

Полусферическая рутиловая линза для ТГц микроскопии на основе эффекта твердотельной иммерсии со сверхразрешением

© В.А. Желнов¹, Н.В. Черномырдин¹, И.Е. Спектор¹, П.А. Каралкин², Д.С. Пономарев³,
В.Н. Курлов⁴, К.И. Зайцев¹

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
119991 Москва, Россия

² Институт регенеративной медицины, Сеченовский университет,
119991 Москва, Россия

³ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН,
117105 Москва, Россия

⁴ Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипяна Российской академии наук,
142432 Черноголовка, Россия

e-mail: vleder.zel@mail.ru

Поступила в редакцию 09.01.2024 г.

В окончательной редакции 23.01.2024 г.

Принята к публикации 05.03.2024 г.

Микроскопия на основе эффекта твердотельной иммерсии — это метод ближнепольной визуализации, который позволяет преодолеть дифракционный предел Аббе за счет фокусировки светового пучка на малом расстоянии за линзой с высоким показателем преломления. Он обеспечивает высокую энергетическую эффективность благодаря отсутствию каких-либо субволновых зондов или диафрагм в оптическом тракте. Выгодное сочетание сверхразрешения и высокой энергетической эффективности открывает широкие возможности применения данного метода в различных областях науки и техники. Пространственное разрешение микроскопии на основе эффекта твердотельной иммерсии в основном ограничено значением показателя преломления линзы, при этом более плотные оптически линзы обеспечивают более высокое разрешение. В настоящей работе объемный кристалл рутила (TiO_2) впервые используется в качестве материала для иммерсионной линзы, которая обеспечивает впечатляющий показатель преломления ~ 10 в терагерцовом диапазоне. Это самое высокое значение показателя преломления, когда-либо использовавшееся в микроскопии на основе эффекта твердотельной иммерсии. Для создания микроскопа использовались лавинно-пролетный диод в качестве источника непрерывного излучения на частоте 0.2 ТГц (длина волны $\lambda = 1.5 \text{ mm}$) и детектор Голя. Экспериментальные исследования показали, что пространственное разрешение разработанного микроскопа находится в пределах 0.06–0.11 λ . Это самое высокое разрешение, когда-либо зарегистрированное для любой оптической системы на основе эффекта твердотельной иммерсии.

Ключевые слова: терагерцовые технологии, терагерцовые оптические материалы, рутил, высокий показатель преломления, ближнепольная микроскопия, микроскопия на основе эффекта твердотельной иммерсии, сверхразрешение.

DOI: 10.61011/OS.2024.04.58217.37-24

Введение

Микроскопия на основе эффекта твердотельной иммерсии впервые представлена в видимом диапазоне для преодоления дифракционного предела Аббе, который составляет 0.5λ [1]. Сущность эффекта твердотельной иммерсии заключается в уменьшении размеров фокального пятна при его формировании в свободном пространстве на субволновом расстоянии ($< \lambda$) за плоской поверхностью иммерсионной линзы, изготовленной из материала с высоким показателем преломления (ПП). Повышение разрешения в таких линзах является результатом суммарного вклада волн, испытывающих обычное френелевское отражение, и эванесцентных волн, которые возбуждаются на плоской границе раздела линза-объект из-за явления полного внутреннего отражения (ПВО) [2]. По сравнению с обыкновенной линзой размер

фокального пятна иммерсионной линзы уменьшается на величину, пропорциональную ПП линзы [2]. Таким образом, при использовании материалов с высоким и средним ПП (таких как стекло высокой плотности, кремний и т.д.) продемонстрировано разрешение в пределах 0.15–0.5 λ [3]. Микроскопия на основе эффекта твердотельной иммерсии обеспечивает не только повышенное разрешение, но и более высокую энергетическую эффективность по сравнению с другими методами ближнепольной визуализации. Данное преимущество достигается вследствие отсутствия каких-либо субволновых зондов и диафрагм в оптическом тракте. Это, в свою очередь, позволяет реализовать данный тип оптических систем с использованием распространенных малоомощных источников излучения и неохлаждаемых детекторов. Сравнение различных методов субволновой визуализации и обсуждение преимуществ микроскопии

на основе эффекта твердотельной иммерсии подробно изложено в обзорной статье [2].

На сегодняшний день разработано множество линз на основе эффекта твердотельной иммерсии с использованием различных материалов и подходов изготовления, геометрии и оптических конструкций [2,4–9] от ультрафиолетового до терагерцового (ТГц) спектрального диапазона. Кроме того, микроскопия на основе эффекта твердотельной иммерсии применялась для решения многих сложных фундаментальных и прикладных задач в видимой [10], инфракрасной (ИК) [11] и рамановской [12] визуализации со сверхразрешением, физике конденсированного состояния и сверхпроводимости [13–16], квантовых науках [17,18], хранении данных [19], неразрушающем контроле [20], биомедицине [21] и других дисциплинах.

Недавно микроскопия на основе эффекта твердотельной иммерсии была реализована в ТГц диапазоне (частоты $\nu \sim 10^{-1} - 10^1$ THz) [22–24]. В частности, разработан ТГц микроскоп на основе эффекта твердотельной иммерсии в режиме отражения [25], который включает объектив, состоящий из широкоапертурного асферического полимерного синглета [26] и полусферы из высокоомного кремния, который обладает ПП $n_{\text{Si}} \simeq 3.414$, а также незначительными дисперсией и поглощением в ТГц диапазоне [27]. В свою очередь, кремниевая полусфера состоит из двух элементов — жестко закрепленной гипополусферы и подвижного окна, которые расположены в плотном контакте и, таким образом, образуют единый оптический элемент. Такая составная конструкция позволяет получать изображения аморфных объектов (в том числе мягких биологических тканей), помещенных сверху на подвижное окно, путем его растрового сканирования сфокусированным ТГц пучком [3,25]. С помощью ТГц микроскопа с кремниевой линзой достигнуто рекордное разрешение 0.15λ при визуализации металл-диэлектрических объектов [25]; также в работе [28] изучалась зависимость разрешения микроскопа от ПП объекта и потерь. Аналитические и численные модели формирования субволнового пятна пучка иммерсионной линзой представлены в работе [29]. Разработанный ТГц микроскоп применялся для визуализации границ и неоднородностей моделей 101.8 глиом в мозгу крысы *ex vivo* [29–31], а также для изучения гетерогенных децеллюляризованных тканей во время их взаимодействия с влажной атмосферой [32].

В настоящее время ограниченные данные о ПП природных оптически прозрачных материалов в ТГц диапазоне затрудняют дальнейшее повышение разрешения микроскопии на основе эффекта твердотельной иммерсии, причем ПП изученных материалов в ТГц области обычно ниже, чем у кремния, $n \leq 3.0 - 3.5$. Интересный подход для увеличения ПП линзы предложен в работах [10,33], где композитные иммерсионные линзы изготавливались либо путем самосборки наночастиц TiO_2 с высоким ПП из коллоидной суспензии (для видимого диапазона), либо путем прессования смеси

TiO_2 и полимерных микропорошков (для ТГц диапазона) соответственно. В работе [33] ПП такой композитной линзы в ТГц диапазоне достигал $n = 4$, однако полученный материал демонстрировал высокое затухание ТГц волн из-за поглощения и рассеяния.

Для того чтобы еще больше повысить разрешение микроскопии на основе эффекта твердотельной иммерсии, в настоящей работе впервые изучается объемный кристалл рутила (TiO_2) с высоким ПП в качестве нового материала для изготовления иммерсионной линзы в ТГц диапазоне. Проведено экспериментальное исследование с использованием ТГц микроскопа на основе эффекта твердотельной иммерсии, работающего в режиме отражения на длине волны $\lambda = 1.5 \text{ mm}$ ($\nu \simeq 0.2 \text{ THz}$). Результаты исследования подтверждают превосходное разрешение в ТГц диапазоне $0.06 - 0.11\lambda$ иммерсионной линзы, изготовленной из рутила по сравнению с любым другим ранее опубликованным материалом для данного типа линз. Полученные результаты открывают возможности к использованию рутиловой оптики в качестве нового материала для ТГц микроскопии со сверхразрешением [34].

Разработка и изготовление рутиловой иммерсионной линзы

Для настоящего исследования выбрана геометрия оптической системы на основе эффекта твердотельной иммерсии, показанная на рис. 1, *a*, которая аналогична той, что подробно описана в работе [25]. Данная система включает широкоапертурный асферический полимерный синглет [26] и составную полусферу из рутила. Синглет с фокусным расстоянием 15 mm и диаметром 25 mm освещается коллимированным ТГц пучком, в результате чего формируется сходящийся волновой фронт. Рутиловая полусфера диаметром 10 mm и толщиной 5 mm установлена после синглета так, чтобы ее сферическая поверхность облучалась сходящимся волновым фронтом, а плоская поверхность совпадала с фокальной плоскостью синглета. В такой геометрии не возникает преломления на сферической поверхности рутиловой полусферы. Расстояние между синглетом и полусферой составляет 2.7 mm . Рутиловая полусфера выполняет функцию повышения разрешения, а на ее плоской поверхности (т. е. плоскости изображения) формируется субволновая каустика ТГц излучения [2,25,29].

Из кристалла рутила (фирма RusGems, Россия) вырезан куб размером $11 \times 11 \times 11 \text{ mm}$ (рис. 1, *b*), из которого получена сфера диаметром 10 mm (рис. 1, *c*), которая затем полирована с помощью алмазного порошка и чаши из бука со сферической поверхностью, покрытой бархатом. Данная сфера разрезана на полусферу толщиной 5 mm и гипополусферу толщиной 4 mm с полированными плоскими поверхностями и *s*-осью рутила, направленной вдоль оптической оси (рис. 1, *e* и 1, *f* соответственно). Из объемного кристалла вырезано рутиловое окно толщиной 1 mm с площадью

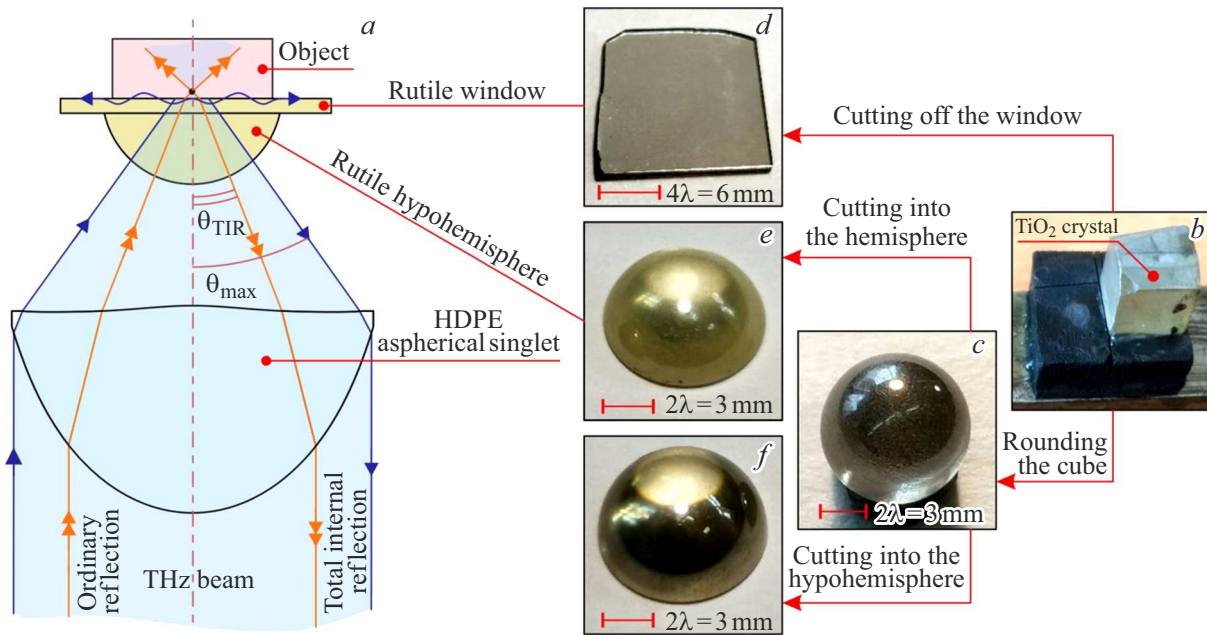


Рис. 1. ТГц оптическая система на основе эффекта твердотельной иммерсии с использованием рутиловой полусферы. (a) Схема оптической системы, состоящей из широкоапертурного асферического полимерного синглета, жестко закрепленной рутиловой гипополусферы и подвижного рутилового окна, которые вместе образуют полусферу. (b) Фотография куба размером $11 \times 11 \times 11\text{ mm}$, вырезанного из объемного кристалла рутила. (c)–(f) Фотографии сферы диаметром 10 mm , окна толщиной 1 mm , полусферы и гипополусферы, вырезанных из объемного кристалла, шлифованных и отполированных. В масштабе указана $\lambda = 1.5\text{ mm}$ ($\nu \approx 0.2\text{ THz}$), соответствующая рабочей длине волны ТГц микроскопа.

поверхности $\approx 3\text{ cm}^2$ и c -осью рутила, ориентированной в направлении оптической оси, которое затем также отшлифовано и отполировано с обеих сторон (рис. 1, d). Вместе с гипополусферой толщиной 4 mm это окно образует единую полусферическую рутиловую линзу общей толщиной 5 mm . Еще одно окно толщиной 1 mm с аналогичной площадью поверхности и такой же c -осью вырезано из объемного кристалла рутила для спектроскопической оценки анизотропного ТГц диэлектрического отклика [35]. В результате собрана составная рутиловая полусфера, которая включает жестко закрепленную гипополусферу толщиной 4 mm (рис. 1, e) и подвижное окно толщиной 1 mm (рис. 1, d), которые расположены в контакте, образуя единый оптический элемент. Подвижное рутиловое окно служит держателем образца и позволяет осуществлять растровое сканирование исследуемых объектов сфокусированным ТГц пучком.

Поскольку оптически анизотропный диэлектрический отклик кристалла рутила существенно зависит от метода и условий выращивания кристалла [35], для изучения анизотропных ТГц оптических свойств использован оригинальный ТГц импульсный спектрометр, работающий в режиме пропускания, который включает две фотопроводящие антенны в качестве излучателя и детектора ТГц импульсов. Данный спектрометр имеет вакуумированный отсек для ТГц пучка, что предотвращает воздействие водяного пара атмосферы на ТГц измерения и расширяет спектральный диапазон исследования

образца. Он также оснащен двумя поляризаторами на основе металлических сеток, предназначенными для поляризационно чувствительных ТГц измерений [36–38].

Для восстановления ТГц оптических свойств рутилового окна применен подход, подробно описанный в работах [39,40]. На рис. 2 показаны измеренные ПП n и коэффициенты поглощения α (по мощности) для обыкновенного и необыкновенного лучей кристалла рутила в диапазоне $0.1\text{--}0.8\text{ THz}$. Полоса измерения ограничена как чувствительностью детектора, так и высокими френелевскими потерями на границе раздела свободное пространство–рутил. Пурпурная штриховая линия на рис. 2 соответствует рабочей частоте 0.2 THz (длина волны $\lambda = 1.5\text{ mm}$) разработанного ТГц микроскопа на основе эффекта твердотельной иммерсии. На данной частоте обыкновенный и необыкновенный ПП рутила достигают $n_{\text{TiO}_2}^o = 9.83$ и $n_{\text{TiO}_2}^e = 13.58$ соответственно, а коэффициенты его поглощения по мощности $\alpha_{\text{TiO}_2} < 0.5\text{ cm}^{-1}$ для рассматриваемых толщин рутиловых оптических элементов относительно невелики. На рис. 1, a c -ось рутила ориентирована коллинеарно оптической оси для минимизации влияния кристаллической анизотропии на фокусирующие свойства оптической системы.

На рис. 3, a представлена схема ТГц микроскопа на основе эффекта твердотельной иммерсии, работающего в режиме отражения, которая аналогична версии с кремниевой иммерсионной линзой [25,3]. Данная схема включает модуляцию ТГц пучка с частотой $\approx 23\text{ Hz}$

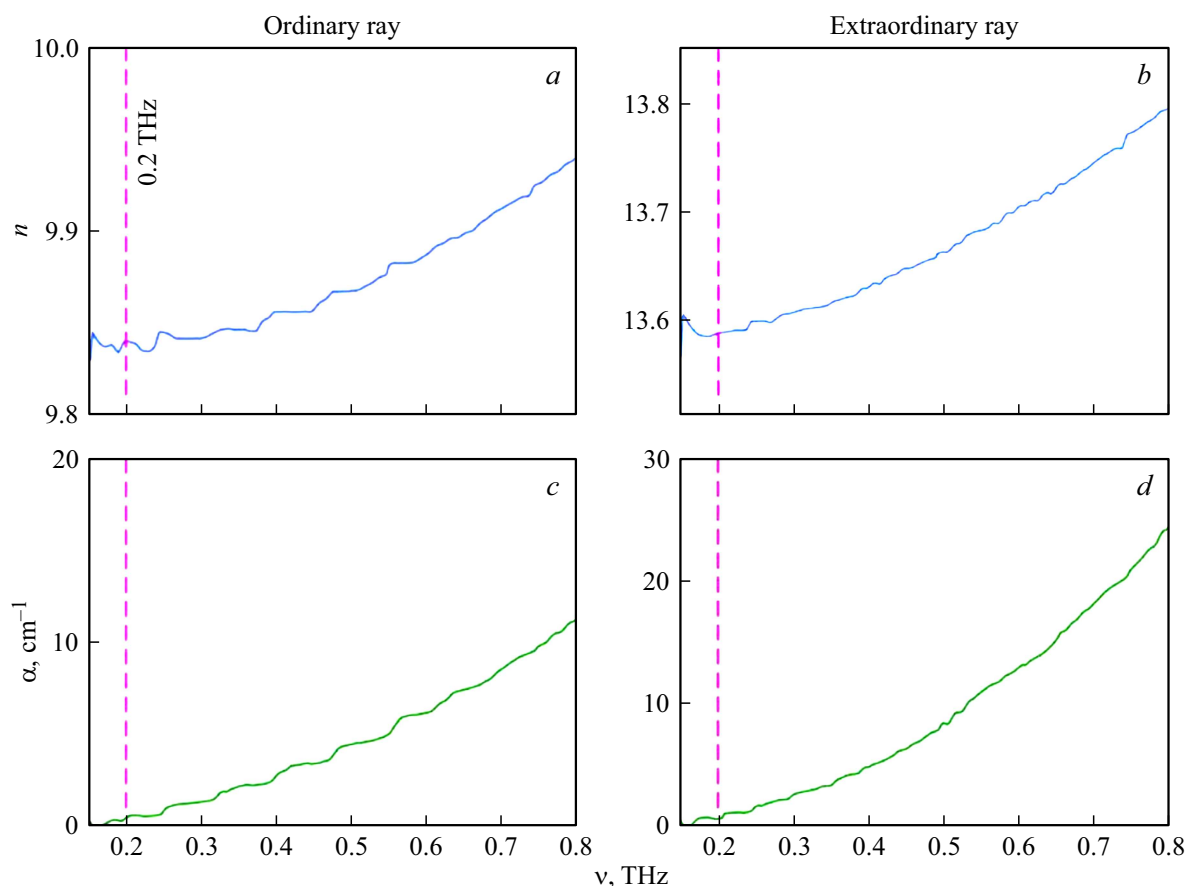


Рис. 2. ПП n и коэффициент поглощения α (по мощности) в ТГц диапазоне кристалла рутила для обыкновенного (a), (c) и необыкновенного (b), (d) лучей. Вертикальная пурпурная штриховая линия показывает частоту 0.2 THz, на которой работает ТГц микроскоп на основе эффекта твердотельной иммерсии.

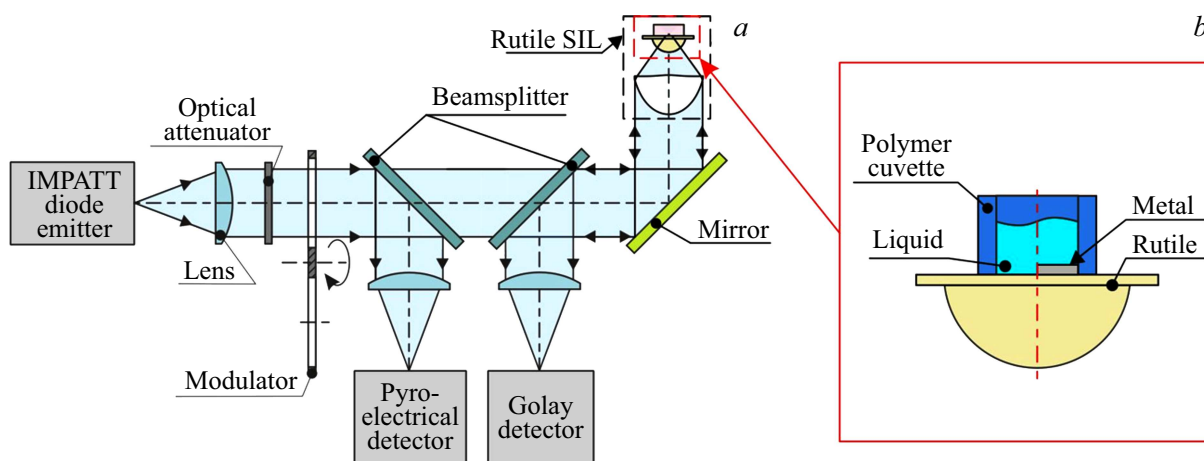


Рис. 3. ТГц микроскоп на основе эффекта твердотельной иммерсии с использованием составной рутиловой полусферы, работающий в режиме на отражении. (a) Схема ТГц микроскопа, в котором используется рутиловая линза, диодный излучатель и детектор Голея. (b) Схема кюветы для измерения жидких тестовых объектов.

с помощью механического модулятора, а также его регистрацию с помощью ячейки Голея с применением синхронного детектирования для улучшения отношения сигнал/шум. В отличие от работ [25,3], где в качестве

ТГц источника использовалась громоздкая лампа обратной волны, в настоящей работе применен гораздо меньший по размеру портативный лавинно-пролетный диод (TeraSense Group) [41], который генерирует неполя-

ризованное излучение со степенью поляризации ≈ 0.7 , длиной волны $\lambda = 1.5 \text{ mm}$ ($\nu \approx 0.2 \text{ THz}$) и мощностью излучения 100 mW . Однако из-за плохой долговременной стабильности выходной мощности диода (колебания в несколько процентов), сравнимой с контрастностью ТГц изображения, для непрерывной калибровки мощности ТГц излучения использован дополнительный пироэлектрический детектор (также в режиме синхронного детектирования). Таким образом, для каждого измерения (пикселя) мощность ТГц пучка, рассеянная образцом и регистрируемая ячейкой Голея, нормировалась на мощность, регистрируемую пироэлектрическим детектором. ТГц изображение формировалось путем растрового сканирования объекта с пространственным шагом окна 0.025λ , удовлетворяющим теореме дискретизации Найквиста–Шеннона–Котельникова [42].

На рис. 3, *b* показана схема измерения жидкого тестового объекта, помещенного в полимерную кювету поверх подвижного рутилового окна. Данная схема позволила осуществлять визуализацию границ раздела жидкий объект–металл для изучения зависимости разрешения микроскопа от оптических свойств жидкого объекта.

Экспериментальное исследование пространственного разрешения

В настоящем исследовании для оценки пространственного разрешения разработанного ТГц микроскопа на основе эффекта твердотельной иммерсии использованы пропилен гликоль (ПГ) и его водные растворы в качестве тестовых объектов [29]. ПГ и его водные растворы являются распространенными гиперосмотическими агентами для иммерсионного оптического просветления тканей в видимом, ИК и ТГц диапазонах [43–45]. В работах [38,46] изучены их оптические свойства с целью подбора оптимальных средств для иммерсионного оптического просветления тканей в ТГц диапазоне. Также в работе [47] приведены измеренные ПП и коэффициенты поглощения для анализируемых жидкостей, которые согласуются с указанными ранее данными. Как ПП, так и коэффициент поглощения монотонно и почти линейно возрастают с уменьшением содержания ПГ в растворе. В частности, на частоте 0.2 THz ПП n увеличивается с 1.77 (для чистого ПГ, 100%) до 2.60 (для деионизированной воды). Это дает большие возможности настройки ТГц оптических свойств тестового объекта для экспериментальных исследований разрешения оптической системы. Как обсуждалось в работе [29], диапазон оптических характеристик растворов ПГ близок к диапазону биологических тканей, что имеет особое значение для биомедицинских приложений.

Для проведения экспериментов сверху на рутиловую полусферу помещена полимерная кювета, в которую у основания установлена металлическая пластина. Измерения проводились с пустой кюветой (воздух) и с кюветой, заполненной растворами ПГ, образуя границу

Пространственное разрешение некоторых оптических систем на основе эффекта твердотельной иммерсии, представленных в литературе. Системы отсортированы по возрастанию разрешения

№	Разрешение, λ	Спектральный диапазон	Длина волны λ , μm	Материал линзы	Ссылка
1	0.49	ТГц	637	Si	[48]
2	0.43	Ближний ИК	0.83	Стекло	[49]
3	0.41	Видимый–ближний ИК	0.78	Стекло	[50]
4	0.4	Ближний ИК	1.1–1.7	Si	[51]
5	0.35	ТГц	600	Si	[52]
6	0.34	Средний ИК	5	Si	[53]
7	0.33	Средний ИК	0.8–1.1	Al_2O_3	[54]
8	0.31	Средний ИК	0.815	ZrO_2	[55]
9	0.3	Микроволновый	1500–3000	Al_2O_3	[56]
10	0.28	Средний ИК	5	Si	[57]
11	0.28	Видимый	0.633	Стекло LaSFN9	[58]
12	0.23	Средний ИК	10.7	Si	[59]
13	0.23	Видимый	0.436	Стекло	[1]
14	0.21	Ближний ИК	1.53	Si	[60]
15	0.2–0.3	ТГц	3.3	TiO_2/PP	[33]
16	0.2–0.23	Средний ИК	9.3–10.7	Si	[61]
17	0.2	Средний ИК	9.3	Si	[62]
18	0.15–0.31	Ближний ИК	1.2	Si	[63]
19	0.15	ТГц	500	Si	[25]

раздела диэлектрик–металл с различными ПП (рис. 3, *b*). Используются водные растворы ПГ различной концентрации: $C_{\text{PG}} = 0.0–1.0$ (по объему) [29,47]. На рис. 4, *a* видно, что экспериментальное разрешение составляет $\delta = 0.115\lambda$ для воздуха и $\delta = 0.067–0.127\lambda$ для водных растворов ПГ. Пример распределения интенсивности отраженного излучения от кюветы с металлической пластиной, заполненной чистым ПГ, представлен на рис. 4, *b*. Здесь интенсивность ТГц изображения нормирована на интенсивность излучения, отраженного от металлической пластины. На рис. 4, *c* продемонстрирован профиль интенсивности, взятый из рис. 4, *b*, по которому была взята первая производная для восстановления функции рассеяния ТГц изображающей системы на основе эффекта твердотельной иммерсии.

В таблице представлены опубликованные данные о пространственном разрешении некоторых оптических систем на основе эффекта твердотельной иммерсии, ра-

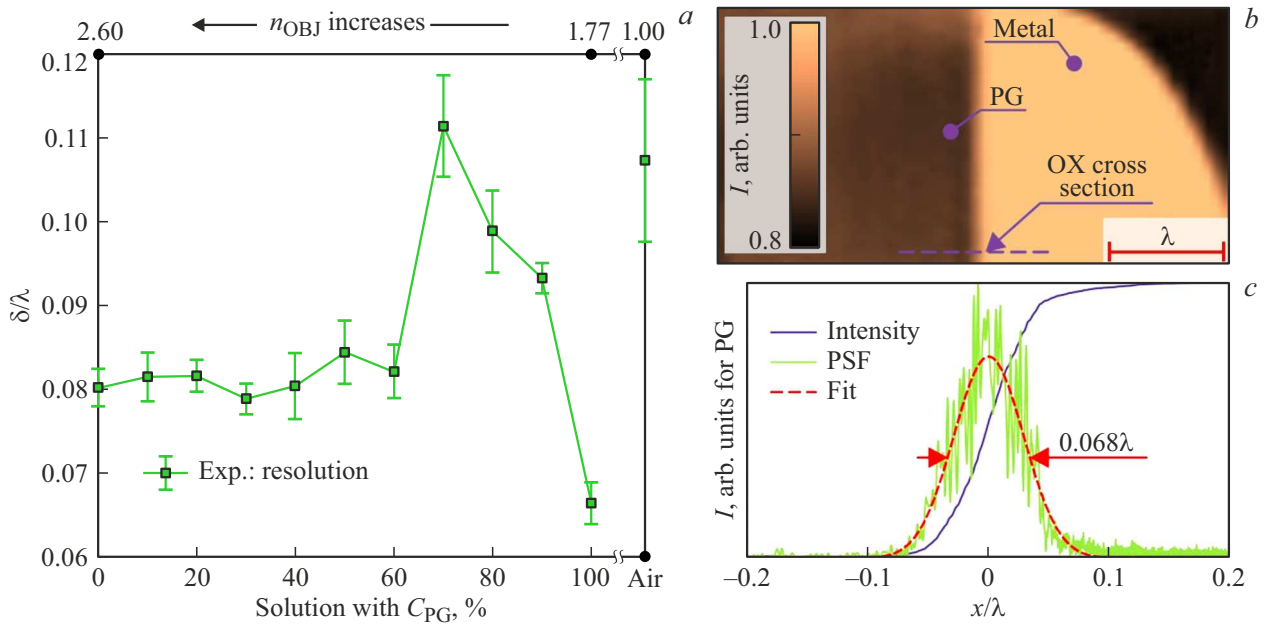


Рис. 4. Экспериментальные исследования пространственного разрешения рутиловой иммерсионной линзы. (а) Экспериментальная оценка разрешения иммерсионной линзы в зависимости от концентрации пропилен гликоля (PG) и ПП. (б) ТГЦ микроскопическое изображение границы раздела 100% PG–металл со ступенчатым изменением коэффициента отражения. (с) Профиль интенсивности, оцененный на основе ТГЦ изображения на панели (б), и его первая производная, а также сглаженная аппроксимация, описывающая функцию рассеяния линзы.

ботающих в разных диапазонах электромагнитного спектра. В анализ включены только те оптические системы, которые охарактеризованы при помощи общепринятых критериев разрешения, таких как радиус диска Эйри по критерию Рэля и размер пятна рассеяния по критерию FWHM. Стоит отметить, что разрешение ТГЦ рутиловой иммерсионной линзы превосходит разрешение всех ранее разработанных аналогичных линз из кремния для ТГЦ диапазона (строка 19 таблицы), а также всех других линз, разработанных для видимого, ближнего, среднего ИК и миллиметрового диапазонов.

Субволновая визуализация с помощью рутиловой иммерсионной линзы

ТГЦ микроскоп на основе эффекта твердотельной иммерсии с использованием рутила применен для визуализации различных типов тестовых сред. На рис. 5, а–д представлены фотографии и ТГЦ изображения напечатанных на 3D-принтере логотипов ИОФ РАН (GPI RAS) и ИФТТ РАН (ISSP RAS) институтов, принимавших участие в настоящем исследовании. Логотип ИОФ РАН изготовлен из проводящего соединения полимера акрилонитрила–бутадиен–стирола (ABS) и углеродных нанотрубок с удельным сопротивлением $4.64 \cdot 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$, а логотип ИФТТ РАН — из полимера полилактидной кислоты (PLA). Глубина букв во всех логотипах составляет 0.4 mm, что значительно больше глубины резкости разработанной ТГЦ оптической системы. Ширина букв составляет 0.4 mm или 0.27λ и

ограничена минимальным диаметром сопла 3D-принтера (FlashForge Creator Pro 2). Буквы субволнового размера четко читаются на всех ТГЦ изображениях.

Заключение

В настоящей работе проводилось экспериментальное исследование иммерсионной линзы из рутила (TiO_2), имеющей впечатляющий ПП $n \sim 10$ в ТГЦ диапазоне, для применения в сверхразрешающей микроскопии. Экспериментальные оценки показали, что рутиловая иммерсионная линза обеспечивает рекордное (для оптических систем на основе эффекта твердотельной иммерсии) пространственное разрешение (0.06–0.11 λ , что в 5–10 раз ниже дифракционного предела Аббе ≈ 0.5 в свободном пространстве. Такое высокое разрешение представляет собой значительный прогресс по сравнению со всеми ранее представленными оптическими системами на основе эффекта твердотельной иммерсии во всех спектральных диапазонах, от видимого до микроволнового. Полученные результаты открывают возможности для нового поколения оптических систем данного типа с использованием рутила для получения ТГЦ изображений со сверхразрешением.

Достигнутое рекордное пространственное разрешение ТГЦ микроскопа на основе эффекта твердотельной иммерсии с рутиловой линзой может найти применение в различных областях ТГЦ науки и техники. Среди них стоит особо отметить медицинскую диагностику и биологию [31,64], неразрушающий контроль материалов [65]

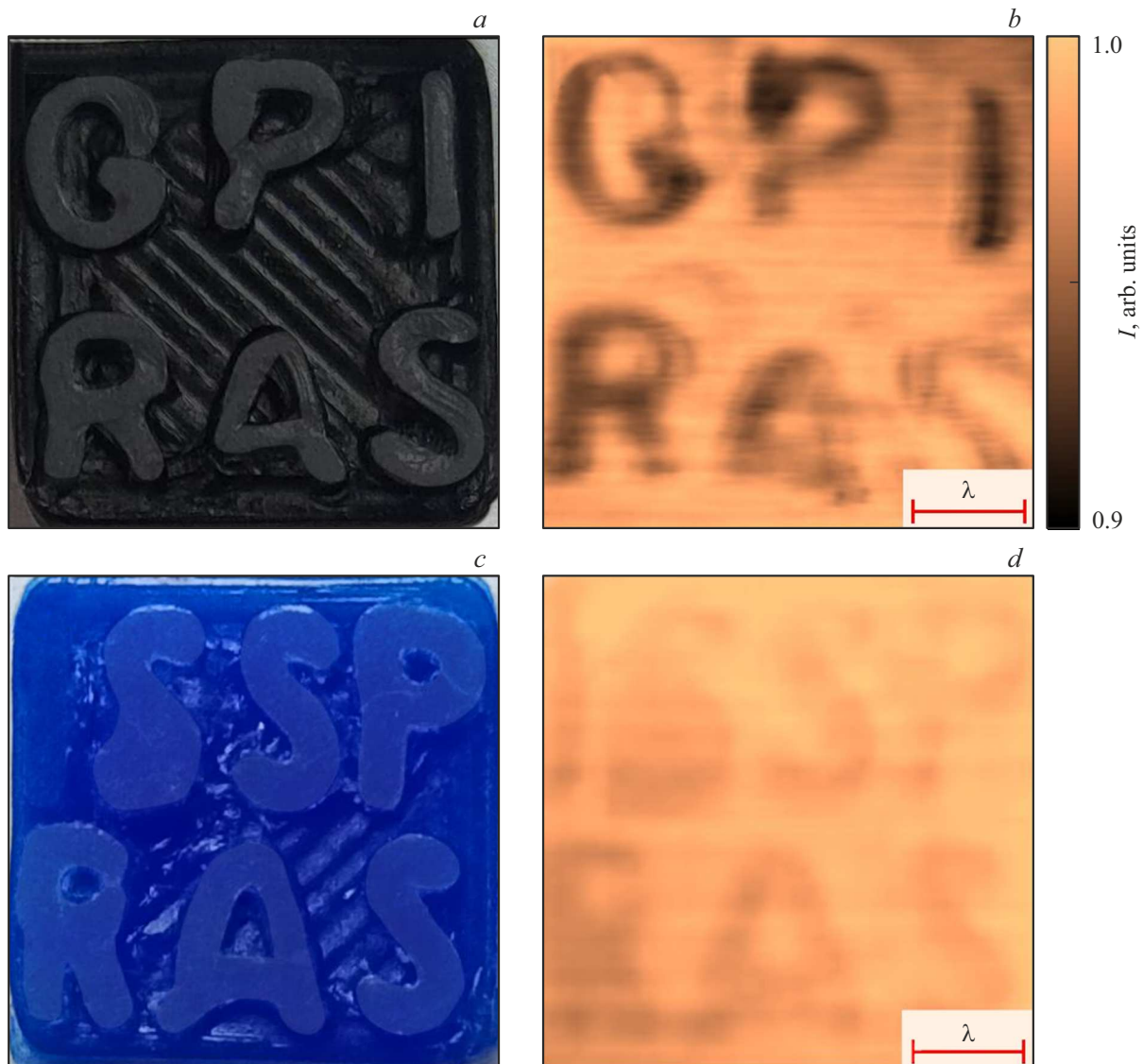


Рис. 5. ТГц микроскопия на основе эффекта твердотельной иммерсии объектов с субволновыми масштабами неоднородностей. (a)–(d) Фотографии и ТГц изображения полимерных логотипов, напечатанных на 3D-принтере, ИОФ РАН, (изготовлен из проводящего полимера ABS), а также ИФТТ РАН (полимер PLA).

и электронных схем [66], контроль качества в фармацевтической [67] и пищевой [68] промышленности.

В то же время (наряду с впечатляющим разрешением) существует ряд проблем, присущих данной системе. Во-первых, очень высокий ПП кристалла рутила значительно снижает энергетическую эффективность микроскопа из-за высоких френелевских потерь на границе раздела воздух–рутил. В перспективе для узкополосной работы этот недостаток можно смягчить, используя просветляющее покрытие на поверхности кристалла. Во-вторых, из-за высокого ПП значительная часть апертуры ТГц пучка в оптической системе подвергается ПВО на плоской границе раздела рутил–объект (рис. 1, a). А именно при наличии воздуха на обратной стороне иммерсионной линзы критический угол ПВО составляет всего лишь $\theta_{\text{TIR}} = \arcsin(n_{\text{air}}/n_{\text{TiO}_2}^0) \simeq 6$. Это означает, что отклик

оптической системы менее чувствителен к небольшим изменениям в ПП объекта по сравнению с аналогичными системами, изготовленными из материалов с более низким ПП, таких как кремний [29]. Наконец, отметим, что из-за очень высокого разрешения и необходимости ориентации *c*-оси кристалла рутила вдоль оптической оси (для сохранения изотропного отклика микроскопа) разработанная оптическая система требует более точного изготовления и сборки по сравнению со стандартным ТГц микроскопом на основе эффекта твердотельной иммерсии, в котором используется кремниевая линза с более низким ПП [25].

Хотя в настоящей работе рассматривается ТГц микроскопия на основе эффекта твердотельной иммерсии в режиме отражения, также возможна реализация и в режиме пропускания [24]. Более того, разработанный

ТГц микроскоп может применяться для количественной визуализации, т.е. для оценки оптических свойств объекта на заданной частоте [29]. Также рутиловая линза может быть скомбинирована с источниками и детекторами ТГц импульсного излучения, таким образом объединяя методы ТГц микроскопии на основе эффекта твердотельной иммерсии и ТГц импульсной спектроскопии для обнаружения широкополосных спектров с субволновым пространственным разрешением. Однако следует учитывать быстрое увеличение потерь и дисперсии материала рутила на более высоких ТГц частотах, как показано на рис. 2. Рутиловая линза также может быть реализована в различных других конфигурациях, таких как гиперполусферическая (линза Вейрштрасса) [21], дифракционная [5], микролинза [4,12] и эндоскопическая [69] линзы на основе эффекта твердотельной иммерсии.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научно-го фонда (РНФ), проект № 22-79-10099.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Mansfield, G. Kino. *Appl. Phys. Lett.*, **57** (24), 2615 (1990). DOI: 10.1063/1.103828
- [2] N. Chernomyrdin, M. Skorobogatiy, D. Ponomarev, V. Bukin, V. Tuchin, K. Zaytsev. *Appl. Phys. Lett.*, **120** (11), 110501 (2022). DOI: 10.1063/5.0085906
- [3] N. Chernomyrdin, V. Zhelnov, A. Kucheryavenko, I. Dolganova, G. Katyba, V. Karasik, I. Reshetov, K. Zaytsev. *Optical Engineering*, **59** (6), 061605 (2019). DOI: 10.1117/1.OE.59.6.061605
- [4] D. Fletcher, K. Crozier, C. Quate, G. Kino, K. Goodson, D. Simanovskii, D. Palanker. *Appl. Phys. Lett.*, **77** (14), 2109 (2000). DOI: 10.1063/1.1313368
- [5] R. Brunner, M. Burkhardt, A. Pesch, O. Sandfuchs, M. Ferstl, S. Hohng, J. White. *J. Optical Society of America A*, **21** (7), 1186 (2004). DOI: 10.1364/JOSAA.21.001186
- [6] I. Golub. *Opt. Lett.*, **32** (15), 2161 (2007). DOI: 10.1364/OL.32.002161
- [7] M.-S. Kim, T. Scharf, M. Haq, W. Nakagawa, H. Herzig. *Opt. Lett.*, **36** (19), 3930 (2011). DOI: 10.1364/OL.36.003930
- [8] D. Kang, C. Pang, S.M. Kim, H.S. Cho, H.S. Um, Y.W. Choi, K. Suh. *Advanced Materials*, **24** (13), 1709 (2012). DOI: 10.1002/adma.201104507
- [9] R. Grote, S. Mann, D. Hopper, A. Exarhos, G. Lopez, G. Kaighn, E. Garnett, L. Bassett. *Nature Commun.*, **10**, 2392 (2019). DOI: 10.1038/s41467-019-10238-5
- [10] W. Fan, B. Yan, Z. Wang, L. Wu. *Science Advances*, **2** (8), e1600901 (2016). DOI: 10.1126/sciadv.1600901
- [11] S. Ippolito, S. Thorne, M. Eraslan, B. Goldberg, M. Unlu, Y. Leblebici. *Appl. Phys. Lett.*, **84** (22), 4529 (2004). DOI: 10.1063/1.1758308
- [12] G. Lerman, A. Israel, A. Lewis. *Appl. Phys. Lett.*, **89** (22), 223122 (2006). DOI: 10.1063/1.2398888
- [13] Q. Wu, R. Grober, D. Gammon, D. Katzer. *Phys. Rev. Lett.*, **83** (13), 2652 (1999). DOI: 10.1103/PhysRevLett.83.2652
- [14] Z. Liu, B. Goldberg, S. Ippolito, A. Vamivakas, M. Unlu, R. Mirin. *Appl. Phys. Lett.*, **87** (7), 071905 (2005). DOI: 10.1063/1.2012532
- [15] R. Hadfield, P. Dalgarno, J. O'Connor, E. Ramsay, R. Warburton, E. Gansen, B. Baek, M. Stevens, R. Mirin, S. Nam. *Appl. Phys. Lett.*, **91** (24), 241108 (2007). DOI: 10.1063/1.2824384
- [16] A. Bogucki, L. Zinkiewicz, M. Grzeszczyk, W. Pacuski, K. Nogajewski, T. Kazimierzczuk, A. Rodek, J. Suffczyński, K. Watanabe, T. Taniguchi, P. Wasylczyk, M. Potemski, P. Kossacki. *Light: Science & Applications*, **9**, 48 (2020). DOI: 10.1038/s41377-020-0284-1
- [17] T. Schroder, F. Gadeke, M. Banholzer, O. Benson. *New J. Physics*, **13** (5), 055017 (2011). DOI: 10.1088/1367-2630/13/5/055017
- [18] V. Devaraj, J. Baek, Y. Jang, H. Jeong, D. Lee. *Opt. Express*, **24** (8), 8045 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.008045
- [19] B. Terris, H. Mamin, D. Rugar, W. Studenmund, G. Kino. *Appl. Phys. Lett.*, **65** (4), 388 (1994). DOI: 10.1063/1.112341
- [20] S. Ippolito, P. Song, D. Miles, J. Sylvestri. *Appl. Phys. Lett.*, **92** (10), 101109 (2008). DOI: 10.1063/1.2892656
- [21] L. Wang, B. Bateman, L. Zanetti-Domingues, A. Moores, S. Astbury, C. Spindloe, M. Darrow, M. Romano, S. Needham, K. Beis, D. Rolfe, D. Clarke, M. Martin-Fernandez. *Commun. Biology*, **2**, 74 (2019). DOI: 10.1038/s42003-019-0317-6
- [22] A. Pimenov, A. Loidl. *Appl. Phys. Lett.*, **83** (20), 4122 (2003). DOI: 10.1063/1.1627474
- [23] B. Gompf, M. Gerull, T. Müller, M. Dressel. *Infrared Physics & Technology*, **49** (1), 128 (2006). DOI: 10.1016/j.infrared.2006.01.021
- [24] N. Chernomyrdin, A. Schadko, S. Lebedev, V. Tolstoguzov, V. Kurlov, I. Reshetov, I. Spektor, M. Skorobogatiy, S. Yurchenko, K. Zaytsev. *Appl. Phys. Lett.*, **110** (22), 221109 (2017). DOI: 10.1063/1.4984952
- [25] N. Chernomyrdin, A. Kucheryavenko, G. Kolontaeva, G. Katyba, I. Dolganova, P. Karalkin, D. Ponomarev, V. Kurlov, I. Reshetov, M. Skorobogatiy, V. Tuchin, K. Zaytsev. *Appl. Phys. Lett.*, **113** (11), 111102 (2018). DOI: 10.1063/1.5045480
- [26] N. Chernomyrdin, M. Frolov, S.P. Lebedev, I.V. Reshetov, I.E. Spektor, V.L. Tolstoguzov, V.E. Karasik, A.M. Khorokhorov, K.I. Koshelev, A.O. Schadko, S.O. Yurchenko, K.I. Zaytsev. *Rev. Sci. Instruments*, **88** (1), 014703 (2017). DOI: 10.1063/1.4973764
- [27] D. Grischkowsky, S. Keiding, M. van Exter, C. Fattinger. *J. Optical Society of America B*, **7** (10), 2006 (1990). DOI: 10.1364/JOSAB.7.002006
- [28] V. Zhelnov, K. Zaytsev, A. Kucheryavenko, G. Katyba, I. Dolganova, D. Ponomarev, V. Kurlov, M. Skorobogatiy, N. Chernomyrdin. *Opt. Express*, **29** (3), 3553 (2021). DOI: 10.1364/OE.415049
- [29] N. Chernomyrdin, M. Skorobogatiy, A. Gavdush, G. Musina, G. Katyba, G. Komandin, A. Khorokhorov, I. Spektor, V. Tuchin, K. Zaytsev. *Optica*, **8** (11), 1471 (2021). DOI: 10.1364/OPTICA.439286
- [30] A. Kucheryavenko, N. Chernomyrdin, A. Gavdush, A. Alekseeva, P. Nikitin, I. Dolganova, P. Karalkin, A. Khalansky, I. Spektor, M. Skorobogatiy, V. Tuchin, K. Zaytsev. *Biomed. Opt. Express*, **12** (8), 5272 (2021). DOI: 10.1364/BOE.432758

- [31] N. Chernomyrdin, G. Musina, P. Nikitin, I. Dolganova, A. Kucheryavenko, A. Alekseeva, Y. Wang, D. Xu, Q. Shi, V. Tuchin, K. Zaytsev. *Opto-Electronic Advances*, **6** (4), 220071 (2023). DOI: 10.29026/oea.2023.220071
- [32] G.R. Musina, N.V. Chernomyrdin, E.R. Gafarova, A.A. Gavdush, A.J. Shpichka, G.A. Komandin, V.B. Anzin, E.A. Grebenik, M.V. Kravchik, E.V. Istranova, I.N. Dolganova, K.I. Zaytsev, P.S. Timashev. *Biomed. Opt. Express*, **12** (9), 5368 (2021). DOI: 10.1364/BOE.433216
- [33] Q. Chapdelaine, K. Nallappan, Y. Cao, H. Guerboukha, N. Chernomyrdin, K. Zaytsev, M. Skorobogatiy. *Optical Materials Express*, **12** (8), 3015 (2022). DOI: 10.1364/OME.461756
- [34] H. Guerboukha, K. Nallappan, M. Skorobogatiy. *Advances in Optics & Photonics*, **10** (4), 843 (2018). DOI: 10.1364/AOP.10.000843
- [35] F. Gervais, B. Piriou. *Phys. Rev. B*, **10** (4), 1642 (1974). DOI: 10.1103/PhysRevB.10.1642
- [36] G. Komandin, V. Anzin, V. Ulitko, A. Gavdush, A. Mukhin, Y. Goncharov, O. Porodinkov, I. Spektor. *Opt. Engineering*, **59** (6), 061 (2019). DOI: 10.1117/1.OE.59.6.061603
- [37] D. Lavrukhin, A. Yachmenev, A. Pavlov, R. Khabibullin, Y. Goncharov, I. Spektor, G. Komandin, S. Yurchenko, N. Chernomyrdin, K. Zaytsev, D. Ponomarev. *Semiconductor Science & Technology*, **34** (3), 034005 (2019). DOI: 10.1088/1361-6641/aaff31
- [38] G. Musina, I. Dolganova, N. Chernomyrdin, A. Gavdush, V. Ulitko, O. Cherkasova, D. Tuchina, P. Nikitin, A. Alekseeva, N. Bal, G. Komandin, V. Kurlov, V. Tuchin, K. Zaytsev. *J. Biophotonics*, **13** (12), e20200029 (2020). DOI: 10.1002/jbio.202000297
- [39] I. Pupeza, R. Wilk, M. Koch. *Opt. Express*, **15** (7), 4335 (2007). DOI: 10.1364/OE.15.004335
- [40] K. Zaytsev, A. Gavdush, V. Karasik, V. Alekhnovich, P. Nosov, V. Lazarev, I. Reshetov, S. Yurchenko. *J. Appl. Phys.*, **115** (19), 193105 (2014). DOI: 10.1063/1.4876324
- [41] A. Shchepetilnikov, A. Zarezin, V. Muravev, P. Gusikhin, I. Kukushkin. *Opt. Engineering*, **59** (6), 061617 (2020). DOI: 10.1117/1.OE.59.6.061617
- [42] C. Shannon. *Proc. IRE*, **37** (1), 10 (1949). DOI: 10.1109/JRPROC.1949.232969
- [43] V. Tuchin. *Tissue Optics: Light Scattering Methods and Instruments for Medical Diagnostics*, Third Edition (SPIE Press, USA, 2015). DOI: 10.1117/3.1003040
- [44] L. Oliveira, K. Zaytsev, V. Tuchin. *Proc. SPIE*, **11585**, 1158503 (2020). DOI: 10.1117/12.2584999
- [45] I. Martins, H. Silva, E. Lazareva, N. Chernomyrdin, K. Zaytsev, L. Oliveira, V. Tuchin. *Biomed. Opt. Express*, **14** (1), 249 (2023). DOI: 10.1364/BOE.479320
- [46] G. Musina, A. Gavdush, N. Chernomyrdin, I. Dolganova, V. Ulitko, O. Cherkasova, V. Kurlov, G. Komandin, I. Zhivotovskii, V. Tuchin, K. Zaytsev. *Opt. Spectrosc.*, **128**, 1026 (2020). DOI: 10.1134/S0030400X20070279
- [47] V.A. Zhelnov, N.V. Chernomyrdin, G.M. Katyba, A.A. Gavdush, V.V. Bukin, S.V. Garnov, I.E. Spektor, V.N. Kurlov, M. Skorobogatiy, K.I. Zaytsev. *Adv. Optical Mater.*, 2300927 (2023). DOI: 10.1002/adom.202300927
- [48] B. Gompf, M. Gerull, T. Muller, M. Dressel. *Infrared Physics and Technology*, **49** (1), 128 (2006). DOI: 10.1016/j.infrared.2006.01.021
- [49] B. Terris, H. Mamin, D. Rugar. *Appl. Phys. Lett.*, **68** (2), 141 (1996). DOI: 10.1063/1.116127
- [50] B. Terris, H. Mamin, D. Rugar, W. Studenmund, G. Kino. *Appl. Phys. Lett.*, **65** (4), 388 (1994). DOI: 10.1063/1.112341
- [51] G. Tessier, M. Bardoux, C. Bouue, C. Filloy, D. Fournier. *Appl. Phys. Lett.*, **90** (17), 171112 (2007). DOI: 10.1063/1.2732179
- [52] N. Chernomyrdin, A. Schadko, S. Lebedev, V. Tolstoguzov, V. Kurlov, I. Reshetov, I. Spektor, M. Skorobogatiy, S. Yurchenko, K. Zaytsev. *Appl. Phys. Lett.*, **110** (22), 221109 (2017). DOI: 10.1063/1.4984952
- [53] D. Fletcher. *Microscale Thermophysical Engineering*, **7** (4), 267 (2003). DOI: 10.1080/10893950390245985
- [54] Q. Wu, R. Grober, D. Gammon, D. Katzer. *Phys. Rev. Lett.*, **83** (13), 2652 (1999). DOI: 10.1103/PhysRevLett.83.2652
- [55] S. Bishop, J. Hadden, R. Hekmati. *Appl. Phys. Lett.*, **120** (11), 114001 (2022). DOI: 10.1063/5.0085257
- [56] A. Pimenov, A. Loidl. *Appl. Phys. Lett.*, **83** (20), 4122 (2003). DOI: 10.1063/1.1627474
- [57] S. Ippolito, S. Thorne, M. Eraslan, B. Goldberg, M. Unlu, Y. Leblebici. *Appl. Phys. Lett.*, **84** (22), 4529 (2004). DOI: 10.1063/1.1758308
- [58] K. Karrai, X. Lorenz, L. Novotny. *Appl. Phys. Lett.*, **77** (21), 3459 (2000). DOI: 10.1063/1.1326839
- [59] D. Fletcher, K. Crozier, C. Quate, G. Kino, K. Goodson, D. Simanovskii, D. Palanker. *Appl. Phys. Lett.*, **78** (23), 3589 (2001). DOI: 10.1063/1.1377318
- [60] E. Ramsay, N. Pleynet, D. Xiao, R. Warburton, D. Reid. *Opt. Lett.*, **30** (1), 26 (2005). DOI: 10.1364/OL.30.000026
- [61] D. Fletcher, K. Crozier, C. Quate, G. Kino, K. Goodson, D. Simanovskii, D. Palanker. *Appl. Phys. Lett.*, **77** (14), 2109 (2000). DOI: 10.1063/1.1313368
- [62] F.H. Koklu, J.I. Quesnel, A.N. Vamivakas, S.B. Ippolito, B.B. Goldberg, M.S. Unlu. *Opt. Express*, **16**, 13950 (2008). DOI: 10.1364/OE.16.009501
- [63] G. Katyba, N. Raginov, E. Khabushev, V. Zhelnov, A. Gorodetsky, D. Ghazaryan, M. Mironov, D. Krasnikov, Y. Gladush, J. Lloyd-Hughes, A. Nasibulin, A. Arsenin, V. Volkov, K. Zaytsev, M. Burdanova. *Optica*, **10** (1), 53 (2023). DOI: 10.1364/OPTICA.475385
- [64] Z. Yan, L.-G. Zhu, K. Meng, W. Huang, Q. Shi. *Trends in Biotechnology*, **40** (7), 816 (2022). DOI: 10.1016/j.tibtech.2021.12.002
- [65] C.D. Stoik, M.J. Bohn, J.L. Blackshire. *Opt. Express*, **16** (21), 17039 (2008). DOI: 10.1364/OE.16.017039
- [66] J. True, C. Xi, N. Jessurun, K. Ahi, N. Asadizanjani. *Opt. Engineering*, **60** (6), 060901 (2021). DOI: 10.1117/1.OE.60.6.060901
- [67] J.A. Zeitler, P.F. Taday, D.A. Newnham, M. Pepper, K.C. Gordon, T. Rades. *J. Pharmacy and Pharmacology*, **59** (2), 209 (2010). DOI: 10.1211/jpp.59.2.0008
- [68] A. Ren, A. Zahid, D. Fan, X. Yang, M.A. Imran, A. Alomainy, Q.H. Abbasi. *Trends in Food Science & Technology*, **85**, 241 (2019). DOI: 10.1016/j.tifs.2019.01.019
- [69] A. Kucheryavenko, V. Zhelnov, D. Melikyants, N. Chernomyrdin, S. Lebedev, V. Bukin, S. Garnov, V. Kurlov, K. Zaytsev, G. Katyba. *Opt. Express*, **31** (8), 13366 (2023). DOI: 10.1364/OE.484650