

удивительного. Например, при температурах выше 1000 °С алмаз становится менее твердым, чем карбид кремния SiC. Более содержательным с точки зрения физики является утверждение, что алмаз из всех известных веществ имеет самые большие значения упругих модулей. Причем главным образом это относится к модулю сдвига, уникально высокое значение которого (~ 5 Мбар) и приводит к выдающимся механическим свойствам алмаза, в том числе и твердости.

Таким образом, плотные модификации, полученные из фуллеритов при высоком давлении, представляют собой новый класс как кристаллически упорядоченных, так и разупорядоченных sp^2 – sp^3 -фаз углерода. По плотности и механическим характеристикам эти фазы являются промежуточными между чистыми sp^2 (фуллерит, графит) и sp^3 (алмаз, лонсдейлит) модификациями. Ранее фазы углерода с непрерывно изменяемой долей валентных sp^2 - и sp^3 -состояний удавалось получать лишь в аморфных тонких пленках. Уникальная комбинация достаточно высокой твердости, пластичности и трещиностойкости (см. также [5]) делают данные углеродные материалы достаточно перспективными. Оптические и электронно-транспортные свойства полученных новых фаз углерода являются предметом дальнейших исследований.

Максимальное давление в данной работе было ограничено возможностями экспериментального оборудования для высокотемпературного синтеза объемных образцов. Однако последовательность необратимых превращений фуллерита C_{60} , наблюдавшаяся при $P = 12,5$ ГПа, является, по-видимому, достаточно общей для высоких давлений ($P > 9$ ГПа) и температур. Действительно, экспериментальные данные [13, 18, 19] указывают, что сжатие C_{60} при комнатной температуре инициирует структурные превращения, подобные наблюдавшимся в данной работе при высоких температурах (но несколько меньшем давлении). Структурные исследования превращений непосредственно под давлением могли бы дать дополнительную информацию о механизмах полимеризации и разупорядочения C_{60} и других фуллеритов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 96-02-17328а и 95-02-03677).

Список литературы

1. Duclos S J et al. *Nature* (London) **351** 380 (1991)
2. Iwasa Y et al. *Science* **264** 1570 (1994)
3. Núñez-Regueiro M et al. *Phys. Rev. Lett.* **74** 278 (1995)
4. Marques L et al. *Phys. Rev. B* **54** R12633 (1996)
5. Бражкин В В и др. *Письма в ЖЭТФ* **62** 328 (1995)
6. Blank V D et al. *Phys. Lett. A* **205** 208 (1995)
7. Бражкин В В, Ляпин А Г, Попова С В *Письма в ЖЭТФ* **64** 755 (1996)
8. Бланк В Д и др. *ЖТФ* **64** 153 (1994)
9. Бланк В Д, Буга С Г *Наука и жизнь* **10** 61 (1995)
10. Ruoff R S, Ruoff A L *Nature* (London) **350** 663 (1991); *Appl. Phys. Lett.* **59** 1553 (1991)
11. Wang Y, Tomanek D, Bertsch G F *Phys. Rev. B* **44** 6562 (1991)
12. Goze C et al. *Phys. Rev. B* **54** R3676 (1996)
13. Hodeau J L et al. *Phys. Rev. B* **50** 10311 (1994)
14. Kelires P C *Phys. Rev. Lett.* **73** 2460 (1994)
15. Weiler M et al. *Phys. Rev. B* **53** 1594 (1996)
16. Clark S J, Ackland G J, Crain J *Phys. Rev. B* **52** 15035 (1995)
17. Yin M T, Cohen M L *Phys. Rev. B* **35** 9559 (1987)
18. Moshary F, Chen N H, Silvera I F *Phys. Rev. Lett.* **69** 466 (1992)
19. Snoke D W, Raptis Y S, Seassen K *Phys. Rev. B* **45** 14419 (1992)

PACS numbers: 12.20.Fv, 11.30.-j, 03.30.+p, 06.30.Gv

Экспериментальное исследование оптической изотропии пространства

В.В. Рагульский

Согласно современным теоретическим представлениям, окружающее нас пространство изотропно по отношению к оптическим явлениям. Исходя из этого, например, считают [1], что преломляющее действие конденсированной среды на световые волны, идущие в противоположных направлениях, совершенно одинаково¹. Однако экспериментальное обоснование таких воззрений оставляет желать лучшего.

Дело в том, что прямое сравнение преломляющих свойств среды для встречных световых пучков до сих пор производилось с точностью, не превышающей $\sim 3 \times 10^{-5}$ (см. статью Араго [3]). Из опубликованных в этой статье результатов следует, что показатель преломления n стекла с указанной точностью не зависит от того, находится ли источник света впереди, по ходу орбитального движения Земли, или же он светит ей вдогонку.

В работах [4, 5] регистрировалось изменение поляризации у встречных световых пучков при их прохождении сквозь наклонную стеклянную пластину. Затем на основе полученных сведений и формул Френеля вычислялись соответствующие показатели преломления. Эти работы близки по методике, но противоположны по своим результатам. Из данных Физо [4] следует, что если один из пучков распространяется на восток, а другой на запад, то "*встречные*" показатели преломления отличаются друг от друга, причем их разность (Δn) зависит от времени и достигает 3×10^{-4} . Но Брас [5] на основании собственных измерений (погрешность которых эквивалентна $\Delta n \sim 4 \times 10^{-5}$) утверждал, что "*восточный*" и "*западный*" показатели преломления одинаковы.

Не исключено, что на изотропию наблюдаемых оптических процессов накладывают отпечаток различные факторы. Например, авторы указанных публикаций допускали, что на нее влияет быстрое движение. Как известно, теория относительности постулирует отсутствие такой зависимости, но постулат не есть доказательство.

Для прояснения ситуации поставлен опыт [6]. Основные элементы экспериментальной установки обозначены на рис. 1. Источником света служит электрическая лампа L , которая освещает узкую щель S , расположенную в фокальной плоскости объектива O_1 . Параллельный пучок, формируемый этим объективом, преломляется призмой V и попадает в высококачественную трипель-призму T . Известно, что такой отражатель разворачивает падающий на него пучок на 180° , причем независимо от угла падения. Отраженный свет проходит призму V в обратном направлении и фокусируется объективом O_1 . Потом часть его выходит через полупрозрачное зеркало M_1 , пространственно отделяясь от исходного излучения.

Репером для определений углового положения пучка, дважды прошедшего призму, служит тонкий штрих,

¹ В частности, это предположение широко используется в теории и практике обращения волнового фронта (см., например, [2]).

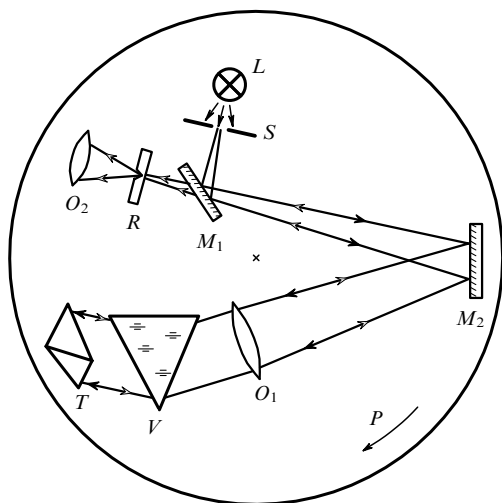


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения изотропии показателя преломления: L — лампа накаливания; S — щель шириной 10 мкм; O_1 — ахроматический объектив с фокусным расстоянием 1,5 м; V — призма из стекла К-8 с преломляющим углом 65° ; T — стеклянная трипльпризма (отраженный ею световой пучок имеет диаметр 5 см); M_1 — плоское полупрозрачное зеркало (обратная сторона его подложки просветлена); M_2 — плоское зеркало с непрозрачным алюминиевым покрытием; R — подвижная стеклянная пластинка с прямолинейным штрихом шириной 3 мкм; O_2 — окуляр со 100-кратным увеличением; P — поворотная платформа.

нанесенный на плоскопараллельную пластинку R . Она расположена в той плоскости, где этот пучок, фокусируясь, создает изображение щели S . Пластинка закреплена на каретке, которую можно передвигать микрометрическим механизмом. Все элементы установлены на платформе P , поворот которой позволяет менять ориентацию данной схемы без ее перестройки.

Отличие Δn от нуля приведет к сдвигу изображения на Δx . Элементарный расчет показывает, что связь между этими величинами есть

$$\Delta n = \frac{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(0,5\gamma)}}{2f \sin(0,5\gamma)} \Delta x, \quad (1)$$

где γ — преломляющий угол призмы, а f — фокусное расстояние объектива O_1 . Подставляя в (1) известные характеристики установки ($\gamma = 65^\circ$, $n = 1,52$, $f = 1,5 \times 10^2$ см), имеем $\Delta n = 3,6 \times 10^{-3} [\text{см}^{-1}] \Delta x [\text{см}]$.

Как показали предварительные эксперименты, угловое положение интересующего нас пучка точнее всего можно отследить по дифракционной картине, которая возникает при его попадании в реперный штрих. Симметрия этой картины, наблюдаемой на расстоянии 0,5 мм от штриха через окуляр O_2 , столь чувствительна к поперечным сдвигам штриха относительно центра падающего на него светового поля, что вполне обнаружимы сдвиги порядка 0,1 мкм.

С помощью описанной аппаратуры была найдена величина Δx для 18 положений платформы, отстоящих друг от друга на 20° . В каждом из них 10 раз фиксировался тот отсчет на барабане микрометра, при котором штрих совпадал с центром изображения щели. Выясни-

лось, что для всех ориентаций платформы отклонения искомого параметра от нуля не превосходят среднеквадратичной ошибки измерений, которая в единицах Δn составляет 5×10^{-8} . Отсюда следует, что по крайней мере с такой точностью лабораторное пространство изотропно по отношению к преломлению света.

Показатель преломления определяется отношением скоростей распространения света в преломляющем веществе и в окружающей среде. Поэтому полученный результат означает, что либо обе эти скорости изотропны, либо они одинаково зависят от направления.

К настоящему времени скорость света измерена с погрешностью примерно 1 м с^{-1} (см. [7]). Но во всех точных опытах, по существу, находилась *скорость, усредненная по двум противоположным направлениям* [8] (например, путем измерения времени двукратного прохода светом фиксированной трассы — сначала от источника, а затем в обратную сторону). Экспериментальные же работы, которые могут дать информацию об *"однонаправленной"* скорости, характеризуются огромным разбросом результатов. Так, в [9] утверждается, что она, если и отличается от средней (c), то не более чем на 1 км с^{-1} . Но согласно [10], различие (Δc) между этими скоростями для некоторых азимутов достигает $360 \pm 40 \text{ км с}^{-1}$.

Идея недавно выполненного эксперимента [10] состоит в том, чтобы раздвинуть трассы, по которым свет распространяется от источника и возвращается к нему, причем сделать времена прохода по этим трассам различными, заполнив одну из них веществом с отличным от единицы показателем преломления. Асимметрия трасс приведет к тому, что при $\Delta c \neq 0$ суммарное время, затрачиваемое светом на пробег по ним, будет зависеть от их пространственной ориентации. Пусть фазовая скорость света при его распространении от источника есть $c + \Delta c$. Тогда для противоположного направления она равна $c - \Delta c$. Очевидно, что на полный обход указанных трасс, каждая из которых имеет длину l , световой волне требуется время

$$t_1 = \frac{l}{c + \Delta c} + \frac{n_1 l}{c - \Delta c}, \quad (2)$$

где n_1 — показатель преломления используемого вещества для этой волны.

Изменения t_1 , зависящие от ориентации трасс, можно обнаружить методами интерферометрии. Для этого надо пустить аналогичную волну по тому же замкнутому маршруту, но во встречном направлении. У нее выражение для времени обхода (t_2) отличается от t_1 (2) знаком перед Δc и, вообще говоря, величиной показателя преломления, который для такой волны есть n_2 . С учетом изложенного разность

$$\Delta t \equiv t_1 - t_2 = \frac{2(n - 1)l\Delta c - cl\Delta n}{c^2 - (\Delta c)^2}. \quad (3)$$

Здесь $n \equiv (n_1 + n_2)/2$ и $\Delta n \equiv n_2 - n_1$. Значит, если волновые фронты обсуждаемых волн первоначально совпадают, то после прохождения замкнутого маршрута они окажутся отстоящими друг от друга на расстояние, линейно зависящее от Δc (величиной $(\Delta c)^2$ в знаменателе (3), конечно, можно пренебречь), что должно сказываться на картине интерференции этих волн.

Схема экспериментальной установки [11] представлена на рис. 2. Ее главным элементом является кольцевой интерферометр, образованный толстой плоскопараллельной пластиной P и трипельпризмой T . В него помещен стеклянный образец G . Интерферометр работает следующим образом. Из лазерного излучения, наклонно падающего на пластину, образуется (за счет преломления и отражения света ее границами) ряд взаимнопараллельных пучков, пара которых попадает затем в трипельпризму. Этот уголкового отражателя выставлен так, что его вершина находится посередине между указанными пучками. Поэтому в результате отражений от него пучки не только разворачиваются на 180° , но и меняются местами: пучок, пришедший к трипельпризме по верхнему пути, направляется ею к пластине по нижнему, и наоборот. Таким образом формируются две световые волны, одна из которых пробегает замкнутый маршрут по ходу часовой стрелки, а вторая — в обратную сторону. Затем пластина совмещает друг с другом вернувшиеся к ней волны, после чего они распространяются в направлении лазера L , интерферируя между собой. Все элементы установки на поворотной платформе.

Описанный интерферометр чрезвычайно устойчив по отношению к вибрациям и деформациям установки (которые неизбежно возникают при ее поворотах), поскольку смещения его деталей не влияют на угол между интерферирующими пучками и временную задержку между ними. Но этот угол зависит от характеристик используемых элементов. Так, для излагаемой работы была выбрана трипельпризма со слегка неортогональными друг другу гранями. За счет этого при отражении от нее взаимнопараллельных пучков между ними возникла угловая расстройка, равная 6×10^{-4} рад. Ее можно было в значительной мере скомпенсировать (или увеличить), поворачивая клиновидную пластину V , преломляющий угол которой равен 5×10^{-4} рад. Тем самым можно в широких пределах менять расстояние между интерференционными полосами, которые возникают при сложении волн, выходящих из интерферометра. Они регистрируются с помощью подвижной щели S .

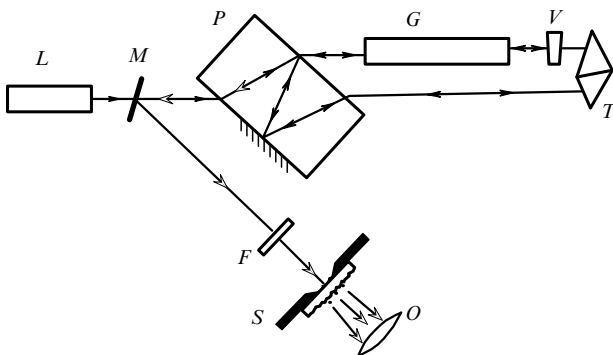


Рис. 2. Оптическая схема установки для определения изотропии скорости света: L — одномодовый гелий-неоновый лазер; M — полупрозрачное зеркало; P — плоскопараллельная пластина из плавленного кварца толщиной 4 см (на часть ее поверхности нанесено зеркальное покрытие); G — стеклянный стержень длиной 68 см с плоскопараллельными торцами; V — клиновидная стеклянная пластина; T — трипельпризма, т.е. уголкового отражателя в виде срезанного угла куба; F — пленочный поляризатор; S — подвижная щель шириной 0,2 мм с прижатым к ней рассеивателем, которым служит матированная лавсановая пленка; O — окуляр с 15-кратным увеличением.

Опыт показал, что при расстоянии между минимумами интерференционной картины $h = 7$ мм, позиционирование щели осуществляется с точностью примерно 3 мкм. Как известно, смещение такой картины на величину h соответствует изменению расстояния между фронтами интерферирующих пучков на λ , где λ — длина волны используемого света. Таким образом, относительное положение этих фронтов в обсуждаемом приборе удалось контролировать с точностью примерно $\lambda/2000$.

Легко выяснить, как соотносится величина сдвига минимума Δh и обнаружимое значение Δc . Согласно приведенным выше расчетам, пространственная задержка между фронтами интерферирующих волн есть $c\Delta t$. Следовательно, в доля длины волны она равна $c\Delta t/\lambda$, что соответствует отношению $\Delta h/h$. Поэтому с учетом (3) имеем

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{c\Delta t}{\lambda} = \frac{2(n-1)l\Delta c - c\Delta n}{\lambda c} \quad \text{или} \quad \Delta v \equiv \Delta c - \frac{c\Delta n}{2(n-1)} = \frac{c\lambda}{2(n-1)h} \Delta h. \quad (4)$$

Подставляя в (4) известные числовые значения параметров ($c = 3 \times 10^{10}$ см с^{-1} , $\lambda = 6,33 \times 10^{-5}$ см, $n = 1,53$, $l = 68$ см и $h = 0,7$ см), получаем $\Delta v = 3,76 \times 10^4 [\text{с}^{-1}] \Delta h [\text{см}]$.

Сдвиг одного из интерференционных минимумов от его среднего положения был определен для 12 ориентаций платформы, отстоящих друг от друга на 30° . Оказалось, что отклонения искомого параметра от нуля не превосходят ошибки измерений, которая в единицах Δv равна 13 см с^{-1} .

С учетом структуры Δv это означает, что либо обе составляющие Δv весьма мала, а именно, $|\Delta c| < 13$ см с^{-1} и $|c\Delta n/2(n-1)| < 13$ см с^{-1} (соответственно $|\Delta n| < 4,6 \times 10^{-10}$), либо между ними существует связь вида $\Delta c = c\Delta n/2(n-1) + \varepsilon$, где $|\varepsilon| < 13$ см с^{-1} . Если сюда подставить найденное в предыдущих опытах ограничение $|\Delta n| < 5 \times 10^{-8}$, то получится $|\Delta c| < 14$ м с^{-1} , т.е. $|\Delta c|/c < 4,7 \times 10^{-8}$.

Таким образом, из изложенных опытов следует, что скорость света в воздухе, а также частное от ее деления на скорость света в стекле (показатель преломления) с точностью не хуже 5×10^{-8} , а возможно и 5×10^{-10} , не зависят от направления. Следовательно, с такой точностью окружающее нас пространство можно считать изотропным по отношению к распространению света в средах различной плотности.

Разумеется, лабораторные эксперименты не могут дать ответа на вопрос, изотропно ли пространство вдали от Земли. Поэтому было бы полезно провести подобные опыты в космических условиях.

Список литературы

1. Слюсарев Г. Г., в кн. *Физическая энциклопедия* Т. 3 (М.: Изд-во Сов. энциклопедия, 1992) с. 382
2. Рагульский В. В. *Обращение волнового фронта при вынужденном рассеянии света* (М.: Наука, 1990)
3. Arago F *Comptes Rendus* **36** 38 (1853)
4. Fizeau H *Comptes Rendus* **49** 717 (1859)
5. Brace D B *Philos. Mag. Ser. 6* **10** 591 (1905)
6. Рагульский В. В. *Письма в ЖЭТФ* **65** 497 (1997)
7. Бонч-Бруевич А. М., в кн. *Физическая энциклопедия* Т. 4 (М.: Изд-во Энциклопедия, 1994) с. 548
8. Фрум К., Эссен Л. *Скорость света и радиоволны* (М.: Мир, 1973) с. 12
9. Illingworth K K *Phys. Rev.* **30** 692 (1927)
10. Marinov S *Indian J. Theor. Phys.* **39** 267 (1991)
11. Ragulsky V V *Phys. Lett. A* (1997)