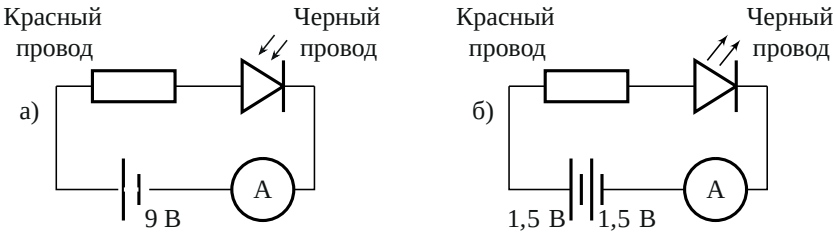
532 нм

Задача 1. [ВсОШ 2024/25, заключительный этап, 11 класс, практический тур, задача 1] «532 нм».

Внимание! В задаче не требуется оценка погрешности в пунктах, в которых это не указано явно.

Оборудование: инфракрасный светодиод с припаянным ограничительным резистором, фотодиод с припаянным ограничительным резистором в светонепроницаемом кожухе, зелёная лазерная указка, батарейка «Крона» 9 В, батарейки АА 2 штуки, батарейный отсек для батареек АА, соединительные провода, переменный резистор 500 Ом, два мультиметра, две линейки 15 см, две линейки 50 см, длинный, средний и короткий алюминиевые профили, 3 струбцины-прищепки, 2 канцелярских зажима шириной 41 мм, 4 канцелярских зажима шириной 25 мм, дифракционная решётка 500 штр/мм, кювета с раствором марганцовки, пластилин, бумажный транспортир, чёрная изолента на столе и по требованию, ножницы.

Соберите схему для измерения фототока фотодиода в соответствии с рисунком 1 (а). Для этого подключите последовательно к батарейке «Крона» один из мультиметров в режиме амперметра и замкните цепь фотодиодом, подключив его в обратной полярности. Соберите также схему питания светодиода в соответствии с рисунком 1 (б).

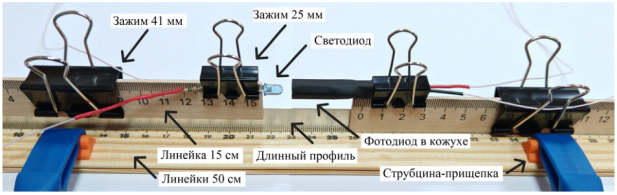


Внимание! Не подключайте светодиод к батарейке «Крона»! Это приведёт к его выходу из строя. Дополнительный светодиод выдаваться не будет.

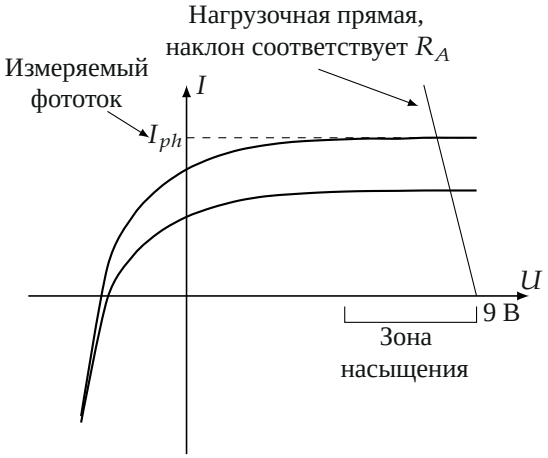
Для проверки работоспособности схемы убедитесь, что через светодиод течёт ток силой $I_{max} > 20$ мА. При помещении светодиода в свето-

непроницаемый кожух фотодиода сила тока через фотодиод увеличивается до значения не менее 100 мкА. Обратите внимание, что фотодиод может располагаться не на осевой линии светонепроницаемого кожуха.

Положите две линейки длиной 50 см на длинный профиль. Профиль с линейками прижмите к столу прищепками. Закрепите фотодиод и светодиод на линейках длиной 15 см (см. рис. 2), которые, в свою очередь, закрепите на алюминиевом профиле. Соберите установку в такой ориентации, чтобы свет от окна не попадал на поверхность фотодиода напрямую.

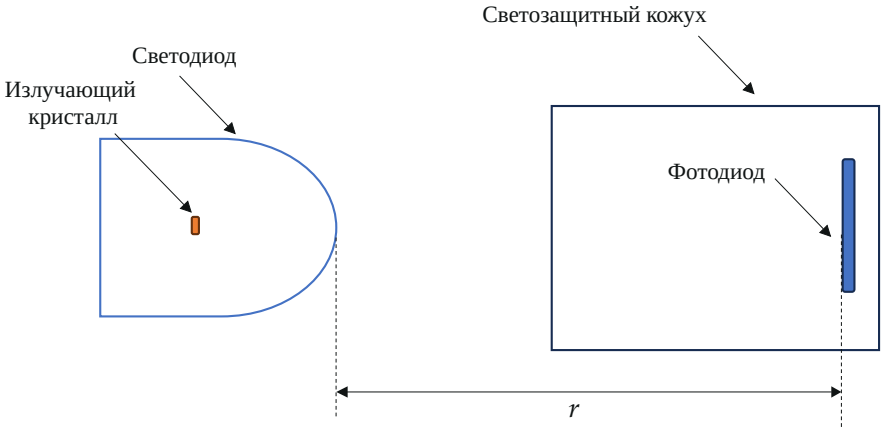


Вольт-амперная характеристика фотодиода, подключённого в обратной полярности, при двух разных освещённостях выглядит так, как показано на рис. 3. Начиная с напряжения $\sim$ 2 В вольт-амперная характеристика выходит на насыщение по силе тока. Именно этот фототок и будет измеряться в задаче.



Часть 1. Линейность фотодатчика.

1.1. Измерьте зависимость фототока фотодиода от расстояния между поверхностью фотодиода и ближней к фотодиоду точкой светодиода. Измерительная поверхность фотодиода и линза светодиода при этом должны находиться на одном горизонтальном уровне.

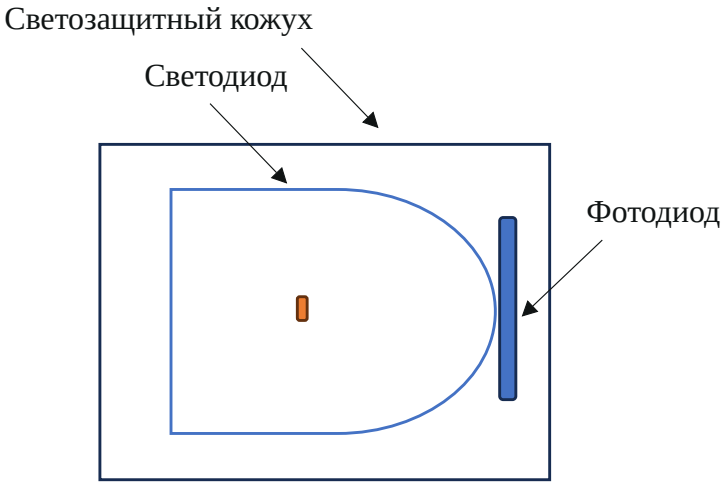


1.2. Разомкните цепь питания светодиода. Измерьте фоновое значение силы тока фотодиода с точностью не менее 5%. Оцените погрешность измерения. При необходимости модифицируйте измерительную схему.

1.3. Проверьте, является ли сила тока фотодиода пропорциональной интенсивности падающего на него света. Для этого постройте график измеренной зависимости в линеаризованном виде и сделайте соответствующий вывод.

Часть 2. Линейность светодиода.

Поставьте светодиод вплотную к фотодиоду (см. рис. 5). Модифицируйте схему питания светодиода так, чтобы появилась возможность менять силу тока, текущего через светодиод в пределах от 0 до I_{max}.

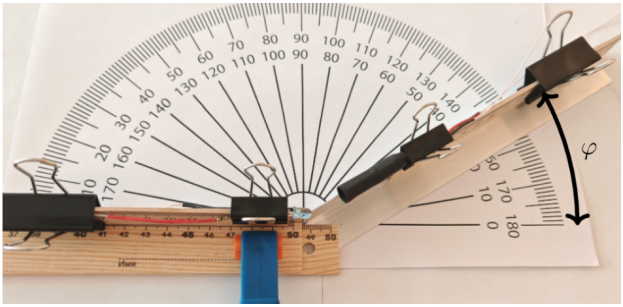


2.1. Измерьте зависимость силы тока, текущего через фотодиод, от силы тока, текущего через светодиод.

2.2. Постройте график измеренной зависимости. Сделайте вывод, можно ли считать, что график описывается прямой пропорциональностью во всём диапазоне измерений.

Часть 3. Диаграмма направленности светодиода.

Установите светодиод на край длинного алюминиевого профиля, так чтобы вершина линзы светодиода находилась в одной вертикальной плоскости с торцом профиля. Фотодиод расположите на той же высоте, что и светодиод, закрепив его на среднем профиле так, чтобы измерительная поверхность фотодиода находилась на расстоянии 5 см от торца среднего по длине профиля. Соберите из двух отрезков профиля гониометр (см. рис. 6).



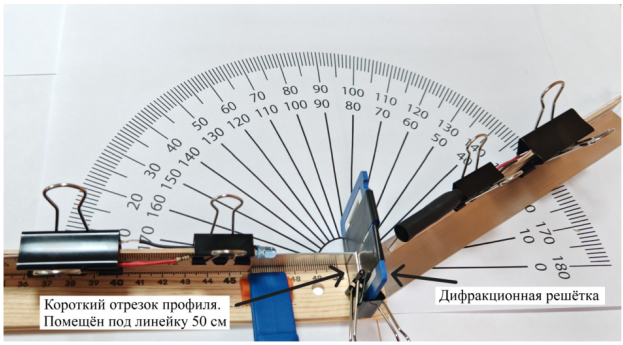
3.1. Подайте на светодиод напряжение от двух батареек AA. Изменяя относительное положение фотодиода и светодиода, измерьте зависимость силы тока фотодиода от угла φ (см. рис. 6) между осью светодиода и линией, соединяющей вершину светодиода и центральную точку измерительной поверхности фотодиода.

3.2. Постройте график измеренной зависимости. Определите угол, соответствующий уменьшению фототока в 5 раз.

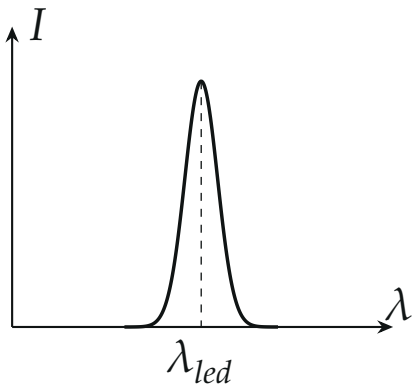
Часть 4. Спектр излучения светодиода.

Заклейте дифракционную решётку изолентой так, чтобы осталась лишь вертикальная щель шириной приблизительно 2 мм. Не разбирая установку, расположите светодиод на расстоянии 5 см от торца длинного профиля. Установите на торце профиля дифракционную решётку.

Установите соосно излучению светодиода средний профиль с фотодиодом. Настройте положение дифракционной решётки так, чтобы показания фотодиода были максимальными.



Установка позволяет примерно измерить спектр излучения светодиода (см. рис. 8). Спектр излучения имеет максимум при длине волны λ_{led}.

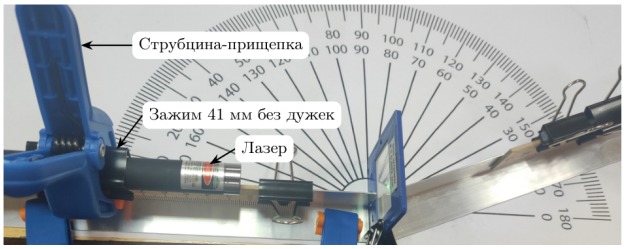


4.1. Изменяя относительное положение фотодиода и светодиода, определите угол φ_1, соответствующий первому дифракционному максимуму, отвечающему длине волны λ_{led}.

4.2. Рассчитайте длину волны максимума спектра излучения светодиода λ_{led}.

Часть 5. Спектр излучения зелёного лазера.

Установите вместо светодиода зелёный лазер (см. рис. 9). Для этого большим канцелярским зажимом закрепите лазер так, чтобы кнопка включения была постоянно нажата. Снимите дужки с зажима. Наденьте на зажим струбцину-прищепку, закрепив конструкцию на линейке длиной 15 см и профиле.

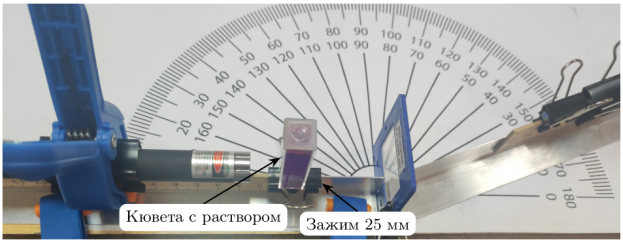


Снимите изоленту с дифракционной решётки и установите дифракционную решётку обратно. Пригласите дежурного члена жюри для освобождения фотодиода от светозащитного кожуха. Закрепите фотодиод на расстоянии 10 см от дифракционной решётки.

5.1. Изменяя относительное положение фотодиода и лазера, измерьте зависимость силы тока фотодиода от угла между осью лазера и линией, соединяющей середину щели дифракционной решётки и центральную точку измерительной поверхности фотодиода. Для каждого положения фотодиода перекрывайте лазерный пучок у его выходного окна, например, с помощью батарейного отсека, и измеряйте фоновое значение силы тока. Проведите измерения в диапазоне от 0 до 40 градусов через каждый градус.

5.2. Рассчитайте разность фототока с лазерным излучением и без в нулевом положении фотодиода $(I_{ph} - I_{ph0})(\varphi = 0)$. Рассчитайте разность фототока с лазерным излучением и без во всём диапазоне измеренных углов $(I_{ph} - I_{ph0})(\varphi)$. Постройте график натурального логарифма отношения измеренных величин $\ln \dfrac{(I_{ph} - I_{ph0})(\varphi)}{(I_{ph} - I_{ph0})(\varphi = 0)}$ от угла φ. Будем называть данную зависимость спектром дифракционной картины.

5.3. Укажите углы максимумов спектра дифракционной картины (не включая нулевой). Какие из указанных углов соответствуют длине волны лазерного излучения $\lambda_1 = 532$ нм?



5.4. Установите сразу после указки кювету с раствором марганцовки (см. рис. 10). Укажите, видно ли зелёное свечение зайчика от пучка лазера, прошедшего через марганцовку.

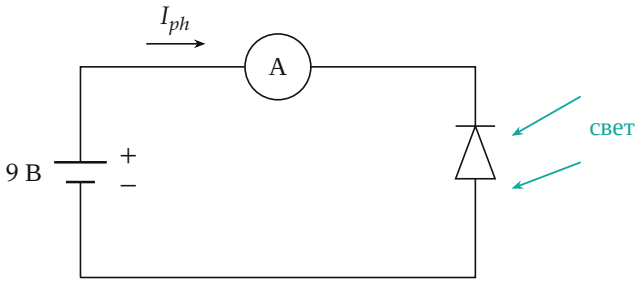
5.5. Вновь измерьте спектр дифракционной картины. Проведите измерения в диапазоне от 0 до 40 градусов.

5.6. Постройте график измеренного спектра.

5.7. Укажите длины волн пиков спектра излучения лазера. Объясните полученный ответ.

▲ **Решение. Что происходит.** Фотодиод в этой работе служит «глазом» установки, и перед главным измерением нужно проверить два предположения: фототок пропорционален мощности света (часть 1), а мощность светодиода пропорциональна току через него (часть 2). Потом (части 3–5) фотодиод поворачивают вокруг источника на гониометре: светодиод даёт узкий пучок, а решётка с периодом d превращает направление в длину волны, $d\sin\varphi_k = k\lambda$. Главная идея работы — по углам пиков найти длины волн, а пики одной длины волны разных порядков отличить от пиков разных волн: у одной волны синусы углов относятся как $1:2:\ldots$, а фильтр гасит одну из волн.

Обозначения. I_{ph} — фототок, r — расстояние от поверхности фотодиода до вершины линзы светодиода, I — ток светодиода, φ — угол, $d = \dfrac{1}{500}$ мм $= 2$ мкм $= 2000$ нм — период решётки, $\Delta I(\varphi) = I_{ph} - I_{ph0}$ — фототок за вычетом фона I_{ph0} (тот же фотодиод, лазер перекрыт). Данные в таблицах — измерения образца организаторов; у участника числа свои, обработка та же. Единица в таблицах организаторов подписана то «мА», то «мкА»; она не важна: дальше используются только отношения токов.



фотодиод включён в обратном направлении

Схема (а): катод фотодиода — к «плюсу» батарейки.

Пункт 0. Схемы и работа фотодиода. В обратном включении свет создаёт в области p–n-перехода пары носителей, поле перехода разносит их, и в цепи идёт ток, пропорциональный числу поглощённых фотонов, то есть мощности света. Когда напряжение на фотодиоде превышает ~ 2 В (рис. 3 условия), ток перестаёт зависеть от напряжения: вольт-амперная характеристика выходит на насыщение. Амперметр с малым

сопротивлением R_A даёт нагрузочную прямую, пересекающую кривую в зоне насыщения, поэтому показания зависят только от света, а не от батарейки.

Часть 1. Линейность фотодатчика.

1.1. Измерение. Светодиод вставляют в кожух фотодиода до упора ($r = 0$) и отодвигают шагами, сначала мелкими (у самого фотодиода сигнал меняется быстро), потом крупнее. Результаты:

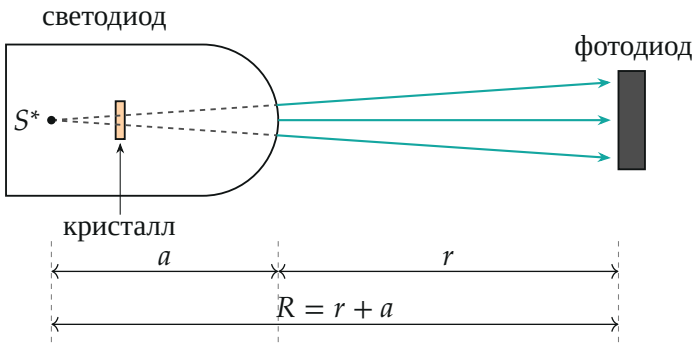
r, см	I_{ph}	$1/\sqrt{I_{ph}}$	r, см	I_{ph}	$1/\sqrt{I_{ph}}$
0,00	1929	0,0228	2,55	160	0,0791
0,15	1419	0,0265	2,85	128	0,0884
0,35	1265	0,0281	3,35	90	0,1054
0,55	1119	0,0299	3,85	70	0,1195
0,75	861	0,0341	4,85	45	0,1491
0,95	685	0,0382	5,85	31	0,1796
1,15	502	0,0446	6,85	23	0,2085
1,35	412	0,0493	8,35	16	0,2500
1,55	334	0,0547	9,85	12	0,2887
1,75	287	0,0590	11,35	9	0,3333
1,95	240	0,0645	13,85	6	0,4082
2,25	195	0,0716			

1.2. Фон. При выключенном светодиоде амперметр показывает около 1–2 мкА (свет окна и ламп). Для точности 5% этого прибору мало: шаг шкалы амперметра сравним с самим сигналом. Переключаем мультиметр в режим вольтметра на пределе 2000 мВ: его входное сопротивление $R_V = 1$ МОм превращает ток в напряжение, 1 мкА соответствует 1000 мВ, и показание в сотни–тысячи милливольт читается с шагом 1 мВ, то есть 0,1%. С учётом дрейфа фона и погрешности прибора принимаем оценку погрешности $\approx 2\%$, что лучше требуемых 5%.

Обратите внимание: вычитать фон надо из каждого показания, но проверка на данных организаторов показывает, что вычитание 1–2 единиц ухудшает линейность дальних точек (невязка растёт с 2% до 5–9%). В таблице фон, по-видимому, уже учтён или мал в её единицах, поэтому

её используем как есть.

1.3. Линеаризация. Светодиод излучает в узкий конус, и в простой модели весь свет идёт из точки — изображения кристалла в линзе, которое лежит на расстоянии a от вершины линзы (схема ниже).



Светодиод в разрезе, не в масштабе: S^* — мнимое изображение кристалла.

Пусть P_Ω — мощность на единицу телесного угла вблизи оси, S — площадь фотодиода, $R = r + a$ — расстояние от точечного источника до него. Тогда на фотодиод падает мощность $P = P_\Omega S/R^2$. Если фототок пропорционален мощности, $I_{ph} = \gamma P$, то

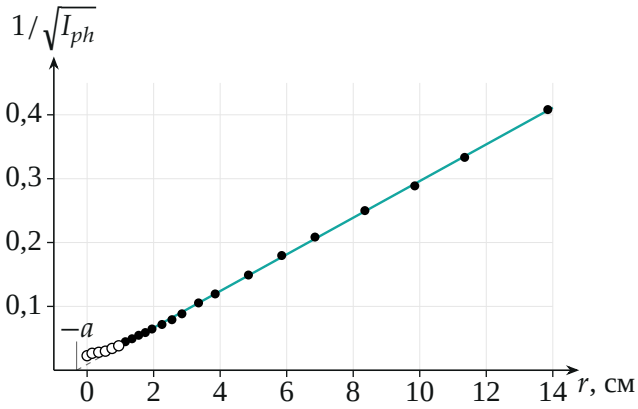
$$I_{ph} = \frac{\gamma P_\Omega S}{(r+a)^2} \quad \Longrightarrow \quad \frac{1}{\sqrt{I_{ph}}} = (r+a)\sqrt{\frac{1}{\gamma P_\Omega S}}.$$

Зачем именно такой график: корень из обратного тока линеен по r только если $I_{ph} \propto P$, а закон обратных квадратов выполнен; при другой связи точки легли бы на кривую. Неизвестные a, γ, P_Ω в проверку не входят: нужна лишь прямая. Строим $1/\sqrt{I_{ph}}$ от r и проводим прямую методом наименьших квадратов по точкам $r \geqslant 1$ см. Для набора (r_i, y_i), $y = 1/\sqrt{I_{ph}}$:

$$k = \frac{\langle ry\rangle - \langle r\rangle\langle y\rangle}{\langle r^2\rangle - \langle r\rangle^2}, \qquad b = \langle y\rangle - k\langle r\rangle, \qquad y = kr + b.$$

Получаем $k = (2{,}87 \pm 0{,}01)\cdot 10^{-2}$ см$^{-1}$, $b = (9{,}1 \pm 0{,}8)\cdot 10^{-3}$, откуда

$a = b/k = (0{,}32 \pm 0{,}03)$ см; среднеквадратичная невязка точек от прямой — 2%.

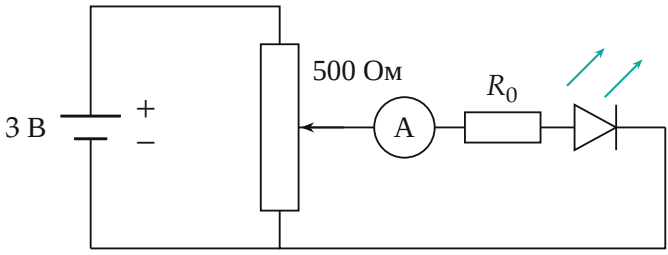


Точки $r \geqslant 1$ см — чёрные, $r < 1$ см — кружки; прямая — МНК.

Точки при $r \geqslant 1$ см (ток меняется почти в 80 раз) лежат на прямой, значит, **фототок пропорционален интенсивности света**. При $r < 1$ см размер фотодиода уже не мал по сравнению с R, свет падает под разными углами, и закон $1/R^2$ для точки неприменим: точки лежат выше прямой ($r = 0$ — в 2,5 раза).

Часть 2. Линейность светодиода.

Схема. Нужно менять ток от нуля до $I_{\max}$, поэтому переменный резистор 500 Ом включаем делителем напряжения: движок снимает долю напряжения батареек на цепочку «резистор R_0 — светодиод». Последовательное включение реостата так не умеет — ток не дойдёт до нуля. Амперметр стоит в цепи светодиода.



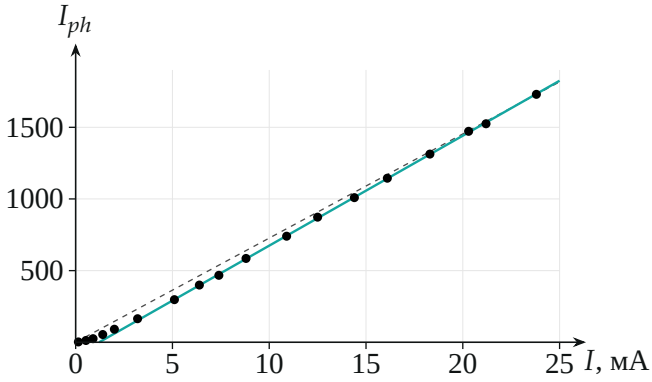
переменный резистор включён делителем

Питание светодиода: резистор 500 Ом — делитель напряжения.

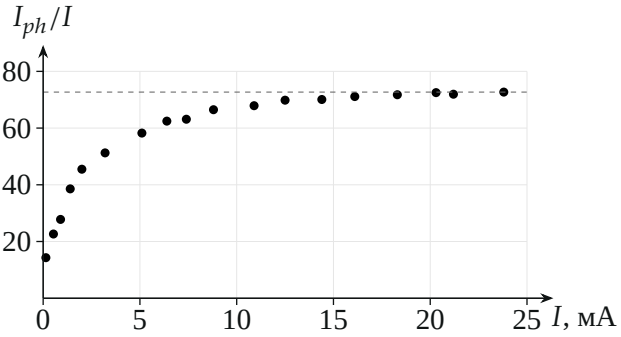
2.1. Измерение. Светодиод вплотную к фотодиоду, ток меняем от 0,14 до 23,8 мА:

I, мА	I_{ph}	I_{ph}/I	I, мА	I_{ph}	I_{ph}/I
0,14	2	14,3	8,80	585	66,5
0,53	12	22,6	10,90	740	67,9
0,90	25	27,8	12,50	873	69,8
1,40	54	38,6	14,40	1009	70,1
2,00	91	45,5	16,10	1145	71,1
3,20	164	51,2	18,30	1313	71,7
5,10	297	58,2	20,30	1472	72,5
6,39	399	62,4	21,20	1525	71,9
7,40	467	63,1	23,80	1730	72,7

2.2. График и вывод. Строим $I_{ph}(I)$. Для проверки пропорциональности сравниваем график с прямой через начало координат и через последнюю точку: $I_{ph} \propto I$ означало бы, что отношение I_{ph}/I одно и то же.



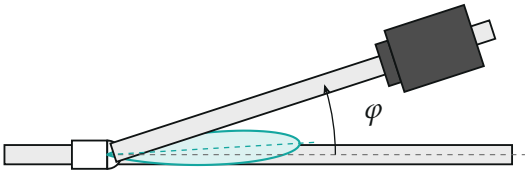
Сплошная прямая — МНК при $I \geqslant 5$ мА, пунктир — пропорциональность.



Отношение I_{ph}/I растёт и выходит на постоянное значение около 73.

При $I \gtrsim 5$ мА точки лежат на прямой $I_{ph} \approx 76{,}7\,(I - 1{,}2$ мА) с отклонением не более 1,6%, но эта прямая не проходит через начало координат: она пересекает ось тока в $\approx 1{,}2$ мА. Поэтому **прямой пропорциональности во всём диапазоне нет**: при малых токах мощность излучения на единицу тока заметно меньше (при 5 мА пропорциональная прямая даёт на 25% больше измеренного, при 0,5 мА — в 3 раза больше). Физически: при малых токах заметная доля носителей рекомбинирует без излучения, и только с ростом тока доля излучательной рекомбинации выходит на постоянное значение. Поэтому все дальнейшие опыты проводим при максимальном токе: там сигнал наибольший, а мощность устойчиво зависит от тока.

Часть 3. Диаграмма направленности.



Гониометр сверху: профиль со светодиодом, повёрнутый профиль с фотодиодом, лепесток диаграммы.

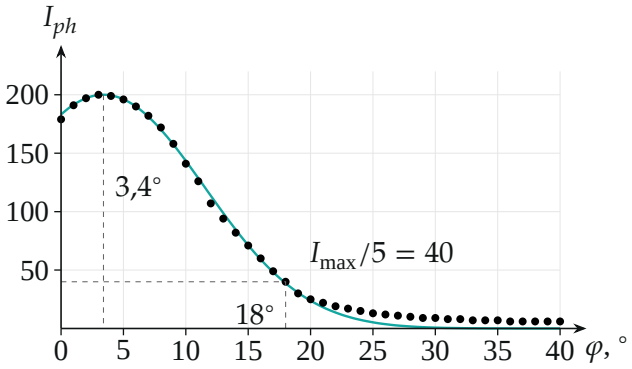
3.1. Измерение. Профиль со светодиодом неподвижен, средний профиль поворачивается вокруг вершины линзы, фотодиод на нём стоит на

расстоянии 5 см. Угол φ отсчитывается по транспортиру от оси светодиода. Результаты:

φ, °	I_{ph}	φ, °	I_{ph}	φ, °	I_{ph}
0	179	14	82	28	10
1	191	15	71	29	9
2	197	16	60	30	9
3	200	17	49	31	8
4	199	18	40	32	8
5	196	19	30	33	7
6	190	20	25	34	7
7	182	21	22	35	7
8	172	22	19	36	6
9	158	23	17	37	6
10	141	24	15	38	6
11	126	25	13	39	6
12	107	26	12	40	6
13	94	27	11		

3.2. График и угол. Строим $I_{ph}(\varphi)$ по таблице. Из-за неточной установки светодиода максимум не на нуле, поэтому отсчитываем угол от максимума. Вершина параболы по пяти точкам вокруг максимума ($\varphi = 1$–5°) даёт $\varphi_{\max} = 3{,}4^\circ$, $I_{\max} \approx 200$. Уменьшение в 5 раз — это $I = 200/5 = 40$: по таблице $I(18^\circ) = 40$ (между 17° и 18° ток 49 и 40). Отсчитывая от максимума, получаем

$$\Delta\varphi = 18^\circ - 3{,}4^\circ \approx 14{,}6^\circ.$$



Точки — измерения, кривая — $I_{\max}\cos^{50}(\varphi-\varphi_{\max})$.

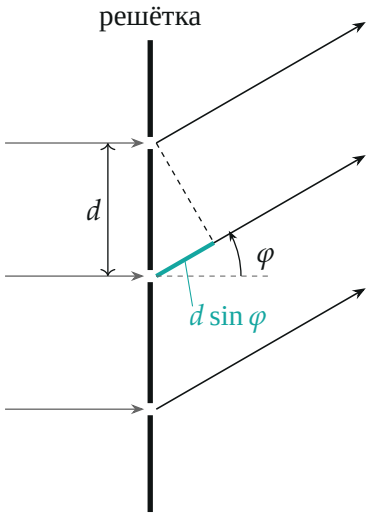
Второй способ. Пучок светодиода хорошо описывается степенью косинуса, $I = I_{\max}\cos^{m}(\varphi-\varphi_{\max})$. Подбор m по точкам $6^\circ \leqslant \varphi \leqslant 17^\circ$ методом наименьших квадратов в координатах $\ln(I/I_{\max})$ от $\ln\cos(\varphi-\varphi_{\max})$ даёт $m \approx 50$ (невязка по логарифму не больше 0,05). Тогда уровень $1/5$ достигается при $\cos^{50}\Delta\varphi = 0{,}2$, то есть $\Delta\varphi = \arccos 0{,}2^{1/50} \approx 14{,}4^\circ$. Фон 6 единиц на хвосте сдвигает результат ещё на $\sim 0{,}5^\circ$: уровень становится $(200-6)/5+6 = 44{,}8$ при $\varphi \approx 17{,}5^\circ$. Все три оценки лежат в $(14{,}5 \pm 1)^\circ$.

Часть 4. Спектр светодиода.

Идея. Дифракционная решётка с периодом d даёт максимумы в направлениях, где разность хода лучей от соседних щелей кратна длине волны:

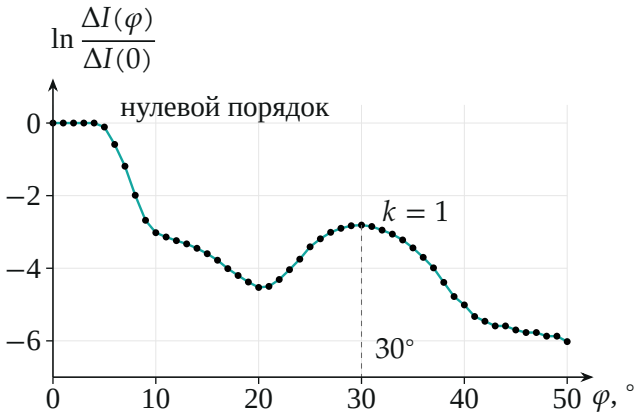
$$d\sin\varphi_k = k\lambda, \qquad k = 0, 1, 2, \ldots$$

Щель в 2 мм нужна, чтобы пучок был узким, а пики по углу — острыми: широкая засветка размыла бы максимумы. Нулевой порядок ($k = 0$) приходит на $\varphi = 0$ для любой длины волны, а положение первого максимума однозначно связано с λ.



Разность хода лучей от соседних щелей — бирюзовый отрезок $d\sin\varphi$.

Измерение. Светодиод стоит перед решёткой, фотодиод двигают по дуге с шагом 1° и снимают $I_{ph}(\varphi)$. Для широкого диапазона токов строим натуральный логарифм отношения $\Delta I(\varphi)/\Delta I(0)$: он сжимает динамический диапазон в сотни раз, и слабый пик первого порядка виден на одном графике с нулевым. Данные жюри (участникам таблицу приводить не требовалось):



Нулевой порядок (до $\sim 5°$) и первый максимум около 30°.

4.1. Угол. Вершина параболы по точкам вокруг пика (28°–32°) даёт 29,8°, положение пика — $\varphi_1 = (30{,}0 \pm 1{,}0)^\circ$ (шаг угла 1°).

4.2. Длина волны. В первом порядке ($k = 1$)

$$\lambda_{led} = d \sin\varphi_1 = \frac{\sin(30{,}0 \pm 1{,}0)^\circ}{500\ \text{мм}^{-1}} = (1000 \pm 40)\ \text{нм}.$$

Погрешность от угла: $\Delta\lambda = d\cos\varphi_1\,\Delta\varphi = 2000\ \text{нм} \cdot 0{,}866 \cdot 0{,}0175 = 30$ нм; округляем до ± 40 нм с запасом на положение щели и ширину пика. Излучение в инфракрасной области, поэтому глаз его не видит.

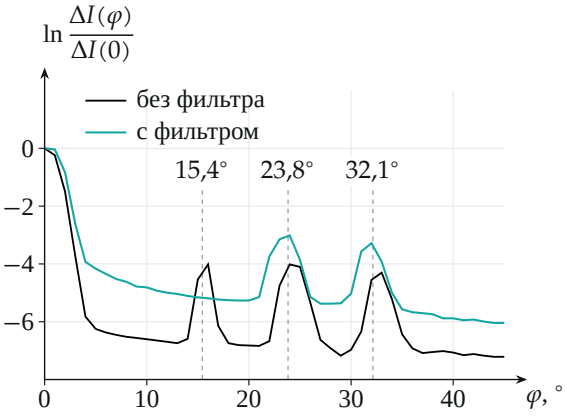
Часть 5. Спектр зелёного лазера.

5.1–5.2. Измерение и обработка. Решётка и фотодиод те же, фотодиод в 10 см от решётки; в каждом положении лазер перекрывают и измеряют фон I_{ph0} (он медленно растёт с углом: 0,69 → 0,89), поэтому вычитание делается в каждой точке отдельно:

$$\Delta I(\varphi) = I_{ph}(\varphi) - I_{ph0}(\varphi), \qquad \ln\frac{\Delta I(\varphi)}{\Delta I(0)}.$$

Например, при $\varphi = 16^\circ$: $\Delta I = 13 - 0{,}75 = 12{,}25$, $\Delta I(0) = 680 - 0{,}69 = 679{,}3$, $\ln(12{,}25/679{,}3) = -4{,}02$ — как в таблице жюри (пересчёт всех 46 строк даёт те же значения).

5.3. Пики. На графике (чёрная линия) три пика, кроме нулевого, — около 16°, 24° и 33°. Пунктирами отмечены расчётные углы: 15,4° и 32,1° для $\lambda = 532$ нм ($k = 1, 2$), 23,8° для 808 нм и 32,1° для 1064 нм ($k = 1$). Какие из них отвечают $\lambda_1 = 532$ нм? Пики одной длины волны подчиняются $\sin\varphi_k = k\lambda/d$, то есть $\sin\varphi_2 = 2\sin\varphi_1$. Проверим: $\sin 16^\circ = 0{,}276$, $\sin 24^\circ = 0{,}407$, $\sin 33^\circ = 0{,}545$; отношения $\sin 24^\circ / \sin 16^\circ = 1{,}48$ и $\sin 33^\circ / \sin 16^\circ = 1{,}98$. Пара 16° и 33° — первый и второй порядки одной волны ($\varphi_1 = (16 \pm 1)^\circ$, $\varphi_3 = (33 \pm 1)^\circ$), а 24° в эту пару не входит. Расчётные углы для 532 нм (пунктиры на графике) меньше измеренных на 0,6–0,9° — в пределах шага.



Чёрная линия — без фильтра, бирюзовая — с фильтром; пунктиры — расчётные углы.

5.4. Кювета. После кюветы с раствором марганцовки зелёный зайчик **исчезает**: раствор перманганата калия имеет полосу поглощения около 530–550 нм и пропускает красный, фиолетовый и инфракрасный свет.

5.5–5.6. Спектр с фильтром. Те же измерения с кюветой на пути пучка дают бирюзовую линию. Пика около 16° нет (его высота над фоном упала с 12,2 до 0,9, в 13 раз — это зелёный свет), пики около 24° и 32° остались.

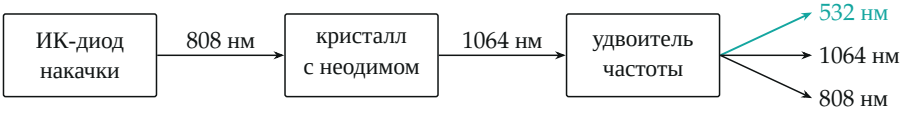
5.7. Длины волн и объяснение. Остались только волны, которые раствор пропускает, значит, это инфракрасное излучение. Пик 24° — первый порядок, пик 32° — тоже первый порядок другой инфракрасной волны, а не второй порядок зелёной: тогда он исчез бы вместе с первым. Результаты:

пик	$\varphi_{\max}$, °	k	$\lambda = d\sin\varphi_{\max}/k$, нм	с фильтром
I	16	1	551 ± 34	исчезает (в 13 раз слабее)
II	24	1	813 ± 32	остаётся, в 0,67 раза
III	32,5	1	1075 ± 29	остаётся, в 0,69 раза

Обратите внимание: на угле 32,1° совпадают второй порядок волны 532 нм и первый порядок волны 1064 нм, потому что $1064 = 2 \cdot 532$. Без фильтра разделить их нельзя, и именно опыт с фильтром показывает, что пик 33° — инфракрасный. Количественная проверка: ослабление

фильтром у пика 24° (заведомо ИК) в 0,67 раза, у пика 32° в 0,69 раза, то есть одинаковое; если бы в 33° был заметный вклад зелёного (ослабление в 13 раз), ослабление было бы гораздо сильнее.

Получаем $\lambda_1 = (550 \pm 40)$ нм (зелёный свет, табличное значение 532 нм), $\lambda_2 = (1070 \pm 30)$ нм и $\lambda_3 = (810 \pm 30)$ нм. Это длины волн, которые у дешёвой зелёной указки действительно есть: ИК-диод накачки излучает 808 нм, кристалл с неодимом — 1064 нм, нелинейный кристалл удваивает частоту, и получается 532 нм. Каждая ступень имеет КПД меньше единицы, поэтому не вся накачка превращается в 1064, и не весь свет 1064 — в зелёный: наружу выходят все три длины волны.



Устройство зелёной указки: на выходе три длины волны.

Проверка. Размерность: $d \sin\varphi$ — длина. Предел порядков: вторая волна 808 нм имела бы второй порядок при $\sin\varphi = 0{,}808$, то есть 54°, вне диапазона 0–45° — поэтому пика второго порядка у неё нет. Разные способы чтения углов (максимум пика, центр тяжести пика по точкам) дают 15,7°, 24,4°, 32,8° и длины волн 541, 826, 1084 нм — те же с точностью ± 40 нм.

Физический смысл: решётка работает как спектральный прибор, и сравнение двух спектров — с фильтром и без — позволяет не только измерить длину волны, но и приписать пик определённому порядку.

Ответ. 2.2) при малых токах зависимость нелинейна (при $I < 5$ мА фототок на единицу тока меньше), при $I \gtrsim 5$ мА линейна, $I_{ph} \approx 76{,}7\,(I - 1{,}2)$; 3.2) фототок падает в 5 раз при отклонении на 15° от максимума (14,6°); 4.1) $\varphi_1 = (30{,}0 \pm 1{,}0)°$; 4.2) $\lambda_{led} = (1000 \pm 40)$ нм; 5.3) $\varphi_1 = (16 \pm 1)°$ и $\varphi_3 = (33 \pm 1)°$ (первый и второй порядки для $\lambda_1 = 532$ нм); 5.4) зелёное свечение после кюветы пропадает; 5.7) $\lambda_1 = (550 \pm 40)$ нм, $\lambda_2 = (1070 \pm 30)$ нм, $\lambda_3 = (810 \pm 30)$ нм (два последних — инфракрасные).