

Поглощение света

Задача 1. [Республиканская олимпиада (Беларусь) 2024/25, 11 класс, экспериментальный тур, задача

2] **Поглощение света.**

При прохождении света через фильтры его интенсивность убывает вследствие поглощения света. В данной работе Вам необходимо исследовать это явление и объяснить некоторые его особенности.

Оборудование. Источники света: красный лазер, белый светодиод; источник питания, фотоприёмник (фотодиод), подставки, переменный резистор 20 кОм, мультиметр, соединительные провода, комплект плёнок: 5 красных, 5 зелёных, 5 синих, 5 серых; прищепка, пластилин, липкая лента.

Коэффициентом пропускания плёнки K называется отношение интенсивности прошедшего через плёнку света I_1 к интенсивности падающего света I_0 , поэтому

$$I_1 = K I_0. \quad (1)$$

Если свет проходит через n плёнок с одинаковыми коэффициентами пропускания, то интенсивность прошедшего света описывается очевидной формулой

$$I_n = K^n I_0. \quad (2)$$

Для анализа этой зависимости и определения коэффициента пропускания удобно использовать логарифмический масштаб

$$\ln \left(\frac{I_n}{I_0} \right) = n \ln K. \quad (3)$$

Используйте этот подход в обработке результатов измерений.

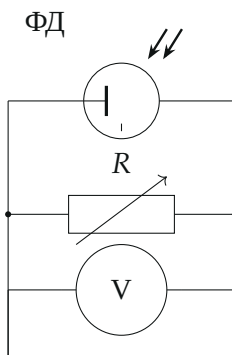


Схема измерения интенсивности: фотодиод ФД, переменный резистор R и вольтметр V параллельно.

Для измерения интенсивности света используйте приведённую схему. Сопротивление резистора в этой схеме надо подбирать экспериментально. При больших значениях этого сопротивления фотоприёмник может перейти в режим насыщения, когда измеряемое напряжение оказывается не пропорциональным интенсивности падающего света. При уменьшении сопротивления измеряемое напряжение уменьшается, но характеристика фотоприёмника становится линейной.

Закрепите с помощью липкой ленты и пластилина на столе фотоприёмник на подставке. Расположите лазер таким образом, чтобы его луч попадал на фотоприёмник и полностью освещал его (надо, чтобы пятно лазера немного превышало размер входного отверстия). В ходе измерений положение лазера и фотоприёмника не должно изменяться. Если в ходе измерений с одним комплектом 5 одинаковых плёнок произошло смещение источника или фотоприёмника, измерения начинайте сначала. Исследуемые плёнки скрепляйте с помощью прищепки и подносите непосредственно к входному отверстию фотоприёмника, не касаясь его. Перед каждой серией измерений пропускания одинаковых плёнок измеряйте фоновое значение интенсивности (при выключенном источнике), при необходимости учитывайте его при расчётах.

Часть 1. Выбор режима работы фотоприёмника. Фотоприёмник освещается светом лазера. Для измерения интенсивности используйте описанную электрическую схему. Измерения проводите только с серыми плёнками.

1.1 Проведите измерения зависимости напряжения U_n на резисторе от числа плёнок n при 3 различных сопротивлениях резистора. Сначала проведите измерения при 2 значениях сопротивлений резистора 20 кОм, 10 кОм. После этого установите такое значение сопротивления, при котором напряжение при максимальном освещении (т. е. без плёнок) немного меньше 200 мВ. Используйте соответствующий диапазон измерения мультиметра.

1.2 Постройте на одном бланке графики зависимости логарифма напряжения $\ln U$ от числа плёнок n для различных значений сопротивления резистора.

1.3 Качественно (и кратко) объясните полученные зависимости.

1.4 Рассчитайте коэффициент пропускания серой плёнки K_c . Оцените погрешность найденного значения.

В дальнейшем работайте при таком значении сопротивления резистора, чтобы максимальное напряжение (при максимальном освещении) не превышало 200 мВ. При необходимости Вы можете изменять сопротивление резистора.

Часть 2. Поглощение красного света лазера.

2.1 Измерьте зависимости интенсивности света I_n , прошедшего через n одинаковых плёнок, от числа этих плёнок. Измерения проведите для красных, зелёных и синих плёнок. Постройте графики (на одном бланке) линеаризованных зависимостей (3) для этих плёнок.

2.2 Укажите, выполняется ли закон (2) в этих экспериментах.

2.3 Рассчитайте коэффициенты пропускания красной $K_{кр}$, зелёной $K_{зел}$ и синей $K_{син}$ плёнок.

2.4 Измерьте пропускание трёх плёнок, сложенных вместе: двух красных и одной зелёной. Приведите теоретическую формулу для коэффициента пропускания этих плёнок и сравните результат расчёта по этой формуле с результатом измерения.

Часть 3. Поглощение белого света. Установите вместо лазера источник белого света. Расположите его вблизи приёмника, оставьте небольшой промежуток между ними для размещения в нём исследуемых плёнок.

3.1 Измерьте зависимости интенсивности света I_n , прошедшего через

n одинаковых плёнок, от числа n . Измерения проведите для всех типов плёнок: серой, красной, зелёной и синей. Постройте линеаризованные графики полученных зависимостей.

3.2 Докажите, что, например, для зелёной плёнки закон поглощения (2) строго не выполняется.

3.3 Рассчитайте коэффициенты пропускания всех типов плёнок: серой, красной, зелёной. Оцените погрешность измерения коэффициента пропускания серой плёнки.

3.4 Сравните коэффициенты пропускания белого света с коэффициентами пропускания красного света. Укажите основную причину их возможных различий.

3.5 Измерьте коэффициент пропускания двойной плёнки: одной красной и одной синей. Приведите теоретическую формулу для коэффициента пропускания этих плёнок и сравните результат расчёта по этой формуле с результатом измерения. Качественно объясните полученный результат.

3.6 Сделайте общий вывод: от чего зависит коэффициент пропускания плёнки.

▲ **Решение. Что происходит.** Идея опыта: свет, прошедший через n одинаковых плёнок, ослабляется в K^n раз, значит $\ln(I_n/I_0) = n \ln K$ — прямая, и K находится по наклону. Прямая будет прямой, только если приёмник измеряет интенсивность *линейно* (Часть 1), а свет — *монохроматический* (Часть 2); для белого света (Часть 3) закон нарушается, потому что у плёнок K зависит от длины волны. Данные ниже — эталонные результаты организаторов; данных белого света в источнике нет, там даны метод и объяснение (помечено).

Обозначения. U_n — показание вольтметра при n плёнках (пропорционально интенсивности в линейном режиме), K — коэффициент пропускания одной плёнки, $\ln U_n = \ln U_0 + n \ln K$.

Часть 1.

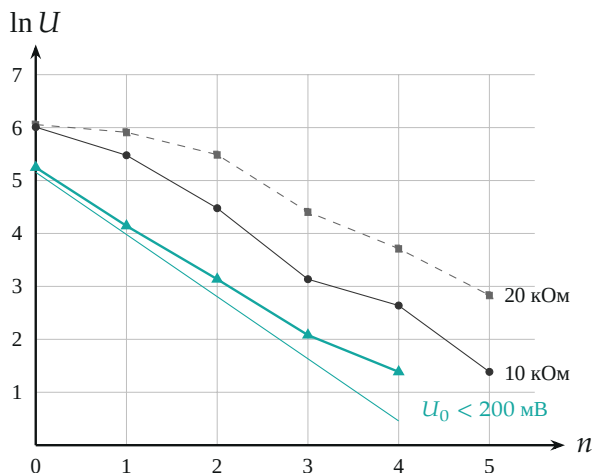
1.1. Серые плёнки, лазер. Измеряем U_n при $n = 0, \dots, 5$ для $R = 20$ кОм, $R = 10$ кОм и R , при котором U_0 немного меньше 200 мВ (выбран диапазон 200 мВ). Фон выключенного лазера вычитается, если он

заметен (в источнике фон не указан). Результаты (мВ):

n	0	1	2	3	4	5
$U, R = 20 \text{ кОм}$	427	369	242	82	41	17
$U, R = 10 \text{ кОм}$	407	239	88	23	14	4
$U, U_0 < 200 \text{ мВ}$	190	63	23	8	4	—

Последовательные отношения U_{n+1}/U_n : для 20 кОм — 0,86; 0,66; 0,34; 0,50; для 10 кОм — 0,59; 0,37; 0,26; 0,61; 0,29; для третьей серии — 0,33; 0,37; 0,35; 0,50. Если закон верен и приёмник линеен, отношения равны K .

1.2. График $\ln U$ от n для трёх сопротивлений.



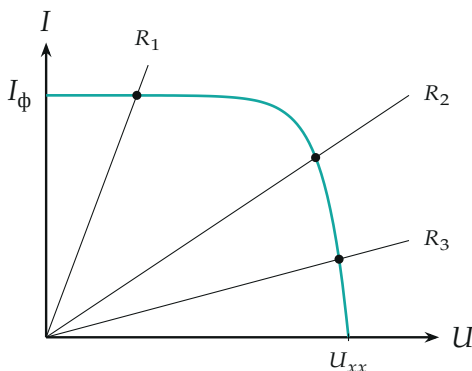
$\ln U_n$ при трёх сопротивлениях; квадраты и пунктир — 20 кОм, кружки — 10 кОм, треугольники и бирюзовая прямая — третья серия.

1.3. Третья серия даёт прямую (остатки случайны, $\lesssim 0,15$ при погрешности отсчёта ± 1 мВ в конце ряда, то есть 25% у 4 мВ). Серии при больших R изогнуты: в начале спад $\ln U$ замедлен ($U_1/U_0 = 0,86$ вместо $\approx 0,35$ у 20 кОм), потом круче. Причина — нелинейность приёмника: фотодиод при освещении создаёт ток $I_\phi \propto I$, но при напряжении на нём $U \sim 0,4\text{--}0,5$ В включается его собственный диодный ток, который

шунтирует резистор. Ток через резистор:

$$\frac{U}{R} = I_{\Phi} - I_s (e^{U/U_T} - 1), \quad U_T \approx 40 \text{ мВ}.$$

Если $I_{\Phi}R \ll 0,4 \text{ В}$, вторым членом можно пренебречь и $U = I_{\Phi}R \propto I$ — линейно. Если R велико, U упирается в $\approx 0,45\text{--}0,5 \text{ В}$ (напряжение холостого хода), как бы ни росла интенсивность — режим насыщения.



Фотодиод в нагрузке R : нагрузочные прямые $R_1 < R_2 < R_3$ пересекают характеристику $I(U)$; при малом R точка на прямом участке (линейный режим), при большом — вблизи U_{xx} (насыщение). **1.4.** Для расчёта берём линейную серию. МНК для $\ln U = a_0 + bn$ даёт $b = -0,979$, $a_0 = 5,155$, стандартная ошибка наклона $0,043$. Значит

$$K_c = e^b = 0,376, \quad \delta K = K \delta b \approx 0,016.$$

Ответ: $K_c = 0,38 \pm 0,02$. Обратите внимание: в источнике записано $0,37 \pm 0,2$; $\pm 0,2$ означало бы 50% и несовместимо с разбросом точек (по порядку величины это $0,02$).

Часть 2.

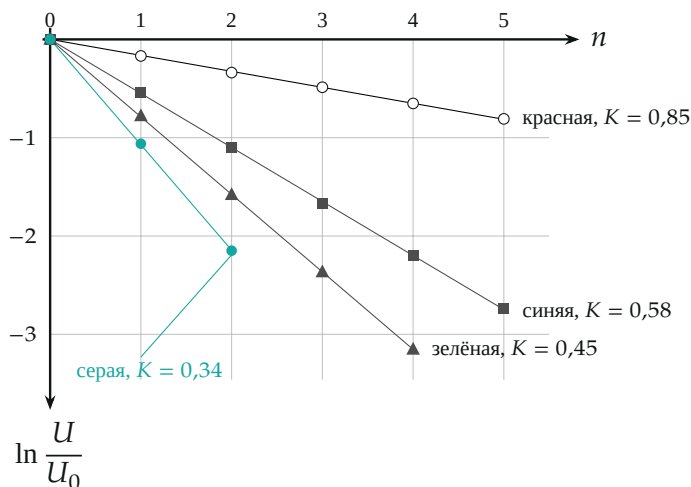
2.1. Плёнки комплектами по n , лазер, линейный режим ($U_0 \approx 130 \text{ мВ}$).

Эталонные данные U , мВ:

n	0	1	2	3	4	5
красные	129,5	109,4	92,4	79,6	67,5	57,7
зелёные	131,1	60,2	27,0	12,3	5,6	
синие	131,7	76,9	43,7	24,9	14,6	8,5
серые	131,2	45,4	15,3			

Графики $\ln(U_n/U_0)$ от n — на рисунке; прямые — МНК с нулевым свободным членом (при $n = 0$ значение равно нулю по определению):

$$\ln K = \frac{\sum n y_n}{\sum n^2}.$$



Линеаризованные зависимости (3) для красной, зелёной, синей и серой плёнок, лазер: красная — кружки, синяя — квадраты, зелёная — треугольники, серая — бирюзовые кружки. **2.2.** Закон (2) выполняется: точки ложатся на прямые, последовательные отношения U_{n+1}/U_n постоянны. Например, красные: 0,845; 0,845; 0,861; 0,848; 0,855; зелёные: 0,459; 0,449; 0,456; 0,455 — разброс $\lesssim 2\%$, систематического хода нет. Для красного лазера (монохроматический свет) это и должно быть.

2.3. Наклоны МНК и коэффициенты $K = e^b$:

плёнка	$b = \ln K$	δb	K
красная	-0,1626	0,0010	$0,850 \pm 0,001$
зелёная	-0,7883	0,0011	$0,455 \pm 0,001$
синяя	-0,5496	0,0015	$0,577 \pm 0,001$
серая	-1,0718	0,0053	$0,342 \pm 0,002$

Внутренняя погрешность наклона мала; полная погрешность определяется дрейфом лазера и положением плёнки, реально порядка 1–2%: $K_{\text{кр}} = 0,85$, $K_{\text{зел}} = 0,45$, $K_{\text{син}} = 0,58$, $K_{\text{с}} = 0,34$. Серая плёнка по лазеру (три точки, U вплоть до 15 мВ) 0,34 — в 0,04 от 0,38 из Части 1: расхождение больше внутренней ошибки, это погрешность малых напряжений и фона.

2.4. Плёнки действуют последовательно, лазерный свет монохроматический, поэтому коэффициенты перемножаются: $I = K_{\text{кр}} K_{\text{кр}} K_{\text{зел}} I_0$,

$$K = K_{\text{кр}}^2 K_{\text{зел}} = 0,85^2 \cdot 0,455 \approx 0,33.$$

Измерение двух красных и одной зелёной плёнок организаторы дают в пределах погрешности: 0,32 — расхождение $\approx 3\%$.

Часть 3. Данных измерений с белым светом в источнике нет (результат зависит от закупленного источника), поэтому ниже — метод и объяснение; цифры сводной таблицы организаторов даны только для сравнения.

3.1. Метод: те же серии и графики $\ln(U/U_0)(n)$ для серой, красной, зелёной, синей плёнок при белом светодиоде.

3.2. Доказательство, что закон (2) для зелёной плёнки не выполняется: если $I_n = K^n I_0$, то последовательные отношения $r_n = I_{n+1}/I_n = K$ одинаковы для всех n (с точностью $\approx 2\%$, как мы видели в 2.2), а $\ln(I_n/I_0)$ линейно по n . Для белого света r_n растёт с n закономерно (разность соседних r_n больше разброса). Причина: белый свет — смесь длин волн с разными $K(\lambda)$. Первыми гаснут компоненты с малым K , а остаётся свет, который плёнка пропускает лучше всего, поэтому средний K растёт с n . Иллюстрация на двухполосной модели (условные числа, не данные орга-

низаторов): 40% света в полосе с $K_1 = 0,45$ и 60% в полосе с $K_2 = 0,95$:
 $I_n \propto 0,4 \cdot 0,45^n + 0,6 \cdot 0,95^n$.

n	0	1	2	3	4	5
$\ln(I_n/I_0)$	0	-0,29	-0,47	-0,60	-0,68	-0,75
$r_n = I_{n+1}/I_n$	0,75	0,83	0,89	0,92	0,93	0,94

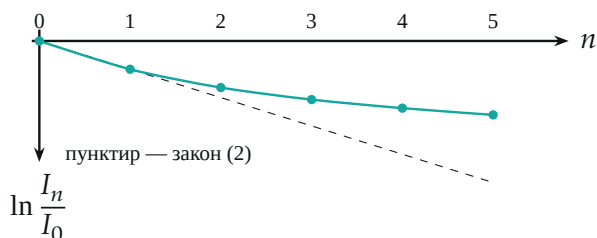


Иллюстрация: на двухполосной модели $\ln(I_n/I_0)$ идёт выпуклой кривой над пунктирной прямой (закон (2) с $K = I_1/I_0$). **3.3–3.4.** Эталонные K (обратите внимание: для белого света цифры зависят от конкретного источника):

плёнка	белый свет	красный лазер
красная	0,89	0,85
зелёная	0,89	0,45
синяя	0,88	0,58
серая	0,40	0,34

Коэффициенты разные: у цветных плёнок для белого света $K \approx 0,9$ вместо 0,45–0,85 для красного лазера. Основная причина — разный спектр падающего света. Красный свет лазера поглощается зелёной и синей плёнками сильно, а у белого светодиода и кремниевых приёмника значительная доля сигнала приходит из области, где красители почти прозрачны (в первую очередь ближний ИК); измеряемое K — усреднение по спектру с весом чувствительности. Серая плёнка поглощает почти равномерно, поэтому у неё K ближе (0,40 и 0,34).

3.5. Если бы K не зависел от спектра, теория для двух плёнок: $K_{\text{кр+син}} = K_{\text{кр}}K_{\text{син}}$. Для лазера это $0,85 \cdot 0,58 \approx 0,49$. Для белого света

формула неверна: по спектру $K_{\text{кр+син}} = \frac{\int S K_{\text{кр}}(\lambda) K_{\text{син}}(\lambda) d\lambda}{\int S d\lambda}$, а произ-

ведение средних $\bar{K}_{\text{кр}} \bar{K}_{\text{син}}$ даёт другое число. Красная плёнка пропускает красный свет и поглощает синий, синяя — наоборот, то есть пропускания в видимых полосах *антикоррелированы*: вместе они пропускают только общую область (ближний ИК) — видимая часть почти гасится, и $K_{\text{кр+син}}$ получается *меньше* произведения $\bar{K}_{\text{кр}} \bar{K}_{\text{син}} \approx 0,89 \cdot 0,88 \approx 0,78$. Это прогноз по теории, значение измерения в источнике не приведено.

3.6. Вывод. Коэффициент пропускания — свойство не только плёнки (краситель, толщина: для одной полосы $K = e^{-\alpha(\lambda)d}$), но и *спектра* падающего света и спектральной чувствительности приёмника. Закон $I_n = K^n I_0$ и правило перемножения K справедливы только для монохроматического света.

Проверка. Размерность: K безразмерно, $\ln K < 0$ при $K < 1$ — знаки наклонов отрицательны, как на графиках. Линейный режим: $U_0 \approx 130 \text{ мВ} \ll U_{xx} \approx 0,45 \text{ В}$. Независимый контроль: второй способ получения K — среднее последовательных отношений: красные 0,851 (по МНК 0,850), зелёные 0,455 (0,455), синие 0,580 (0,577) — совпали.

Физический смысл: каждая плёнка отнимает от света одну и ту же долю; такой закон даёт ровно прямую в логарифмах, а любое отклонение от прямой — признак нелинейного приёмника или немонахроматического света.

Ответ. 1.2) графики на рисунке: при $R = 20$ и 10 кОм зависимость $\ln U$ от n изогнута (насыщение фотодиода), при $U_0 < 200 \text{ мВ}$ — прямая; 1.4) $K_c = 0,38 \pm 0,02$; 2.2) закон (2) выполняется; 2.3) $K_{\text{кр}} = 0,85$, $K_{\text{зел}} = 0,45$, $K_{\text{син}} = 0,58$ (серая 0,34); 2.4) $K = K_{\text{кр}}^2 K_{\text{зел}} \approx 0,33$ (измерение 0,32); 3.2) для белого света I_{n+1}/I_n растёт с n ; 3.4) для белого света $K \approx 0,9$ у цветных плёнок — иной спектр; 3.5) $K_{\text{кр+син}} \neq K_{\text{кр}} K_{\text{син}}$ (меньше), так как K зависит от длины волны; 3.6) K зависит от спектра света и приёмника, не только от плёнки.