

УДК 535-92, 535-14, 608.3

РАСЧЕТ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ЗЕРКАЛЬНОГО ОБЪЕКТИВА ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКОГО СПЕКТРОГРАФА-ИНТРАВИЗОРА

Е.В. Новоселов, В.Г. Беспалов

Представлены результаты моделирования перестраиваемого зеркального объектива для импульсного терагерцового рефлектометрического спектрографа-интравизора с использованием программы Zemax.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, рефлектометр, спектрограф-интравизор, зеркальный объектив.

Введение

Излучение терагерцового (ТГц) диапазона имеет уникальные характеристики: многие вещества являются прозрачными для данного излучения. В сравнении с видимыми или инфракрасными волнами ТГц излучение может проникать в органические материалы, такие как кожа, пластики, одежда или бумага. Вследствие низкой энергии ТГц фотона оно не вызывает повреждений, связанных с ионизирующими излучениями (такими, как рентгеновское или УФ излучение). Благодаря этим свойствам данный вид излучения идеально подходит для неразрушающей диагностики, что необходимо, например, при контроле содержимого багажа в аэропортах, обнаружении прослушивающего оборудования либо тайников в помещениях, а также в медицине для исследования тканей человека [1]. В то же время ТГц диапазон охватывает актуальную область колебательных, вращательных и трансляционных линий широкого класса органических молекул, что важно для целей спектроскопии и диагностики материалов [2].

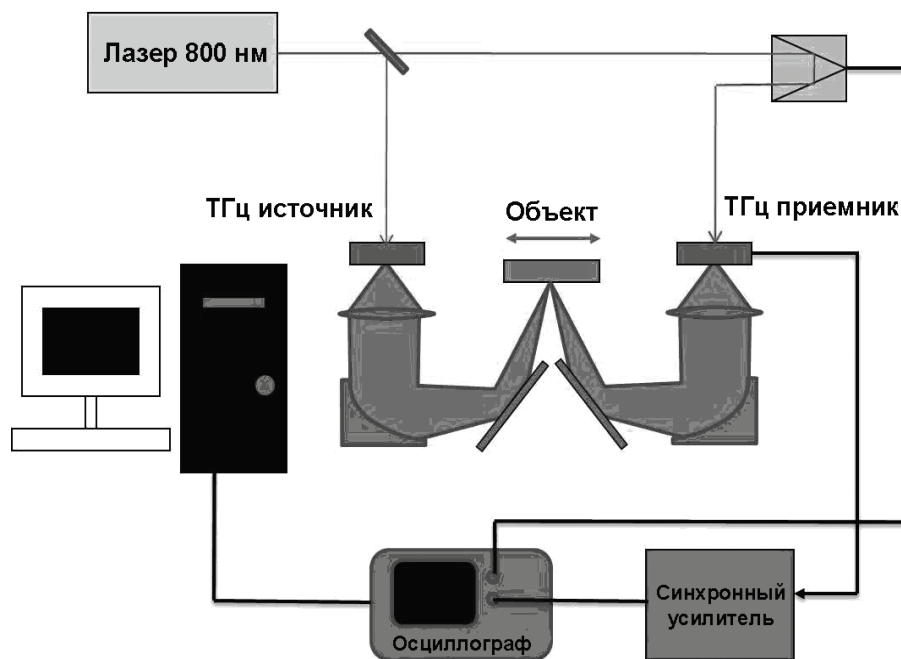


Рис. 1. Схема терагерцового рефлектометра, использующая параболические зеркала для фокусировки ТГц излучения

Фокусировка терагерцового излучения

В настоящее время для фокусировки ТГц излучения наиболее часто применяются схемы, использующие внеосевые параболические зеркала.

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки, использованной в работе [3]: для генерации ТГц излучения выращенный при низкой температуре кристалл GaAs облучался импульсным излучением лазера на титане с сапфиром с длиной волны 800 нм, длительностью 80 фс и частотой следования импульсов 80 МГц. Образец помещался на моторизованную платформу, которая позволяла осуществлять линейное сканирование. Фокусировка и сбор отраженного излучения осуществлялись при помощи систем, использующих линзы и внеосевые параболические зеркала.

Недостатком использования параболических зеркал является сложность расчета и юстировки; кроме того, представленные в литературе фокусирующие системы обычно не являются перестраиваемыми.

Целью данной работы является разработка оптической схемы (рис. 2) для проведения экспериментов по исследованию термобарьерного покрытия турбинных лопаток.

Терагерцовый рефлектометрический спектрограф-интравизор

Нами предложена схема терагерцового рефлектометрического спектрографа-интравизора, которая приведена на рис. 2. Для получения излучения в диапазоне 0,1–1,5 ТГц применяется метод генерации фотопроводящей антенной при облучении фемтосекундными импульсами [4]. В качестве источника накачки используется фемтосекундный Yb:KYW-лазер Solar FL-1 (длина волны 1040 нм, длительность импульса 150 фс, частота следования 80 МГц, средняя мощность 1,2 Вт). Излучение лазера попадает на полупроводниковый кристалл InAs, помещенный в центр магнитной системы с постоянным магнитным полем величиной 1,8 Тл, где путем возбуждения фотоносителей и происходит генерация ТГц излучения. Форма спектра ТГц излучения близка к колоколообразной с центром вблизи 0,3 ТГц и шириной от 0,1 до 1,5 ТГц по уровню 0,01 и приведена на рис. 3.

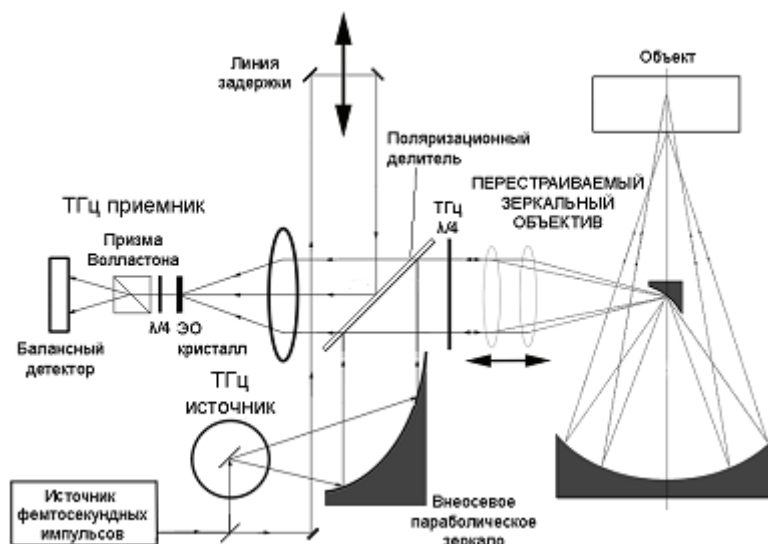


Рис. 2. Схема импульсного терагерцового рефлектометрического спектрографа-интравизора с перестраиваемым зеркальным объективом

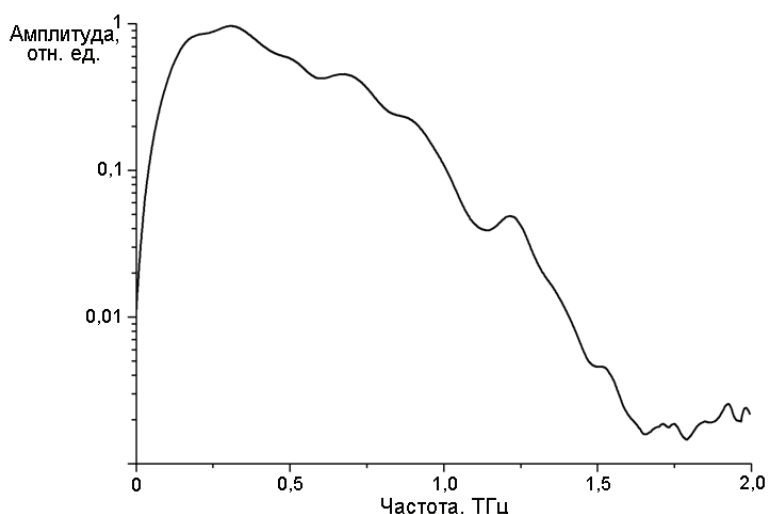


Рис. 3. Спектр ТГц излучения

Далее ТГц излучение коллимируется параболическим зеркалом с главным фокусом 120 мм и апертурой 90 мм, после чего попадает на поляризационный делитель, от которого отражается излучение только вертикальной линейной поляризации, которое, пройдя четвертьволновую пластинку, преобразуется в излучение с круговой (например, правосторонней) поляризацией. Далее с использованием перестраиваемого зеркального объектива излучение фокусируется в требуемой точке исследуемого объекта. Отражаясь от обычного изотропного образца, излучение, как правило, сохраняет поляризацию; т.е. при распространении в обратном направлении на четвертьволновую пластинку приходит излучение с круговой, но уже с левосторонней поляризацией. Пройдя четвертьволновую пластинку, излучение с левосторонней круговой поляризацией преобразуется в излучение с горизонтальной поляризацией и проходит

через ТГц поляризационный делитель. Далее излучение фокусируется на электрооптический детектор (ЭО) – кристалл теллурида кадмия, вырезанный по направлению [100]. При попадании одновременно пробного пучка фемтосекундного излучения и пучка ТГц излучения на электрооптический кристалл CdTe ТГц импульс наводит в кристалле двулучепреломление для пробного пучка вследствие электрооптического эффекта [5]. Величина двулучепреломления прямо пропорциональна напряженности электрического поля ТГц волны в данный момент $E(t)$. Измерение двулучепреломления производится устройством, состоящим из четвертьволновой пластины, призмы Волластона, балансного фотодетектора и синхронного усилителя, управляемого от оптико-механического модулятора, помещенного в пучок накачки. Сигнал с синхронного усилителя поступает на цифровой вольтметр, что позволяет производить измерения с помощью персонального компьютера.

Перестраиваемый зеркальный объектив

Перестраиваемый зеркальный объектив состоит из двух зеркал и собирающей линзы. Одно из зеркал радиусом 250 мм является сферическим и имеет радиус кривизны 450 мм. Преимуществом использования для фокусировки сферического зеркала является уменьшение габаритов объектива. Второе зеркало – плоское, радиусом 40 мм.

В качестве материала для собирающей линзы был выбран полиметилпентен (TPX) [6]. Он прозрачен для излучения в ультрафиолетовом, видимом и дальнем инфракрасном диапазонах. Его показатель преломления равен $1,460 \pm 0,006$, и он практически не зависит от длины волны. Оптические потери в материале очень низкие вплоть до миллиметровых волн. Дисперсия показателя преломления полиметилпентена приведена в таблице. Расчет проводился для длины волны 500 мкм. Для аппроксимации показателя преломления использовалась формула Конради.

λ , мкм	n
0,633	1,4630
24	1,4568
60	1,4559
300	1,4600
667	1,4600
1000	1,4650
3191	1,4660

Таблица. Дисперсия показателя преломления полиметилпентена

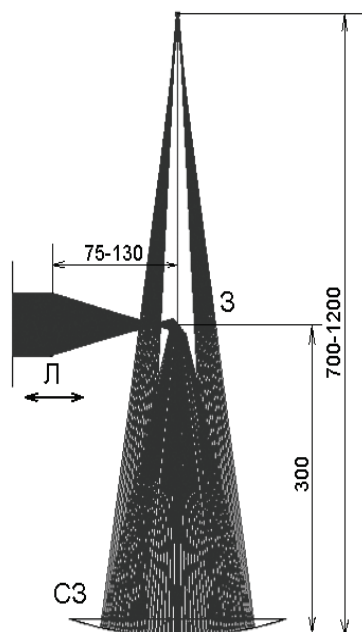


Рис. 4. Схема перестраиваемого зеркального объектива:
Л – линза; З – зеркало; СЗ – сферическое зеркало. Размеры указаны в миллиметрах

Для расчета объектива использовалась программа Zemax [7], применяемая при проектировании оптических систем. Программа Zemax позволяет моделировать и рассчитывать оптические и оптико-механические системы различной сложности методом трассировки лучей. В результате получено, что наиболее оптимальный результат по таким параметрам, как минимальный размер объектива, минимальный размер пятна фокусировки и максимальная величина апертуры сферического зеркала, достигается при использовании линзы с радиусом кривизны обеих поверхностей 100 мм и толщиной 10 мм. Рассчитанный объектив обеспечивает перестройку глубины фокусировки на 500 мм. На рис. 4 приведена схема рассчитанного объектива, смоделированного в программе Zemax.

Заключение

В результате компьютерного моделирования в программе Zemax рассчитаны параметры зеркального объектива для импульсного терагерцового рефлектометрического спектрографа-интравизора, удовлетворяющего заданным требованиям: фокусировка излучения на длине волны 500 мкм, изменение расстояния фокусировки на 500 мм. В дальнейшем планируется изготовление необходимых деталей перестраиваемого зеркального объектива, создание импульсного терагерцового рефлектометрического спектрографа-интравизора и проведение на нем экспериментов.

Работа выполнялась в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, ГК № П872.

Литература

1. Dragoman D., Dragoman M. Terahertz field and application // Progress in Quantum Electronics. – 2004. – V. 28. – P. 1–66.
2. Fitzgerald A. J. et al. An introduction to medical imaging with coherent terahertz radiation // Phys. Med. Biol. – 2002. – V. 47. – P. 3727–3734.
3. Chia-Chu Chen et al. Pulsed-terahertz reflectometry for health monitoring of ceramic thermal barrier coatings // Opt. Exp. – 2010. – V. 18. – № 4. – P. 3477–3486.
4. Беспалов В.Г., Городецкий А.А., Денисюк И.Ю., Козлов С.А., Крылов В.Н., Лукомский Г.В., Петров Н.В., Путилин С.Э. Методы генерации сверхширокополосных ТГц импульсов фемтосекундными лазерами. // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75. – № 10. – С. 34–41.
5. Cook D.J., Hochstrasser R.M. Intense terahertz pulses by four-wave rectification in air // Optics Letters. – 2000. – V. 25. – № 16. – P. 1210–1212.
6. ТГц материалы: сайт ЗАО «Тидекс» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://tydex.ru/ru/products/thz_optics/thz_materials/, свободный. Яз. рус. (дата обращения 05.10.2010).
7. ZEMAX-EE: сайт «ZEMAX Development Corporation» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.zemax.com/index.php?option=com_content&task=category&ionid=12&id=49&Itemid=132, свободный. Яз. англ. (дата обращения 05.10.2010).

- Новоселов Евгений Владимирович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, eugene.novoselov@gmail.com
- Беспалов Виктор Георгиевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, vic-torbespaloff@gmail.com