

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 535–14: 621.37

ПРИМЕНЕНИЕ БАЛАНСНОГО ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА В ТЕРАГЕРЦЕВОМ ИМПУЛЬСНОМ СПЕКТРОМЕТРЕ

© 2025 г. Г. И. Кропотов ^а, Д. И. Цыпишка ^{а,*}, В. Е. Авицюк ^а

^а *Общество с ограниченной ответственностью “ТИДЕКС”*

Россия, 194292, Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, 16

^{*}*e-mail: dmitrytsypishka@tydex.ru*

Поступила в редакцию 28.03.2025 г.

После доработки 30.04.2025 г.

Принята к публикации 12.05.2025 г

Разработан электрооптический детектор терагерцевого излучения. Обсуждаются базовые принципы работы прибора и его особенности. Приводятся основные характеристики электрооптического детектора и отмечаются преимущества его применения в спектроскопических системах терагерцевого диапазона.

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие импульсной терагерцевой (ТГц) спектроскопии во временной области (time-domain spectroscopy, TDS) и связанных с ней ТГц-технологий привело к появлению еще одного способа изучения окружающего мира. Ее прогресс обязан появлению пико- и фемтосекундных лазеров, которые позволили реализовать оптический метод генерации ТГц-излучения, основанный на том, что взаимодействие коротких лазерных импульсов с веществом приводит к возникновению импульсов поляризации в нелинейно-оптических средах, релаксация которых создает волны электромагнитного ТГц-излучения. Излучение фемтосекундных лазеров также может применяться и для регистрации импульсного ТГц-излучения.

Для детектирования ТГц-излучения могут использоваться несколько методов. Первым приемником ТГц-излучения стала фотопроводящая антенна. Электрооптическое детектирование также получило широкое распространения из-за широкой полосы пропускания и возможности параллельного формирования изображений. В широкополосном импульсном спектрометре, разработанном в компании “ТИДЕКС”, для генерации ТГц-излучения используется метод оптического выпрямления фемтосекундных импульсов [1]. Для регистрации импульсов используется метод электрооптического

детектирования [2] с применением электрооптического детектора импульсного ТГц-излучения.

Импульсный ТГц-спектрометр производства компании “ТИДЕКС” представляет собой комплексный прибор для широкополосной ТГц-спектроскопии во временной области. В его состав входят следующие компоненты (рис. 1):

- твердотельный фемтосекундный лазер;
- электрооптический детектор (ЭОД) импульсного ТГц-излучения;
- оптомеханические компоненты для оптического и ТГц-путей;
- линия задержки;
- управляющие электронные блоки оптической линии задержки, оптико-механического модулятора и лазера;
- ПК с установленным ПО.

Рис. 1. Импульсный ТГц-спектрометр компании “ТИДЕКС”

Принципиальная оптическая схема импульсного ТГц-спектрометра представлена на рис. 2.

Рис. 2. Принципиальная оптическая схема широкополосного импульсного спектрометра.

Излучение иттербиевого твердотельного фемтосекундного лазера ТеМа-1050/100 (ООО "Авеста") разделяется на два пучка: пучок накачки и зондирующий (пробный) пучок. Более мощный пучок накачки используется для генерации ТГц-импульса. Генерация происходит за счет эффекта оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов накачки в кристалле 1% MgO:LiNbO₃. Эффект оптического выпрямления состоит в том, что при прохождении интенсивного оптического импульса через нелинейно-оптический кристалл в последнем возникает нелинейная поляризация, повторяющая по форме огибающую оптического импульса (рис. 3) [3]. Зондирующий пучок служит для детектирования ТГц-импульса. Для детектирования ТГц-импульсов используется электрооптический детектор. Детектирование происходит за счет изменения поляризации зондирующего импульса в присутствии ТГц-импульса.

Рис. 3 Оптическое выпрямление.

Механизмы генерации ТГц-импульсов в широкополосном импульсном спектрометре описаны в работе [4]. В этой работе подробно рассмотрены принципы работы ЭОД и преимущества его использования в таких системах.

2. ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТГц-ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА

Классический сбалансированный фотодетектор – это устройство, которое измеряет разницу между фототоками, генерируемыми светом, попадающим на два фотодиода. Затем эта разница усиливается с помощью встроенного усилителя, подается на внешний блокирующий усилитель и отображается на визуализаторе (осциллографе или компьютере).

Электрооптический детектор на основе балансного детектора используется для регистрации когерентного ТГц-излучения в широкополосном импульсном ТГц-спектрометре, работающем во временном представлении, поскольку позволяет непосредственно определить величину поля ТГц-излучения. В более широком смысле ЭОД может применяться в качестве детектора ТГц-поля во всех случаях, когда можно выполнить оптическое смещение ТГц-и лазерного и опорного пучков на нелинейном кристалле.

Прогресс в развитии ЭОД связан с интеграцией электроники и оптики в единую систему, позволяющую получить на выходе анализируемый сигнал, пригодный к выводу на персональный компьютер. С другой стороны, вычисления в электронике не разности сигналов фотодиодов, а их отношения позволяет добиваться большей стабильности прибора по отношению к флуктуациям опорного лазерного пучка.

Работа ЭОД основана на использовании электрооптического эффекта, вызываемого действием низкочастотного ТГц-излучения в нелинейно-оптическом кристалле при прохождении через него зондирующего излучения. Пучок ТГц-диапазона фокусируется на электрооптический кристалл, соосно с ним в кристалл направляется пучок зондирующего излучения.

Для эффективной регистрации слабых ТГц-сигналов используется метод синхронного детектирования, при котором ТГц-пучок предварительно модулируется, а сигнал с ЭОД отправляется на синхронный усилитель. Пошагово меняя задержку пробного импульса, мы прописываем временной профиль поля ТГц-импульса.

Электрооптический детектор регистрирует электрическое поле ТГц-импульсов во временном представлении, определяя не только амплитуду поля, но и его фазу [5]. В основе электрооптического детектирования лежит эффект Поккельса для электрооптических кристаллов, который заключается в изменении показателя преломления среды в оптическом диапазоне в присутствии внешнего электрического поля, в данном случае, поля ТГц-импульса. При этом разность показателей преломления пропорциональна его

амплитуде ($\Delta n \propto E_{\text{THz}}$). Верно и обратное утверждение: амплитуда приложенного поля может быть определена путем измерения наведенного им двулучепреломления.

Рис. 4. Схематическая диаграмма опыта по изучению электрооптического эффекта. Поляризация электрооптического кристалла представлена до и после прохождения лучом поляризационной оптики.

На рис. 4 приведена типичная схема электрооптического детектирования ТГц-сигнала путем измерения наведенного ТГц-полем двулучепреломления. В том случае, если групповая скорость оптического импульса хорошо согласована с фазовой скоростью ТГц-импульса в электрооптическом кристалле, оптический импульс за время распространения по кристаллу будет менять свою поляризацию под действием вызванного постоянным ТГц-полем двулучепреломления. На этом же рисунке представлено изменение поляризации пробного импульса по мере его прохождения через установку при наличии и в отсутствие ТГц-сигнала.

За время прохождения линейно-поляризованного оптического импульса и ТГц-импульса через электрооптический кристалл под действием наведенного ТГц-полем двулучепреломления поляризация становится эллиптической в результате различного набег фаз для обыкновенной и необыкновенной волн. Величина эллиптичности, пропорциональная величине ТГц-поля, может быть зарегистрирована с помощью поляризационного анализатора. В ЭОД в качестве поляризационного анализатора используются четвертьволновая пластинка и призма Волластона. Призма Волластона делит пробный пучок на два ортогонально-поляризованных пучка, полученных с помощью поляризационного анализатора. Каждый из пучков детектируется своим фотодиодом. Электрооптический детектор измеряет разность интенсивностей двух ортогональных компонент $I_s = I_y - I_x$. Эта разность пропорциональна амплитуде приложенного ТГц-поля.

Для увеличения чувствительности схемы пучок накачки модулируется с помощью механического прерывателя и с помощью синхронного усилителя, встроенного в ЭОД, детектируется вызванная ТГц-импульсом модуляция поляризации пробного пучка.

Для целей электрооптического детектирования используется электрооптический кристалл, например, теллурид цинка (ZnTe). Хорошее согласование в нем фазовой скорости ТГц-импульса с групповой скоростью оптического импульса с длиной волны порядка 800 нм, высокая прозрачность как на оптических, так и на ТГц-частотах, и большая величина электрооптического коэффициента $r_1 = 4$ пм/В делают данный кристалл подходящим для электрооптического детектирования. Выбор типа кристалла осуществляется с учетом требований к соотношению сигнал/шум прибора, а также к ширине спектра детектируемого

сигнала. Набором кристаллов разной толщины можно перекрыть значительную часть ТГц-спектра при заданном соотношении сигнал/шум.

Типичное направление поляризации оптического и ТГц-пучков по отношению к кристаллографическим осям кристалла приведено на рис. 5. Наведенное ТГц-полем двулучепреломление будет максимальным в том случае, когда и оптический, и ТГц-импульсы линейно поляризованы параллельно оси $[1\bar{1}0]$ кристалла ZnTe.

Рис. 5. Направление поляризации ТГц-поля и пробного лазерного пучка в кристалле ZnTe.

Нелинейная поляризация оптического импульса ортогональна электрическому полю импульса. Поэтому при прохождении оптического импульса через кристалл ZnTe его поляризация под влиянием ТГц-поля из линейной превращается в эллиптическую.

Фазовый сдвиг поляризации пробного пучка из-за эффекта Поккельса при прохождении оптического импульса через кристалл толщиной L определяется формулой

$$\Delta\varphi = (n_y - n_x) \frac{\omega L}{c} = \frac{\omega L}{c} n_o^3 r_1 E_{\text{THz}}, \quad (1)$$

где n_o – оптический показатель преломления на частоте пробного пучка, r_1 – электрооптический коэффициент. Интенсивности ортогонально поляризованных пучков, попадающих на балансный фотодетектор, определяются следующим образом:

$$I_x = \frac{I_0}{2} (1 - \sin \Delta\varphi) \approx \frac{I_0}{2} (1 - \Delta\varphi), \quad (2)$$

$$I_y = \frac{I_0}{2} (1 + \sin \Delta\varphi) \approx \frac{I_0}{2} (1 + \Delta\varphi), \quad (3)$$

где I_0 – интенсивность пробного пучка. Здесь использовано приближение $\Delta\varphi \ll 1$, выполняющееся при электрооптическом детектировании. Соответственно, сигнал на выходе балансного фотодетектора определяется амплитудой ТГц-поля:

$$I_S = I_y - I_x = I_0 \Delta\varphi = \frac{I_0 \omega L}{c} n_o^3 r_1 E_{\text{THz}} \propto E_{\text{THz}}. \quad (4)$$

В реальной ситуации временное или частотное разрешение метода электрооптического детектирования ограничено тремя факторами: конечной длительностью пробного импульса, дисперсией нелинейной восприимчивости и рассогласованием скоростей оптического и ТГц-сигналов в нелинейном кристалле. Соответственно, сигнал на выходе электрооптического детектора является сверткой поля ТГц-импульса и функции отклика детектора $F(\omega, \omega_{\text{THz}})$, определяемой всеми тремя факторами [2]:

$$E_S(t) = \int_{-\infty}^{\infty} E_{THz}(\omega_{THz}) F(\omega, \omega_{THz}) e^{-i\omega_{THz}t} d\omega_{THz} \quad (5)$$

где $E_S(t)$ – временное представление сигнала на выходе детектора, $E_{THz}(\omega_{THz})$ – комплексная амплитуда ТГц-импульса. Преобразование Фурье от обеих частей равенства приводит к простой связи между ТГц-импульсом и выходным сигналом в частотном представлении:

$$E_S(\omega_{THz}) = F(\omega, \omega_{THz}) \cdot E_{THz}(\omega_{THz}). \quad (6)$$

Здесь $F(\omega, \omega_{THz})$ – отклик детектора, который представляет собой произведение трех зависящих от частоты составляющих:

$$F(\omega, \omega_{THz}) = A_{Opt}(\omega_{THz}) \cdot \chi^{(2)}(\omega, \omega_{THz}, \omega - \omega_{THz}) \cdot \Delta\Phi(\omega, \omega_{THz}), \quad (7)$$

где $A_{Opt}(\omega_{THz})$ – автокорреляционная функция электрического поля пробного оптического импульса, определяемая следующим образом:

$$A_{Opt}(\omega_{THz}) = \int_{-\infty}^{\infty} E_{Opt}^*(\omega' - \omega) E_{Opt}(\omega' - \omega - \omega_{THz}) d\omega', \quad (8)$$

$\chi^{(2)}(\omega; \omega_{THz}, \omega - \omega_{THz})$ – нелинейная восприимчивость второго порядка. Функция $\Delta\Phi(\omega, \omega_{THz})$ учитывает рассогласование групповой скорости оптического импульса и фазовой скорости ТГц-излучения.

Рис. 6. Второй порядок нелинейной восприимчивости в ZnTe.

На рис. 6 показана частотная зависимость нелинейной восприимчивости второго порядка в ZnTe. Всплеск функции в области 5 ТГц показывает, что основным физическим фактором, влияющим на данную величину, является поперечная фононная мода с частотой 5.3 ТГц. Величина $\Delta\Phi(\omega, \omega_{THz})$ определяет частотную фильтрацию, вызванную рассогласованием скоростей, она задается формулой

$$\Delta\Phi(\omega, \omega_{THz}) = \frac{e^{i\Delta k(\omega, \omega_{THz})L} - 1}{i\Delta k(\omega, \omega_{THz})}. \quad (9)$$

Рассогласование волнового вектора Δk определяется следующим образом:

$$\Delta k = k(\omega) + k(\omega_{THz}) - k(\omega + \omega_{THz}) = \frac{\omega}{c} n_O(\omega) + \frac{\omega_{THz}}{c} \{n_T(\omega_{THz}) + i k_T(\omega_{THz})\} - \frac{\omega + \omega_{THz}}{c} n_O(\omega + \omega_{THz}), \quad (10)$$

где n_O и $n_T + i k_T$ – оптический и ТГц-показатели преломления в ZnTe. Из-за нелинейного поглощения, включающего двухфононные процессы, мнимая часть ТГц-показателя

преломления k_T должна быть скорректирована с учетом измеренного коэффициента поглощения.

На рис. 7 изображена нормированная амплитуда функции отклика детектора в диапазоне 0–5 ТГц для кристаллов ZnTe различной толщины при длительности пробного импульса 100 фс. Из-за поперечного фононного резонанса при частоте 5.3 ТГц отклик детектора на частотах выше 4 ТГц пренебрежимо мал. С ростом толщины кристалла чувствительность линейно возрастает, но из-за рассогласования скоростей уменьшается полоса пропускания.

Рис. 7. Нормированная амплитуда функции детектированного отклика $F(\omega, \omega_{\text{THz}})$ для ZnTe.

Таким образом, величина электрооптического эффекта зависит от толщины кристалла и от величины спектрального отклика кристалла. Чем тоньше кристалл, тем выше величина спектрального отклика в диапазоне 0.2–2 ТГц и в диапазоне свыше 3 ТГц. С увеличением толщины кристалла падает величина спектрального отклика в диапазоне 0.2–2 ТГц и начинает искажаться сигнал в области значений свыше 3 ТГц. В районе частот 2.5 ТГц величина спектрального отклика остается постоянной. Из-за поперечного фононного резонанса на частоте 5.3 ТГц спектр измеряемого ТГц-излучения ограничен до величины 5.3 ТГц. Наибольшая амплитуда сигнала и наибольшая информативность кривой получаются при использовании кристалла ZnTe толщиной 1 мм.

Из формулы (4) следует, что для вычисления ТГц-поля с помощью ЭОД необходимо знать отношение $(I_y - I_x)/I_0$. Кроме того, при флуктуациях I_0 будут иметь место флуктуации величин в числителе. Это позволяет сделать вывод о целесообразности аппаратной реализации вычисления указанного отношения, а не разности величин в числителе.

3. ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ДЕТЕКТОР КОМПАНИИ “ТИДЕКС”

Разработанная в компании “ТИДЕКС” модель детектора ТГц-импульсов [6] основана на делении разности сигналов фототоков на их сумму. Это позволяет получить более стабильный результат при временных флуктуациях опорного лазерного пучка, чем в распространенных моделях, где разность сигналов делится на опорный сигнал [7, 8]. С применением этой модели стало возможным прямое без дополнительных расчетов измерение напряженностей полей ТГц-импульсов излучения.

Из-за сложности выделения суммы сигналов оптически сложение сигналов выполняется после оцифровки на программируемой логике. Для этого осуществляется индивидуальное усиление сигналов с каждого фотодиода.

Особенностью производимых компанией “ТИДЕКС” детекторов является наличие в них встроенной оптики, а также встроенного синхронного усилителя (lock-in amplifier). В детекторе реализованы функции нормировки сигнала, автоматической подстройки баланса сигнала на фотоприемниках, а также предусмотрена возможность управления механической линией задержки из поставляемого вместе с ЭОД оригинального программного обеспечения. Область применения данного прибора – системы спектроскопии во временной области. Встроенная оптика дает возможность быстро и легко интегрировать детектор в готовую измерительную (экспериментальную и т. п.) схему. Синхронный усилитель обеспечивает высокое отношение сигнал/шум, а также делает сам детектор более компактным и удобным в установке и использовании. Функция нормировки сигнала обеспечивает сохранность высокого отношения сигнал/шум и точного измерения временной формы ТГц-импульса при флуктуациях уровня мощности входного сигнала и лазера накачки. Современное программное обеспечение, разработанное под Windows (XP, Vista, 10), позволяет легко управлять параметрами ЭОД, отображать результаты измерений, управлять прибором как самостоятельно, так и в составе TDS-системы, включая управление типовой линией задержки.

В выпускаемых моделях ЭОД компании “ТИДЕКС” в зависимости от диапазона длин волн сигнального излучения используются электрооптические кристаллы ZnTe (60–01100 нм) и CdTe (1100–1700 нм). Основные технические характеристики ЭОД приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики ЭОД

Наименование характеристики, единица измерения	Значение
Спектральная ширина сигнального излучения, нм	11–20
Спектральная чувствительность, ТГц	0.1–4
Длительность импульса сигнального излучения, фс	<120
Мощность сигнального пучка, мВт	1–20
Минимальная необходимая мощность ТГц-излучения в интервале частот 0.1–4 ТГц, нВт	1
Частота модуляции синхронного усилителя, Гц	15–250000
Усиление синхронного усилителя	100–30000
Постоянная времени синхронного усилителя, с	0.003–10

Для связи детектора с ПК используется порт USB 2.0, а для вывода сигнала на осциллограф применяется ВЧ-разъем.

Рис. 9. Внешний вид электрооптического детектора импульсного ТГц-излучения компании “ТИДЕКС”.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускаемых в компании “ТИДЕКС” ЭОД реализовано аппаратное деление разности фототоков на их сумму, что позволяет получить результат, более стабильный по отношению к временным флуктуациям опорного лазерного пучка.

Интегрированный в общую плату прибора синхронный усилитель увеличивает отношение сигнал/шум прибора. Все пассивные оптические элементы (электрооптический кристалл, четвертьволновая пластина, призма Волластона) интегрированы в единый прибор. Это позволяет уменьшить габариты TDS-систем и упростить процедуру юстировки элементов схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stevens T. E., Wahlstrand J. K., Kuhl J., Merlin R.* // Science. 2001. V. 291. P. 627. <https://doi.org/10.1126/science.291.5504.627>.
2. *Lee Y.-S.* Principles of Terahertz Science and Technology. Berlin: Springer Science & Business Media LLC, 2009. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09540-0>.
3. *Ward J.F.* // Phys. Rev. 1966. V. 143. P. 596. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.143.569>.
4. *Цубизов И.А., Кропотов Г.И.* // Фотоника. 2018. Т. 12. С. 398. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2018.72.4.398.404>.
5. *Wu Q., Zhang X.C.* // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. P. 1285. <https://doi.org/10.1063/1.119873>.
6. https://www.tydexoptics.com/pdf/ru/EOD_ru.pdf.
7. *Leitenstorfer A., Hunsche S., Shah J., Nuss M.C., Knox W.H.* // Appl. Phys. Lett. 1999. V.74. P. 1516. <https://doi.org/10.1063/1.123601>.
8. *Грачев Я.В., Осипова М.О., Беспалов В.Г.* // КЭ. 2014. Т. 44. С. 1170. <https://doi.org/10.1070/QE2014v044n12ABEH015520>.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Импульсный ТГц-спектрометр компании “ТИДЕКС”.

Рис. 2. Принципиальная оптическая схема широкополосного импульсного спектрометра.

Рис. 3. Оптическое выпрямление.

Рис. 4. Схематическая диаграмма опыта по изучению электрооптического эффекта. Поляризация электрооптического кристалла представлена до и после прохождения лучом поляризационной оптики.

Рис. 5. Направления поляризации ТГц-поля и пробного лазерного пучка в кристалле ZnTe.

Рис. 6. Второй порядок нелинейной восприимчивости в ZnTe.

Рис. 7. Нормированная амплитуда функции детектированного отклика $F(\omega, \omega_{\text{THz}})$ для ZnTe. при длительности оптического импульса 100 фс и разной толщине кристаллов.

Рис. 8. Внешний вид электрооптического детектора импульсного ТГц-излучения компании “ТИДЕКС”.

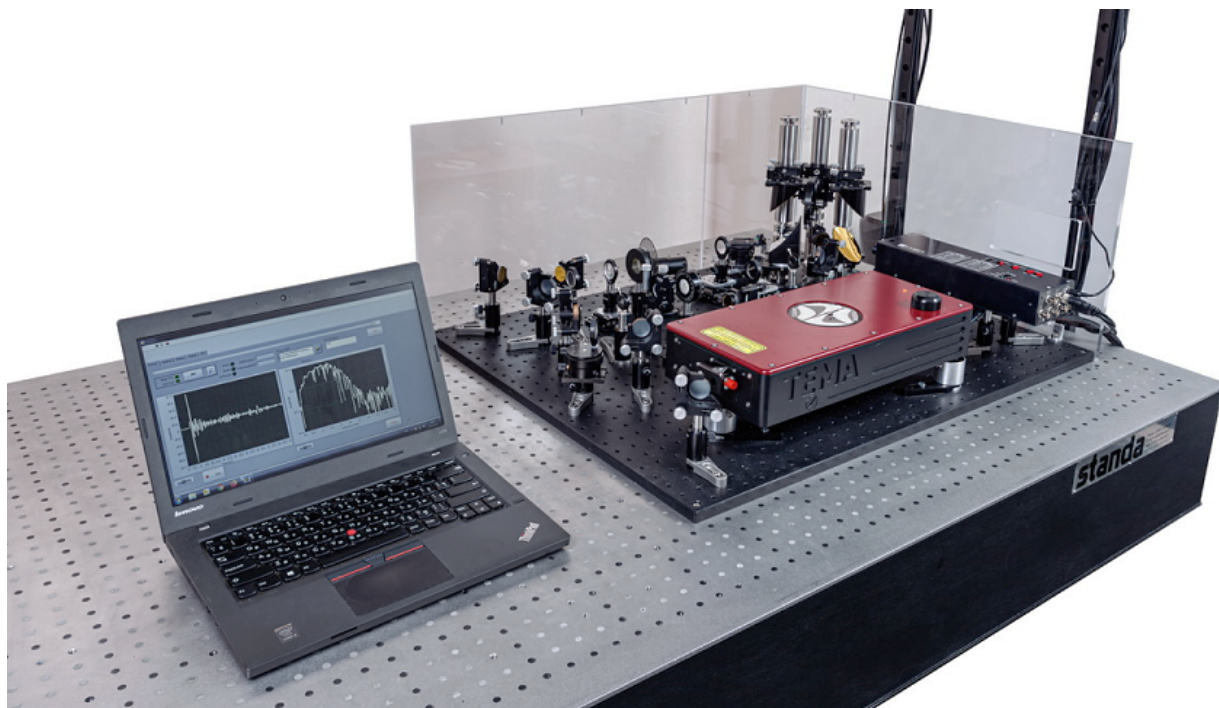


Рис. 1

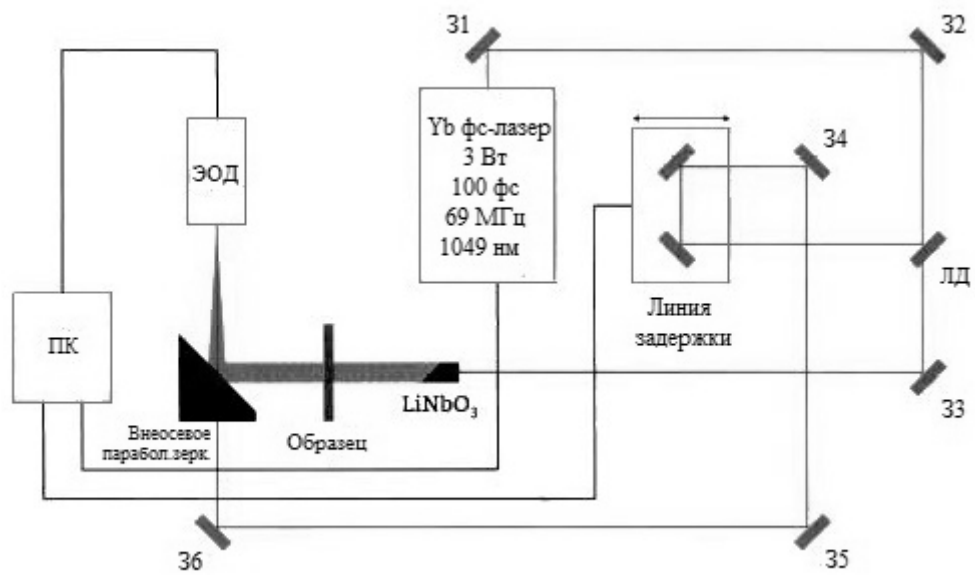


Рис. 2

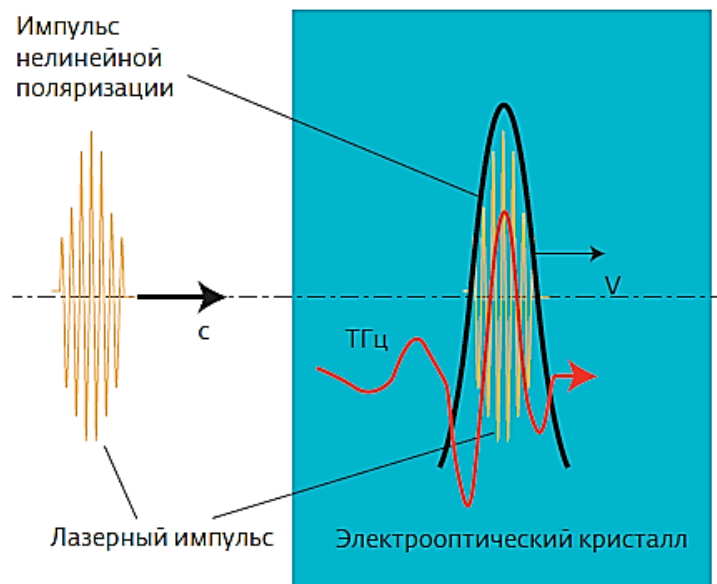


Рис. 3

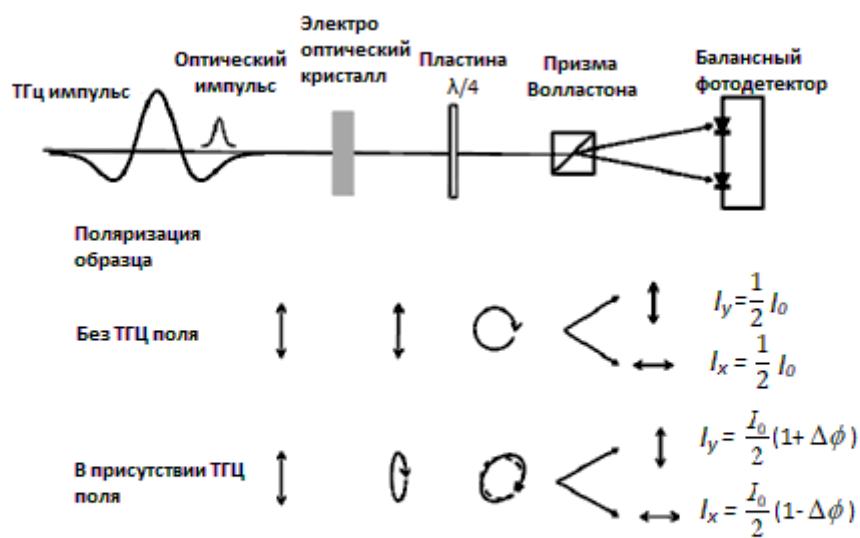


Рис. 4

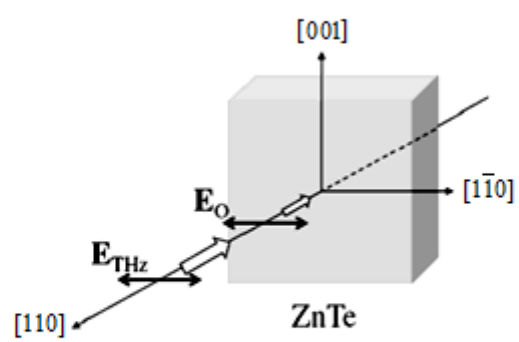


Рис. 5

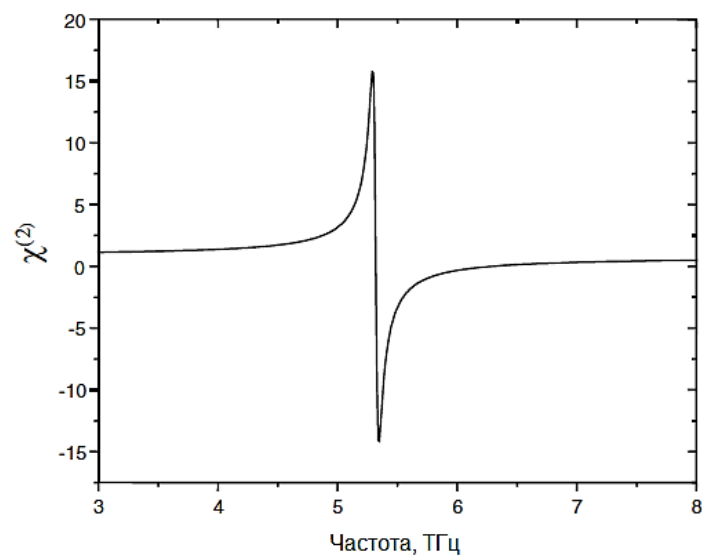


Рис. 6

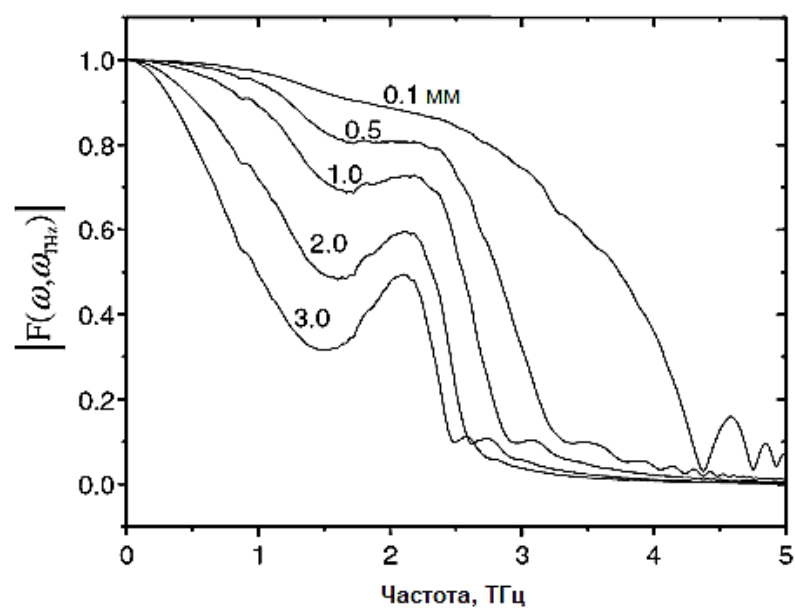


Рис. 7



Рис. 8