02

Особенности определения оптических параметров с помощью терагерцового спектрометра с временным разрешением на основе терагерцового эмиттера InAs

© В.Н. Трухин

ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия

e-mail: valera.truchin@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 15.12.2025 г.
В окончательной редакции 20.03.2026 г.
Принята к публикации 30.05.2026 г.

Представлена методика, позволяющая учесть интерференционные явления в терагерцовом эмиттере InAs, эпитаксиальная пленка которого синтезируется на подложке полуизолирующего GaAs, и достичь более высокого частотного разрешения при спектральном анализе. Для верификации методики проведены экспериментальные исследования пропускания терагерцового излучения образцов кремния и прессованных таблеток на основе порошка полиэтилена и смеси магнитных наночастиц Fe_3O_4, покрытых слоем SiO_2 и глюкозы, выполненные с помощью терагерцового спектрометра с временным разрешением на базе терагерцового эмиттера InAs, и выполнен расчет оптических параметров исследуемых образцов.

Ключевые слова: времяразрешенная терагерцовая спектроскопия, кремний, наночастицы, спектры кремния, InAs, терагерцовое излучение.

DOI: 10.61011/OS.2026.09.63813.8882-26

Введение

С появлением фемтосекундных лазеров терагерцовая (ТГц) спектроскопия получила новые возможности для исследования оптических свойств ряда веществ. Ключевым достижением стало создание компактных ТГц-спектрометров с временным разрешением, функционирующих при комнатной температуре [1]. Эти приборы позволяют напрямую определять фундаментальные оптические параметры сред, таких как комплексный показатель преломления, который включает действительную часть — показатель преломления (n) и мнимую часть, связанную с показателем поглощения (α). Совершенствование ТГц-спектрометров, а именно, создание эффективных эмиттеров и чувствительных детекторов, позволяет расширить как частотный диапазон, так и разрешение этих приборов. Отметим, что реализация этих параметров зависит не только от приборного исполнения, но и от самих параметров образцов [2]. В настоящей работе описана методика, позволяющая увеличить временной интервал регистрируемой волновой формы основного ТГц-импульса, на котором отсутствуют импульсы, обусловленные интерференционными процессами внутри эмиттера, что позволило реализовать частотное разрешение ТГц-спектрометра. Для подтверждения функциональности разработанной методики выполнены экспериментальные исследования пропускания ТГц-излучения для двух типов образцов: пластин монокристаллического кремния и прессованных таблеток на основе порошка полиэтилена и смеси магнитных наночастиц Fe_3O_4, покрытых слоем SiO_2 и глюкозы. Измерения проводились на ТГц-спектрометре с временным разрешением, в котором излучение генерировалось эмиттером на основе эпитаксиальной пленки InAs, синтезированной на полуизолирующей подложке GaAs. На основе разработанной методики проведен расчет оптических параметров исследуемых образцов.

Образцы и методика эксперимента

Измерения волновых форм ТГц-импульсов, прошедших через образцы, проводились с использованием экспериментальной установки ТГц-спектрометра с временным разрешением (рис. 1). Источником излучения, которое использовалось для генерации ТГц-излучения и его детектирования, служил титан-сапфировый лазер, генерирующий оптические импульсы с длительностью ~ 15 fs, длиной волны 800 nm, частотой повторения импульсов 80 MHz и средней мощностью ~ 0.65 W. Основной оптический импульс линейно поляризованного лазерного излучения делился на два с помощью светоделительной пластинки. Первый световой импульс (накачка) использовался для генерации терагерцового излучения, второй импульс (пробный) служил для регистрации амплитуды и фазы терагерцового излучения. Когерентное ТГц-излучение генерировалось при возбуждении оптическим импульсом накачки эпитаксиальной пленки InAs, выращенной на подложке полуизолирующего GaAs [3].

Оптический импульс накачки проходит через линию оптической задержки ODL, которая позволяет регистрировать волновую форму терагерцового импульса.

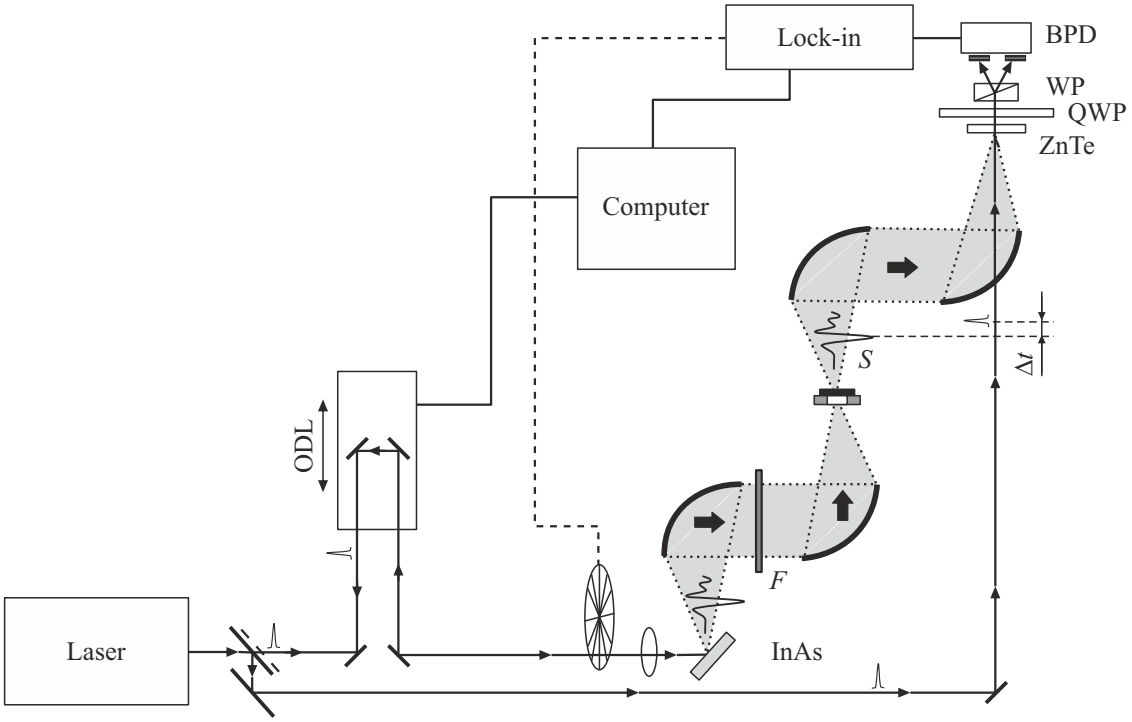


Рис. 1. Экспериментальная установка. ТГц-спектрометр с временным разрешением: S — образцы, *F* — черный фильтр из полиэтилена, ODL — оптическая линия задержки, QWP — четвертьволновая пластина, WP — призма Волластона, BPD — балансный фотодетектор, Laser — Ti/сапфировый лазер.

Комплиментарная пара внеосевых параболических зеркал использовалась для формирования параксиального пучка ТГц-излучения и фокусировки его на детектор. Детектирование ТГц-излучения осуществлялось с помощью метода электрооптического стробирования. В качестве детектора использовался кристалл ZnTe толщиной 1 mm. В электрооптическом кристалле вследствие взаимодействия поля ТГц-волны с пробным световым пучком происходит изменение поляризации пробного пучка, которое детектируется с помощью оптической схемы, включающей четвертьволновую пластинку, призму Волластона WP и фотодиодного балансного детектора BPD. Временной профиль ТГц-электрического поля получался путем формирования зависимости сигнала с балансного детектора от временной задержки между импульсом накачки и пробным импульсом. Установка ТГц-спектрометра функционировала при комнатной температуре.

В качестве образцов использовались пластины высокоомного кремния толщиной 1.84 mm, а также прессованные таблетки на основе порошка полиэтилена и смеси магнитных наночастиц Fe_3O_4, покрытых слоем SiO_2 и глюкозы [4].

Результаты и обсуждение

В ходе эксперимента были зарегистрированы волновые формы, представляющие зависимость амплитуды

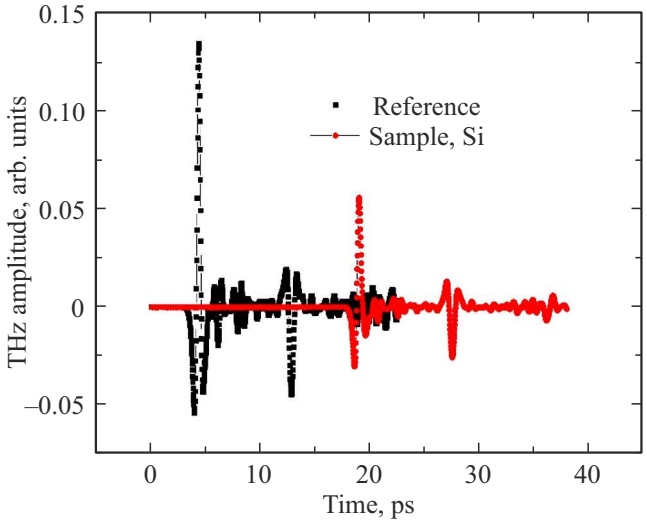


Рис. 2. Волновая форма ТГц-импульса, прошедшего в свободном пространстве и через образец кремния.

ТГц-сигнала от временной задержки между импульсом накачки и пробным импульсом. Эти волновые формы были получены для ТГц-импульсов, прошедших через исследуемые образцы и через свободное пространство (рис. 2). Для получения спектральных компонент терагерцового поля было использовано быстрое преобразование Фурье (БПФ) [5]. С использованием части ре-

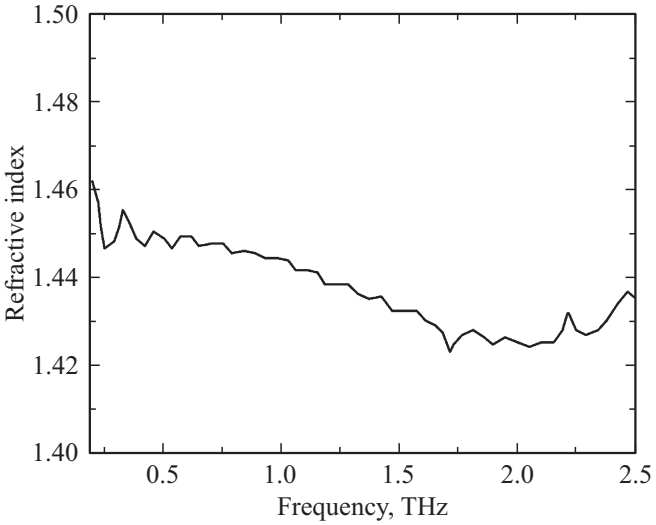


Рис. 3. Спектр показателя преломления образца полиэтилена с наночастицами Fe_3O_4, рассчитанный без использования предложенной методики.

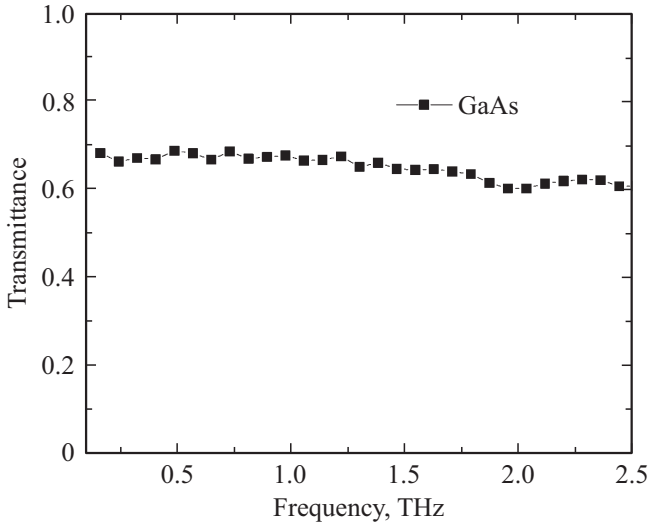


Рис. 4. Спектр коэффициента пропускания пластинки полуизолирующего GaAs.

зультатов БПФ (спектральные амплитуда и фаза) были рассчитаны коэффициент преломления и поглощения, при этом использовались результаты, полученные при регистрации ТГц-импульса, прошедшего как в свободном пространстве, так и через образец.

В силу специфики технологии роста эпитаксиальной пленки синтез InAs осуществлялся на подложке полуизолирующего GaAs, который обладает хорошим пропусканием в терагерцовом диапазоне частот. ТГц-излучение, генерируемого эмиттером, представляло последовательность импульсов (рис. 2). На волновой форме ТГц-импульса, прошедшего через свободное пространство, наблюдался второй пик, имеющий отрицательную амплитуду. Наличие этого второго ТГц-импульса обусловлено отражением от границы между подложкой и держателем эмиттера ТГц-излучения, генерируемого в прямом направлении. Соответственно использование временного окна, протяженностью большего, чем временной интервал между первым и вторым импульсом, приводило к появлению синусоидальных биений в спектре. Типичный пример приведен для спектра показателя образца полиэтилена с наночастицами Fe_3O_4 на рис. 3.

Для устранения вклада этой интерференции производилось сложение исходной волновой формы и волновой формы, полученной путем временного смещения исходной волновой формы на интервал, равный времени распространения ТГц-импульса через двойную толщину подложки GaAs, на которой был выращен слой InAs. Амплитуда преобразованной волновой формы нормировалась с учетом уменьшения амплитуды второго импульса. Таким образом получались волновые формы ТГц-импульсов, прошедших как через свободное пространство, так и через образец, без наличия ТГц-импульса, обусловленного отражением ТГц-импульса, генерируемого в прямом направлении. Такое приближение волновой формы ТГц-импульса допустимо, так как пропускание пластинки полуизолирующего GaAs слабо зависит от частоты в исследуемом терагерцовом диапазоне (рис. 4).

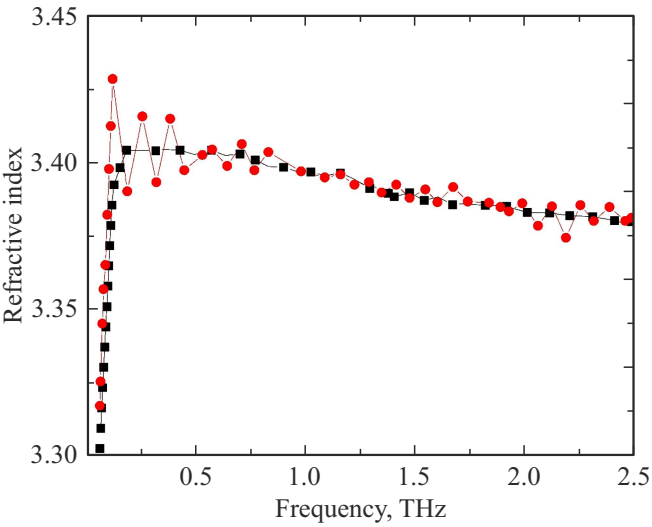


Рис. 5. Спектр показателя преломления преломления Si, рассчитанный с использованием предложенной методики (черная кривая — ■) и без использования методики (красная кривая — ○).

Временной интервал для преобразования Фурье выбирался до момента появления второго ТГц-импульса, связанного с отражением ТГц-волны от поверхностей образца. Возможный уход начального уровня сигнала балансного фотодетектора устранялся с помощью интегрирования волновой формы и определения параметра сдвига волновой формы по амплитуде для получения нулевого значения самого интеграла волновой формы.

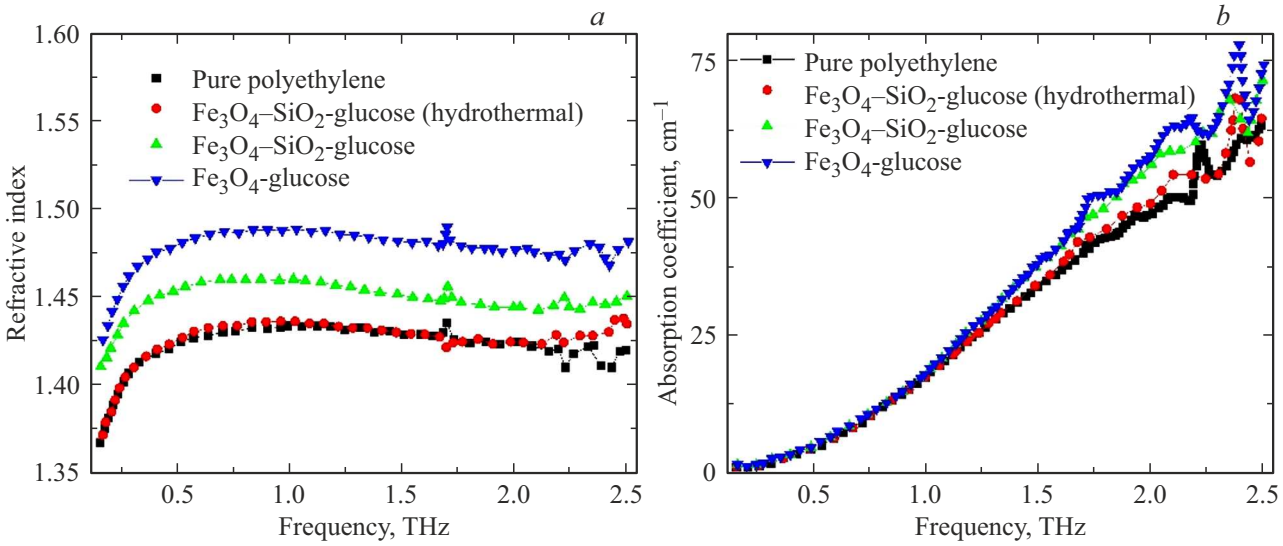


Рис. 6. Спектры показателя преломления и коэффициента поглощения образцов на основе смеси полиэтилена и Fe_3O_4.

Таким образом были скорректированы волновые формы ТГц-импульсов для дальнейшего получения комплексного значения спектральной амплитуды ТГц-импульса путем преобразования Фурье. При расчетах использовались зависимости амплитуды $A(\omega)$ и фазы $\varphi(\omega)$ от частоты. В итоге были рассчитаны следующие зависимости: $A^{\text{ref}}(\omega)$, $\varphi^{\text{ref}}(\omega)$, $A^{\text{sam}}(\omega)$, $\varphi^{\text{sam}}(\omega)$.

Так как спектральные зависимости фаз имели различные значения при нулевой частоте, была проведена корректировка. Корректировка осуществлялась с помощью линейной аппроксимации и смещения по величине фазы.

Расчеты были основаны на использовании формул для пропускания электромагнитного излучения через поглощающую среду в виде пластины толщиной d [6]. Для отношения комплексных амплитуд ТГц-поля импульса, прошедшего через образец и свободное пространство, можно получить следующее соотношение:

$$\frac{E^s_{ex}}{E^r_{ex}} = \frac{4\tilde{n}}{(\tilde{n}+1)^2} \frac{1}{\left(1-\frac{(\tilde{n}-1)^2}{\tilde{n}+1)^2}e^{i2kd}\right)^2} e^{ik\tilde{n}d-\frac{\omega}{c}d}, \qquad (1)$$

где $k = \frac{\omega}{c}$ — волновой вектор, $\tilde{n} = (n + i\chi)$ — комплексный показатель преломления, $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, d — толщина образца.

Так как был выбран временной интервал, на котором находится только первый импульс и нет ТГц-импульсов, связанных с отражением ТГц-волны от поверхностей образца, формула (1) упрощается (в ней остается только первый член от разложения второго множителя) и она переходит в следующее соотношение:

$$\frac{E^s_{ex}}{E^r_{ex}} = \frac{A^s_{ex}}{A^r_{ex}} e^{\varphi^s-\phi^{ref}} = \frac{4\,\tilde{n}}{(\tilde{n}+1)^2} e^{ik\tilde{n}d-\frac{\omega}{c}d}, \qquad (2)$$

где $A^s_{ex} = |E^s_{ex}|$, $A^r_{ex} = |E^r_{ex}|$.

Из формулы (2) видно, что аналитические выражения для n и χ от величин $\frac{A^s_{ex}}{A^r_{ex}}$ и $(\varphi^s - \phi^{ref})$ отсутствуют. Для сред, имеющих коэффициент поглощения $\alpha < 100\,\text{cm}^{-1}$ в терагерцовом диапазоне ($f \sim 1\,\text{THz}$), выполняется соотношение $\text{n}/\chi \sim 0.03$. Это позволяет в первом приближении считать в первом сомножителе в формуле (2) $\tilde{n} = n$. В результате для спектральных амплитуд и фаз соответственно получаются следующие соотношения:

$$\frac{A^s_{ex}}{A^r_{ex}} = \frac{4\,n}{(n+1)^2} e^{-\frac{\omega}{c}\chi d}, \qquad (3)$$

$$\varphi^s - \phi^{ref} = \frac{\omega}{c}nd - \frac{\omega}{c}d. \qquad (4)$$

Из формулы (4) следует соотношение для показателя преломления:

$$n = \frac{(\varphi^s - \phi^{ref})\,c}{2\pi d\,f} + 1. \qquad (5)$$

Зная показатель преломления и учитывая, что $\frac{\omega}{c}\chi = \frac{\alpha}{2}$, можно рассчитать поглощение образца из формулы (3):

$$\alpha = \frac{2}{d}\ln\left(\frac{4n\,E^{ref}}{(n+1)^2\,E^s}\right). \qquad (6)$$

В итоге на основе полученных экспериментальных результатов, были рассчитаны частотные зависимости показателя преломления и коэффициента поглощения для исследуемых образцов: Si (рис. 5), полиэтилен с Fe_3O_4 (рис. 6, *a*, *b*). Хорошо видно, что проявление изменений в спектре (периодические биения), обусловленных интерференцией, отсутствует.

Заключение

В ходе работы было исследовано пропускание терагерцового излучения через образцы кремния и таблетки, состоящие из смеси полиэтиленового порошка

с магнитными наночастицами, покрытых слоем SiO_2 и глюкозы. Были получены спектральные зависимости коэффициентов преломления и поглощения.

Используя в данной работе разработанную методику, удалось избавиться от интерференционных явлений, связанных с отражением ТГц-импульса от поверхности подложки, граничащей с держателем эмиттера. Данный метод позволяет скорректировать при анализе и расчете оптических констант влияние работы самого ТГц-эмиттера на основе эпитаксиальных пленок InAs, выращенных на прозрачных для ТГц-излучения подложках. Следует заметить, что для ТГц-эмиттера на основе InAs, синтезированного на подложке сильно легированного полупроводника, например GaAs, необходимость применения данной методики отпадает, так как отражение сгенерированного в прямом направлении терагерцового излучения происходит на границе InAs-GaAs, что практически увеличивает ТГц-импульс в два раза (ТГц-генерация от такого излучателя была описана в работе [7]).

Благодарности

Автор выражает благодарность Смолянской О.А. за представленные образцы полиэтилена с наночастицами Fe_3O_4.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Государственного задания, тема „Исследования электрических, оптических, фотоэлектрических и магнитных явлений квантовой природы в полупроводниковых и полимерных материалах и структурах“ (FFUG-2024-0016).

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Список литературы

[1] P.U. Jepsen, D.G. Cooke, M. Koch. Laser Photonics Rev., **5**, 124 (2011). DOI: 10.1002/lpor.201000011
[2] M. Naftaly. *Terahertz metrology* (Artech House, 2015).
[3] A.V. Andrianov, A.N. Aleshin, V.N. Truchin, A.V. Bobylev. J. Phys. D. Appl. Phys., **44**, 265101 (2011). DOI: 10.1088/0022-3727/44/26/265101
[4] O.A. Smolyanskaya et al. Proc. SPIE, **10892**, 108920L (2019). DOI: 10.1117/12.2506870
[5] A.G. Davies, A.D. Burnett, Wenhui Fan, E.H. Linfield, J.E. Cunningham. Materials Today, **11**(3), 18 (2008). DOI: 10.1016/S1369-7021(08)70016-6
[6] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики* (Наука, М., 1973).
[7] В.Н. Трухин, В.А. Соловьев, И.А. Мустафин, М.Ю. Чернов. ПЖТФ, **48**(3), 51 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.03.51985.19051