УДК 535-14

# УВЕЛИЧЕНИЕ СООТНОШЕНИЯ СИГНАЛ-ШУМА ДЕТЕКТИРУЕМОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ПОЛЯ В КРИСТАЛЛЕ CdTe ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВЗАИМНОГО УГЛА МЕЖДУ ПОЛЯРИЗАЦИЯМИ ТГЦ И ИК ИМПУЛЬСОВ

В.С. Шумигай, Е.Н. Опарин, А.Н. Цыпкин

В работе предложена методика оптимизации параметров стандартной установки терагерцовой спектроскопии с разрешением по времени, позволяющая повысить соотношение сигнал-шум. В качестве детектирующего кристалла использовался теллурид кадмия (CdTe), срезанный вдоль плоскости (110). Источником излучения накачки был выбран фемтосекундный твердотельный иттербиевый лазер с центральной длиной волны излучения 1050 нм. Исследование детектирующих свойств электрооптического кристалла CdTe для трех углов между поляризациями зондирующего и терагерцового импульса показало, что максимальное соотношение сигнал-шум достигается при угле между поляризациями, равном 90 градусов.

**Ключевые слова:** терагерцовое излучение, электрооптическое детектирование, импульсное излучение, поляризация.

## 1. Введение

Излучение терагерцового диапазона частот находит множество применений на практике, например, в спектроскопии, в получении изображений, а также для передачи информации и при исследовании свойств различных материалов [1, 2]. Одним из способов детектирования широкополосного терагерцового излучения является метод электрооптического стробирования, основанный на эффекте Поккельса. Поле терагерцового импульса наводит в оптически-изотропном кристалле двойное лучепреломление, величина

Университет ИТМО, 197101 Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. A; e-mail: vshumigay.itmo@gmail.com.

которого линейно зависит от амплитуды ТГц излучения [3]. Наведенная анизотропия приводит к изменению поляризации зондирующего инфракрасного импульса, распространяющегося через кристалл вместе с терагерцовым, что и регистрируется в ходе эксперимента.

Важную роль в процессе детектирования играет значение угла поворота кристалла CdTe вокруг его оптической оси [110], а также взаимная ориентация поляризаций зондирующего и TГц импульса до прохождения через кристалл.

В работах [4, 5], где кристалл CdTe использовался в качестве детектирующего кристалла широкополосного терагерцового излучения в спектрометре с разрешением по времени, центральная длина волны была 800 нм. Как следует из работ [6, 7], при таком выборе детектирующего кристалла наибольший диапазон синхронизма между ИК и ТГц излучением достигается при длине волны накачки, равной 1055 нм. Экспериментального измерения эффективности использования данного кристалла при детектировании не проводилось. В работе [8] рассматривались зависимости амплитуды ТГц импульса от угла между поляризациями пробного и ТГц импульса для кристалла ZnTe. Необходимо отметить, что данный кристалл обладает меньшим электрооптическим коэффициентом  $r_{41}$ , чем CdTe. В результате было предложено использовать конфигурацию установки терагерцовой спектроскопии с разрешением по времени, для которой в качестве детектирующего кристалла использовался CdTe, срезанный вдоль плоскости (110) и обладающий толщиной 5 мм, а длина волны накачки равнялась 1050 нм, близкой к оптимальной для данного кристалла. Для оценки параметров установки, при которых достигается максимальное соотношение сигнал-шум, было проведено исследование зависимости амплитуды ТГц поля от угла между поляризациями пробного и ТГц импульса и угла поворота кристалла CdTe вокруг оптической оси. По полученным результатам был найден угол взаимной ориентации поляризаций двух импульсов, при котором амплитуда детектируемого терагерцового импульса достигала наибольшего значения.

#### 2. Экспериментальные методы

2.1. Экспериментальная установка. В качестве источника излучения использовался фемтосекундный Yb-лазер с центральной длиной волны излучения 1050 нм, длительностью импульсов 100 фс и их энергией 30 нДж. Генерация ТГц излучения осуществлялась в кристалле InAs за счет эффекта Дембера в узкозонном полупроводнике. Кристалл CdTe был выбран в качестве детектирующего ввиду его высокого (среди кристаллов со структурой цинковой обманки) электрооптического коэффициента  $r_{41} = 4.5 \text{ пм/B}$  для излучения на длине волны 1050 нм. Спектр детектируемого ТГц излучения обладал полушириной 0.5 ТГц и центральной частотой, равной 0.4 ТГц.

Измерения проводились на установке ТГц спектроскопии с разрешением по времени [9]. Непосредственно схема системы электрооптического детектирования изображена на рис. 1. Так, после кристалла пробный пучок проходит через четвертьволновую пластинку и попадает на призму Волластона, где разделяется на два пучка, каждый из которых содержит в себе одну из ортогональных поляризационных компонент исходного. Мощности пучков детектируются двумя фотодиодами, установленными в балансном детекторе.



Рис. 1: Принципиальная схема системы электрооптического детектирования:  $\lambda/4$  – четвертьволновая пластинка;  $\mathcal{A}_1$ ,  $\mathcal{A}_2$  – детекторы.

Так как терагерцовое поле меняется медленно по сравнению с длительностью фемтосекундного лазерного импульса, то можно считать, что при электрооптическом стробировании детектируется квазипостоянное электрическое поле. При этом предполагается, что взаимная задержка зондирующего и терагерцового импульсов в кристалле невелика, то есть можно считать, что зондирующий импульс взаимодействует с одним и тем же участком терагерцового импульса при их распространении через кристалл. Для того чтобы измерить другой участок терагерцового импульса, изменяют временную задержку зондирующего импульса на некоторую величину [10]. Сканируя задержку, получают всю волновую форму (осциллограмму) терагерцового импульса.

Для анализа эффективности детектирования терагерцового поля необходимо непосредственно получить волновую форму импульса для различных углов поворота детектирующего кристалла CdTe вокруг оптической оси и для различной ориентации поляризаций TГц и пробного ИК пучка. При этом поляризация зондирующего импульса варьируется при помощи призмы Глана и четвертьволновой пластинки, а поляризация TГц импульса остается неизменной для каждого из экспериментов и направленной перпендикулярно оси z и оси [110].



Рис. 2: Зависимость амплитуды ТГц поля от угла поворота детектирующего кристалла CdTe вокруг оптической оси при угле между поляризациями зондирующего и терагерцового пучка, равного: (a) 45°, (б) 0°, (в) 90°.

2.2. Измерение и обработка данных. В данной работе исследуемый диапазон углов поворота кристалла вокруг оптической оси приведен от 0 до 360 градусов с шагом в 10 градусов. На каждой временной форме ТГц импульса был выявлен пик, после чего для найденных значений был построен график зависимости от углов поворота детектирующего кристалла вокруг оптической оси.

На рис. 2(а) приведен график зависимости амплитуды ТГц импульса от угла поворота кристалла CdTe вокруг оси [110] при угле между поляризациями ТГц и зондирующего импульса, равного 45 градусам. На графике наблюдаются пики с периодичностью в 60 градусов, причем значения амплитуды поля на 130 и 190 градусах максимальны. Аналогичные графики можно построить и для угла между поляризациями ТГц и зондирующего импульса, равного 0 и 90 градусов. Эти зависимости изображены на рис. 2(б) и 2(в). Для каждого набора экспериментальных данных среднеквадратичное отклонение равнялось 0.12, 0.14 и 0.18 соответственно.

Экспериментальные данные были получены в относительных единицах и нормированы на единицу, после чего теоретические и экспериментальные максимумы сигналов были совмещены. Данная методика позволила добиться совпадения экспериментальных и теоретических данных со средним отклонением в 7.5%.

В работе [6] приведены теоретические зависимости интенсивности выходного сигнала от угла наклона поляризаций ТГц и пробного импульса к оси z для кристалла ZnTe. Так как кристалл ZnTe является кристаллом со структурой цинковой обманки, его теоретическое описание полностью совпадает с описанием соответствующих зависимостей для кристалла CdTe. Значит, сигнал от балансного детектора  $\Delta I(\alpha, \beta)$  пропорционален приложенному электрическому полю:

$$\Delta I(\alpha, \beta) \sim E_T(\cos\alpha \cdot \sin 2\beta + 2\sin\alpha \cdot \cos 2\beta),\tag{1}$$

где  $\alpha$  – угол между поляризацией терагерцового импульса и осью z,  $\beta$  – угол между поляризацией пробного импульса и осью z.

Согласно этим зависимостям максимальное значение сигнала достигается при  $\beta = \alpha$ или  $\beta = \alpha + 90^{\circ}$ . Однако в эксперименте было выявлено, что наибольшее соотношение сигнал-шум пришлось на угол между поляризациями двух импульсов, равный именно 90 градусов. При этом кристалл CdTe был повернут вокруг оптической оси на угол в 90 градусов. Это расхождение связано с внутренними деформациями, образованными в процессе роста кристалла.

## 3. Заключение

В данной работе была предложена вариация установки терагерцовой спектроскопии с разрешением по времени, суть которой заключается в выборе теллурида кадмия в качестве детектирующего кристалла, а также в использовании длины волны накачки, равной 1050 нм. Для такой конфигурации были подобраны углы поворота кристалла вокруг оптической оси, при которых амплитуда детектируемого сигнала достигала максимального значения. Сделано это было для трех углов между поляризациями зондирующего и ТГц импульса. Все это позволяло достигнуть соотношения сигнал-шум спектрометра, значение которого превышало 10<sup>3</sup>.

Сравнение максимальных амплитуд сигналов, полученных для трех различных углов между поляризациями ТГц и зондирующего импульса, показывает, что наибольшее соотношение сигнал-шум приходится на угол в 90 градусов (при условии, что угол между поляризацией ТГц импульса и осью [001] равен 90 градусов). Так, пиковое значение поля (при заданном угле поворота кристалла) для угла между поляризациями, равного 90 градусов, на 12.5% и 11% больше пиковых значений для углов поворота кристалла, равных 45 и 0 градусов, соответственно.

Найденные зависимости согласуются с теоретическими оценками из работы [8, 11] для углов между поляризациями, равных 45 и 90 градусов. Для угла в 0 градусов в эксперименте наблюдались меньшие значения соотношения сигнал-шум, что связано с особенностями роста кристалла.

Полученный результат важен для прикладных вопросов терагерцовой спектроскопии по времени, так как при определенном подборе угла поворота кристалла CdTe и угла между поляризациями пробного и TГц импульса можно добиться увеличения соотношения сигнал-шум в 20 раз. К примеру, предложенная конфигурация установки позволила добиться увеличения точности измерения показателя преломления кристалла LiNbO<sub>3</sub>, за счет увеличения амплитуды детектируемого TГц поля.

# ЛИТЕРАТУРА

- K. Ahi, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology 7(6), 747 (2017). DOI: 10.1109/TTHZ.2017.2750690.
- [2] M. Wang, E. H. Yang, Nano-Structures and Nano-Objects 15, 107 (2018). DOI: 10.1016/j.nanoso.2017.08.011.
- [3] S. P. Kovalev, G. K. Kitaeva, Journal of the Optical Society of America B 30(10), 2650 (2013). DOI: 10.1364/JOSAB.30.002650.
- [4] X. Xu, J. Xu, X. C. Zhang, Opt. Lett. **31**, 978 (2006). DOI: 10.1364/OL.31.000978.
- [5] K. Liu, H. S. Kang, T. K. Kim, X. C. Zhang, Appl. Phys. Lett. 81, 4115 (2002). DOI: 10.1063/1.1524696.
- [6] X. Ropagnol, M. Matoba, J. E. Nkeck, et al., Applied Physics Letters 117(18), 181101 (2020). DOI: 10.1063/5.0024112.

- [7] B. Pradarutti, G. Matthäus, S. Riehemann, et al., Optics Communications 281(19), 5031 (2008). DOI: 10.1016/j.optcom.2008.06.055.
- [8] P. C. Planken, H. K. Nienhuys, H. J. Bakker, T. Wenckebach, Journal of the Optical Society of America B 18(3), 313 (2001). DOI: 10.1364/JOSAB.18.000313.
- [9] M. O. Zhukova, B. T. Hogan, E. N. Oparin, et al., Nanoscale Research Letters 14(1), (2019). DOI: 10.1186/s11671-019-3062-3.
- [10] A. Nahata, A. S.Weling, T. F. Heinz, Applied Physics Letters 69(16), 2321 (1996). DOI: 10.1063/1.117511.
- [11] N. C. van der Valk, T. Wenckebach, P. C. Planken, JOSA B 21(3), 622 (2004). DOI: 10.1364/JOSAB.21.000622.

Поступила в редакцию 20 января 2022 г.

После доработки 16 октября 2022 г.

Принята к публикации 17 октября 2022 г.