## Задача №11-Е1. 532 нм

Соберем установку, описанную в условии и измерим зависимость фототока от расстояние между светодиодом и фотодиодом. Для того что бы мерить на расстояниях меньше длины кожуха выдвеним светодиод относительно линейки, вставим светодиод в кожух до упора ($r = 0$) и проведём измерения.

| $r$, см | $I_{ph}$, мА | $\frac{1}{\sqrt{I_{ph}}}$, $\frac{1}{\sqrt{\text{мА}}}$ | $r$, см | $I_{ph}$, мА | $\frac{1}{\sqrt{I_{ph}}}$, $\frac{1}{\sqrt{\text{мА}}}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 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 | | | |

При выключенном светодиоде показания амперметра около 1-2 микроампер. Для измерения с точностью 5% переключим мультиметр, подключенный к фотодиоду, в режим вольтметра 2000 милливольт.Так как сопротивление мультиметра в режиме вольтметра составляет $R_V = 1$ МОм, то показания вольтметра составят несколько сотен – тысяч милливольт.

Свет от излучающего кристалла в светодиоде попадает на линзу, формирующую почтит точечное мнимое изображение кристалла (см. рис.1). Таким образом, пучок света, выходящий из кристалла геометрически в простейшей модели выходит из точечного источника, находящегося внутри светодиода.

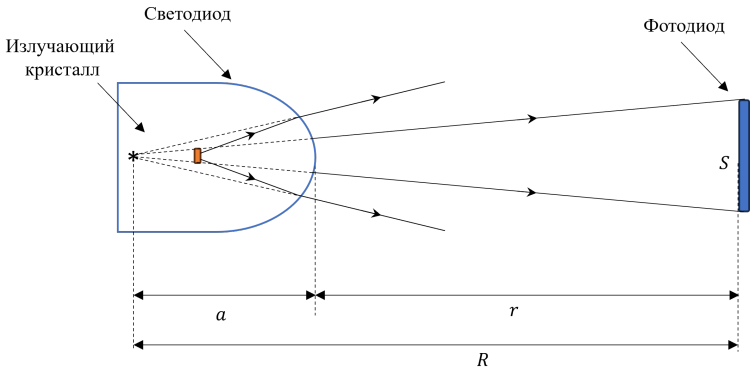



Рис. 1. Распространение света от светодиода к фотодиоду.

Пусть в небольшой окрестности осевого направления светодиода мощность света, распространяемого светодиодом в единицу телесного угла постоянна и равна $N_\Omega$. Тогда, если фотодиод имеет площадь поверхности $S$ и находится на расстоянии $R$ от изображения кристалла светодиода, то мощность падающего на него света может быть рассчитана как:

$$N = N_\Omega \frac{S}{R^2}. \tag{1}$$

В эксперименте возможно измерить лишь расстояние $r$ между фотодиодом и вершиной линзы светодиода. Тогда формулу для получаемой светодиодом мощности можно записать как:

$$N = N_\Omega \frac{S}{(r+a)^2}, \tag{2}$$

где $a$ – расстояние между изображением кристалла светодиода и вершиной линзы светодиода.

Предположим, что фототок светодиода пропорционален падающей на него мощности света:

$$I_{ph} = \gamma N. \tag{3}$$

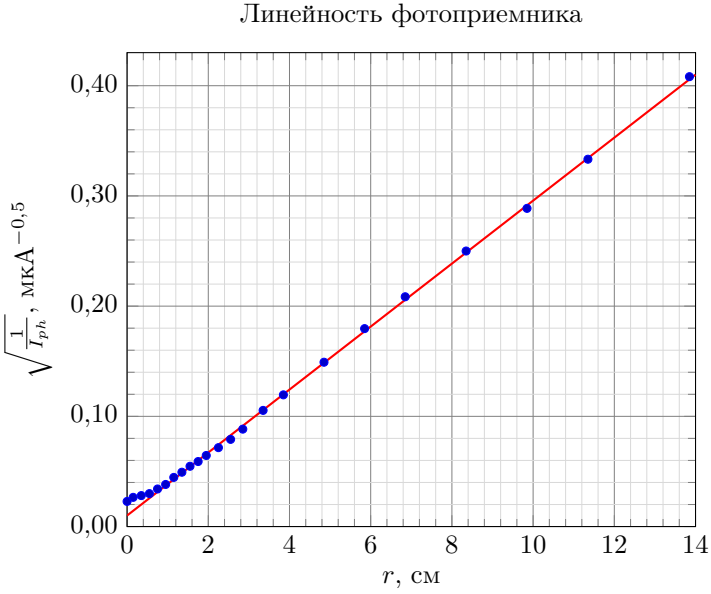
Тогда зависимость фототока от расстояния $r$ может быть описана функцией:

$$I_{ph} = \frac{N_\Omega}{\gamma} \frac{S}{(r+a)^2}. \tag{4}$$

Преобразуем функцию к виду:

$$\frac{1}{\sqrt{I_{ph}}} = (r+a)\sqrt{\frac{\gamma}{SN_\Omega}}. \tag{5}$$

Для проверки предположений построим график зависимости $\frac{1}{\sqrt{I_{ph}}}(r)$. Видно, что график описывается линейной функцией в области $r > 1$ см, что говорит о выполнении высказанных предположений и в частности о прямой пропорциональности между фототоком и мощностью падающего на фотодиод света. В области графика $r < 1$ см площадь фотодиода не мала посравнению с $R^2$ и зависимость не линейна.




Проверка линейности фотоприемника

Установим фотодиод и светодиод вплотную друг к другу. Модифицируем схему питания светодиода в соответствии с рисунком 2.

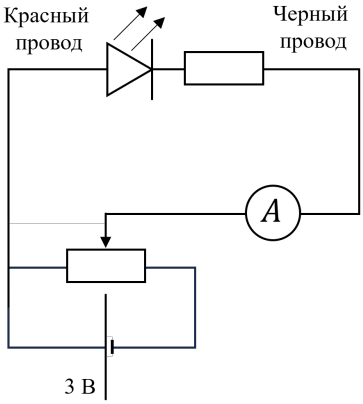
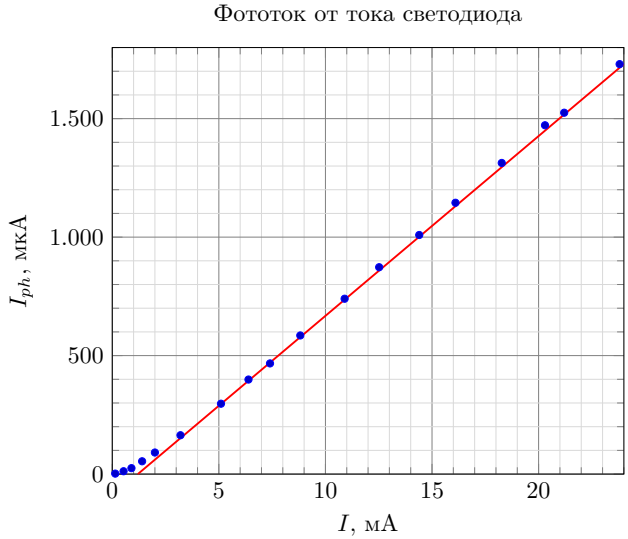



Рис. 2. Модифицированная схема питания светодиода

| $I$, мА | $I_{ph}$, мА | $I$, мА | $I_{ph}$, мА |
|---|---|---|---|
| 0,14 | 2 | 8,8 | 585 |
| 0,53 | 12 | 10,9 | 740 |
| 0,90 | 25 | 12,5 | 873 |
| 1,40 | 54 | 14,4 | 1009 |
| 2,00 | 91 | 16,1 | 1145 |
| 3,20 | 164 | 18,3 | 1313 |
| 5,10 | 297 | 20,3 | 1472 |
| 6,39 | 399 | 21,2 | 1525 |
| 7,40 | 467 | 23,8 | 1730 |

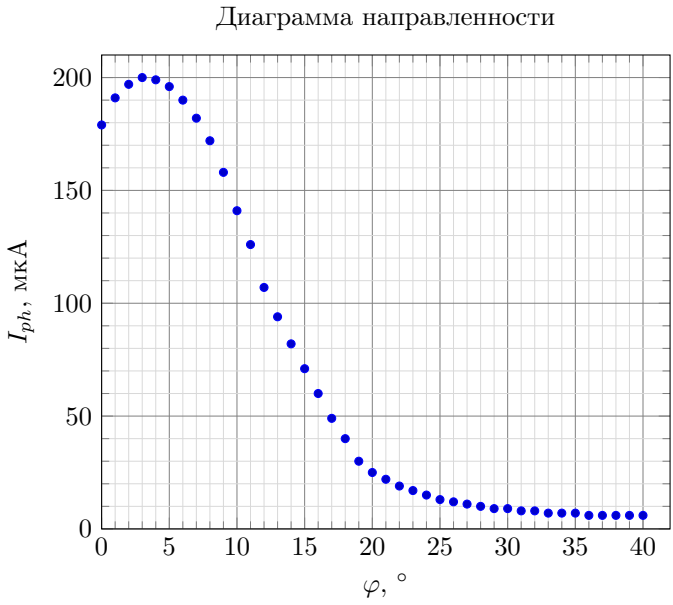
Построим график исследованной зависимости. Видно, что при малых токах зависимость имеет нелинейный характер. То есть мощность излучения света светодиодом не является прямо пропорциональной току во всём диапазоне, хотя в большей части она линейна. В последствии все измерения будем проводить на максимальном токе.




Соберем гониометр, описанный в условии задачи и измерим зависимость фототока от угла направления распространения света.

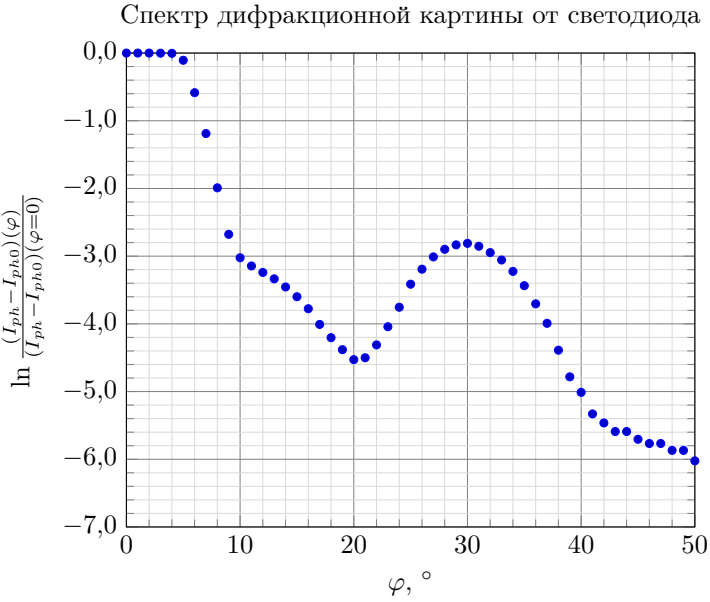
| $\varphi$,° | $I_{ph}$, мА | $\varphi$,° | $I_{ph}$, мА | $\varphi$,° | $I_{ph}$, мА |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 179 | 14 | 82 | 28 | 10 |
| 1 | 191 | 15 | 71 | 29 | 9 |
| 2 | 197 | 16 | 60 | 30 | 9 |
| 3 | 200 | 17 | 49 | 31 | 8 |
| 4 | 199 | 18 | 40 | 32 | 8 |
| 5 | 196 | 19 | 30 | 33 | 7 |
| 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 | | |

Построим график измеренной зависимости. Т.к. светодиод установлен не идеально, то направление на максимум может быть смещено. По сравнению с смещённым максимумам фототок уменьшается в пять раз при отклонении на 15° от максимума.




Соберем установку для измерения спектра дифракционной картины света светодиода. Т. к. токи малы будем использовать мультиметр в режиме вольтметра и проведем соответствующие измерения. Нижи приведены измерения жюри, участникам их приводить в работе **НЕ ТРЕБОВАЛОСЬ!**

| $\varphi,^\circ$ | $\ln \frac{I_{ph}-I_{ph0}}{(I_{ph}-I_{ph0})_{\max}}$ | $\varphi,^\circ$ | $\ln \frac{I_{ph}-I_{ph0}}{(I_{ph}-I_{ph0})_{\max}}$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 0,00 | 26 | -3,19 |
| 1 | 0,00 | 27 | -3,01 |
| 2 | 0,00 | 28 | -2,90 |
| 3 | 0,00 | 29 | -2,83 |
| 4 | 0,00 | 30 | -2,81 |
| 5 | -0,11 | 31 | -2,85 |
| 6 | -0,59 | 32 | -2,95 |
| 7 | -1,19 | 33 | -3,06 |
| 8 | -1,99 | 34 | -3,22 |
| 9 | -2,68 | 35 | -3,44 |
| 10 | -3,02 | 36 | -3,70 |
| 11 | -3,14 | 37 | -3,99 |
| 12 | -3,24 | 38 | -4,39 |
| 13 | -3,33 | 39 | -4,78 |
| 14 | -3,45 | 40 | -5,01 |
| 15 | -3,60 | 41 | -5,33 |
| 16 | -3,78 | 42 | -5,46 |
| 17 | -4,01 | 43 | -5,59 |
| 18 | -4,20 | 44 | -5,59 |
| 19 | -4,38 | 45 | -5,70 |
| 20 | -4,53 | 46 | -5,77 |
| 21 | -4,50 | 47 | -5,77 |
| 22 | -4,31 | 48 | -5,87 |
| 23 | -4,04 | 49 | -5,87 |
| 24 | -3,75 | 50 | -6,02 |
| 25 | -3,41 | | |




$$\varphi_1 = (30{,}0 \pm 1{,}0)^\circ$$

На графике наблюдается два максимума, соответствующие нулевому и первому порядку дифракции. Длина волны максимума спектра светодиода $\lambda_{led}$ может быть рассчитана из направления на первый максимум дифракции $\varphi_1$ с помощью формулы дифракционной решетки:

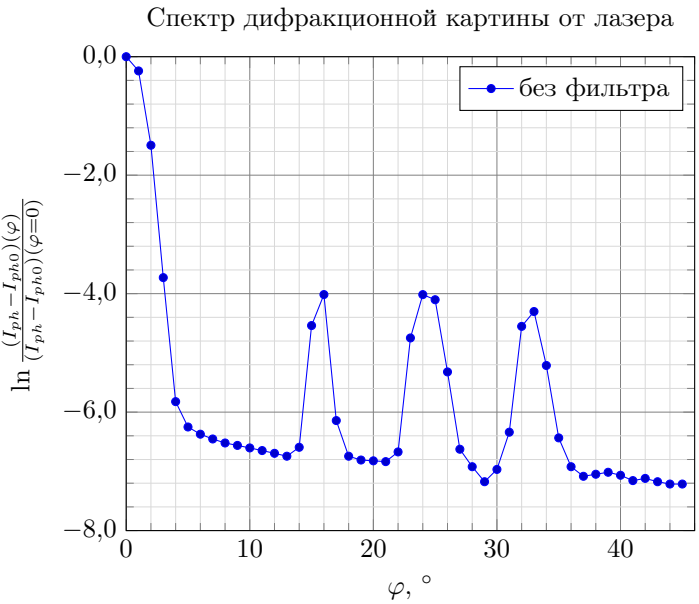
$$\lambda_{led} = \frac{\sin \varphi_1}{N} = \frac{\sin (30{,}0 \pm 1{,}0)^\circ}{500} = (1000 \pm 40) \text{ нм}. \tag{6}$$

Измерим аналогичным способом спектр дифракционной картины, полученной от лазерной указки.

| $\varphi$,° | $I_{ph}$, мА | $I_{ph0}$, мА | $\ln \frac{I_{ph}-I_{ph0}}{(I_{ph}-I_{ph0})_{max}}$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 680 | 0,69 | 0,000 |
| 1 | 535 | 0,69 | -0,240 |
| 2 | 153 | 0,69 | -1,495 |
| 3 | 17 | 0,69 | -3,729 |
| 4 | 2,70 | 0,69 | -5,823 |
| 5 | 2,00 | 0,69 | -6,251 |
| 6 | 1,85 | 0,69 | -6,373 |
| 7 | 1,76 | 0,69 | -6,453 |
| 8 | 1,69 | 0,69 | -6,521 |
| 9 | 1,65 | 0,69 | -6,562 |
| 10 | 1,61 | 0,69 | -6,604 |
| 11 | 1,59 | 0,71 | -6,649 |
| 12 | 1,56 | 0,72 | -6,695 |
| 13 | 1,53 | 0,73 | -6,744 |
| 14 | 1,68 | 0,75 | -6,594 |
| 15 | 8,01 | 0,75 | -4,539 |
| 16 | 13 | 0,75 | -4,016 |
| 17 | 2,21 | 0,75 | -6,143 |
| 18 | 1,55 | 0,75 | -6,744 |
| 19 | 1,50 | 0,75 | -6,809 |
| 20 | 1,49 | 0,75 | -6,822 |
| 21 | 1,48 | 0,75 | -6,836 |
| 22 | 1,61 | 0,75 | -6,672 |

| $\varphi,^\circ$ | $I_{ph}$, мА | $I_{ph0}$, мА | $\ln \frac{I_{ph}-I_{ph0}}{(I_{ph}-I_{ph0})_{max}}$ |
|---|---|---|---|
| 23 | 6,64 | 0,75 | -4,748 |
| 24 | 13 | 0,76 | -4,016 |
| 25 | 12 | 0,77 | -4,102 |
| 26 | 4,10 | 0,78 | -5,321 |
| 27 | 1,68 | 0,78 | -6,626 |
| 28 | 1,44 | 0,77 | -6,922 |
| 29 | 1,32 | 0,80 | -7,175 |
| 30 | 1,44 | 0,80 | -6,967 |
| 31 | 2,00 | 0,80 | -6,339 |
| 32 | 7,96 | 0,80 | -4,553 |
| 33 | 10 | 0,80 | -4,302 |
| 34 | 4,50 | 0,80 | -5,213 |
| 35 | 1,89 | 0,80 | -6,435 |
| 36 | 1,47 | 0,80 | -6,922 |
| 37 | 1,37 | 0,80 | -7,083 |
| 38 | 1,40 | 0,81 | -7,049 |
| 39 | 1,43 | 0,82 | -7,015 |
| 40 | 1,40 | 0,82 | -7,066 |
| 41 | 1,38 | 0,85 | -7,156 |
| 42 | 1,39 | 0,84 | -7,119 |
| 43 | 1,39 | 0,87 | -7,175 |
| 44 | 1,39 | 0,89 | -7,214 |
| 45 | 1,39 | 0,89 | -7,214 |

Построим график полученной зависимости.




Длине волны $\lambda_1$ соответствуют два дифракционных максимума(1-ый и 2-ой) при углах: $\varphi_1 = (16 \pm 1)^\circ$ $\varphi_3 = (33 \pm 1)^\circ$

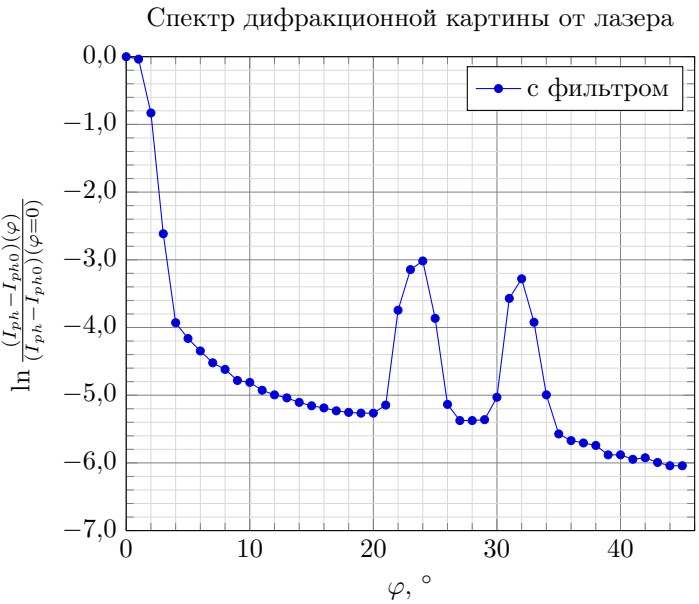
Установим кювету с марганцовкой на пути пучка лазера. Видно, что после прохождения кюветы видимый на экране зайчик лазера зеленого цвета пропадает. Это означает, что в значительной степени видимый диапазон излучения лазера поглощается раствором.

Вновь измерим спектр дифракционной картины.

| $\varphi$,° | $I_{ph}$, мА | $I_{ph0}$, мА | $\ln \frac{I_{ph}-I_{ph0}}{(I_{ph}-I_{ph0})_{max}}$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 169 | 0,69 | 0,000 |
| 1 | 163 | 0,69 | -0,036 |
| 2 | 74 | 0,69 | -0,831 |
| 3 | 13 | 0,69 | -2,615 |
| 4 | 4,00 | 0,69 | -3,929 |
| 5 | 3,31 | 0,69 | -4,163 |
| 6 | 2,87 | 0,69 | -4,346 |
| 7 | 2,52 | 0,69 | -4,521 |
| 8 | 2,35 | 0,69 | -4,619 |
| 9 | 2,10 | 0,69 | -4,782 |
| 10 | 2,06 | 0,69 | -4,811 |
| 11 | 1,93 | 0,71 | -4,927 |
| 12 | 1,86 | 0,72 | -4,995 |
| 13 | 1,82 | 0,73 | -5,040 |
| 14 | 1,77 | 0,75 | -5,106 |
| 15 | 1,72 | 0,75 | -5,156 |
| 16 | 1,69 | 0,75 | -5,188 |
| 17 | 1,65 | 0,75 | -5,231 |
| 18 | 1,63 | 0,75 | -5,254 |
| 19 | 1,62 | 0,75 | -5,265 |
| 20 | 1,62 | 0,75 | -5,265 |
| 21 | 1,73 | 0,75 | -5,146 |
| 22 | 4,73 | 0,75 | -3,745 |

| $\varphi,^\circ$ | $I_{ph}$, мА | $I_{ph0}$, мА | $\ln \frac{I_{ph}-I_{ph0}}{(I_{ph}-I_{ph0})_{max}}$ |
|---|---|---|---|
| 23 | 8,00 | 0,75 | -3,145 |
| 24 | 9,00 | 0,76 | -3,017 |
| 25 | 4,30 | 0,77 | -3,865 |
| 26 | 1,77 | 0,78 | -5,136 |
| 27 | 1,56 | 0,78 | -5,374 |
| 28 | 1,55 | 0,77 | -5,374 |
| 29 | 1,59 | 0,80 | -5,362 |
| 30 | 1,90 | 0,80 | -5,030 |
| 31 | 5,54 | 0,80 | -3,570 |
| 32 | 7,13 | 0,80 | -3,281 |
| 33 | 4,13 | 0,80 | -3,923 |
| 34 | 1,94 | 0,80 | -4,995 |
| 35 | 1,44 | 0,80 | -5,572 |
| 36 | 1,38 | 0,80 | -5,671 |
| 37 | 1,36 | 0,80 | -5,706 |
| 38 | 1,35 | 0,81 | -5,742 |
| 39 | 1,29 | 0,82 | -5,881 |
| 40 | 1,29 | 0,82 | -5,881 |
| 41 | 1,29 | 0,85 | -5,947 |
| 42 | 1,29 | 0,84 | -5,924 |
| 43 | 1,29 | 0,87 | -5,993 |
| 44 | 1,29 | 0,89 | -6,042 |
| 45 | 1,29 | 0,89 | -6,042 |

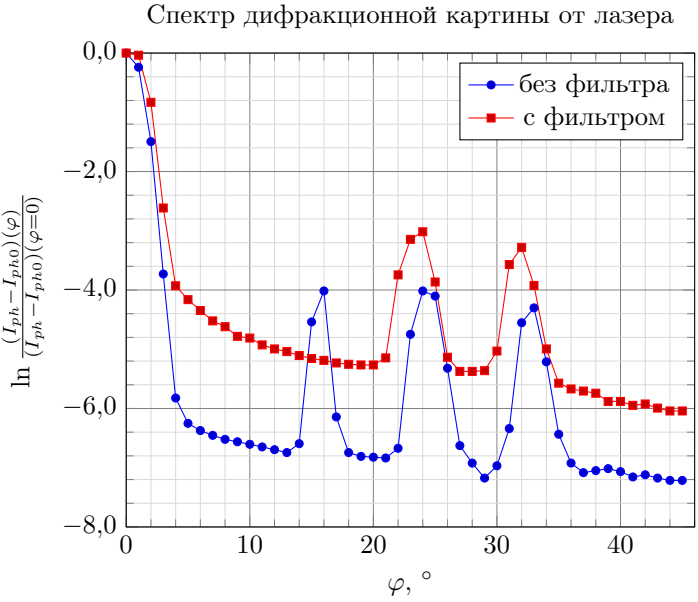
Построим график полученной зависимости.




Сопоставим два полученных спектра, что бы исключить второй дифракционный максимум волны с $\lambda_1 = 532$ нм.

Видно, что два полученных спектра похожи, но у снятого с фильтром из марганцовки отсутствует максимум в районе 16°, отвечающий первому дифракционному максимуму зеленого света. При этом пик, отвечающий второму дифракционному максимуму зеленого света на спектре остался. Так как известно, что зеленый свет в большей степени поглощается марганцовкой, то можно сделать вывод, что в спектре излучения после прохождения фильтра остается инфракрасное излучение. Направление, соответствующее второму максимуму зеленого света, является направлением на первый максимум оставшегося инфракрасного излучения. То есть в спектре лазера присутствуют длины волн:

$$\lambda_1 = \frac{\sin(16 \pm 1)^\circ}{N} = (550 \pm 40) \text{ нм}; \lambda_2 = \frac{\sin(32{,}5 \pm 1{,}0)^\circ}{N} = (1070 \pm 30) \text{ нм}. \quad (7)$$




Также на обоих спектрах присутствует еще один пик, соответствующий еще одной длине волны инфракрасного излучения, который также отвечает спектру излучения лазера:

$$\lambda_3 = \frac{\sin(24 \pm 1)^\circ}{N} = (810 \pm 30) \text{ нм}. \tag{8}$$

В действительности в зелёном лазере установлен инфракрасный светодиод накачки с длиной волны $\lambda_{3theor} = 808$ нм. Свет от этого светодиода попадает в активную среду лазера, возбуждая ее. Активная среда излучает свет на длине волны $\lambda_{2theor} = 1064$ нм. Излучение активной среды усиливается в резонаторе и в дальнейшем попадает в оптический кристалл, в котором преобразуется в излучение с удвоенной частотой или уменьшенной вдвое длиной волны $\lambda_{2theor} = 532$ нм. После этого излучение покидает лазер. Каждый из описанных процессов происходит с некоторым КПД, поэтому из зеленой лазерной указки выходит свет сразу трех длин волн $\lambda_1$, $\lambda_2$, $\lambda_3$, что и было показано в проведенном эксперименте.