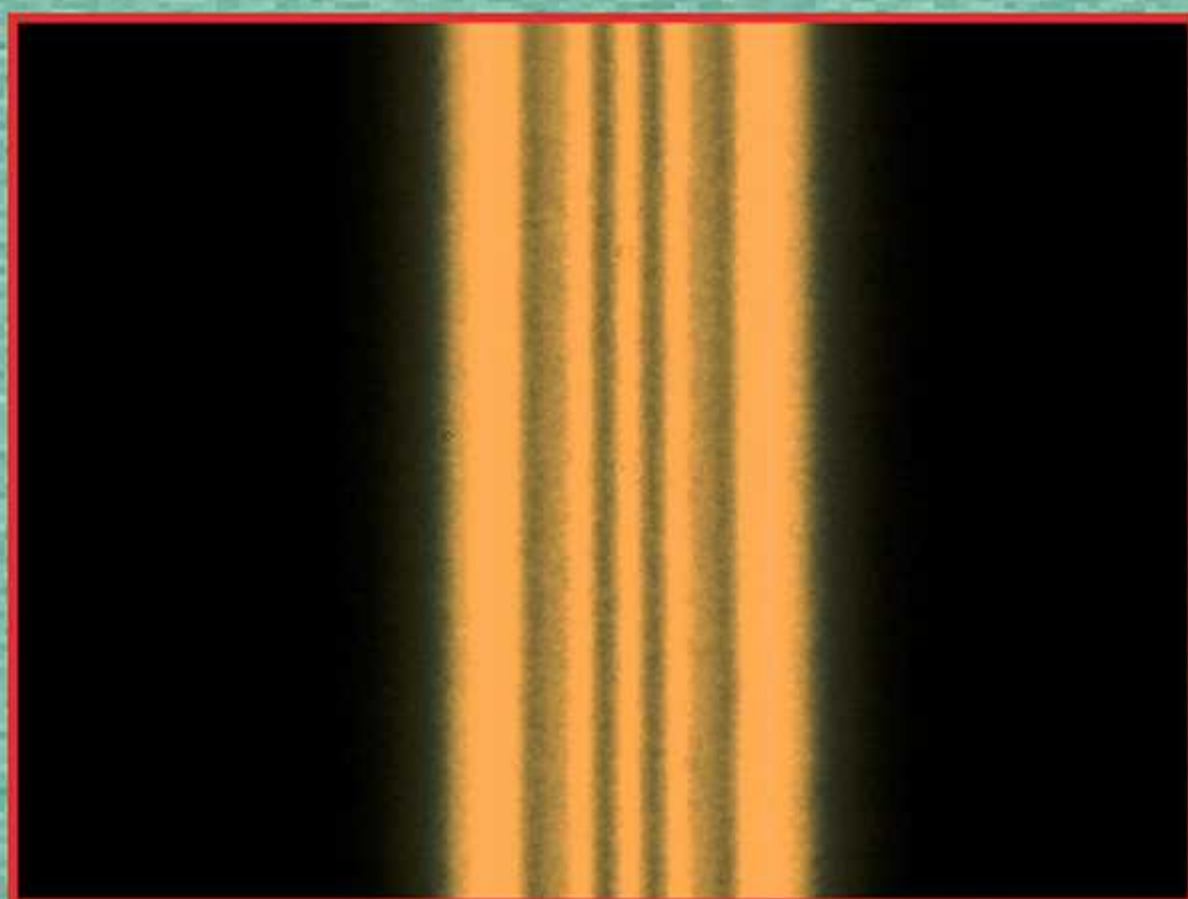
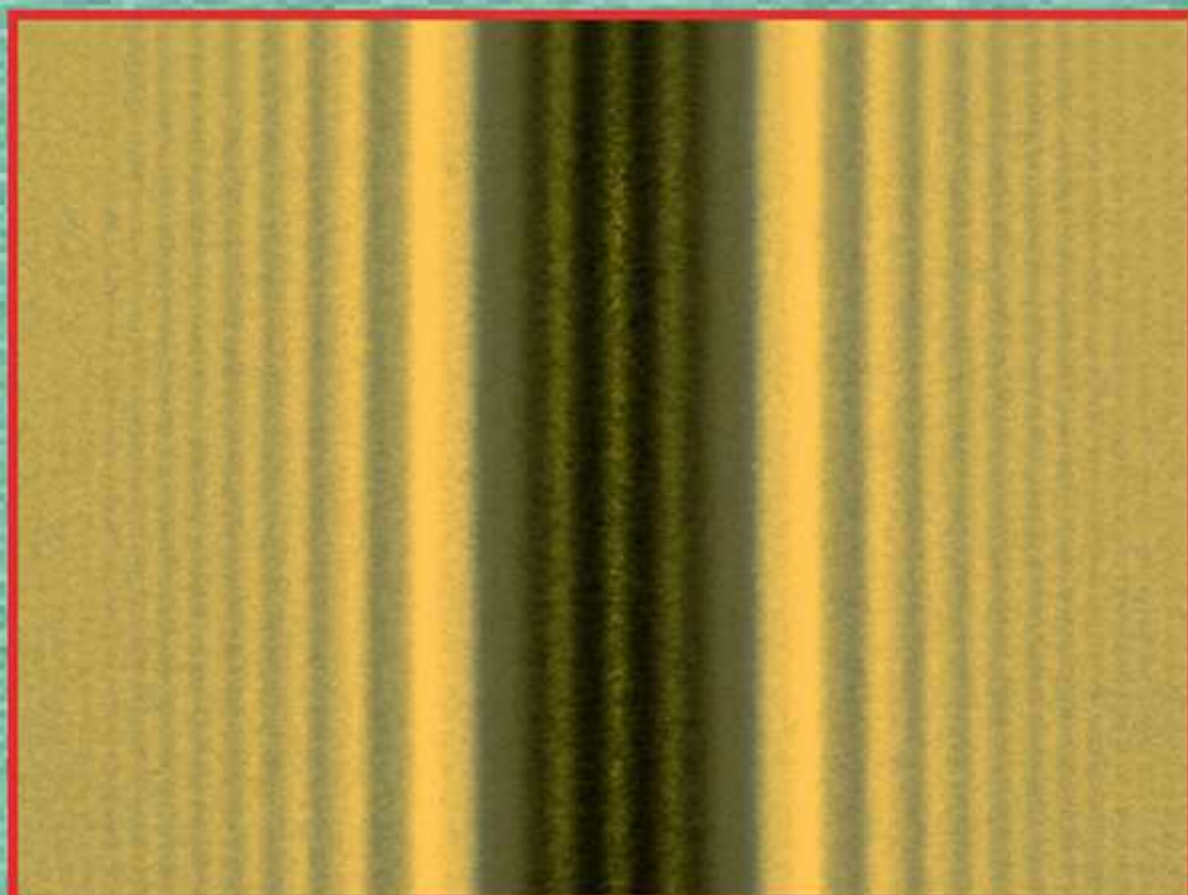


ISSN 2307-5457

УЧЕБНАЯ ФИЗИКА



3
2021



УДК 372.853:535

В. В. Майер, Е. И. Вараксина
**НОРМАЛЬНАЯ ДИСПЕРСИЯ СВЕТА В
ДЕМОНСТРАЦИОННЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТАХ**

Предлагаются демонстрационные и лабораторные эксперименты по качественному и количественному учебному исследованию нормальной дисперсии света. В качестве объектов исследования взяты призма прямого зрения Амичи и треугольная равносторонняя призма из стекла флинт марки ТФЗ. Описаны простые и доступные приборы для демонстрации, наблюдения и фотографирования на смартфон дисперсионных кривых. Рассмотрены ручной и компьютерный методы обработки результатов эксперимента.

Ключевые слова: нормальная дисперсия света, лекционная демонстрация, лабораторная работа, учебное исследование, дисперсионная кривая, фотографирование на смартфон.

1. Введение

Дисперсия света — явление зависимости абсолютного показателя преломления вещества от длины (или частоты) световой волны $n = n(\lambda)$. Дисперсия называется *нормальной*, если с ростом длины волны показатель преломления вещества уменьшается. Вблизи линий поглощения света наблюдаются области *аномальной* дисперсии, в которых при увеличении длины волны показатель преломления тоже увеличивается.

Классические эксперименты И. Ньютона [1], Ф. Леру, А. Кундта и теория дисперсии света излагаются во всех университетских курсах оптики [2–7]. Поэтому актуальна проблема разработки современных учебных приборов, доступных для самостоятельного изготовления студентами и обеспечивающих экспериментальное изучение дисперсии света. Целью нашей работы является решение этой проблемы для курса общей и экспериментальной физики бакалавриата.

2. Демонстрационный эксперимент

Дисперсию света $n = n(\lambda)$ в натурном эксперименте со времен Ньютона [1] исследуют методом скрещенных спектров. Для этого получают расположенный горизонтально эталонный спектр, и отклоняют его призмой из исследуемого вещества в вертикальном направлении. В демонстрационном эксперименте в качестве эталонного удобно использовать равномерный спектр от дифракционной решетки, а исследовать дисперсию призмы прямого зрения Амичи.

Фотография демонстрационного прибора [8, 9] приведена на рис. 1: 1 — осветитель, состоящий из миниатюрной лампы накаливания с короткой прямой нитью (3,5 В, 0,26 А), собирающей линзы с фокусным расстоянием 35 мм и тубуса длиной 50 мм, в котором может перемещаться лампа; 2 — призма прямого зрения (Амичи); 3 — голографическая дифракционная решетка с периодом 0,001 мм [8, 10].

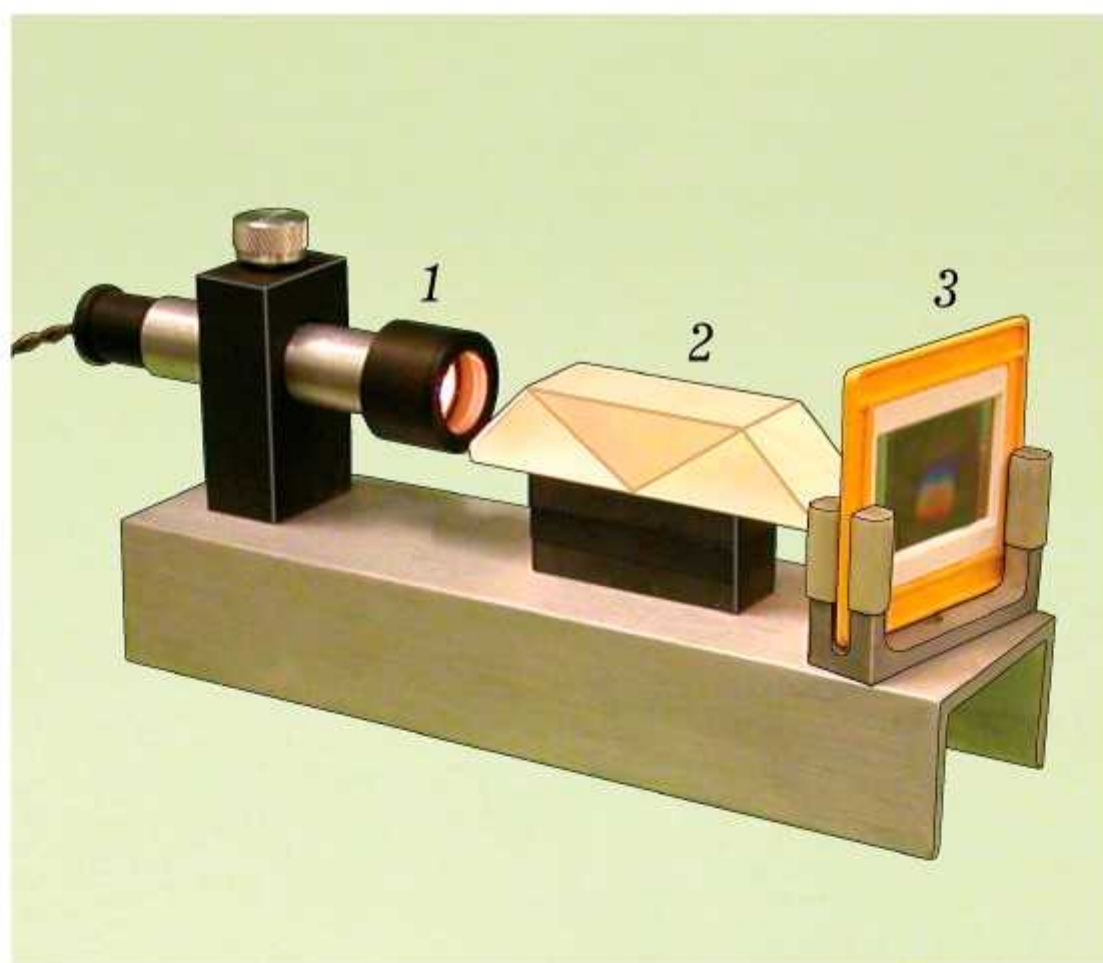


Рис. 1. Прибор для лекционной демонстрации дисперсионной кривой

Демонстрацию проводят следующим образом. На расстоянии около 0,5 м от осветителя ставят работающий напросвет белый экран из полиэстерной пленки и включают осветитель. Поворачивая и перемещая внутри его тубуса лампу накаливания, получают на экране резкое изображение ее нити в виде небольшого яркого вертикального отрезка. На пути светового пучка помещают дифракционную решетку так, чтобы ее щели были ориентированы вертикально. Поворачивают решетку вокруг вертикальной оси на угол α , примерно равный углам падения на фотослой интерферирующих пучков света при записи голограммы ($\alpha \approx 19^\circ$). При этом

на экране получают равномерный сплошной спектр, ориентированный горизонтально. В первом приближении угол отклонения света дифракционной решеткой пропорционален длине световой волны.

Убирают дифракционную решетку и на пути светового пучка, выходящего из осветителя, ставят призму прямого зрения, как показано на рис. 1. При этом на экране появляется ориентированный вертикально сплошной неравномерный спектр, красный конец которого находится внизу. В первом приближении угол отклонения света от направления выходящего из призмы пучка красного света можно считать пропорциональным эффективному показателю преломления материала призмы.

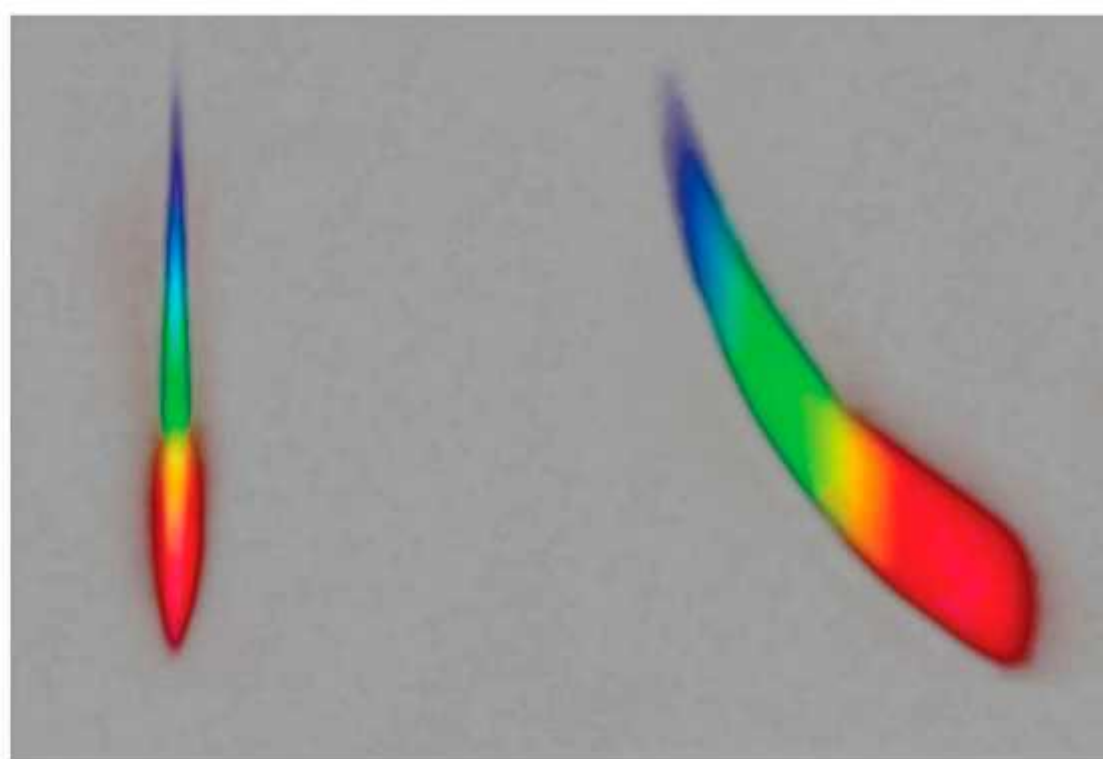


Рис. 2. Сплошные спектры белого света: слева — спектр, создаваемый призмой прямого зрения Амичи; справа — спектр в форме дисперсионной кривой, полученный из призматического спектра с помощью голографической дифракционной решетки

Ставят дифракционную решетку в положение, в котором она находилась в первом опыте, и обнаруживают, что на экране рядом с вертикальным прямым призматическим спектром появляется изогнутый дифракционный спектр (рис. 2). Анализируя результаты проделанных опытов, обучающиеся приходят к выводу, что этот спектр в первом приближении можно считать дисперсионной кривой, характеризующей материал, из которого изготовлена использованная в опыте призма.

3. Оценка показателей преломления материала треугольной призмы

Элементарная теория нормальной дисперсии света приводит к приближенной формуле Коши [2, 5]:

$$n = a + \frac{b}{\lambda^2}, \quad (1)$$

где n — абсолютный показатель преломления вещества, λ — длина световой волны, a и b — постоянные, которые для каждого вещества необходимо определить экспериментально. Измерив значения показателя преломления n_1 и n_2 для двух длин волн λ_1 и λ_2 , получают систему из двух уравнений с двумя неизвестными a и b . Решая эту систему, находят значения постоянных в формуле Коши:

$$a = n_1 - \frac{b}{\lambda_1^2}, \quad b = \frac{n_2 - n_1}{1/\lambda_2^2 - 1/\lambda_1^2}. \quad (2)$$

Из геометрической оптики обучающимся известно, что показатель преломления n материала, из которого изготовлена равнобедренная призма с преломляющим углом α , проще всего определить по углу γ наименьшего отклонения света от первоначального направления [3–5]:

$$n = \frac{\sin \frac{\alpha + \gamma}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (3)$$

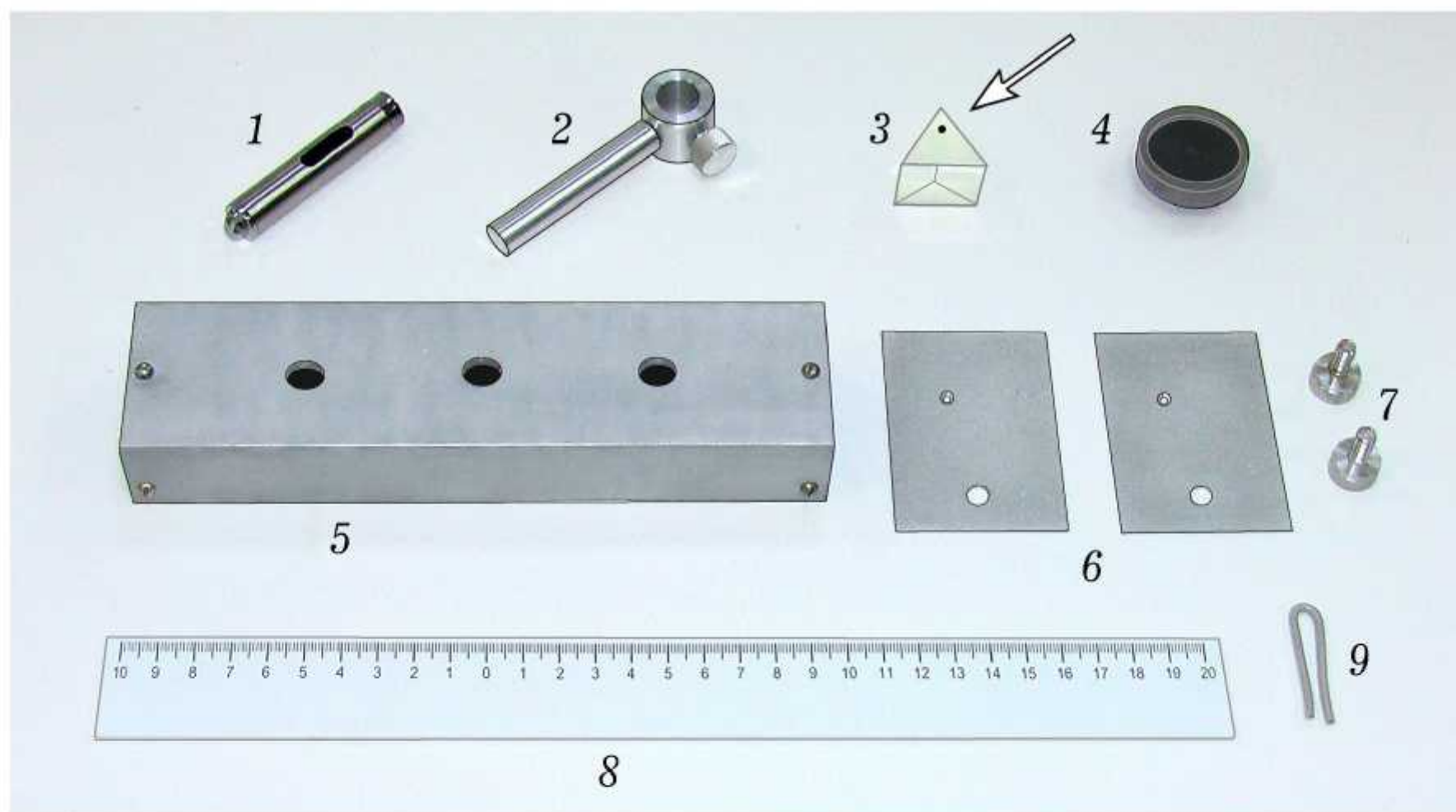


Рис. 3. Элементы прибора для определения показателя преломления треугольной равнобедренной призмы. Стрелка показывает вершину угла отклонения пучка света от первоначального направления

На рис. 3 дана фотография деталей, из которых студенты могут самостоятельно собрать простой прибор (рис. 4) для измерения угла γ . На этих рисунках обозначены: 1 — полупроводниковый лазер (лазерная указка); 2 — держатель лазера; 3 — равнобедренная стеклянная призма из стекла флинт; 4 — поворотный столик

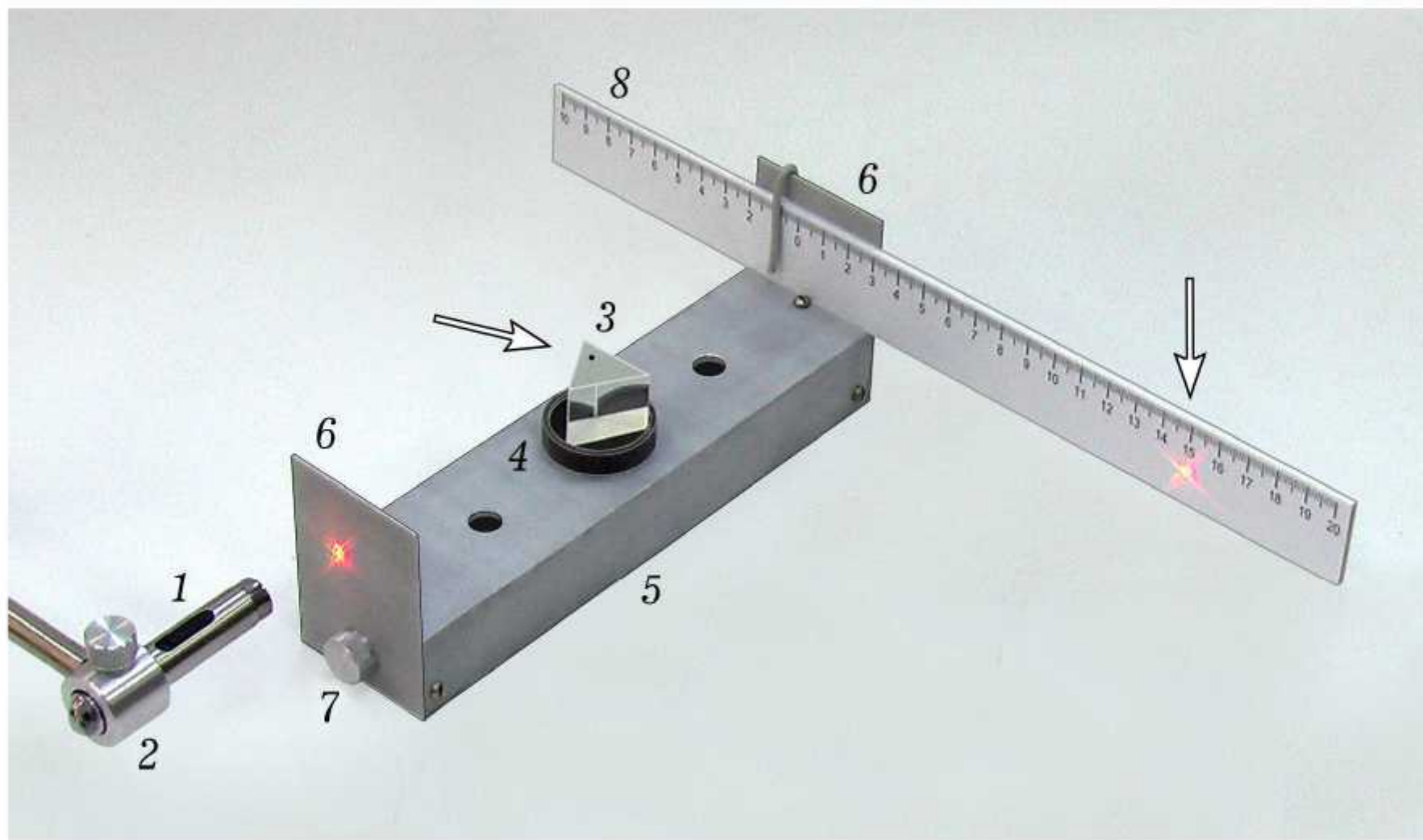


Рис. 4. Определение показателя преломления призмы по углу наименьшего отклонения пучка лазерного излучения: стрелки показывают вершину угла отклонения, обозначенную точкой на призме, и место падения преломленного пучка света на линейку

для призмы, изготовленный из эбонита или подходящего пластика; 5 — основание прибора из дюралевого швеллера; 6 — одинаковые дюралевые экраны визира с отверстиями диаметром 2 мм; 7 — крепежные винты; 8 — измерительная линейка с миллиметровыми делениями; 9 — зажим для линейки.

Собрав прибор (рис. 4), с основания снимают поворотный столик с призмой и измерительную линейку. Направляют пучок лазерного излучения так, чтобы он прошел через оба визирных отверстия. Располагают линейку так, чтобы ее нулевое деление находилось против выходного отверстия визира, и закрепляют линейку зажимом. Помещают поворотный столик с призмой на место и, вращая столик вокруг вертикальной оси, добиваются минимального отклонения светового пучка на линейке. Измеряют расстояние x от линейки до обозначенной на призме точкой вершины угла отклонения γ светового пучка от первоначального направления и расстояние y от нулевого деления линейки до точки падения преломленного пучка на линейку. По этим данным вычисляют $\operatorname{tg} \gamma$, угол γ и, пользуясь формулой (3), показатель преломления стекла.

В наших опытах получились следующие значения: для зеленого света $\lambda_1 = 534$ нм и $n_1 = 1,7255$; для красного света $\lambda_2 = 657$ нм и $n_2 = 1,7105$.

4. Прибор для фотографирования дисперсионной кривой

Для изготовления этого прибора необходимы общедоступные элементы, фотография которых приведена на рис. 5: 1 — закрепленная на панели ртутная лампа *CCFL* 80 × 2,0 мм для 3,5-дюймового ЖК-дисплея [11]; 2 — пластиковая крышка со щелью шириной 0,2 мм, оставляющая сбоку щелевые вентиляционные отверстия для охлаждения лампы; 3 — блок питания лампы (инвертор лампы *CCFL*, 12 В) [12]; 4 — изогнутая из пластика Г-образная штанга длиной 200 мм; 5 — дюралевая стойка; 6 — голографическая дифракционная решетка с периодом 0,001 мм; 7 — равнобедренная призма из стекла флинт; 8 — специальный держатель для призмы и дифракционной решетки, изготовленный из эбонита или подходящего пластика; 8' — такой же держатель, изготовленный на 3D-принтере; 9 — крепежные винты; 10 — линейка с миллиметровыми делениями, показывающая масштаб фотографии.

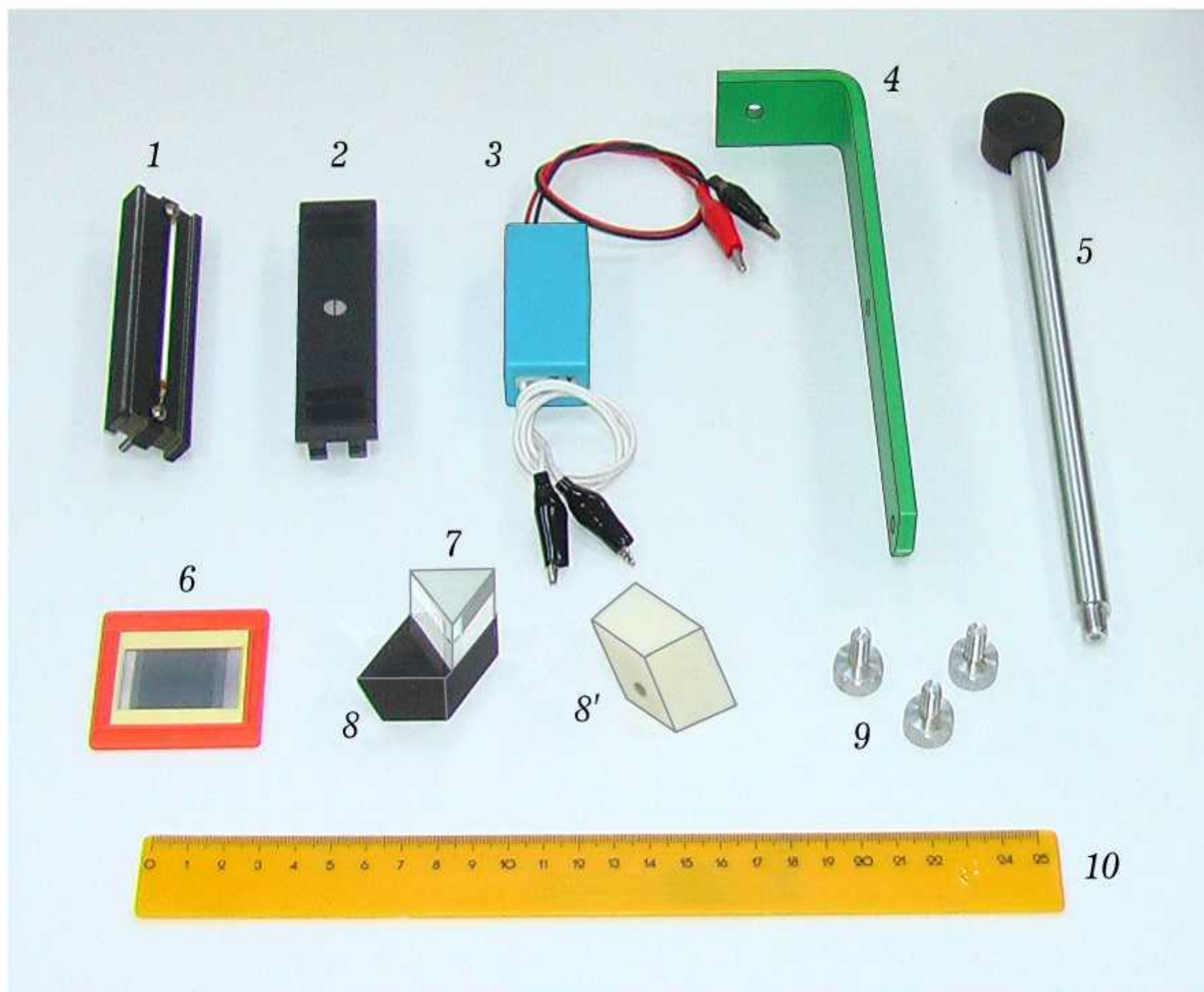


Рис. 5. Элементы прибора для фотографирования дисперсионной кривой

На рис. 6 приведена фотография прибора в рабочем состоянии (11 — смартфон, на который производится фотографирование). Призма в приборе установлена так, чтобы ее верхняя грань была горизонтальна, а вершина преломляющего угла находилась снизу.

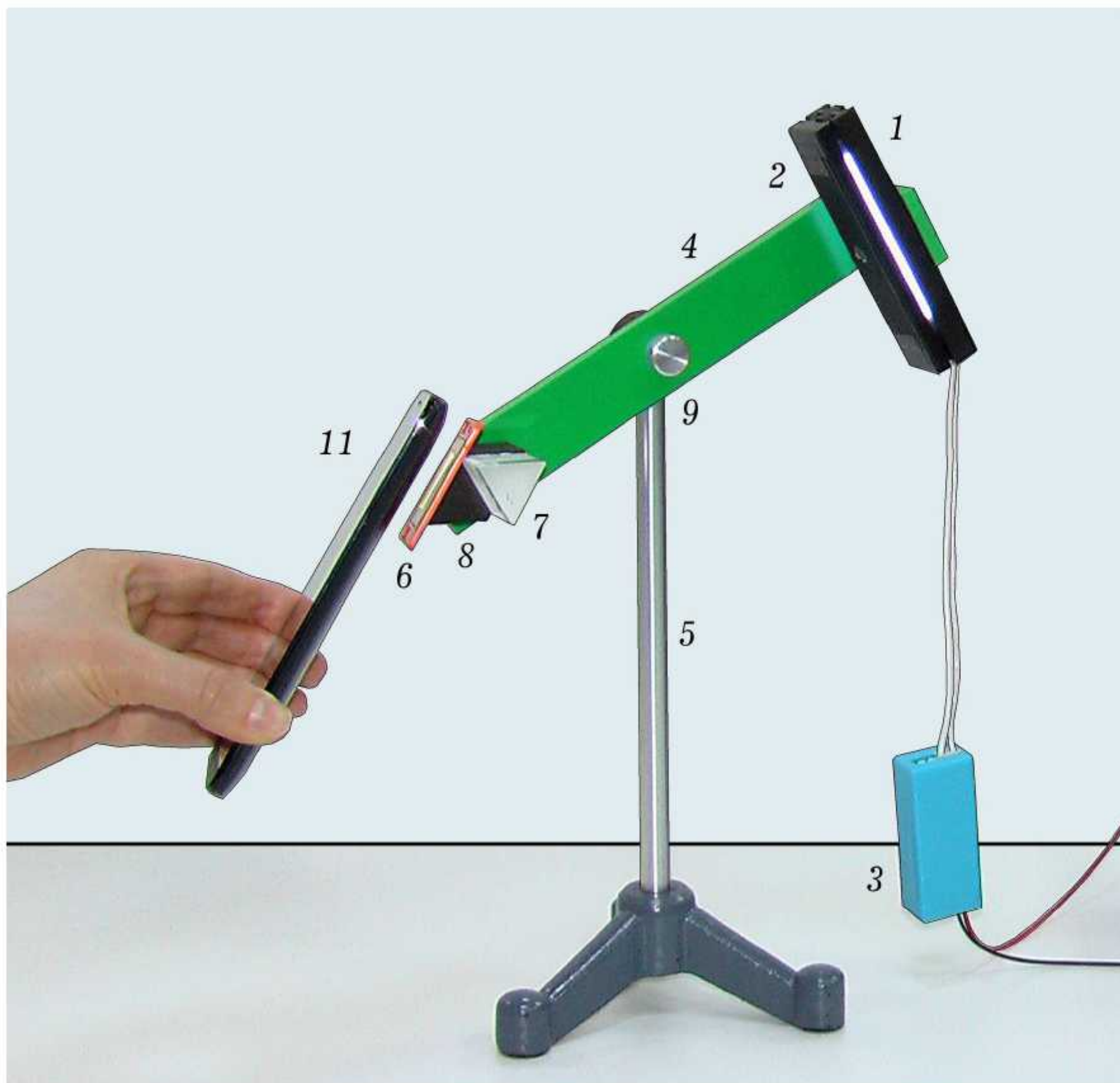


Рис. 6. Установка для фотографирования дисперсионной кривой

Свет от ртутной лампы падает на призму сверху вниз и выходит под углом наименьшего отклонения. Преломленный призмой пучок идет снизу вверх, что удобно для наблюдения и фотографирования.

Нетрудно видеть, что показанные на рис. 4 и 6 приборы принципиально ничем не отличаются друг от друга. Действительно, достаточно первый прибор повернуть против часовой стрелки на 90° и наклонить так, чтобы основание призмы оказалось сверху и стало горизонтальным, как получится второй прибор.

Способ изготовления дифракционной решетки на фотопластинке или фотопленке описан в работах [8, 10]. Там же указано, что решетка дает спектр максимальной яркости, если свет падает на нее под углом, равным углом падения интерферирующих пучков при голографической записи решетки. Поэтому держатель для призмы и решетки нужно изготовить так, чтобы закрепленная на нем решетка давала спектр в направлении, перпендикулярном спек-

тру, создаваемому призмой. Дифракционный спектр будет иметь максимальную яркость, если решетку, перпендикулярную выходящему из призмы пучку, повернуть относительно этого положения на угол, примерно равный 19° . Призму и решетку крепят к держателю двусторонним скотчем или приклеивают.

5. Выполнение эксперимента и ручная обработка его результатов

Сборка прибора из готовых элементов и выполнение эксперимента занимают минимальное время. Студенты вначале должны увидеть изогнутый дисперсионный спектр, а затем сфотографировать его на смартфон, как это показано на рис. 6. Понятно, что лучше смартфон не держать в руке, а закрепить его в подходящем штативе.

Чтобы убедиться в том, что полученная в эксперименте фотография изогнутого спектра соответствует формуле Коши (1), нужно распечатать ее на принтере так, чтобы получилось изображение достаточно большого размера. Рядом с фотографией необходимо построить декартову систему координат, горизонтальная ось которой отградуирована в длинах волн λ , а вертикальная — в значениях показателя преломления n (рис. 7).

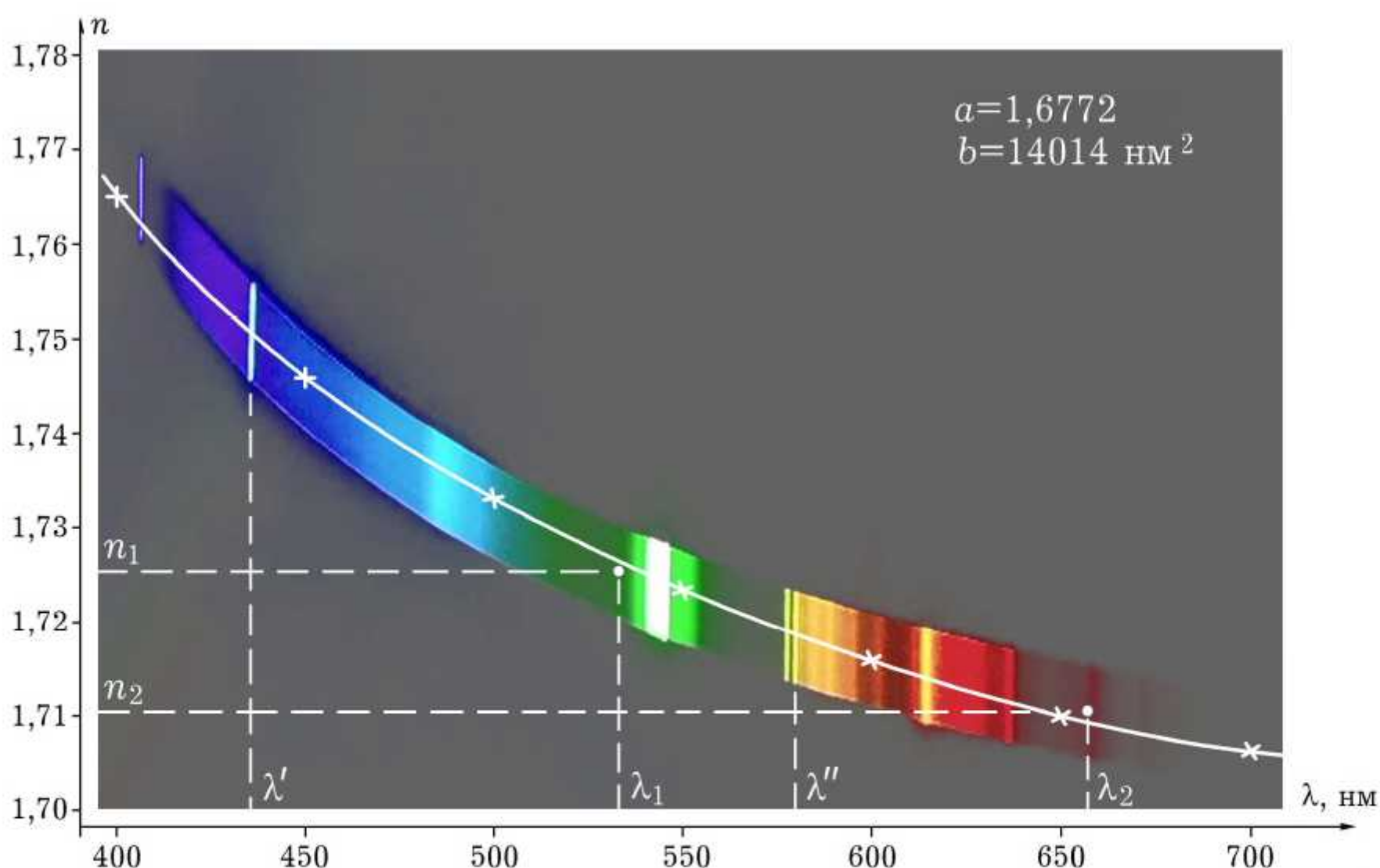


Рис. 7. Ручная обработка результатов эксперимента. Круглые белые точки соответствуют излучению зеленого и красного лазеров. Теоретический график $n = a + b/\lambda^2$ построен по точкам (белые крестики, сплошная линия)

Градуировку оси абсцисс производят, пользуясь тем, что длины волн ртутного спектра известны. Выбирают, например, яркую светлую фиолетовую линию $\lambda' = 435,8 \approx 436$ нм и яркую желтую линию $\lambda'' = 579,1 \approx 579$ нм и на фотографии измеряют в мм расстояние Δl_λ между этими линиями вдоль оси длин волн. Далее находят цену деления горизонтальной оси в нм/мм:

$$c_\lambda = \frac{\lambda'' - \lambda'}{\Delta l_\lambda} \quad (4)$$

и на оси λ ставят первое деление 400 нм, отступя влево от значения $\lambda' = 436$ нм на $36/c_\lambda$ мм. Чтобы обозначить, например, следующее большое деление 450 нм, нужно найти расстояние до него от первого деления: $(450 - 400)/c_\lambda$ мм и т. д. Проведенную градуировку оси проверяют по второй выбранной длине волны λ'' .

Аналогичным образом градуируют вертикальную ось, используя измеренные с помощью зеленого и красного лазеров значения показателей преломления призмы для двух длин волн: $\lambda_1 = 534$ нм и $n_1 = 1,7255$; $\lambda_2 = 657$ нм и $n_2 = 1,7105$. На изогнутом спектре обозначают точки, соответствующие этим длинам волн, и определив цену деления оси показателей преломления n :

$$c_n = \frac{n_1 - n_2}{\Delta l_n}, \quad (5)$$

наносят на нее деления от 1,70 до 1,78.

Пользуясь полученной градуировкой, определяют показатели преломления для двух ярких линий ртутного спектра, например, для уже использованных фиолетовой и желтой. Решив систему из двух уравнений (1) с двумя неизвестными a и b , по формулам (2) находят эти константы. Начиная от 400 нм с шагом 50 нм, рассчитывают по формуле (1) теоретические значения показателя преломления. В той же системе координат строят график зависимости $n = n(\lambda)$ и убеждаются, что приближенная формула Коши удовлетворительно описывает полученную в эксперименте кривую нормальной дисперсии материала призмы.

6. Компьютерная обработка результатов эксперимента

Для компьютерной обработки полученной в эксперименте фотографии имеет смысл использовать электронные таблицы *Excel*. Сначала определяют, из какого стекла изготовлена исследуемая призма. Для этого полученные для красного и зеленого света показатели преломления сравнивают со справочными данными для различных стекол флинт [13].

В электронных таблицах *Excel* по справочным данным (табл. 1) строят графики зависимости показателя преломления от длины

Таблица 1
Показатели преломления стекол флинт [13]

Линия спектра	λ , нм	Показатель преломления n				
		ТФ1	ТФ2	ТФ3	ТФ4	ТФ5
h	404,7	1,682279	1,710667	1,762150	1,788574	1,806078
g	435,8	1,672450	1,699828	1,749256	1,774539	1,791337
F'	480,0	1,662347	1,688731	1,736166	1,760316	1,776434
F	486,1	1,661197	1,687470	1,734685	1,758709	1,774753
e	546,1	1,652193	1,677618	1,723164	1,746226	1,761711
d	587,6	1,647668	1,672680	1,717419	1,740019	1,755235
D	589,3	1,647501	1,672498	1,717208	1,739792	1,754997
C'	643,8	1,642955	1,667550	1,711471	1,733612	1,748553
C	656,3	1,642080	1,666601	1,710373	1,732431	1,747322
r	706,5	1,639008	1,663268	1,706524	1,728300	1,743017

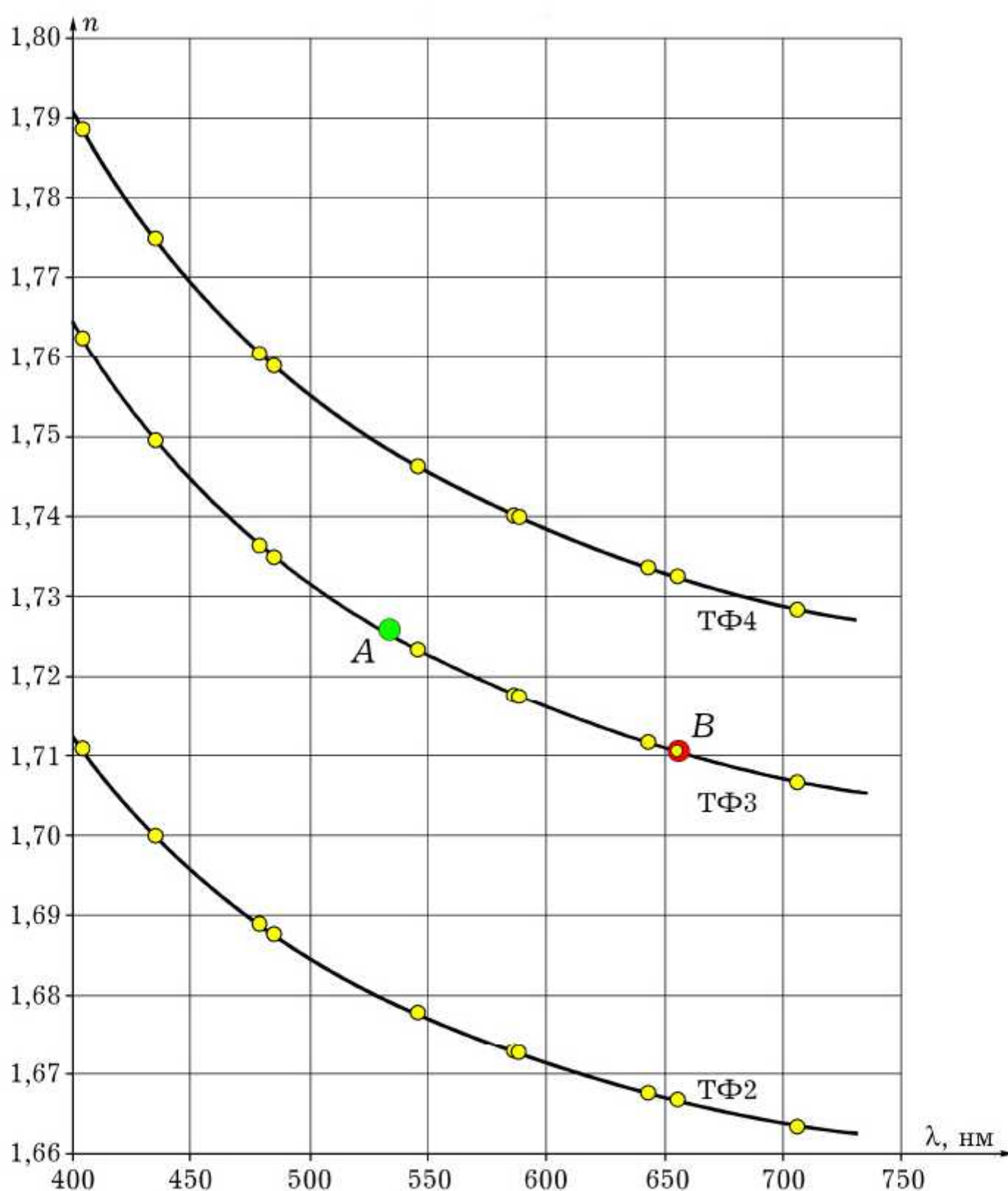


Рис. 8. Дисперсионные кривые стекол ТФ2, ТФ3 и ТФ4, построенные по справочным данным (желтые точки), и две экспериментальные точки зеленая A и красная B для излучения полупроводниковых лазеров

волны для различных марок стекол флинт и наносят на них две точки A и B , соответствующие излучению зеленого и красного лазеров (рис. 8). Обнаруживают, что эти точки находятся наиболее близко к дисперсионной кривой стекла флинт ТФЗ. В студенческих экспериментах погрешность в измерении показателей преломления может быть довольно значительной. Тем не менее всегда надежно исключаются из рассмотрения все стекла флинт кроме марки ТФЗ.

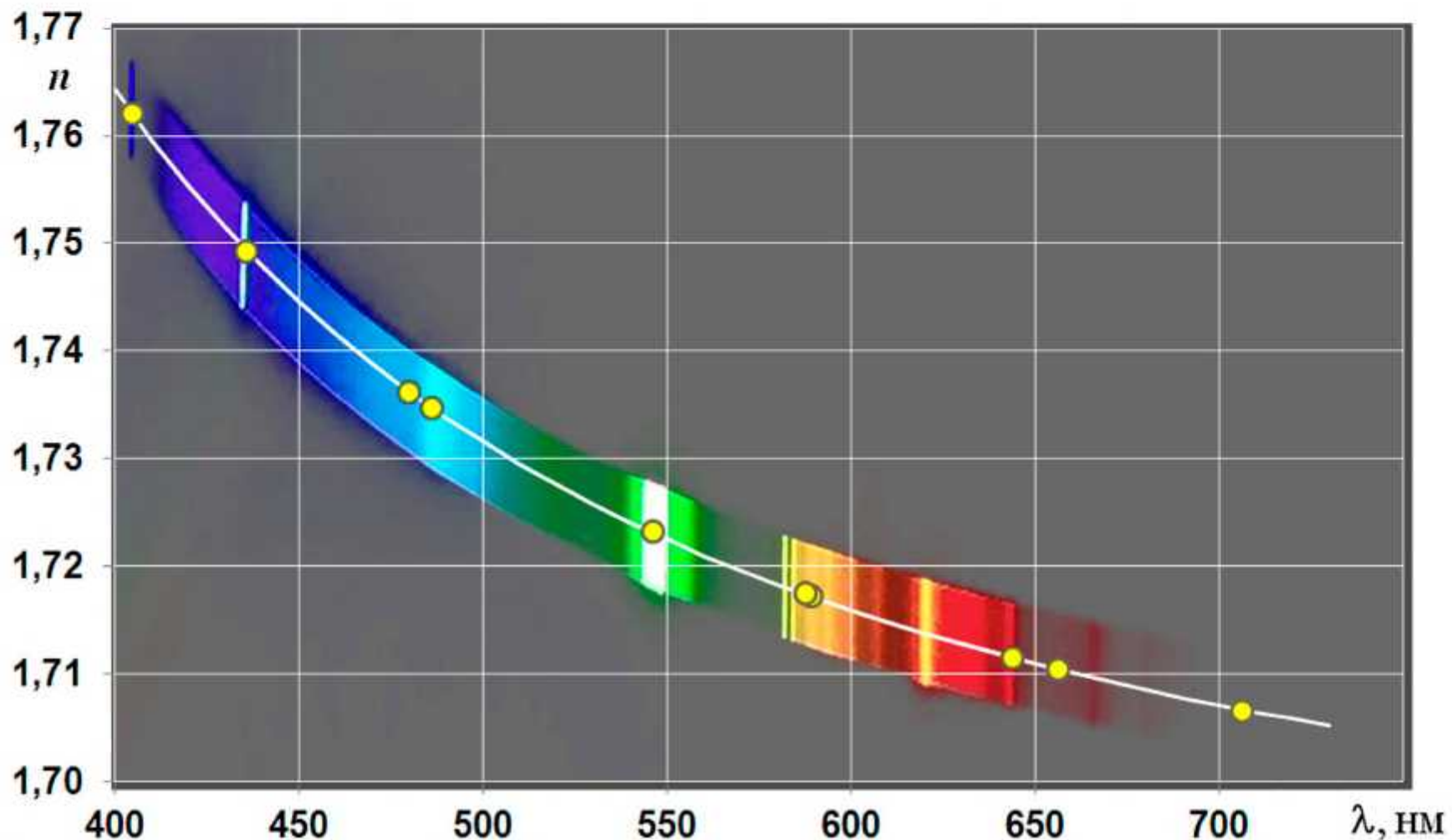


Рис. 9. Скриншот результатов обработки полученной в эксперименте дисперсионной кривой в программе *Excel*. Круглые желтые точки соответствуют табличным значениям показателя преломления стекла флинт ТФЗ (табл. 1). Сплошной линией изображен график функции, содержащий следующий член формулы Коши (1) $n = a + b/\lambda^2 + c/\lambda^4$. Значения коэффициентов $a = 1,6855$, $b = 9595 \text{ нм}^2$ и $c = 48,21 \cdot 10^7 \text{ нм}^4$ найдены в *Excel* по справочным данным для стекла марки ТФЗ

Теперь можно сравнить фотографию изогнутого спектра с построенной дисперсионной кривой. Для этого полученную фотографию загружают в таблицы *Excel*. Задают параметры графика, на котором изображена дисперсионная кривая стекла ТФЗ: убирают заливку области построения диаграммы, чтобы она стала прозрачной, задают белый цвет горизонтальных и вертикальных линий сетки, перемещают диаграмму на передний план. Изменяют размер загруженной фотографии так, чтобы ее было удобно сравнивать с дисперсионной кривой. Затем накладывают дисперсионную кривую на фотографию. Растягивая построенный график по горизонтальной и вертикальной осям, совмещают точки, соответствующие ярким линиям ртутного спектра, с этими линиями на фотографии. Например, линии g и e (табл. 1) соответствуют светлым ярко-фиолетовой и ярко-зеленой линиям ртутного спектра. Убеждаются, что дисперсионная кривая прекрасно ложится на фотографию дисперсионного спектра (рис. 9).

7. Заключение

Описанные в статье приборы настолько просты и доступны для воспроизведения, что вполне могут быть изготовлены самими студентами при выполнении проектных исследований. Материальным продуктом проектной деятельности являются готовые наборы деталей, которые обеспечивают быструю сборку экспериментальных установок для демонстрационных опытов и лабораторных работ практикума. Фотографирование дисперсионных кривых на смартфон экономит время, необходимое для получения, обработки и интерпретации результатов эксперимента. В целом материал статьи позволяет организовать увлекательную исследовательскую деятельность обучаемых: на лекции при демонстрации дисперсионной кривой перед студентами ставится проблема, которая затем решается ими во внеурочной проектной деятельности или при выполнении лабораторных работ физического практикума.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-013-00157. *Acknowledgments:* The reported study was funded by RFBR, project number 20-013-00157.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ньютон И. Лекции по оптике. — М.: Издательство академии наук СССР. — 1946. — 298 с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1970. — 856 с.
3. Дитчберн Р. Физическая оптика. — М.: Наука, 1965. — 632 с.
4. Сивухин Д. В. Общий курс физики: Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. IV. Оптика. — М.: Физматлит, 2006. — 792 с.
5. Ландсберг Г. С. Оптика. Учеб. пособие: Для вузов. — М.: Физматлит, 2003. — 848 с.
6. Necht E. Optics. — New York: Addison Wesley, 2002. — 698 p.
7. Хвольсон О. Д. Курс физики. В 5 томах. Том 2. Учение о звуке (акустика). — Учение о лучистой энергии. — М.: РСФСР Государственное издательство Берлин, 1923. — 776 с.
8. Майер В. В. Учебный эксперимент с голографической дифракционной решеткой: Методическая разработка для студентов физико-математических факультетов пединститутов. — Глазов: ГГПИ, 1990. — 36 с.
9. Майер В. В. Голографическая дифракционная решетка / Учебное оборудование для кабинетов физики общеобразовательных учреждений / Под ред. Г. Г. Никифорова. — М.: Дрофа, 2005. — С. 364–365.
10. Mayer V. V., Varaksina E. I. Holographic grating and smartphone-based optical spectrograph for educational research // European Journal of Physics. — 2020. — Vol. 41. — 055302.
11. Новые лампы подсветки CCFL 80 мм×2,0 мм для 3,5-дюймовой панели ЖК-дисплея. https://aliexpress.ru/item/32836345959.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.264d33edsXDpuV&_ga=2.48431460.394710438.1617968240-2004446071.1607073427&sku_id=65101445053
12. Инвертор лампы CCFL. https://aliexpress.ru/item/4001229637642.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.264d33edsXDpuV&_ga=2.48431460.394710438.1617968240-2004446071.1607073427&sku_id=10000015379126570
13. glassBank — каталог оптических сред [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://glassbank.ifmo.ru> (дата обращения: 05.02.2021).