

**МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА.
ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

**MICRO- AND NANOELECTRONICS.
CONDENSED MATTER PHYSICS**

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-71-80>



УДК 621.311.6:621.3.089.2

**Комплексный показатель преломления титаната стронция
в терагерцовом диапазоне частот**

В.Р. Бильт[®],
К.А. Гришунин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

®Автор для переписки, e-mail: vrbilyk@mail.ru

Современное развитие терагерцовой спектроскопии во временной области (THz-TDS) позволяет проводить более точные и достоверные измерения диэлектрических свойств по сравнению с традиционной инфракрасной спектроскопией с использованием некогерентного источника света. Широкополосная THz-TDS является мощным инструментом для определения действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости при прохождении ТГц-излучения, которая позволяет определять параметры мягких мод в сегнетоэлектриках. В данной работе методом терагерцовой спектроскопии с временным разрешением исследована зависимость комплексного показателя преломления монокристаллического квантового парамагнетика титаната стронция в терагерцовом диапазоне частот от 0.3 до 1.3 ТГц. Показано, что низкочастотный терагерцовый отклик материала обусловлен доминированием мягкой фононной моды ТО₁. Измеренные экспериментальные зависимости показали хорошее сходство с теоретическими кривыми, полученными из анализа модели осциллятора Лоренца для комплексной диэлектрической проницаемости титаната стронция. Результаты работы важны для понимания принципиальной возможности возбуждения параметра порядка в сегнетоэлектрических материалах и могут быть использованы для создания энергоэффективных устройств памяти со скоростью записи информации, близкой к теоретическому пределу.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, сегнетоэлектрик, терагерцевая спектроскопия.

**Complex Refractive Index of Strontium Titanate
in the Terahertz Frequency Range**

Vladislav R. Bilyk[®],
Kirill A. Grishunin

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

®Corresponding author e-mail: vrbilyk@mail.ru

The recent progress in terahertz time-domain spectroscopy enables the accurate and reliable measurements of dielectric properties in comparison with the traditional far-infrared spectroscopy using an incoherent light source. The broadband THz-TDS is a powerful tool to determine the real and imaginary parts of a complex dielectric constant by the transmission which allows to detect the parameters of the soft modes in ferroelectrics. In this work, the terahertz time-domain spectroscopy was used to investigate the dependence of the complex refractive index of a single-crystal quantum paraelectric strontium titanate in the terahertz frequency range from 0.3 to 2 THz. It was shown that the low-frequency terahertz response of the material is determined by the soft phonon mode TO1. The measured experimental dependences showed a good agreement with the theoretical curves obtained from the analysis of the Lorentz oscillator model for the complex dielectric constant of strontium titanate. The obtained results are necessary for understanding the principle of possibility to manipulate the order parameter in ferroelectric materials and can be used to create energy-efficient memory devices with a speed of recording information close to the theoretical limit.

Keywords: terahertz radiation, ferroelectricity, terahertz spectroscopy.

Введение

С момента открытия полярной мягкой моды в кристалле титаната стронция (SrTiO_3) возник большой интерес и появились попытки понять поведение диэлектрических свойств данного материала, в частности, изучить взаимосвязь между диэлектрическими свойствами и оптическими фоновыми характеристиками [1–3].

Титанат стронция является потенциальным сегнетоэлектриком со структурой перовскита ABO_3 . С одной стороны, его диэлектрическое поведение полностью контролируется за счет динамики мягкой моды [4], с другой стороны, переход из параэлектрической в сегнетоэлектрическую фазу не происходит вплоть до температуры абсолютного нуля, так как подавлен квантовыми флуктуациями [5]. Эти свойства, а также возможность получения высококачественных тонких пленок, делают SrTiO_3 материалом для применения в перестраиваемых микроволновых компонентах [6]. Зависимость его диэлектрической проницаемости от постоянного тока [7] и низкие диэлектрические потери в микроволновом диапазоне при комнатной температуре [8] могут быть достигнуты путем химического замещения атомов стронция твердыми растворами титаната бария-стронция [9] или путем введения растягивающей деформации за счет правильного выбора подложки для эпитаксиального роста тонкой пленки.

Благодаря высокому значению статической диэлектрической проницаемости [10, 11], SrTiO_3 широко используется также в производстве конденсаторных структур с высокой плотностью записи информации [12, 13], таких, как динамическая память с произвольным доступом (DRAM) [14].

Недавно было показано [15–17], что вышеперечисленные характеристики делают SrTiO_3 предпочтительным материалом для применения в терагерцовых устройствах, в частности, в устройствах управления и перестройки терагерцового излучения. С развитием области генерации и детектирования терагерцового излучения методы статической и терагерцовой спектроскопии с временным разрешением (THz-TDS) превратились в универсальные методы для характеризации полной диэлектрической функции широкого

спектра материалов в дальней инфракрасной области спектра [18]. Первое применение такого рода спектроскопии было осуществлено для паров воды, содержащихся в окружающей атмосфере [19]. Впоследствии удалось экспериментально измерить коэффициенты поглощения и показатель преломления для целого ряда диэлектриков и полупроводников [20].

В представленной работе изучен диэлектрический отклик от монокристаллического образца титаната стронция SrTiO_3 в диапазоне частот 0.3–1.3 ТГц с использованием методики терагерцовой спектроскопии с временным разрешением. По сравнению с другими методами определения характеристик материалов терагерцевая спектроскопия во временной области имеет ряд преимуществ [21, 22], а именно в частности, возможность изучать удаленно, без использования электродов, сложную диэлектрическую дисперсию материала путем измерения электрического поля когерентных терагерцевых волн. Экспериментальные результаты объяснены в рамках модели Друде–Лоренца.

Методическая часть

Исследуемый образец представлял собой монокристалл SrTiO_3 с размерами $0.5 \times 0.5 \times 0.14$ мм и ориентацией $<100>$. Рабочие поверхности образца имели полированную до оптического качества поверхность. Для исключения влияния механических напряжений образец закрепляли только с одного торца. Поверхность рядом с образцом закрывали алюминиевой фольгой, блокирующей ТГц-излучение.

Титанат стронция обладает объемным структурным фазовым переходом $t\bar{3}m \rightarrow 4/mmm$ (из центросимметричной в центросимметричную фазу) при температуре $T_c = 105$ К, что делает его оптически изотропным. На его элементарную ячейку приходится пять атомов, что приводит к четырем трижды вырожденным оптическим модам с частотами 90, 170, 539 и 793 см⁻¹, соответственно [3, 23–26]. Характерным поведением таких сегнетоэлектриков является высокое значение диэлектрической проницаемости, которое зависит от температуры в соответствии с законом Кюри–Вейсса [27]:

$$\epsilon_0 \propto 1/(T - T_c),$$

где ϵ_0 – статическая диэлектрическая проницаемость.

Экстраполированная температура Кюри составляет $T_c = 40$ К. Хотя SrTiO_3 фактически никогда не претерпевает сегнетоэлектрический переход, а зависимость Кюри–Вейсса применима только для $T > 50$ К [3], его переход в сегнетоэлектрическое состояние возможен путем приложения механического [28, 29] или электрического напряжения [30], а также путем легирования [31].

ТГц-излучение генерировалось за счет эффекта оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов ИК-диапазона ($\lambda = 800$ нм, $\tau = 100$ фс) в электрооптическом кристалле ZnTe. Для компенсации расходимости и фокусировки ТГц-излучения использовались внеосевые параболические зеркала, фокусные расстояния которых были подобраны таким образом, чтобы обеспечить минимальный размера пятна, ограниченного дифракционным пределом, в области образца.

Для измерения временных форм падающего и прошедшего через образец ТГц-импульсов использовался метод электрооптического стробирования [32]. Схема установки представлена на рис. 1. Расходящийся ТГц-пучок, прошедший через точку фокуса

на месте образца, собирался и фокусировался второй парой параболических зеркал на кристалле-детекторе ZnTe. Зондирующий импульс ИК-диапазона пространственно и во времени совмещался с ТГц-импульсом на электрооптическом кристалле. При отсутствии ТГц- поля линейно-поляризованные импульсы ИК-излучения проходят через электрооптический кристалл без изменения. Затем, проходя через фазовую пластинку $\lambda/4$, две взаимно-перпендикулярные компоненты поляризации пространственно разделяются с помощью призмы Волластона и детектируются с помощью балансного фотодиода. Так как после прохождения четвертьволновой пластины ИК-луч имеет круговую поляризацию, то сигнал с разностного канала балансного фотодетектора будет нулевым. В случае, когда ТГц- и ИК-импульсы одновременно приходят на электрооптический кристалл ZnTe, ИК-импульс испытывает дополнительный набег фазы $\Delta\phi$, индуцированный электрическим полем ТГц-импульса E_0 , и его поляризация меняется на эллиптическую. Данное изменение фазы, регистрируемое с помощью балансного фотодетектора, пропорционально амплитуде электрического поля ТГц-импульса:

$$\Delta\phi = \frac{1}{2} \frac{\omega n_0^3 r_{41} E_0 d}{c},$$

где ω – частота ИК-излучения;

n_0 – показатель преломления для ИК-излучения;

r_{41} – электрооптический коэффициент;

d – толщина электрооптического кристалла;

c – скорость света [33].

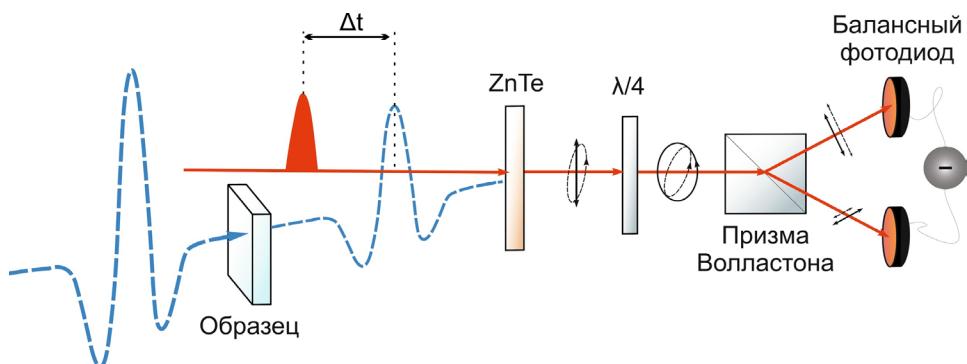


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки и принципа электрооптического детектирования ТГц-излучения. Сплошными черными линиями обозначена поляризация изначально падающего зондирующего излучения, пунктиром – во время воздействия ТГц-импульса.

Следует отметить, что данный метод детектирования импульсного ТГц-излучения позволяет регистрировать непосредственно временной профиль электрического поля ТГц-импульса за счет варьирования времени прихода ТГц- и ИК-импульсов на кристалл-детектор.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены частотные спектры падающего и прошедшего через образец ТГц-импульсов.

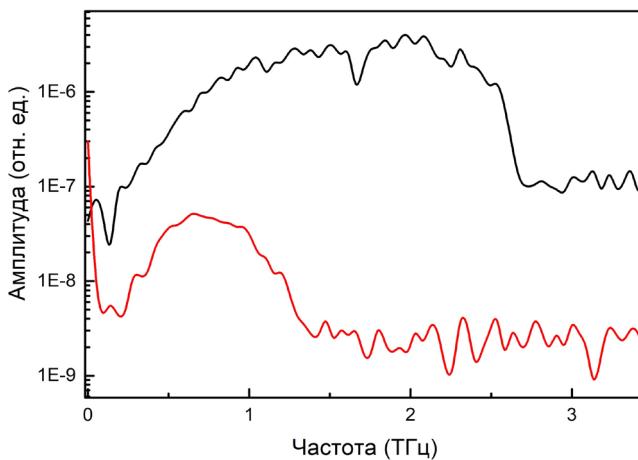


Рис. 2. Частотный спектр опорного и прошедшего через исследуемый образец SrTiO_3 ТГц-импульсов.

Прохождение электромагнитных волн через материал характеризуется комплексным показателем преломления:

$$\tilde{n} = n_r + ik,$$

где n_r – действительная часть показателя преломления, которая определяет фазовую скорость электромагнитной волны при ее распространении в среде относительно скорости света в вакууме;

k – коэффициент экстинкции, связанный с коэффициентом поглощения α соотношением $k = \alpha\lambda / 4\pi$, где λ – длина волны.

Зная комплексные амплитудные коэффициенты Фурье-спектров опорного сигнала $E_{\text{опорный}}(\omega)$ и сигнала образца $E_{\text{образец}}(\omega)$, можно вычислить комплексный амплитудный коэффициент пропускания образца в соответствии с передаточной функцией:

$$H_{\text{экспер}}(\omega) = \frac{E_{\text{образец}}(\omega)}{E_{\text{опорный}}(\omega)} = T(\omega)e^{i\phi(\omega)} = t_{12}t_{23}e^{-\alpha d/2}e^{i(\tilde{n}-1)\omega d/c} \quad (1)$$

где t_{12} и t_{23} – амплитудные коэффициенты Френеля на границе воздух–образец и образец–воздух, соответственно; d - толщина кристалла;

$\phi(\omega)$ – относительная фаза прошедшего через образец и опорного ТГц-импульсов [34].

Уравнение (1) позволяет установить связь между $H_{\text{экспер}}(\omega)$ и комплексным показателем преломления \tilde{n} . Благодаря этому становится возможным нахождение действительной части показателя преломления $n_r(\omega)$, коэффициента пропускания $T(\omega)$ и коэффициента поглощения $\alpha(\omega)$ согласно следующим формулам [35]:

$$n_r(\omega) = 1 + \frac{c\phi(\omega)}{\omega d} \quad (2)$$

$$T(\omega) = 1 - \frac{(n_r(\omega) - 1)^2}{(n_r(\omega) + 1)^2} \quad (3)$$

$$\alpha(\omega) = -\frac{2}{d} \ln \left(T(\omega) \frac{4n}{(n_r + 1)^2} \right) \quad (4)$$

Однако необходимо заметить, что при получении соответствующего частотного спектра для конкретного образца в зависимости от спектральных амплитуд не всегда возможно определить доверительный интервал измерения, т. е. граничные значения частот, при которых полученный спектр сигнала переходит от фактического измеренного сигнала к шуму. В качестве критерия мы использовали оценку коэффициента поглощения $\alpha(\omega)$ и нашли такое $\alpha_{\max}(\omega)$, при котором значения поглощения выше этого уровня считались недоверительными. В качестве критерия границы доверительного интервала использовано отношение среднеквадратичного отклонения (σ) измерения с закрытым ТГц-лучом к максимальному значению амплитуды сигнала в момент воздействия ТГц-импульса (E_{\max}^{THz}). Таким образом, частотная зависимость $\alpha_{\max}(\omega)$ запишется в виде

$$\alpha(\omega) = -\frac{2}{d} \ln \left(\frac{\sigma}{E_{\max}^{THz}} \frac{4n}{(n_r + 1)^2} \right).$$

На рис. 3 кружками показаны рассчитанные по формулам (2)–(4) из экспериментальных данных зависимости показателя преломления $n_r(\omega)$ и коэффициента поглощения $\alpha(\omega)$ для SrTiO₃ в ТГц-диапазоне частот, а также граница доверительного интервала (черная кривая на рис. 3б). С ростом частоты коэффициент поглощения увеличивается, но заметных пиков поглощения ниже 1.3 ТГц не наблюдается, что подтверждается зависимостью показателя преломления.

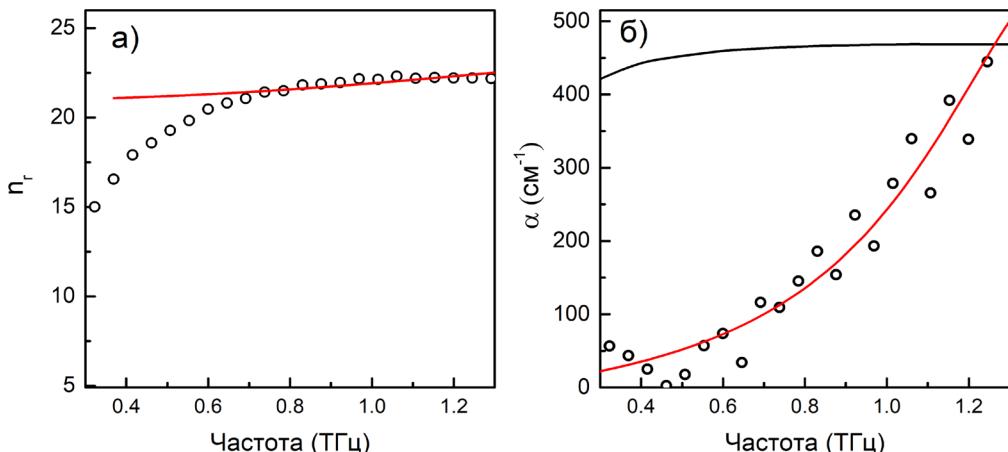


Рис. 3. Зависимость показателя преломления (а) и коэффициента пропускания (б), рассчитанные из измерений методом ТГц-спектроскопии с временным разрешением. Аппроксимация показана сплошной линией. Черной сплошной линией показана граница чувствительности спектрометра.

Показатель преломления и коэффициент поглощения могут быть выражены через действительную (ϵ') и мнимую (ϵ'') части диэлектрической проницаемости [36]:

$$n_r^2(\omega) = \frac{1}{2} (\sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + \epsilon') \quad (5)$$

$$k^2(\omega) = \frac{1}{2} (\sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} - \epsilon') \quad (6)$$

В свою очередь, диэлектрическая проницаемость ϵ может быть рассчитана из классической модели Друде–Лоренца, где взаимодействие излучения с решеткой приводит к поглощению электромагнитной волны из-за создания или уничтожения вибрации решетки. В рамках этой модели комплексная диэлектрическая проницаемость записывается как

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{A\omega^2}{\omega^2 - \omega_{TO}^2 - i\Gamma\omega}, \quad (7)$$

где $\epsilon_{\infty} = 5.5$ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость [2];

A – сила осциллятора;

ω_{TO} – частота продольной оптической фононной моды;

Γ – константа затухания.

Сплошные красные линии на рис. 3а и 3б получены в результате совместной теоретической аппроксимации показателей преломления и коэффициента поглощения, низкочастотной оптической мягкой фононной моды на частоте $\omega_{TO} = 2.7$ ТГц с шириной линии $\Gamma = 1.5$ ТГц. Определенная в результате аппроксимации собственная частота мягкой моды хорошо согласуется с литературными значениями [23].

Несмотря на то, что нижняя сегнетоэлектрическая оптическая мягкая мода в SrTiO₃ индуцируется преимущественно изгибом Ti–O–Ti октаэдра, является Рамановской, ИК-активной модой [1, 23] и имеет выраженную температурную зависимость [7], она остается сложно различимой для традиционных методов ИК-отражения и комбинационного рассеяния из-за близости ее частоты к доверительному интервалу методов.

Заключение

Методом терагерцовой спектроскопии с временным разрешением исследованы диэлектрические свойства монокристалла титаната стронция (SrTiO₃) в частотной области от 0.3 до 1.3 ТГц. Показано, что низкочастотный терагерцовый отклик от SrTiO₃ в основном обусловлен низколежащей мягкой фононной модой TO₁ с частотой 2.7 ТГц. Однако из-за сильного поглощения SrTiO₃ при частотах выше 1.5 ТГц для более глубокого понимания поведения данной фононной моды требуются дополнительные прямые измерения.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-32-00487).

Литература:

1. Barker A.S., Tinkham M. Far-infrared ferroelectric vibration mode in SrTiO₃ // Phys. Rev. 1962. V. 125. № 5. P. 1527–1530. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.125.1527>
2. Spitzer W.G., Miller R.C., Kleinman D.A., Howarth L.E. Far infrared dielectric dispersion in BaTiO₃, SrTiO₃, and TiO₂ // Phys. Rev. 1962. V. 126. № 5. P. 1710–1721. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.126.1710>
3. Ostapchuk T., Petzelt J., Železný V., Pashkin A., Pokorný J., Drbohlav I., Kužel R., Rafaja D., Gorshunov B.P., Dressel M., Ohly C., Hoffmann-Eifert S., Waser R. Origin of soft-mode stiffening and reduced dielectric response in SrTiO₃ thin films // Phys. Rev. B. 2002. V. 66. № 23. P. 235406-12. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.235406>
4. Fedorov I., Železný V., Petzelt J., Trepakov V., Jelínek M., Trtík V., Čerňanský M., Studničník M. Far-infrared spectroscopy of a SrTiO₃ thin film // Ferroelectrics. 1998. V. 208–209. № 1. P. 413–427. <https://doi.org/10.1080/00150199808014890>
5. Müller K.A., Burkard H. SrTiO₃: An intrinsic quantum paraelectric below 4 K // Phys. Rev. B. 1979. V. 19. № 7. P. 3593–3602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.19.3593>

6. Bellingeri E., Pellegrino L., Marré D., Palleggi I., Siri A.S. All-SrTiO₃ field effect devices made by anodic oxidation of epitaxial semiconducting thin films // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. № 9. P. 5976–5981. <https://doi.org/10.1063/1.1613373>
7. Saifi M.A., Cross L.E. Dielectric properties of strontium titanate at low temperature // Phys. Rev. B. 1970. V. 2. № 3. P. 677–684. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.2.677>
8. Wang Z., Cao M., Yao Z., Zhang Q., Song Z., Hu W., Xu Q., Hao H., Liu H., Yu Z. Giant permittivity and low dielectric loss of SrTiO₃ ceramics sintered in nitrogen atmosphere // J. Eur. Ceram. Soc. 2014. V. 34. № 7. P. 1755–1760. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.01.015>
9. Tagantsev A.K., Sherman V.O., Astafiev K.F., Venkatesh J., Setter N. Ferroelectric materials for microwave tunable applications // J. Electroceramics. 2003. V. 11. № 1/2. P. 5–66. <https://doi.org/10.1023/B:JECR.0000015661.81386.e6>
10. Weaver H.E. Dielectric properties of single crystals of SrTiO₃ at low temperatures // J. Phys. Chem. Solids. 1959. V. 11. № 3–4. P. 274–277. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(59\)90226-4](https://doi.org/10.1016/0022-3697(59)90226-4)
11. Lippmaa M., Nakagawa N., Kawasaki M., Ohashi S., Inaguma Y., Itoh M., Koinuma H. Step-flow growth of SrTiO₃ thin films with a dielectric constant exceeding 104 // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. № 23. P. 3543–3545. <https://doi.org/10.1063/1.124155>
12. Jorel C., Vallée C., Gonon P., Gourvest E., Dubarry C., Defay E. High performance metal-insulator-metal capacitor using a SrTiO₃/ZrO₂ bilayer // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 94. № 25. P. 253502-3. <https://doi.org/10.1063/1.3158951>
13. Hou C., Huang W., Zhao W., Zhang D., Yin Y., Li X. Ultrahigh energy density in SrTiO₃ film capacitors // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2017. V. 9. № 24. P. 20484–20490. <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.7b02225>
14. Sirenko A.A., Bernhard C., Golnik A., Clark A.M., Hao J., Si W., Xi X.X. Soft-mode hardening in SrTiO₃ thin films // Nature. 2000. V. 404. № 6776. P. 373–376. <http://dx.doi.org/10.1038/35006023>
15. Skoromets V., Kadlec F., Kadlec C., Němec H., Rychetsky I., Panaitov G., Müller V., Fattakhova-Rohlfing D., Moch P., Kužel P. Tuning of dielectric properties of SrTiO₃ in the terahertz range // Phys. Rev. B. 2011. V. 84. № 17. P. 174121-10. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.174121>
16. Wu L., Jiang L., Sheng Q., Ding X., Yao J. Optical tuning of dielectric properties of SrTiO₃:Fe in the terahertz range // Opt. Lett. 2013. V. 38. № 14. P. 2581–2583. <https://doi.org/10.1364/OL.38.002581>
17. Kužel P., Kadlec F., Němec H., Ott R., Hollmann E., Klein N. Dielectric tunability of SrTiO₃ thin films in the terahertz range // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. № 10. P. 102901-3. <https://doi.org/10.1063/1.2183370>
18. Mantsch H.H., Naumann D. Terahertz spectroscopy: The renaissance of far infrared spectroscopy // J. Mol. Struct. 2010. V. 964. № 1–3. P. 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2009.12.022>
19. van Exter M., Fattiger C., Grischkowsky D. Terahertz time-domain spectroscopy of water vapor // Opt. Lett. 1989. V. 14. № 20. P. 1128–1130. <https://doi.org/10.1364/OL.14.001128>
20. Grischkowsky D., Keiding S., van Exter M., Fattiger C. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors // J. Opt. Soc. Am. B. 1990. V. 7. № 10. P. 2006–2015. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.7.002006>
21. Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology // Nat. Photonics. 2007. V. 1. № 2. P. 97–105. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.3>
22. Ferguson B., Zhang X.-C. Materials for terahertz science and technology // Nat. Mater. 2002. V. 1. № 1. P. 26–33. <https://doi.org/10.1038/nmat708>
23. Nilsen W.G., Skinner J.G. Raman Spectrum of Strontium Titanate // J. Chem. Phys. 1968. V. 48. № 5. P. 2240–2248. <https://doi.org/10.1063/1.1669418>
24. Han J., Wan F., Zhu Z., Zhang W. Dielectric response of soft mode in ferroelectric SrTiO₃ // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. № 3. P. 031104. <https://doi.org/10.1063/1.2431448>
25. Misra M., Kotani K., Kawayama I., Murakami H., Tonouchi M. Observation of TO₁ soft mode in SrTiO₃ films by terahertz time domain spectroscopy // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 87. № 18. P. 182909. <https://doi.org/10.1063/1.2128039>
26. Tkach A., Vilarinho P.M., Kholkin A.L., Pashkin A., Veljko S., Petzelt J. Broad-band dielectric spectroscopy analysis of relaxational dynamics in Mn-doped SrTiO₃ ceramics // Phys. Rev. B. 2006. V. 73. № 10. P. 104113–7. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73.104113>
27. Kittel C. Introduction to Solid State Physics. 7th ed. New York: Wiley, 1975. 688 p.
28. Khaber L., Beniaiche A., Hachemi A. Electronic and optical properties of SrTiO₃ under pressure effect: Ab initio study // Solid State Commun. 2014. V. 189. P. 32–37. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2014.03.018>
29. Verma A., Raghavan S., Stemmer S., Jena D. Ferroelectric transition in compressively strained SrTiO₃ thin films // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 107. № 19. P. 192908. <https://doi.org/10.1063/1.4935592>
30. Tikhomirov O., Jiang H., Levy J. Local Ferroelectricity in SrTiO₃ Thin Films // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 89. № 14. P. 147601–4. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.147601>
31. Kumar A.S., Suresh P., Kumar M.M., Srikanth H., Post M.L., Sahner K., Moos R., Srinath S. Magnetic and ferroelectric properties of Fe doped SrTiO₃-δ films // J. Phys. Conf. Ser. 2010. V. 200. № 9. P. 092010-4. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/200/9/092010>

32. Valdmanis J., Mourou G. Subpicosecond electrooptic sampling: Principles and applications // IEEE J. Quantum Electron. 1986. V. 22. № 1. P. 69–78. <https://doi.org/10.1109/JQE.1986.1072867>
33. Nahata A., Auston D.H., Heinz T.F., Wu C. Coherent detection of freely propagating terahertz radiation by electro-optic sampling // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. № 2. P. 150–152. <https://doi.org/10.1063/1.116130>
34. Jepsen P.U., Cooke D.G., Koch M. Terahertz spectroscopy and imaging – Modern techniques and applications // Laser Photon. Rev. 2011. V. 5. № 1. P. 124–166. <https://doi.org/10.1002/lpor.201000011>
35. Jepsen P.U., Fischer B.M. Dynamic range in terahertz time-domain transmission and reflection spectroscopy // Opt. Lett. 2005. V. 30. № 1. P. 29–31. <https://doi.org/10.1364/OL.30.000029>
36. Kuzmany H. The Dielectric Function. In: Solid-State Spectroscopy. Springer, 1998. P. 101–120. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03594-8>

References:

1. Barker A.S., Tinkham M. Far-infrared ferroelectric vibration mode in SrTiO₃. *Phys. Rev.* 1962; 125(5):1527-1530. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.125.1527>
2. Spitzer W.G., Miller R.C., Kleinman D.A., Howarth L.E. Far infrared dielectric dispersion in BaTiO₃, SrTiO₃, and TiO₂. *Phys. Rev.* 1962; 126(5):1710-1721. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.126.1710>
3. Ostapchuk T., Petzelt J., Železný V., Pashkin A., Pokorný J., Drbohlav I., Kužel R., Rafaja D., Gorshunov B.P., Dressel M., Ohly C., Hoffmann-Eifert S., Waser R. Origin of soft-mode stiffening and reduced dielectric response in SrTiO₃ thin films. *Phys. Rev. B.* 2002; 66(23):235406-12. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.235406>
4. Fedorov I., Železn V., Petzelt J., Trepakov V., Jelínek M., Trtík V., Čerňansk M., Studniček. Far-infrared spectroscopy of a SrTiO₃ thin film. *Ferroelectrics.* 1998; 208-209(1):413-427. <https://doi.org/10.1080/00150199808014890>
5. Müller K.A., Burkard H. SrTiO₃: An intrinsic quantum paraelectric below 4 K. *Phys. Rev. B.* 1979; 19(7):3593-3602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.19.3593>
6. Bellingeri E., Pellegrino L., Marré D., Pallecchi I., Siri A.S. All-SrTiO₃ field effect devices made by anodic oxidation of epitaxial semiconducting thin films. *J. Appl. Phys.* 2003; 94(9):5976-5981. <https://doi.org/10.1063/1.1613373>
7. Saifi M.A., Cross L.E. Dielectric properties of strontium titanate at low temperature. *Phys. Rev. B.* 1970; 2(3):677-684. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.2.677>
8. Wang Z., Cao M., Yao Z., Zhang Q., Song Z., Hu W., Xu Q., Hao H., Liu H., Yu Z. Giant permittivity and low dielectric loss of SrTiO₃ ceramics sintered in nitrogen atmosphere. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2014; 34(7):1755-1760. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.01.015>
9. Tagantsev A.K., Sherman V.O., Astafiev K.F., Venkatesh J., Setter N. Ferroelectric materials for microwave tunable applications. *J. Electroceramics.* 2003; 11(1/2):5-66. <https://doi.org/10.1023/B:JECR.0000015661.81386.e6>
10. Weaver H.E. Dielectric properties of single crystals of SrTiO₃ at low temperatures. *J. Phys. Chem. Solids.* 1959; 11(3–4):274-277. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(59\)90226-4](https://doi.org/10.1016/0022-3697(59)90226-4)
11. Lippmaa M., Nakagawa N., Kawasaki M., Ohashi S., Inaguma Y., Itoh M., Koinuma H. Step-flow growth of SrTiO₃ thin films with a dielectric constant exceeding 104. *Appl. Phys. Lett.* 1999; 74(23):3543-3545. <https://doi.org/10.1063/1.124155>
12. Jorel C., Vallée C., Gonon P., Gourvest E., Dubarry C., Defay E. High performance metal-insulator-metal capacitor using a SrTiO₃/ZrO₂ bilayer. *Appl. Phys. Lett.* 2009; 94(25):253502-3. <https://doi.org/10.1063/1.3158951>
13. Hou C., Huang W., Zhao W., Zhang D., Yin Y., Li X. Ultrahigh energy density in SrTiO₃ film capacitors. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2017; 9(24):20484-20490. <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.7b02225>
14. Sirenko A.A., Bernhard C., Golnik A., Clark A.M., Hao J., Si W., Xi X.X. Soft-mode hardening in SrTiO₃ thin films. *Nature.* 2000; 404(6776):373–376. <http://dx.doi.org/10.1038/35006023>
15. Skoromets V., Kadlec F., Kadlec C., Němec H., Rychetsky I., Panaitov G., Müller V., Fattakhova-Rohlfing D., Moch P., Kužel P. Tuning of dielectric properties of SrTiO₃ in the terahertz range. *Phys. Rev. B.* 2011; 84(17):174121-10. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.174121>
16. Wu L., Jiang L., Sheng Q., Ding X., Yao J. Optical tuning of dielectric properties of SrTiO₃:Fe in the terahertz range. *Opt. Lett.* 2013; 38(14):2581-2583. <https://doi.org/10.1364/OL.38.002581>
17. Kužel P., Kadlec F., Němec H., Ott R., Hollmann E., Klein N. Dielectric tunability of SrTiO₃ thin films in the terahertz range. *Appl. Phys. Lett.* 2006; 88(10): 102901-3. <https://doi.org/10.1063/1.2183370>
18. Mantsch H.H., Naumann D. Terahertz spectroscopy: The renaissance of far infrared spectroscopy. *J. Mol. Struct.* 2010; 964(1-3):1-4. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2009.12.022>
19. van Exter M., Fattinger C., Grischkowsky D. Terahertz time-domain spectroscopy of water vapor. *Opt. Lett.* 1989; 14(20):1128-1130. <https://doi.org/10.1364/OL.14.001128>
20. Grischkowsky D., Keiding S., van Exter M., Fattinger C. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors. *J. Opt. Soc. Am. B.* 1990; 7(10):2006-2015. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.7.002006>
21. Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology. *Nat. Photonics.* 2007; 1(2):97-105. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.10>

- org/10.1038/nphoton.2007.3
22. Ferguson B., Zhang X.-C. Materials for terahertz science and technology. *Nat. Mater.* 2002; 1(1):26-33. <https://doi.org/10.1038/nmat708>
23. Nilsen W.G., Skinner J.G. Raman spectrum of strontium titanate. *J. Chem. Phys.* 1968; 48(5):2240-2248. <https://doi.org/10.1063/1.1669418>
24. Han J., Wan F., Zhu Z., Zhang W. Dielectric response of soft mode in ferroelectric SrTiO₃. *Appl. Phys. Lett.* 2007; 90(3):031104. <https://doi.org/10.1063/1.2431448>
25. Misra M., Kotani K., Kawayama I., Murakami H., Tonouchi M. Observation of TO1 soft mode in SrTiO₃ films by terahertz time domain spectroscopy. *Appl. Phys. Lett.* 2005; 87(18):182909. <https://doi.org/10.1063/1.2128039>
26. Tkach A., Vilarinho P.M., Khoklin A.L., Pashkin A., Veljko S., Petzelt J. Broad-band dielectric spectroscopy analysis of relaxational dynamics in Mn-doped SrTiO₃ ceramics. *Phys. Rev. B.* 2006; 73(10):104113-7. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73.104113>
27. Kittel C. Introduction to Solid State Physics. 7th ed. 1975. New York: Wiley, 1975. 688 p.
28. Khaber L., Beniaiche A., Hachemi A. Electronic and optical properties of SrTiO₃ under pressure effect: Ab initio study. *Solid State Commun.* 2014; 189:32-37. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2014.03.018>
29. Verma A., Raghavan S., Stemmer S., Jena D. Ferroelectric transition in compressively strained SrTiO₃ thin films. *Appl. Phys. Lett.* 2015; 107(19):192908. <https://doi.org/10.1063/1.4935592>
30. Tikhomirov O., Jiang H., Levy J. Local ferroelectricity in SrTiO₃ thin films. *Phys. Rev. Lett.* 2002; 89(14):147601-4. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.147601>
31. Kumar A.S., Suresh P., Kumar M.M., Srikanth H., Post M.L., Sahner K., Moos R., Srinath S. Magnetic and ferroelectric properties of Fe doped SrTiO₃-δ films. *J. Phys. Conf. Ser.* 2010; 200(9):092010-4. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/200/9/092010>
32. Valdmanis J., Mourou G. Subpicosecond electrooptic sampling: Principles and applications. *IEEE J. Quantum Electron.* 1986; 22(1):69-78. <https://doi.org/10.1109/JQE.1986.1072867>
33. Nahata A., Auston D.H., Heinz T.F., Wu C. Coherent detection of freely propagating terahertz radiation by electro-optic sampling. *Appl. Phys. Lett.* 1996; 68(2):150-152. <https://doi.org/10.1063/1.116130>
34. Jepsen P.U., Cooke D.G., Koch M. Terahertz spectroscopy and imaging – Modern techniques and applications. *Laser Photon. Rev.* 2011; 5(1):124-166. <https://doi.org/10.1002/lpor.201000011>
35. Jepsen P.U., Fischer B.M. Dynamic range in terahertz time-domain transmission and reflection spectroscopy. *Opt. Lett.* 2005; 30(1):29-31. <https://doi.org/10.1364/OL.30.000029>
36. Kuzmany H. The Dielectric Function. In: Solid-State Spectroscopy. Springer, 1998. P. 101-120. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03594-8>

Об авторах:

Бильк Владислав Романович, аспирант кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА); стажер-исследователь специализированной учебно-научной лаборатории сверхбыстрой динамики ферроиков кафедры наноэлектроники ФТИ РТУ МИРЭА (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID: 57194048515, ResearcherID: N-9662-2015, <https://orcid.org/0000-0002-3013-8655>

Гришунин Кирилл Александрович, аспирант кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID: 56968091600, ResearcherID: Q-1005-2017, <https://orcid.org/0000-0001-9523-355X>

About the authors:

Vladislav R. Bilyk, Postgraduate Student of the Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA); researcher, Laboratory of Ultrafast Dynamics of Ferroics of the Chair of Nanoelectronics RTU MIREA (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID: 57194048515, ResearcherID: N-9662-2015, <https://orcid.org/0000-0002-3013-8655>

Kirill A. Grishunin, Postgraduate Student of the Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID: 56968091600, ResearcherID: Q-1005-2017, <https://orcid.org/0000-0001-9523-355X>

Для цитирования: Бильк В.Р., Гришунин К.А. Комплексный показатель преломления титаната стронция в терагерцовом диапазоне частот // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 4. С. 71–80 <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-71-80>

For citation: Bilyk V.R., Grishunin K.A. Complex refractive index of strontium titanate in the terahertz frequency range. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019; 7(4):71-80, (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-71-80>