

## ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 535 : 33

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ  
ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ  
ИМПУЛЬСНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО СПЕКТРОМЕТРА\*А. А. Мамрашев<sup>1,2</sup>, О. И. Потатуркин<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Учреждение Российской академии наукИнститут автоматизации и метрологии Сибирского отделения РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1<sup>2</sup> Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Новосибирский государственный университет»,

630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

E-mail: mamrashev@iae.nsk.su

Рассмотрены характеристики системы поляризационно-оптической регистрации импульсного терагерцового спектрометра в нелинейных кристаллах теллурида цинка (ZnTe). Экспериментально исследовано влияние толщины кристаллов ZnTe (0,5, 1 и 2 мм) на чувствительность системы регистрации, проведено сравнение с модельными расчётами. Экспериментально и теоретически показано влияние временного шага и диапазона сканирования терагерцового импульса на спектральное разрешение и диапазон спектрометра. Измерены терагерцовые спектры пропускания типичных контейнерных материалов.

*Ключевые слова:* терагерцовая спектроскопия, поляризационно-оптическая регистрация.

**Введение.** Терагерцовый диапазон частот (0,3–10 ТГц) является наименее изученной областью электромагнитного спектра, однако представляет значительный интерес для фундаментальных исследований и практических применений [1]. В этом диапазоне развиваются как традиционные методы спектроскопии, основанные на генераторах узкополосного перестраиваемого излучения [2], так и импульсные методы на основе источников, преобразующих оптические импульсы ближнего ИК-диапазона в терагерцовые [3]. В первом случае регистрируется интенсивность излучения на определённых частотах, а в случае импульсной спектроскопии применяются методы регистрации временной формы коротких пикосекундных импульсов, имеющих широкий спектральный диапазон. Когерентная регистрация имеет преимущество перед традиционной, так как позволяет измерить не только амплитуду, но и фазу излучения, что при последующем определении свойств материалов избавляет от использования соотношений Крамерса — Кронига. Кроме того, с помощью импульсного спектрометра путём его незначительной модификации могут быть реализованы исследования кинетики процессов с применением метода pump-probe [4].

Когерентная регистрация в импульсных спектрометрах может осуществляться двумя основными способами: одновременным взаимодействием терагерцовых и пробных оптических импульсов в нелинейных кристаллах [3] и в фотопроводящих антеннах [5]. Так как длительность терагерцовых импульсов на несколько порядков больше оптических, поле терагерцовых импульсов можно считать для них постоянным. Поляризационно-оптический метод регистрации основан на том, что поле терагерцового импульса вызывает изменение

\*Работа выполнена при поддержке Президиума РАН (программа № 21 «Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов»).

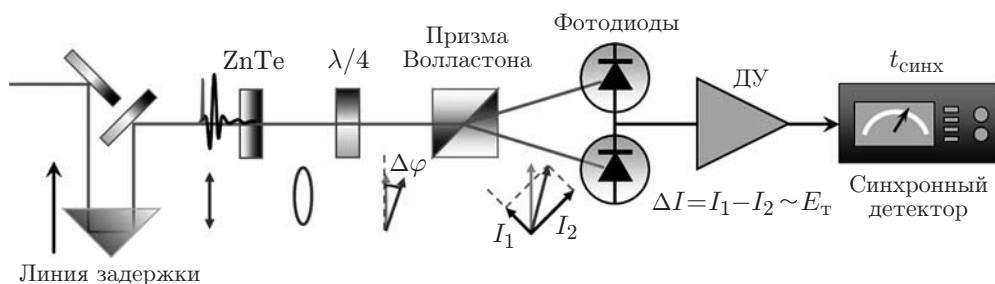


Рис. 1. Схема поляризационно-оптической регистрации (ДУ — дифференциальный усилитель)

эллипсоида показателей преломления нелинейного кристалла, благодаря чему меняется поляризация пробного импульса, которая затем преобразуется в электрический сигнал. При регистрации в фотопроводящих антеннах фотоносители, рождающиеся при поглощении оптических импульсов и имеющие малое время жизни (несколько сотен фемтосекунд), движутся в терагерцовое поле, формируя импульсы тока. Используя линию задержки пробных импульсов относительно терагерцовых, можно получить зависимость амплитуды терагерцового поля от времени, т. е. временную форму терагерцового импульса.

В данной работе рассматривается система поляризационно-оптической регистрации терагерцового излучения и влияние её параметров, в частности свойств нелинейного кристалла, на спектральную чувствительность, разрешение и спектральный диапазон.

**Экспериментальная установка.** Исследование системы регистрации проведено в составе созданного импульсного терагерцового спектрометра [6]. Генерация импульсного терагерцового излучения осуществляется в поверхностном слое кристалла арсенида индия (InAs) [7]. Источником пробных оптических импульсов длительностью 110 фс на длине волны 775 нм является волоконный лазер с модулем, осуществляющим преобразование исходного излучения во вторую гармонику. В качестве нелинейного кристалла регистрации использован теллурид цинка (ZnTe) ориентации (110) с просветляющим покрытием на длине волны 775 нм. Поляризационно-оптическая регистрация в нём основана на эффекте Поккельса. Электрическое поле терагерцового импульса вызывает изменение эллипсоида показателей преломления, благодаря чему линейная поляризация пробного импульса, проходящего через нелинейный кристалл, становится эллиптической. Дальнейшее преобразование эллиптичности в поворот плоскости поляризации четвертьволновой пластинкой с последующим разложением на две ортогональные компоненты призмой Волластона и дифференциальной регистрацией их интенсивностей ( $I_1, I_2$ ) кремниевыми  $p-i-n$ -фотодиодами позволяет получить результирующий разностный сигнал, пропорциональный напряжённости терагерцового поля (рис. 1).

Оптическая линия задержки представляет собой линейный позиционер с установленным на нём уголковым отражателем. С её помощью изменяется длина оптического пути пробных импульсов и формируется задержка с заданным временным шагом  $\delta t$  в диапазоне  $T$ . В каждом положении линии задержки синхронный детектор, настроенный на частоту модуляции генерируемого терагерцового излучения, измеряет разностный сигнал фотодиодов. Таким образом осуществляется сканирование временной формы терагерцового импульса (рис. 2). Управление линией задержки, установка параметров сканирования и запись временной формы производятся с помощью компьютера со специализированным программным обеспечением. Спектр сигнала вычисляется путём цифрового преобразования Фурье.

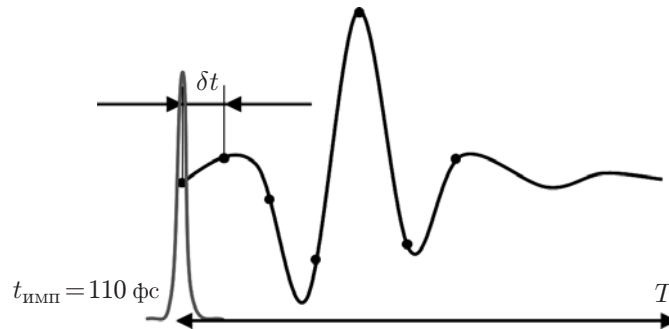


Рис. 2. Сканирование терагерцового импульса

**Влияние толщины кристалла регистрации.** Теория поляризационно-оптической регистрации хорошо изучена [8]. Измеряемый поляризационно-оптический сигнал (терагерцовый импульс)  $E_T^*(f)$  зависит не только от действительной формы генерируемого импульса  $E_T(f)$ , но и от передаточной функции спектрометра и свойств системы регистрации. В частности, измеряемый сигнал  $E_T^*(f)$  пропорционален функции  $S(f, d)$ , имеющей размерность длины и выражающей зависимость спектральной чувствительности системы регистрации от толщины нелинейного кристалла [9]:

$$S(f, d) = \left[ \frac{e^{-\alpha_T(f)d} + 1 - 2e^{-\frac{\alpha_T(f)d}{2}} \cos\left(\frac{2\pi f}{c}(n_T(f) - n_{огр})\right)}{\left(\frac{\alpha_T(f)}{2}\right)^2 + \left(\frac{2\pi f}{c}(n_T(f) - n_{огр})\right)^2} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $f$  — частота терагерцового излучения;  $n_T$ ,  $\alpha_T$  — показатель преломления и коэффициент поглощения на терагерцовых частотах;  $d$  — толщина кристалла;  $n_o$  — показатель преломления на длине волны пробного импульса;  $n_{огр} = n_o - \lambda_o(\partial n_o / \partial \lambda_o)$ . Определяющим в этом выражении является условие фазового синхронизма между групповой скоростью пробного импульса и фазовой скоростью терагерцового, выраженное через показатели преломления:  $n_T(f) - n_{огр} = 0$ . Кроме того, выражение (1) учитывает поглощения на терагерцовых частотах, но не учитывает поглощения на длинах волн накачки, так как оно сравнительно мало ( $\alpha_o \sim 0,2 \text{ см}^{-1}$ ) в кристалле ZnTe.

Комплексный показатель преломления выражается через комплексную диэлектрическую проницаемость:  $n_T + ik_T = \sqrt{\varepsilon_T}$ , где  $\kappa_T$  — показатель поглощения, причём  $\alpha_T = 4\pi f \kappa_T / c$ , а диэлектрическая проницаемость может быть приближённо описана суммой осцилляторов Лоренца:

$$\varepsilon_T(f) = \varepsilon_\infty + \sum_j \frac{A_j f_j^2}{f_j^2 - f^2 - 2i\gamma_j f}. \quad (2)$$

Значения соответствующих коэффициентов в терагерцовом диапазоне для кристаллов ZnTe приведены в таблице, а  $\varepsilon_\infty = 6,8$  [10, 11].

Значение показателя преломления кристалла ZnTe на длине волны пробного оптического излучения может быть получено из эмпирической формулы

$$n_o^2(\lambda_o) = a + \frac{b\lambda_o^2}{\lambda_o^2 - c^2},$$

где  $a = 4,57$ ,  $b = 2,8$ ,  $c = 378 \text{ нм}$  [11]. Таким образом,  $n_o(775 \text{ нм}) = 2,87$ ,  $n_{огр}(775 \text{ нм}) = 3,27$ , что, например, обеспечивает фазовый синхронизм на частоте 2,4 ТГц в соответствии с выражением (2).

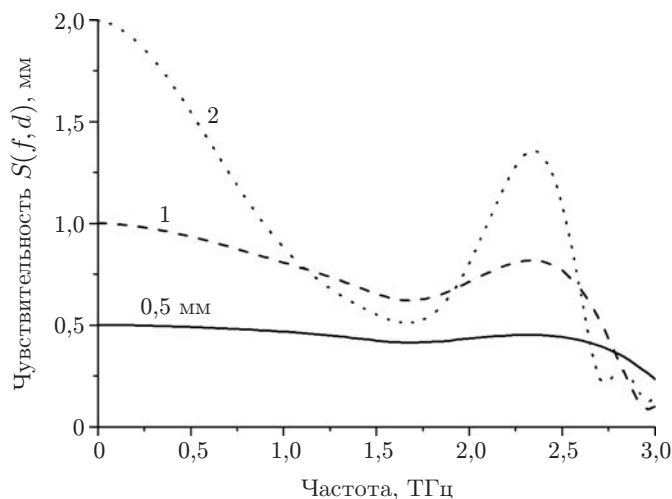
**Значения коэффициентов  
в описании диэлектрической проницаемости  
на терагерцовых частотах**

$j$	$A_j$	$f_j$ , ТГц	$\gamma_j$ , ТГц
1	0,04	1,7	0,4
2	0,08	3,75	0,4
3	3	5,36	0,003

Рассчитанная по формуле (1) модельная спектральная чувствительность  $S(f, d)$  для различных толщин кристалла ZnTe представлена на рис. 3. Видно, что применение более толстых кристаллов может обеспечить бóльшую чувствительность на высоких и низких частотах. При этом фазовое рассогласование и поглощение вблизи частоты 1,7 ТГц понижает чувствительность в этой области при увеличении толщины. Более тонкий кристалл обеспечивает равномерный спектральный отклик и более широкий спектральный диапазон. Однако увеличение спектрального диапазона за счёт уменьшения толщины кристалла ограничено из-за линии сильного фононного поглощения на частоте 5,36 ТГц.

Проведены экспериментальные исследования спектров терагерцовых импульсов при различных толщинах кристалла регистрации (0,5, 1 и 2 мм). Непосредственное сравнение экспериментальных данных с модельными расчётами невозможно, так как модель не учитывает спектра генерации и передаточной функции спектрометра. Однако в эксперименте менялась только толщина кристалла, поэтому отношение измеренных спектров  $E_T^*(f, d_1)/E_T^*(f, d_2)$  равно отношению соответствующих спектральных чувствительностей  $S(f, d_1)/S(f, d_2)$ , рассчитанных по формуле (1). Результаты экспериментов и модельных расчётов приведены на рис. 4. Видно, что модель качественно объясняет полученные экспериментальные зависимости. Количественные расхождения на высоких и низких частотах могут быть обусловлены отличием свойств применяемых кристаллов от данных, представленных в литературе.

**Влияние параметров сканирования.** Помимо характеристик систем генерации и регистрации терагерцовых импульсов на поляризационно-оптический сигнал также влияют параметры сканирования терагерцового импульса: временной шаг и диапазон. Из



*Рис. 3.* Расчётная спектральная чувствительность  $S(f, d)$  при различных толщинах кристалла регистрации

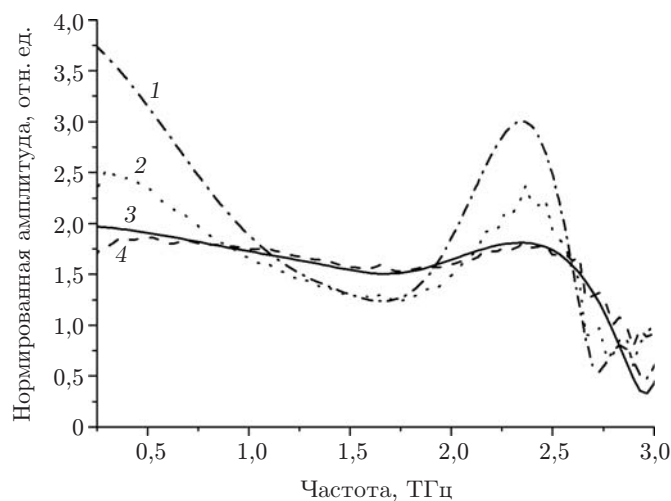


Рис. 4. Спектральная чувствительность системы регистрации при толщине кристалла ZnTe 2 мм (кривые 1, 2) и 1 мм (кривые 3, 4), нормированная на чувствительность при толщине 0,5 мм: 1, 3 — модельные расчёты; 2, 4 — экспериментальные результаты

свойств преобразования Фурье спектральное разрешение  $\delta f$  и спектральный диапазон  $F$  определяются в соответствии с формулами

$$\delta f = \frac{1}{T}; \quad F = \frac{1}{2\delta t}. \quad (3)$$

Влияние временного диапазона сканирования на спектральное разрешение в терагерцовом диапазоне экспериментально исследовано на примере поглощения паров воды в атмосфере. На рис. 5 показаны линии поглощения паров воды при переходах в параизомере  $0_0 \rightarrow 1_0$  ( $36,605 \text{ см}^{-1}$ , или  $1,097 \text{ ТГц}$ ) и ортоизомере  $3_{-3} \rightarrow 3_{-1}$  ( $37,14 \text{ см}^{-1}$ , или  $1,112 \text{ ТГц}$ ) [12] при различных диапазонах сканирования. Видно, что для разрешения этих линий, отстоящих друг от друга на  $\Delta f = 0,015 \text{ ТГц}$ , достаточно диапазона сканирования  $T = 1/\Delta f = 66,7 \text{ пс}$ .

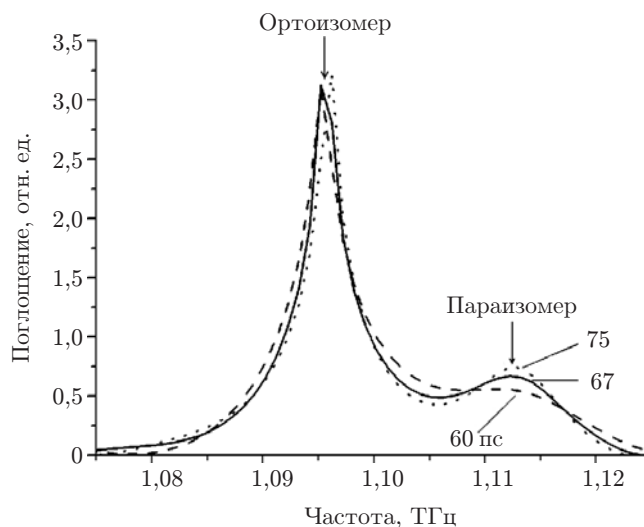


Рис. 5. Спектры поглощения паров изомеров воды при различных диапазонах сканирования  $T$

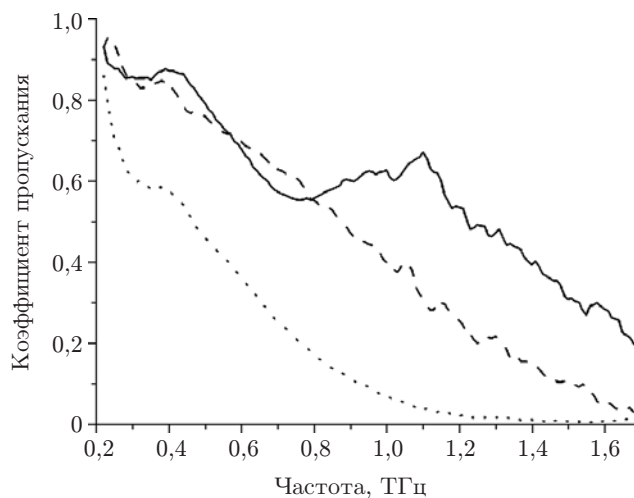


Рис. 6. Спектры пропускания материалов: два слоя бумаги плотностью 80 г/м<sup>2</sup> (сплошная линия), хлопчатобумажная ткань (штриховая), натуральная кожа (пунктирная)

Фактический спектральный диапазон определяется параметрами генератора терагерцового излучения, передаточной функцией спектрометра, чувствительностью системы регистрации и длительностью пробных оптических импульсов. При этом необходимо, чтобы шаг сканирования был меньше определённого порогового значения, соответствующего максимальной частоте спектрометра. Так, например, в проведённых экспериментах диапазон не превышал 3 ТГц, поэтому достаточно было использовать перемещение линии задержки с временным шагом  $\delta t = 125$  фс, что ограничивает спектральный диапазон 4 ТГц.

**Терагерцовые спектры пропускания.** В целях исследования возможности применения терагерцовой спектроскопии для обнаружения различных материалов и объектов, находящихся в контейнерах, экспериментально измерены спектры пропускания типичных контейнерных материалов: бумаги, хлопчатобумажной ткани и натуральной кожи. Приведённые на рис. 6 зависимости представляют собой отношения спектров терагерцовых импульсов, прошедших через материал к опорному терагерцовому спектру, полученному в отсутствие образцов. Видно, что эти материалы достаточно прозрачны на низких терагерцовых частотах, а падение пропускания в высокочастотной области вероятнее всего обусловлено рассеянием на структуре материалов [13].

**Заключение.** В данной работе рассмотрено влияние двух факторов на характеристики системы регистрации импульсного терагерцового спектрометра: свойств кристалла регистрации и параметров сканирования терагерцовых импульсов.

Проведено экспериментальное исследование спектральной чувствительности системы регистрации на длине волны 775 нм при использовании кристаллов ZnTe разной толщины. Установлено, что полученные экспериментальные результаты согласуются с расчётными в соответствии с моделью поляризационно-оптической регистрации. Показано, что более толстые кристаллы обеспечивают большую чувствительность на низких и высоких частотах ( $<1$  ТГц и  $>2$  ТГц), а кристаллы меньшей толщины — более широкий спектральный диапазон и равномерный спектральный отклик.

Экспериментально подтверждено на примере двух линий поглощения паров (пара- и ортоизомеров) воды, что спектральное разрешение обратно пропорционально диапазону

сканирования. При этом для регистрации всего диапазона терагерцовых частот, присутствующих в спектрометре ( $<3$  ТГц), достаточно шага сканирования 125 фс.

Измерены спектры пропускания типичных контейнерных материалов, для которых характерно значительное падение пропускания высокочастотного терагерцового излучения из-за рассеяния на структуре материалов.

Авторы выражают благодарность В. Д. Анцыгину за плодотворное обсуждение и Н. А. Николаеву за помощь в проведении экспериментальных исследований (Институт автоматизации и электротехники СО РАН). Авторы также благодарят А. П. Ковчавцева (Институт физики полупроводников СО РАН) за предоставленные образцы кристаллов InAs и выражают признательность А. П. Чихонадских и Г. Н. Москальцу (ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем», г. Санкт-Петербург) за помощь в работе и полезные обсуждения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tonouchi M.** Cutting-edge terahertz technology // *Nature Photon.* 2007. **1**, N 2. P. 97–105.
2. **Taniuchi T., Okada S., Nakanishi H.** Widely tunable terahertz-wave generation in an organic crystal and its spectroscopic application // *Journ. Appl. Phys.* 2004. **95**, N 11. P. 5984–5988.
3. **Nahata A., Weling A. S., Heinz T. F.** A wideband coherent terahertz spectroscopy system using optical rectification and electro-optic sampling // *Appl. Phys. Lett.* 1996. **69**, Is. 16. P. 2321–2323.
4. **Beard M. C., Turner G. M., Schmuttenmaer C. A.** Transient photoconductivity in GaAs as measured by time-resolved terahertz spectroscopy // *Phys. Rev. B.* 2000. **62**, N 23. 15764.
5. **Cai Y., Brener I., Lopata J. et al.** Design and performance of singular electric field terahertz photoconducting antennas // *Appl. Phys. Lett.* 1997. **71**, N 15. P. 2076–2078.
6. **Анцыгин В. Д., Мамрашев А. А., Николаев Н. А., Потатуркин О. И.** Малогабаритный терагерцовый спектрометр с использованием второй гармоники фемтосекундного волоконного лазера // *Автометрия.* 2010. **46**, № 3. С. 110–117.
7. **Анцыгин В. Д., Николаев Н. А.** Об эффективности генерации терагерцового излучения в кристаллах GaAs, InAs и InSb // *Автометрия.* 2011. **47**, № 4. С. 23–30.
8. **Gallot G., Grischkowsky D.** Electro-optic detection of terahertz radiation // *JOSA B.* 1999. **16**, N 8. P. 1204–1212.
9. **Schneider A., Neis M., Stillhart M. et al.** Generation of terahertz pulses through optical rectification in organic DAST crystals: theory and experiment // *JOSA B.* 2006. **23**, N 9. P. 1822–1835.
10. **Wynne K., Carey J. J.** An integrated description of terahertz generation through optical rectification, charge transfer, and current surge // *Opt. Commun.* 2005. **256**, N 4–6. P. 400–413.
11. **Nazarov M. M., Shkurinov A. P., Tuchin V. V., Zhernovaya O. S.** Modification of terahertz pulsed spectrometer to study biological samples // *Proc. SPIE.* 2007. **6535**. 65351J.
12. **Tikhonov V. I., Volkov A. A.** Separation of water into its ortho and para isomers // *Science.* 2002. **296**, N 5577. 2363.
13. **Shen Y. C., Taday P. F., Pepper M.** Elimination of scattering effects in spectral measurement of granulated materials using terahertz pulsed spectroscopy // *Appl. Phys. Lett.* 2008. **92**, N 5. 051103.