

Акустический датчик мощного лазерного импульсного излучения

Антонов С.Н.

Д.т.н, в.н.с., Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова
Российской академии наук, 141190 г. Фрязино, Россия

Аннотация

Пьезоэлектрический датчик мощного импульсного лазерного излучения на основе терморезистивного механизма – выделения тепла на облучаемой светом поверхности твердого тела и генерации звука, вызванного тепловым расширением области облучения. Состоит из внешней поглощающей свет пластины, находящейся в акустическом контакте с пьезоэлементом, регистрирующим звуковые колебания. Имеет преимущества как тепловых измерителей – возможность без искажений регистрировать световые потоки большой мощности, так и электронных – высокое быстродействие и небольшие размеры чувствительного элемента. Измерены основные параметры – чувствительность, быстродействие, температурная стабильность, динамический диапазон, обсуждены прикладные аспекты.

Ключевые слова: термоупругий эффект, пьезоэлемент, лазерное излучение, динамический диапазон, акустика, акустооптика.

Acoustic sensor high-power laser pulse radiation

Antonov S. N.

DSc, Head of Laboratory, Institute of Radioengineering and Electronics. V.A. Kotelnikov of the Russian Academy of Sciences, 141190 Fryazino, Russia

Abstract

Piezoelectric transducer of high-power pulsed laser radiation on the basis of termorezistivno mechanism – the heat generation on the irradiated light, the surface of a solid body and sound generation caused by thermal expansion of the area of irradiation. Consists of an external light-absorbing plate, which is in acoustic contact with the piezoelectric element, registering the sound vibrations. Has the advantages such as heat meters – possibility of distortion to record light beams of high power and electronics, high performance and small size of sensitive element. The main measured parameters – sensitivity, speed, temperature stability, dynamic range, discussed applied aspects.

Key words: *thermoelastic effect, a piezoelectric element, laser radiation, dynamic range, acoustics, acousto-optics.*

Введение

Современная лазерная техника ставит задачу развития и модернизации систем приема и регистрации мощного импульсного оптического излучения.

Для регистрации и измерения энергетических параметров лазерного излучения используются различные физические принципы. Наибольшее распространение получили методы, основанные на преобразовании оптической энергии в тепловую, с последующим измерением тепловых параметров, или непосредственное преобразование оптической энергии в электрический ток.

Парадоксальность заключается в том, что именно повышение мощности лазеров до сотен и более ватт усложняет измерения их параметров – неизбежен существенный нагрев чувствительного элемента. Один из подходов заключается в использовании измерителей проходного типа, когда на измерительный элемент

поступает лишь часть световой мощности. Однако при ответвлении (или ослаблении) мощного луча возникают искажения в измерениях: поглощающие элементы нагреваются, отражающие имеют поляризационную и угловую зависимость, у матовых диаграмма рассеивания неравномерна и т.д.

Тепловые измерители мощности света характеризуются широким спектральным и динамическим диапазонами, высокой линейностью, точностью и стабильностью характеристик. В тоже время, они принципиально уступают электронным измерителям (например, полупроводниковым) в быстродействии, а сами калориметрические приемные устройства (головки) являются относительно громоздкими.

Целью работы и явилось разработка устройства, имеющего преимущества как тепловых измерителей – возможность без искажений регистрировать световые потоки большой мощности, так и электронных – высокое быстродействие и небольшие размеры чувствительного элемента. Работа носит экспериментальный характер.

1. Экспериментальная методика и установка

Физический принцип, предлагаемого метода регистрации импульсного лазерного излучения, основан на терморрадиционном (термоупругом) механизме – выделении тепла на облучаемой светом (поглощающей) поверхности твердого тела и генерации звука, вызванного тепловым расширением этой области облучения. Заметим, что сам этот эффект обнаружен давно и изучен весьма полно, см., например, обзорную статью Л.М. Лямшева [1].

Рис.1 схематично поясняет появления электрического сигнала в экспериментальной ситуации.

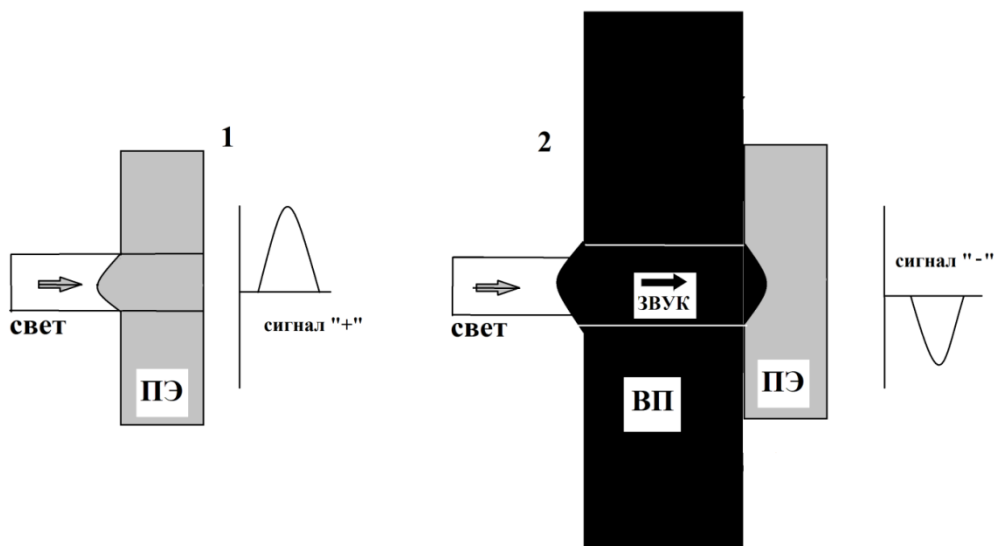


Рис.1. Иллюстрация терморрадиционного механизма с дополнительной внешней пластиной

Здесь: 1 – на пьезоэлектрический элемент (ПЭ) (продольной поляризацией) падает световой луч. При локальном импульсном воздействии лазерного луча часть световой энергии отражается, а часть поглощается в поверхностном слое, вызывая нагрев области облучения. Если, материал (в большинстве случаев) имеет положительный температурный коэффициент расширения, то область воздействия

расширяется. Скорость и величина изменения размера поверхностного слоя связаны с теплоемкостью и теплопроводностью материала. Нагрев приводит к локальному увеличению размеров, и быстрая деформация возбуждает акустическую волну, распространяющуюся перпендикулярно к поверхности ПЭ и, следовательно, пьезоотклик. Знак электрического сигнала, здесь, примем положительным.

2 – перед ПЭ, в акустическом контакте, установлена внешняя (пассивная пьезоэлектрически) пластина ВП. Нагрев также увеличивает локальный размер пластины, распространяющаяся волна деформации уже сдвигает ПЭ, это определяет смену знака пьезоотклика, что установлено в наших экспериментах.

В плане создания измерителя мощности лазерного излучения, использование дополнительной ВП очевидно – появление электрического сигнала связано не с нагревом чувствительного пьезоматериала, а с нагревом только пластины. Тем самым, не сложно осуществить тепловую изоляцию ПЭ, например, отводя тепло от ВП. Кроме того, ВП может быть выполнена двухслойной: первый охлаждаемый слой из материала высокой теплопроводности (медь, керамика), второй с низкой (стекло, жидкость).

Существенно, что проверялось экспериментально, терморрадиционный сигнал пропорционален мощности света, а не интенсивности.

Была исследована комбинация из ниобата лития, пьезокерамики и большого количества дополнительных пластин разных конфигураций и материалов. Выявленные закономерности позволили разработать наиболее оптимальное, в плане поставленной задачи, устройство.

Чувствительный элемент датчика изготовлен из ниобата лития (пластина $Y+36^0$ среза – чисто продольная мода) в виде полированного диска диаметром 6 мм, толщиной 0.5 мм. На поверхности напылялись медные электроды. Диск припаивался к медному Г-образному химически почерненному основанию. Конструкция датчика схематично показана на рис. 2.

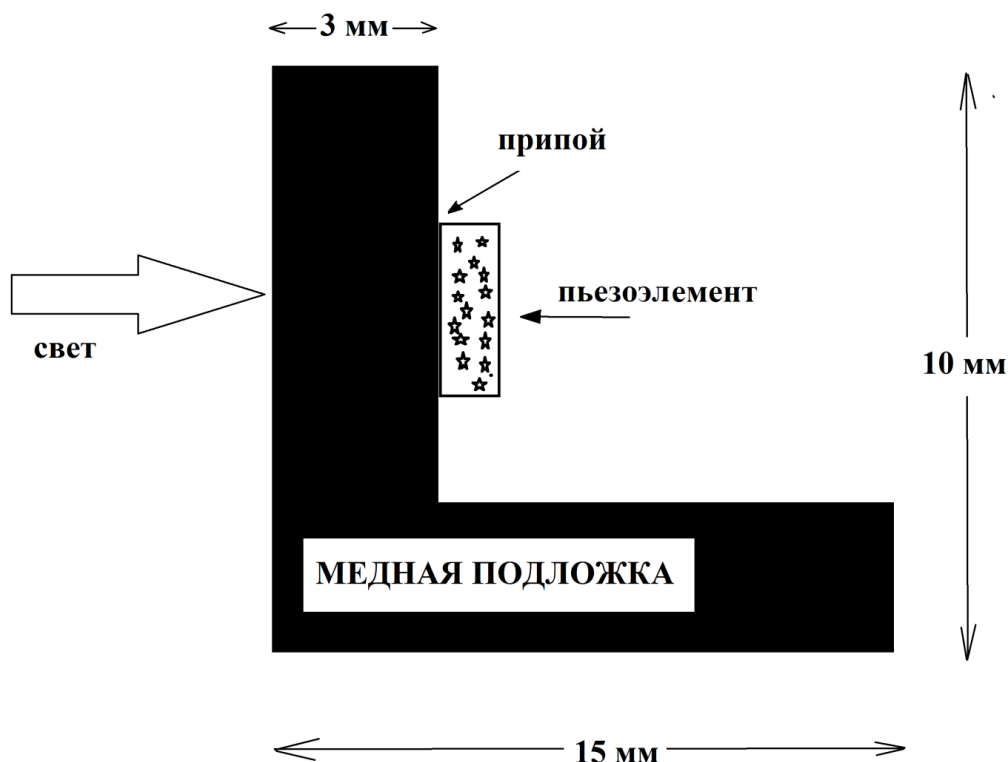


Рис. 2. Конструкция датчика

На рис.3 представлена схема экспериментальной установки.

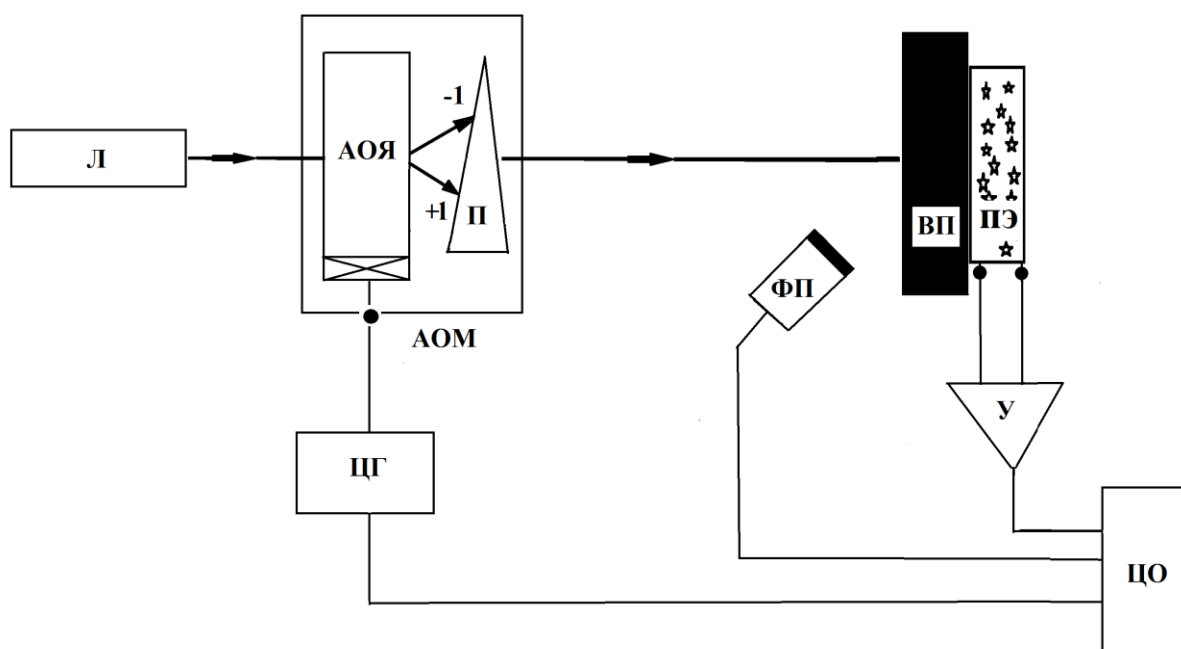


Рис.3. Схема экспериментальной установки

Здесь Л – лазер, АОМ – акустооптический модулятор, П – поляризационная призма, ВП – внешняя пластина, ПЭ – пьезоэлемент, ЦГ – цифровой генератор, ФП – фотоприемник, У – усилитель, ЦО – цифровой осциллограф.

Использовался неполяризованный непрерывный волоконный одномодовый лазер с длиной волны 1.07 мкм, апертура 1 мм, $M^2 = 1.01$, регулируемая выходная мощность до 20 Вт. Поляризационно нечувствительный модулятор содержал акустооптическую ячейку АОЯ на базе кристалла TeO_2 и поляризационную призму П и обеспечивал импульсную модуляцию луча с эффективностью 95 % [2].

Используемые приборы: генератор – AFG3000, усилитель - УЗ-29, осциллограф - TDS1012В.

Генератором формировался импульсный сигнал управления модулятором и синхроимпульсы на осциллограф. Модулированный луч направлялся на исследуемый датчик. Сигнал с электродов ПЭ через усилитель поступал на осциллограф. Кремневый PIN фотоприемник регистрировал рассеянный от поверхности датчика свет. Мощность света в импульсе 19 Вт.

Фотография изготовленного датчика, на котором проводились измерения, представлена на рис. 4.

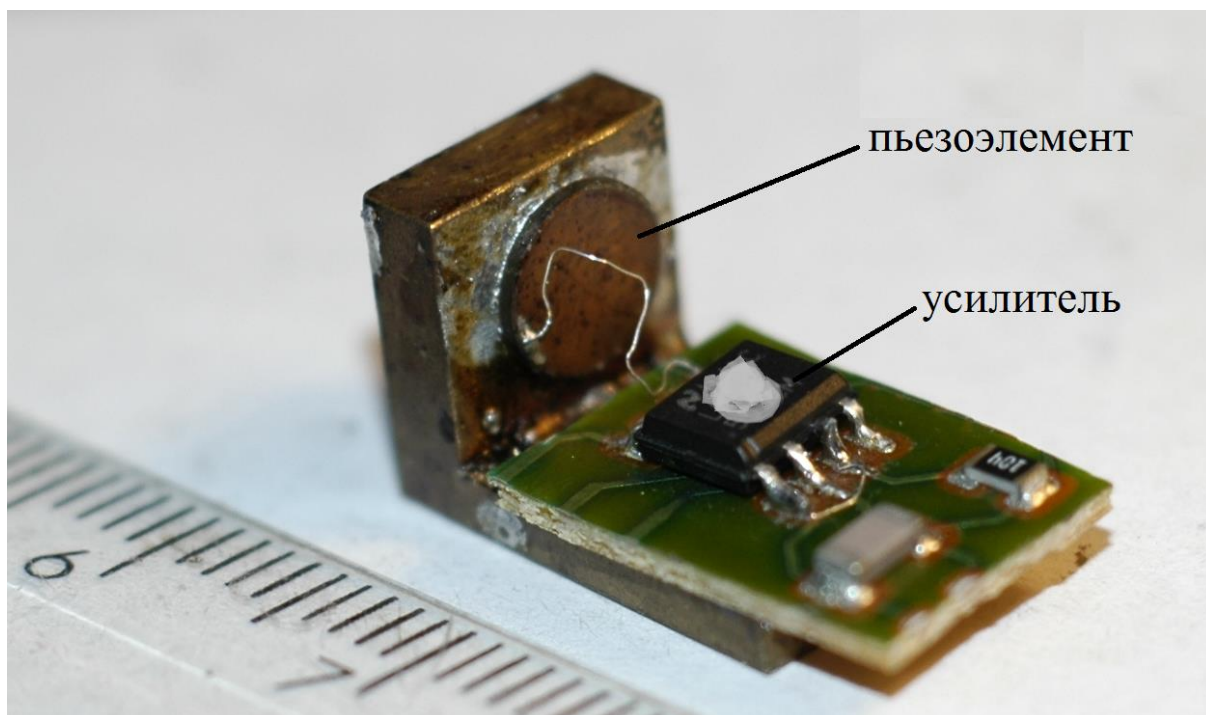
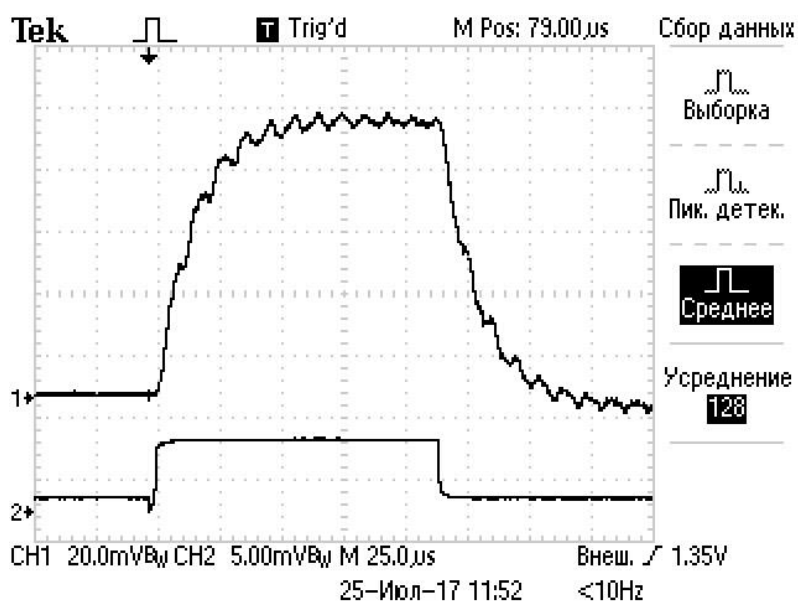


Рис. 4. Фотография датчика, деления линейки – см

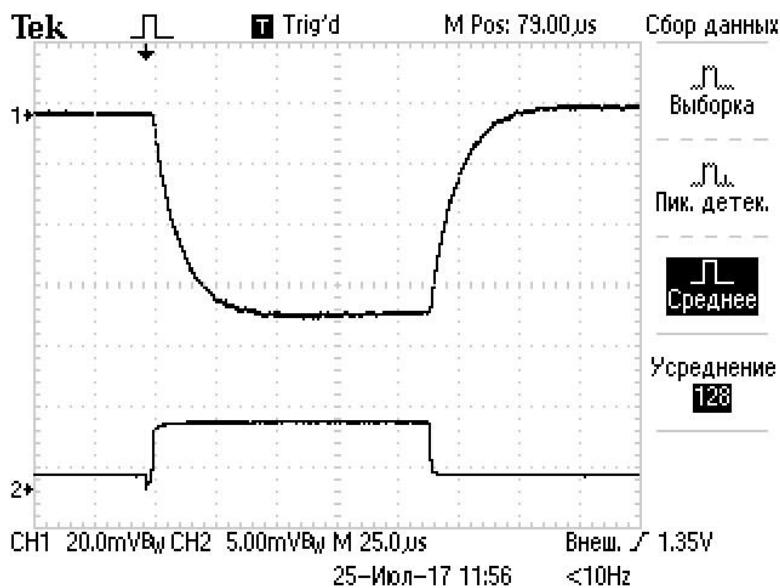
2. Экспериментальные результаты

Целью экспериментов явилось измерение основных параметров датчика: чувствительность, быстродействие, динамический диапазон, температурная зависимость, угловая чувствительность. Обсуждение полученных результатов – ниже.

Электронные фотографии сигнала с осциллографа показаны на серии рис. 5, верхний отклик с ПЭ, нижний – с фотодиода.



а) свет падает на медную пластину



б) свет падает непосредственно на ПЭ

Рис.5. Сигналы от: ПЭ – верхний отклик, фотодиода – нижний
Развертка по X – 25 µs на клетку

На рис.6 представлена температурная зависимость амплитуды сигнала с ПЭ от температуры, которая изменялась внешним нагревателем.

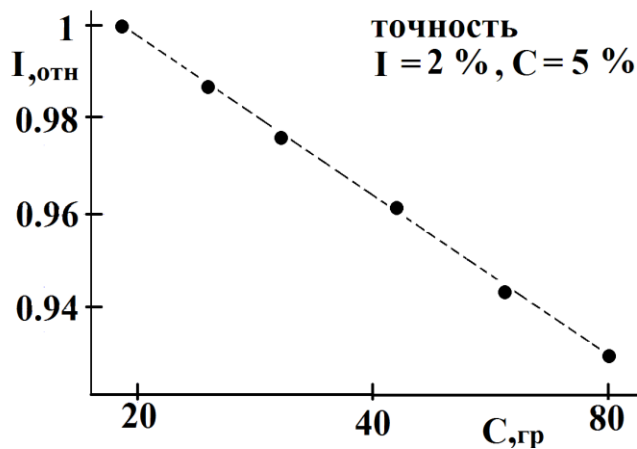


Рис. 6. Температурная зависимость чувствительности датчика

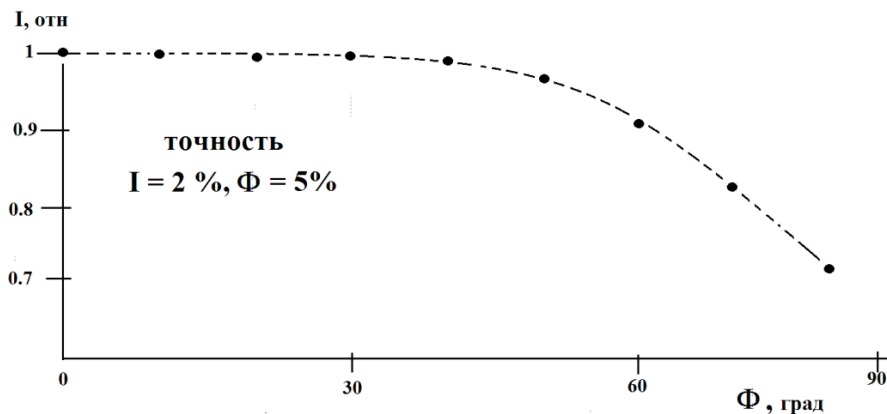


Рис. 7. Угловая зависимость чувствительности датчика

Рис.7 показывает изменение амплитуды сигнала с датчика при изменении его углового положения относительно лазерного луча. 0 град – нормальное падение света на поверхность датчика.

3. Обсуждение результатов

Наблюдаемая разнополярность пьезооткликов рис. 5а) и 5б) при воздействии на медную пластину и ПЭ, указывают на адекватность модели рис. 1.

3.1. Чувствительность (рис. 5)

При мощности оптического импульса $P_{оп} = 19$ Вт амплитуда сигнала непосредственно на обкладках ПЭ равна 50 мВ. Из измеренного значения активной составляющей импеданса ПЭ 300 кОм, оценки потерь на преобразовании звук – сигнал в ПЭ 3 дБ и поглощении 90% света на поверхности меди, получаем оценочную величину акустической мощности поступающей на ПЭ $P_{ак} \approx 1.9 \cdot 10^{-8}$ Вт. Таким образом, экспериментальная величина коэффициента радиационно-акустического преобразования:

$$\eta_{э} = P_{ак} / P_{оп} \approx 1.9 \cdot 10^{-8} / 19 = 1 \cdot 10^{-9} \quad (1)$$

Сопоставим величину наблюдаемого преобразования с расчетом по выражению (9) стр. 50 работы [1], Используя коэффициент объемного теплового расширения меди $\beta = 5 \cdot 10^{-5} / \text{град}$, и интенсивность света $J = 19 \cdot 10^2$ Вт/см² получим расчетный коэффициент преобразования:

$$\eta_{р} = 8,3 \cdot 10^{-13} \cdot J \sim 1.7 \cdot 10^{-9} \quad (2)$$

Различие между экспериментом и расчетом существует, но не принципиальное. По-видимому, подставленные оценочные параметры не точны. Следовательно, имеет место именно радиационно-акустическое преобразование световой энергии в электрическую.

Таким образом, верхний диапазон измеряемых мощностей многократно превышает уровень 20 Вт, и будет ограничиваться лишь деструкцией (окислением, плавлением, горением) принимаемой свет поверхности датчика.

3.2. Быстродействие (рис. 5)

Из осциллограммы видно, что быстродействие датчика составляет около 40 мкс. Проведенные измерения указывают на то, что наряду с другими факторами (теплоемкость и теплопроводность поглощающего материала), быстродействие зависит и от толщины ПЭ. Так, с пластиной ниобата лития 55 мкм быстродействие составило около 25 мкс. Можно предположить, что дальнейшее уменьшение толщины ПЭ будет приводить к повышению быстродействия, хотя и связано с определенными технологическими трудностями.

3.3. Температурная зависимость чувствительности (рис. 6)

Измерения показывают, что по крайней мере в данном температурном диапазоне, зависимость линейная и имеет значение около $1.8 \cdot 10^{-3} / \text{град}$. Поскольку, точка Кюри (фазовый переход) у ниобата лития $\sim 1210^\circ\text{C}$, механизм зависимости, очевидно, не связан с изменением его пьезо свойств. Статические изменения размеров, тоже вряд ли являются причиной. Тем самым, причина зависимости, по-видимому, та же, что и для всех колориметрических систем – изменение разности температур между начальной температурой и температурой при воздействии. В плане практики, решение очевидно, либо осуществлять термостабилизацию поглощающей пластины, отводя

выделяемое тепло, либо (и) аппаратно учитывать статическую температуру при измерениях.

3.4. Угловая зависимость чувствительности (рис.7)

При углах наклона до 40 - 45 гр. сигнал практически не меняется. По-видимому, основной механизм уменьшения сигнала при больших углах – это увеличение эффективного размера облучаемой области, и выход света за апертуру ПЭ. С практической точки зрения эта слабая чувствительность весьма полезна – не требуется точного углового позиционирования датчика относительно светового луча, и сохраняется адекватность измерений при различных расходимостях луча.

Отметим еще одну особенность пьезоотклика при воздействии света на медную пластину. На рис. 5а видно, что за переднем и заднем фронтах импульса возникают затухающие гармонические колебания. Период колебаний примерно равен 10 мкс, что соответствует времени пробега звуковой волны от поглощающей поверхности меди до задней грани ниобата лития, тем самым акустический резонатор – медная пластина и ПЭ возбуждается на фронтах сигнала. В то же время, на рис 5б, возбуждение непосредственно ПЭ, стоячая волна (с точностью наблюдения) отсутствует. Причина «асимметрии» автору не ясна.

Были проведены эксперименты при больших интенсивностях света, установкой короткофокусного объектива (фокус 15 мм) перед медной пластиной. При этом возникало пламя на поверхности меди. Существенных изменений в характеристиках сигнала зафиксировано не было.

Выводы

Разработан датчик мощного импульсного лазерного излучения, основанный на терморационном (термоупругом) эффекте. Предназначен для измерений абсолютных значений мощности при высоком (микросекундном) быстродействии. Энергетическое воздействие света происходит на внешней пластине с возможным ее охлаждением, что и позволяет измерять оптические потоки до сотен и более ватт. Небольшие габариты датчика позволяют интегрировать его в существующие лазерные системы и устройства. Кроме того, данный принцип может найти использование в системах лазерной обработки материалов для приема акустического сигнала непосредственно через деталь, на которую воздействует лазерный луч с целью контроля и управления режимом работы.

Автор выражает признательность д.ф.-м.н. В.И. Миргородскому, как инициатору работы.

Работа выполнена в рамках госзаказа ФИРЭ.

Список литературы

1. Лямшев Л.М. //Успехи физических наук. 1992. Том 162. № 4. С. 43-94.
2. Антонов С.Н. // ЖТФ. 2016.том 86. Вып.1. С. 132-135.