

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт инженерной физики и радиоэлектроники
Базовая кафедра фотоники и лазерных технологий

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий баз.каф. ФилЛТ
_____ А.Н. Втюрин
« _____ » _____ 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**Измерение показателя преломления оптически прозрачных
материалов с помощью «однозеркального» интерферометра**

16.04.01 Техническая физика

16.04.01.02 Оптическая физика и квантовая электроника

| | | | |
|----------------------|-------|--|---------------|
| Научный руководитель | _____ | профессор, д-р физ.-мат. наук | В.В. Слабко |
| Консультант | _____ | науч. сотр., канд. физ.-мат. наук | А.А. Иваненко |
| Выпускник | _____ | | Н.А. Губич |
| Рецензент | _____ | ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук | А.С. Крылов |

Красноярск 2020

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Измерение показателя преломления оптически прозрачных материалов с помощью «однозеркального» интерферометра» содержит 41 страницу текстового документа, 20 рисунков и 19 использованных источников и 5 приложений.

ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ, ОДНОЗЕРКАЛЬНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР, ВАКУУМНЫЙ ИЧФ, ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЛАЗЕР.

Цель работы: разработать методику и установку для измерения показателя преломления с помощью «однозеркального» интерферометра.

В связи с этим были поставлены следующие задачи:

- 1) ознакомление с литературой по данной теме;
- 2) разработка методики измерения показателя преломления прозрачных тонких сред с помощью однозеркального интерферометра;
- 3) разработка и создания лабораторного макета установки измерения;
- 4) разработка схемы перестройки температуры лазера для управления длиной волны диодного лазера;
- 5) экспериментальная проверка элементов разработанной методики измерения показателя преломления.

Созданный макет установки позволяет осуществлять измерение фазы до третьего знака после запятой. Полученные результаты будут использованы для разработки измерителя абсолютных значений показателей преломления.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Содержание..... | 3 |
| Введение..... | 4 |
| 1 Методы измерения показателя преломления..... | 5 |
| 1.1 Гониометрический метод..... | 5 |
| 1.2 Рефрактометрический метод..... | 9 |
| 1.3 Интерферометрический метод..... | 11 |
| 1.4 Выбор интерферометра..... | 12 |
| 1.4.1 Интерферометр Майкельсона..... | 12 |
| 1.4.2 Однозеркальный интерферометр..... | 15 |
| 1.5 Интерференционно-чувствительный фотоприемник..... | 16 |
| 1.5.1 Определение и свойства ИЧФ..... | 16 |
| 1.5.2 Вакуумные интерференционно-чувствительные фотоприемники..... | 17 |
| 2 Разработка методики и установки измерения показателя преломления..... | 18 |
| 2.1 Измерение показателя преломления..... | 18 |
| 2.2 Структурная схема и описание установки..... | 19 |
| 2.3 Преобразователь ток-напряжение-усилитель..... | 22 |
| 2.4 Стабилизатор тока и температуры..... | 25 |
| 3 Экспериментальные результаты..... | 27 |
| Заключение..... | 31 |
| Список использованных источников..... | 32 |
| Приложение А..... | 34 |
| Приложение Б..... | 35 |
| Приложение В..... | 37 |
| Приложение Г..... | 38 |
| Приложение Д..... | 39 |

ВВЕДЕНИЕ

Показатель преломления вещества – важная величина, равная отношению фазовых скоростей света (электромагнитных волн) в вакууме и в данной среде. Величина, которая применена и реализована как в быту, так и в промышленной сфере для создания оптических приборов, установок. Без существования эффекта преломления не возможно было бы человеку видеть окружающий мир, ведь стекловидное тело и хрусталик глаза - это биологические линзы выполняющие функцию фокусировки светового потока в точку на чувствительной сетчатке глаза.

Существуют различные методы измерения показателя преломления, гониометрический, рефрактометрический и интерференционный. Эти методы позволяют измерять показатель преломления с высокой точностью, но наиболее точным является интерференционный, однако этот метод, использующий стандартные интерферометры часто не удобен в работе. В связи с этим разработка более простых и удобных методов и приборов является актуальной.

Цель работы: разработать методику и установку для измерения показателя преломления с помощью «однозеркального» интерферометра.

В связи с этим были поставлены следующие задачи:

- 1) ознакомление с литературой по данной теме;
- 2) разработка методики измерения показателя преломления прозрачных тонких сред с помощью однозеркального интерферометра;
- 3) разработка и создания лабораторного макета установки измерения;
- 4) разработка схемы перестройки температуры лазера для управления длиной волны диодного лазера;
- 5) экспериментальная проверка элементов разработанной методики измерения показателя преломления.

1 Методы измерения показателя преломления

Метод измерения показателя преломления следует выбирать в зависимости от предельной погрешности измерений, технико-экономической целесообразности выполнения требований к изготовлению образца для измерений, установленных для каждого метода.

В случае необходимости проведения измерений показателей преломления и дисперсий с повышенной точностью требования к качеству измеряемых образцов, к средствам и условиям измерения должны устанавливаться в зависимости от конкретного объекта и цели измерения, с учетом особенностей используемого прибора и заданной погрешности.

Гониометрические методы включают:

- метод наименьшего отклонения;
- метод автоколлимации.

Рефрактометрические методы включают:

- метод измерения на рефрактометре Пульфриха;
- метод измерения на V-рефрактометре;
- метод измерения на рефрактометре Аббе;
- метод измерения на компенсационном рефрактометре.

Интерференционный сравнительный метод измерения

Измерение показателя преломления проводят для длин волн, при которых нормируют качество или характеризуют свойства оптического материала. По измеренным показателям преломления вычисляют значения средней дисперсии и коэффициента дисперсии. Значения частных дисперсий и относительных частных дисперсий вычисляют при необходимости [1].

1.1 Гониометрический метод

Гониометрами называются приборы, предназначенные для измерения углов между плоскими полированными гранями различных деталей, а также

для измерения углов отклонения лучей при их преломлении призмами и клиньями, изготовленными из стекла и других прозрачных материалов.

Измерение углов на гониометре можно проводить двумя способами - абсолютным и относительным. При абсолютном способе измеряемый угол сравнивают с лимбом гониометра и получают сразу величину измеряемого угла. При относительном способе измеряют отклонение величины измеряемого угла от угла эталонной детали и считывают эту величину со шкалы, расположенной на сетке коллиматора или зрительной трубы.

Гониометр состоит из подставки с вертикальной осью, вокруг которой вращаются лимб, столик для установки измеряемой детали и зрительная труба /автоколлиматор/. На основании закреплен кронштейн с коллиматором. Со зрительной трубой жестко связаны отсчетные устройства для отсчета по шкале лимба гониометра.

Гониометры позволяют измерять углы двумя способами коллимационным и автоколлимационным (рисунок 1).

При коллимационном способе пучок света, выходящий из коллиматора, падает под углом на грань призмы, величину угла которой хотим измерить, и отразившись от нее попадает в зрительную трубу. По лимбу снимается отсчет. Затем поворачивают столик с деталью, добиваются совмещения сетки трубы с изображением сетки коллиматора и при отражении пучка света от другой грани призмы и снимают отсчет с лимба. Разность отсчетов a - даст дополнение угла до 180° . Измеряемый угол вычисляется по формуле: $s = 180^\circ - a$.

При автоколлимационном методе вместо зрительной трубы устанавливают автоколлиматор, который поочередно устанавливается сначала против одной грани, а потом против другой. При каждом положении автоколлиматора снимают отсчет по лимбу. Разность отсчетов при первом и втором положениях даст тот же угол α . Измеряемый угол вычисляется по той же формуле.

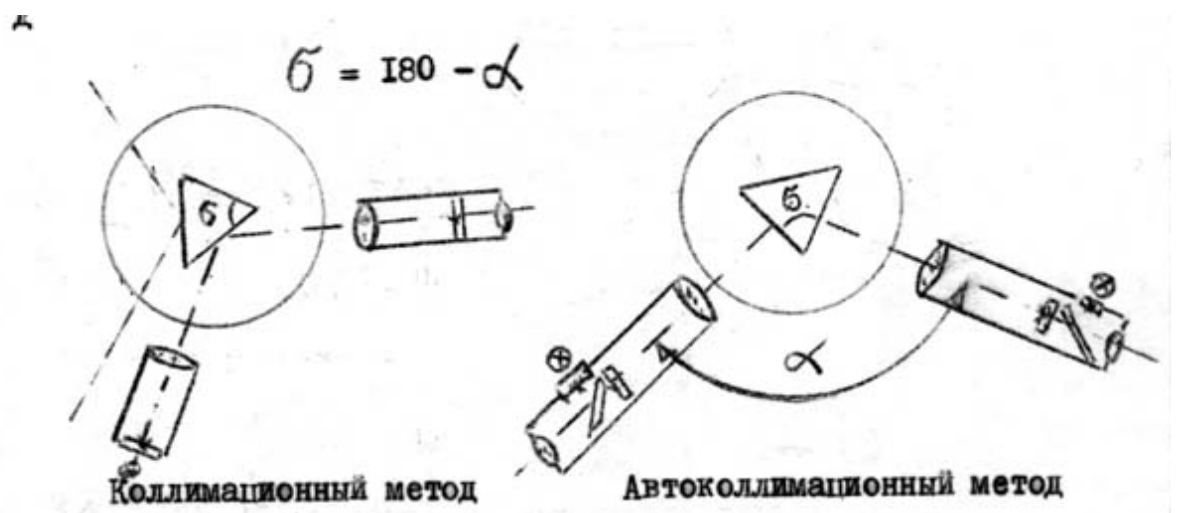


Рисунок 1 — Коллимационный и автоколлимационный метод

К гониометру предъявляются следующие требования:

- 1) оси вращения столика, лимба и зрительной трубы должны быть соосны;
 - 2) визирные оси зрительной трубы /автоколлиматора/ и коллиматора должны быть расположены перпендикулярно вертикальной оси вращения;
 - 3) зрительная труба и коллиматор должны быть сфокусированы на бесконечность;
 - 4) плоскость столика и лимба должны быть расположены перпендикулярно оси вращения и соответственно параллельны между собой.
- Наибольшую ошибку в измерении вызывает эксцентриситет лимба (рисунок 2).

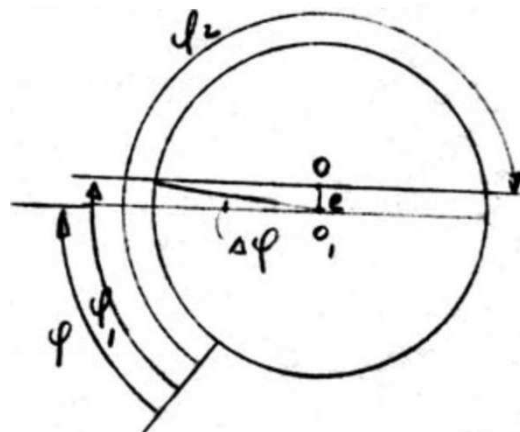


Рисунок 2 — Эксцентриситет лимба

Необходимо измерить угол φ , тогда запишем $\varphi = \varphi_1 - \Delta\varphi$, $\varphi = \varphi_2 - \Delta\varphi - 180^\circ$ и $\varphi = [(\varphi_1 + \varphi_2)/2] - 90^\circ$. Если отсчет будет производиться по двум диаметрально противоположным частям лимба, то ошибка, вызванная эксцентриситетом лимба, ликвидируется. Определение правильности показания гониометра производится путем контрольных измерений углов специального образца (полигона), представляющего собой многогранную призму с полированными гребнями. Число граней может быть различным (6;8;24 и более). К полигону прилагается паспорт, в котором указывается значение углов между гранями. Для гониометра с погрешностью 10" и 5" допускается погрешность углов полигона 3" и 2" соответственно.

С помощью гониометров можно определять:

- 1) величину двугранных углов между плоскими полированными гребнями;
- 2) пирамидальность призм;
- 3) показатель преломления по углу отклонения луча призмой.

Конструкция гониометра имеет следующие особенности:

- 1) посадочные места для трубы и коллиматора одинаковые, что позволяет заменять одну на другой;
- 2) труба и автоколлиматоры имеют сменные окуляры, сетки и др., что позволяет превратить трубу в автоколлиматор и наоборот;
- 3) в трубе применена внутренняя фокусировка;
- 4) отсчет по лимбу ведется путем совмещения двух диаметрально противоположных его частей и передачи их изображения в поле зрения отсчетного микроскопа;
- 5) в отсчетной системе применен оптический микрометр.

Гониометры выпускаются, в соответствии с ГОСТ 10021-62, типов ГС-30, ГС-10, ГС-5, ГС-2, ГС-1.

Цифра указывает точность гониометра в угловых секундах [2].

1.2 Рефрактометрический метод

Если луч света пересекает границу раздела двух прозрачных однородных сред, то направление луча изменяется – происходит его преломление или рефракция. Согласно закону преломления света, отношение синусов углов падения (α) и преломления (β) – величина постоянная: $n = \sin\beta / \sin\alpha$ (рисунок 3).

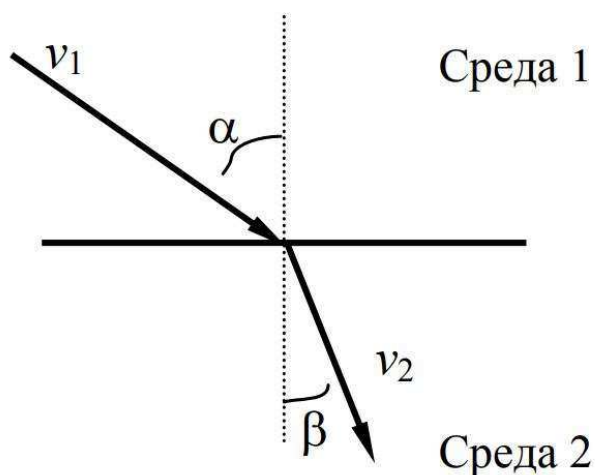


Рисунок 3 — Закон преломления света

Коэффициент (n) называется показателем преломления. Это безразмерная величина, которая указывает, во сколько раз скорость света в «среде 1» больше скорости света в «среде 2»: $n = v_1 / v_2$. Если «среда 1» является вакуумом, то (v_1) – скорость света в вакууме ($\approx 3 \cdot 10^8$ м/с), а коэффициент (n) – абсолютный показатель преломления (обычно его определяют для газов). Для жидкостей и твердых тел наиболее часто определяют показатель преломления относительно воздуха. В этом случае (n) – относительный показатель преломления вещества. Связь между абсолютным ($n_{\text{абс}}$) и относительным по отношению к воздуху показателями преломления имеет вид: $n_{\text{абс}} = n_{\text{возд}} \cdot n_{\text{отн}}$, где $n_{\text{возд}}$ – абсолютный показатель преломления воздуха ($\approx 1,00027$). Проводить подобный расчет, однако, обычно нет необходимости, так как в рефрактометрических таблицах для жидких и твердых веществ (и для растворов лекарственных веществ) также приводят значения ($n_{\text{отн}}$).

Показатель преломления зависит от следующих факторов:

- 1) природы вещества;
- 2) плотности вещества;
- 3) концентрации вещества в растворе;
- 4) температуры и давления, при которых проводится измерение (так как они влияют на плотность вещества);
- 5) длины волны света [3].

Наиболее часто (но не всегда) определяют показатель преломления для D-линии спектра натрия (589,3 нм – среднее значение для дублета) при 20°C – n_D^{20} . При этом поддерживают температуру исследуемой пробы с помощью встроенного в рефрактометр термостата.

Из вышесказанного следует, что при прочих равных условиях показатель преломления раствора зависит от концентрации растворенного вещества (или веществ).



Рисунок 4 — Ручной рефрактометр

Прибором для измерения показателя преломления является рефрактометр (рисунок 4). Они позволяют определять показатель преломления с точностью до 0,01% и даже до 0,001% от измеряемой величины. Для этого требуется всего

(0,05 – 0,5) г вещества, а вся процедура измерений сводится к отсчету по шкале прибора.

Измеряют показатель преломления для различных целей:

- идентификация и оценка чистоты веществ;
- изучение взаимодействия и превращений компонентов химических систем (комплексообразование, диссоциация, фазовые превращения и др.);
- количественное определение.

В фармацевтическом анализе наибольшее значение приобрел количественный анализ растворов лекарственных веществ. С этой целью применяются рефрактометры, позволяющие определять показатель преломления с относительно высокой точностью: $n \pm 0,0001$.

Рефрактометрический и гониометрические методы – не единственные методы, используемые для измерения показателя преломления. В некоторых случаях требуется более высокая точность и чувствительность анализа. Например, показатели преломления газов при обычных условиях близки к единице, отличаясь на несколько десятитысячных долей. Поэтому в газовом анализе используют интерферометрический метод, принцип действия которых основан на интерференции света. Эти приборы позволяют измерять разности показателей преломления с точностью до $10^{-7} - 10^{-8}$, что используется, например, для определения содержания метана в рудничном воздухе (переносные «шахтные» интерферометры) и для исследования обмена веществ при дыхании [4].

1.3 Интерферометрический метод

Интерференционные методы исследования применяются в самых разнообразных областях науки и техники. Высокая чувствительность и информативность интерференционных измерений, их безконтактность и безинерционность, возможность использования в качестве меры длину световой волны определили обширные возможности их использования.

Интерференционные устройства применяются для контроля качества поверхностей деталей, исследования микро- и макрогеометрии точных деталей, контроля однородности и параметров структуры материалов и сред, включая биологические ткани, высокоточного измерения параметров перемещений и деформаций различных объектов и др. Интерферометры используются и в спектральных исследованиях, для точного измерения длины волны электромагнитных волн, исследования сверхтонкой структуры спектральных линий, измерения показателей преломления газов и паров, их плотности.

Оптические интерферометры с лазерными источниками света применяют в качестве эталонов и образцовых средств измерения длины. Интерференционные приборы применяются при изучении разного рода физических процессов при наличии неоднородности исследуемого объекта.

Например, при изучении температурного поля объекта, при исследовании неоднородностей в воздушных вихрях и потоках, при исследовании дисперсии вблизи полосы поглощения вещества, для измерения механических напряжений в моделях при наличии нагрузок. Интерференционные методы используют и в астрономии для определения угловых размеров одиночных и двойных звезд [5].

1.4 Выбор интерферометра

1.4.1 Интерферометр Майкельсона

С помощью интерферометра Майкельсона (1852-1931) впервые было проведено систематическое изучение тонкой структуры спектральных линий и выполнено первое прямое сравнение эталонного метра с длиной световой волны. Знаменитый опыт Майкельсона – Морли, целью которого было обнаружение движения Земли относительно эфира, был выполнен также с помощью интерферометра Майкельсона. Однако историческое значение указанных выше исследований, в особенности последнего, слишком велико.

Поэтому необходимо хотя бы кратко остановиться на описании устройства и работы интерферометра Майкельсона.

Схема интерферометра приведена на (рисунок 5) Свет от протяженного источника S попадает на плоскопараллельную разделенную пластинку P_1 покрытую полупрозрачным тонким слоем серебра или алюминия.

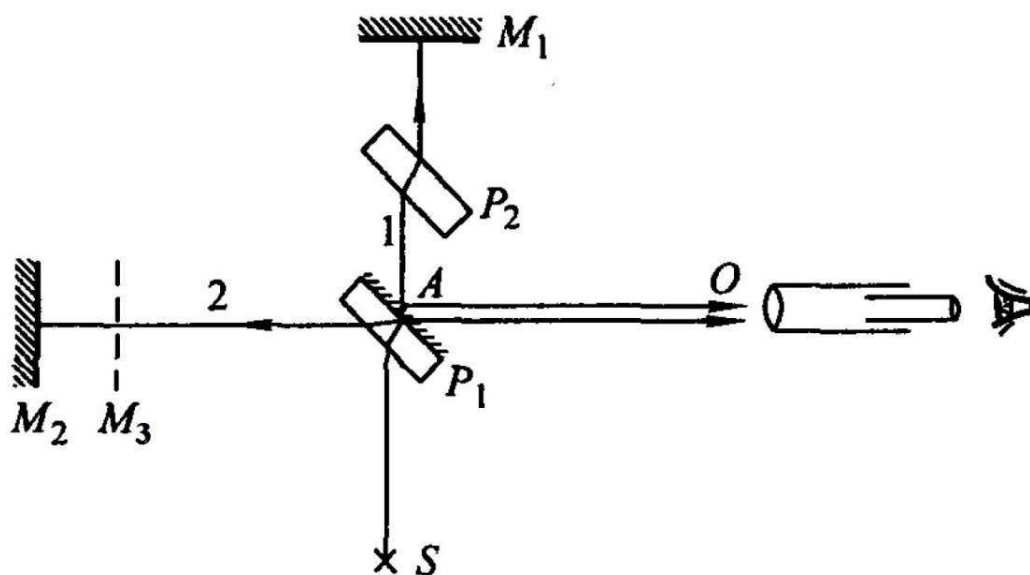


Рисунок 5 — Схема интерферометра Майкельсона

Эта пластинка частично пропускает, частично отражает свет, разделяя падающий пучок на два взаимно перпендикулярных пучка. Первый пучок, пройдя через пластинку P_1 , отражается обратно зеркалом M_1 , а затем частично отражается от пластинки P_1 в направлении AO . Второй пучок, отразившись от покрытой металлом поверхности пластинки P_1 , направляется к зеркалу M_2 , отражается от него, снова проходит через пластинку P_1 и далее идет в направлении AO , как и первый пучок.

Таким образом, от одного и того же источника получаются два пучка лучей одинаковой интенсивности, идущих в зрительную трубу, где и наблюдаются интерференционные полосы.

На пути первого пучка лучей ставится пластинка P_2 , тождественная пластинке P_1 . Она компенсирует разность хода между пучками, возникающую из-за того, что второй пучок пересекает разделительную пластинку P_1 три, а

первый только один раз. Так как стекло обладает дисперсией, то без такой компенсации наблюдение интерференции в белом свете было бы невозможно.

Зеркало M_1 неподвижно, а M_2 с помощью микрометрического винта может перемещаться на специальных салазках строго параллельно самому себе. В больших интерферометрах такое перемещение должно происходить на десятки сантиметров. Поэтому к механической части прибора предъявляются исключительно высокие требования. Зеркала интерферометра снабжены также установочными винтами, позволяющими придавать им правильное положение.

Пусть M_3 — изображение поверхности зеркала M_1 в отражающей плоскости разделительной пластинки P_1 . Тогда интерференция будет происходить так же, как и в воздушном слое между двумя отражающими плоскостями M_2 и M_3 . Разность хода между отраженными лучами $\Delta = 2d \cos \varphi$, где d — толщина слоя, а φ — угол падения. Если слой плоскопараллелен, то будут получаться интерференционные полосы равного наклона, локализованные в бесконечности. Их можно наблюдать глазом, аккомодированным на бесконечность, или в трубу, установленную также на бесконечность. Получатся интерференционные кольца с центром в точке схождения лучей, нормально отраженных от поверхностей M_2 и M_3 . Этому направлению соответствует максимальная разность хода $\Delta = 2d$. Поэтому максимальный порядок интерференции будет наблюдаться в центре картины. Отсюда следует, что при увеличении толщины d воздушного зазора полосы интерференции будут перемещаться в направлении от центра (в противоположность тому, что было с кольцами Ньютона).

При увеличении зазора d на $\lambda/2$ разность хода увеличится на λ , так что произойдет смещение на одну полосу (т.е. на место каждой светлой полосы станет такая же светлая соседняя полоса). При изменении угла падения на $\Delta\varphi$ разность хода изменится на $2d \sin \varphi \Delta\varphi$. Отсюда видно, что полосы интерференции получатся тем шире, чем меньше d . При $d = 0$ они стали бы бесконечно широкими, т.е. поле зрения было бы освещено равномерно.

При больших зазорах и высокой степени монохроматичности света с интерферометром Майкельсона наблюдалась интерференция очень высокого порядка (около 10^6). Если M_2 и M_3 близки друг к другу и образуют воздушный клин с небольшим углом, то полосы интерференции локализуются либо на поверхности клина, либо вблизи нее. Это — полосы равной толщины, имеющие вид равноотстоящих прямых, параллельных ребру клина [6].

1.4.2 Однозеркальный интерферометр

Однозеркальный интерферометр (рисунок 6) предназначен для электронного измерения физических величин, связанных с изменением интерференционного поля в пространстве и времени. Отличие от известных интерферометров состоит в прямой электронной регистрации интерференционного поля с помощью интерференционно - чувствительного фотоприемника. Это - позволяет упростить оптическую схему интерферометра, уменьшить его габаритные размеры.

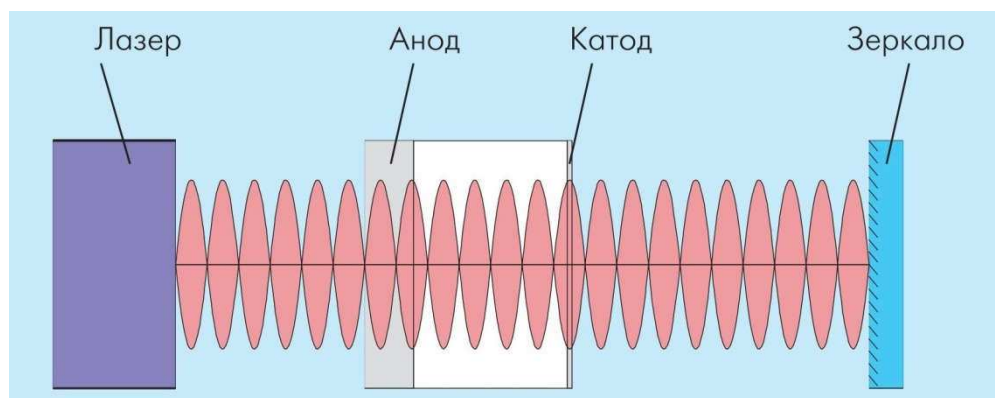


Рисунок 6 — Внешний вид однозеркального интерферометра

В отличие от интерферометра Майкельсона, однозеркальный интерферометр содержит 3 элемента: лазер, вакуумный ИЧФ и зеркало. Зеркало закреплено на пьезоэлементе обеспечивающем его пилообразное перемещение. На выходе вакуумного ИЧФ формируется синусоидальное напряжение, пропорциональное интенсивности стоячей волны. При изменении направления

движения зеркала происходит зеркальное отражение синусоиды относительно этого момента времени [7, 8].

1.5 Интерференционно-чувствительный фотоприемник

1.5.1 Определение и свойства ИЧФ

Интерференционно-чувствительный фотоприемник (ИЧФ) – это фотоприемник, электрический отклик которого зависит от его положения в интерференционном поле, образованном встречными потоками излучения (рисунок 7), т.е. он является детектором пространственного распределения интенсивности в интерференционном поле встречных световых потоков. Он состоит из прозрачной подложки и тонкого фотоэлектрического слоя, имеющего достаточно высокую прозрачность [9, 10, 12].

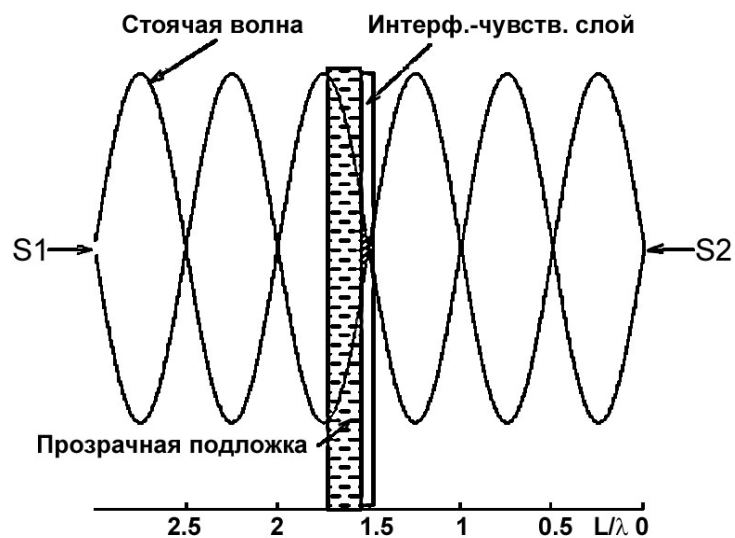


Рисунок 7 — ИЧФ в интерференционном поле встречных световых потоков. По оси абсцисс отложена оптическая разность хода, нормированная к длине волны

Высокая прозрачность фотоприемника необходима для того, чтобы в фотоэлектрическом слое существовало интерференционное поле, образованное встречными световыми потоками. В пределах оптической толщины фотоэлектрического слоя ИЧФ не должно укладываться кратное число

периодов интерференции, иначе интерференционная составляющая сигнала фотоприемника будет отсутствовать. Частотный диапазон чувствительности фотоприемника должен соответствовать частотному диапазону излучения, образующего измеряемое интерференционное поле.

1.5.2 Вакуумные интерференционно-чувствительные фотоприемники

Адаптация стандартных технологий вакуумных фотоэлектронных приборов, с точки зрения изготовления вакуумного интерференционно-чувствительного фотоэлемента, не является очень сложной. Достаточно изготовить анодную и умножительную системы, пропускающими оптическое излучение, а напротив окна с фотокатодом расположить выходное окно. На (рисунок 8) изображена структурная схема вакуумного ИЧФ [11].

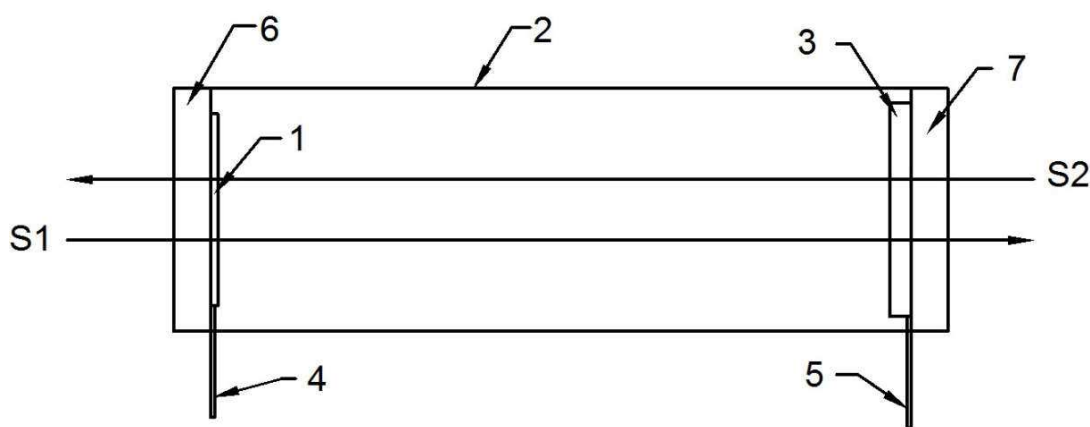


Рисунок 8 — Интерференционно-чувствительный вакуумный фотоэлемент: 1- прозрачный фотокатод; 2 - герметичный баллон; 3 - прозрачный анод; 4 и 5 - подводящие электроды; 6 и 7 - входное и выходное окно

Требования к неоднородности оптической толщины элементов на пути измеряемых встречных световых потоков, конечно выше, чем в стандартных фотоэлектронных приборах.

2 Разработка методики и установки измерения показателя преломления

2.1 Измерение показателя преломления

Фотоприемник находится в интерференционном поле, образованном встречными световыми потоками S1 и S2 с плоскими волновыми фронтами, параллельными фоточувствительным слою в месте его нахождения. По оси X отсчитывается оптическое расстояние, учитывающее показатель преломления среды распространения световых потоков.

Оптическая координата расстояния равна

$$X_{opt} = \int_0^{X_g} n(X) dX \quad (1)$$

где X_g – геометрическое расстояние, отсчитываемое от начала координат;
 $n(X)$ – показатель преломления среды на пути распространения световых потоков вдоль оси X.

Отклик фотоприемника пропорционален интегралу от интенсивности в пределах толщины фотоэлектрического слоя:

$$Q(X_{opt}, \tau, d_{opt}) \simeq \int_{X_{opt}}^{X_{opt}+d_{opt}} \cos^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} X + \frac{\pi c}{\lambda} \tau \right) dX \simeq \frac{1}{2} \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} d_{opt} \right) \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} X_{opt} + \frac{2\pi c}{\lambda} \tau + \frac{2\pi}{\lambda} d_{opt} \right) + \frac{\pi}{\lambda} d_{opt} \quad (2)$$

где E_m – амплитуда колебаний электрического вектора,
 λ – длина волны,
 c – скорость света,
 t – время,

τ – исходное время задержки фронта S1 относительно фазы S2,

d – толщина фоточувствительного слоя фотоприемника

Отклик фотоприемника пропорционален суммарной интенсивности световых потоков в месте своего расположения. Зависимость сигнала от пространственной координаты имеет вид суммы синусоидальной функции и постоянной величины. Отклик фотоприемника так же прямо пропорционален чувствительности фотоэлектрического слоя к интенсивности света бегущей волны.

Показатель преломления рассчитывается по формуле:

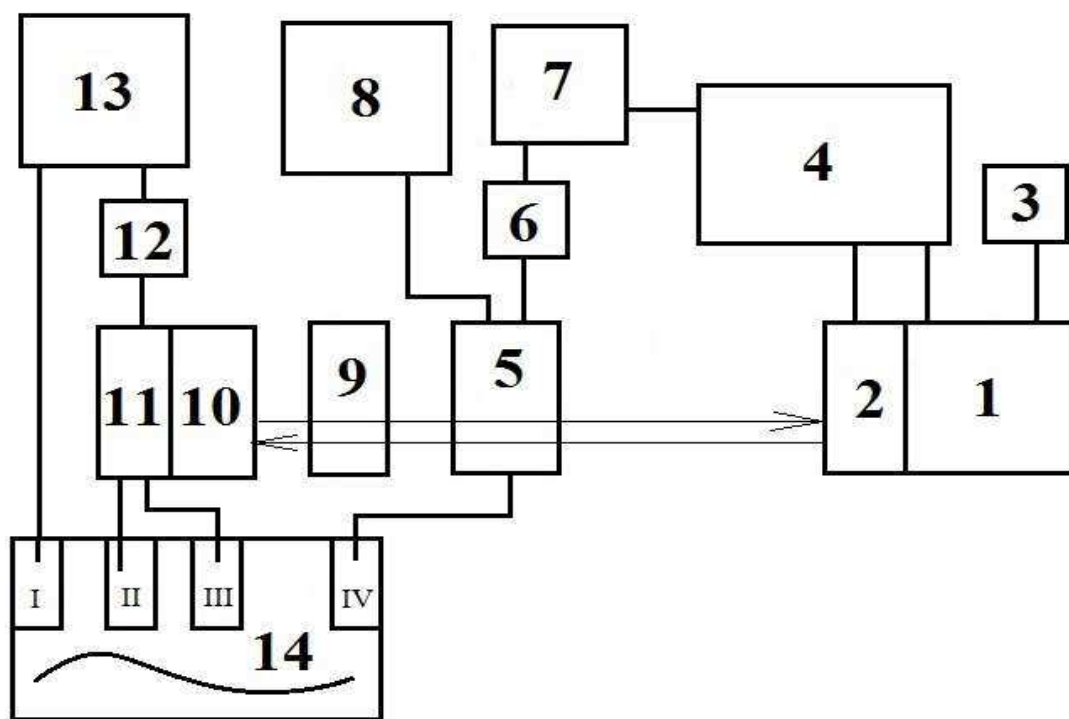
$$n^{образ} = \frac{Xopt_{656,85}^{образ} - Xopt_{656,6}^{образ}}{Xopt_{656,85}^{воз} - Xopt_{656,6}^{воз}}$$

где $Xopt_{656,85}^{образ}$, $Xopt_{656,6}^{образ}$ – это фаза стоячей волны образованной волнами с длинами волн 656,85 нм и 656,6 нм в образце соответственно;

$Xopt_{656,85}^{воз}$, $Xopt_{656,6}^{воз}$ аналогичные предыдущему величины, полученные при измерение в отсутствие образца [13].

2.2 Структурная схема и описание установки

В соответствие с требованиями, выставленными рения, был создан макет установки, изображенный на рисунке 9.



- (1) Полупроводниковый лазер ml 101j21-01; (2) Элемент Пельтье; (3) Стабилизатор тока; (4) Стабилизатор температуры; (5) Сурьмяно-цезиевый вакуумный фотоэлемент; (6) Преобразователь ток-напряжение-усилитель; (7) Источник питания $\pm 15\text{В}$; (8) Источник питания фотоприемника 1200В; (9) Позиционер образцов; (10) Зеркало; (11) Корректор микроперемещений пьезоэлектрический КП-1; (12) Усилитель модулирующего сигнала пьезоэлемента; (13) Генератор сигналов специальной формы АКПП - 3402; (14) Четырехканальный (I, II, III, IV) цифровой осциллограф НДО – 4034

Рисунок 9 — Структурная схема установки

В структурную схему установки входит, полупроводниковый лазер ml 101j21-01 имеющий выходную мощность 80 мВт, и рабочий диапазон длин волн 654-662нм (приложение А). Он состоит в тепловом контакте с элементом Пельтье и собран в корпус колиматора. Лазер и элемент Пельтье соединены схемой стабилизации температуры, что дает нам возможность перестраивать лазер по длине волны. Лазерный луч проходит через полупрозрачный вакуумный ИЧФ, позиционер и отразившись от зеркала, закреплённого на пьезокорректор (приложение Г) вновь проходит через позиционер и фотоприемник. На выходе фотоприемника формируется сигнал, имеющий форму косинуса. Прямой и отраженный лучи формируют интерференционный

сигнал, регистрируемый ИЧФ. В точке изменения направления движения зеркала на пьезоэлементе происходил скачок фазы синусоидального сигнала фотоприемника на π .

Усиленный сигнал фотоприемника регистрируется цифровым осциллографом. Первый канал осциллографа используется в качестве синхронизирующего сигнала с генератора.

Макет установки изображен на рисунке 10.

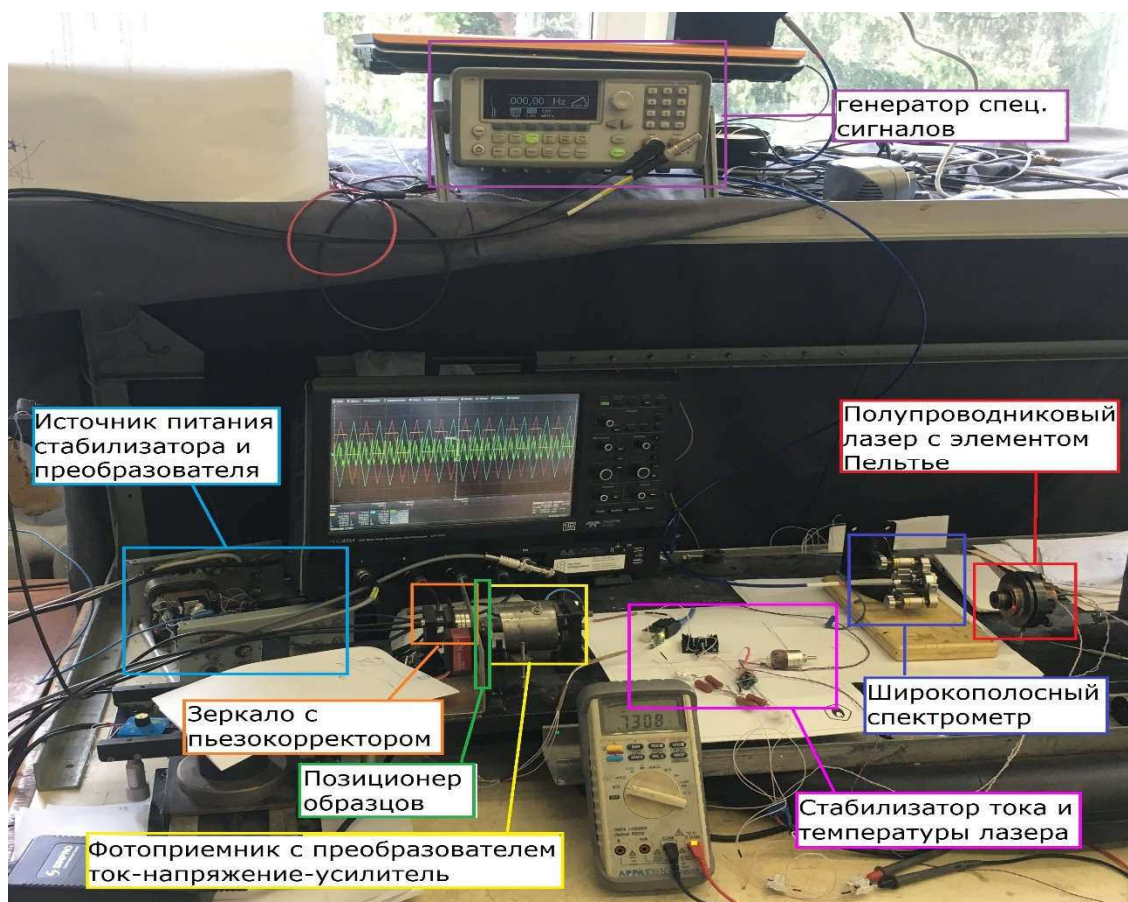


Рисунок 10 — Макет установки

На макете виден лазер, застабилизированный на длине волны 656,1 нм. Так же виден осциллограф с интерференционной картинной и пилообразным напряжением на пьезоэлементе поданным с генератора сигнала специальной формы (приложение В), мультиметр для измерения напряжение на лизерном диоде, и широкополосный спектрометр серии HR4000CG-UV-NIR (приложение Б)

2.3 Преобразователь ток-напряжение-усилитель

Для измерения в широком диапазоне частот требуется разработка высокочувствительного, высокочастотного преобразователя ток-напряжение для вакуумного ИЧФ. На (рисунок 11) представлена схема преобразователя. Первый каскад преобразователя разработан малошумящий, высокочастотный, на операционном усилителе (ОРА827) со сверхнизким входным током (3пА), с шумовыми характеристиками ($U = 4 \frac{nV}{\sqrt{v}}, \left(\frac{nB}{\sqrt{\Gamma u}}\right); I = 2,2 \frac{fA}{\sqrt{v}}, \left(\frac{\phi A}{\sqrt{\Gamma u}}\right)$).

Следующие три каскада выполнены на малошумящем, высокочувствительном операционном усилителе (АDА4898) с несколько большим входным током (30 нА), но меньшим входным напряжением шума ($U = 0,9 \frac{nV}{\sqrt{v}}, \left(\frac{nB}{\sqrt{\Gamma u}}\right); I = 2,4 \frac{nA}{\sqrt{v}}, \left(\frac{nA}{\sqrt{\Gamma u}}\right)$).

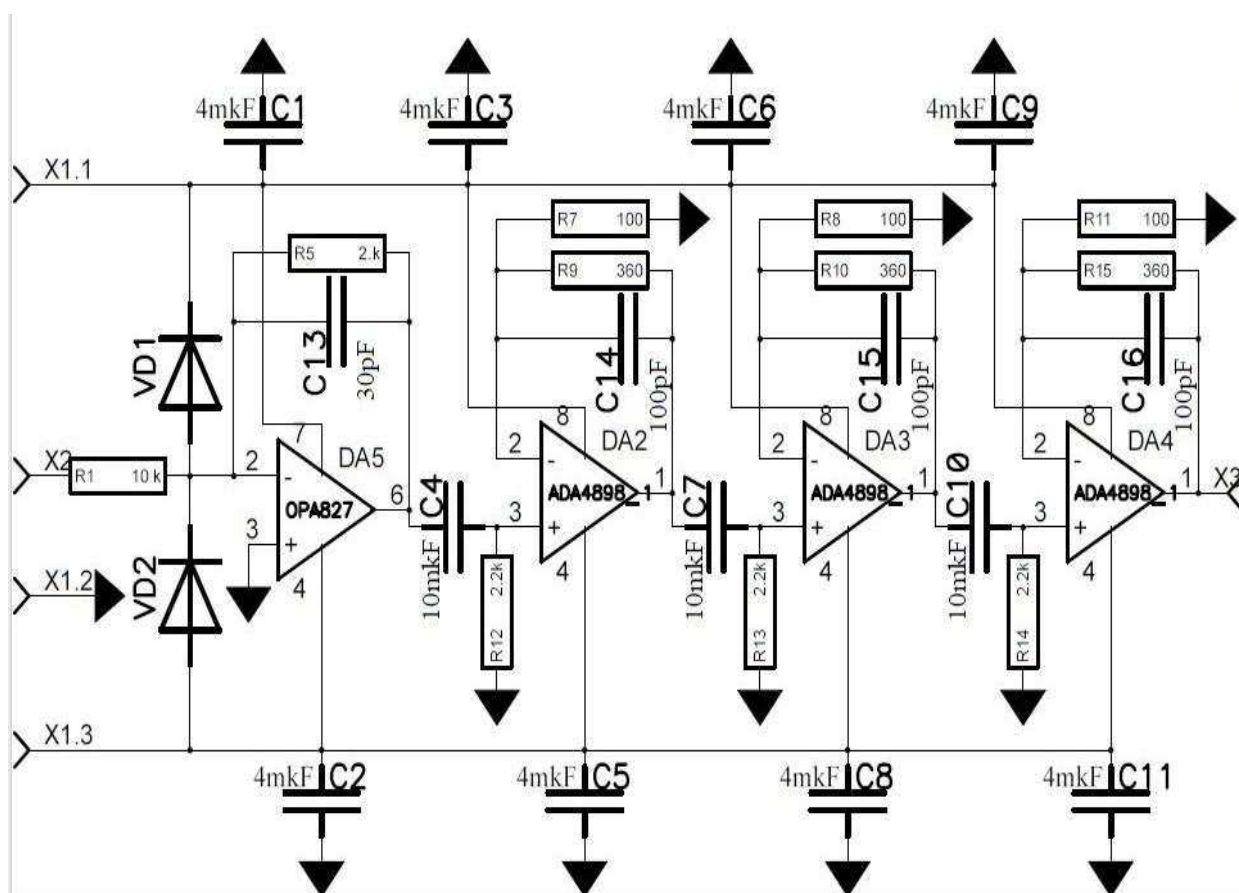


Рисунок 11 —Схема преобразователя ток-напряжение-усилитель

АЧХ в низкочастотной области (рисунок 12) формируется с помощью разделительных конденсаторов, установленными между каскадами. Это позволяет значительно уменьшить влияние фликкер-шума характерного для операционных усилителей и преобладающего в низкочастотной области. Кроме того, такое решение исключает влияние подсветок на результаты измерений.

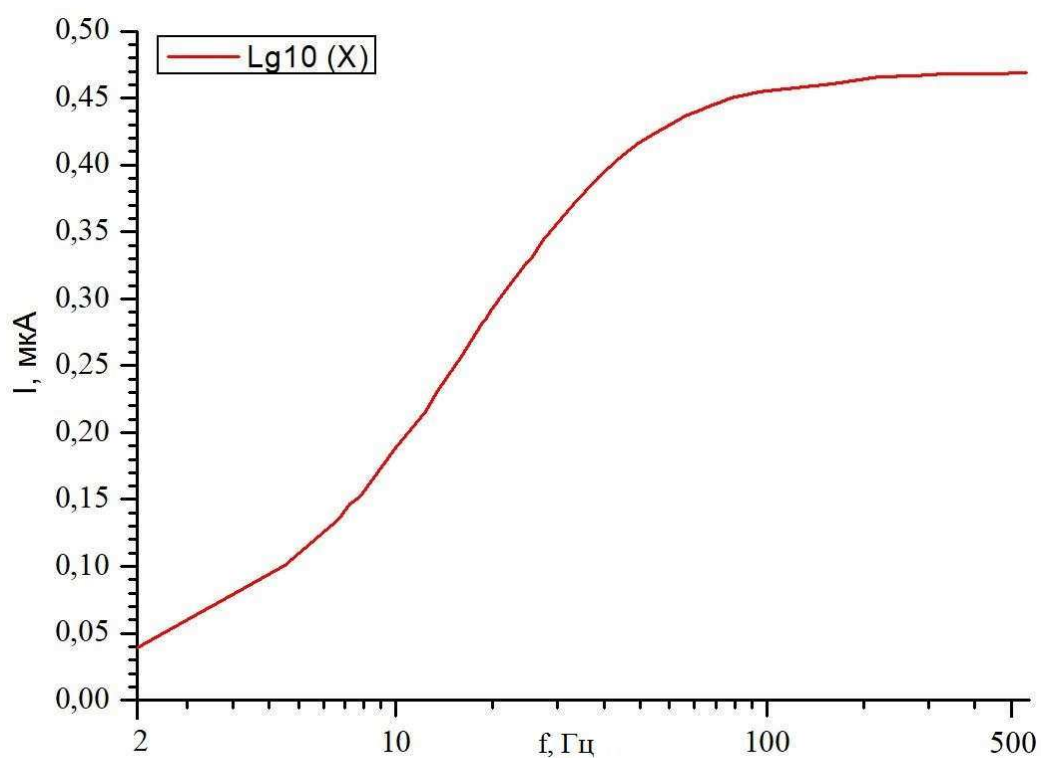


Рисунок 12— График амплитудно-частотной характеристики преобразователя в низкочастотной области (2-500 Гц)

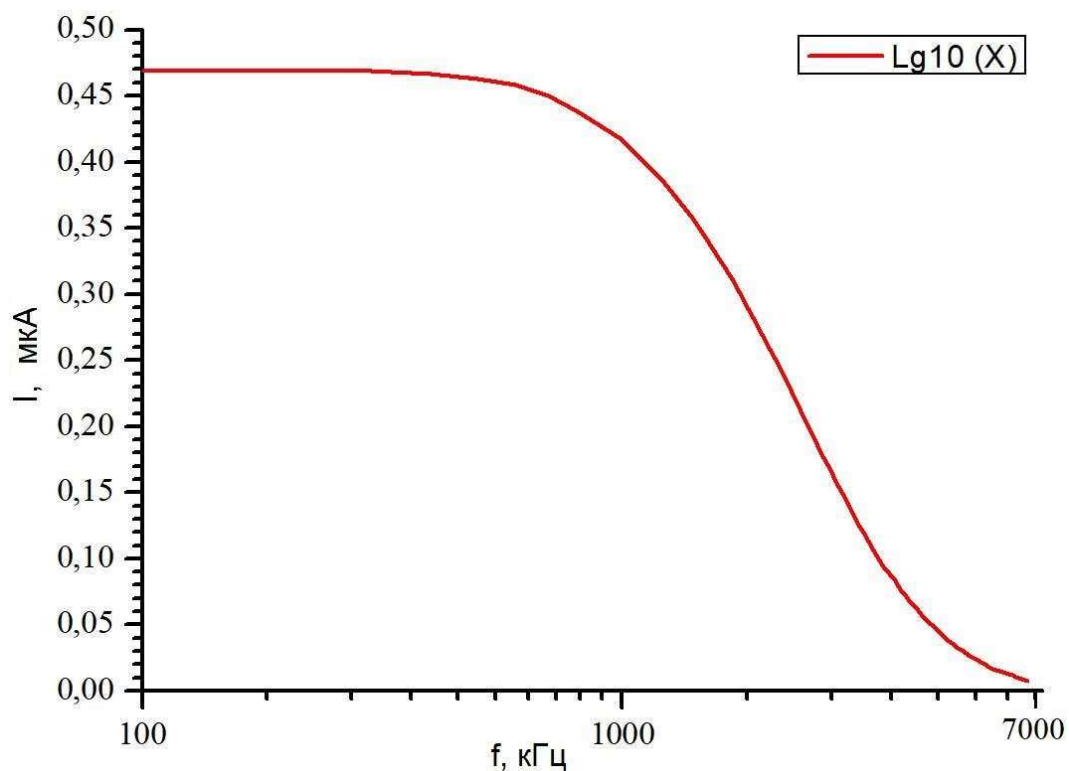


Рисунок 13 — График амплитудно-частотной характеристики преобразователя в высокочастотной области (100-7000 кГц)

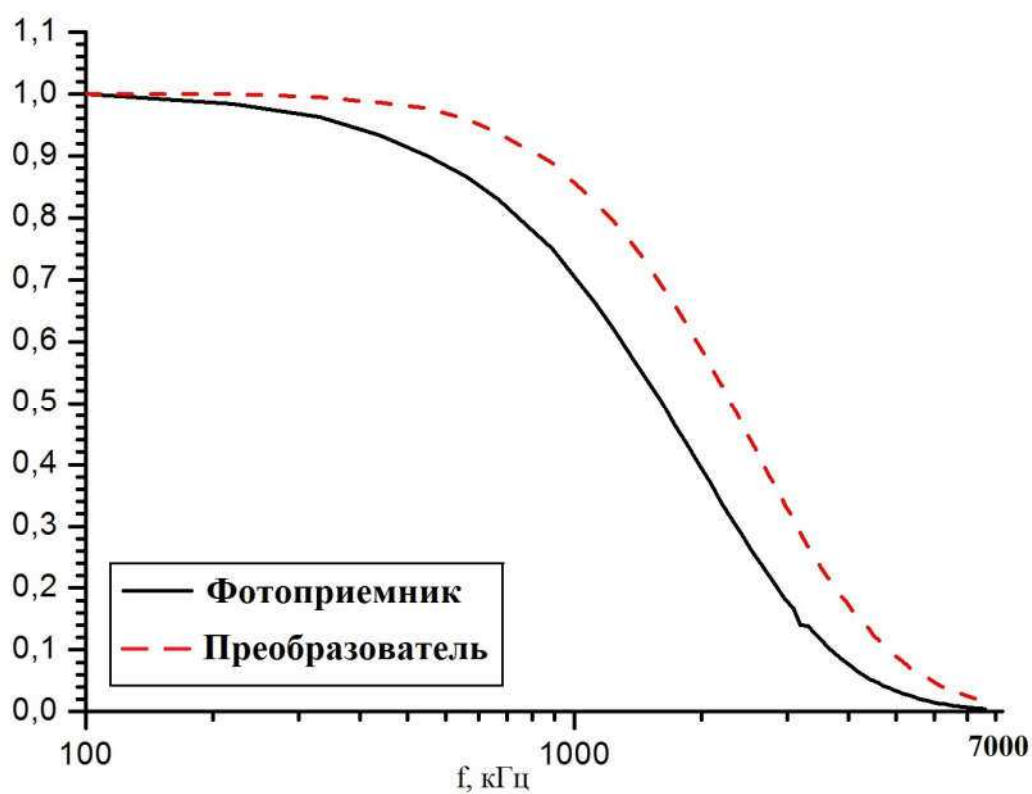


Рисунок 14 — График нормированных амплитудно-частотных характеристик преобразователя усилителя и вакуумного фотоприемника с преобразователем-услителем

Согласно рисунку 14 усилитель обладает несколько более широкой полосой пропускания, чем фотоприемник. Усилитель разработан с небольшим запасом по полосе пропускания, т. е. усилитель не ограничивает ширину полосы пропускания фотоприемника.

2.4 Стабилизатор тока и температуры

Полупроводниковый лазер запитывается стабилизатором тока (рисунок 15). Задаваемый ток 60 мА.

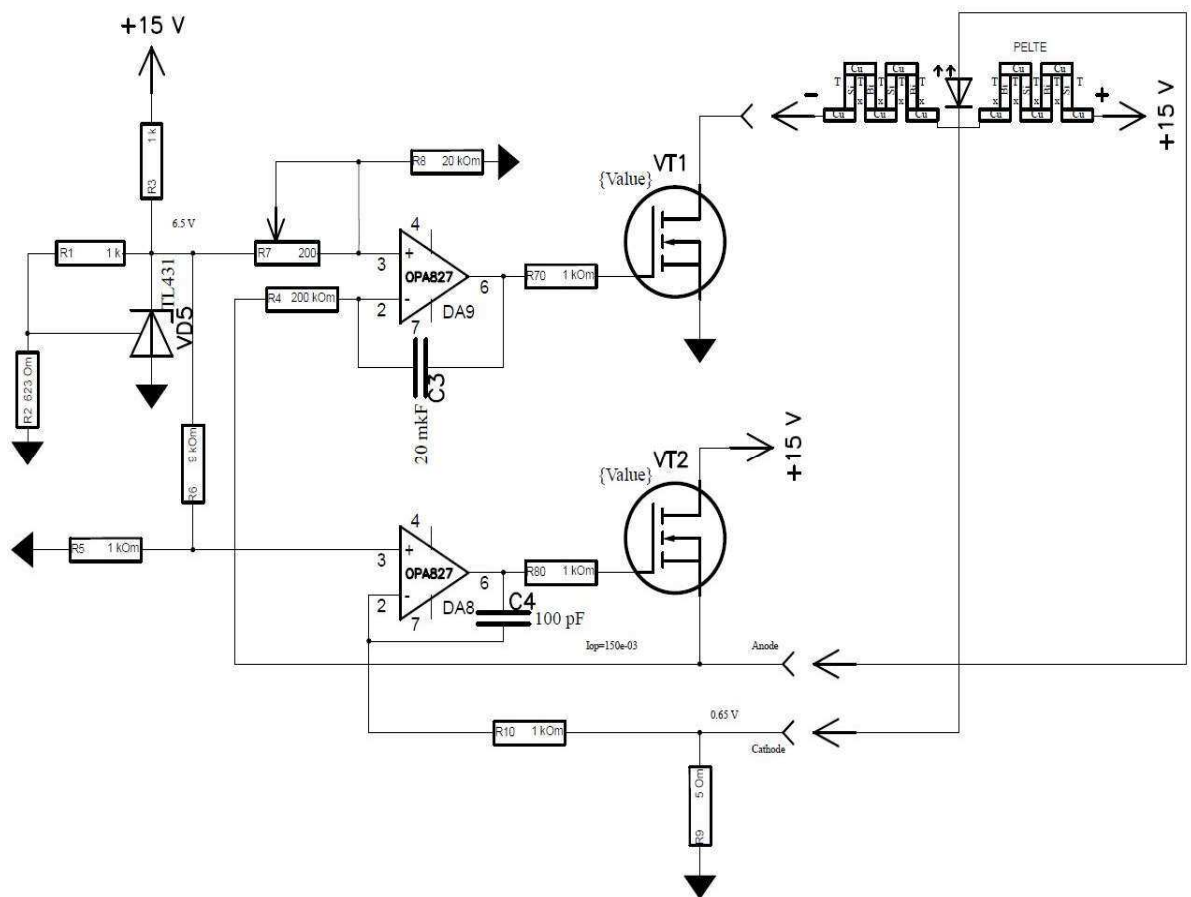


Рисунок 15 — Схема стабилизатора

Лазерный диод имеет тепловой контакт с охлаждаемой стороной элемента Пельтье. Горячая сторона элемента Пельтье охлаждается корпусом коллиматора. Схема на элементе Пельтье обеспечивает стабилизацию температуры лазера в заданных пределах. Управление температурой лазера

осуществляет его перестройку по длине волны. Соответственно меняя температуру пельтье, мы меняем длину волны лазера. Осуществляя перестройку по длине волны и измеряя интерферограммы с объектом и без него, по которым можно определить задержку света по времени, мы вычисляем показатель преломления объекта.

Что бы выбрать рабочий диапазон, производилось измерение зависимости напряжения на лазерном диоде (пропорционально температуре диода) при изменении тока на элементе Пельтье (рисунок 16).

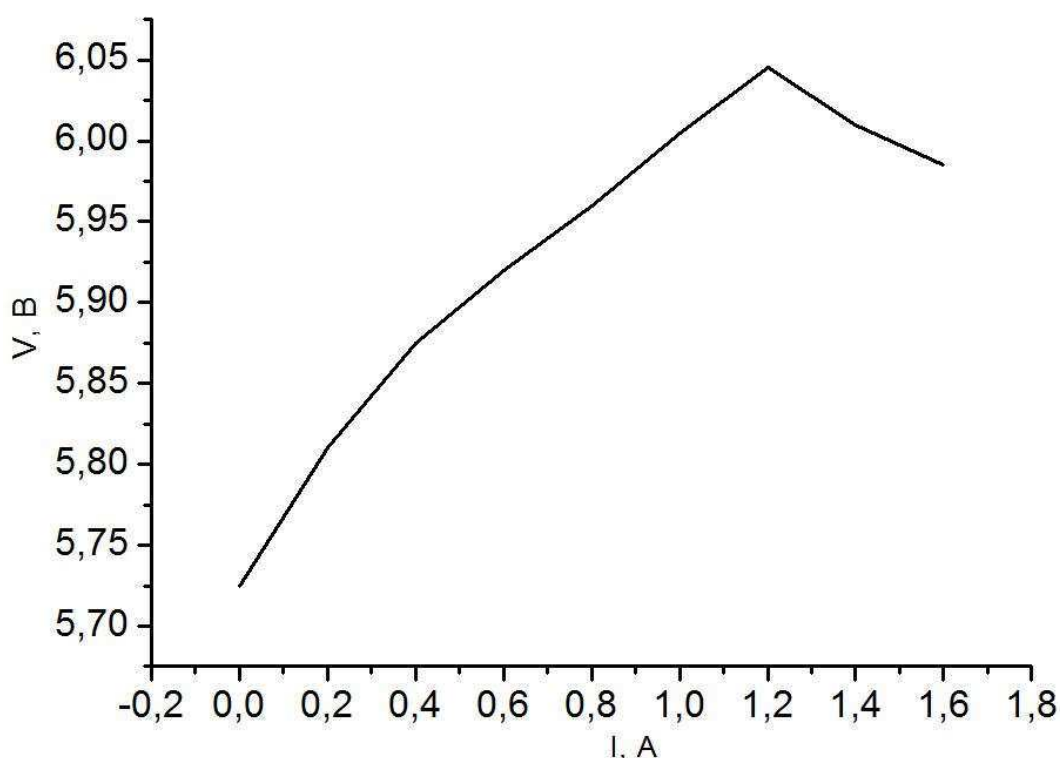


Рисунок 16 — Зависимость напряжения диода при изменении тока на элементе Пельтье

Рабочий диапазон составляет 0,4А – 0,6А. Напряжение на диоде пропорционально его температуре. Задавая напряжение выбранной рабочей точки на стабилизаторе температуры, обеспечиваем стабилизацию заданной температуры диода, а значит и длинны волны с высокой точностью.

3 Экспериментальные результаты

Для расчета показателя преломления, получены следующие экспериментальные результаты:

- 1) интерферограммы без образца при двух значениях длин волн лазера. Выбраны длины волн 656,85 нм и 656,6 нм;
- 2) интерферограммы с установленным образцом при тех же значениях длин волн.

Интерферограмма на длине волны 656,6 нм без образца приведен на рисунках 17, 18.

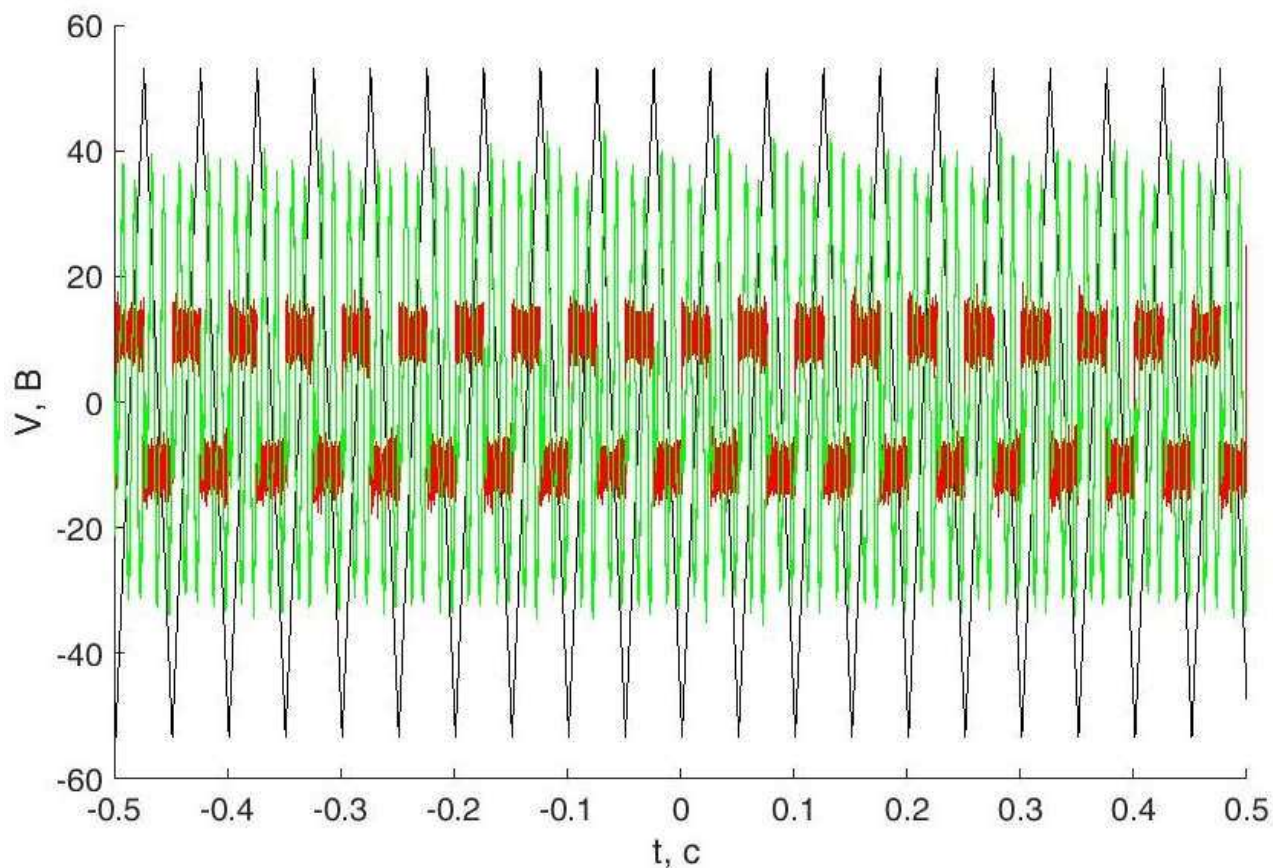


Рисунок 17 — Интерферограмма на длине волны 656,6 нм

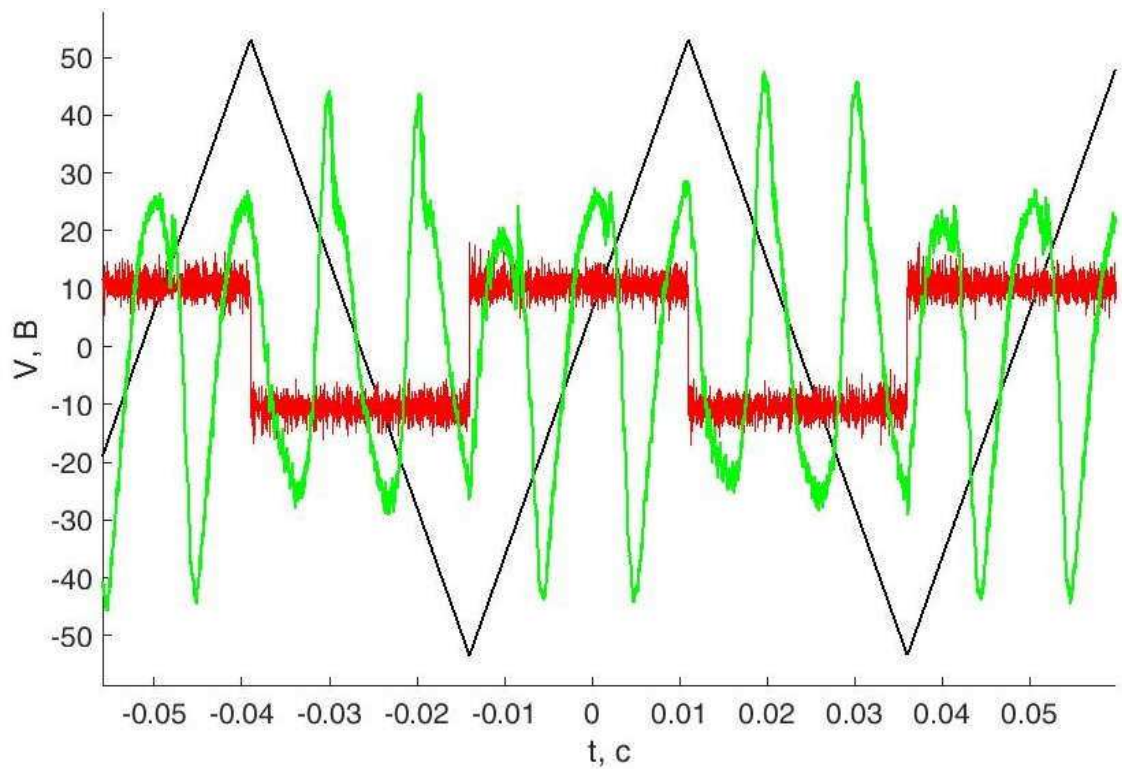


Рисунок 18 — Интерферограмма на длине волны 656,6 нм

Произведены усреднение участков интерферограммы одной осциллограммы в 40 периодах. Из измерений получена зависимость напряжения на выходе усилителя фотоприемника от напряжения на пьезоэлементе (рисунок 19).

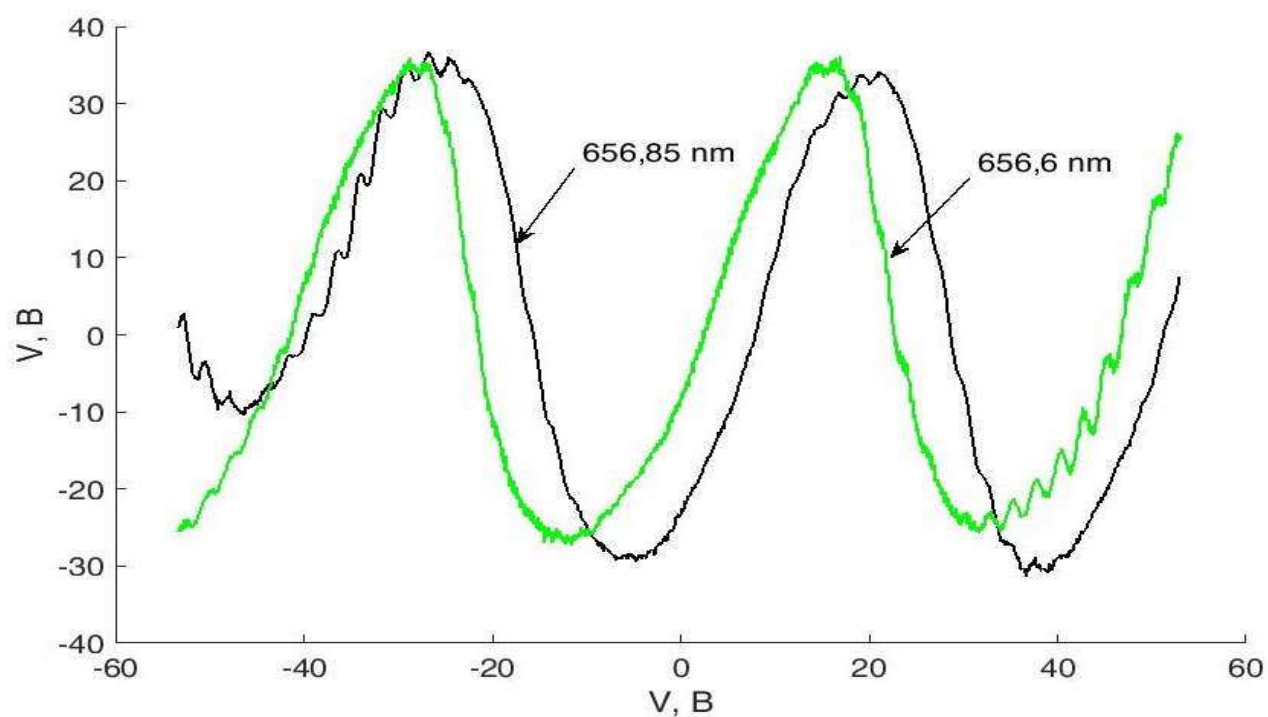


Рисунок 19 — Интерферограмма на двух длинах волн

Коэффициент пьезоэлектрического эффекта был измерен в моей выпускной квалификационной работе «разработка установки для измерения пьезоэффекта с помощью оптического интерферометра» и составляет 72,233 в/мкм. При делении напряжения на пьезоэлементе на этот коэффициент, получаем зависимость сигнала фотоприемника от перемещения пьезокорректора. Даная зависимость представлена на рисунке 20.

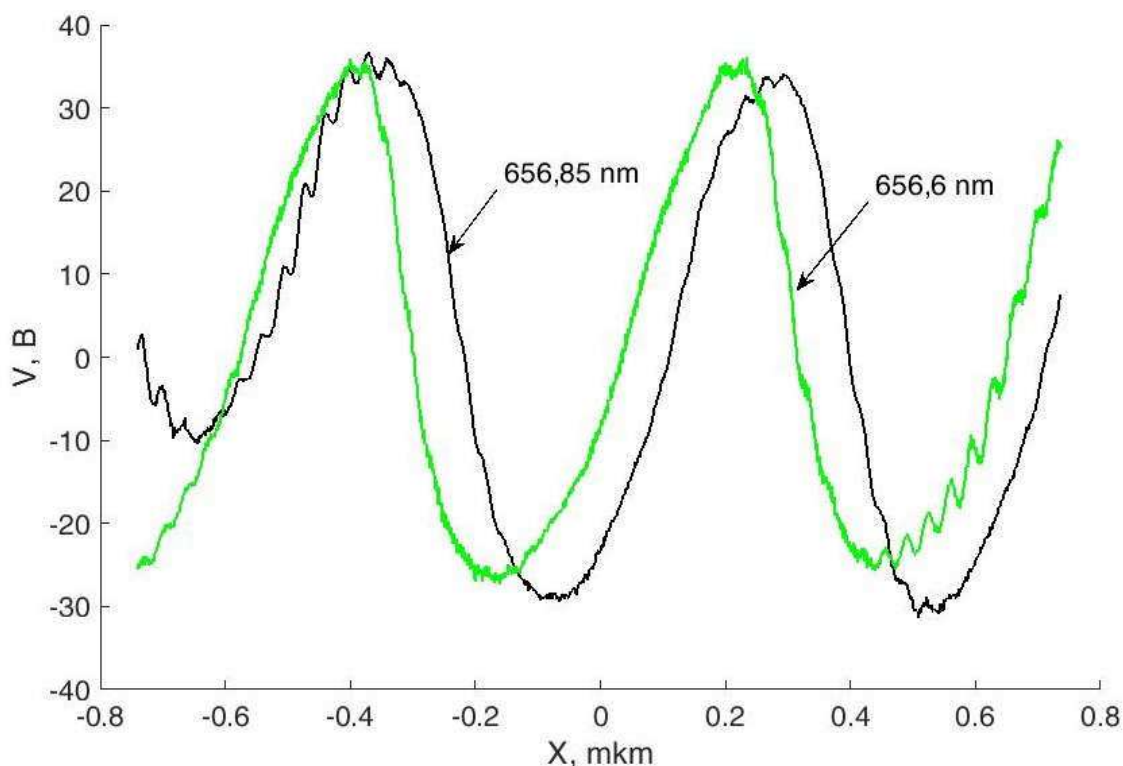


Рисунок 19 — Интерферограмма на двух длинах волн с пересчетом на коэффициент

Разностью фаз полученных синусоидальных сигналов для воздуха является $\text{Хорт}_{656.85}^{\text{Воз}} - \text{Хорт}_{656.6}^{\text{Воз}}$ в формуле (3) для расчета показателя преломления. Те же расчеты произведены для измерений с образцом. Пользуясь полученными измерениями, производим расчет показателя преломление по формуле (3).

Обработка всех полученных интерферограмм производилась при использовании программы MatLab.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения магистерской диссертации был проведен литературный обзор по теме методы измерения показателя преломления, интерферометры, вакуумные ИЧФ, полупроводниковые лазеры.

В основу разработки взят однозеркальный интерферометр с применением вакуумного интерференционно-чувствительного фотоприемника, который имеет преимущества перед другими интерферометрами. К таким преимуществам относятся простота оптической схемы и юстировки интерферометра. Так же разработан высокочувствительный, высокочастотный преобразователь ток-напряжение-усилитель для ИЧФ и проведены измерения его амплитудно-частотных характеристик.

Основными пунктами являются:

1) разработана методика измерения фазы стоячей волны, возникающей в однозеркальном интерферометре;

2) разработан и создан экспериментальный образец установки, включающий в себя полупроводниковый лазер с температурной перестройкой длины волны и ее стабилизации в этой области с точностью до: 0.75 нм;

3) проведены измерения интерферограммы в зависимости от напряжения на пьезоэлементе;

полученные результаты будут использованы для разработки измерителя абсолютных значений показателей преломления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Материалы оптические. Методы измерения показателя преломления : государственный стандарт союза ССР / Москва ГСП : ред. В. С. Бабкина. – Москва : издательство стандартов, 1992. – 30 с.
2. Высокоточные угловые измерения /Д.А. Аникст, К.М. Константинович, И.В. Меськин [и др.] ; под ред. Ю.Г. Якушенкова. – М: Машиностроение, 1987. – 1480 с.
3. Борн, М. Основы оптики. / М. Борн, Э. Вольф – М: Наука, 1973. – 720 с.
4. Иоффе, Б.В. Рефрактометрические методы химии / Б.В. Иоффе. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.: Химия, 1974. – 400 с.
5. Абруков, С.А. Теневые и интерференционные методы исследования оптических неоднородностей : учебное пособие / С.А. Абруков. – Казань : Казан. ун-та, 1962. – 83 с.
6. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. IV. Оптика. — 3-е изд., стереот. / Д. В. Сивухин — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 792 с.
7. Ivanenko, A. A. Selective interference sensitive photodetector / A. A. Ivanenko, V.F. Shabanov, A.M. Sysoev, N.P. Shestakov // Proceeding on CAOL/LFNM/POEO. – Ukraine, 12-17 Septeember, 2005. – P. 275-278.
8. Пат. 2255306 Российская федерация, МКП G01B9/02, Интерферометр / Иваненко А.А., Сысоев А.М, Шестаков Н.П. – № 2002107179/28; 2002.03.20; утв. 2005.06.27, Бюл. №18
9. Shestakov, N. P. Photodetector interference field / N. P. Shestakov, A. A. Ivanenko, A. M. Sysoev // Proceedings of SPIE. – 2002. – V. 4900, Part Two – P. 1276-1289.
10. Ivanenko, A.A. New photodetector - meter of the correlation function of optical signals / A. A. Ivanenko, N. P. Shestakov, A. M. Sysoev, V. F. Shabanov // Proceeding SCI. – 2003. – V.10. – P. 124-129.

11. Пат. 2227341 Российская федерация, МКП H01J40/02, Фотоэлектронный прибор / Иваненко А.А., Шестаков Н.П., Сысоев А.М. – № 2002103994/09; 2002.02.13; утв. 2004.04.20, Бюл. №11.

12. Пат. 2224331 Российская федерация, МКП H01L31/00, Фотоприемник (варианты) / Шестаков Н.П., Иваненко А.А., Сысоев А.М. – № 2001131679/28; 2001.11.23; утв. 2004.02.20, Бюл. №5.

13. Иваненко, А.А. Интерференционно-чувствительные фотоприемники и их применение : дис. ... канд. Физ.-мат. наук : 01.04.01 / Иваненко Александр Анатольевич. - Красноярск , 2009. – 83с.

14. Ives H. Standing light waves; Repetition of an experiment by Wiener, using a photoelectric probe surface / H. Ives, T. Fry // J. of Optical Society of America. – 1933. –V. 23. – P. 73–83.

15. Bücher H. Stehende-Wellen-Interferometer zur Messung von optischen Gangunterschieden / H. Bücher // Patentschrift DE. – 1983. – 3300369. – P. 6.

16. Пат. 2241280 Российская федерация, МКП H01L31/00, Фотоприемник / Шестаков Н.П., Иваненко А.А., Сысоев А.М. – № 2002102016/28; 2002.01.21; утв. 2004.11.27, Бюл. №33.

17. Иваненко, А.А. Квадратурный двухфазный интерференционно-чувствительный фотоприемник для интерферометров встречных световых потоков / А.А. Иваненко, Н.П. Шестаков, А.М. Сысоев, В.Ф. Шабанов // Труды Всероссийской научно-технической конференции. – Красноярск, 2006. – 339. – 343с.

18. Stiebig, H. Standing-wave spectrometer / H. Stiebig, D. Knippa, E. Bunte // Applied Physics Letters. – 2006. – V. 88. – P. 083509-1 – 083509-3.

19. Мосс, Т. Полупроводниковая оптоэлектроника / Т. Мосс, Г. Баррел, Б. Эллис. – М: Мир, 1976. – 432 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Полупроводниковый лазер — твердотельный лазер, в котором в качестве рабочего вещества используется полупроводник. В таком лазере, в отличие от лазеров других типов (в том числе и других твердотельных), используются излучательные переходы не между локализованными уровнями энергии атомов, молекул и ионов, а между разрешёнными энергетическими зонами или подзонами кристалла.



ELECTRICAL/OPTICAL CHARACTERISTICS (T_c=25° C)

| Symbol | Parameter | Test conditions | Min. | Typ. | Max | Unit |
|-----------------|---------------------------------------|--------------------------|------|------|-----|-------|
| I _{th} | Threshold current | CW | - | 65 | - | mA |
| I _{op} | Operating current | CW, P _o =80mW | - | 150 | - | mA |
| V _{op} | Operating voltage | CW, P _o =80mW | - | 2.4 | 3.0 | V |
| η | Slope efficiency | CW, P _o =80mW | - | 0.95 | - | mW/mA |
| λ _p | Peak wavelength | CW, P _o =80mW | 654 | 658 | 662 | nm |
| θ _{//} | Beam divergence angle (parallel) | CW, P _o =80mW | 7 | 9.5 | 12 | ° |
| θ _⊥ | Beam divergence angle (perpendicular) | CW, P _o =80mW | 14 | 17 | 20 | ° |

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



Широкополосный спектрометр серии HR4000CG-UV-NIR оснащен составной голографической решеткой HC-1, специально разработанной фирмой Ocean Optics для эффективной работы в диапазоне 200–1100 нм. Этот спектрометр полностью сконфигурирован для Вас и готов к работе.

| Физические характеристики | |
|----------------------------------|--|
| Габаритные размеры: | 148.6 x 104.8 x 45.1 мм |
| Вес: | 570 г |
| Детектор | |
| Тип, модель: | Линейный ПЗС, Toshiba TCD1304AP |
| Количество пикселей: | 3648 |
| Размер пикселя: | 8 x 200 мкм |
| Емкость пикселя: | ~ 100 000 электронов |
| Чувствительность: | 130 фотонов/отсчет (400 нм); 60 фотонов/отсчет (600 нм) |
| Оптический модуль | |
| Оптическая схема: | f/4, асимметричная скрещенная Черни-Тернера |
| Фокусное расстояние: | 101.6 мм (входное и выходное) |

Окончание приложения Б

| | |
|------------------------------|---|
| Входная апертура: | Входная щель шириной 5 мкм |
| Дифракционная решётка: | НС-1, 300 штрих/мм |
| Фильтр OFLV: | OFLV-200-1100 |
| Усовершенствованное УФ-окно: | Да, UV4 |
| Волоконно-оптический разъём: | SMA 905 для одножильного волоконно-оптического кабеля с числовой апертурой 0.22 |

Спектроскопические характеристики

| | |
|-------------------------------|---|
| Спектральный диапазон: | 200–1050 нм |
| Оптическое разрешение: | 0.75 нм FWHM |
| Отношение сигнал/шум: | 300:1 (при полном сигнале) |
| Разрешение АЦП: | 14 разрядов |
| Темновой шум: | 12 отсчётов RMS |
| Время интегрирования: | 3.8 мс - 10 с |
| Динамический диапазон: | 2 x 10 ⁹ (системный); 1300:1 для единичного измерения |
| Рассеянное излучение: | <0.05 % (600 нм), <0.10 % (435 нм) |
| Скорректированная линейность: | > 99.8 % |

Электрические характеристики

| | |
|---------------------------|--|
| Питание: | 5 В, 450 мА |
| Скорость передачи данных: | Полный спектр передаётся с периодом 4 мс (USB 2.0) или 18 мс (USB 1.1) |
| Входы/выходы: | 10 программируемых линий цифрового ввода-вывода |
| Аналоговые каналы: | Один 13-разрядный аналоговый вход, один 9-разрядный аналоговый выход |
| Режимы синхронизации: | 4 режима |
| Функция стробирования: | есть |
| Разъём: | 30 контактов |

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Генератор сигналов специальной формы АКИП-3402



АКИП-3402

- Диапазон частот до 50 МГц для синуса и до 25 МГц для меандра
- Разрешение по частоте 1 мкГц
- Погрешность установки частоты $\pm 20 \cdot 10^{-6}$ (опция $\pm 5 \cdot 10^{-7}$)
- Формы сигнала: синусоидальный, прямоугольный, пила, треугольник, шум, постоянное смещение
- Режим формирования сигнала произвольной формы (5 видов)
- Возможность установки сопротивления нагрузки до 1 МОм
- Использование прямого цифрового синтеза
- Разрядность ЦАП 14 бит; частота дискретизации 125 МГц; память 256 тысяч точек
- Режимы АМ, ФМ, ЧМ, ИМ, ГКЧ, фазо-частотная манипуляция
- Перестраиваемое время нарастания (от 5 нс до 100 нс)
- Параллельный выход данных 16 бит
- Интерфейс USB, LAN, GPIB (КОП)
- ПО Waveratt для формирования сигналов произвольной формы
- Вход внешней опорной частоты
- Поддержка синхронной работы нескольких генераторов
- Синхро -вход и -выход

Технические данные:

| ХАРАКТЕРИСТИКИ | ПАРАМЕТРЫ | ЗНАЧЕНИЯ |
|---------------------|--|--|
| ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ | Частотный диапазон | 1 мкГц - 50 МГц (для синуса) |
| | Разрешение | 1 мкГц |
| | Погрешность установки частоты | $\pm 20 \cdot 10^{-6}$ (опционально $\pm 5 \cdot 10^{-7}$) |
| | Выходной уровень | 10 мВ...10 В пик-пик на нагрузке 50 Ом |
| СИНУСОИДА | Погрешность установки уровня на 1 кГц | $\pm(1\%+1 \text{ мВпик}) \pm 5 \cdot 10^{-7}$ (10 МГц опция 01) |
| | Неравномерность АЧХ относительно 1 кГц | 0,1 дБ при частоте менее 100 кГц, 0,15 дБ для частот от 100 кГц до 5 МГц, 0,3 дБ для частот от 5 МГц до 20 МГц, 0,5 дБ для частот от 20 до 50 МГц |
| | Кoeffициент гармоник (при уровне не более 1Впик) | ≤ -70 дБн (0,04%) до 20 кГц, < -65 дБн до 100 кГц, < -50 дБ до 1 МГц, < -40 дБн до 20 МГц, < -35 дБн до 50 МГц |
| ПОСТОЯННОЕ СМЕЩЕНИЕ | Диапазон | ± 5 В на нагрузке 50 В (пиковое значение AC+DC) |
| | Погрешность установки | $\pm(2\%$ от смещения $+0,5\%$ от амплитуды сигнала) |
| МЕАНДР | Частотный диапазон | 1 мкГц - 25 МГц |
| | Время нарастания/спада | < 10 нс |
| | Выброс | $< 2\%$ |
| | Перестраиваемая скважность | 20% - 80% (до 10 МГц), 40 - 60% (до 25 МГц) |
| | Погрешность установки скважности | $\pm 1\%$ для скважности 50% |
| | Джиттер | 200 пс |
| ПИЛА, ТРЕУГОЛЬНИК | Диапазон частот | 1 мкГц - 200 кГц |
| | Нелинейность | $< 0,1\%$ |
| | Перестраиваемая скважность | 0,0 - 100,0% |
| ИМПУЛЬС | Диапазон частот | 500 мкГц - 10 МГц |
| | Длительность импульса | От 20 нс |
| | Время нарастания/спада | < 10 нс |
| | Диапазон изменения времени нарастания | От 5 до 100 нс |
| | Диапазон изменения скважности | 0,000,000,2% - 99,999,999,8% |
| | Период повторения импульсов | От 100 нс до 2000 с |
| | Выброс | $< 2\%$ |
| | Джиттер | 200 пс |
| ШУМ | Полоса частот (белый шум) | 20 МГц (типично) |
| ПРОИЗВОЛЬНАЯ ФОРМА | Диапазон частот | 1 мкГц - 10 МГц |
| | Длина памяти | 2 - 256 тысячи точек |
| | Разрешение ЦАП | 14 бит (включая знак) |
| | Частота дискретизации | 125 МГц |
| | Память | 4 ячейки |
| | Параметры сигнала | Минимальное время нарастания 30 нс, линейность 0,1%, джиттер 6 нс |

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Пьезоэлектрический корректор микроперемещений КП - 1 обладает большим быстродействием, безинерционностью, малой потребляемой мощностью. Пьезоэлектрический корректор применяется для обеспечения прецизионного перемещения с точностью до тысячных долей мкм: в фото-, рентгено- и электролитографии для точного совмещения шаблонов в оборудовании, в медицинской технике для точной подачи инструмента, в лазерной аппаратуре для управления мощностью излучения, расходимостью пучка, в системах сканирования оптического луча в пространстве и других прецизионных устройствах.



| Параметры | Единица измерения | Значение |
|---|-------------------|-----------|
| Линейное изменение длины при положительном или отрицательном напряжении не более 250В | мкм | 5 |
| Статическая емкость, не более | мкФ | 0,05 |
| Сопротивление изоляции, не менее | МОм | 20 |
| Допустимое рабочие электрическое напряжение, не более | В | 250 |
| Рабочий диапазон частот | Гц | 5... 1000 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Осциллограф HDO4034 представляет собой очередной этап в развитии современной цифровой осциллографии с использованием передовой технологии высокой четкости. Он также имеет компактный форм-фактор, длинную память, мощные средства для отладки и локализации проблем, оснащен дисплеем с технологией multi-touch и диагональю 31 см.



| Параметр | Значения |
|--|---|
| Канал вертикального отклонения | |
| Число каналов | 4 |
| Полоса пропускания (-3 дБ) | 350 МГц |
| Время нарастания | 1 нс |
| Ограничение полосы | 20, 200 МГц |
| Коэффициент отклонения ($K_{откл.}$) | 50 Ом: 1 мВ/дел...1 В/дел 1 МОм: 1 мВ/дел...10 В/дел |
| Погрешность установки $K_{откл.}$ | $\pm 0,5 \%$ |

Продолжение приложения Д

| | |
|---|---|
| Диапазон установки смещения | 50 Ом: 1 мВ – 4,95 мВ: ± 1,6 В; 5 мВ – 9,90 мВ: ± 4 В; 10 мВ – 19,8 мВ: ± 8 мВ; 20 мВ – 1 В: ± 10 В 1 МОм: 1 мВ – 4,95 мВ: ± 1,6 В; 5 мВ – 9,90 мВ: ± 4 В; 10 мВ – 19,8 мВ: ± 8 мВ; 20 мВ – 100 мВ: ± 16 В; 102 мВ – 198 мВ: ± 80 В; 200 мВ – 1 В: ± 160 В 1,02 В – 10 В: ± 400 В |
| Входной импеданс | 1 МОм / 15 пФ или 50 Ом |
| Макс. входное напряжение | 50 Ом: 5 В ср. кв.; 1 МОм: 400 В макс. (на нагр. 1 МОм) |
| Погрешность установки смещения | ± (1 % + 0,5% от полной шкалы + 0,02% от макс. смещ. + 1 мВ) |
| Канал горизонтального отклонения | |
| Коэффициент развертки ($K_{разв.}$) | 20 пс/дел...1000 с/дел |
| Погрешность установки $K_{разв.}$ | $\leq 2,5 \times 10^{-6}$ |
| Режимы работы | Внутренняя и внешняя развертка (Y-T и X-Y) |
| Синхронизация | |
| Источники синхросигнала | Один из каналов, вход внеш. синхр., вход внеш. синхр./10, от сети |
| Режимы запуска развертки | Автоматический, ждущий, однократный |
| Стандартные виды синхронизации | Основная (фронт, длительность, ТВ), интеллектуальная (глич, рант, длительность, скорость нарастания, интервал и т.д), по шаблону, по логической последовательности, каскадная (каскадная, по качеству, по подтвержденному первому), по результатам измерений |
| Вид входа | Открытый, закрытый, ВЧ и НЧ фильтры |
| Вход внешней синхронизации | 1 МОм ($\pm 2\%$) / 15 пФ |
| Предзапуск | 0-100% от полной длины памяти |
| Послезапуск | 0-10,000 точек |
| Диапазон внутренней синхронизации | $\pm 4,1$ делений от центра |

Окончание приложения Д

| Аналого-цифровое преобразование | |
|---|--|
| Разрешение по вертикали | 12 бит (15 бит в режиме увеличения разрешения (ERES)) |
| Макс. частота дискретизации (однократный сигнал) | 2,5 ГГц |
| Эквивалентная частота дискретизации | 125 ГГц (периодический сигнал) |
| Интерполяция | Линейная, Sin X / X |
| Длина записи (стандартно) | 12,5 Мб на канал (25 Мб при объединении) |
| Длина записи (опции) | 25 Мб на канал (50 Мб при объединении) |
| Сегментированная память | До 10.000 сегментов с межсегментным временем 1 мкс |
| Режимы сбора данных | Выборка, пик. детектор (> 1 нс); усреднение (2 / ... / 512); накопление; однократный запуск |
| Автоматические измерения | |
| Количество параметров | 30 измерений |
| Режим отображения | До 8 измерений одновременно с отображением статистики и гистограмм |
| Математика | Более 25 стандартных функций, включая БПФ (возможность отображение до 2-х графиков математики, объединение 2-х операторов) |
| Дополнительные возможности | |
| Интерфейсы | Ethernet-10/100BaseT (2), USB (6), USBTMC, RS-232, SVGA, DVI, HDMI; Опции: GPIB |
| Расширенный запуск развертки | Выбросы, импульсы, огибающая, логические условия |
| Декодирование сигналов низкоскоростных шин данных | Опция синхронизации и декодирования сигналов шин USB2, DigRF V4, ARINC 429, I2C, SPI, UART, RS232, CAN, FlexRay, LIN, MIL-STD-1553, AudioBus, DigRF 3G, MIPI D-PHY CSI-2 |
| Режим WaveScan | Поиск аномалий по захваченному сигналу – 20 параметров сигнала |
| Общие данные | |
| ЖК-дисплей | TFT сенсорный экран 31 см с технологией multi-touch, (WXGA), разрешение 1280 x 800 |

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт инженерной физики и радиоэлектроники
Базовая кафедра фотоники и лазерных технологий

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий баз.каф. ФилЛТ

 А.Н. Втюрин

« » 2020 г.

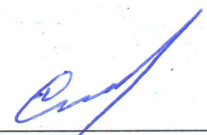
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**Измерение показателя преломления оптически прозрачных
материалов с помощью «однозеркального» интерферометра**

16.04.01 Техническая физика

16.04.01.02 Оптическая физика и квантовая электроника

Научный руководитель



профессор,
д-р физ.-мат. наук

В.В. Слабко

Консультант



науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук

А.А. Иваненко

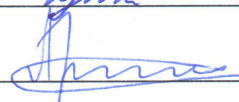
Выпускник



ст. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук

Н.А. Губич

Рецензент



А.С. Крылов

Красноярск 2020