

УДК 535.42

## МЕЗОСКОПИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ МУТНЫХ СРЕД В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В. Н. Андреев, А. А. Гурьянов, Б. З. Спивак, Ф. А. Чудновский,  
Б. И. Шкловский

Наблюдены мезоскопические флуктуации прозрачности упруго рассеивающей среды как функции внешнего магнитного поля. Объяснение этих флуктуаций основано на том, что в случайной среде во внешнем магнитном поле вследствие эффекта Фарадея меняются условия интерференции при многократном рассеянии.

В последнее время большое внимание привлекают мезоскопические осцилляции проводимости малых металлических образцов в магнитном поле [1, 2]. Аналогичное явление можно наблюдать, изучая прохождение света сквозь многократно рассеивающую непоглощающую мутную среду. Свет, попадающий в образец такой среды, характеризующейся средней транспортной длиной свободного пробега фотона  $l$ , будет полностью им рассеиваться, если длина образца  $L \gg l$ . На экране, установленном за образцом, рассеянный когерентный свет образует так называемую спекл-структуру, представляющую собой чередующиеся светлые и темные пятна. Если образец имеет форму цилиндра с диаметром основания  $D$ , то характерный линейный размер этих пятен (спеклов)  $\sim \lambda S/D$ , где  $\lambda$  — длина волны света,  $S$  — расстояние между образцом и экраном. Каждая точка этой структуры образуется в результате интерференции большого числа лучей, приходящих от точек торцевой поверхности цилиндра, которые в результате многократного рассеяния света внутри цилиндра являются источниками света со случайными поляризацией, фазой и амплитудой. Изменение условий рассеяния света в образце меняет указанные характеристики источников и, следовательно, вид спекл-структуры.

Спекл-структуру можно изменить и при помещении образца во внешнее магнитное поле. Пусть поле  $B$  направлено, например, по оси цилиндра. Выберем на торцевой поверхности цилиндра произвольную точку. В результате многократного рассеяния внутри цилиндра в эту точку приходит большое количество лучей, длины которых отличаются друг от друга на величину  $L^2/l$ . В результате эффекта Фарадея в поле  $B$  угол поворота плоскости поляризации света на такой длине составит  $\nu BL^2/l$ , где  $\nu$  — постоянная Верде среды. Вследствие этого поляризация, амплитуда и фаза света в выбранной точке изменятся, что приведет и к изменению спекл-структуры, т. е. изменению интенсивности света, измеренной при фиксированном угле  $\Omega$  ( $I_\Omega$ ). При изменении поля должны наблюдаться случайные осцилляции интенсивности  $I_\Omega$  с характерным периодом по полю  $\Delta B \sim \pi l/L^2 \nu$ .

Это явление, которое можно назвать мезоскопическими осцилляциями оптической прозрачности в магнитном поле, отличается от мезоскопических осцилляций проводимости [1, 2] в двух отношениях. Во-первых, различна природа действия магнитного поля на орбитальное движение электрона и поляризацию света. Во-вторых, при оптических измерениях

появляется возможность наблюдать гораздо больше по относительной величине осцилляции, если проводить измерения в телесных углах  $\Delta\Omega \ll \lambda/D$ . Влияние эффекта Фарадея на интерференционные поправки к средней прозрачности теоретически уже исследовалось в работе [3].

Для экспериментальной проверки приведенных выше соображений была собрана установка, схема которой приведена на рис. 1. Образец длиной  $L$  и диаметром основания  $D$ , рассеивающий свет, располагался в зазоре между полюсами электромагнита. Максимальная напряженность магнитного поля составляла  $\sim 2$  Тл для зазора 6 мм и  $\sim 1$  Тл для зазора 14 мм. Луч света от He—Ne лазера, генерирующего моду  $TEM_{00}$  с  $\lambda = 0.63$  мкм, направляли либо вдоль направления магнитного поля, либо перпендикулярно к нему. Диаметр пучка  $\sim 3$  мм, мощность на образце  $\sim 10$  мВт. Рассеянный вперед свет формировал в плоскости наблюдателя спекл-структуру, которая и исследовалась с помощью ФЭУ. Измерения интенсивности проводились в отдельных точках спекл-структуры. Это достигалось выбором размеров диафрагм и расстояний между ними таким

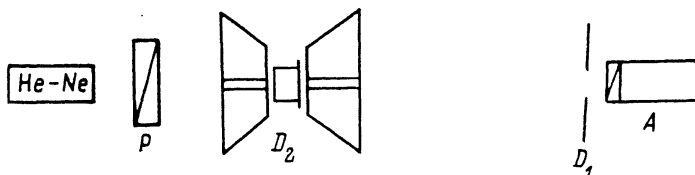


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

образом, чтобы выполнялось условие  $\Delta\Omega < \lambda/D_2$ . Диафрагма  $D_2$  помещалась непосредственно на образце. Чтобы исключить влияние на спекл-структуру возможного движения полюсов магнита при включении магнитного поля, диаметр этой диафрагмы выбирался меньшим, чем диаметр осевого отверстия магнита. Как правило,  $D_2 = 1 \div 2$  мм. Диаметр диафрагмы  $D_1$ , закрепленной на ФЭУ, был равен 0.1 мм, что давало величину угла наблюдения  $\sim 1$  мрад. ФЭУ можно было смещать на  $\pm 10^\circ$  от оси и исследовать поэтому различные спеклы. Для проведения поляризационных измерений в схему включались дополнительные элементы — поляризатор, анализатор и четвертьволновая пластинка.

В качестве объектов измерений нами использовались образцы, изготовленные из стекла с постоянной Верде  $0.1 - 0.2$  мин/см·Э. В одних случаях стекло дробилось до величины зерен  $1 - 5$  мкм, а затем спрессовывалось в таблетку и спекалось; степень мутности образцов определялась в этом случае размером зерен, температурой и временем спекания. В первом приближении ее можно было оценить, считая поглощение отсутствующим, исходя из величины интегрального пропускания  $T$ . При этом средняя транспортная длина свободного пробега фотона будет равна  $1/T$ . Кроме описанных выше образцов, нами использовались также ликвидирующие стекла с величиной зародышей  $\sim 0.6$  мкм и стопы из стеклянных пластин с матированными поверхностями. Интегральное пропускание образцов составляло  $5 - 20$  %, что соответствует толщине образца, равной  $5 - 20$  средних транспортных длин. Образцы вырезались в форме цилиндров с отношением диаметра к высоте  $\sim 10$ , на поверхность которых наносился зеркальный слой для увеличения степени рассеяния. В торцах цилиндра располагались отверстия. Зеркальные поверхности чернились для предотвращения паразитных засветок. В эксперименте измерялась интенсивность рассеянного света. Интегральная интенсивность принималась за характеристику мутности образца, а по интенсивности света в спеклах, измеренной при различных положениях поляризационных элементов, методом Стокса рассчитывались эллиптичность и азимут большой полуоси эллипса поляризации света в стекле.

Распределение интенсивности по спеклам носило случайный характер и может быть описано экспоненциальной статистикой, подробно исследо-

ванной Гудменом [4]. На рис. 2 приведены распределения изменения азимута поляризации при включении магнитного поля для различных образцов, отличающихся рассеивающими свойствами. Для случая «простой» спекл-структуры, образованной при рассеянии света на одной матовой поверхности, поляризационные параметры практически не имели разброса, а изменение азимута поляризации в магнитном поле одинаково для всех точек структуры и равно углу поворота в отсутствие рассеяния. При увеличении числа рассеивающих поверхностей (аналог появления рассеяния в объеме) увеличивалось число точек, в которых это равенство не выполнялось, а эллиптичность отличалась от нуля (см. таблицу). При дальнейшем увеличении мутности образца максимальные величины изменения азимута поляризации, эллиптичности и интенсивности в магнитном поле увеличивались. При этом, однако, наблюдалось уменьшение среднего по спеклам изменения азимута поляризации в магнитном поле. Подобный эффект был отмечен нами и в случае, когда параметром было не магнитное поле, а азимут поляризации падающего света.

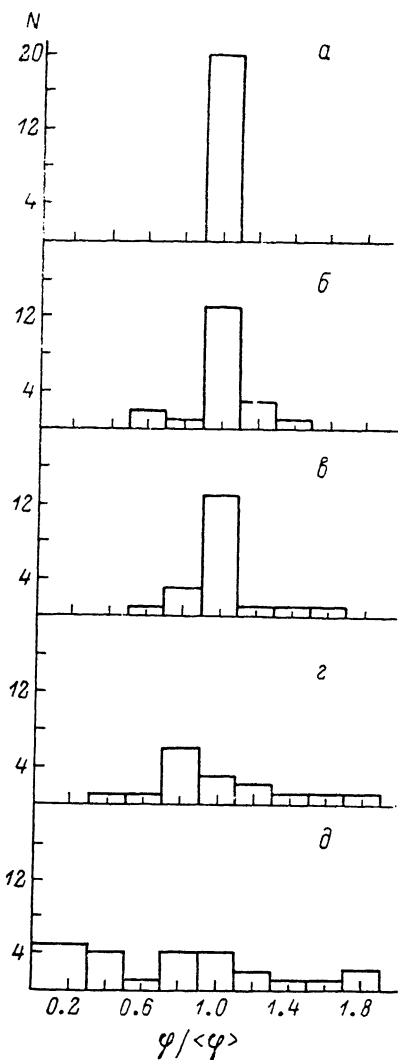


Рис. 2. Распределение по спеклам величин изменения азимута поляризации в магнитном поле для стеклянных пластинок с одной матированной поверхностью (а) и с двумя рассеивающими поверхностями (б), для стопы из трех стеклянных пластинок с матированными поверхностями (в) и для спёка из толченого стекла (г).

$\langle \varphi \rangle$  — усредненное по спеклам изменение азимута поляризации.

Основными экспериментальными результатами являются в следующем.

- 1) Свет, рассеянный вперед мутной средой, создает спекл-структуру с экспоненциальной статистикой распределения интенсивности по отдельным спеклам, практически не зависящей от мутности.
- 2) При падении плоскополяризованного, когерентного света на мутную среду рассеянный вперед свет полностью деполаризован интегрально, однако во всех точках спекл-структуры свет поляризован полностью, при-

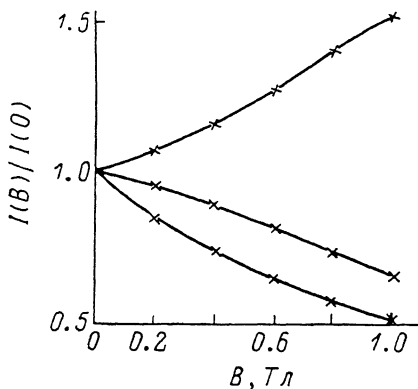


Рис. 3. Изменение интенсивности света для трех различных спеклов в магнитном поле.

Образец — спёк из толченого стекла.

**Изменение азимута поляризации  
в магнитном поле и при повороте  
плоскости поляризации падающего света  
для образцов различной мутности**

Параметр	Номер образца				
	1	2	3	4	5
$T$	0.9	0.6	0.15	0.14	0.05
$\langle \epsilon \rangle$	0.05	0.3	0.45	0.7	0.8
$\langle \Delta \varphi \rangle / \varphi_0$	1	1	—	0.65	0.59
$\langle \Delta \varphi \rangle / \varphi$	1	0.85	0.74	0.48	—

Примечание. 1 — пластинка из стекла с матированными поверхностями, 2 — стопа из трех стеклянных пластинок с матированными поверхностями, 3 — пластинка из стекла МС 23 с необработанными поверхностями, 4 — слёк из толченого стекла, 5 — пластинка из ливярующего стекла.  $\langle \Delta \varphi \rangle$  — усредненная по спеклам величина изменения азимута поляризации,  $\varphi_0$  — угол поворота плоскости поляризации в образце в отсутствие рассеяния,  $\varphi$  — угол поворота плоскости поляризации изадающего света,  $\langle \epsilon \rangle$  — усредненная по спеклам величина эллиптичности,  $T$  — интегральное пропускание.

чем параметры, характеризующие состояние поляризации, меняются от точки к точке.

3) При помещении рассеивающего свет образца длиной  $L$ , характеризующегося постоянной Верде  $\nu$  в магнитное поле  $B$ , спекл-структура, создаваемая им в плоскости наблюдения, полностью меняется. Соответственно меняются и параметры, характеризующие состояние поляризации света в отдельных точках этой структуры, а также интенсивность рассеянного света в них.

4) Изменение азимута поляризации в отдельных точках спекл-структуры при включении магнитного поля может значительно (в 2—3 раза) превышать угол поворота плоскости поляризации в том же поле и материале в отсутствие рассеяния  $\varphi_0 = \nu BL$ , однако при усреднении этого изменения по спеклам его величина становится меньше  $\varphi_0$ , причем имеется тенденция к ее уменьшению с увеличением степени мутности.

5) Изменение интенсивности рассеянного света (оптической прозрачности) в отдельных точках спекл-структуры достигает 50 % (рис. 3).

Таким образом, полученные результаты, совпадая качественно с выводами, сделанными на основе теоретических предпосылок, отличаются от них по величине. Изменение интенсивности в отдельных точках спекл-структуры и углы поворота азимута поляризации в них меньше. Мы считаем, что увеличение магнитных полей позволит наблюдать и осцилляции оптической прозрачности. Что же касается различия между ожидавшимися и полученными изменениями азимута поляризации в отдельных спеклах, то оно, возможно, связано с поглощением света в процессе диффузии через образец. В этом случае типичная длина пути при диффузионном движении света эффективно уменьшается, что ведет к уменьшению эффективности действия магнитного поля на статистические свойства спекл-структуры рассеянного образцом света.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Umbach C. P., Washburn S., Laibowitz R. B., Webb R. A. Phys. Rev. B, 1984, vol. 30, N 7, p. 4048—4051.  
 [2] Stone A. D., Lee P. A. Phys. Rev. Lett., 1985, vol. 55, N 15, p. 1622—1625.  
 [3] Голубенцев А. А. ЖЭТФ, 1984, т. 86, № 1, с. 47—59.  
 [4] Laser Speckle and Related Phenomena / Ed. J. C. Dainty. Topics in Applied Physics, 1984, vol. 9 Springer—Verlag.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
3 марта 1988 г.