

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 681.787, 681.5

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ТЕРАГЕРЦЕВОГО
ПЛАЗМОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА ДЛЯ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА НОВОСИБИРСКОМ ЛАЗЕРЕ НА СВОБОДНЫХ
ЭЛЕКТРОНАХ**

©2025 г. С. Е. Краснопевцев^{a,b,*}, В. В. Герасимов^{a,b}

*^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения
Российской академии наук*

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Новосибирский государственный университет

Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

**e-mail: k.s.e@nsu.ru*

Поступила в редакцию 23.04.2025 г.

После доработки 06.08.2025 г.

Принята к публикации 13.08.2025 г.

Разработана система автоматизации исследований по амплитудному сканированию пространственной интерференционной картины на динамическом плазмонном интерферометре Майкельсона для экспериментов на терагерцевом излучении Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ). Задачами системы являются автоматизация исследований, включающая управление группой оптических позиционеров с одновременным получением сигналов от фотоэлектрических приемников, сбор и сохранение информации с итоговой постобработкой полученных данных. Управляющим ядром системы является персональный компьютер с программным обеспечением на языке Python. Оцифровка оптических сигналов, обработанных синхронными детекторами, осуществляется разработанным двухканальным аналого-цифровым преобразователем. Система обеспечивает автоматизированное сохранение необходимых данных в формате Excel для дальнейшей постобработки. Тестирование комплекса по измерению характеристик поверхностных плазмон-поляритонов на длине волны НЛСЭ, равной 141 мкм, показало хорошее согласие с данными, полученными ранее без применения данного комплекса.

1. ВВЕДЕНИЕ

Примерно с конца 80-х годов ведется интенсивное освоение терагерцевого (ТГц) диапазона электромагнитных волн – от 0.1 до 10 ТГц (что соответствует длинам волн от 30 мкм до 3 мм) [1], которое сопровождается разработкой в данном диапазоне источников, детекторов,

квазиоптических элементов, методов измерений, устройств и др. [2]. Особый интерес представляет сейчас применение ТГц-волн для создания систем связи шестого поколения [3] в радиоастрономии, досмотровых системах, биомедицинской диагностике и материаловедении [4].

Во многих фундаментальных и прикладных задачах требуется измерять как спектры излучения самих источников, так и спектры от взаимодействия с исследуемым веществом. Важными характеристиками спектральных измерений являются чувствительность, точность, быстродействие, динамический диапазон, требования к которым зависят от конкретной задачи. Среди задач ТГц-спектроскопии важное место занимает исследование поверхностей и тонких пленок. Для проводящих поверхностей или тонких диэлектрических пленок могут использоваться классические подходы, такие как отражательно-абсорбционная спектроскопия [5] или эллипсометрия [6, 7]. Однако из-за большой длины ТГц-волны по сравнению с толщиной слоя данные методы обладают невысокой чувствительностью. Использование поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) – разновидности поверхностных электромагнитных волн, генерируемых зондирующим излучением на поверхности проводников (чаще металлов), – позволяет повысить чувствительность измерений вследствие увеличения длины взаимодействия излучения со слоем и концентрации его поля в приповерхностной области [8]. ППП представляют собой комплекс p -поляризованной поверхностной электромагнитной волны, распространяющейся вдоль границы раздела проводник–диэлектрик, и волны плотности электронов проводимости в приповерхностном слое проводника [9]. Поле поверхностной волны экспоненциально затухает с увеличением расстояния от границы раздела сред.

Было показано, что в ТГц-диапазоне частот для измерения оптических констант металлических и углеродсодержащих поверхностей, а также нанесенных на них тонких диэлектрических пленок, наиболее подходящим методом является динамическая плазменная интерферометрия с использованием схемы Майкельсона [10–12]. Выбор динамической схемы обусловлен требованием высокой точности измерений [13], отсутствием необходимости использования дорогих и малочувствительных ТГц-матричных детекторов, а также невозможностью реализовать статические методы из-за присутствия в оптических плазменных схемах интенсивных засветок от паразитных объемных волн. Паразитные волны возникают как на оптических элементах схемы, так и в результате радиационных потерь ППП на шероховатостях и других оптических неоднородностях проводящей поверхности [14, 15]. В свою очередь, интерферометрия в пучках ППП позволяет объединить возможности амплитудных и фазовых измерений с целью определения комплексного показателя преломления ППП $\tilde{n}_s = n_s + ik_s$, однозначно связанного посредством дисперсионного уравнения с эффективной

диэлектрической проницаемостью металлической поверхности и оптическими константами нанесенных на металл диэлектрических покрытий [8, 9].

Вследствие высокой проводимости благородных металлов в ТГц-диапазоне частот (по сравнению с видимым или ИК-диапазонами) [16], действительная часть показателя преломления ППП n_s отличается от показателя преломления объемной волны в воздухе на величину порядка 10^{-4} [10], что накладывает высокие требования к точности измерений амплитудных спектров. Эта проблема становится еще более острой, если учитывать спектральную или амплитудную нестабильность используемых источников ТГц-излучения класса MegaScience (что вызвано сложностью их устройства и большим количеством компонент), таких как НЛСЭ [17]. Для решения данной задачи, помимо высокой точности юстировки оптической схемы интерферометра, требуются автоматизированное управление и синхронный сбор данных интерференционной картины с приемлемыми скоростью и точностью (с возможностью набора статистики), а в случае необходимости контроля спектра излучения самого источника – использование второго динамического интерферометра объемных волн [13]. Эти требования накладывают ограничения не только на программный комплекс управления интерферометром, но и на его аппаратную часть (детекторы, оптические элементы и др.)

В настоящей работе будут представлены результаты по разработке и тестированию программно-аппаратного комплекса для управления динамическим плазмонным интерферометром Майкельсона, сбора и быстрого анализа получаемых на нем экспериментальных данных. Программная часть создавалась на языке Python. В тестовых экспериментах в качестве источников излучения использовались диодный лазер с длиной волны 655 нм и НЛСЭ (длина волны 141 мкм). Экспериментальными образцами для плазмонной рефрактометрии служили золотые пленки с диэлектрическим покрытием из сульфида цинка субмикронной толщины, нанесенные на плоские полированные стеклянные подложки. Достоинствами любой программы управления экспериментом являются ее надежность, простота, гибкость и адаптивность к другим экспериментальным задачам, возможность ее использования на современном и доступном оборудовании (персональный компьютер) с универсальными операционными системами, удобство в эксплуатации. Поэтому в рамках настоящей работы перед авторами стояла задача создать не только программу для автоматизации экспериментов на рассматриваемой установке, но и некоторый гибкий универсальный программный комплекс, который можно было бы в будущем легко адаптировать под разные исследовательские и прикладные задачи подобного класса, в том числе для различных экспериментов на пользовательских станциях НЛСЭ.

2. ПЛАЗМОННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР МАЙКЕЛЬСОНА

Общая схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Подробное описание плазмонного интерферометра и его характеристики можно найти в работе [13]. В настоящей работе мы рассмотрим лишь основной принцип метода регистрации интерферограмм и приведем основные элементы, важные с точки зрения автоматизации установки.

Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В основе функционирования ТГц-ППП-интерферометра, как и классического интерферометра Майкельсона, лежит анализ интерферограммы, но формируемой не объемными волнами, а коллинеарными пучками ППП, направляемых исследуемой поверхностью [18]. Определение действительной части показателя преломления ППП (n_s) осуществляется путем сравнения спектра излучения ЛСЭ со спектром ППП, получаемых в результате фурье-анализа интерферограмм. Мнимая часть (κ_s) определяется величиной затухания интенсивности ППП по мере их распространения по исследуемой поверхности.

В качестве источника ТГц-излучения использовался НЛСЭ [19], являющийся на сегодняшний день одним из самых мощных в области частот более 1 ТГц [20]. Излучение НЛСЭ представляет собой периодическую последовательность импульсов длительностью 100 пс, следующих с частотой 5.6 МГц. Данное излучение линейно поляризовано, полностью когерентно в поперечном сечении пучка, временная когерентность составляет 30–100 пс (в зависимости от длины волны и режима работы лазера). Характерная средняя мощность излучения, поступающего на вход интерферометра, составляла порядка 10 Вт, диаметр гауссова пучка равен 12 мм. Рабочая длина волны излучения λ была выбрана равной 141 мкм с шириной линии порядка 1%.

Поскольку в штатном режиме работы НЛСЭ спектр его излучения нестабилен (длина волны в процессе измерений может смещаться до 0.2 мкм), с целью учета его вариаций одновременно с плазмонной интерферограммой регистрировалась и интерферограмма, формируемая пучками излучения НЛСЭ. Для этого к схеме плазмонного интерферометра [21] был добавлен интерферометр Майкельсона объемных волн (ОВ) (рис. 1).

Из пучка излучения НЛСЭ, поступающего на вход установки, с помощью литографического поляризатора P_1 выделялась p -компонента, соответствующая поляризации ППП. Линейно-поляризованное излучение разделялось пленочным полипропиленовым делителем BS_1 толщиной 30 мкм на два пучка. Отраженный пучок, интенсивность которого регулировалась поляризатором P_2 , направлялся зеркалом M_5 на интерферометр ОВ, а прошедший пучок фокусировался цилиндрическим зеркалом CL (с фокусным расстоянием 75 мм) на верхнее

ребро торца плоской подложки образца, где вследствие дифракции излучение преобразовывалось в ППП [22].

В плазмонном интерферометре использовались неподвижное M_1 и подвижное M_2 зеркала с золотым покрытием отражающих граней и защитным слоем ZnS, а в качестве делителя – плоскопараллельная пластинка BS_2 из полиимидного материала Zeonex (TYDEX, Россия) [23], ориентированная под углом 45° к падающему пучку ППП. Нижние грани зеркал и делителя были оптически полированы и плотно прилегали к подложке, обеспечивая оптический контакт с ее поверхностью. Достоинством таких зеркал является то, что такие элементы можно свободно переставлять и фиксировать при перестройке интерферометра.

На выходе из плазмонного интерферометра совмещенные пучки ППП из обоих плеч переходили на выпуклую поверхность примыкавшего к боковой грани подложки цилиндрического элемента преобразования ППП в ОВ, и на его конце за счет дифракции преобразовывались в ОВ, регистрируемые фотоэлектрическим приемником (ФЭП) излучения. Элемент представлял собой $1/8$ часть цилиндра с радиусом кривизны 60 мм, выпуклая поверхность которого содержала слой золота толщиной 300 нм, покрытый слоем ZnS толщиной 1.0 мкм. Цилиндрический элемент служил для пространственного разделения ОВ, порожденных ППП, и паразитных ОВ, возникающих на оптических элементах плазмонного интерферометра, а также радиационных потерь ППП [14]. Дополнительным пространственным фильтром паразитных ОВ служила прямоугольная щель высотой проема 1 мм из поролона, размещенная на образце в месте его контакта с выходным элементом преобразования.

Детектирование интерферирующих ОВ, порождаемых пучками ППП, осуществлялось модифицированным однопиксельным пироэлектрическим приемником ($NEP \approx 1.9 \cdot 10^{-9}$ Вт/Гц^{1/2}) МГ-32 (НЗПП “Восток”, Россия) [24, 25], обладающим большим быстродействием (время отклика в зависимости от режима работ составляло от десятков микросекунд до десятков миллисекунд, см. разд. 5). На входном окне приемника вместо стандартного германиевого окна (приводившего к большим потерям энергии за счет отражения [26]) была установлена собирающая линза из полипропилена диаметром 10 мм, которая собирала всю падающую на приемник мощность на пироэлектрическом кристалле размером 1×1 мм².

В интерферометре ОВ использовались аналогичный детектор, зеркала M_3 и M_4 , а также делитель BS_3 из Zeonex толщиной 2 мм.

Поскольку использовавшиеся пироэлектрические приемники могут регистрировать только изменяющийся во времени поток излучения, на входе установки размещался механический обтюратор, модулировавший интенсивность излучения с частотой 109 Гц. Сигналы с каждого приемника регистрировались двумя синхронными детекторами SR-830 (Stanford Research, США)

при постоянной времени интегрирования 3 мс, с выходов которых они поступали либо на двухканальный цифровой осциллограф (Handyscope 3, TiePie engineering, Нидерланды), функционирующий в режиме самописца, либо на двухканальный АЦП. Оцифрованные сигналы записывались в файл.

Подвижные зеркала M_2 и M_4 крепились к платформам оптических позиционеров Standa, (Литва), либо более точных позиционеров Newport (Франция), которые смещали зеркала в процессе сканирования вдоль оси x . При работе с ТГц-излучением лазера на свободных электронах скорость сканирования была выбрана максимально возможной (250 мкм/с), при которой детекторы при выбранной частоте модуляции успевали корректно прописывать регистрируемые сигналы. Время записи одной пары интерферограмм, соответствующих смещению подвижных зеркал на 30 мм, составляло около 2 минут.

2.1. Программно-аппаратный комплекс

Для управления экспериментальным стендом, представленным в предыдущем разделе, был разработан программный комплекс, управляющий с помощью персонального компьютера функциональными блоками установки: оптическими позиционерами; аналого-цифровыми преобразователями, принимающими данные с фотоэлектрических приемников; синхронными детекторами. Блок-схема программного и аппаратного комплексов приведена на рис. 2.

Рис. 2. Блок-схема программно-аппаратного комплекса

Персональный компьютер управляет перемещением кареток оптических позиционеров, на которых закреплялись зеркала двух интерферометров – плазмонного интерферометра и интерферометра объемных волн. В результате перемещения зеркал на выходе интерферометров наблюдается периодическое изменение интенсивности за счет интерференции. Данное изменение интенсивности вызвано меняющейся разностью оптических путей, а следовательно, и изменением относительной фазы двух пучков каждого интерферометра. Эти изменения интенсивности дискретно считываются ФЭП. Полученные сигналы передаются далее в синхронные детекторы для фильтрации шума и сигналов постоянной паразитной засветки. Очищенные сигналы поступают на двухканальный аналого-цифровой преобразователь, который далее передает информацию по USB-порту в компьютер. Управляющим ядром комплекса является программное обеспечение (далее программа) на языке Python, работающее на персональном компьютере. По окончании эксперимента программа создает таблицу Excel, содержащую строки данных, сформированные в хронологической последовательности. Столбцы содержат, в том числе, следующие данные: значение времени в миллисекундах с момента начала

сбора данных, мгновенные значения сигналов интенсивности ФЭП и связанные с ними мгновенные значения координат всех позиционеров.

2.2. Управление позиционерами

Программа автоматически обнаруживает подключенные контроллеры позиционеров Standa 8SMC4-USB-B9-2 и Newport ESP-30x и число подключенных к ним позиционеров. Для каждого обнаруженного позиционера в окне программы создается собственная панель управления, содержащая все необходимые элементы управления и контроля (рис. 3). Для использования каждого канала позиционера его необходимо предварительно включить, для чего служит соответствующая экранная кнопка.

Рис. 3. Вид окон управления позиционерами для включенного и отключенного каналов ...

Контроллеры управления Standa 8SMC4 предусматривают отдельные значения для шагов и для микрошагов шагового двигателя (ШД). Микрошаги, в свою очередь, задаются, исходя из выбранного режима. Эта особенность отражается при указании всех координат и скоростей позиционеров этого типа.

Для каждого позиционера Standa индивидуально задаются такие параметры, как напряжение импульсов, подаваемых на ШД, максимальный ток ШД, количество шагов на один полный оборот вала ШД, величины ускорений разгона и торможения, включение/отключение использования концевых датчиков и полярность сигнала для каждого из них. Также задаются скорость перемещения каждого позиционера и режим использования микрошагового движения.

Предусмотрены возможности как приблизительного ручного, так и точного абсолютного и относительного координатных перемещений каждого позиционера. Интерфейс управляющей программы предусматривает две кнопки для ручного перемещения позиционера в пространстве значений координат "больше-меньше", позволяющие перемещать позиционер, пока пользователь удерживает нажатой кнопку соответствующего направления. Кроме этого, имеются две кнопки для перемещения позиционера в обе стороны точно на заданное число шагов. Дополнительно предусмотрена возможность использования относительных перемещений в пространстве "право-лево" с выбором одной из двух возможных ориентаций.

Для реализации автоматического координатного перемещения целесообразно пользоваться двумя значениями координат с условными обозначениями "А" и "В". Эти значения задаются в специальных редактируемых полях на экране. Чтобы воспользоваться этими значениями для управления позиционером, добавлены две кнопки: "Перемещение в точку А" и "Перемещение в точку В", а также "Циклическое перемещение" для перемещения из "А" в "В" и затем обратно необходимое число раз.

Перемещение до указанной координаты предусматривается как непрерывное равномерное, так и прерывистое (дискретное). Прерывистое перемещение задается дистанцией перемещения в количестве шагов и временем покоя после этого. Дополнительно предусмотрены кнопки для сохранения на диске и восстановления всех настроек каждого позиционера.

Как упоминалось выше, чтобы контролировать характеристики опорного пучка, синхронно со сканированием интерференционной картины плазмонного интерферометра необходимо проводить сканирование еще и интерферометра объемных волн. Для реализации одновременного перемещения зеркал обоих позиционеров программа управления предусматривает режим синхронного управления “ведущий-ведомый”. Для реализации такого режима в окно позиционера добавлен выпадающий список доступных других позиционеров, чтобы можно было выбрать второй позиционер в качестве ведомого для режима синхронного перемещения, а также кнопку включения/выключения режима синхронного управления с выбранным позиционером. Дополнительно предусмотрена кнопка для передачи настроек ведущего позиционера в ведомый позиционер.

2.3. Фотоэлектрические приемники излучения

Получение информации об интенсивности пучка ТГц-излучения осуществляется пироэлектрическим детектором МГ-32, выпускаемым Новосибирским заводом полупроводниковых приборов “Восток”. Чтобы понизить потери энергии на входном германиевом окне детектора и увеличить эффективность сбора энергии пучка НЛСЭ, данное окно было заменено на полипропиленовую линзу диаметром 10 мм, которая фокусирует падающий поток излучения на пироэлектрический кристалл размером $1 \times 1 \text{ мм}^2$ внутри детектора. Электронная схема датчика ФЭП на базе коммерческого детектора МГ-32 была дополнена возможностью изменения постоянной времени, которая определяет баланс между чувствительностью и быстродействием датчика. В целях минимизации помех в выходном сигнале электропитание схемы (+12 В / -12 В) обеспечивается элементами постоянного электропитания типа CR2032 в количестве 8 штук. Схема оптического приемника приведена на рис. 4.

Рис. 4. Схема электрическая принципиальная датчика ФЭП...

Как видно, датчик ФЭП реализован в виде двух блоков, которые соединены экранированным кабелем длиной около 1.2 м. Внешний вид датчика приведен на рис. 5.

Рис. 5. Электронный блок (а) и приемный модуль детектора МГ-32 (б)

Для вывода выходного сигнала на электронном блоке имеется разъем стандарта BNC, позволяющий подключить его к синхронному детектору через стандартный коаксиальный

кабель. Переключатель на верхней панели электронного блока позволяет подобрать оптимальное время усреднения излучения и одновременно амплитуду выходного сигнала.

Такой детектор ТГц-излучения получился недорогим, с приемлемым соотношением быстродействия и чувствительности, экономичным и компактным.

3. НАСТРОЙКА СИНХРОННОГО ДЕТЕКТОРА

Чтобы наладить работу каждого синхронного детектора, необходимо предварительно правильно его настроить, задав режим синхронизации, выбрать режим автоподстройки фазы относительно синхросигнала контроллера обтюратора, источник входного сигнала, вид электрической связи с "землей", чувствительность, степень усиления сигнала, постоянную времени, направление вывода выходного сигнала, его смещение. Учитывая такое количество настроек синхронного детектора, их удобно задавать на экране управляющей программы (рис. 3), а потом разом передавать в синхронный детектор нажатием кнопки. Такая возможность поддерживается используемым синхронным детектором. Для этого его необходимо подключить к компьютеру и через появившийся коммуникационный порт (СОМ-порт) настроить каждый из параметров нужным образом. Для этого программа имеет отдельную панель настроек для каждого подключенного синхронного детектора.

Кроме этого, программа предусматривает сохранение всех настроек в файл, а также загрузку настроек из файла в синхронный детектор. Это дает возможность воспроизводить эксперимент с точным соблюдением режима обработки сигнала синхронным детектором.

После правильной настройки синхронного детектора он формирует очищенный и усиленный выходной сигнал, который передается далее в конвертер АЦП.

4. КОНВЕРТЕР АЦП

Оцифровка сигналов, принимаемых от синхронных детекторов, производится разработанным двухканальным аналого-цифровым преобразователем с разрешением 10 бит. Блок АЦП был построен на базе микроконтроллера STM32F103C8T6 швейцарской компании STMicroelectronics, представленного отладочной платой "BluePill" [27]. Поскольку эта плата не оснащена микросхемой, реализующей интерфейс USB, необходимый для взаимодействия с компьютером, для этой цели использовался дополнительный модуль в виде платы Arduino NANO. Сигнальные линии приема и передачи (RxD и TxD) интерфейса UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) микроконтроллера STM32F103C8T6 были подключены к соответствующим клеммам платы Arduino NANO [28], которые соединены непосредственно с контактами микросхемы FT232RL, реализующей на плате Arduino NANO интерфейс USB.

Выходной контакт передачи данных TxD контроллера Arduino NANO был предварительно запрограммирован на перевод в высокоимпедансное состояние, чтобы предотвратить конфликт сигналов при передаче данных. Схема конвертера приведена на рис. 6.

Рис. 6. Схема и внешний вид конвертера АЦП...

Питание обеих плат контроллеров конвертер получает от разъема USB компьютера. Контакты разъема micro-USB на корпусе конвертера распаяны короткими проводами прямо на клеммы разъема платы Arduino NANO (в правом верхнем углу рис. 6).

Подключение конвертера АЦП к компьютеру осуществляется через модуль конвертера интерфейсов USB-COM китайского производства (предназначен для взаимного преобразования сигналов интерфейса USB и сигналов COM-порта последовательного интерфейса RS-232). После подключения операционная система создает виртуальный COM-порт и присваивает ему порядковый номер. Программа на компьютере позволяет выбрать для подключения любой порт из всех доступных в системе в данный момент. Программа может анализировать два внутренних идентификатора COM-порта – идентификатор производителя и идентификатор устройства. Анализ этих идентификаторов позволяет определить среди всех доступных портов тот, который соответствует именно контроллеру Arduino NANO. На панели управления имеется специальный переключатель “Фильтр” (рис. 3), который позволяет отфильтровать список доступных портов, оставив только те, которые соответствуют устройству Arduino NANO. Вероятнее всего, это окажется конвертер АЦП.

Управляющая программа конвертера (микроконтроллера STM32F103C8T6) написана на языке C++ и загружена в его внутреннюю энергонезависимую память. Сразу после подачи питания эта программа проводит настройку всех задействованных ресурсов микроконтроллера. Прежде всего, это встроенный 10-битовый аналого-цифровой преобразователь. Также настраивается таймер, по прерываниям которого вызывается функция-обработчик, инициирующая аналого-цифровое преобразование сигналов с входных клемм. После получения значений АЦП эта функция передает их в коммуникационный порт в виде информационного пакета на скорости 115200 бит/с (максимальная доступная скорость). Период срабатывания таймера (период дискретизации данных АЦП) может быть задан при помощи специальной команды со стороны компьютера. Всего предусмотрена обработка нескольких управляющих команд от управляющей программы на компьютере:

- установка периода срабатывания таймера в миллисекундах (период дискретизации),
- установка количества входных сигналов, подлежащих оцифровке (1 или 2),
- включение/отключение передачи данных,

– включение/отключение передачи счетчика внутренней тактовой частоты контроллера, работающего с периодом 10 мкс, что позволяет программе управления использовать ее в качестве более точной относительной шкалы времени, чем системные часы операционной системы,

– сброс счетчика счетчика внутренней тактовой частоты.

Все передаваемые конвертером АЦП значения отправляются в символьном виде, т.е. преобразуются в строки цифр (символы ASCII). Это связано с особенностями коммуникационного протокола передачи UART. Управляющая программа на компьютере преобразует принимаемый поток строк обратно в набор чисел и дальше использует их в соответствии со своим алгоритмом.

5. ПЕРЕДАЧА СИГНАЛОВ ИНТЕНСИВНОСТИ ФЭП ПРОГРАММЕ УПРАВЛЕНИЯ

Управляющая программа содержит отдельную панель управления для взаимодействия с конвертером АЦП.

Конвертер самостоятельно производит периодическое аналого-цифровое преобразование сигналов. Периодичность такого преобразования задается ему командой от управляющей программы при нажатии экранной кнопки подключения к конвертеру АЦП. Специальное поле ввода в окне программы (рис. 3) позволяет задавать произвольное значение периода выборки данных, и это значение немедленно передается в конвертер. Рядом с этим полем на экране отображается фактическое значение периода поступающих от конвертера АЦП данных.

Необходимо отметить, что минимальный период выборки данных, который определяет максимальную частоту дискретизации исследования, очень сильно зависит от особенностей используемого персонального компьютера – как от его аппаратного обеспечения, так и от программной конфигурации, в частности, от операционной системы и установленных прикладных и системных программ. Опыт тестирования в этом отношении показал, что минимальный достигнутый период, обеспечивающий отработку стабильного значения периода дискретизации, составил 13 мс. Лабораторный компьютер показал лишь значение 30 мс. Причины такого разброса не исследовались.

Для предварительной настройки интерферометров перед началом эксперимента необходимо иметь возможность отображать сигналы ФЭП в виде осциллограммы. Предусмотрены графические переключатели для включения/отключения каждого из сигналов.

Началом эксперимента является включение записи данных АЦП и запуск движения задействованных позиционером. Над кнопкой записи появляются индикаторы, отображающие число собранных порций данных и время, прошедшее с начала их записи.

Для удобства наблюдения за ходом эксперимента добавлена возможность открытия отдельного дополнительного окна произвольного размера и положения, отображающего ту же осциллограмму сигналов.

6. МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

В процессе настройки оптической схемы перед проведением эксперимента часто встают вопросы точной юстировки оптических элементов. Для некоторых настроек бывает целесообразно применять нестандартные приспособления. Ниже приводятся два таких примера.

На выходе из плазмонного интерферометра ППП дифрагируются на краю поверхности, высвечиваясь в виде обыкновенной объемной электромагнитной волны. Для пространственного отделения сигнала дифрагированных ППП от объемного излучения паразитных волн используется выпуклая поверхность $1/8$ цилиндра (рис. 1). Из-за того, что ППП испытывают затухание в процессе распространения в плазмонном интерферометре, а также из-за потерь при движении по цилиндрической поверхности (в сумме это до 90% всех потерь), высвечивающаяся на крае цилиндра исследуемая объемная электромагнитная волна может иметь очень слабую интенсивность. В связи с этим большую важность имеет задача точной юстировки входного окна пироэлектрического детектора, т. е. выбор его положения и наклона.

Для облегчения этой задачи спроектирован и изготовлен кронштейн-трансформер из дюралюминия на базе стандартного стержневого держателя Standa с дополнительной площадкой для крепления оборудования и магнитной подошвой для простой и быстрой установки на металлическую поверхность оптического стола (рис. 7а). Магнитное крепление позволяет легко, точно и достаточно надежно выставлять положение кронштейна на оптическом столе, не прибегая к зажиму болтами. Конструкция обеспечивает четыре степени свободы.

Рис. 7. а – Универсальный кронштейн для юстировки пироэлектрического детектора ...

Второй прием, который тоже хорошо себя зарекомендовал, это способ зажима стационарного зеркала плазмонного интерферометра. Как отмечалось в разд. 2, стационарное зеркало должно иметь оптический контакт с поверхностью исследуемого образца, т.е. требуется надежный и плотный прижим. Встает вопрос выбора способа прижима зеркала к пластине образца, позволяющего легко проводить тонкую настройку интерферометра и надежную последующую фиксацию зеркала. Ранее для фиксации использовалась струбцина, которая позволяла ослабить прижим, юстировать зеркало, а затем снова затянуть прижим. Однако затяжка струбцины почти всегда нарушала полученную юстировку и делала данный процесс трудоемким.

Для решения этого вопроса был изготовлен специальный упругий зажим. За основу был взят офисный зажим для бумаг с двумя откидывающимися проволочными лапками. Одна из губок зажима была отпилена бормашиной с алмазным диском. На торцевой стороне близ линии отреза бурами с алмазным покрытием проточены два отверстия под винты М3. К этим отверстиям прикручены два комплементарно ориентированных угловых алюминиевых профиля той же ширины, что и зажим (рис. 7б, в). Вся суть обработки зажима свелась к тому, чтобы увеличить его несжимаемую зону путем замены губки и лапки на одной из его сторон. Слегка сжимая лапки зажима одной рукой, второй можно аккуратно юстировать зеркало. В нужный момент остается ослабить лапки, и зеркало остается надежно зафиксированным без каких-либо наведенных смещений.

7. ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА

Функция программно-аппаратного комплекса заключается в основном в настройке и управлении оптическими позиционерами и детекторами интерферометров Майкельсона, сбором и анализом экспериментальных данных. Поэтому для тестирования программно-аппаратной части не обязательно генерировать поверхностные плазмон-поляритоны, достаточно было проверить ее работу в режиме объемных волн (классический интерферометр Майкельсона). Вначале эксперименты проводились с использованием компактного диодного лазера CPS635R (THORLABS, Германия) с длиной волны 637 нм. Это позволило не использовать большую установку НЛСЭ, требующую больших ресурсов для работы, а с помощью видимого излучения упростить процедуру юстировки. К тому же диодный лазер имеет гораздо большую (чем НЛСЭ) длину когерентности, что позволило накопить большой массив данных для повышения точности измерения спектра. На втором этапе для тестирования установки использовалось ТГц-излучение НЛСЭ с длиной волны 141 мкм, и измерения проходили как с объемными волнами, так и с генерацией ППП. Для того чтобы оценить качество получаемых интерферограмм и спектров, которые напрямую связаны со скоростью и точностью сбора данных через конвертер АЦП, запись сигналов с синхронного детектора также проводилась с помощью 12-битового цифрового осциллографа HandyScope 3 (TiePie engineering, Нидерланды) с частотой дискретизации 0.5 мс.

8. ТЕСТИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ДИОДНОГО ЛАЗЕРА НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 637 НМ

Длина волны диодного лазера $\lambda = 637$ нм в несколько раз меньше шага используемых позиционеров фирмы Standa $\Delta = 2.5$ мкм. Поэтому смещение позиционеров проводилось в режиме микрошагов со скоростью 586 нм/с. На рис. 8а представлены интерферограммы сигналов с детектора, записанные с помощью конвертера АЦП и цифрового осциллографа.

Рис. 8. а – Осциллограммы, измеренные на интерферометре объемных волн с помощью программного комплекса...

Для записи сигналов с помощью конвертера АЦП было подобрано минимальное время сбора данных $dT = 30$ мс, при котором данные конвертера успевают приниматься компьютером. Видимых различий между осциллограммами не наблюдались. На рис. 8б показана гистограмма выборки шага по времени (период дискретизации) за одно сканирование интерферограммы, заданного в программе управления. Наблюдается небольшое отличие фактического времени dT от заданного примерно на 0.3 мс (1%), что может быть связано с появлением небольшого перекрытия циклов обработки данных при выбранном периоде передачи на данном компьютере. При этом дисперсия этого значения очень мала, 0.003 мс (примерно $10^{-4}dT$), что является достоинством выбранной программной архитектуры автоматизированной системы. Наличие смещения фактического значения dT от заданного никак не отражается на точности определения спектра, так как спектр строится по фактическим значениям, а дисперсия может только немного уширить получаемую линию спектра. С помощью дискретного преобразования Фурье в модуле постобработки от измеренных осциллограмм были найдены спектры излучения, которые показаны на рис. 9. После аппроксимации гауссовой функцией по центральной линии была найдена длина волны излучения, которая составила 662 нм с шириной спектра на полувысоте 100 нм для измерений с помощью программного комплекса, 656 нм с шириной 140 нм для измерений с помощью быстрого осциллографа. Как видно, в пределах погрешности измерений длины волн, измеренные обоими способами, совпали и согласуются с паспортными данными диодного лазера.

Рис. 9. Спектры красного лазера, полученные численным фурье-преобразованием из осциллограмм на рис. 8а.

9. ТЕСТИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ТГЦ-ИЗЛУЧЕНИЯ НЛСЭ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 141 МКМ

Для тестирования плазмонного интерферометра была выбрана длина волны излучения НЛСЭ $\lambda \approx 141$ мкм, что почти на два порядка меньше величины шага позиционера интерферометра (2.5 мкм). Поэтому запись интерферограмм проводилась в режиме шагового смещения позиционера со скоростью 100 шагов/с (или 250 мкм/с). При этой скорости детекторы успевают корректно зарегистрировать и передать через синхронный усилитель сигнал в АЦП, а потом в СОМ-порт компьютера. На рис. 10 представлены интерферограммы, измеренные на плазмонном интерферометре и интерферометре объемных волн (см. рис. 1) с использованием конвертера АЦП и цифрового осциллографа. Видно, что контраст интерференционных картин по Максвеллу близок к единице в центре интерферограммы, а к концам уменьшается до нуля.

Ограниченный диапазон контраста соответствует длине когерентности лазерного излучения (примерно 30 мм). По данным интерферограммам были восстановлены спектры, которые показаны на рис. 11. Спектры ППП смещены относительно спектров ОВ в стороны меньших длин волн, что соответствует меньшей фазовой скорости ППП по сравнению с фазовой скоростью ОВ. Стоит отметить, что в течение 30–40 мин, когда проводились измерения спектров, длина волны излучения смещалась в области 0.02 мкм, что соответствует величине $10^{-4} \lambda$. Данное смещение определяется временной стабильностью спектра генерации НЛСЭ.

Рис. 10. Осциллограммы, измеренные на плазмонном интерферометре и интерферометре объемных волн ...

Рис. 11. Спектры ППП и ОВ, найденные численным фурье-преобразованием из осциллограмм...

Действительную часть показателя преломления ППП n_s можно найти как отношение центральных линий гауссовой аппроксимации спектров объемных волн (λ) и ППП (λ_s) [13]:

$$n_s = \frac{\lambda}{\lambda_s}. \quad (1)$$

Полученные значения n_s усреднялись по серии из 4–6 одинаковых измерений.

Для определения мнимой части показателя преломления ППП κ_s неподвижное плечо плазмонного интерферометра перекрывалось порононовым рассеивателем (рис. 1) и измерялось затухание сигнала ППП по мере смещения зеркала M_2 . Графики зависимостей сигнала от смещения зеркала (скорость смещения составляла 1 мм/с) представлены на рис. 12.

Рис. 12. Графики затухания сигнала ППП в зависимости от смещения зеркала M_2

Аппроксимируя данные зависимости экспоненциальной функцией, мы находили длину распространения ППП L_s (расстояние, при котором сигнал ППП уменьшался в $e \approx 2.718$ раз). После усреднения по серии из 4–6 измерений находилось среднее значение L_s , по которому рассчитывалась мнимая часть показателя преломления ППП:

$$\kappa_s = \frac{\lambda}{4\pi L_s}. \quad (2)$$

Результаты для n_s и κ_s представлены в табл. 1. Видно, что данные величины, полученные с помощью программного комплекса и цифрового осциллографа, в пределах погрешности практически совпадают и согласуются с результатами из наших более ранних работ [10], что говорит о достоверности данных, полученных в эксперименте с использованием программного комплекса. Можно заметить, что погрешность найденного значения n_s составила примерно 10^{-4} , что соответствует временной стабильности спектра излучения НЛСЭ, указанной выше. На точность определения n_s влияет не только временная стабильность источника, но и точность смещения позиционера, качество юстировки оптической схемы интерферометров, а также доля

паразитного излучения, попадающего в приемник. На мнимую часть κ_s в большей степени влияют временная стабильность мощности генерации НЛСЭ и наличие паразитных засветок [13].

Таблица 1. Результаты определения комплексного показателя преломления ППП $\tilde{n}_s = n_s + i\kappa_s$, найденные в экспериментах с использованием программного комплекса и цифрового осциллографа

Способ получения данных	n_s	κ_s
Программный комплекс	1.0029 ± 0.0001	$(1.8 \pm 0.09) \cdot 10^{-4}$
Цифровой осциллограф	1.0032 ± 0.0001	$(1.9 \pm 0.1) \cdot 10^{-4}$

10. ПЕРСПЕКТИВЫ МОДЕРНИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА

Описанную в данной работе систему управления экспериментом целесообразно модернизировать с учетом недостатков, выявленных при тестировании комплекса. Основным фактором, влияющим на точность спектральных измерений, является точность привязки координаты позиционера подвижного зеркала интерферометра и измеряемого сигнала, которая, в свою очередь, сильно зависит от скорости передачи данных от контроллера в компьютер. В связи с этим предлагается рассмотреть реализацию части функций непосредственного управления позиционерами, аналого-цифрового преобразования и фильтрации шумов на отдельном микроконтроллерном блоке, связанном с персональным компьютером высокоскоростным интерфейсом USB, с поддержкой нескольких конечных узлов передачи со стороны микроконтроллера для возможности организации двух каналов взаимодействия: для командного обмена и для высокоскоростной передачи данных АЦП в компьютер. Такая архитектура позволит передавать данные на персональный компьютер со скоростью передачи не менее 10 Мбит/с без использования виртуальных коммуникационных портов. Это даст возможность существенно повысить точность оцифровки данных (до 12–16 бит) и одновременно значительно увеличить скорость передачи данных на компьютер, что, в свою очередь, позволит повысить точность спектральных измерений и использовать более высокую скорость перемещения зеркал интерферометров. При реализации приведенной выше схемы управляющая программа на персональном компьютере будет передавать в микроконтроллерный блок команды управления, принимать ответы и поток данных. Принимая данные, программа может сохранять и одновременно отображать их. Кроме этого, учитывая то, что спектр получается путем дискретного фурье-преобразования данных интенсивности пространственной интерференционной картины, для обеспечения высокой точности результатов необходимо обеспечить максимальное уменьшение разброса отклонений интервала выборки данных ФЭП. Поэтому учет реального времени и привязку к нему всех получаемых данных целесообразно

проводить в микроконтроллерном блоке. Ожидается, что можно достичь скорости измерений, как в современных коммерческих инфракрасных фурье-спектрометрах Bruker.

Оснащение микроконтроллерного блока модулем Ethernet позволит ему синхронно транслировать управляющие сообщения и ответы на них управляющему контроллеру, а в итоге – позиционерам компании Newport (контроллер Newport ESP302). Таким образом, микроконтроллерный блок превращается в высокоточную систему прокси-управления реального времени с точностью привязки событий не хуже десятков микросекунд.

Также можно рассмотреть возможность оснащения микроконтроллерного блока дополнительной оперативной или флэш-памятью необходимого объема для возможности накопления всех экспериментальных данных во время проведения эксперимента. После окончания эксперимента массив данных можно будет передать управляющей программе в системный блок. В этом случае во время эксперимента микроконтроллерный блок будет передавать управляющей программе лишь промежуточные данные для визуального мониторинга координат позиционеров и отображения сигналов ФЭП на осциллограмме. Этот процесс не требует соблюдения высокого уровня точности привязки ко времени. Вся логика управления экспериментом сохранится в управляющей программе, которую можно будет оперативно настраивать и модернизировать под изменяющиеся нужды.

Очевидно, что интерферометр объемных волн можно использовать автономно и для решения некоторых других задач, например, для оперативного контроля длины волны излучения на диагностической станции НЛСЭ в реальном времени. Гибкость программной архитектуры позволяет настраивать и добавлять по необходимости новые программные модули, оперативно расширяя круг решаемых задач. Например, уже существует запрос от пользователей НЛСЭ на создание двумерного механического сканера для получения ТГц-изображения требуемого разрешения.

11. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и апробирован программно-аппаратный комплекс для автоматического управления и сбора данных на терагерцевом динамическом плазмонном интерферометре Майкельсона. Эксперименты на интерферометре сопряжены с механическим перемещением оптических зеркал с одновременным приемом данных от датчиков, сигнал от которых после обработки синхронными детекторами обрабатывался разработанным двухканальным АЦП-конвертером, а затем передавался в персональный компьютер. Значения сигналов сохраняются построено в электронной таблице с привязкой к координатам и реальному времени. В текущей версии предлагаемый комплекс позволил повысить скорость проведения исследования, удобство

управления экспериментом, повторяемость и точность результатов, а также сформировать результат исследований в компактном и удобном для анализа виде.

С использованием терагерцевого квазимонохроматического излучения (длина волны 141 мкм) Новосибирского лазера на свободных электронах выполнены тестовые эксперименты по плазмонной рефрактометрии золотой пленки на поверхности стекла с дополнительным диэлектрическим покрытием из сульфида цинка толщиной 1.65 мкм. Результаты тестовых измерений в пределах погрешности согласуются с данными, полученными при использовании для сбора данных вместо АЦП-конвертера коммерческого 12-битового двухканального цифрового осциллографа Handyscope-3, а также с данными, полученными в более ранних работах.

Опыт эксплуатации системы управления в настоящей работе показал очевидность дальнейшей ее модернизации с целью повышения точности и быстродействия сбора и обработки измерений, ее гибкости и удобства в использовании. Текущая версия программно-аппаратного комплекса может рассматриваться в качестве базовой платформы для дальнейшего развития и расширения его возможностей, что позволит решать различные экспериментальные задачи на пользовательских станциях НЛСЭ, а также с применением других источников излучения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты получены с использованием оборудования ЦКП “Сибирский центр синхротронного и терагерцевого излучения” на базе уникальной научной установки "Новосибирский лазер на свободных электронах" в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-22-20008), а также правительства Новосибирской области (<https://rscf.ru/project/25-22-20008/>).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

У авторов нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Братман В.Л., Лутвак А.Г., Суворов Е.В. // УФН. 2011. Т. 181. № 8. С. 867. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0181.201108f.0867>
2. Dragoman D., Dragoman M. // Progress in Quantum Electronics. 2004. V. 28. № 1. P. 1. [https://doi.org/10.1016/S0079-6727\(03\)00058-2](https://doi.org/10.1016/S0079-6727(03)00058-2)
3. Jiang W., Zhou Q., He J. et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2024. V. 26. № 4. P. 2326. <https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3385908>
4. Ukirade N.A. // Next Materials. 2025. V. 6. P. 100479. <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2024.100479>.
5. O'Hara J.F., Withayachumnankul W., Al-Naib I. // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2012. V. 33. № 3. P. 245. <https://doi.org/10.1007/s10762-012-9878-x>
6. Hofmann T., Herzinger C.M., Boosalis A., Tiwald T.E., Woollam J.A., Schube M. // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. № 2. С. 023101. <https://doi.org/10.1063/1.3297902>
7. Азаров И.А., Швец В.А., Прокопьев В.Ю. и др. // ПТЭ. 2015. № 3. С. 71. <https://doi.org/10.7868/S0032816215030039>
8. Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред. / Под ред. В.М. Аграновича и Д.Л. Миллса. Москва: Наука, 1985.
9. Майер С.А. Плазмоника: теория и приложения. Москва, Ижевск: R&C Dynamics, 2011.
10. Gerasimov V.V., Nikitin A.K., Lemzyakov A.G., Azarov I.A., Kotelnikov I.A. // Appl. Sci. 2023. V. 13. P. 7898. <https://doi.org/10.3390/app13137898>
11. Gerasimov V.V., Khasanov I.Sh., Kukotenko V.D., Lemzyakov A.G., Ivanov A.I., Antonova I.V., Cherevko A.G. // IEEE Trans. THz Sci. Technol. 2025. V. 15. P. 61. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2024.3485870>
12. Герасимов В.В., Никитин А.К. // РФ Патент 2829436, 2024.
13. Gerasimov V.V., Nikitin A.K., Lemzyakov A.G. // Instrum. Exp. Tech. 2023. V. 66. P. 423. <https://doi.org/10.1134/S0020441223030053>
14. Gerasimov V.V., Knyazev B.A., Lemzyakov A.G., Nikitin A.K., Zhizhin G.N. // J. Opt. Soc. Am. B. 2016. V. 33. P. 2196. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.33.002196>
15. Gerasimov V.V., Nikitin A.K., Vanda V.S., Lemzyakov A.G., Azarov I.A. // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2025. V. 46. P. 32. <https://doi:10.1007/s10762-025-01051-x>.
16. Ordal M.A., Long L.L., Bell R.J., Bell S.E., Bell R.R., Alexander R.W., Ward C.A. // Appl. Opt. 1983. V. 22. P. 1099. <https://doi.org/10.1364/AO.22.001099>
17. Kubarev V.V., Kulipanov G.N., Kolobanov E.I. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. 2009. V. A603. P. 25. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.12.122>

18. *Никитин А.К., Хитров О.В.* Патент РФ 2709600. 2019.
19. *Shevchenko O.A., Vinokurov N.A., Arbuzov V.S. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2019. V. 83. P. 228. <https://doi.org/10.3103/S1062873819020278>
20. *Rosker M.J., Wallace H.B.* // IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, Honolulu, HI, USA. 2007. P. 773. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2007.380054>
21. *Gerasimov V.V., Nikitin A.K., Khitrov O.V., Lemzyakov A.G.* // 46-th Intern. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). Chengdu, China. 2021. P. 1. <https://doi.org/10.1109/IRMMWTHz50926.2021.9567134>
22. *Gerasimov, V.V.; Nikitin, A.K.; Lemzyakov, A.G.; Azarov, I.A.* // Photonics. 2023. V. 10. P. 917. <https://doi.org/10.3390/photonics10080917>
23. http://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_devices/golay_cell/ (08.04.2025)
24. <http://www.nzpp.ru/product/gotovye-izdeli/fotopriemnye-ustroystva/> (08.04.2025)
25. *Паулиш А.Г., Дорожкин К.В., Суляев, Гусаченко А.В., Морозов А.О., Пыргаева С.М.* // Сб. трудов конференции “Актуальные проблемы радиофизики АПР 2019”. Томск, 2019. С. 482. <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000709334>
26. *Gerasimov V.V., Knyazev B.A., Nikitin A.K.* // Quantum Electron. 2017. V. 47. № 1. P. 65. <https://doi.org/10.1070/QEL16178>
27. <https://reversepcb.com/stm32f103c8t6/>
28. <https://www.nextpcb.com/blog/arduino-nano-pinout>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема экспериментальной установки.
- Рис. 2.** Блок-схема программно-аппаратного комплекса.
- Рис. 3.** Вид окон управления позиционерами для включенного и отключенного каналов контроллера.
- Рис. 4.** Схема электрическая принципиальная датчика ФЭП.
- Рис. 5.** Электронный блок (а) и приемный модуль детектора МГ-32 (б).
- Рис. 6.** Схема и внешний вид конвертера АЦП.
- Рис. 7.** а – Универсальный кронштейн для юстировки пироэлектрического детектора (внешний вид); б – пружинный зажим для крепления неподвижного зеркала М1 к образцу; в – зажим, фиксирующий зеркало: 1 – поверхность исследуемого образца, 2 – стационарное зеркало.
- Рис. 8.** а – Осциллограммы, измеренные на интерферометре объемных волн с помощью программного комплекса и цифрового осциллографа. Источник излучения – красный диодный лазер ($\lambda = 637$ нм). Скорость сканирования 586 нм/с. б – Разброс времени накопления, фиксируемый при измерениях осциллограмм с помощью программного комплекса.
- Рис. 9.** Спектры красного лазера, полученные численным фурье-преобразованием из осциллограмм на рис. 8а.
- Рис. 10.** Осциллограммы, измеренные на плазмонном интерферометре и интерферометре объемных волн с помощью программного комплекса и цифрового осциллографа. Источник излучения – терагерцевое излучение ЛСЭ ($\lambda = 141$ мкм).
- Рис. 11.** Спектры ППП и ОВ, найденные численным фурье-преобразованием из осциллограмм на рис. 8, измеренных с помощью программного комплекса (а) и цифрового осциллографа (б).
- Рис. 12.** Графики затухания сигнала ППП в зависимости от смещения зеркала М2 в плазмонном интерферометре, измеренные с помощью программного комплекса (а) и цифрового осциллографа (б).

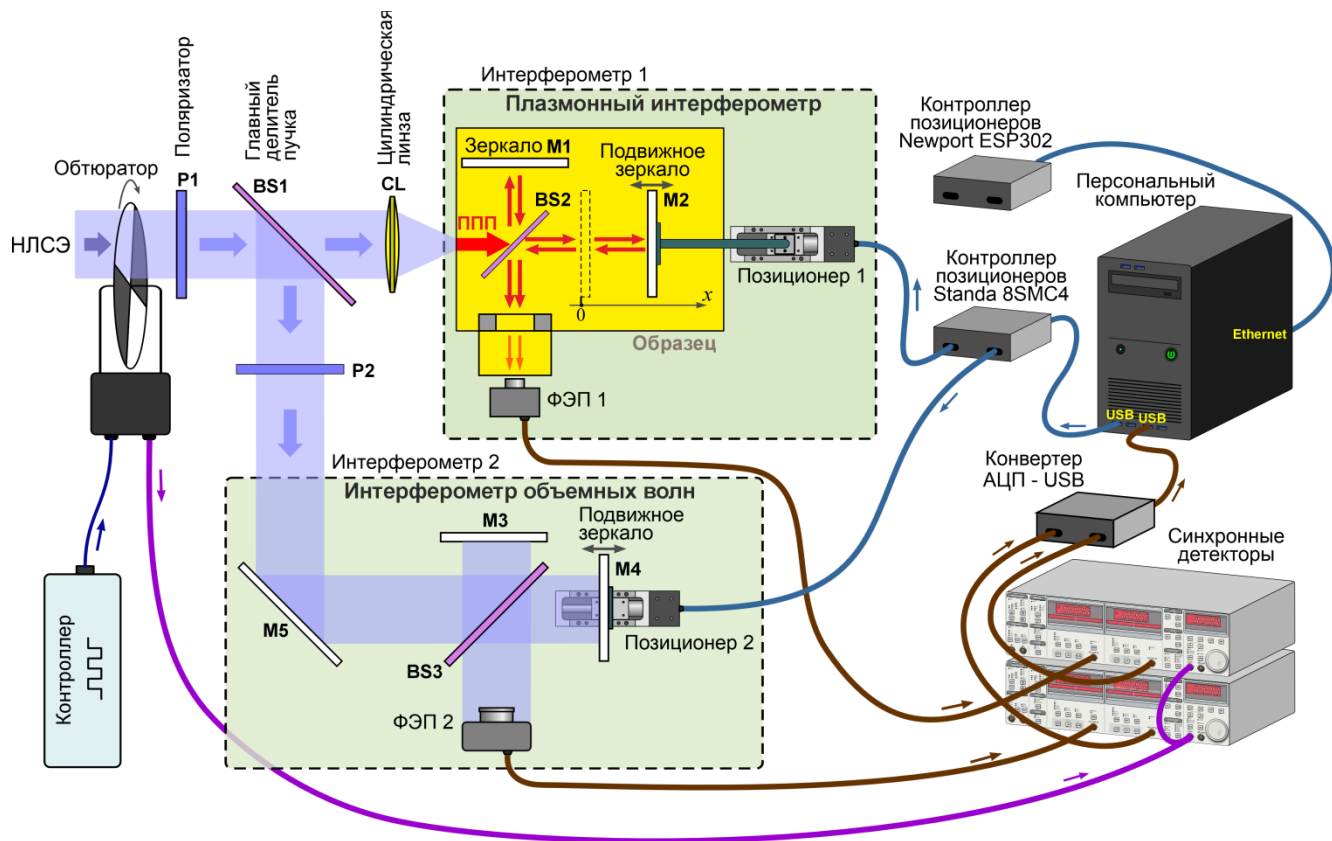


Рис. 1.

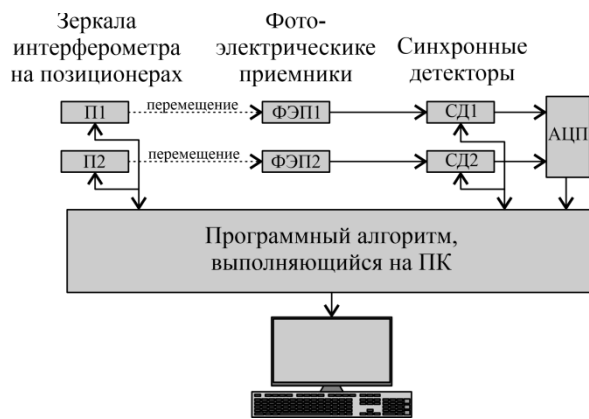


Рис. 2.

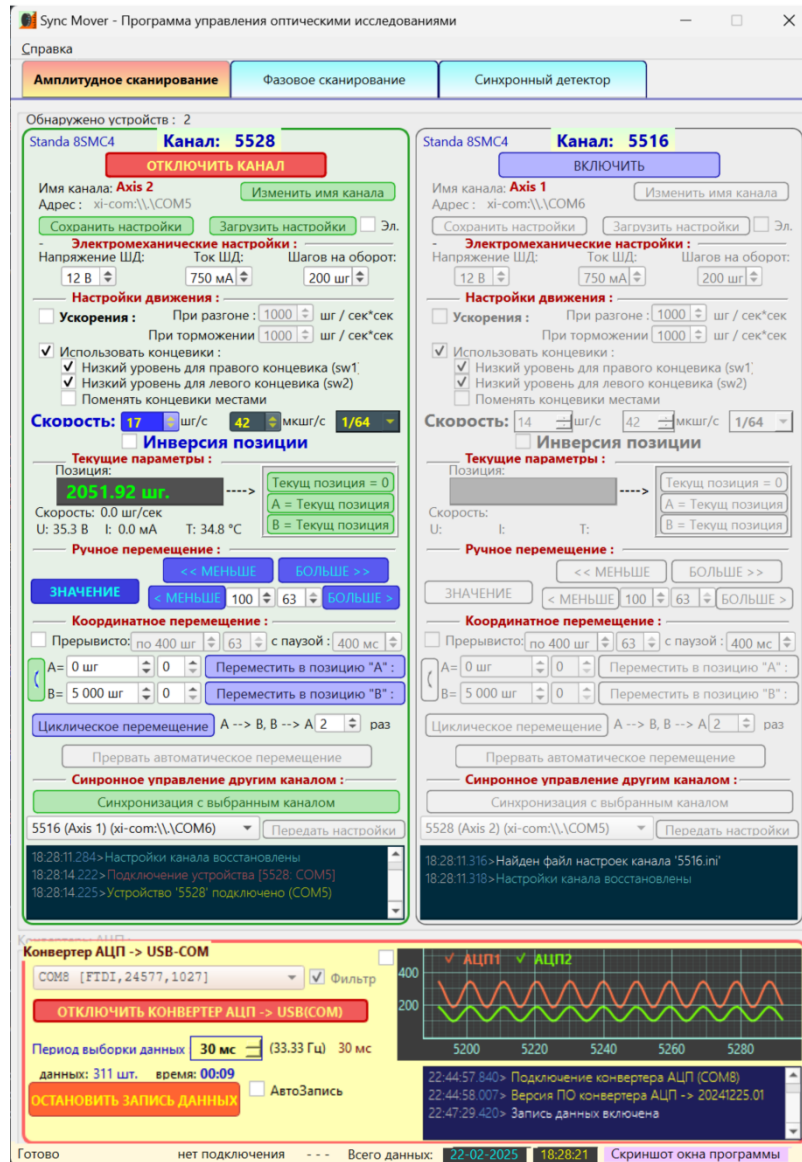


Рис. 3.

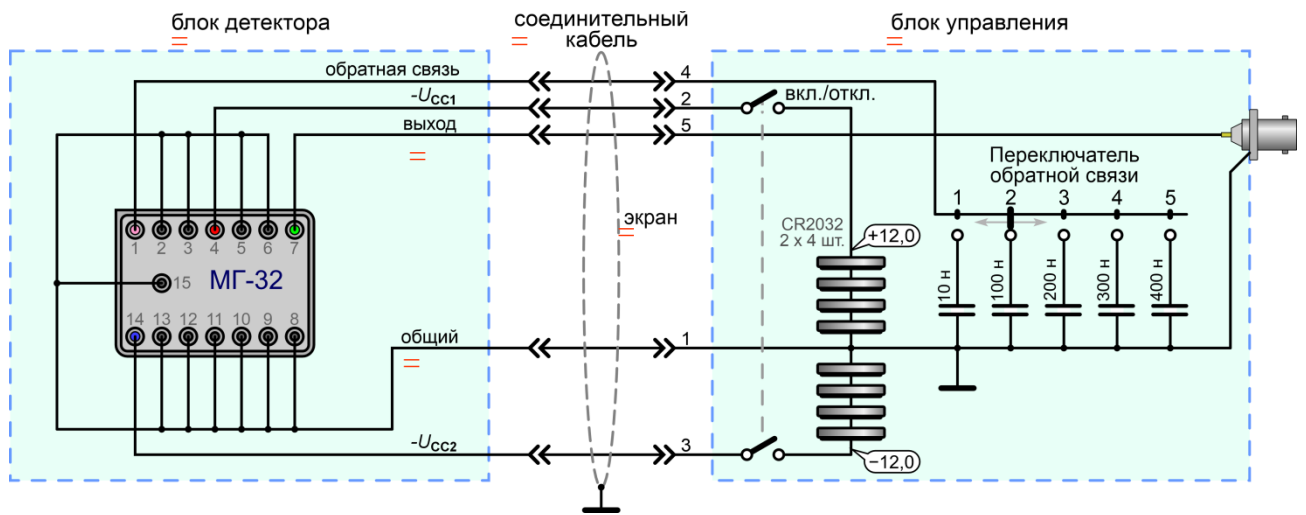


Рис. 4.

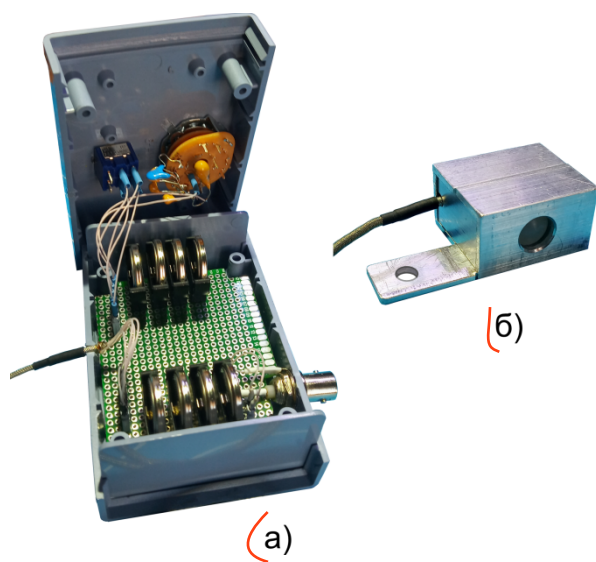


Рис. 5.

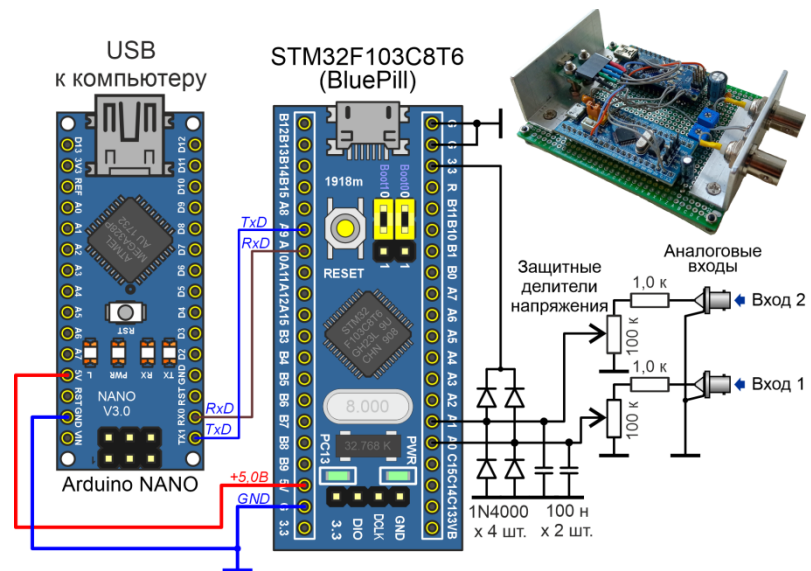
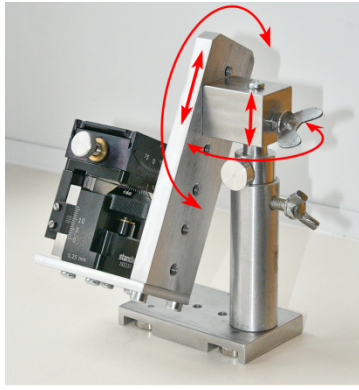


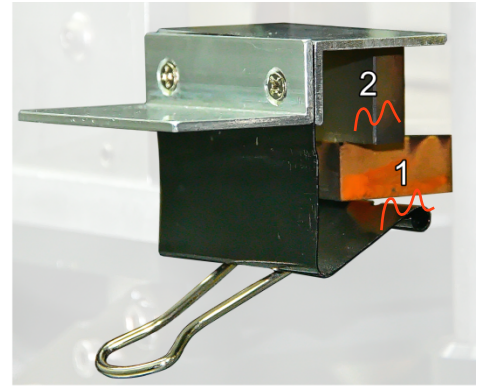
Рис. 6.



(a)

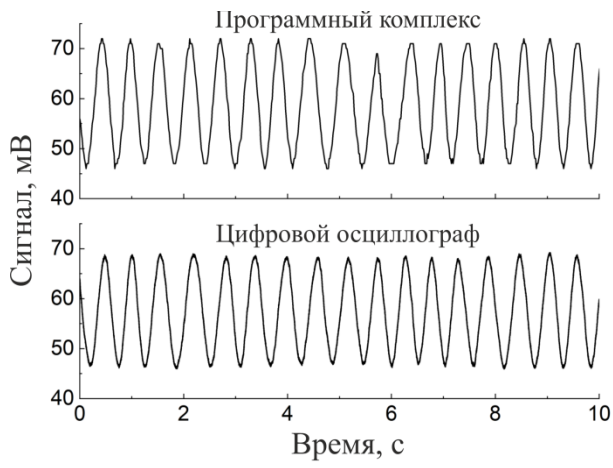


(б)

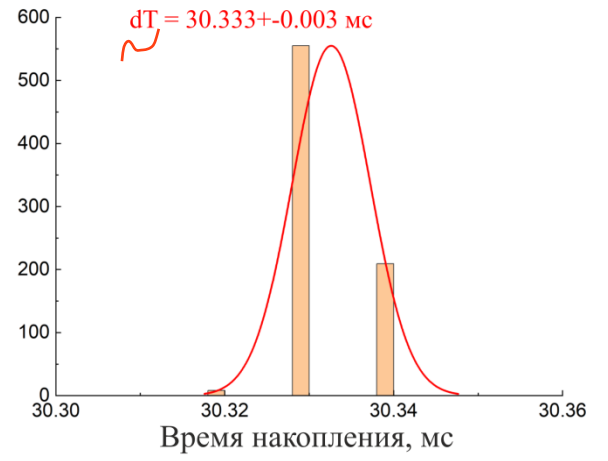


(в)

Рис. 7.



(а)



(б)

Рис. 8.

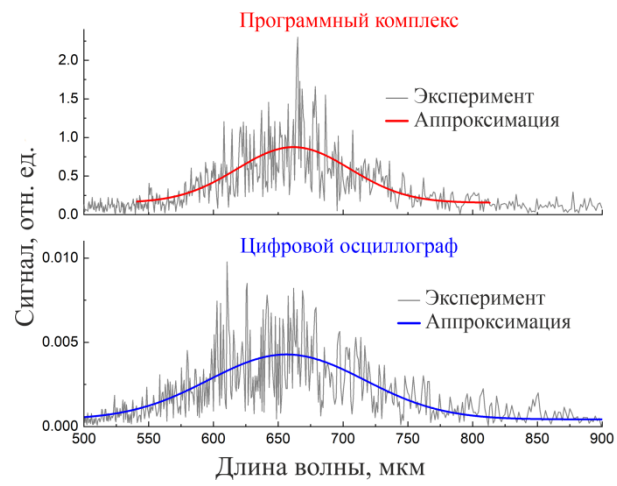


Рис. 9.

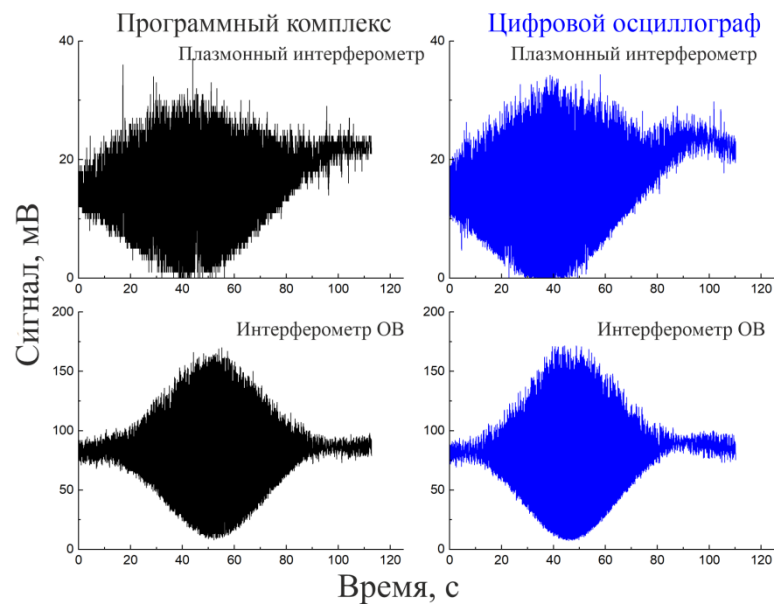


Рис. 10.

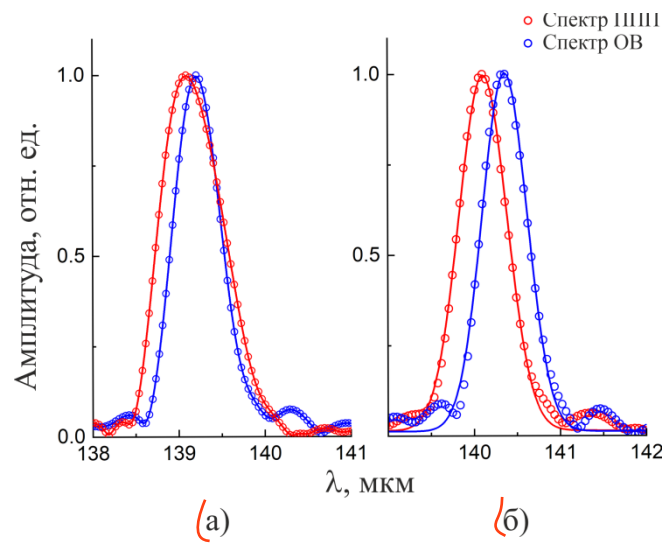


Рис. 11.

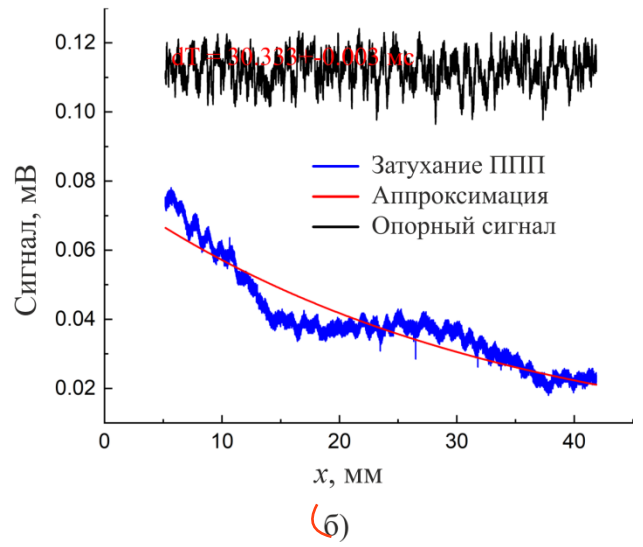
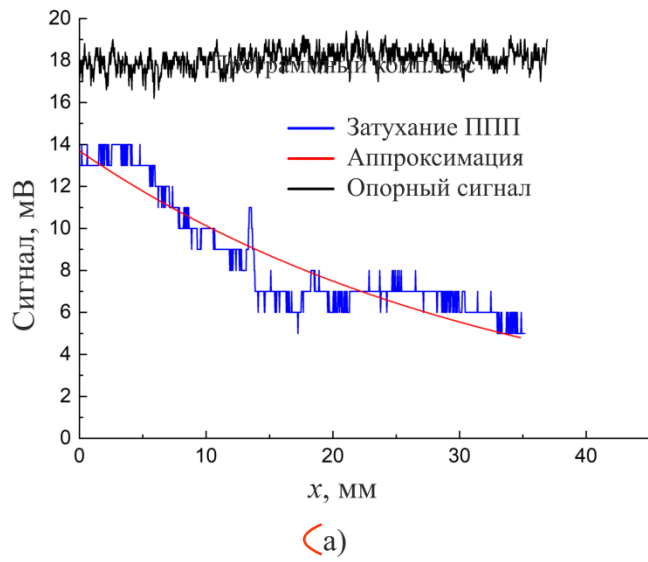


Рис. 12.