

УДК 538.9

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В КРЕМНИИ, НАВЕДЕННЫЙ ИМПУЛЬСОМ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2021 г. О. В. Чефонов^{1, *}, А. В. Овчинников^{1, **}, М. Б. Агранат^{1, ***}

¹ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*E-mail: oleg.chefonov@gmail.com

**E-mail: a.ovtch@gmail.com

***E-mail: agranat2004@mail.ru

Поступила в редакцию 25.02.2021 г.

После доработки 30.08.2021 г.

Принята к публикации 28.09.2021 г.

В работе представлены экспериментальные результаты исследования нелинейного оптического эффекта в образцах кристаллического кремния с различной степенью и типом легирования, индуцированного электрическим полем ультракороткого импульса терагерцевого излучения в диапазоне напряженностей от 4 до 10 МВ/см. Экспериментально измерен электрооптический коэффициент для образцов кремния разной толщины и степенью легирования на длине волны 1240 нм. Получены оценки действительной части объемной нелинейной восприимчивости третьего порядка $\chi^{(3)}$, постоянной Керра и нелинейного показателя преломления n_2 .

DOI: 10.31857/S0040364421050033

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время экспериментальные исследования с использованием терагерцевого (ТГц) излучения представляют собой активно развивающуюся междисциплинарную область [1–5]. Благодаря прогрессу в генерации ТГц-импульсов [6] стало возможным получение электромагнитных полей с пиковой напряженностью в несколько десятков МВ/см в спектральном диапазоне 1–10 ТГц с помощью относительно компактных настольных установок [7–13]. Такие высокие значения напряженности электрического поля позволили открыть область нелинейной ТГц-спектроскопии, в которой низкочастотные моды вещества переводятся в режимы с колебаниями большой амплитуды [14–17], проводить исследования и получать ранее недоступную информацию о силовом воздействии ТГц-импульсов на тонкие металлические пленки [18–21], исследовать генерацию носителей заряда за счет ударной ионизации и нелинейные эффекты в полупроводниках [22–29], управлять спиновой динамикой в ферроиках [30–32].

С развитием интенсивных источников терагерцевого диапазона стало возможным наблюдать и изучать нелинейные оптические эффекты, индуцированные ТГц-полем, в различных аморфных и кристаллических средах [33–39]. Одним из таких эффектов, возникающих под действием импульсов ТГц-излучения, является эффект Керра, который описывает изменение показателя преломления среды под действием внешнего электрического поля.

Данный эффект пропорционален квадрату напряженности приложенного электрического поля, в отличие от эффекта Поккельса, который по полю линеен, и может наблюдаться в любых материалах. Оба электрооптических эффекта практически безынерционны (временной отклик порядка 1 фс [40]) и в связи с этим активно используются при создании современных оптических модуляторов и затворов.

Для постоянного электрического поля закон Керра выражается как $\Delta n = K\lambda E^2$, где K – постоянная Керра, λ – длина волны в вакууме, E – напряженность электрического поля. На оптических частотах наблюдается зависящая от интенсивности модуляция показателя преломления $\Delta n = n_2 I$, что приводит к хорошо известным нелинейным оптическим эффектам, таким как самофокусировка (линза Керра), фазовая самомодуляция и двойное лучепреломление, которые обычно измеряются посредством деполяризации слабого зондирующего излучения (оптический эффект Керра).

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований нелинейного оптического эффекта в образцах кристаллического кремния с различными степенью и типом легирования, индуцированного электрическим полем субпикосекундного импульса терагерцевого излучения при напряженностях электрического поля от 4 до 10 МВ/см.

Результаты подобных исследований крайне важны для развития кремниевой фотоники и кремниевой оптоэлектроники, которые в настоящее время рассматриваются как основные платформы для оптической связи в центрах обработки и передачи данных, разработки и оптимизации сверхбыстрого кремниевого электрооптического переключателя для интегрально-оптических приложений, а также для задач, где требуются дополнительные кремниевые функциональные возможности, основанные на оптических нелинейностях, включая квантовую фотонику.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментов изображена на рис. 1. Экспериментальные исследования выполнялись на базе уникальной хром-форстеритовой лазерной системы [41], собранной по схеме усиления chirпированного импульса и состоящей из задающего генератора, стретчера, усилительных каскадов и временного компрессора. В обычном режиме работы лазерная система позволяет получить на выходе из временного компрессора оптические импульсы на длине волны 1240 нм с энергией до 40 мДж, длительностью 100 фс и частотой

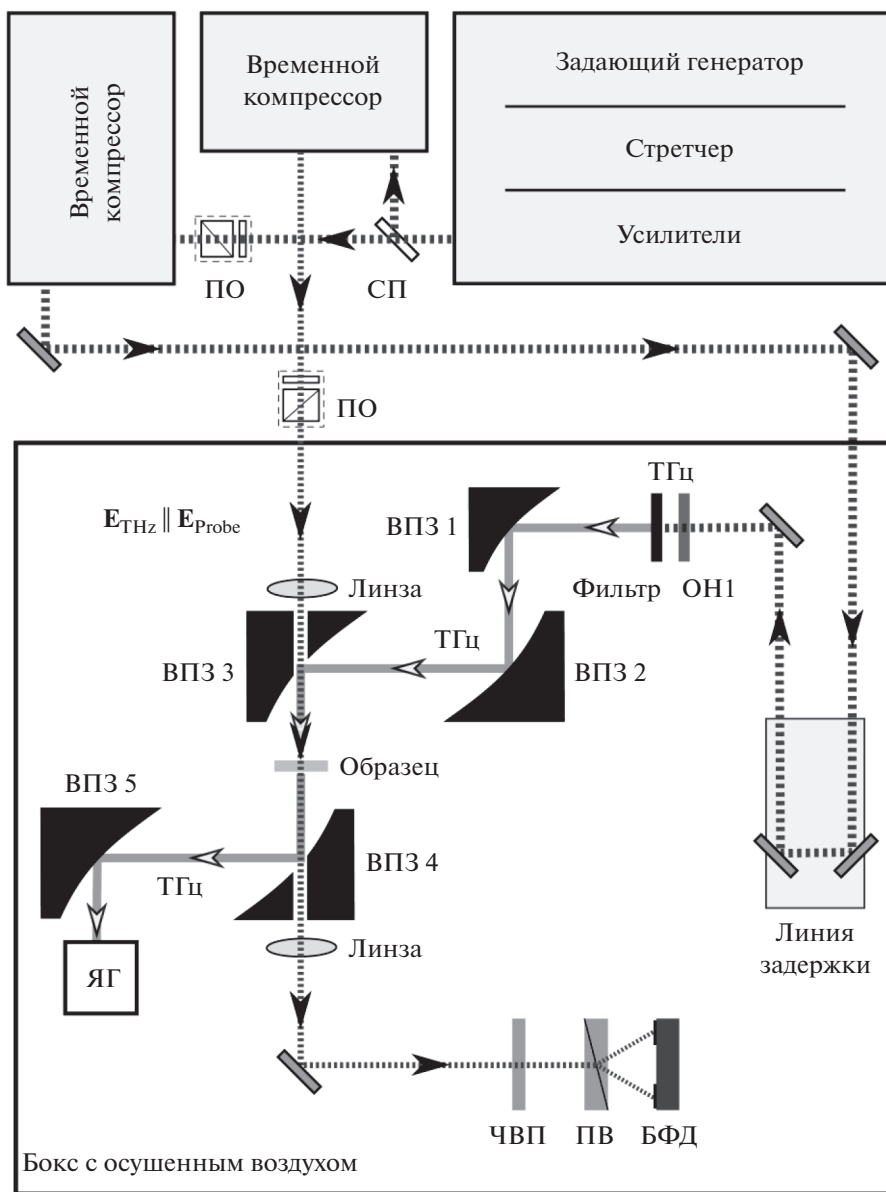


Рис. 1. Схема экспериментов: СП – светоделительная пластина; ПО – поляризационные ослабители; ВПЗ 1, ВПЗ 2, ВПЗ 3, ВПЗ 4, ВПЗ 5 – внеосевые параболические зеркала; ЯГ – ячейка Голея; ЧВП – четвертьволновая пластина; ПВ – призма Волластона; БФД – балансные фотодиоды; E_{THz} , E_{Probe} – векторы напряженности электрического поля терагерцевого и зондирующего импульсов.

повторения 10 Гц. Лазерное излучение после усиленных каскадов делилось на две части с помощью светоделительной пластины (СП). Основная часть энергии лазерного импульса (98%) предназначалась для накачки нелинейного кристалла и генерации терагерцевых импульсов, а другая часть (2%) служила в качестве зондирующего импульса. Регулировка энергии импульса накачки и зондирующего импульса осуществлялась поляризационными ослабителями (ПО), состоящими из полуволновой пластины и призмы Глана–Томпсона.

ТГц-импульсы генерировались методом оптического выпрямления фемтосекундных импульсов хром-форстеритовой лазерной системы в нелинейном органическом кристалле ОН1 (2-(3-(4-гидроксистирил)-5,5-диметилциклогексо-2-энилиден)малонитрил) толщиной 570 мкм и диаметром 8 мм. Плотность энергии лазера накачки, падающей на кристалл ОН1, имела величину порядка 10 мДж/см², при этом эффективность преобразования излучения лазерной накачки в терагерцевое составила 2.5%. После кристалла ОН1 был установлен отрезающий широкополосный ТГц-фильтр (LPF8.8-47, Tydex), блокирующий длины волн меньше 34 мкм. Коэффициент ослабления отрезающего фильтра на длине волны излучения лазерной накачки 1240 нм составлял не менее 10⁸. Для достижения максимальной напряженности электрического поля ТГц-импульса и максимальной плотности энергии ТГц-пучков на выходе из кристалла ОН1 расширился с 8 до 48 мм с помощью телескопа, собранного из двух внеосевых параболических зеркал (ВПЗ 1 и ВПЗ 2) с эффективными фокусными расстояниями 25.4 и 152.4 мм. Фокусировка ТГц-излучения на экспериментальный образец осуществлялась внеосевым параболическим зеркалом (ВПЗ 3) с эффективным фокусным расстоянием 50.8 мм и диаметром 50.8 мм. Радиус ТГц-пучка в фокальной плоскости составил 154 мкм по уровню 1/е². Измерения размера ТГц-пучка проводились специализированной терагерцевой камерой (RIGI, Swiss Terahertz). Энергия ТГц-импульсов измерялась с помощью дополнительной пары параболических зеркал (ВПЗ 4 и ВПЗ 5) и калиброванной ячейки Голя (ЯГ) (GS-1D, Tydex). Максимальная энергия ТГц-импульсов в экспериментах равнялась 120 ± 4 мкДж. Длительность ТГц-импульса определялась по измеренной волновой форме и составила порядка 400 фс по уровню FWHM (полная ширина на уровне половинной амплитуды). Волновая форма ТГц-импульса была измерена методом электрооптического детектирования на кристалле GaP (фосфид галлия) толщиной 200 мкм. На рис. 2 приведены временной профиль ТГц-импульса (рис. 2а) и его спектр (рис. 2б), восстановленный преобразованием Фурье. По измеренным параметрам ТГц-излучения (размер пучка, энергия, длительность) выполнена оценка максимального значения напря-

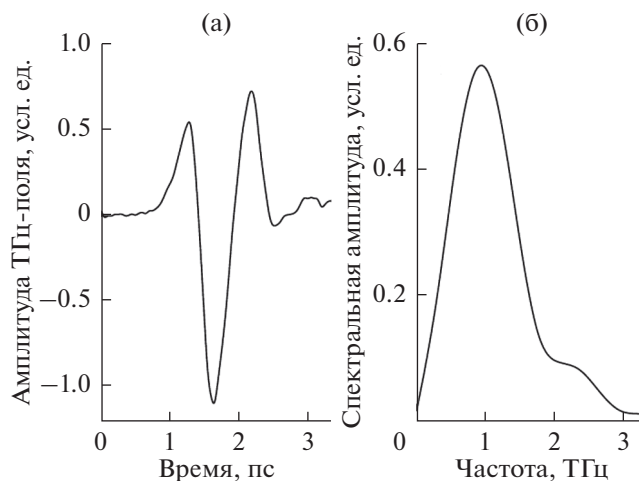


Рис. 2. Временной профиль электрического поля ТГц-импульса (а) и восстановленный спектр ТГц-импульса с помощью преобразования Фурье (б).

женности электрического поля ТГц-импульса [42], которая составила около 24 МВ/см.

Зондирующий импульс (1240 нм) распространялся в одном направлении с ТГц-импульсом и фокусировался на образце в центральную область ТГц-пучка в пятно диаметром 20 мкм (по уровню 1/е²) линзой с фокусным расстоянием 100 мм. Интенсивность зондирующего излучения на образце составляла 10¹¹ Вт/см².

Зондирующий импульс перед образцом имеет линейную поляризацию, а после прохождения через образец приобретает эллиптическую поляризацию за счет двойного лучепреломления, наведенного электрическим полем ТГц-импульса. Эллиптичность детектируется в схеме с четвертьволновой пластинкой (ЧВП) и призмой Волластона (ПВ), которая разделяет входящий луч на два луча ортогональной поляризации, разность интенсивностей которых измеряется балансными фотодиодами (БФД) (PDB210C/M, Thorlabs), как функция временной задержки между ТГц-накачкой и оптическим зондирующим импульсом.

В экспериментах использовались пластины монокристаллического кремния марок КЭФ (100) толщиной 245 мкм (*n*-тип с концентрацией основных носителей $\sim 9 \times 10^{16}$ см⁻³), КДБ (100) толщиной 235 мкм (*p*-тип, $\sim 1.6 \times 10^{15}$ см⁻³) и КДБ (111) толщиной 470 мкм (*p*-тип, $\sim 1 \times 10^{12}$ см⁻³). Для первых двух образцов (*n*- и *p*-типа) концентрация основных носителей, которые использовались в предыдущих работах [23, 24, 26, 27], была измерена методом эффекта Холла. Для третьего образца концентрация носителей рассчитывалась по удельному сопротивлению, приведенному в паспорте производителя. Каждый образец фиксировался на специальном ин-

дивидуальном держателе и устанавливался на моторизованной двухкоординатной системе линейного позиционирования, которая позволяла перемещать образец вдоль и поперек оптической оси. Установка образцов в фокальную плоскость зеркала ВПЗ 3 (рис. 1) осуществлялась по результатам измерения терагерцевого пропускания образца методом z -сканирования [23, 24]. Для этого образец перемещался вдоль оптической оси ТГц-пучка в окрестностях его перетяжки, а прошедшее через образец ТГц-излучение регистрировалось ячейкой Голя с помощью зеркала ВПЗ 4 и ВПЗ 5. Эксперименты проводились при комнатной температуре в боксе с осушенным воздухом для уменьшения поглощения энергии ТГц-импульса водяными парами (абсолютная влажность при температуре 23°C составляла $\sim 0.43 \text{ г/м}^3$) в диапазоне значений напряженностей электрического поля ТГц-импульсов 4–10 МВ/см.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 приведены временные зависимости наведенного оптического двулучепреломления в различных образцах кремния на длине волны 1240 нм при воздействии на них ТГц-импульсом с напряженностью электрического поля 6.5 МВ/см. Для сравнения на рис. 3 также представлена возведенная в квадрат волновая форма ТГц-импульса (пунктирная кривая), которая показывает, что форма сигналов наведенного двойного лучепреломления не повторяет в точности форму ТГц-

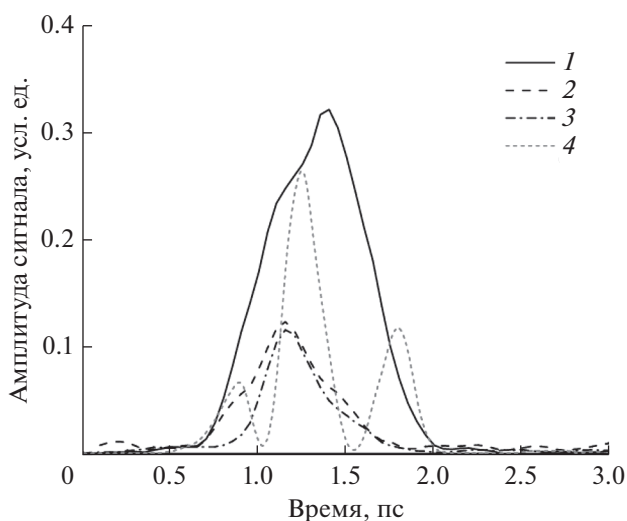


Рис. 3. Временные зависимости сигнала оптического двулучепреломления в кремнии, наведенного электрическим полем ТГц-импульса с напряженностью 6.5 МВ/см: 1 – кремний p -типа толщиной 470 мкм; 2 – p -типа, 235 мкм; 3 – s -типа, 245 мкм; 4 – квадрат волновой формы ТГц-импульса.

поля, а имеет вид огибающей волновой формы с одним центральным максимумом.

В общем случае величина регистрируемого электрооптического сигнала будет пропорциональна напряженности электрического поля E_{THz} , приложенного к кристаллу, его линейному электрооптическому коэффициенту r и толщине L :

$$S(\omega) \propto \frac{\omega L}{c} \Delta n = \frac{2\pi L}{\lambda} n_0^3 E_{\text{THz}} t_{\text{THz}} r, \quad (1)$$

где ω – круговая частота зондирующего импульса, c – скорость света, Δn – наведенное двойное лучепреломление, λ – длина волны зондирующего импульса, n_0 – показатель преломления кристалла на частоте зондирующего импульса, $t_{\text{THz}} = 2/(n_{\text{THz}} + 1)$ – амплитудный коэффициент пропускания Френеля кристалла на терагерцевой частоте, n_{THz} – показатель преломления кристалла на терагерцевой частоте.

Поведение сигнала, описываемое выражением (1), проиллюстрировано на рис. 3. При увеличении толщины кристалла (образцы кремния p -типа) в два раза происходит двукратное увеличение сигнала наведенного двулучепреломления при фиксированном значении напряженности поля.

Для кристалла GaP зависимость сигнала наведенного двулучепреломления от величины приложенного поля должна быть линейной (в области полей, где нелинейными эффектами среды можно пренебречь), так как обусловлена в основном эффектом Поккельса – линейным по полю электрооптическим эффектом, который связан с нелинейной восприимчивостью второго порядка $\chi^{(2)}$. В кремнии, который является centrosymmetric кристаллом, нелинейная восприимчивость второго порядка отсутствует и $\chi^{(2)} = 0$, вследствие чего будут отсутствовать и нелинейные эффекты второго порядка, а его нелинейность будет определяться кубической восприимчивостью $\chi^{(3)}$. Поэтому для кремния полевая зависимость сигнала наведенного двулучепреломления должна быть квадратичной $\sim E_{\text{THz}}^2$, так как данное явление относится к процессам с нелинейной восприимчивостью третьего порядка – электрооптический эффект Керра.

На рис. 4 представлены зависимости максимального значения электрооптического сигнала образцов кремния от максимальной амплитуды напряженности электрического поля ТГц-импульса. Как видно из графиков, в диапазоне напряженностей электрических полей от 4 до 10 МВ/см, которые значительно превышают пороговые пробойные значения для кремния ~ 0.5 МВ/см (для постоянного во времени поля), зависимости сигналов достаточно хорошо аппроксимируются степенной функцией с показателем степени 2, как и предпо-

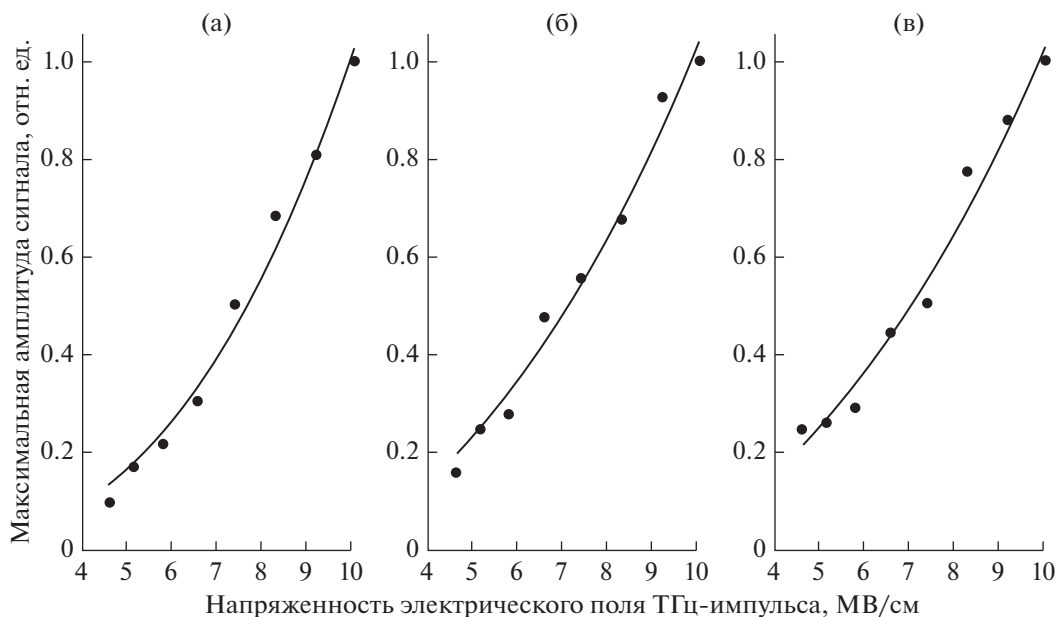


Рис. 4. Зависимости сигнала оптического двулучепреломления в кремнии, индуцированного электрическим полем ТГц-импульса в диапазоне напряженностей 4–10 МВ/см: (а) – кремний *p*-типа толщиной 470 мкм; (б) – *p*-типа, 235 мкм; (в) – *s*-типа, 245 мкм; точки – экспериментальные данные, линии – степенная аппроксимация.

лагалось выше (коэффициенты аппроксимации приведены в табл. 1).

По экспериментальным данным были получены оценки электрооптических коэффициентов образцов кремния на длине волны 1240 нм, действительной части объемной нелинейной восприимчивости третьего порядка $\chi^{(3)}$, постоянной Керра и нелинейного показателя преломления n_2 (коэффициент Керра) в диапазоне полей ТГц-импульсов 4–10 МВ/см.

Для этого с помощью выражения (1) с использованием измеренных параметров кристалла GaP было получено соотношение, позволяющее оценить эквивалентный линейный электрооптический коэффициент образцов кремния

$$r_{\text{Si}}^* = \frac{S_{\text{Si}}^{\text{meas}} k_{\text{GaP}} r_{\text{GaP}}}{S_{\text{GaP}}^{\text{meas}} k_{\text{Si}}}$$

Здесь $S_{\text{Si}}^{\text{meas}}$ и $S_{\text{GaP}}^{\text{meas}}$ – измеренные максимальные значения электрооптического сигнала для кристаллов кремния и фосфида галлия в условных единицах; k_{GaP} и $k_{\text{Si}} = \frac{2\pi L}{\lambda} n_0^3 E_{\text{THz}} t_{\text{THz}}$ – множитель из выражения (1) при электрооптическом коэффи-

циенте r для соответствующего кристалла; r_{GaP} – электрооптический коэффициент кристалла GaP. Параметры кристалла GaP: $r_{\text{GaP}} = 0.7 \times 10^{-12}$ м/В для частоты 1 ТГц, $n_0 = 3.1$ для длины волны 1240 нм, $n_{\text{THz}} = 3.34$ [43, 44], $S_{\text{GaP}}^{\text{meas}} = 6.5$ для поля 6.5 МВ/см. Параметры образцов кремния: $n_0 = 3.52$ для длины волны 1240 нм [45], $n_{\text{THz}} = 3.4$, $S_{\text{Si}}^{\text{meas}} = 0.32$ для *p*-типа толщиной 470 мкм, $S_{\text{Si}}^{\text{meas}} = 0.12$ для *p*-типа толщиной 235 мкм, $S_{\text{Si}}^{\text{meas}} = 0.11$ для *n*-типа толщиной 245 мкм для поля 6.5 МВ/см (см. рис. 3).

Следует отметить, что в экспериментах для каждого кристалла амплитуда сигнала зондирующего импульса на балансных диодах в отсутствие ТГц-поля устанавливалась на одном и том же уровне, так как измеряемый сигнал двойного лучепреломления зависит от интенсивности зондирующего импульса из-за специфики схемы регистрации.

Линейный электрооптический коэффициент r связан в свою очередь с нелинейной восприимчивостью второго порядка $\chi^{(2)}$ как $r = 2\chi^{(2)}/n_0^4$. Отсюда можно получить выражение для эквивалентной вос-

Таблица 1. Коэффициенты аппроксимационных функций вида $y = ax^b$ для рис. 4

Коэффициенты	<i>p</i> -Si, 470 мкм	<i>p</i> -Si, 235 мкм	<i>s</i> -Si, 245 мкм
<i>a</i>	0.0024 ± 8.121	0.00738 ± 0.0023	0.00964 ± 0.0029
<i>b</i>	2.6252 ± 0.154	2.14652 ± 0.1441	2.02435 ± 0.1418

Таблица 2. Экспериментальные оценки нелинейной восприимчивости $\chi^{(3)}$, постоянной Керра K и нелинейного коэффициента показателя преломления n_2 для различных образцов кремния на длине волны 1240 нм в диапазоне полей 4–10 МВ/см

Материал	$\chi^{(3)}$, $10^{-21} \text{ м}^2/\text{В}^2$	K , $10^{-16} \text{ м}/\text{В}^2$	n_2 , $10^{-20} \text{ м}^2/\text{Вт}$
<i>p</i> -Si (111), 470 мкм	1.2	8.3	2.7
<i>p</i> -Si (100), 235 мкм	0.9	6.2	2.1
<i>n</i> -Si (100), 245 мкм	0.8	5.7	1.9

приимчивости второго порядка $\chi_{\text{eq}}^{(2)}$ для кремния – $\chi_{\text{eq}}^{(2)} = \chi^{(3)} E_{\text{THz}} = r_{\text{Si}}^* n_0^4 / 2$, и далее найти значения нелинейной восприимчивости третьего порядка $\chi^{(3)}$ и другие параметры [46]. В табл. 2 приведены результаты оценок нелинейной восприимчивости третьего порядка $\chi^{(3)}$, постоянной Керра $K = 3\chi^{(3)} / (\lambda n_0)$ и нелинейного коэффициента показателя преломления $n_2 = 3\chi^{(3)} / (4n_0^2 c \epsilon_0)$, где $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ Ф}/\text{м}$ – диэлектрическая постоянная, для экспериментальных образцов на длине волны 1240 нм в диапазоне полей ТГц-импульсов 4–10 МВ/см.

На рис. 5 приведены измеренные временные зависимости сигнала оптического двулучепреломления в образцах кремния *p*-типа толщиной 235 и 470 мкм на длине волны 1240 нм, индуцированно-го электрическим полем ТГц-импульса с напря-

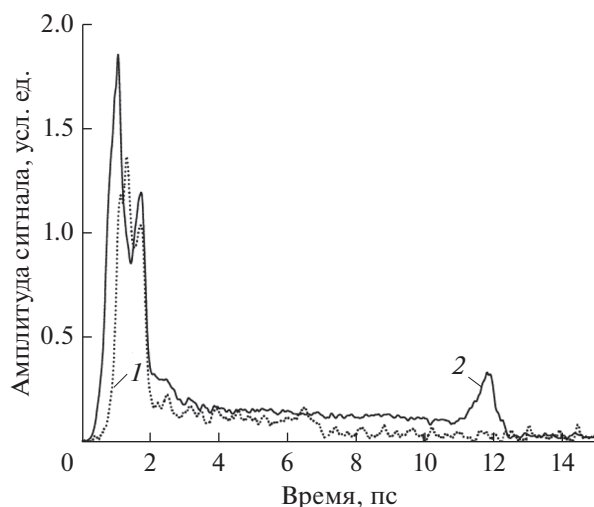


Рис. 5. Временные зависимости сигнала наведенного оптического двулучепреломления в кремнии *p*-типа толщиной 235 (1) и 470 мкм (2) при воздействии ТГц-импульсом с напряженностью электрического поля 24 МВ/см.

женностью 24 МВ/см, в диапазоне временных задержек до 15 пс.

В начальный момент времени 0–2 пс сигналы демонстрируют временную структуру с особенностями, напоминающую отклики, приведенные на рис. 3, но с провалом в центральной части в окрестности 1.2 пс, где интенсивность ТГц-импульса максимальна. После окончания действия ТГц-импульса (от 2 пс и далее) сигнал наведенного двулучепреломления резко спадает, но полностью не исчезает и далее плавно затухает в течение нескольких пикосекунд в зависимости от толщины образца. При временах задержки около 6.5 и 12 пс во временной зависимости можно заметить усиление в сигнале наведенного двулучепреломления, по форме напоминающее то, которое наблюдается в начальный момент перекрытия импульсов накачки и зондирования на рис. 3. Оценки показывают, что эти времена соответствуют двукратному переотражению ТГц-импульса в образцах кремния толщиной 235 и 470 мкм соответственно. На временах, превышающих время двукратного переотражения, сигнал наведенного двойного лучепреломления исчезает полностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные измерения нестационарного оптического двойного лучепреломления образцов кристаллического кремния с различной степенью легирования и толщиной на длине волны 1240 нм, индуцированного интенсивными ТГц-импульсами в диапазоне напряженностей электрических полей 4–10 МВ/см. В данном диапазоне напряженностей для всех образцов наблюдается квадратичная зависимость сигнала двулучепреломления от величины ТГц-поля, которая соответствует электрооптическому эффекту Керра. Получены оценки электрооптического коэффициента, действительной части объемной нелинейной восприимчивости третьего порядка $\chi^{(3)}$, постоянной Керра и нелинейного показателя преломления n_2 для образцов кремния на длине волны 1240 нм.

Показано, что при воздействии ТГц-импульса с напряженностью электрического поля 24 МВ/см на образцы кремния *p*-типа толщиной 470 и 235 мкм наблюдается сильно нелинейный отклик в сигнале наведенного двулучепреломления. После окончания действия ТГц-импульса индуцированная анизотропия продолжает сохраняться в течение нескольких пикосекунд и пропадает на временах, превышающих время двукратного переотражения ТГц-импульса в образце.

Все экспериментальные работы были выполнены на уникальной тераваттной хром-форстеритовой лазерной системе (УНУ “ЛТФК”) в центре коллективного пользования “Лазерный фемтосекундный комплекс” ОИВТ РАН. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства нау-

ки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-15-2020-785 от 23 сентября 2020 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Manjappa M., Singh R.* Materials for Terahertz Optical Science and Technology // *Adv. Opt. Mater.* 2020. V. 8. P. 1901984.
2. *Ильина И.В., Ситников Д.С., Агранат М.Б.* Современное состояние исследований влияния терагерцевого излучения на живые биологические системы // *ТВТ.* 2018. Т. 56. № 5. С. 814.
3. *Peng Y., Shi Ch., Wu X., Zhu Y., Zhuang S.* Terahertz Imaging and Spectroscopy in Cancer Diagnostics: A Technical Review // *BME Frontiers.* 2020. V. 2020. P. 2547609.
4. *Feng Ch., Otani Ch.* Terahertz Spectroscopy Technology as an Innovative Technique for Food: Current State-of-the-Art Research Advances // *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2020. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1779649>
5. *Papaioannou E.Th., Beigang R.* THz Spintronic Emitters: a Review on Achievements and Future Challenges // *Nanophotonics.* 2021. V. 10. P. 1243.
6. *Jazbinsek M., Puc U., Abina A., Zidansek A.* Organic Crystals for THz Photonics // *Appl. Sci.* 2019. V. 9. P. 882.
7. *Vicario C., Ovchinnikov A., Ashitkov S., Agranat M., Fortov V., Hauri C.* Generation of 0.9-mJ THz Pulses in DSTMS Pumped by a Cr:Mg₂SiO₄ Laser // *Opt. Lett.* 2014. V. 39. P. 6632.
8. *Vicario C., Monoszlai B., Hauri C.P.* GV/m Single-Cycle Terahertz Fields from a Laser-Driven Large-Size Partitioned Organic Crystal // *Phys. Rev. Lett.* 2014. V. 112. P. 213901.
9. *Shalaby M., Hauri C.P.* Demonstration of a Low-frequency Three-dimensional Terahertz Bullet with Extreme Brightness // *Nat. Commun.* 2015. V. 6. P. 5976.
10. *Vicario C., Jazbinsek M., Ovchinnikov A., Chefonov O., Ashitkov S., Agranat M., Hauri C.* High Efficiency THz Generation in DSTMS, DAST and OH1 Pumped by Cr:forsterite Laser // *Opt. Express.* 2015. V. 23. P. 4573.
11. *Овчинников А.В., Чефонов О.В., Молчанов В.Я., Юшков К.Б., Викарио К., Хаури К.* Генерация перестраиваемого по частоте импульсного терагерцевого излучения хром-форстеритовой лазерной системой с акустооптическим управлением временным профилем импульсов // *Квантовая электроника.* 2016. V. 46. № 12. С. 1149.
12. *Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Agranat M.B., Fortov V.E., Jazbinsek M., Hauri C.P.* Generation of Strong-field Spectrally Tunable Terahertz Pulses // *Opt. Express.* 2020. V. 28. P. 33921.
13. *Fülöp J.A., Tzortzakis S., Kampfrath T.* Laser-Driven Strong-Field Terahertz Sources // *Adv. Opt. Mater.* 2020. V. 8. P. 1900681.
14. *Kampfrath T., Tanaka K., Nelson K.A.* Resonant and Nonresonant Control Over Matter and Light by Intense THz Transients // *Nat. Photonics.* 2013. V. 7. P. 680.
15. *Tanaka K., Hirori H., Nagai M.* THz Nonlinear Spectroscopy of Solids // *IEEE Trans. Sci. Technol.* 2011. V. 1. P. 301.
16. *Hebling J., Yeh K.-L., Hoffmann M.C., Nelson K.A.* High-power THz Generation, THz Nonlinear Optics, and THz Nonlinear Spectroscopy // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2008. V. 14. P. 345.
17. *Romashevskiy S.A., Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Agranat M.B.* Subpicosecond Terahertz Radiation with an Electric Field above 1 MV/cm: Interaction with Condensed Matter and its Applications // *High Temp.* 2017. V. 55. № 6. P. 859.
18. *Овчинников А.В., Чефонов О.В., Агранат М.Б.* Разрушение тонких пленок свинца под воздействием сверхкоротких импульсов терагерцевого излучения // *ТВТ.* 2020. Т. 58. № 4. С. 641.
19. *Chefonov O.V., Ovchinnikov A.V., Evlashin S.A., Agranat M.B.* Damage Threshold of Ni Thin Film by Terahertz Pulses Journal of Infrared // *Millimeter, and Terahertz Waves.* 2018. V. 39. Iss. 11. P. 1047.
20. *Agranat M.B., Chefonov O.V., Ovchinnikov A.V., Kondratenko P.S., Ashitkov S.I., Fortov V.E.* Damage in a Thin Metal Film by High-Power Terahertz Radiation // *Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 120. P. 085704.
21. *Chefonov O.V., Ovchinnikov A.V., Evlashin S.A., Agranat M.B.* Degradation and Destruction of Thin Steel Films under Repeated Exposure to Ultrashort Pulses of THz Radiation // *Tech. Phys. Lett.* 2019. V. 45. № 6. P. 570.
22. *Chai X., Ropagnol X., Ovchinnikov A., Chefonov O., Ushakov A., Garcia-Rosas C.M., Isgandarov E., Agranat M., Ozaki T., Savel'ev A.* Observation of Cross-over from Intraband to Interband Nonlinear Terahertz Optics // *Opt. Lett.* 2018. V. 43. P. 5463.
23. *Chefonov O.V., Ovchinnikov A.V., Romashevskiy S.A., Chai X., Ozaki T., Savel'ev A.B., Agranat M.B., Fortov V.E.* Giant Self-induced Transparency of Intense Few-cycle Terahertz Pulses in n-doped Silicon // *Opt. Lett.* 2017. V. 42. P. 4889.
24. *Chefonov O.V., Ovchinnikov A.V., Agranat M.B., Fortov V.E., Efimenko E.S., Stepanov A.N., Savel'ev A.B.* Nonlinear Transfer of an Intense Few-cycle Terahertz Pulse Through Opaque n-doped Si // *Phys. Rev. B.* 2018. V. 98. P. 165206.
25. *Hirori H., Shinokita K., Shirai M., Tani S., Kadoya Y., Tanaka K.* Extraordinary Carrier Multiplication Gated by a Picosecond Electric Field Pulse // *Nat. Commun.* 2011. V. 2. P. 594.
26. *Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Mishina E.D., Agranat M.B.* Second Harmonic Generation in the Bulk of Silicon Induced by an Electric Field of a High Power Terahertz Pulse // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. P. 9753.
27. *Savel'ev A., Chefonov O., Ovchinnikov A., Rubtsov A., Shkurinov A., Zhu Y., Agranat M., Fortov V.* Transient Optical Non-linearity in p-Si Induced by a Few Cycle Extreme THz Field // *Opt. Express.* 2021. V. 29. P. 5730.
28. *Chefonov O.V., Ovchinnikov A.V., Agranat M.B., Stepanov A.N.* Terahertz Beam Spot Size Measurements by a CCD Camera // *Opt. Lett.* 2019. V. 44. P. 4099.
29. *Chefonov O.V., Ovchinnikov A.V., Sitnikov D.S., Agranat M.B.* Focal Spot Imaging of Terahertz Subpicosecond Pulse by THz-field-induced Optical Second Harmonic Generation // *High Temp.* 2019. V. 57. № 1. P. 137.
30. *Kampfrath T., Sell A., Klatt G., Pashkin A., Mahrlein S., Dekorsy T., Wolf M., Fiebig M., Leitenstorfer A., Huber R.*

- Coherent Terahertz Control of Antiferromagnetic Spin Waves // Nat. Photonics. 2011. V. 5. P. 31.
31. *Baierl S., Mentink J.H., Hohenleutner M., Braun L., Do T.-M., Lange C., Sell A., Fiebig M., Woltersdorf G., Kampfrath T., Huber R.* Terahertz-Driven Nonlinear Spin Response of Antiferromagnetic Nickel Oxide // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 117. P. 197201.
 32. *Chefonov O.V., Ovchinnikov A.V., Hauri C.P., Agranat M.B.* Broadband and Narrowband Laser-based Terahertz Source and its Application for Resonant and Non-resonant Excitation of Antiferromagnetic Modes in NiO // Opt. Express. 2019. V. 27. P. 27273.
 33. *Hoffmann M.C., Brandt N.C., Hwang H.Y., Yeh K., Nelson K.A.* Terahertz Kerr Effect // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. P. 231105.
 34. *Zalkovskij M., Strikwerda A.C., Iwaszczuk K., Popescu A., Savastru D., Malureanu R., Lavrinenko A.V., Jepsen P.U.* Terahertz-induced Kerr Effect in Amorphous Chalcogenide Glasses // App. Phys. Lett. 2013. V. 103. P. 221102.
 35. *Cornet M., Degert J., Abraham E., Freysz E.* Terahertz Kerr Effect in Gallium Phosphide Crystal // J. Opt. Soc. Am. B. 2014. V. 31. P. 1648.
 36. *Sajadi M., Wolf M., Kampfrath T.* Terahertz-field-induced Optical Birefringence in Common Window and Substrate Materials // Opt. Express. 2015. V. 23. P. 28985.
 37. *Vicario C., Shalaby M., Hauri C.P.* Subcycle Extreme Nonlinearities in GaP Induced by an Ultrastrong Terahertz Field // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 118. P. 083901.
 38. *Shalaby M., Vicario C., Hauri C.P.* Extreme Nonlinear Terahertz Electro-optics in Diamond for Ultrafast Pulse Switching // APL Photonics. 2017. V. 2. P. 036106.
 39. *Tan Y., Zhao H., Zhang R., Zhang C., Zhao Y., Zhang L.* Ultrafast Optical Pulse Polarization Modulation Based on the Terahertz-induced Kerr Effect in Low-density Polyethylene // Opt. Express. 2020. V. 28. P. 35330.
 40. *Lin H., Ogbuu O., Liu J., Zhang L., Michel J., Hu J.* Breaking the Energy-Bandwidth Limit of Electrooptic Modulators: Theory and a Device Proposal // J. Lightwave Technol. 2013. V. 31. P. 4029.
 41. *Агранат М.Б., Ашитков С.И., Иванов А.А., Конященко А.В., Овчинников А.В., Фортвов В.Е.* Тераваттная фемтосекундная лазерная система на хромфорстерите // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 6. С. 506.
 42. *Sitnikov D.S., Romashevskiy S.A., Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Savel'ev A.B., Agranat M.B.* Estimation of THz Field Strength by an Electro-optic Sampling Technique Using Arbitrary Long Gating Pulses // Laser Phys. Lett. 2019. V. 16. P. 115302.
 43. *Casalbuoni S., Schlarb H., Schmidt B., Schmäser P., Steffen B., Winter A.* Numerical Studies on the Electro-optic Detection of Femtosecond Electron Bunches // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2008. V. 11. P. 072802.
 44. *Adachi S.* Optical Dispersion Relations for GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, InSb, $Al_xGa_{1-x}As$, and $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. P. 6030.
 45. *Schinke C., Peest P.C., Schmidt J., Brendel R., Bothe K., Vogt M.R., Kröger I., Winter S., Schirmacher A., Lim S., Nguyen H.T., MacDonald D.* Uncertainty Analysis for the Coefficient of Band-to-band Absorption of Crystalline Silicon // AIP Adv. 2015. V. 5. P. 067168.
 46. *Boyd R.W.* Nonlinear Optics. 3rd ed. Acad. Press, 2008. 640 p.