

Минобрнауки России  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской  
академии наук (ИСЭ СО РАН)  
Отдел образовательной деятельности

## НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах

научно-квалификационной работы на тему:

### **«Генерация терагерцового излучения в нелинейных кристаллах и лазерном филаменте»**

Направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия

Профиль подготовки (специальность): 01.04.05 – оптика

Аспирант:

Сандабкин Евгений Александрович



Научный руководитель:

Лосев Валерий Фёдорович,

д. ф.-м. н., профессор

г. н. с. ИСЭ СО РАН

Томск – 2021

## **Обоснование актуальности темы научного исследования**

Исследования, посвященные методам генерации и регистрации терагерцового (ТГц) излучения, активно проводятся последние три десятилетия, что связано с широкими перспективами применения данного излучения в задачах науки и техники [1].

Определение опасных материалов на удаленной дистанции актуальная задача в различных направлениях научных исследований. Актуальность данной работы состоит в создании систем мониторинга атмосферы в терагерцовом (ТГц) диапазоне, т.к. в этой спектральной области присутствуют частоты колебательно-вращательных мод тяжелых молекул, включая органические. Одним из популярных способов получения ТГц излучения является генерация разностной частоты в нелинейных кристаллах (НК): близкие частоты ( $\Delta\lambda \approx 12$  нм) двух Nd:YAG лазеров смешиваются в НК, порождая третью частоту, лежащую в ТГц диапазоне [2]. Как правило полученный таким образом ТГц генератор легко перестраивать по частоте простым поворотом кристалла (исключение составляют высокоэффективные кристаллы ниобата лития [3], где для перестройки частоты требуется изменять геометрию оптической схемы). Однако популярные НК с высокими коэффициентами нелинейной восприимчивости, а, следовательно, и высокой эффективностью преобразования обладают невысокой лучевой стойкостью и сложностью в изготовлении широкоапертурных кристаллов. В настоящей работе предлагается использовать фемтосекундные (фс) лазерные импульсы для накачки таких НК, как GaSe и ZnGeP<sub>2</sub> (ZGP). Фемтосекундный импульс обладает широким спектром, компоненты которого, взаимодействуя между собой позволяют получать разностную частоту в диапазоне 0,1 – 5 ТГц. Кроме того, с уменьшением длительности импульса уменьшается разрушительное влияние тепловых эффектов и основное влияние начинают оказывать уже полевые эффекты и многофотонное поглощение, что приводит к значительному росту лучевой стойкости НК, а, следовательно, и эффективности преобразования излучения.

Еще одним перспективным методом создания терагерцовых генераторов для систем мониторинга атмосферы является генерация ТГц импульсов в плазме фемтосекундного лазерного филамента, что позволяет дистанционно создавать источники ТГц излучения.

**Цель научной работы:** рассмотрение методов создания мощных источников ТГц излучения, пригодных для использования в системах мониторинга атмосферы на наличие опасных веществ. В качестве таких источников могут послужить широко распространенные нелинейные кристаллы такие как GaSe или ZnGeP<sub>2</sub> (ZGP), а также лазерный филамент, создаваемый удаленно вблизи области исследования.

### **Основные задачи научного исследования**

- 1) Повышение эффективности терагерцового генератора на базе нелинейных кристаллов путем накачки сверхкороткими лазерными импульсами;
- 2) Исследование возможности применения нелинейных кристаллов в качестве узконаправленных источников терагерцового излучения;
- 3) Исследование механизмов формирования широкополосного терагерцового сигнала в лазерном филаменте и зависимость его параметров от условий окружающей среды.

### **Содержание выполненного исследования с описанием использованных методов, и его основные результаты**

#### **1. Литературный обзор**

Терагерцовым (ТГц) излучением называется электромагнитное излучение в интервале частот от 0,2 до 3,5 ТГц (85 – 1500 мкм). Этот частотный интервал занимает часть электромагнитного спектра между инфракрасным (ИК) и микроволновым диапазонами, поэтому его часто также называют дальним ИК или субмиллиметровым диапазоном. В ТГц диапазоне

лежат спектры излучения астрономических объектов, а также спектры сложных органических молекул (таких как молекулы белков и ДНК, некоторых взрывчатых веществ, вредных веществ – загрязнителей атмосферы) [4].

Для решения поставленных задач были использованы методы генерации ТГц излучения путем получения разностной частоты в нелинейных кристаллах (ZGP, GaSe, BBO), а также в лазерном филаменте.

Рассмотрим более подробно каждый из методов генерации ТГц излучения.

Генерация в нелинейных кристаллах (НК) позволяет получить ТГц сигнал с довольно узким спектром и дает широкие возможности по спектральной перестройке полученного сигнала, однако не лишена недостатков: в таких генераторах присутствуют широкополосные «провалы», вызванные фоновыми пиками поглощения в НК, часть спектра оказывается недоступной из-за интерференции ТГц волн, отраженных от граней кристалла, так же генераторы на НК имеют низкую предельную интенсивность накачки в следствии невысокой лучевой стойкости НК, что накладывает ограничения на максимальную генерируемую мощность импульса в ТГц диапазоне.

Лазерный филамент в качестве источника ТГц излучения обладает рядом преимуществ по сравнению с другими источниками: ТГц сигнал филамента имеет широкий спектр (от  $\sim 0.1$  до  $\sim 100$  ТГц) [5 – 8], является когерентным [9 – 11], его длительность может составлять 1 – 2 периода электромагнитного поля [12]. Используя явление филаментации можно использовать ТГц излучение для проведения дистанционных исследований [13, 14 – 16], поскольку филамент можно создать непосредственно рядом с удаленным объектом исследования [17]. Генерация ТГц излучения другими методами с последующим его распространением на большие расстояния в атмосфере затруднительна, так как молекулы воды, присутствующие в атмосферном воздухе, имеют очень высокий коэффициент поглощения в ТГц области частот [18].

## 2. Описание установки Старт-480М

В экспериментах использовался фемтосекундный Ti:Sa лазерный комплекс «Старт-480М» (проект «Авеста»). является задающим генератором для мультитераваттной системы THL-100 [19].

Общий вид и структурная схема стартового комплекса показаны на рисунке 1. Фемтосекундные лазерные импульсы генерируются лазером Tis-20 (2) на корунде с титаном. В качестве источника его накачки используется лазер Coherent Verdi V8 (3) на кристалле Nd:YVO4 с диодной накачкой и с внутрирезонаторным преобразованием во вторую гармонику (8 Вт, CW, 532 нм). Лазер Tis-20 на выходе имеет следующие параметры лазерного излучения: длина волны  $\lambda = 950$  нм, мощность – 200 мВт, частота повторения импульсов – 80 МГц, длительность импульса – 50 фс. Далее импульс попадает в стандартный двухпроходовой стретчер (4), использующий только отражательную оптику, где растягивается приблизительно до 100 пс. Для предотвращения влияния усиленной люминесценции из регенеративного усилителя на работу фемтосекундного лазера, после стретчера используется блок оптической развязки – широкополосный изолятор Фарадея. Растянутый импульс инжектируется в блок (6) в регенеративный усилитель (РУ) с помощью ячейки Поккельса, где усиливается. После того как инжектированный импульс с энергией  $< 1$  нДж достигает своей максимальной энергии (усиливается приблизительно в 106 раз), он выбрасывается из усилителя с помощью той же ячейки Поккельса. Далее импульс попадает в первый многопроходовой усилитель (МУ1), на выходе которого энергия импульса может достигать значений  $> 20$  мДж [20]. Накачкой РУ и МУ1 служит лазерная система (5) Lotis-2145D (YAG:Nd<sup>3+</sup>, 532 нм, 12 нс,  $< 400$  мДж, два лазерных пучка на выходе, производство Lotis ТП, Беларусь). На следующем этапе импульс усиливается во втором (8) многопроходном усилителе (МУ2), накачка которого осуществляется лазерной системой (7) Solar LQ-929 (YAG:Nd<sup>3+</sup>, 532 нм, 8-12 нс,  $< 2$  Дж, производство Solar ТП, Беларусь). Для предотвращения пробоя оптики компрессора пучок

увеличивается в диаметре с помощью зеркального телескопа. На выходе стартового комплекса компрессор на дифракционных решетках (9) сжимает лазерный импульс до 50 фс. Изменяя параметры лазеров накачки и регулируя положение решеток компрессора, на выходе стартового комплекса после компрессора можно получить линейно поляризованное в горизонтальной плоскости излучение с энергией 5-25 мДж и длительностью 50-200 фс, либо 5-40 мДж с длительностью 100 пс (до компрессора), на длине волны 950 нм с частотой повторения импульсов 10 Гц. Управление и настройка стартового комплекса осуществляется с помощью блока синхронизации (1) и персонального компьютера (10).

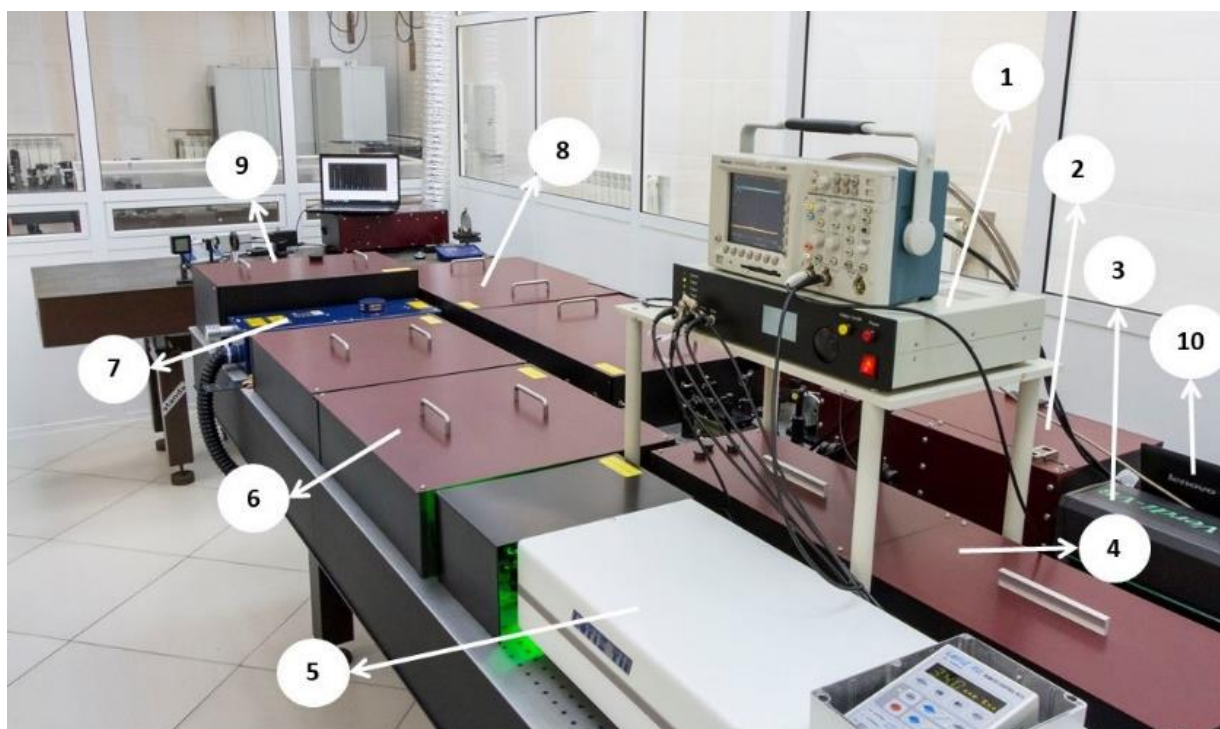


Рисунок 1 – Состав стартового комплекса. 1-Блок синхронизации, 2-задающий генератор, 3-лазер накачки задающего генератора, 4 – стретчер, 5-лазер накачки РУ и МУ1, 6 – РУ и МУ1, 7 – лазер накачки МУ2, 8 – МУ2, 9 – компрессор, 10 – персональный компьютер.

Для регистрации возникающего ТГц излучения использовался программно-аппаратный комплекс на основе ячейки Голя GC-1P (Tydex, Россия).

### 3. Генерация ТГц излучения в нелинейных кристаллах

Решение проблем, связанных с созданием ТГц систем, требует использования мощных источников ТГц излучения с высокими параметрами выходной энергии. Одним из популярных способов получения ТГц излучения является генерация разностной частоты в НК: близкие частоты двух Nd:YAG лазеров смешиваются в НК, при соблюдении условий фазового синхронизма порождая третью частоту, лежащую в ТГц диапазоне [2]. Полученный таким образом ТГц генератор легко перестраивать по частоте простым поворотом кристалла (исключение составляют высокоэффективные кристаллы ниобата лития [3], где для перестройки частоты требуется изменять геометрию оптической схемы). Однако популярные НК с высокими коэффициентами нелинейной восприимчивости, а, следовательно, и высокой эффективностью преобразования обладают невысокой лучевой стойкостью и сложностью в изготовлении широкоапертурных кристаллов.

Было предложено использовать фемтосекундные (фс) лазерные импульсы для накачки таких НК, как GaSe, ZnGeP<sub>2</sub> (ZGP) и  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (BBO). Фемтосекундный импульс обладает широким спектром, компоненты которого, взаимодействуя между собой позволяют получать разностную частоту в диапазоне 0,1 – 5 ТГц. Оригинальной идеей является использование для накачки лазерных импульсов фемтосекундной длительности. Это связано с тем, что с уменьшением длительности импульса уменьшается и разрушительное влияние тепловых эффектов, а основное влияние начинают оказывать уже полевые эффекты и многофотонное поглощение, что приводит к значительному росту лучевой стойкости НК, а, следовательно, и по совокупности параметров эффективности преобразования излучения.

#### 3.1. Генерация ТГц излучения фс-импульсом в НК GaSe

Для генерации мощного ТГц излучения с большим успехом используются НК такие как GaSe или ZnGeP<sub>2</sub> (ZGP). Обладая высокими нелинейными коэффициентами (ZGP:  $d_{36}=75$  пм/В, GaSe  $d_{22} = 54$  пм/В) [21]

такие кристаллы обладают высокой эффективностью при работе в роли генераторов разностной частоты.

Слои выращенной були GaSe расположены перпендикулярно оптической оси, что делает возможным изготовление кристаллов простым отделением слоев нужной толщины, при этом дополнительная полировка практически не требуется. Так же согласно [22] возможно применение данного кристалла в качестве генератора в системах с транспортировкой ТГц пучка на значительные расстояния.

В ходе исследований было экспериментально получено излучение в диапазоне 0,2 – 2,5 ТГц с пиковой мощностью 7,5 кВт. Полученное излучение имело невысокую расходимость (рисунок 2) и уверенно определялось при комнатной температуре детектором, оснащенный собирающей системой линз и расположенным на удалении 8 м от НК. В качестве источника накачки использовался фс лазерный комплекс с центральной длиной волны 950 нм и длительностью импульса 60 фс.

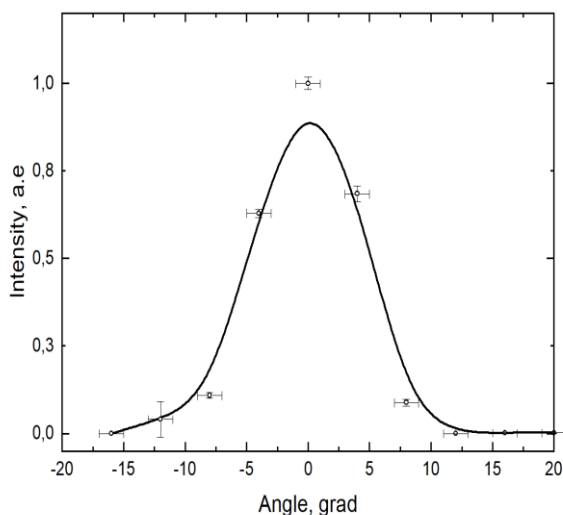


Рисунок 2 – Расходимость ТГц пучка

Полученные в результате экспериментов данные, показывают, что, используя такой генератор совместно с коллимирующим телескопом достаточно легко получить значительную длину сканируемой трассы в атмосфере.



### **3.2. Генерация ТГц излучения фс-импульсом в НК ZGP**

Нелинейный кристалл  $\text{ZnGeP}_2$  (ZGP) имеет диапазон пропускания 0,74 – 12 мкм на нулевом уровне, высокие нелинейные, механические, термические свойства и сравнительно высокий порог разрушения [22]. Благодаря своим свойствам кристалл ZGP широко используется в наносекундных источниках среднего ИК диапазона для получения мощных импульсов при комнатной температуре при накачке в диапазоне 2,5 – 10,7 мкм [21]. Использование наиболее привлекательных твердотельных лазеров (0,67 – 2,5 мкм) в качестве источников накачки затруднено наличием в этом диапазоне интенсивного поглощения с коэффициентом потерь от 0,6 до 5  $\text{см}^{-1}$  и более. Однако в последнее время появился ряд статей, посвященных исследованию возможности генерации ТГц излучения фс-лазерами, накачиваемыми кристаллы ZGP, в том числе в коротковолновой области поглощения [24 – 26].

Были рассчитаны условия генерации ТГц излучения в условиях фазового синхронизма при накачке фс лазером с центральной длиной волны 800 нм или 950 нм и в соответствии с расчетами проведены эксперименты.

Достигнутая пиковая мощность генерируемого ТГц излучения с накачкой на 800 нм составила около 1 кВт, что немного меньше, чем при накачке 950 нм, где мощность составила 1,12 кВт. Результаты хорошо совпали с предварительными оценками.

Следует отметить, что использованный кристалл не обладает высоким оптическим качеством. Использование более качественных кристаллов с более низкими оптическими потерями в диапазоне длин волн накачки должно привести к более высокой эффективности генерации ТГц излучения.

### **3.2. Генерация ТГц излучения фс-импульсом в НК ВВО**

Была также исследована возможность создания генератора ТГц диапазона на базе НК  $\beta$ -ВВО. Согласно расчетам, в таком кристалле возможна генерация лазерной частоты в условиях фазового синхронизма. Данный НК обладает крайне малыми нелинейными коэффициентами ( $d_{22} = 2,2$  пм/В),

однако при этом имеет чрезвычайно высокую лучевую стойкость, что по совокупности параметров должно дать эффективность преобразования не хуже рассмотренных выше НК. Однако в связи с отсутствием НК, вырезанного под углом синхронизма для генерации длинноволнового излучения в спектральной области где имеются окна прозрачности атмосферы (0,02 – 0,5 ТГц) был проведен опыт с имеющимся в наличии кристаллом и получена генерация в диапазоне  $F > 1$  ТГц, где поглощение ВВО высоко, что не позволило в полной мере провести оценки эффективности преобразования, но создало задел для дальнейших работ.

#### **4. Генерация ТГц импульсов в плазме лазерного филамента**

Источник ТГц, создаваемый в воздухе в плазме филамента обладает рядом существенных отличий по сравнению с источниками на базе нелинейных кристаллов. Так как молекулы воды, присутствующие в атмосферном воздухе, хорошо поглощают ТГц излучение, то применение источников на базе НК предъявляет требование к повышенной выходной мощности ТГц генераторов. А благодаря филаменту, ТГц источники могут быть расположены далеко от лазерных систем, что значительно сократит потери, вызванные поглощением в атмосфере [27]. Кроме того, ТГц импульс, создаваемый в плазме лазерного филамента имеет более широкий спектр, а исследуя его поляризацию становится возможным судить о наличии электрического поля в исследуемой среде и его параметрах.

##### **4.1. Известные методы генерации ТГц в филаменте**

Существует несколько методов генерации ТГц излучения при филаментации – одноцветная и двухцветная схемы.

Схема генерации ТГц излучения, где для образования плазменного канала используется излучение с одной длиной волны называется одноцветной.

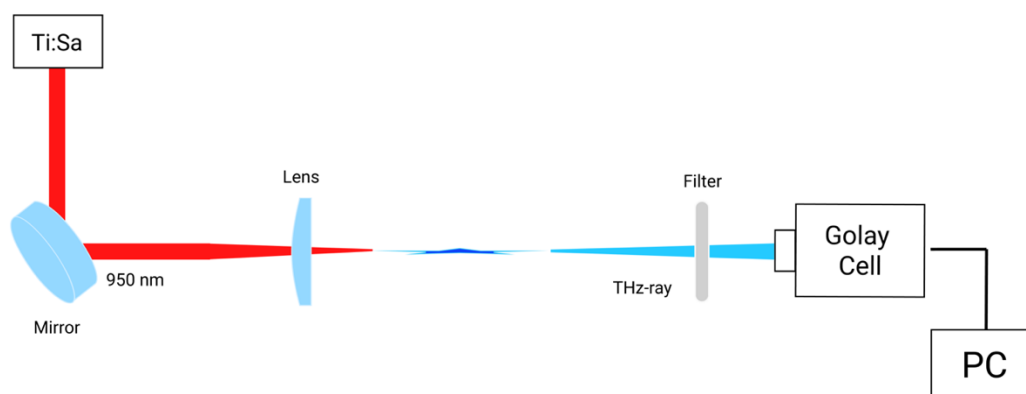


Рисунок 3 – Одноцветная схема

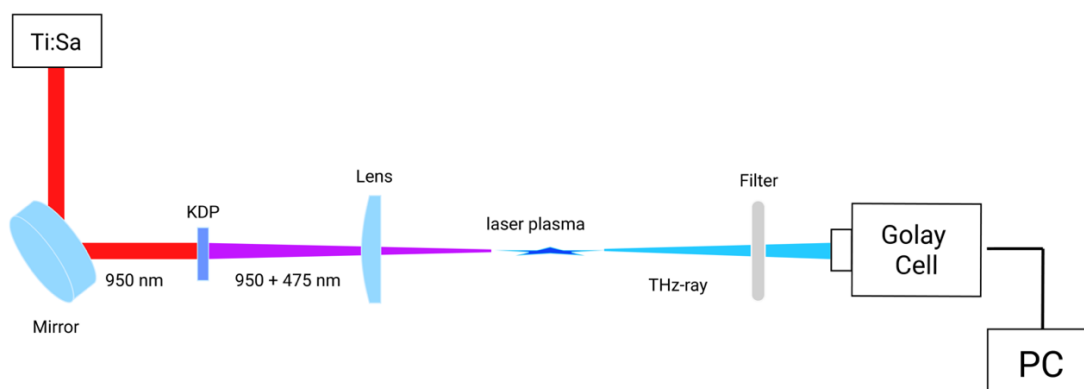


Рисунок 4 – Двухцветная схема

Схема, где ТГц излучение генерируется при коллинеарном распространении импульсов основной и второй гармоник лазера в лазерном филаменте была названа двухцветной.

#### 4.2. Генерация в одноцветной схеме

В [11, 12, 13] для создания филамента в воздухе использовалось лазерное излучение на длине волны 800 нм, с длительностью 120 фс, энергией до 10 мДж и частотой повторения 10 Гц. Нами был поставлен аналогичный эксперимент. В качестве источника накачки служил лазер с центральной длиной волны 950 нм (60 фс, 10 Гц, 5 – 12 мДж). Для регистрации возникающего ТГц излучения использовался программно-аппаратный комплекс на основе ячейки Голя GC-1P (Tydex, Россия), перед входным

окном детектора был установлен набор собирающих линз. Однако полученное ТГц излучение зарегистрировать не удалось. Серия проведенных далее экспериментов (описаны ниже) показала, что виной тому недостаточная чувствительность применяемого в наших условиях детектора.

#### **4.3. Генерация в двухцветной схеме**

Генерация ТГц излучения при смешении первой и второй гармоник неодимового лазера была показана в работах [27, 28], такая схема генерации была названа «двухцветной». Нами также был проведен аналогичный эксперимент. Для генерации второй гармоники (ГВГ) использовался кристалл KDP толщиной 1,8 мм. ГВГ осуществлялась по I типу ( $o+o\rightarrow e$ ), соответственно поляризации первой и второй гармоник излучения лежали в разных плоскостях. Как было выяснено в ходе экспериментов каждая из гармоник вносит свой вклад в поляризацию получаемого ТГц импульса.

#### **4.4. Генерация в одно и двухцветной схемах с поперечным приложением электрического поля**

На рисунке 5 представлена схема эксперимента генерации ТГц излучения в одноцветном филаменте с поперечным приложенным электрическим полем.

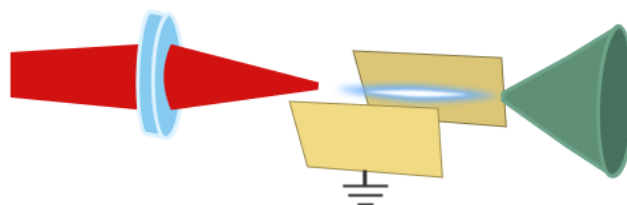


Рисунок 5 – Схема генерации ТГц излучения в одноцветном филаменте с поперечным приложением электрического поля.

В двухцветной схеме для генерации второй гармоники перед собирающей линзой устанавливался кристалл КДП.

На рисунке 6 представлено сравнение зависимости интенсивности ТГц излучения от приложенного к области филаментации внешнего электрического поля в одно- и двухцветной схемах генерации ТГц излучения.

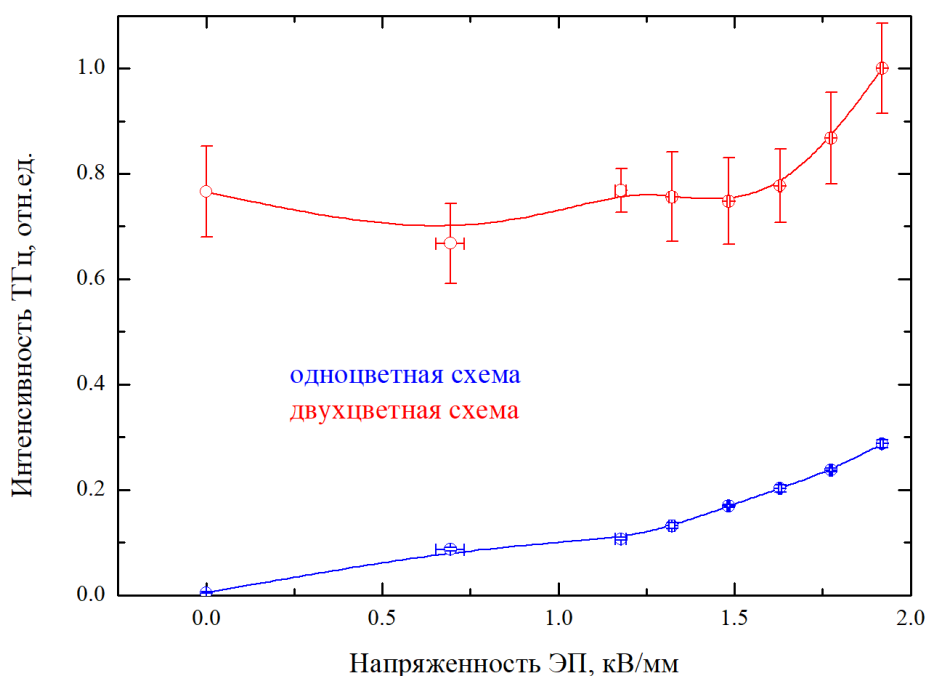


Рисунок 6 – Зависимости интенсивности ТГц излучения от внешнего электрического поля.

Эксперименты показали почти двукратный прирост интенсивности ТГц поля при переходе от одноцветной схемы к двухцветной. Так же было отмечено уменьшение расходимости получаемого ТГц излучения при увеличении напряжения на электродах в обеих схемах. При совпадении направления приложения внешнего ЭП с вертикальной или горизонтальной компонентой излучения накачки наблюдалось усиление соответствующей ей компоненты поляризации возникающего ТГц импульса.

#### 4.5. Генерация в одно и двухцветной схемах с продольным приложением электрического поля

При продольном приложении ЭП, филамент проходит через два круглых электрода, как показано на рисунке 7. В нашем эксперименте диаметр

электродов составлял 60 мм, расстояние между электродами и диаметр отверстий в них – 15 мм. Размер отверстий был обусловлен тем, чтобы расходящееся ТГц поле гарантированно не блокировалось электродной пластиной.

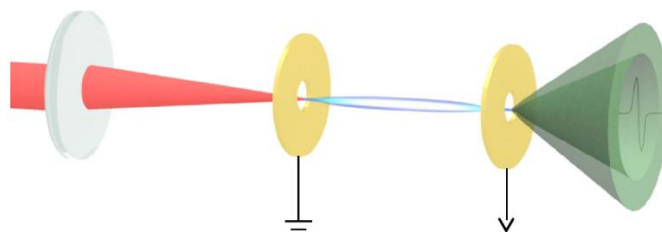


Рисунок 7 – Схема генерации ТГц излучения в одноцветном филаменте с продольным приложенным электрическим полем.

Так же, как и в случае приложения поперечного электрического поля его увеличение приводило к росту интенсивности ТГц излучения, однако направление приложения поля так же оказывало влияние на результат: при смене полярности прикладываемого к электродам напряжения (напряженность поля составляла 600 В/мм), разница сигнала, регистрируемого ТГц детектором составляла порядка 20%.

### **Научные положения, сформулированные на основе результатов исследования**

1) Для получения терагерцовых импульсов киловатной и более мощностей предлагается использовать лазерные импульсы фемтосекундной длительности. Увеличение пиковой мощности достигается за счет большей лучевой стойкости кристаллов при воздействии фемтосекундных импульсов.

2) Детально исследованы способы создания удаленного от системы накачки источника терагерцового излучения в окружающей среде, позволяющего получать информацию об ее свойствах. В экспериментах достигнута мощность 1 кВт в импульсе.

## **Обоснование достоверности полученных результатов**

Достоверность полученных данных обеспечивается тем, что полученные в экспериментах результаты хорошо согласуются с теоретическими оценками и не противоречат известным данным.

## **Обоснование новизны и научной ценности результатов исследования и научных положений**

Полученные в работе результаты и сформулированные научные положения обладают новизной и научной ценностью, поскольку сложность создания эффективных ТГц источников связана с тем, что в ТГц диапазоне плохо применимы хорошо разработанные методы генерации излучений соседних диапазонов – оптического и микроволнового. Источники СВЧ, синхротроны, лазеры на свободных электронах являются дорогими, а также громоздкими, что мешает использовать их в широком применении. Используя фс лазер для реализации ГРЧ в НК или генерации ТГц излучения в плазме лазерного филамента, можно получить компактный, сравнительно недорогой, мощный источник ТГц излучения.

## **Сведения об опубликовании результатов исследования**

1. D. M. Lubenko, G. V. Lansky, N. A. Nikolaev, E. A. Sandabkin, V. F. Losev, Yu. M. Andreev, «Generation of THz emission in nonlinear BBO crystal at room temperature», Proc. SPIE 11322, XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications, 113222C (11 December 2019); <https://doi.org/10.1117/12.2554152>.

2. D. M. Lubenko, V. F. Losev, E. A. Sandabkin, G. V. Lansky, Y. M. Andreev and D. M. Ezhov, «THz pulse generation in ZnGeP<sub>2</sub> with near-IR pumping», 2020 International Conference Laser Optics (ICLO), 2020, pp. 1-1, doi: 10.1109/ICLO48556.2020.9285598.

3. E. A. Sandabkin, D. M. Lubenko and V. F. Losev, «Source of narrowly directed THz radiation for remote sensing systems», 2020 International Conference Laser Optics (ICLO), 2020, pp. 1-1, doi: 10.1109/ICLO48556.2020.9285637.

4. Пыла А. Zyatikov, Valery F. Losev, Dmitriy M. Lubenko, and Evgeniy A. Sandabkin, «Analysis of the active medium parameters of molecular nitrogen ions in ambient air», Opt. Lett. 45, 6518-6521 (2020), doi:10.1364/OL.403577.

### **Сведения о представлении результатов исследования на международных и всероссийских научных конференциях**

1) International Conference Laser Optics (ICLO), 2-6 Nov. 2020, St. Petersburg, Russia. Стендовый доклад.

2) XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications (AMPL-2019), 2019, Tomsk, Russian Federation. Стендовый доклад.

### **Сведения о личном вкладе аспиранта в получение результатов научного исследования**

Подготовка экспериментальной установки для проведения исследований, разработка и сборка оптических схем. Участие в проведении экспериментальных исследований лично автором работы. Обработка и интерпретация полученных данных осуществлялась совместно с сотрудниками лаборатории газовых лазеров ИСЭ СО РАН, в частности, Лубенко Д.М. и Лосев В.Ф. осуществляли постановку задач и курирование выполняемых работ, принимали участие в обсуждении полученных экспериментальных результатов, осуществляли помощь в написании статей. Составление плана, и постановка основных задач научно-исследовательской работы осуществлялось совместно с научным руководителем Лосевым В.Ф.



## Список использованной литературы

1. Zhang X.-C., Xu. J. Introduction to THz Wave Photonics // Springer. 2010. Pp. 1–246.
2. Донин В.И., Никонов А.В., Яковин Д.В. Эффективное удвоение частоты в Nd:YAF-лазере с поперечной диодной накачкой // Квантовая электроника. 2004. Т. 34, С. 930–932.
3. Лубенко Д. М., Лосев В. Ф., Андреев Ю. М., Ланский Г. В. Модельное исследование даун-конверсии ВГ Ti:Sapphire лазера в кристаллах LBO в ТГц диапазон // XV Международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике. 2016. С. 113–113.
4. Царев М.В. Генерация и регистрация терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами // Учебное пособие. 2011. С. 75.
5. Kim K. Y., Taylor A. J., Glowina J. H., Rodriguez G. Coherent control of terahertz supercontinuum generation in ultrafast laser – gas interactions // Nat. Photonics. 2008. Vol. 2. Pp. 605– 609.
6. Rodriguez G., Dakovski G. L. Scaling behavior of ultrafast two-color terahertz generation in plasma gas targets: energy and pressure dependence // Opt. Express. 2010. Vol. 18. No. 14. Pp. 15130–15143.
7. Thomson M. D., Blank V., Roskos H. G. Terahertz white-light pulses from an air plasma photo-induced by incommensurate two-color optical fields // Opt. Express. 2010. Vol. 18. No. 22. Pp. 23173–23182.
8. E. Matsubara, M. Nagai, and M. Ashida, “Ultrabroadband coherent electric field from far infrared to 200 THz using air plasma induced by 10 fs pulses,” Appl. Phys. Lett., vol. 101, no. 1, 2012.
9. Tzortzakis S., Mechain G. M, Patalano G., Andre Y., Prade B., Franco M., and Mysyrowicz A. Coherent subterahertz radiation from femtosecond infrared filaments in air // Opt. Lett. 2002. Vol. 27. No. 21. Pp. 1944–1946.
10. Mechain G. M, Tzortzakis S., Prade B., Franco M., Mysyrowicz A., Leriche B. Calorimetric detection of THz radiation from femtosecond filaments in air // Appl. Phys. B Lasers Opt. 2003. Vol. 77. No. 8. Pp. 707–709.

11. Amico C. D., Houard A., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A., Coherent and incoherent radial THz radiation emission from femtosecond filaments in air // *Opt. Express*. 2007. Vol. 15. No. 23. Pp. 15274–15279.
12. Bartel T., Gaal P., Reimann K., Woerner M., Elsaesser T. Generation of single-cycle THz transients with high electric-field amplitudes // *Opt. Lett.* 2005. Vol. 30, No. 20. Pp. 2805–2807.
13. D'Amico C., Houard A., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A., Couairon A., Tikhonchuk V. T. Conical forward THz emission from femtosecond-laser-beam filamentation in air // *Phys. Rev. Lett.* 2007. Vol. 98. No. 23. Pp. 8–11.
14. Liu Y., Houard A., Prade B., Akturk S., Mysyrowicz A., Tikhonchuk V. T. Terahertz radiation source in air based on bifilamentation of femtosecond laser pulses // *Phys. Rev. Lett.* 2007. Vol. 99, No. 13, Pp. 1–4.
15. Wang T. J., Yuan S., Chen Y., Daigle J. F., Marceau C., Theberge F., Chateauneuf M., Dubois J., Chin S. L. Toward remote high energy terahertz generation // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 97, No. 11.
16. Daigle J.-F. F., Theberge F., Henriksson M., Wang T.-J. J., Yuan S., Chateauneuf M., Dubois J., Piche M., Chin S. L. Remote THz generation from two-color filamentation: long distance dependence // *Opt. Express*. 2012. Vol. 20, No. 6. Pp. 6825–6834.
17. Mechain G. M., D'Amico C., Andre Y. B., Tzortzakis S., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A., Couairon A., Salmon E., Sauerbrey R. Range of plasma filaments created in air by a multiterawatt femtosecond laser // *Opt. Commun.* 2005. Vol. 247. No. 1–3. Pp. 171–180.
18. Andreeva V.A., Kosareva O.G., Panov N.A., Shipilo D.E., Solyankin P.M., Esaulkov M.N., Gonzalez de Alaiza Martinez P., Shkurinov A.P., Makarov V.A., Berge L., Chin S.L. Ultrabroad terahertz spectrum generation from an air-based filament plasma // *Physical Review Letters*. 2016. Pp. 116.
19. Алексеев С. В. , Аристов А. И. , Грудцын Я. В. , Иванов Н. Г. , Ковальчук Б. М., Лосев В. Ф. Гибридные фемтосекундные системы видимого

диапазона на основе XeF(C-A)-усилителя: состояние и перспективы // Квантовая электроника. 2013. Т.43. №3. С. 190–200.

20. Фемтосекундная лазерная система «Старт-480М». Руководство пользователя. С. 52.

21. Nikogosyan D.N. Nonlinear optical crystals, 3rd rev. – Springer: New York, 2005. – 413 с.

22. Huang Z.-M., Huang J.-G., Gao Y.-Q., Kokh K.A., Lanskii G.V. High-resolution terahertz spectrometer with up to 110 m single-pass base // Proceedings of 41st IRMMW-THz. IEEE. 2016. Pp. 1-2.

23. Boyd G.D., Bridges T.J., Patel C.K.N., Buehler E. Continuously phase-matched terahertz difference frequency generation in an embedded-waveguide structure supporting only fundamental modes // Appl. Phys. Lett. 1972. Vol. 21, No. 11, Pp.553–555.

24. Rowley J.D., Pierce J.K., Brant A.T., Halliburton L.E., Giles N.C., Schunemann P.G., Bristow A.D. Broadband terahertz pulse emission from ZnGeP<sub>2</sub> // Optics Letters. 2012. Vol. 37. Issue 5, Pp. 788–790.

25. Rowley D., Wahlstrand J.K., Zawilski K.T., Schunemann P.G., Giles N.C., Bristow A.D. Terahertz generation by optical rectification in uniaxial birefringent crystals // Optics Express. 2012. Vol. 20. Issue 15. Pp. 16968-16973.

26. Piyathilaka H.P., Sooriyagoda R., Dewasurendra V., Johnson M.B., Zawilski K.T., Schunemann P.G., Bristow A.D. // Optics Express. 2019. Vol. 27. Issue 12, Pp. 16958-16965.

27. Yi Liu Terahertz Radiation from a Longitudinal Electric Field Biased Femtosecond Filament in Air // Chinese Physics Letters. 2020. No.37. Pp. 5.

28. Wang T., Marceau C., Yuan S., Chen Y., Wang Q., Th F. External focusing effect on terahertz emission from a two-color femtosecond laser-induced filament in air // Laser Physics Letters. 2011. Vol. 61. No. 1. Pp. 57–61.