

# Лабораторная работа 4.7.2

## Эффект Поккельса

Выполнил Жданов Елисей Б01-205

### 1 Цель работы:

- 1) Исследовать интерференцию рассеянного света, прошедшего кристалл
- 2) Наблюдать изменение характера поляризации света при наложении на кристалл электрического поля

### 2 Оборудование:

- 1) Гелий-неоновый лазер
- 2) Поляризатор
- 3) Кристалл ниобата лития
- 4) Матовая пластинка
- 5) Экран
- 6) Источник высоковольтного переменного и постоянного напряжения
- 7) Фотодиод
- 8) Осциллограф
- 9) Линейка

### 3 Теоретическая справка

Эффектом Поккельса называется изменение показателя преломления света в кристалле под действием электрического поля, причём это изменение пропорционально напряжённости электрического поля. Вследствие эффекта Поккельса в кристалле либо появляется двойное лучепреломление, либо меняется его величина (если кристалл был двулучепреломляющим в отсутствие поля), либо, как в данной работе, одноосный кристалл становится двуосным.

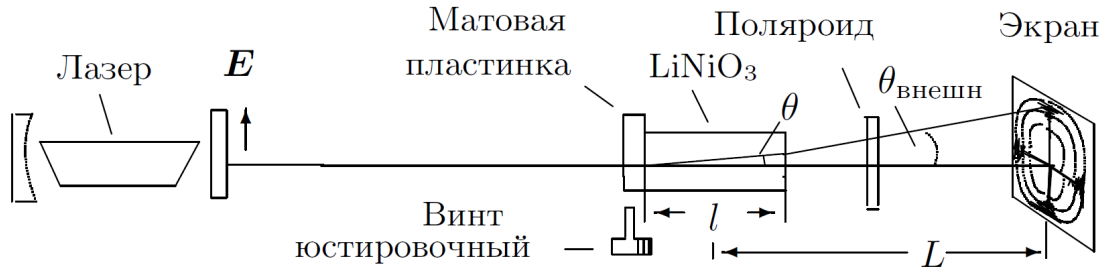


Рис. 1. Схема для наблюдения интерференционной картины

В общем случае, когда луч света распространяется под углом  $\theta$  к оптической оси  $z$  (рис. 1), существуют два собственных значения показателя преломления  $n_1$  и  $n_2$ : в обыкновенной волне (если световой вектор  $E$  перпендикулярен плоскости  $(k, e_z)$ , где  $k$  - волновой вектор луча,  $e_z$  - орт по оси  $z$ ) показатель  $n_1 = n_o$ , а в необыкновенной (когда световой вектор  $E$  лежит в плоскости  $(k, e_z)$ ) показатель преломления  $n_2$  зависит от угла  $\theta$ : согласно формуле (7.9), можем записать

$$\frac{1}{n_2^2} = \frac{\cos^2 \theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_e^2}.$$

Разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами, приобретаемая при прохождении через кристалл длиной  $\ell$ , равна

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \ell \cdot (n_1 - n_2).$$

Для обыкновенного луча  $n_1 = n_o$  и не зависит от угла  $\theta$  между направлением луча и осью  $z$ . Для необыкновенного луча  $n_2$  зависит от угла  $\theta$  и определяется уравнением (1). Считая, что  $n_e$  и  $n_o$  отличаются незначительно, для малых углов ( $\sin \theta \approx \theta$ ,  $\cos \theta \approx 1 - \theta^2/2$ ) получаем

$$n_2 \approx n_o - (n_o - n_e) \theta^2.$$

Таким образом,

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} l (n_o - n_e) \theta^2$$

Направлениями постоянной разности фаз служат конусы  $\theta = \text{const}$ , поэтому интерференционная картина представляет собой концентрические окружности. Интерференционные кольца перерезаны тёмным "мальтийским крестом" который выделяет области, где интерференция отсутствует. В этих направлениях распространяется только одна поляризованная волна (обыкновенная или необыкновенная). При повороте выходного поляроида (анализатора) на  $90^\circ$  картина меняется с позитива на

негатив: везде, где были светлые места, появляются тёмные и наоборот.

Для случая, когда разрешённое направление анализатора перпендикулярно поляризации лазерного излучения (скрещенные поляризации), найдём радиус тёмного кольца с номером  $m$ . Для луча, идущего вдоль оси  $z$  ( $m = 0$ ), показатели преломления для двух волн совпадают, сдвиг фаз между ними равен нулю, поляризация излучения на выходе остаётся такой же, как на входе, и луч не проходит через анализатор. Картина не изменится при сдвиге фаз между обыкновенной и необыкновенной волной, кратном  $2\pi$ . Поэтому для  $m$ -го тёмного кольца  $\Delta\varphi = 2\pi m$  или  $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \ell (n_o - n_e) \theta^2 = 2\pi m$ . Если  $L$  – расстояние от центра кристалла до экрана, то, учитывая закон преломления (закон Снеллиуса) на границе кристалла, при малых углах  $\theta_{\text{внешн}} = n_o \theta$  (рис. 1) получаем выражение для радиуса кольца:

$$r_m^2 = \frac{\lambda}{\ell} \frac{(n_o L)^2}{(n_o - n_e)} m.$$

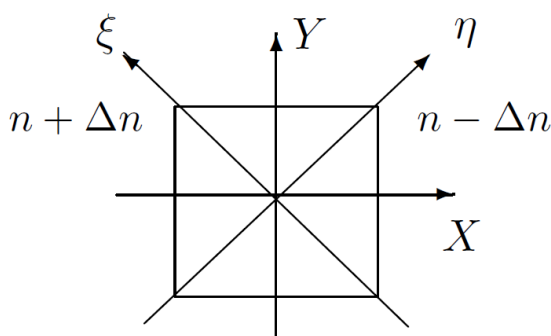


Рис. 2. Эффект Поккельса —  
появление новых главных  
направлений при наложении  
электрического поля

Измеряя радиусы колец, можно найти разность  $(n_o - n_e)$  – двулучепреломление кристалла.

Представим теперь, что мы поместили кристалл в постоянное электрическое поле  $E_{\text{эл}}$ , направленное вдоль оси  $x$ , перпендикулярной оптической оси кристалла  $z$ . Луч света распространяется вдоль оси  $z$ , при этом для любой поляризации в отсутствие внешнего поля показатель преломления равен  $n_o$ . Свойства симметрии кристалла и его электрооптический тензор таковы, что в результате линейного электрооптического эффекта (эффекта Поккельса) в плоскости  $(xy)$  возникают два главных направления  $\xi$  и  $\eta$  под углами  $45^\circ$  к осям  $x$  и  $y$  (рис. 2) с показателями преломления  $(n_o - \Delta n)$  и  $(n_o + \Delta n)$ , то есть появляются «медленная» и «быстрая» оси, причём  $\Delta n = A \cdot E_{\text{эл}}$  ( $A$  – некая константа, зависящая только от типа кристалла).

Пусть свет на входе в кристалл поляризован вертикально, а на выходе стоит анализатор, пропускающий горизонтальную поляризацию. Разложим исходный

световой вектор  $E = E_0 e^{i(\omega t - kz)}$  по осям  $\xi$  и  $\eta$ :  $E_\xi = E_\eta = E_0/\sqrt{2}$ . После прохождения кристалла между векторами  $E_\xi$  и  $E_\eta$  появится разность фаз:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\ell}{\lambda} 2\Delta n = \frac{4\pi\ell}{\lambda} A E_{эл} = \frac{4\pi\ell}{\lambda} \frac{1}{d} AU,$$

где  $U = E_{эл} d$  - напряжение на кристалле,  $d$  - размер кристалла в поперечном направлении. Результирующее поле после анализатора это сумма проекций  $E_\xi$  и  $E_\eta$  на направление  $x$ , т. е.

$$E_{\text{вых}} = \frac{E_0}{2} e^{i(\omega t - k\ell)} \left( e^{i\Delta\varphi/2} - e^{-i\Delta\varphi/2} \right) = E_0 e^{i(\omega t - k\ell)} \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right).$$

Интенсивность света пропорциональна квадрату модуля вектора электрического поля в волне:

$$I_{\text{вых}} \sim EE^* = E_0^2 \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right),$$

поэтому

$$I_{\text{вых}} = I_0 \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{U}{U_{\lambda/2}}\right).$$

Здесь

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{4A} \frac{d}{\ell}$$

- так называемое полуволновое напряжение - имеет тот смысл, что при  $U = U_{\lambda/2}$  сдвиг фаз между двумя волнами, соответствующими двум собственным поляризациям,  $\Delta\varphi = \pi$  (разность хода равна  $\lambda/2$ ), и интенсивность света на выходе анализатора, как следует из (3), достигает максимума.

В работе предлагается показать, что при параллельных поляризациях лазера и анализатора

$$I_{\text{вых}} = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{U}{U_{\lambda/2}}\right).$$

Напряжение  $U_{\lambda/2}$  называют также управляющим напряжением. Оно уменьшается, как это видно из (4), с уменьшением длины волны света  $\lambda$  и с увеличением отношения  $\lambda/d$  кристалла (это справедливо для поперечного электрооптического эффекта, который используется в нашем опыте). Характерная величина полуволнового напряжения в ниобате лития для видимого света составляет несколько сотен вольт.

## 4 Экспериментальная установка

Свет гелий-неонового лазера, поляризованный в вертикальной плоскости, проходя сквозь матовую пластинку, рассеивается и падает на двоякопреломляющий кристалл

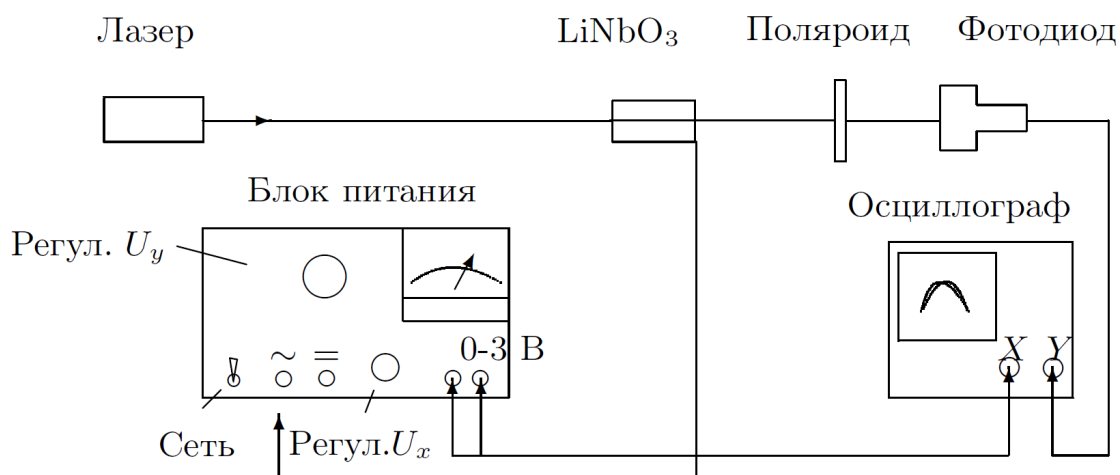


Рис. 3. Схема для изучения двойного лучепреломления в электрическом поле

под различными углами. Кристалл ниобата лития с размерами  $3 \times 3 \times 26$  мм вырезан вдоль оптической оси  $z$ . На экране, расположенном за скрещенным поляроидом, видна интерференционная картина.

Для  $\lambda = 0.63$  мкм (длина волны гелий-неонового лазера) в ниобате лития  $n_0 = 2.29$ .

Убрав рассеивающую пластинку и подавая на кристалл постоянное напряжение, можно величиной напряжения влиять на поляризацию луча, вышедшего из кристалла.

Заменяв экран фотодиодом (рис. 3) и подав на кристалл переменное напряжение, можно исследовать поляризацию луча с помощью осциллографа.

## 5 Измерения, Обработка

1) Предварительно отъюстируем систему, хотя в процессе эксперимента это все равно придется неоднократно повторить. Убедимся в том, что лазерный луч поляризован вертикально, а у поляроида найдем вертикальное разрешённое направление.

2-3) Расположим интерференционную картину со сдвигом, чтобы наблюдать наибольшее количество колец.

Расстояние  $L = 74.0 \pm 0.5$  см.

Длина волны излучения гелий-неонного лазера  $\lambda = 0.63$  мкм.

Показатель преломления кристалла  $n_0 = 2.29$

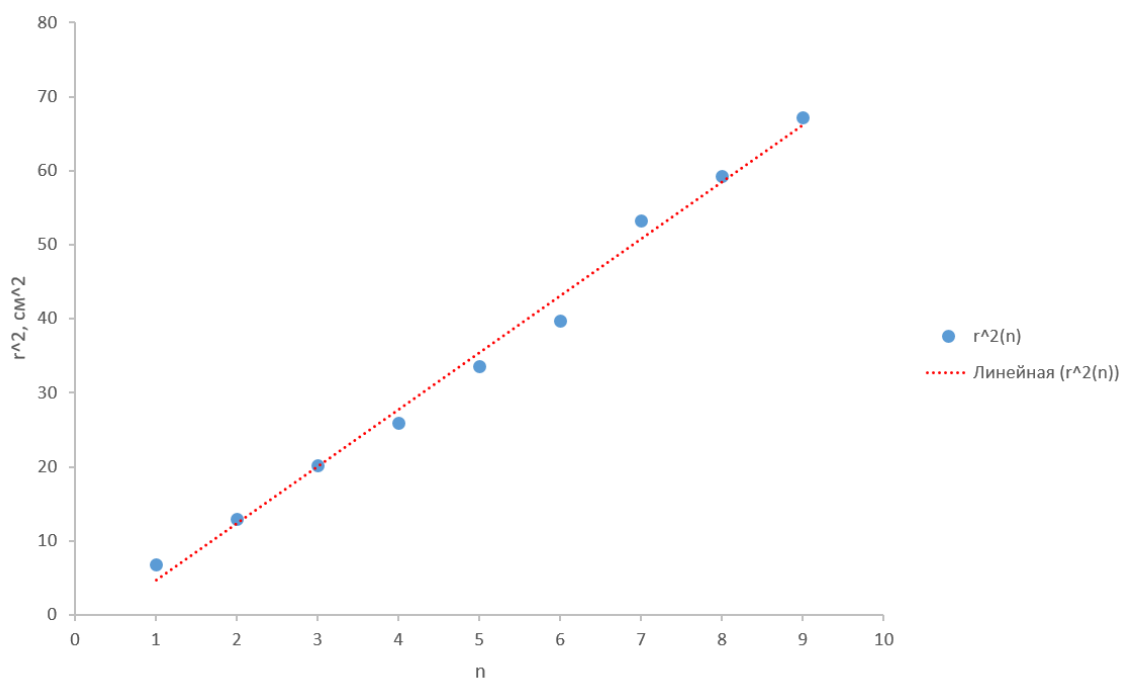
Длина кристалла  $l = 26$  мм.

4) Данные приведены в таблице

### Зависимость радиуса кольца от его номера

n	r, см
1	2.6
2	3.6
3	4.5
4	5.1
5	5.8
6	6.3
7	7.3
8	7.7
9	8.2

## Зависимость $r^2(n)$



Найдем угловые коэффициенты прямых для каждой установки по МНК.

$$a = \frac{\langle x_i y_i \rangle - \langle x \rangle \langle y_i \rangle}{\langle x_i^2 \rangle - \langle x_i \rangle^2}$$

$$b = \langle v_i \rangle - a \langle N_i \rangle$$

Также рассчитаем их погрешности

$$S_a^2 = \frac{\langle x_i^2 \rangle}{\langle x_i^2 \rangle - \langle x_i \rangle^2} \cdot \frac{\langle b_i - b \rangle^2}{n - 2}$$

Итоговая зависимость

$$r^2 = (-2.9 \pm 1.5) + (7.68 \pm 0.27) \cdot m$$

$$n_0 - n_e = 0.091 \pm 0.005$$

Это совпадает с табличным значением 0.09 в пределах погрешности.

5) Уберем матовую пластинку и отъюстируем систему.

Включим ЛБП в сеть и убедимся в работоспособности установки.

Удобнее всего проводить замеры при исходной параллельной поляризации, тогда полуволновому напряжению будет соответствовать минимум яркости.

Полученное значение

$$U_{\lambda/2} = 450 \text{ В}$$

6) При четвертьволновом напряжении  $U_{\lambda/2}$  получается круговая поляризация, т.е. интенсивность не меняется при вращении поляроида.

7) Проведем наблюдения с помощью фотодиода и осциллографа, расположим фотодиод на расстоянии около 40-50 см от кристалла, чтобы минимизировать вклад рассеянного излучения лазера и максимизировать попадающее на элемент излучение центрального луча.

8-9) Занесу в таблицу результаты измерения напряжений по фигурам Лиссажу и визуально

	$U_{\lambda/2}$ , В	$U_{\lambda}$ , В	$U_{3\lambda/2}$ , В
Лиссажу	420	840	1260
Визуал	450	-	-

Результаты сходятся в рамках возможных неточностей.

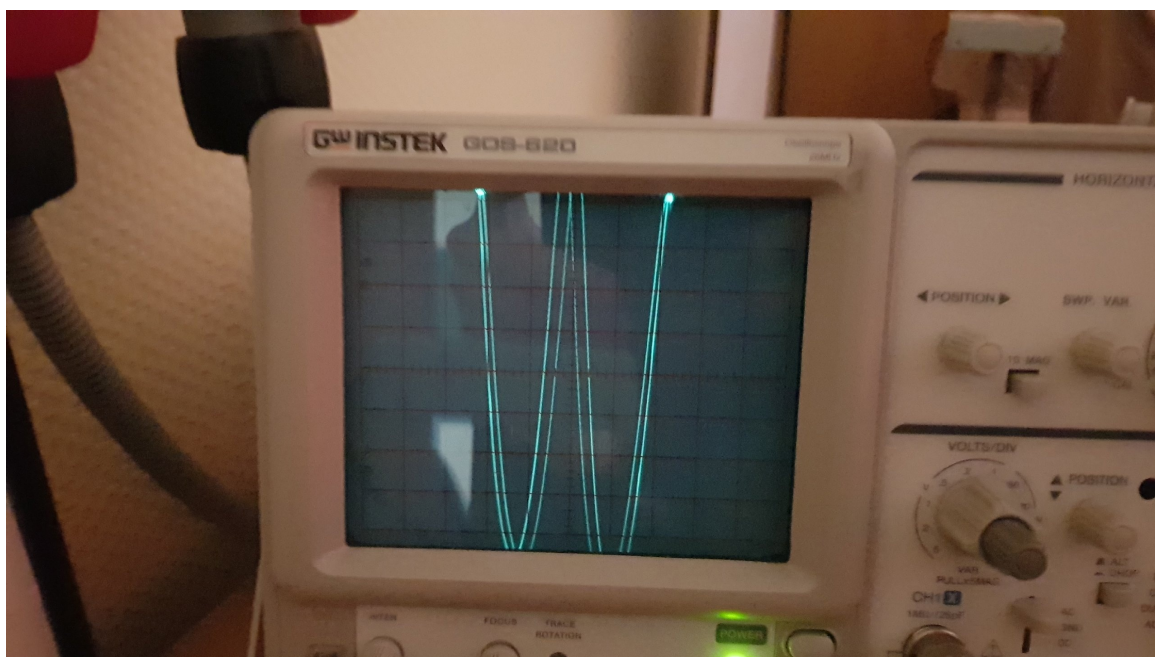


Рис. 1: Полуволновое

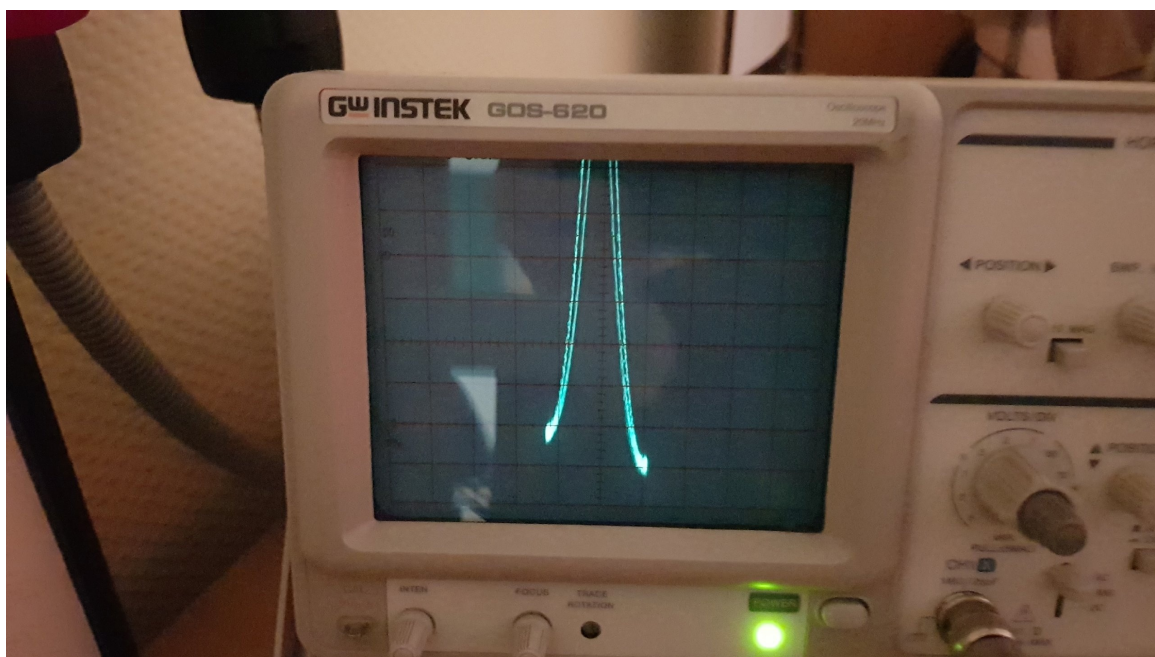


Рис. 2: Волновое



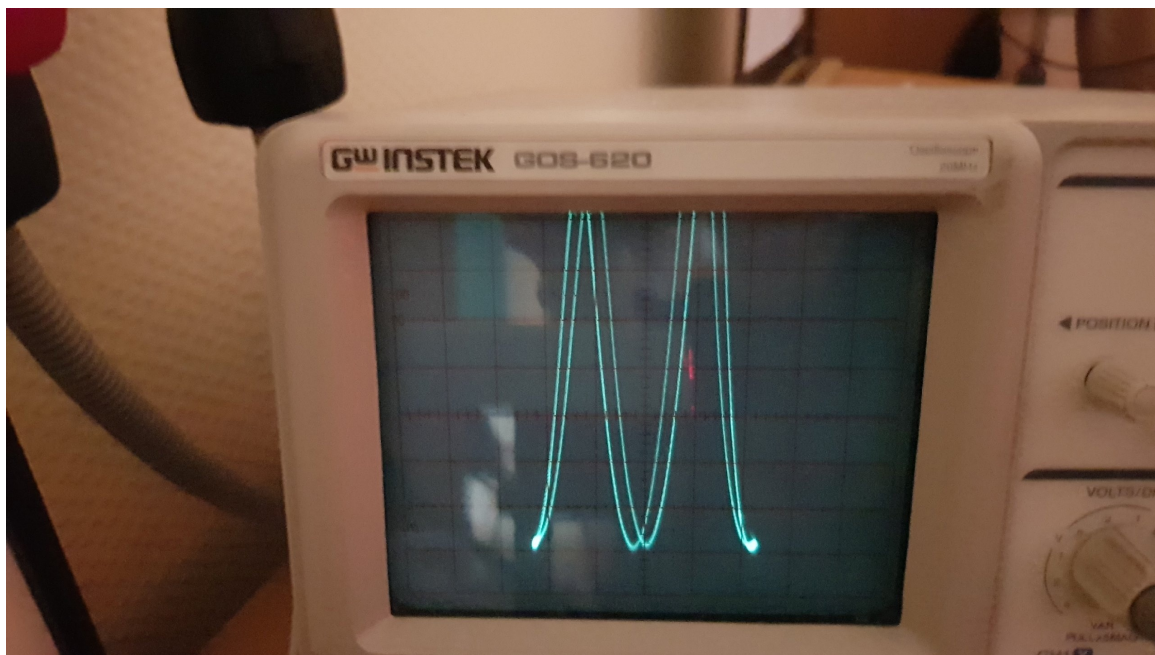


Рис. 3: Волновое инвертированное

## 6 Вывод

Были проведены замеры как двулучепреломления на основе интерференционной картины поляризованного света, прошедшего через кристалл, так и волновых напряжений, соответствующих своим фигурам Лиссажу. Результаты совпали с табличными, что свидетельствует о верной постановке эксперимента и грамотно заданных приближениях.

## 7 Ресурсы

Расчет по МНК: [метод-наименьших-квадратов.рф](http://метод-наименьших-квадратов.рф)