

УДК 538.9

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ В КРЕМНИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИМПУЛЬСА С ВЫСОКОЙ НАПРЯЖЕННОСТЬЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

© 2022 г. А. В. Овчинников*, О. В. Чефонов**, М. Б. Агранат***

ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

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

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

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

Поступила в редакцию 03.06.2022 г.

После доработки 07.09.2022 г.

Принята к публикации 13.10.2022 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований генерации второй оптической гармоники фемтосекундного лазерного импульса с длиной волны излучения 1240 нм в поверхностном слое кремния при воздействии импульсами терагерцевого излучения с максимальной напряженностью электрического поля до 23 МВ/см. Показано, что в диапазоне полей до 15 МВ/см интенсивность второй гармоники пропорциональна диэлектрической восприимчивости $\chi^{(3)}$ и квадрату напряженности электрического поля терагерцевого импульса.

DOI: 10.31857/S0040364422050106

ВВЕДЕНИЕ

Генерация второй гармоники (ГВГ) является одним из наиболее широко используемых нелинейно-оптических процессов в экспериментальных исследованиях. Впервые ГВГ была продемонстрирована в 1961 г. благодаря изобретению лазера, обеспечивающего монохроматическое излучение с высокой интенсивностью [1]. Генерация второй гармоники также наблюдалась в центросимметричных средах, находящихся в постоянном или переменном электрическом поле. Электрическое поле приводило к нарушению симметрии, что устраняло запрет на ГВГ в такой среде [2]. О результатах по исследованию ГВГ, индуцированной электрическим полем (EFISH), сообщалось в ряде работ [3, 4]. Некоторое время эти измерения ограничивались низкочастотными полями переменного тока. Однако, благодаря разработкам источников интенсивных импульсов терагерцевого (ТГц) излучения [5, 6], в кристаллах бета-бората бария [7] и во многих центросимметричных средах [8] была обнаружена ГВГ, индуцированная полем ТГц-импульса (TFISH) [8–10]. TFISH описывается как нелинейное явление третьего порядка, в котором интенсивность сигнала второй гармоники (ВГ) пропорциональна интенсивности ТГц-импульса, квадрату интенсивности основной частоты лазера I_{ω} и нелинейной восприимчивости материала $\chi^{(3)}$

третьего порядка: $I_{2\omega}^{\text{TFISH}} \sim |\chi^{(3)}|^2 I_{\omega}^2 I_{\text{THz}}$. Теоретическое и экспериментальное исследование меха-

низма TFISH в полупроводниках было выполнено в ряде работ [11, 12]. Генерация второй гармоники, индуцированная импульсом ТГц-излучения, наблюдалась также в нецентросимметричных сегнетоэлектриках [13] и антиферромагнитных материалах [14]. Эти работы показали возможность разработки сверхбыстрых устройств на основе таких материалов, которые могли бы работать с пикосекундной скоростью обработки данных. Однако для наиболее часто используемых материалов, лежащих в основе большинства фотонных компонентов [15] и современной полупроводниковой промышленности [16, 17], пока недостаточно разработано методов управления симметрией центросимметричного кристалла кремния неразрушающим и сверхбыстрым способом. В связи с этим задача исследования свойств кремния и механизмов генерации второй оптической гармоники под действием импульсов ТГц-излучения сохраняет свою актуальность.

Ранее в работе [18] были представлены экспериментальные исследования генерации второй оптической гармоники в кремнии при воздействии импульсов ТГц-излучения с напряженностью электрического поля, падающей на образец, до 22 МВ/см. Было показано, что при напряженности электрического поля свыше 8 МВ/см наблюдается отклонение зависимости энергии импульса второй гармоники от напряженности электрического поля ТГц-импульса от квадратичной, что связывалось с изменением эф-

фактивной диэлектрической восприимчивости $\chi^{(2)}$, которая определялась как $\chi^{(2)}(E_\Omega) + \chi_j^{(2)}(j(E_\Omega)) = \chi^{(3)}E_\Omega + \chi^{(3)}j(E_\Omega)$, где E_Ω – напряженность электрического поля ТГц-импульса, а $j(E_\Omega)$ – плотность тока. Более детальный анализ экспериментальных данных затруднен в связи с используемой схемой эксперимента, в которой пучки ТГц- и зондирующего излучения распространялись в попутном направлении.

В данной работе представлены экспериментальные результаты исследования интенсивности генерации второй оптической гармоники инфракрасного фемтосекундного лазерного импульса в поверхностном слое пластины кремния при воздействии ТГц-импульсов с различной напряженностью электрического поля в диапазоне от 1 до 23 МВ/см (падающих на образец) при одновременном измерении временной зависимости пропускания зондирующего импульса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СХЕМА

Исследование индуцированной ГВГ в кремнии проводилось в схеме “pump-probe”, в которой в качестве накачки использовался импульс ТГц-излучения, а в качестве пробы – фемтосекундный импульс с длиной волны излучения 1240 нм и длительностью 100 фс. Экспериментальная схема для проведения исследований аналогична схеме в работе [19] и представлена на рис. 1.

Генерация импульсов ТГц-излучения осуществлялась методом оптического выпрямления лазерных импульсов с длиной волны излучения

1240 нм, длительностью импульса 80 фс и с энергией в импульсе до 30 мДж [20] в нелинейном органическом кристалле ДСТМС (4-N,N-диметиламино-4'-N'-метилстильбазолия 2,4,6-триметилбензолсульфонат) [21, 22]. Излучение хром-форстеритовой лазерной системы является оптимальным источником накачки для генерации ТГц-излучения в кристалле ДСТМС с эффективностью до 3% и гауссовым пространственным распределением [23, 24], что позволяет фокусировать ТГц-пучок в размер, близкий к дифракционному пределу [25, 26]. Для проведения экспериментов использовался кристалл ДСТМС диаметром 8 мм и толщиной 440 ± 5 мкм. Эффективность преобразования составляла 1.6%, а энергия импульса – 120 мкДж. Для ослабления излучения лазерной накачки после ТГц-кристалла был установлен фильтр, который ослаблял в 10^8 раз излучение с длиной волны меньше 34 мкм. Для достижения максимальной напряженности электрического поля пучок ТГц-излучения расширялся до ~50 мм с помощью телескопа 6 : 1, состоящего из двух внеосевых параболических зеркал (PM1 и PM2). Фокусировка ТГц-излучения осуществлялась с помощью внеосевого параболического зеркала (PM3) с эффективным фокусным расстоянием 50.8 мм и диаметром 50.8 мм. Диаметр ТГц-пучка в фокальной плоскости составил 170 ± 10 мкм по уровню 1/e, что близко к дифракционному пределу 154 мкм для центральной длины волны 170 мкм. Пространственное распределение ТГц-пучка измерялось “ножевым методом”.

Временная форма ТГц-импульса измерялась методом электрооптического детектирования. В качестве зондирующего излучения использовался фемтосекундный оптический импульс с длиной волны излучения 1240 нм, а в качестве электрооптического кристалла фосфид галлия (GaP (110)) толщиной 200 мкм.

Эксперименты проводились в геометрии встречного распространения зондирующего и ТГц-пучков, что позволяло исследовать ГВГ вблизи поверхности пластины кремния со стороны входа ТГц-импульса при максимально возможных значениях напряженности электрического поля ТГц-импульса.

Кремний является средой с центральной симметрией и генерация второй гармоники в объеме запрещена, так как диэлектрическая восприимчивость $\chi^{(2)} = 0$. Однако при наличии внешнего воздействия симметрия кремния может быть нарушена и генерация второй гармоники становится возможной [27]. Частным случаем такого воздействия может являться внешнее электрическое поле ТГц-импульса, при котором квадратичная восприимчивость становится отличной от нуля $\chi^{(2)} = \chi^{(2)}(E_\Omega) = \chi^{(3)}E_\Omega$, а соответствующая нелинейная поляризация имеет вид

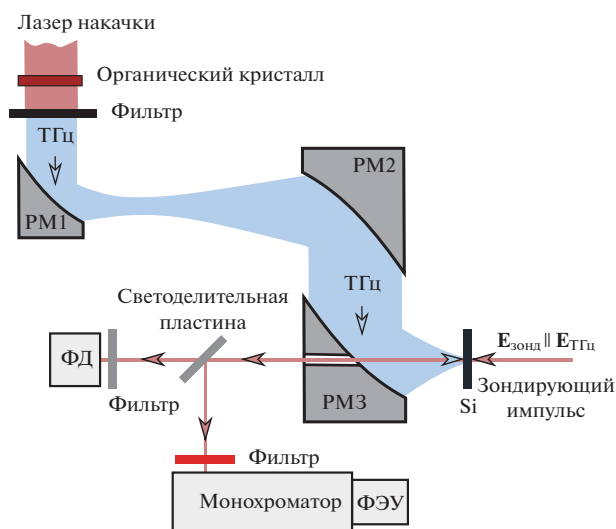


Рис. 1. Экспериментальная схема измерений: PM1, PM2, PM3 – внеосевые параболические зеркала; ФЭУ – фотоэлектронный умножитель; Si – кремниевая пластина; ФД – фотодиод.

$$P(2\omega) \propto \chi^{(3)} E_{\Omega} E_{\omega} E_{\omega},$$

где $\chi^{(3)}$ – феноменологический тензор объемной кубической восприимчивости среды, не обращающийся в нуль в centrosимметричных средах, а E_{ω} и E_{Ω} – электрические поля инфракрасного лазера и ТГц-импульсов.

Интенсивность излучения ГВГ достигает максимума на длине когерентности $l_c = \lambda / (4|n_{\omega} - n_{2\omega}|)$, где λ – длина волны излучения, $n_{\omega} = 3.515$ – показатель преломления среды на основной длине волны, $n_{2\omega} = 3.888$ – показатель преломления среды на длине волны второй гармоники, на которой выполняется условие фазового синхронизма. Длина когерентности в кремнии для длин волн 1240 и 620 нм составляет ~1 мкм. Область перекрытия ТГц- и зондирующего импульсов в случае встречной геометрии определяется как $l_{\text{THz}} = c\tau_{\text{THz}} / (|n_{\omega} + n_{\text{THz}}|)$, где τ_{THz} – длительность ТГц-импульса; $n_{\omega}, n_{\text{THz}}$ – показатели преломления кремния на длине волны зондирующего и ТГц-импульсов. Для ТГц-импульса длительностью 1 пс (FWHM) и $n_{\omega} = 3.52$, $n_{\text{THz}} = 3.56$ область кремния, в которой происходит нарушение симметрии в присутствии зондирующего импульса, составляет величину 42 мкм. Если для зондирующего излучения с длиной волны 1240 нм кремний является прозрачным материалом в невозбужденном состоянии (энергия кванта излучения зондирующего импульса 0.98 эВ меньше ширины запрещенной зоны кремния 1.1 эВ), то для излучения второй гармоники с длиной волны 620 нм кремний непрозрачен, а толщина слоя, в котором интенсивность излучения уменьшается в e раз, определяется как $l = \lambda / (4\pi k)$ и составляет величину ~3 мкм [28]. Так как $l_{\text{THz}} \gg l_c$, то генерация излучения второй гармоники возникает только при перекрытии зондирующего и ТГц-импульсов вблизи поверхности со стороны входа ТГц-импульса [29] в слое толщиной, не превышающей глубину свободного пробега фотона 620 нм.

Одновременно с измерением интенсивности второй гармоники измерялось пропускание излучения зондирующего импульса.

Излучение зондирующего импульса фокусировалось в центральную область ТГц-пучка в пятно диаметром 20 мкм (по уровню $1/e$) с помощью линзы с фокусным расстоянием 100 мм. Регистрация интенсивности излучения второй гармоники с длиной волны 620 нм осуществлялась фотоэлектронным умножителем с охлаждением для уменьшения шумов. Для блокирования излучения пробного импульса на основной частоте использовался интерференционный фильтр (FB620-10, Thorlabs) и монохроматор, настроенный на пропускание излучения с длиной волны 620 нм. Регистрация интенсивности излучения зондирующего

импульса, прошедшей через экспериментальный образец, осуществлялась InGaAs фотодиодом (DET01CFC/M, Thorlabs) с максимальной чувствительностью в диапазоне 800–1700 нм и постоянной времени ~1 нс. Интенсивность пробного излучения составляла 10^{10} Вт/см², что исключало возникновение каких-либо нелинейных эффектов в образце, а также было существенно ниже порога создания свободных носителей заряда за счет двухфотонного поглощения (энергия кванта излучения зондирующего импульса 0.98 эВ меньше ширины запрещенной зоны кремния).

В качестве экспериментального образца в работе использовалась полированная пластина кристаллического кремния, легированного атомами бора (*p*-тип), с ориентацией (100) и толщиной 235 мкм. Концентрация легирующей примеси составляла 1.6×10^{15} см⁻³ и определялась по измеренному удельному сопротивлению (12.2 Ом см) четырехзондовым методом. Образец был установлен на моторизованном трансляторе для оптимального расположения в фокальной плоскости фокусирующего параболического зеркала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для исследования генерации второй оптической гармоники в кремнии при воздействии импульсов ТГц-излучения были проведены измерения интенсивности второй гармоники и коэффициента пропускания кремния на длине волны излучения 1240 нм в зависимости от временной задержки между ТГц- и зондирующим импульсами при различных значениях напряженности электрического поля (рис. 2).

Так как процесс генерации второй оптической гармоники в centrosимметричной среде в присутствии электрического поля ТГц-импульса является безынерционным, то временная зависимость интенсивности второй гармоники должна повторять временную форму ТГц-импульса, а интенсивность должна быть пропорциональна квадрату напряженности электрического поля [29, 30]. На рис. 3 представлены результаты сравнения временной формы ТГц-импульса, временной зависимости интенсивности второй гармоники и коэффициента пропускания зондирующего импульса, полученные при максимальной напряженности электрического поля ТГц-импульса. Как видно из рисунка, при наличии четырех экстремумов во временной форме ТГц-импульсов в интенсивности второй гармоники наблюдаются только два максимума. При этом второй максимум по интенсивности значительно меньше первого, несмотря на то что напряженность электрического поля ТГц-импульса, падающего на образец, выше.

В ряде работ [31–33] было показано, что при воздействии ТГц-импульсов с высокой напряженно-

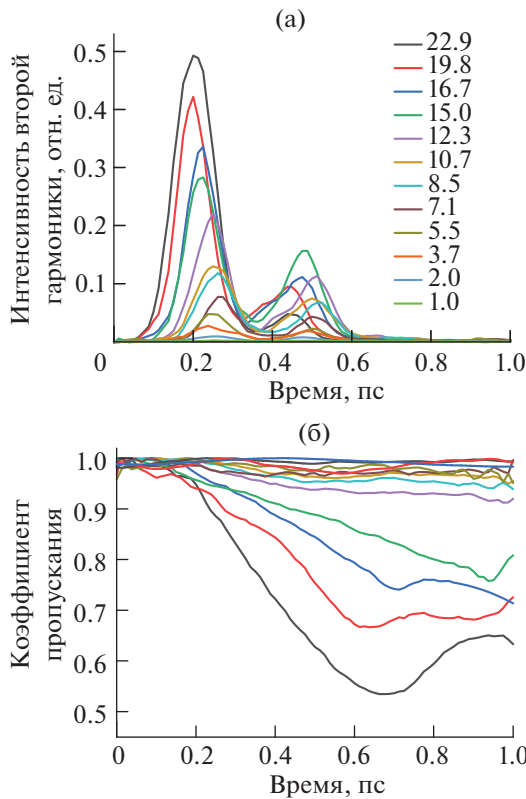


Рис. 2. Зависимости интенсивности второй гармоники (620 нм) (а) и пропускания зондирующего излучения (1240 нм) (б) от времени при напряженностях электрического поля ТГц-импульса 1.0–22.9 МВ/см.

стью электрического поля в кремнии происходит генерация свободных носителей заряда с высокой концентрацией. Для оценки влияния индуцированных носителей заряда на генерацию второй оп-

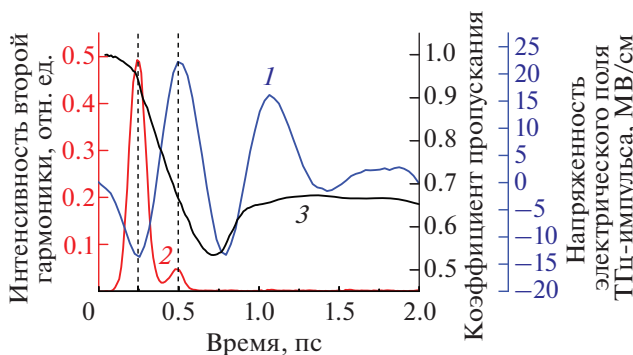


Рис. 3. Сравнение временной формы ТГц-импульса (1), падающего на образец, интенсивности второй гармоники (2) и зависимости коэффициента пропускания зондирующего излучения с длиной волны 1240 нм образцом кремния (3) при максимальной напряженности электрического поля (~23 МВ/см).

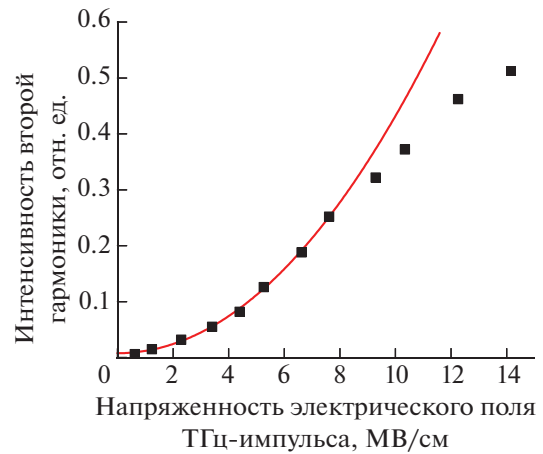


Рис. 4. Зависимость интенсивности ВГ в первом максимуме от напряженности электрического поля ТГц-импульса: точки – экспериментальные данные, кривая – квадратичная зависимость.

тической гармоники была построена зависимость интенсивности ВГ в первом максимуме (в области 200 фс) от напряженности электрического поля ТГц-импульса, падающего на образец, в первом экстремуме (рис. 4).

Как видно из рисунка, экспериментальные данные до ~8 МВ/см хорошо аппроксимируются квадратичной зависимостью, что свидетельствует о механизме ГВГ, связанном с воздействием импульса ТГц-излучения, при котором интенсивность ВГ пропорциональна диэлектрической восприимчивости $\chi^{(3)}$ и квадрату напряженности электрического поля ТГц-импульса [7, 10], как было показано выше. При напряженностях электрического поля свыше 8 МВ/см наблюдается отклонение от квадратичной зависимости. Кроме этого, начиная с данной величины напряженности электрического поля происходит уменьшение пропускания зондирующего импульса (рис. 2б), что может приводить к снижению интенсивности второй гармоники, так как $I_{2\omega} \sim I_{\omega}^2$. Зависимость ВГ от напряженности электрического поля с учетом уменьшения интенсивности зондирующего импульса представлена на рис. 5. В этом случае все экспериментальные точки хорошо аппроксимируются квадратичной зависимостью. Таким образом, механизм ГВГ при значениях напряженности электрического поля ТГц-импульса до ~14 МВ/см не отличается от механизма при низких значениях полей [10].

Аналогичная обработка экспериментальных данных (с учетом изменения пропускания зондирующего излучения) выполнена для интенсивности второй гармоники во втором максимуме (рис. 2а), которая соответствовала второму экстремуму напряженности электрического поля ТГц-импуль-

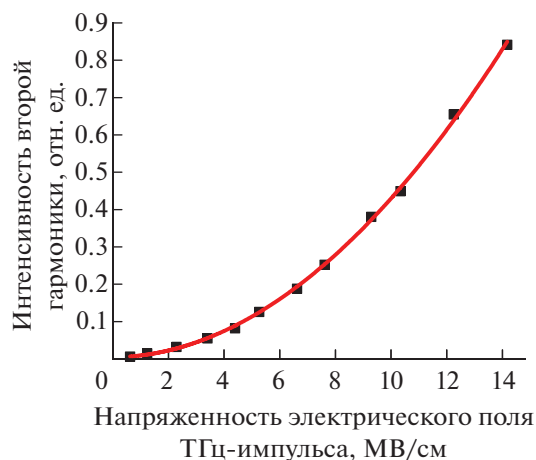


Рис. 5. Зависимость интенсивности ВГ в первом максимуме от напряженности электрического поля ТГц-импульса с учетом коэффициента пропускания пробного импульса: точки — экспериментальные данные, кривая — квадратичная зависимость.

са, величина которого достигала ~ 23 МВ/см (падающего на образец ТГц-импульса). Результаты представлены на рис. 6.

Как и для первого максимума второй гармоники, экспериментальные данные достаточно хорошо аппроксимируются квадратичной зависимостью до 15 МВ/см. При напряженностях электрического поля выше 15 МВ/см наблюдается существенное отклонение экспериментальных данных от квадратичной зависимости. Уменьшение интенсивности второй гармоники может быть связано с увеличением отражения и/или поглощения излучения ТГц-импульса вследствие образования высокой концентрации свободных носителей заря-

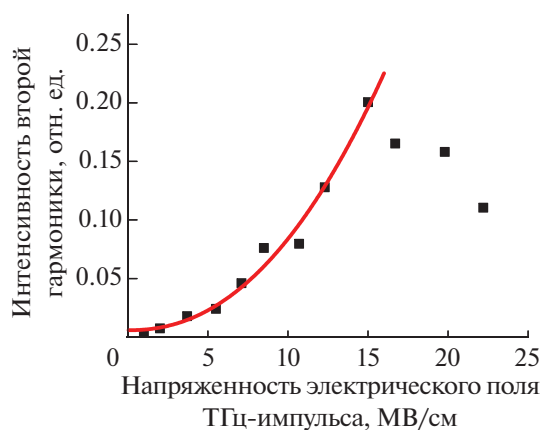


Рис. 6. Зависимость интенсивности ВГ во втором максимуме от напряженности электрического поля ТГц-импульса, падающего на образец, с учетом коэффициента пропускания пробного импульса: точки — экспериментальные данные, кривая — квадратичная зависимость.

да либо с изменением эффективной диэлектрической восприимчивости второго порядка $\chi^{(2)}$ за счет возникновения транзиентных токов, как было предложено в ранее выполненной работе [18]. Полученные экспериментальные результаты не позволяют сделать однозначный вывод о причинах уменьшения интенсивности второй оптической гармоники при напряженностях электрического поля ТГц-импульса выше 15 МВ/см и требуются дополнительные исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования генерации второй оптической гармоники в кремнии при воздействии импульсов ТГц-излучения с напряженностью электрического поля до 23 МВ/см, падающего на образец, показали, что до 15 МВ/см интенсивность второй гармоники пропорциональна квадрату напряженности электрического поля ТГц-импульса, что соответствует механизму TFIISH. В диапазоне от 8 до 15 МВ/см необходимо учитывать ослабление зондирующего излучения с длиной волны 1240 нм в кремнии за счет генерации свободных носителей заряда под действием ТГц-импульса. При напряженностях поля выше 15 МВ/см, исходя из полученных экспериментальных данных, интерпретация зависимости интенсивности второй гармоники от напряженности электрического поля затруднена.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Franken P.A., Hill A.E., Peters C.W., Weinreich G. Generation of Optical Harmonics // Phys. Rev. Lett. 1961. V. 7. P. 118.
2. Terhune R.W., Maker P.D., Savage C.M. Optical Harmonic Generation in Calcite // Phys. Rev. Lett. 1962. V. 8. P. 404.
3. Blanchard P.M., Mitchell G.R. A Comparison of Photoinduced Poling and Thermal Poling of Azo-Dye-Doped Polymer Films for Second Order Nonlinear Optical Applications // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63. P. 2038.
4. Guillet de Chatellus H., Freysz E. Measurement of the Third-order Susceptibility of Glasses by FISH of Femtosecond Pulses // Opt. Express. 2001. V. 9. P. 586.
5. Hebling J., Almasi G., Kozma I., Kuhl J. Velocity Matching by Pulse Front Tilting for Large Area THz-pulse Generation // Opt. Express. 2002. V. 10. P. 1161.
6. Hirori H., Doi A., Blanchard F., Tanaka K. Single-cycle Terahertz Pulses with Amplitudes Exceeding 1 MV/cm

- Generated by Optical Rectification in LiNbO_3 // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 98. P. 091106.
7. *Chen J., Han P., Zhang X.C.* Terahertz-field-induced Second-harmonic Generation in a Beta Barium Borate Crystal and Its Application in Terahertz Detection // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 95. P. 011118.
 8. *Dai J., Xie X., Zhang X.C.* Detection of Broadband Terahertz Waves with a Laser-induced Plasma in Gases // *Phys. Rev. Lett.* 2006. V. 97. P. 8.
 9. *Cook D.J., Hochstrasser R.M.* Intense Terahertz Pulses by Four-wave Rectification in Air // *Opt. Lett.* 2000. V. 25. P. 1210.
 10. *Nahata A., Heinz T.F.* Detection of Freely Propagating Terahertz Radiation by Use of Optical Second-harmonic Generation // *Opt. Lett.* 1998. V. 23. P. 67.
 11. *Bodrov S.B., Sergeev Y.A., Korytin A.I., Stepanov A.N.* Terahertz-field-induced Second Optical Harmonic Generation from Si(111) Surface // *Phys. Rev. B. Amer. Phys. Soc.* 2022. V. 105. P. 1.
 12. *Бодров С.Б., Корытин А.И., Сергеев Ю.А., Степанов А.Н.* Генерация второй гармоники оптического излучения в кристаллах типа цинковой обманки при комбинированном воздействии фемтосекундного оптического и сильного терагерцевого полей // *Квантовая электроника.* 2020. Т. 50. № 5. С. 496.
 13. *Grishunin K.A., Ilyin N.A., Sherstyuk N.E., Mishina E.D., Kimel A., Mukhortov V.M., Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Agranat M.B.* THz Electric Field-induced Second Harmonic Generation in Inorganic Ferroelectric // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. P. 687.
 14. *Овчинников А.В., Чefonov О.В., Агранат М.Б., Гришунин К.А., Ильин Н.А., Писарев Р.В., Кимель А.В., Калашишникова А.М.* Генерация второй оптической гармоники под действием пикосекундных терагерцевых импульсов в центросимметричном антиферромагнетике NiO // *Письма ЖЭТФ.* 2016. Т. 104. № 7. С. 467.
 15. *Bogaerts W., Chrostowski L.* Silicon Photonics Circuit Design: Methods, Tools, and Challenges // *Laser Photonics Rev.* 2018. V. 12. P. 1700237.
 16. *Kim D., Jung H.J., Park I.J. et al.* Efficient, Stable Silicon Tandem Cells Enabled by Anion-engineered Wide-bandgap Perovskites // *Science.* 2020. V. 368. P. 155.
 17. *Yang C.H., Leon R.C.C., Hwang J.C.C. et al.* Operation of a Silicon Quantum Processor Unit Cell Above One Kelvin // *Nature.* 2020. V. 580. P. 350.
 18. *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.
 19. *Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Agranat M.B., Kudryavtsev A.V., Mishina E.D., Yurkevich A.A.* Free-carrier Generation Dynamics Induced by Ultrashort Intense Terahertz Pulses in Silicon // *Opt. Express.* 2021. V. 29. P. 26093.
 20. *Агранат М.Б., Ашитков С.И., Иванов А.А., Конященко А.В., Овчинников А.В., Фортвов В.Е.* Тераваттная фемтосекундная лазерная система на хром-форстерите // *Квантовая электроника.* 2004. Т. 34. № 6. С. 506.
 21. *Yang Z., Mutter L., Stillhart M., Ruiz B., Aravazhi S., Jazbinsek M., Schneider A., Gramlich V., Günter P.* Large-size Bulk and Thin-film Stilbazolium-salt Single Crystals for Nonlinear Optics and THz Generation // *Adv. Funct. Mater.* 2007. V. 17. P. 2018.
 22. *Stillhart M., Schneider A., Günter P.* Optical Properties of 4-N,N-Dimethylamino-4'-N'-Methyl-Stilbazolium 2,4,6-Trimethylbenzenesulfonate Crystals at Terahertz Frequencies // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2008. V. 25. P. 1914.
 23. *Vicario C., Ovchinnikov A.V., Ashitkov S.I., Agranat M.B., Fortov V.E., Hauri C.P.* Generation of 0.9-mJ THz Pulses in DSTMS Pumped by a Cr:Mg₂SiO₄ Laser // *Opt. Lett.* 2014. V. 39. P. 6632.
 24. *Vicario C., Jazbinsek M., Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Ashitkov S.I., Agranat M.B., Hauri C.P.* High Efficiency THz Generation in DSTMS, DAST, and OH1 Pumped by Cr:Forsterite Laser // *Opt. Express.* 2015. V. 23. P. 4573.
 25. *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.
 26. *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.
 27. *Ding Y., Zeng Y., Yu X., Liu Z., Qian J., Li Y., Peng Y., Song L., Tian Y., Leng Y., Li R.* Terahertz-assisted Even Harmonics Generation in Silicon // *Science.* 2022. V. 25. P. 103750.
 28. *Green M.A.* Self-consistent Optical Parameters of Intrinsic Silicon at 300 K Including Temperature Coefficients // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2008. V. 92. P. 1305.
 29. *Bodrov S.B., Sergeev Y.A., Korytin A.I., Burova E.A., Stepanov A.N.* Terahertz Pulse Induced Femtosecond Optical Second Harmonic Generation in Transparent Media with Cubic Nonlinearity // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2020. V. 37. P. 789.
 30. *Grishunin K., Bilyk V., Sherstyuk N., Mukhortov V., Ovchinnikov A., Chefonov O., Agranat M., Mishina E., Kimel A.V.* Transient Second Harmonic Generation Induced by Single Cycle THz Pulses in Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO₃/MgO // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. P. 697.
 31. *Tarekegne A.T., Iwaszczuk K., Zalkovskij M., Strikwerda A.C., Jepsen P.U.* Impact Ionization in High Resistivity Silicon Induced by an Intense Terahertz Field Enhanced by an Antenna Array // *New J. Phys.* 2015. V. 17. P. 043002.
 32. *Tarekegne A.T., Hirori H., Tanaka K., Iwaszczuk K., Jepsen P.U.* Impact Ionization Dynamics in Silicon by MV/cm THz Fields // *New J. Phys.* 2017. V. 19. P. 123018.
 33. *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. 94. P. 165206.