловленный различием значений ρc , мал, большая крутизна соответственной характеристики рассеяния обеспечивает, как можно видеть, вполне удовлетворительную контрастность изображения.

Для оценки разрешающей способности преобразователя в режиме аномальной деформации использовался объект в виде проволочной сетки из латуни (диаметр проволоки 0,25 мм, размеры элемента сетки $0,5 \times 0,5$ мм²). Фотография соответственного изображения приведена на фиг. 7. Как видно, преобразователь различает детали объекта, сравнимые с половиной длиной волны ультразвука на этой частоте в воде. Аналогичной разрешающей способностью обладает описанный в работе [3] преобразователь, основанный на эффекте изменения поляризации. Следует отметить тот факт, что потоки, вызывающие рассеяние света, формировались в слое в пределах каждого элемента акустического изображения объекта — сетки. Это дает основание считать, что масштаб этих потоков определяется масштабом неоднородности поля в плоскости слоя.



Фиг. 7. Акустическое изображение латунной сетки, визуализированное преобразователем на жидком кристалле. Частота 3,2 Мгц

Отметим, что, по мнению автора работы [3], возникновение рассеяния в слое ограничивает акустический динамический диапазон работы устройства. Как показывают наши исследования, этот эффект также может быть с успехом использован для целей визуализации с тем дополнительным преимуществом, что соответствующее акустооптическое устройство может работать при достаточно высоких уровнях естественного освещения, не требует применения дополнительного источника света и использования поляризационной техники.

Таким образом, проведенные опыты подтвердили возможность создания устройств с активным элементом в виде слоя нематического вещества с гомеотропным расположением молекул для целей визуализации акустических изображений объектов. С помощью такого устройства можно также исследовать поля излучателей ультразвука и наблюдать распределение интенсивности в любом сечении звукового пучка.

ЛИТЕРАТУРА

1. *L. W. Kessler, S. P. Sawyer.* Ultrasonic Stimulation of Optical Scattering in Nematic Liquid Crystals. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, *47*, 10, 440—442.
2. *О. А. Капустина, Ю. Г. Статников.* Воздействие ультразвуковых поверхностных волн на жидкие кристаллы. *ЖЭТФ*, 1973, *64*, 1, 226—230.
3. *P. Greguss.* A New Liquid Crystals Acoustical to Optical Display. *Acustica*, 1973, *29*, 1, 52—58.
4. *Y. Kagawa, T. Hatakeyama, Y. Tanaka.* Vibro-optical and vibro-dielectric effects in a Nematic Liquid Crystal Layer. *J. Sound and Vibration*, 1975, *41*, 1, 1—11.

Акустический институт
Академии наук СССР

Поступила
2 апреля 1976 г.