

Научная статья

ББК 74.262.23

УДК 372.853

В. В. Майер, Е. И. Вараксина

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РОБОТОТЕХНИКИ:
ФОТОДАТЧИК ЛИНЕЙНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА**

Представлен дидактический ресурс экспериментального исследования фотодатчика линейно поляризованного света при изучении будущими учителями физических основ робототехники. Показано, что разработанную серию учебных опытов можно использовать для организации проектной деятельности обучающихся в старшей школе.

Ключевые слова: физические основы робототехники, проектная деятельность, поляризация света, поляроиды, кремниевый фотодиод.

V. V. Mayer, E. I. Varaksina

**PHYSICS FOUNDATIONS OF ROBOTICS:
PHOTO SENSOR OF LINEARLY POLARIZED LIGHT**

A didactic resource is presented for the experimental study of a photo sensor of linearly polarized light when future teachers study the physics foundations of robotics. It is shown that the developed series of educational experiments can be used to organize student's project activity in high school.

Keywords: physics foundations of robotics, design activity, polarization of light, polaroids, silicon photodiode.

DOI: 10.62957/2307-5457-2024-3-12-23

1. Введение

Важность подготовки учителей физики к школьным занятиям по робототехнике не вызывает сомнений. Столь же очевидна необходимость использования элементов и устройств образовательной робототехники в учебном физическом эксперименте [1, 2, 3]. Для решения этих задач в распоряжении учебных заведений разного уровня имеются робототехнические наборы отдельных деталей и готовых блоков с подробными пошаговыми инструкциями по их

применению [4]. Поэтому развитие школьников при изучении робототехники происходит в основном на уровне сборки и программирования простейших роботов. В сознании обучающихся эти роботы выглядят состоящими из черных ящиков, физические основы действия которых непонятны, так как их устройство недоступно для изучения.

На кафедре физики и дидактики физики нашего университета для решения этой проблемы разработана и реализуется дисциплина «Физические основы робототехники» (всего аудиторных занятий 54 часа; из них лекции — 16, практические занятия — 28, контроль самостоятельной работы — 10 часов) [5]. Группа в количестве 12 студентов делится на звенья по два человека в каждом. На практических занятиях звенья выполняют учебные экспериментальные исследования тех физических явлений и объектов, которые широко применяются в образовательной робототехнике. Согласно рабочей программе дисциплины на одно исследование отводится 4 часа учебного времени. Контроль самостоятельной работы осуществляется в форме презентации каждым звеном выполненного исследования и публичного обсуждения его результатов.

Практические занятия отличаются от обычных лабораторных работ тем, что они фактически моделируют организацию будущим учителем проектной деятельности школьников. С этой целью звеньям предоставляются специально разработанные *дидактические ресурсы проектной деятельности*, часть из которых опубликована. Например, статья [6] обеспечивает учебное исследование датчика Холла, работа [7] — исследование инфракрасного датчика расстояния, статья [8] используется при исследовании импульсного метода определения скорости звука.

Фотодатчики находят широкое применение в робототехнике, в том числе, образовательной. Например, в известных учебных наборах по робототехнике применяется датчик линии; в датчике цвета решающую роль играет спектральная характеристика фотодатчика; посредством датчика расстояния определяют удаленность препятствия; фотодатчик оптопары запускает отсчет времени и т. д. Однако неразборные блоки робототехнических наборов недоступны для такого изучения, которое позволяет обучающимся в доказательном эксперименте уяснить сущность физических явлений, лежащих в их основе.

В настоящей работе представлен дидактический ресурс экспериментального исследования фотодатчика линейно поляризованного света при изучении будущими учителями физических основ робототехники. Такой датчик состоит из фотодиода с расположенной перед ним поляроидной пленкой и предназначен для создания электронно-механического анализатора. Так называется прибор, который показывает направление колебаний светового вектора в пучке линейно поляризованного света. Прототип этого прибора представлен в ста-

тье [9], а описание его современного варианта планируется дать в следующем номере журнала «Учебная физика».

2. Фотоны, поляризация света и фотодиодный датчик

По современным представлениям свет — это поток испускаемых атомами элементарных частиц (*фотонов*), которые являются квантами электромагнитного поля. Каждый фотон обладает энергией, импульсом, частотой и нулевой массой, поэтому движется со скоростью света.

Для наших целей достаточно упрощенно считать, что фотоны представляют собой короткие отрезки (цуги) поперечных электромагнитных волн. В таких волнах электрическое и магнитное поля неразрывно связаны: колебания одного поля порождают колебания другого и синфазны с ним, в результате электромагнитная волна распространяется от источника. Однако в оптике особую значимость имеет вектор напряженности электрического поля \vec{E} электромагнитной волны, на который реагируют многие приемники света. Поэтому оптические теории строятся для вектора \vec{E} , который называется *световым*, а перпендикулярный ему вектор магнитной индукции \vec{B} подразумевается и при необходимости учитывается в теории.

Атомы обычных источников испускают фотоны независимо друг от друга. Поэтому в пучке *естественного света* вектор \vec{E} колеблется беспорядочно во всех направлениях в плоскости, перпендикулярной направлению светового пучка. Естественный свет, пройдя через *поляризатор*, становится линейно поляризованным. В нем световые векторы отдельных фотонов колеблются в одном направлении, которое называют *главным направлением* поляризатора. Для учебных опытов наиболее доступны и удобны *поляроиды*, — поляризаторы на основе прозрачной пленки, в состав которой входят одинаково ориентированные молекулы, обладающие значительным *дихроизмом*.

Глаз человека не реагирует на состояние поляризации светового пучка. Например, пучки естественного и линейно поляризованного света равной интенсивности визуально воспринимаются одинаково. Чтобы обнаружить поляризованный свет, используют специальные *анализаторы*, которые изменение направления поляризации сводят к изменениям интенсивности света. Самым простым анализатором является поляризатор, который позволяет отличить естественный свет от линейно и частично поляризованного.

Изложенное показывает, что на начальном этапе изучения поляризации света школьники должны усвоить немало новых для них и далеких от житейской практики понятий. Поэтому в статье [9] предлагается в демонстрационных опытах вместо обычного поляроидного анализатора использовать оригинальный электронно-механический анализатор линейно поляризованного света. Основным элементом этого прибора является фотодатчик, состоящий из

неподвижного фотодиода и вращающегося перед ним указателя в виде двойной стрелки, в отверстии которого закреплена поляроидная пленка. При освещении линейно поляризованным светом датчик вырабатывает напряжение, которое подается на вход специального усилителя. С выходом усилителя соединен сервопривод, вращающий датчик до тех пор, пока закрепленная на нем двойная стрелка не станет параллельна направлению колебаний светового вектора в пучке поляризованного света.

3. Основное оборудование для учебного эксперимента

Для выполнения учебного исследования фотодиода необходимо подготовить соответствующее оборудование. Так как это исследование предназначено для организации проектной деятельности в старшей школе, то целесообразно максимальное использование имеющихся в школьном кабинете физики приборов.

3.1. Фотодиод ФД–256, кремниевый. Выбор фотодиода этого типа обусловлен его небольшими размерами (диаметр 4 мм, длина 8 мм) и достаточно высокой чувствительностью (0,02 мкА/лк), захватывающей диапазон видимого света (0,40–1,10 мкм). Однако максимум чувствительности фотодиода ФД–256 лежит в инфракрасной области (0,75–0,90 мкм).

3.2. Диод 1N4001, кремниевый, выпрямительный. Основные параметры диода 1N4001: максимальное постоянное обратное напряжение 50 В; максимальная сила прямого тока 1 А; катод обозначен светлым кольцом на корпусе. Можно заменить любым другим полупроводниковым диодом.

3.3. Мультиметр DT9208A, цифровой. В опытах применяется для измерения силы тока, напряжения и сопротивления постоянных резисторов.

3.4. Тестер (авометр) Ц4315, аналоговый. В опытах служит для измерения сопротивления $p-n$ -перехода. Может быть заменен практически любым аналоговым авометром.

3.5. Люксметр. Для измерения освещенности хорошо подходит современный недорогой цифровой люксметр Digital Luxmeter LX1010B. Он имеет три предела измерений: 2000, 20000, 50000 лк; в опытах используется первый предел измерений.

3.6. Источник питания. Фотодиод подключается к батарее типа 3R12 на 4,5 В через постоянный резистор (например, сопротивление $R = 13$ кОм и мощность $W = 1$ Вт), который для удобства должен иметь достаточно большие размеры.

3.7. Источник естественного света. В большинстве опытов используется школьный осветитель для теневого проецирования (ти-

па ОТП), с лампой накаливания (6 В, 21 св, прямая спираль). В некоторых экспериментах этот источник можно заменить небольшой настольной лампой накаливания (220 В, 95 Вт).

3.8. Спектральный аппарат. Для получения на белом экране сплошного спектра достаточной яркости наиболее пригодна школьная призма прямого зрения. Основной недостаток этой призмы заключается в неравномерности даваемого ею спектра: длина красной части значительно меньше фиолетовой. В опытах по обнаружению инфракрасной составляющей спектра лампы накаливания этот недостаток обращается в достоинство.

3.9. Оптические фильтры. Из комплекта приборов к школьному проекционному аппарату типа ФОС–115 необходимы: тепловой фильтр и два поляроидных поляризатора, установленные в рейтеры с возможностью вращения вокруг оптической оси.

4. Экспериментальное исследование фотодатчика

В серии простых опытов студенты исследуют основные физические явления, положенные в основу датчика, состоящего из поляроидного анализатора и фотодиода. Теоретические задания они выполняют, используя материалы лекционного курса и рекомендованной литературы [10].

Опыт 1. Основное свойство полупроводникового диода. Всем известно, что диод пропускает ток в одном направлении и не пропускает его в другом. Иначе говоря, сопротивление диода в прямом направлении близко к нулю, а в обратном — приближается к бесконечности. Убедиться в этом можно, последовательно измерив сопротивления диода в противоположных направлениях. Однако использовать для этого нужно не цифровой мультиметр, который сейчас есть в каждом доме, а аналоговый тестер или авометр, который сохранился во многих школьных кабинетах физики.

Задание. Схематически изобразите электронно–дырочный переход и соответствующую энергетическую диаграмму. Поясните, как получается такой переход, и почему прямой ток диода существенно больше обратного. Нарисуйте вольтамперную характеристику диода.

Опыт 2. Удивительное свойство фотодиода. Фотодиод устанавливают на вертикальной стойке из пластика, соединяют с омметром и освещают лампой накаливания. Обнаруживают, что в темноте фотодиод работает точно так же, как обычный диод. Если омметр показывает, что сопротивление фотодиода близко к нулю, то освещение фотодиода почти не изменяет этих показаний. Значит, свет практически не влияет на прямой ток фотодиода. При

обратном включении находящегося в темноте фотодиода его сопротивление очень велико, и резко уменьшается, если фотодиод осветить лампой накаливания. Это означает, что освещение вызывает рост тока, идущего через $p-n$ -переход фотодиода. Сила тока может возрасти только при увеличении приложенного к проводнику напряжения или числа свободных носителей заряда в проводнике. Поэтому результат опыта можно объяснить лишь увеличением числа носителей заряда. В фотодиоде это электроны и дырки. Итак, опыт показывает, что поток фотонов вызывает в полупроводнике образование электронно-дырочных пар, которые в электрическом поле движутся упорядоченно, то есть создают электрический ток.

Задание. Схематически изобразите электронно-дырочный переход фотодиода и с помощью энергетических диаграмм объясните все результаты выполненного эксперимента.

Опыт 3. Определение анода и катода фотодиода. У фотодиода ФД-256 есть два вывода, один из которых длиннее другого. Чтобы определить, какой из выводов является анодом, к фотодиоду подключают мультиметр в режиме милливольтметра и на линзу фотодиода направляют свет от лампы накаливания. При этом прибор показывает наличие небольшой фотоэдс на выводах освещенного фотодиода. Очевидно, что положительный полюс получившегося источника напряжения является анодом фотодиода, а отрицательный — катодом. Если к фотодиоду в качестве внешней цепи подключить резистор, то ток через него идет от анода к катоду, а внутри фотодиода — от катода к аноду. Такой режим включения фотодиода называется *фотогальваническим* (рис. 1.1).

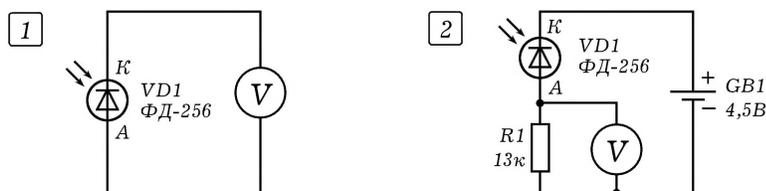


Рис. 1. Схемы включения фотодиода: 1 — фотогальванический режим работы; 2 — фотодиодный режим работы

Задание. Выясните, полупроводник какого типа n или p является анодом фотодиода в фотогальваническом режиме. Сравнив опыты 3 и 1, объясните, почему для определения выводов фотодиода лучше использовать цифровой мультиметр, чем аналоговый авометр.

Опыт 4. Зависимость фотоэдс от освещенности фотодиода. Для экспериментального исследования этой зависимости дополняют оборудование предыдущего опыта люксметром любого типа, на-

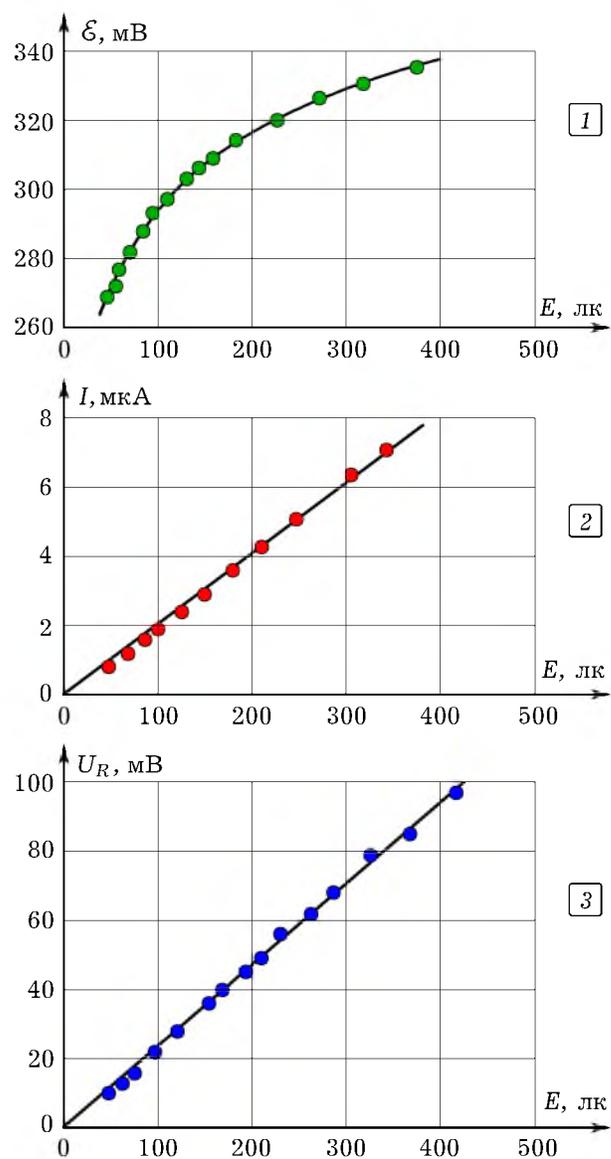


Рис. 2. Световые характеристики фотодиода. *Фотогальванический режим:* 1 — зависимость фотоэдс от освещенности; 2 — зависимость силы тока короткого замыкания фотодиода от освещенности; *фотодиодный режим:* 3 — напряжение на резисторе сопротивлением $R = 13$ кОм в зависимости от освещенности

пример, Digital Luxmeter LX1010B. Рядом с фотодиодом ФД–256 располагают датчик люксметра и на расстоянии 3–4 м от этих приборов помещают настольную лампу накаливания. С фотодиодом соединяют мультиметр в режиме милливольтметра. Приближая лампу к фотодиоду, снимают зависимость фотоэдс от освещенности и строят соответствующий график. Делают вывод, что в фотогальваническом режиме *световая характеристика фотодиода* (зависимость фотоэдс от светового потока) нелинейна (рис. 2.1).

Задание. Как известно, теория приводит к следующему выражению для ЭДС фотодиода в фотогальваническом режиме [10]:

$$\mathcal{E} = \frac{kT}{e} \left(\ln \frac{I_L}{I_s} + 1 \right).$$

Поясните все физические величины в этой формуле и покажите, что она верно описывает характер полученной в опыте зависимости фотоэдс от освещенности фотодиода.

Опыт 5. Фототок короткого замыкания фотодиода. В условиях предыдущего опыта переводят мультиметр в режим микроамперметра и снимают зависимость тока короткого замыкания фотодиода ФД–256 от его освещенности. Построив график этой зависимости, обнаруживают, что она линейна (рис. 2.2).

Задание. Объясните, почему сила тока короткого замыкания линейно зависит от освещенности фотодиода.

Опыт 6. Фотодиодный режим работы фотодиода. Режим работы, при котором на фотодиод подано обратное напряжение от постороннего источника, называется *фотодиодным* (рис. 1.2). Собирают цепь, состоящую из последовательно соединенных батареи на 4,5 В, фотодиода ФД–256 и резистора сопротивлением 13 кОм так, чтобы катод фотодиода был соединен с положительным полюсом батареи. Параллельно резистору подключают мультиметр в режиме вольтметра. Включают лампу накаливания и снимают зависимость напряжения на резисторе от освещенности фотодиода. Построив соответствующий график, обнаруживают, что эта зависимость линейна (рис. 2.3).

Задание. В прямоугольной системе координат изобразите семейство вольтамперных характеристик кремниевого фотодиода при различных освещенностях. Покажите области фотодиодного и фотогальванического режимов фотодиода, на осях обозначьте напряжения холостого хода и тока короткого замыкания, выделите вольтамперную характеристику неосвещенного фотодиода.

Опыт 7. Спектральная характеристика фотодиода. Школьный осветитель для теневого проецирования располагают на расстоянии не менее 0,5 м от белого экрана и получают на нем резкое

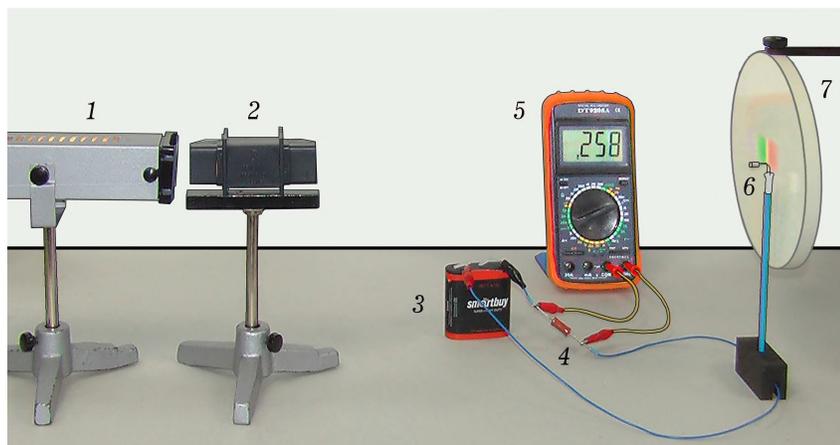


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования спектральной чувствительности фотодиода: 1 — осветитель для теневого проецирования; 2 — призма прямого зрения; 3 — источник питания; 4 — постоянный резистор $R = 13 \text{ кОм}$; 5 — мультиметр в режиме вольтметра; 6 — фотодиод ФД-256 на стойке; 7 — белый экран для наблюдения спектра

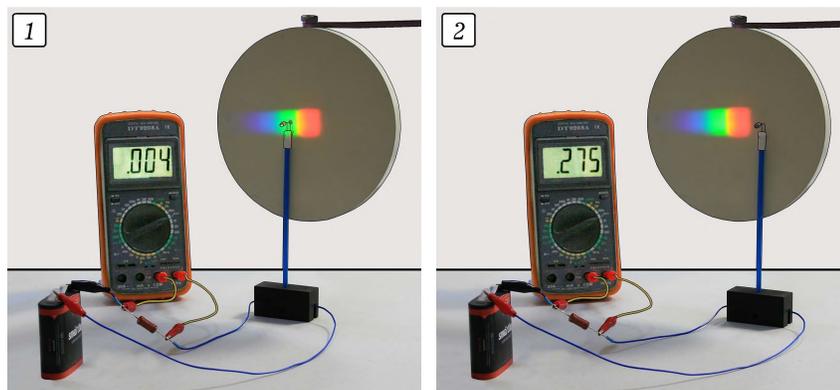


Рис. 4. Изучение спектральной характеристики фотодиода: 1 — фотодиод расположен в зеленой области сплошного спектра; 2 — фотодиод перемещен в невидимую инфракрасную область

изображение спирали в виде небольшого вертикального отрезка. Вблизи объектива осветителя помещают призму прямого зрения и разворачивают изображение спирали в горизонтальный спектр. Фотодиод на стойке располагают вблизи экрана и собирают такую же цепь, как опыте 6 (рис. 3). Перемещают фотодиод вдоль спектра. Обнаруживают, что в пределах видимой части спектра напряже-

ние на резисторе, созданное идущим через него фототоком, мало. Но оно сильно возрастает и достигает максимума в инфракрасной области (рис. 4). Следовательно, фотодиод типа ФД–256 обладает максимальной чувствительностью в инфракрасной части оптического излучения.

Задание. Пользуясь любыми доступными источниками информации, найдите и в отчете изобразите спектральную характеристику кремниевого фотодиода.

Опыт 8. Спектральная характеристика поляроидной пленки. Известно, что поляроидные поляризаторы работают только в видимой области спектра и не поляризуют инфракрасное излучение. Для экспериментального доказательства этого факта рядом со школьным осветителем располагают тепловой фильтр, затем устанавливают поляроидный поляризатор, такой же анализатор и фотодиод в фотодиодном режиме (рис. 1.2). Включают тепловой источник света и вращают вокруг оси светового пучка сначала поляризатор, а затем анализатор. Обнаруживают, что при этом сила фототока изменяется от нуля (рис. 5.1) до максимума в соответствии с законом Малюса. Делают вывод: поляроидные пленки поляризуют видимый свет. Убирают тепловой фильтр и повторяют опыт. Теперь наблюдают, что при вращении любого из поляризаторов фототок тоже изменяется от минимального (рис. 5.2) до максимального значения (рис. 5.3), но в минимумах он не достигает нуля. Это означает, что поляроидные поляризаторы не вполне поляризуют инфракрасное излучение, к которому наиболее чувствителен фотодиод ФД–256.

Задание. В доступных для изучения источниках попробуйте найти информацию о спектральных характеристиках поляроидных пленок.

5. Заключение

Новизна результатов представленного в работе дидактического исследования заключается в следующем.

1. Показано, что на занятиях по изучению дисциплины «Физические основы робототехники» целесообразна и возможна подготовка будущих учителей к организации в школе проектной деятельности по учебному исследованию приборов и устройств современной техники.

2. Разработаны содержание и методика экспериментального изучения студентами фотодатчика линейно поляризованного света с целью подтверждения основных положений физической теории внутреннего фотоэффекта на примере кремниевого фотодиода.

3. Реализована серия простых и доступных опытов с использованием типового школьного оборудования, которая позволяет орга-

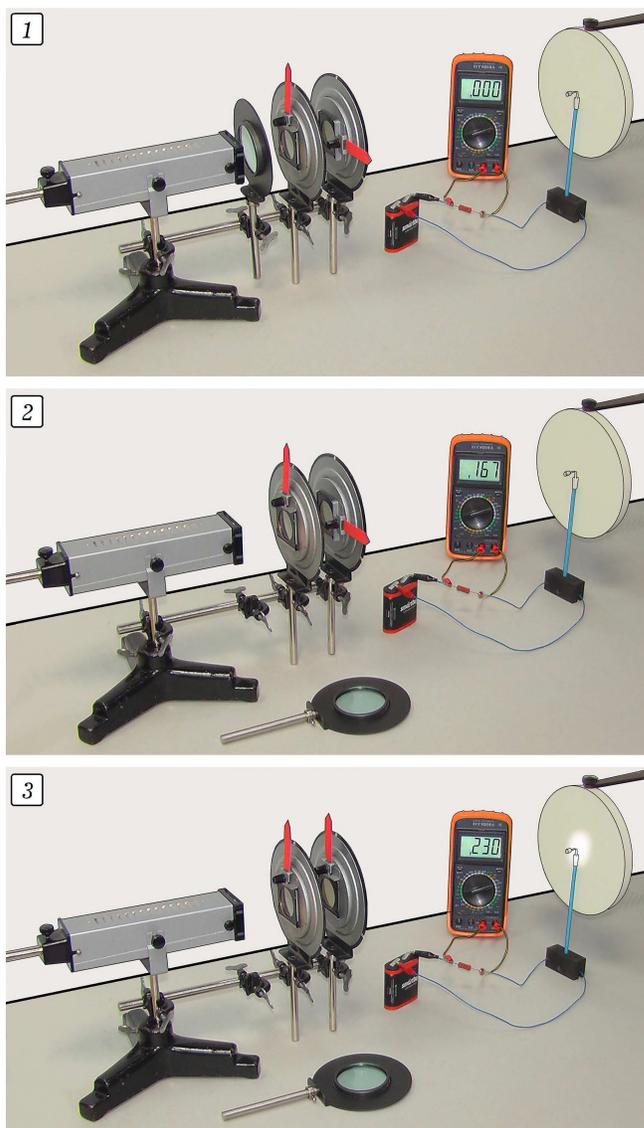


Рис. 5. Изучение спектральной характеристики поляроидной пленки: 1 — поляризатор и анализатор скрещены, тепловой фильтр задерживает инфракрасное излучение; 2 — тепловой фильтр убран, через скрещенные поляризатор и анализатор проходит инфракрасное излучение; 3 — главные направления поляризатора и анализатора параллельны, на экране видна освещенная область

низывать в старших классах проектную деятельность по учебному исследованию фотоэлектрического датчика линейно поляризованного света и может быть использована при изучении физических основ оптики и робототехники.

Исследование выполнено на базе Федеральной инновационной площадки «Школа учебного физического эксперимента» по проекту «Методология создания и внедрения современных учебных физических приборов и опытов для урочной и внеурочной деятельности по физике в средней школе и в педагогическом вузе» (ХУИА-2024-0030), который реализуется при финансовой поддержке Министерства просвещения Российской Федерации в рамках государственного задания (Дополнительное соглашение Министерства просвещения Российской Федерации и ФГБОУ ВО «Глазовский государственный инженерно-педагогический университет имени В.Г.Короленко» № 073-03-2024-058/1 от 13.02.2024 к соглашению № 073-03-2024-058 от 19.01.2024, регистрационный № НИОКТР 1023040600021-1-5.3.1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Оспенникова Е. В., Ершов М. Г., Оспенников А. А. Применение образовательной робототехники в учебном процессе по физике // Информационные компьютерные технологии в образовании. Вестник ПГГПУ. — 2016. — № 12. — С. 116–141.
2. Саранин В. А., Кельдышев Д. А., Иванов Ю. В. Применение робототехнических наборов в физических экспериментах // Международный научно-исследовательский журнал. — 2017. — № 9. — С. 90–96.
3. Куимов А. С., Зуев П. В. Формирование элементов технической грамотности учащихся при проведении физического эксперимента // Учебная физика. — 2024. — № 2. — С. 58–65.
4. Гребнева Д. М. Достоинства и недостатки использования программируемых конструкторов Lego при обучении робототехнике // Наука и перспективы. — 2017. — № 2. — URL: nir.esrae.ru/14-104 (дата обращения: 25.07.2024).
5. Вараксина Е. И., Майер В. В. Основные принципы и содержание практикума по физическим основам робототехники // Тезисы / Физика в школе и вузе: международный сборник научных статей. Выпуск 23 / Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена. — СПб., 2021. — С. 211–212.
6. Майер В. В., Вараксина Е. И., Васильев И. А. Учебное исследование датчика Холла, извлеченного из устаревшего компьютера // Учебная физика. — 2018. — № 3. — С. 18–32.
7. Вараксина Е. И., Касаткин К. А., Майер В. В. Развитие физического мышления учащихся при изучении элементов робототехники: учебное исследование инфракрасного датчика расстояния // Физика в школе. — 2015. — № 8. — С. 28–36.
8. Майер В. В., Вараксина Е. И. Импульсный метод измерения скорости звука // Потенциал. — 2014. — № 11. — С. 65–74.
9. Майер В. В., Майер Р. В. Электронно-механический демонстратор светового вектора // Учебная физика. — 1997. — № 1. — С. 53–61.
10. Игошин Ф. Ф., Самарский Ю. А., Ципенюк Ю. М. Лабораторный практикум по общей физике: Квантовая физика. — М.: Физматкнига, 2012. — 464 с. (С. 379–384)

Глазовский государственный
инженерно-педагогический
университет имени В. Г. Короленко

Поступила в редакцию 30.04.24.