Размеронезависимое и эффективное фототермическое преобразование солнечного света на наночастицах TiN и Ti_3C_2 MXene в сравнении с Au

© В.Г. Ефременко[1], И.В. Мартынов[2], Е.А. Антонычева[1], И.А. Веселова[3], А.А. Ушков[2], А.А. Вишневый[2], В.Г. Лейман[2], Г.И. Целиков[2], А.В. Арсенин[2], А.В. Сюй[2,*]

[1] Кафедра физики и теоретической механики, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия
[2] Центр фотоники и двумерных материалов, Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия
[3] Химический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

e-mail: alsyuy271@gmail.com

Поступила в редакцию 01.12.2025 г.
В окончательной редакции 08.12.2025 г.
Принята к публикации 10.12.2025 г.

Проведено сравнительное теоретическое моделирование фототермических характеристик наночастиц Au, нитрида титана (TiN) и Ti_3C_2 MXene. Для количественной оценки производительности в условиях солнечного облучения (AM1.5G) применен критерий интегральной фототермической эффективности ($IPCE$), учитывающий спектральное распределение солнечной энергии и соотношение поглощения и рассеяния. Расчеты показывают, что TiN и Ti_3C_2 демонстрируют высокую $IPCE$ ($> 90\,\%$), которая слабо зависит от размера частиц в диапазоне диаметров $20-100$ nm. В отличие от этого эффективность наночастиц Au значительно снижается при отклонении от оптимального диаметра (~ 60 nm) вследствие роста потерь на рассеяние. Обнаруженная слабая зависимость эффективности от размера для TiN и Ti_3C_2 снижает требования к монодисперсности при синтезе и позиционирует эти соединения как перспективную платформу для масштабируемых фототермических систем.

Ключевые слова: фототермическое преобразование, наночастицы, широкополосное поглощение, локализованный поверхностный плазмонный резонанс.

DOI: 10.61011/OS.2026.08.63703.50-26

Введение

В последние годы спрос на масштабируемые технологии фототермического преобразования солнечной энергии стремительно растет, что обусловлено актуальными задачами децентрализованной энергетики, опреснения морской воды, промышленного нагрева и экологического катализа. Разработка высокоэффективных фототермических материалов имеет решающее значение не только для устойчивой энергетики, включая солнечную дистилляцию и паровую генерацию, но и для биомедицинских применений, в частности фототермальной терапии рака, где наноматериалы демонстрируют уникальный потенциал для селективного разрушения опухолевых клеток. Эффективная реализация этих технологий требует создания новых материалов, способных обеспечивать высокий коэффициент преобразования солнечного света в тепло в широком спектральном диапазоне при минимальных оптических потерях [1–9].

Традиционно фототермические агенты основывались на плазмонных наночастицах благородных металлов, прежде всего золота (Au), благодаря выраженному локализованному поверхностному плазмонному резонансу (LSPR) и значительной оптической мощности поглощения [1,9,10]. Однако широкое внедрение Au в крупномасштабные солнечные технологии наталкивается на фундаментальные и до сих пор не решенные задачи. Применение Au ограничено тремя основными факторами. Во-первых, узкополосная природа LSPR (пик $520-550$ nm) позволяет утилизировать лишь малую долю широкого солнечного спектра (AM1.5G). Во-вторых, низкая термическая ($T_{\text{пл}} = 1064\,^\circ\text{C}$) и химическая стабильность Au исключает его использование в высокотемпературных промышленных приложениях. В-третьих, и это наиболее критично для масштабирования, фототермическая эффективность Au экстремально чувствительна к геометрии и размерам частиц [10]. Достижение оптимального поглощения требует строгого контроля дисперсности, что усложняет и удорожает синтез. Необходимость строгого контроля морфологии для достижения пиковой эффективности делает крупномасштабный синтез экономически нежизнеспособным. Это стимулирует поиск альтернатив среди недорогих и стабильных соединений, обладающих широкополосным поглощением и высокой фототермической производительностью [11–21].

Особый интерес представляют тугоплавкий нитрид титана (TiN) [16–18,22,23] и двумерный Ti_3C_2 MXene [24–26], продемонстрировавшие выдающиеся интегральные фототермические параметры и — в отличие от Au — преобразование энергии, не зависящее

от размеров частиц. Нитрид титана сочетает плазмонные свойства, сопоставимые с Au, с исключительной термической и химической стабильностью, что делает его идеальным для жестких промышленных условий. Материал Ti_3C_2 MXene, напротив, демонстрирует металлическую проводимость и уникальную способность к сверхширокополосному поглощению ($> 90\,\%$) в видимом и ИК-диапазонах, обусловленную комбинацией межзонных переходов и плазмонных возбуждений [26], что незаменимо для водных систем генерации и пара.

Несмотря на растущий интерес к TiN и Ti_3C_2, прямое сравнение их эффективности с Au в реальных условиях остается затруднительным из-за отсутствия унифицированной метрики и различий в экспериментальных условиях. Стандартные измерения эффективности на одной резонансной длине волны (PCE) неадекватны для оценки широкополосных поглотителей и не отражают их реальную производительность под сложным солнечным спектром. В существующей литературе до сих пор не было проведено систематического анализа, который объединял бы эти три принципиально разных класса материалов в рамках единой модели, позволяющей выявить фундаментальные, а не ситуативные различия.

В настоящей работе представлено сравнительное моделирование оптических и фототермических свойств наночастиц Au, TiN и Ti_3C_2 в идентичных геометрических условиях и применен разработанный нами критерий интегральной фототермической эффективности ($IPCE$). Этот подход позволяет впервые количественно сопоставить интегральную конверсию энергии солнечного спектра (AM1.5G) с учетом потерь на рассеяние, обеспечивая объективное и прямое сравнение разнородных материалов. Нами продемонстрировано, что TiN и Ti_3C_2 не только превосходят традиционно используемое золото по интегральной эффективности, но, что является ключевым новым результатом, обладают слабой зависимостью фототермического отклика от размера частиц. Именно это фундаментальное свойство, выявленное в ходе нашего анализа, снимает главное производственное ограничение благородных металлов — необходимость прецизионного синтеза монодисперсных частиц, открывая путь к экономически эффективному и масштабируемому производству солнечных фототермических систем нового поколения.

Целью данной работы является сравнение оптических и фототермических свойств наночастиц Au, TiN и Ti_3C_2 в идентичных геометрических условиях.

Методы

Моделирование оптических свойств и параметры материалов

Оптические сечения поглощения (C_{abs}), рассеяния (C_{sca}) и экстинкции (C_{ext}) для одиночных сферических наночастиц рассчитывались с использованием теории Ми. Соответствующие безразмерные эффективности (Q_{abs}, Q_{sca}, Q_{ext}) определялись путем нормировки сечений на площадь геометрического поперечного сечения частицы (πr^2).

Моделирование проводилось для сферических наночастиц Au, TiN, Ti_3C_2 в диапазоне диаметров от 20 до 100 nm (с шагом 10 nm) в неабсорбирующей среде (вода, $n \sim 1.33$). Сферические наночастицы Au широко доступны и их свойства хорошо изучены. Для слоистого материала Ti_3C_2 (MXene), традиционно существующего в виде 2D-листов, использование сферической модели также является физически обоснованным. Современные методы импульсной лазерной абляции в жидкости позволяют эффективно трансформировать слоистые ван-дер-ваальсовы материалы в идеально сферические наночастицы с сохранением их уникальных оптических свойств. В частности, недавние работы демонстрируют возможность получения стабильных сферических наночастиц MXene и родственных соединений с узким распределением по размерам, что делает нашу модель применимой к реальным лазерно синтезированным коллоидам [8,9,16,25,27]. Расчеты выполнялись в спектральном диапазоне 400–900 nm с шагом 1 nm. Указанный диапазон выбран потому, что в нем сосредоточена наибольшая энергетическая часть солнечного спектра AM1.5G — на этот интервал приходится более половины суммарной мощности солнечного излучения (63.7 %). Такой подход позволяет учесть вклад именно тех длин волн, которые наиболее значимы для фототермических и фотокаталитических процессов. Диэлектрические функции, необходимые для расчетов, были взяты из авторитетных литературных источников: для Au использованы экспериментальные данные [28]; для TiN использованы экспериментальные значения параметров n, k поликристаллических пленок [29]; для Ti_3C_2 использованы экспериментальные данные для пленок, сформированных из нанолистов [26].

Метрики фототермической эффективности

Эффективность фототермического преобразования (PCE) на определенной длине волны λ определялась как отношение эффективности поглощения к эффективности экстинкции:

$$PCE(\lambda) = \frac{Q_{abs}(\lambda)}{Q_{ext}(\lambda)}.$$

Для адекватной оценки производительности в условиях реального солнечного облучения применяется критерий интегральной фототермической эффективности — $IPCE$ представляет собой средневзвешенное значение PCE по стандартному солнечному спектру $I(\lambda)$ (AM1.5G), взвешенное по поглощенной мощности, в рабочем диапазоне (400–900 nm):

$$IPCE = \frac{\int_{400}^{900} Q_{abs}(\lambda) I(\lambda) d\lambda}{\int_{400}^{900} Q_{ext}(\lambda) I(\lambda) d\lambda}.$$

Общая интегральная мощность, поглощенная наночастицей (P_{abs}), которая определяет общую генерацию тепла, рассчитывается по формуле

$$P_{\text{abs}} = \int_{400}^{900} Q_{\text{abs}}(\lambda) I(\lambda) d\lambda.$$

Результаты и анализ

Спектральные и размерные ограничения плазмоники для сферических наночастиц Au

Численное моделирование подтверждает фундаментальные различия в оптических механизмах трех материалов (рис. 1). Как и ожидалось, наночастицы Au (60 nm) демонстрируют ярко выраженный, но узкополосный пик LSPR в диапазоне 500–550 nm. Этот узкополосный резонансный механизм ограничивает применимость Au для утилизации широкого спектра солнечной энергии. Анализ зависимости от размера частиц (рис. 1, *a*) показывает, что максимальное поглощение (Q_{abs}) достигается только в строго определенном диапазоне $\sim$ 60–70 nm. Любое отклонение от этого оптимального размера приводит к резкому падению эффективности. Более того, с увеличением размера наночастиц Au возрастает вклад рассеяния (Q_{sca}) в общее сечение экстинкции (рис. 1, *d*). Это приводит к снижению эффективности фототермического преобразования, поскольку рассеянные фотоны не вносят вклад в генерацию тепла. Таким образом, применение частиц Au сталкивается с двойным ограничением — узким спектральным окном и критической чувствительностью оптического отклика к геометрическим размерам наночастиц, что делает их малопригодным для масштабируемого производства.

Широкополосное поглощение наночастиц TiN и Ti_3C_2 MXene

В разительном контрасте сферические наночастицы TiN и Ti_3C_2 MXene демонстрируют принципиально иной, нерезонансный механизм поглощения (рис. 1, *b, c*). Оба материала показывают сверхширокополосное поглощение, охватывающее видимый и ближний ИК-диапазоны. Частицы Ti_3C_2, в частности, показывают высокий и равномерный Q_{abs} в важном для солнечной энергетики диапазоне 600–800 nm, но более низкий по абсолютным значениям, чем тот же параметр Q_{abs} для частиц TiN. Критически важно, что для частиц TiN и Ti_3C_2 поглощение (Q_{abs}) доминирует над рассеянием (Q_{sca}) во всем исследованном диапазоне размеров (рис. 1, *e,f*). Это обеспечивает стабильно высокое значение *PCE* (превышающее 80–90 % спектрально) независимо от геометрии (рис. 2, *e,f*).

Независимая от размера частиц эффективность (*IPCE*) и инженерная применимость

Традиционные метрики, такие как пиковое поглощение или эффективность фототермического преобразования на отдельных длинах волн, не позволяют объективно сравнивать материалы с различными спектральными характеристиками в условиях реального солнечного излучения. Наночастицы золота демонстрируют высокое пиковое поглощение ($\sim$ 4 arb. units) при 520 nm, что создает иллюзию превосходной эффективности. Однако это преимущество нивелируется узкой полосой резонанса: за пределами диапазона 500–600 nm поглощение Au резко падает, оставляя значительную часть солнечного спектра AM1.5G (особенно красную и ближнюю ИК-области, 600–900 nm) неиспользованной. В противоположность этому частицы Ti_3C_2 и TiN демонстрируют умеренное, но стабильное поглощение в видимом и ближнем ИК-диапазонах, эффективно утилизируя практически весь доступный солнечный спектр. Более того, монохроматические измерения *PCE* не учитывают спектральное распределение энергии в солнечном излучении. Например, Au может показывать высокое значение *PCE* ($\sim$ 70–80 %) на резонансной длине волны, но это значение быстро снижается до 20–30 % в красной и ближней ИК-областях, где по-прежнему содержится $\sim$ 40–50 % энергии солнечного спектра. Такой подход создает искаженное представление о реальной производительности материала в условиях широкополосного солнечного облучения (рис. 2, *a–c*).

Именно поэтому вводится метрика интегральной фототермической эффективности (*IPCE*) — средневзвешенное значение *PCE* по стандартному солнечному спектру AM1.5G, где весовой функцией служит интенсивность излучения на каждой длине волны. Параметр *IPCE* показывает, какая доля всей поглощенной солнечной энергии преобразуется в тепло, а не теряется на рассеяние или отражение. Эта метрика позволяет объективно сравнивать материалы с принципиально разными оптическими механизмами (узкополосный плазмонный резонанс Au против широкополосного поглощения Ti_3C_2 и TiN) в контексте их реального применения для солнечного фототермического преобразования. Результаты расчетов *IPCE* убедительно демонстрируют, что несмотря на более скромное пиковое поглощение, Ti_3C_2 и TiN превосходят золото по интегральной эффективности, достигая значений > 90 % во всем диапазоне размеров частиц 20–100 nm.

Этот результат выявляет фундаментальное технологическое преимущество данных материалов. Он означает, что для достижения пиковой эффективности этим материалам не требуется сложный и дорогостоящий контроль морфологии при синтезе. Напротив, параметр *IPCE* для Au демонстрирует резкое падение при диаметрах выше 60 nm, что напрямую связано с ростом потерь на рассеяние. Прямым следствием этой независимости от размеров является поведение

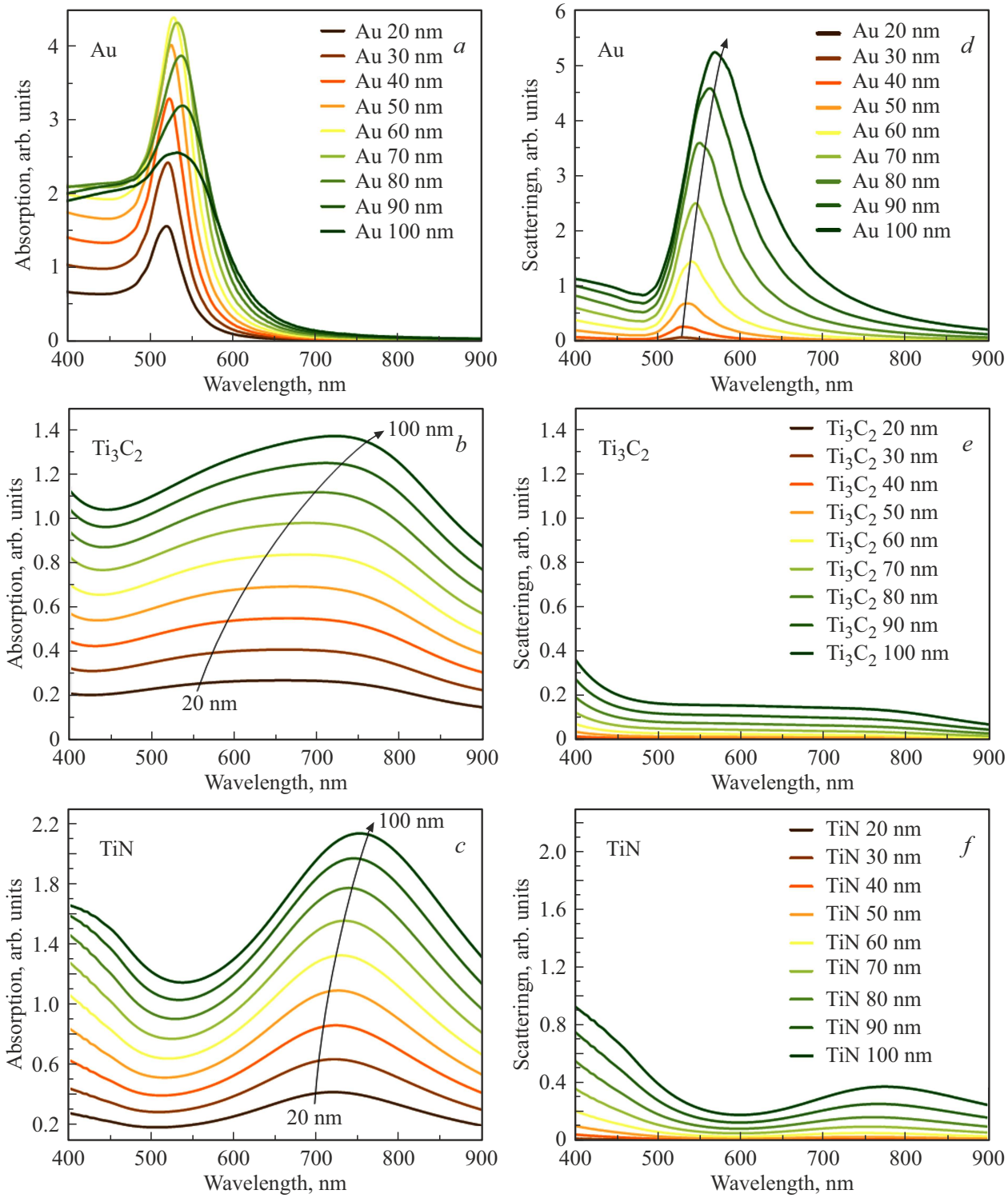


Рис. 1. Спектральная зависимость поглощения (a–c) и рассеяния (d–f) для наночастиц Au, Ti_3C_2 и TiN разных диаметров (20–100 nm). Расчеты выполнены с использованием теории Ми в воде ($n = 1.33$) для длин волн 400–900 nm.

абсолютной поглощенной мощности P_{abs} (рис. 3, b). В то время как P_{abs} для частиц Au быстро достигает насыщения из-за потерь на рассеяние, частицы TiN и Ti_3C_2 демонстрируют стабильный рост поглощенной мощности. Это доказывает, что широкополосные, нерезонансные материалы, такие как TiN и MXene, являются не просто более дешевой, а технически превосходящей альтернативой благородным металлам для крупномасштабных фототермических приложений.

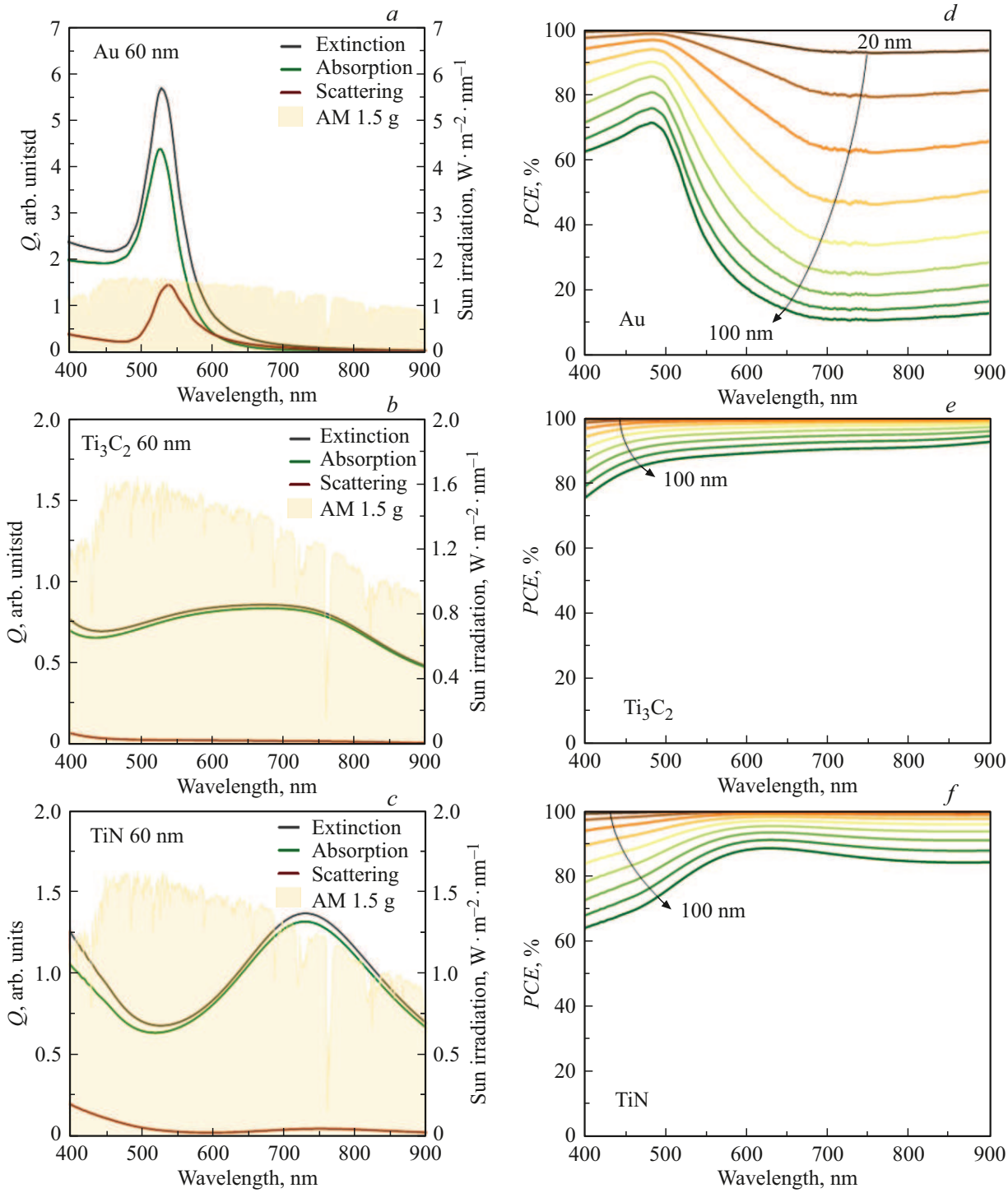


Рис. 2. Эффективность фототермического преобразования (PCE) наночастиц Au, Ti_3C_2 и TiN. (a–c) Спектры экстинкции, поглощения и рассеяния, наложенные на солнечный спектр AM1.5G для частиц размером 60 nm. (d–f) Спектральная PCE (Q_{abs}/Q_{ext}) как функция длины волны для частиц радиусом 20–100 nm.

Обсуждение

Наши результаты демонстрируют, что интегральная фототермическая эффективность материалов TiN и Ti_3C_2 MXene не только превосходит эффективность традиционно используемого Au, но, что более важно, фундаментально не зависит от размера наночастиц. Это различие обусловлено кардинально разными оптико-физическими механизмами (таблица). Эффективность Au полностью определяется резонансом LSPR — коллективным колебанием электронов, которое по своей природе чрезвычайно чувствительно к геометрии на-

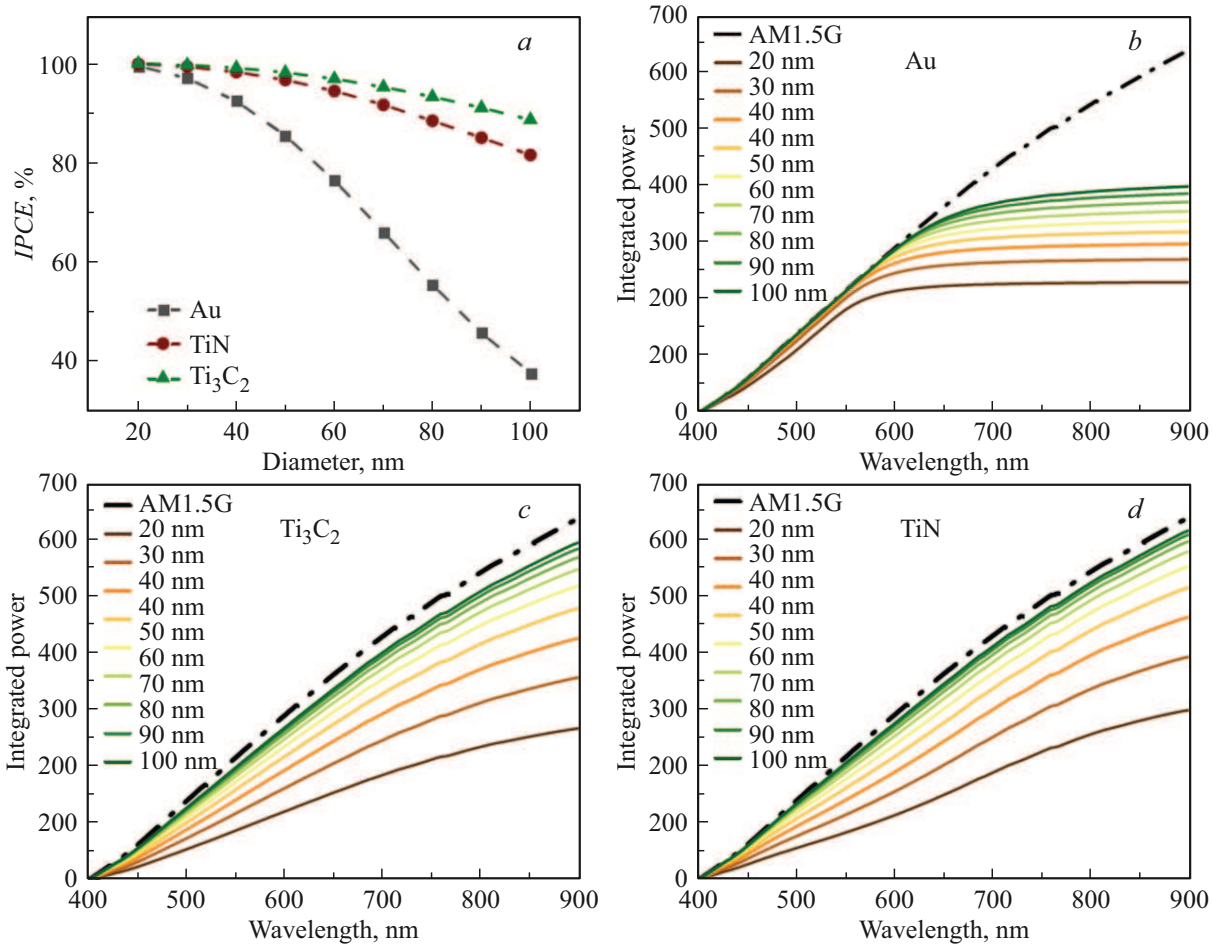


Рис. 3. Интегральная эффективность фототермического преобразования и поглощаемая мощность при солнечном освещении. (*a*) Параметр *IPCE*, зависящий от размера, для наночастиц Au, TiN и Ti_3C_3. (*b–d*) Кумулятивная поглощаемая мощность в солнечном спектре AM1.5G для частиц радиусом 20–100 nm.

ночастицы. Незначительное отклонение от оптимального диаметра ($\sim 60-70$ nm) смещает баланс в сторону рассеяния, что приводит к катастрофическому падению эффективности. Напротив, широкополосный отклик TiN и Ti_3C_2 обусловлен комбинацией собственных электронных свойств: межатомными и межзонными переходами, высокой проводимостью и возбуждением множественных плазмонных мод. Поскольку поглощение генерируется за счет внутренней электронной структуры материала, а не только за счет геометрии, фототермический отклик остается стабильно высоким ($IPCE > 90\,\%$) в широком диапазоне размеров наночастиц.

Фундаментальное различие в оптическом отклике исследуемых материалов обусловлено их диэлектрическими функциями и электронной структурой. Эффективность Au определяется LSPR. Поскольку Au характеризуется относительно низкими омическими потерями (малым значением мнимой части диэлектрической проницаемости, $\mathrm{Im}(\varepsilon)$) в видимом диапазоне, геометрические параметры частицы критически влияют на баланс между поглощением и радиационными потерями (рассеянием). С увеличением размера доля рассеяния в экстинкции возрастает, снижая *IPCE*. Напротив, TiN и Ti_3C_2 обладают значительно более высокими внутренними потерями в исследуемом спектральном диапазоне. В TiN широкополосный отклик определяется суперпозицией внутризонных (друде-подобный отклик в ближнем ИК-диапазоне) и межзонных переходов (в видимой области) [15,16]. Для Ti_3C_2 характерно интенсивное поглощение, обусловленное высокой металлической проводимостью и сложной структурой зоны проводимости [17]. Высокое значение $\mathrm{Im}(\varepsilon)$ в TiN и Ti_3C_2 приводит к сильному демпфированию плазмонных колебаний. Это, в свою очередь, вызывает уширение спектральных характеристик и подавление эффективности рассеяния даже при увеличении геометрического размера. В результате поглощение доминирует над рассеянием во всем диапазоне 20–100 nm, обеспечивая стабильно высокий *IPCE* ($> 90\,\%$). Таким образом, именно высокая диссипация энергии в объеме материала, а не резонансные геометрические эффекты, определяет высокую фототермическую эффективность и ее слабую зависимость от размера для TiN и Ti_3C_2.

Сравнительные оптические механизмы и инженерные параметры

Параметр	Наночастицы Au	Наночастицы TiN	Наночастицы Ti_3C_2
Доминирующий оптический механизм	Резонансный LSPR (мультипольные моды)	Широкополосный, электронные переходы/плазмоника	Межзонные переходы/ стационарные плазмоны
Оптимальный спектр поглощения	Узкополосный (500–550 nm)	Широкий (видимый/ближний ИК)	Широкий (600–800 nm)
Зависимость эффективности от размера	Критическая чувствительность (пик 60–70 nm)	Низкая зависимость (устойчивый рост)	Низкая зависимость (стабильно высокая *IPCE*)
Термическая стабильность	Низкая/ограниченная (деградация при нагреве)	Высокая (рефрактерная, стабильна до $> 900\,^{\circ}C$)	Умеренная (окислительная нестабильность)
Стоимость и масштабируемость	Высокая стоимость, сложный контроль размера	Низкая стоимость, масштабируемый синтез	Низкая стоимость, потенциал масштабирования

Эта фундаментальная физическая разница имеет прямые инженерные следствия (таблица). Мы ввели интегральную фототермическую эффективность как универсальный критерий для оценки материалов в условиях стандартного солнечного излучения (спектр AM1.5G). Этот критерий доказывает, что TiN и Ti_3C_2 обладают уникальной толерантностью к размеру. С технологической точки зрения это устраняет главный барьер масштабирования, присущий плазмонике благородных металлов. Поскольку *IPCE* сохраняет высокие значения ($> 90\,\%$) для всех индивидуальных размеров в диапазоне 20–100 nm, полидисперсная система (смесь частиц различных размеров), типичная для масштабного химического синтеза, будет демонстрировать аналогичную высокую интегральную эффективность. Это выгодно отличает данные материалы от золота, где полидисперсность привела бы к резкому снижению общей производительности из-за вклада неэффективных (рассеивающих) крупных фракций. Отпадает необходимость в дорогостоящем и сложном синтезе монодисперсных наночастиц, что позволяет использовать экономически эффективные методы производства, такие как шаровое измельчение TiN или гидротермальный синтез MXene, сохраняя при этом почти идеальную эффективность преобразования.

Следует отметить, что наше моделирование ограничено диапазоном 400–900 nm, который охватывает основную часть ($\sim 65\,\%$) энергии солнечного спектра AM1.5G. Однако значительный энергетический резерв ($\sim 35\,\%$) сосредоточен в ближней и средней инфракрасных областях (> 900 nm). В этом контексте Ti_3C_2 MXene и TiN обладают дополнительным, еще не полностью раскрытым потенциалом. В отличие от Au, чей плазмонный резонанс затухает при переходе в ИК-область, TiN и особенно Ti_3C_2 сохраняют высокую поглощающую способность в NIR- и MIR-диапазонах благодаря механизмам свободных носителей заряда [18]. Это делает их идеальными кандидатами для „полноспектрального“ сбора солнечной энергии, что особенно критично для промышленных систем парогенерации и опреснения, где важен каждый ватт поглощенной мощности. Учет вклада > 900 nm в будущих моделях, вероятно, продемонстрирует еще более впечатляющее преимущество тугоплавких и 2D-материалов над традиционными металлами.

Справедливость наших теоретических выводов подтверждается растущим числом экспериментальных исследований. Например, экспериментально продемонстрировано, что внутренняя эффективность преобразования света в тепло для Ti_3C_2 близка к 100 %, а недавние работы показали эффективность солнечной парогенерации на основе MXene, превышающую 84–90 % [19,20]. Аналогично наночастицы TiN подтвердили свою высокую фототермическую эффективность и стабильность в экспериментах по фототермальной терапии, превосходя золотые аналоги в биологических окнах прозрачности и тестировании прямых солнечных коллекторов, [21,22]. Эти данные качественно и количественно согласуются с предсказаниями нашей модели о высокой интегральной эффективности и перспективности данных материалов.

Помимо оптических преимуществ, TiN и Ti_3C_2 решают проблемы практической жизнеспособности. Тугоплавкая природа материала TiN (стабильность до $> 900\,^{\circ}C$) делает его единственным жизнеспособным кандидатом для высокотемпературных промышленных приложений (например, солнечных концентраторов), где Au подвергается термической деградации. С экономической точки зрения, оба материала синтезируются из широкодоступного и недорогого титана, что обеспечивает на порядки более низкую стоимость по сравнению с Au.

Несмотря на очевидные преимущества, широкое внедрение Ti_3C_2 MXene сталкивается с известной проблемой окислительной нестабильности, особенно в водной среде. Это остается главным технологическим вызовом для данного класса материалов. Однако эта проблема активно решается [23] — стратегии, включающие поверхностную функционализацию, легирование или инкапсулирование в защитные гидрогелевые и полимерные матрицы, уже демонстрируют значительное повышение стабильности и общей эффективности, например, в сол-

нечных испарителях с эффективностью преобразования пара до 90.7 %.

Заключение

Оптические свойства наночастиц TiN и Ti_3C_2 MXene представляют собой многообещающую область исследований, открывающую новые горизонты для практического применения. В частности, их уникальные фототермические характеристики делают их крайне перспективными для биомедицинской тераностики, а также для решения насущных экологических и энергетических задач, включая фототермический катализ, выделение водорода и опреснение воды. Для полной реализации этого потенциала будущие исследования должны быть сосредоточены на оптимизации методов синтеза и поверхностной модификации TiN и Ti_3C_2. Это позволит не только улучшить их стабильность и характеристики, но и расширить функциональные возможности, утвердив MXene в качестве ключевого материала для развития новых технологий в энергетике, экологии и медицине.

Наше исследование демонстрирует важность использования интегральных критериев, таких как $IPCE$, для оценки фототермических материалов, предназначенных для утилизации широкополосного солнечного излучения. Показано, что применение Au в масштабируемых системах существенно осложнено из-за сильной зависимости эффективности от морфологии частиц и роста потерь на рассеяние с увеличением размера.

Критерий $IPCE$ строго демонстрирует, что широкополосные материалы TiN и Ti_3C_2 MXene представляют собой эффективную альтернативу благородным металлам, демонстрируют высокую эффективность ($IPCE > 90\,\%$), слабо зависящую от размера в исследованном диапазоне радиусов 20–100 nm. Это свойство в сочетании с их термической стабильностью и экономической доступностью снижает ключевые барьеры масштабирования и открывает путь к созданию фототермических систем, способных к эффективной утилизации солнечного спектра.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-79-10108 — моделирование фототермических характеристик сферических наночастиц Au, TiN и Ti_3C_2 MXene; грант № 23-13-00276 — размеронезависимая эффективность ($IPCE$) и инженерная применимость) и Министерства науки и образования РФ (грант № 24-45-00021).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] G. Baffou, R. Quidant. Laser Photon. Rev., **7** (2), 171 (2012). DOI: 10.1002/lpor.201200003
[2] G. Baffou, F. Cichos, R. Quidant. Nat. Mater., **19** (9), 946 (2020). DOI: 10.1038/s41563-020-0740-6
[3] X. Bai, X. Qi, Y. Liu, J. Sun, T. Shen, L. Pan. Chem. Asian J., **20** (1), e202400993 (2025). DOI: 10.1002/asia.202400993
[4] B.L. Cushing, V.L. Kolesnichenko, C.J. O'Connor. Chem. Rev., **104**, 3893 (2004). DOI: 10.1021/cr030027b
[5] R. Li, L. Zhang, L. Shi, P. Wang. ACS Nano, **11** (4), 3752–3759 (2017). DOI: 10.1021/acsnano.6b08415
[6] V. Amendola, M. Meneghetti. Phys. Chem. Chem. Phys., **11**, 3805 (2009). DOI: 10.1039/b900654k.
[7] A.V. Syuy, I.V. Martynov, D.I. Tselikov, G.I. Tselikov, V.G. Efremenko, D.V. Dyubo, M.S. Gurin, D.S. Shtarev, A.V. Arsenin, V.S. Volkov. Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics, **88** (3), S443 (2004). DOI: 10.1134/s1062873824709991
[8] I.A. Zavidovskiy, I.V. Martinov, D.I. Tselikov, A.V. Syuy, A.A. Popov, S.M. Novikov, A.V. Kabashin, A.V. Arsenin, G.I. Tselikov, V.S. Volkov, A.D. Bolshakov. Nanomaterials, **14** (23), 1961 (2024). DOI: 10.3390/nano14231961
[9] A.A. Ushkov, D.V. Dyubo, N.M. Belozerova, I.S. Kazantsev, D.I. Yakubovsky, A.V. Syuy, G.V. Tikhonowski, D.I. Tselikov, I.V. Martinov, G.A. Ermolaev, D.V. Grudinin, A.V. Melentyev, A.A. Popov, A.I. Chernov, A.D. Bolshakov A.A. Vyshnevyy, A.V. Arsenin, A.V. Kabashin, G.I. Tselikov, V.S. Volkov. Nanomaterials, **15** (1), 4 (2024). DOI: 10.3390/nano15010004
[10] Q. Yu, P. Guan, D. Qin, G. Golden, P.M. Wallace. Nano Lett., **8** (7), 1923-8 (2008). DOI: 10.1021/nl0806163
[11] P. Zhang, S. Yang, L. Wang, L. Zhao, Z. Zhu, B. Liu, J. Zhong, X. Sun. Nanotechnology, **25** (24), 245301 (2014). DOI: 10.1088/0957-4484/25/24/245301
[12] S. Link, M.A. El-Sayed. Int. Rev. Phys. Chem., **19** (3), 409 (2000). DOI: 10.1080/01442350050034180
[13] U. Aslam, S. Chavez, S. Linic. Nat. Nanotechnol., **12** (10), 1000 (2017). DOI: 10.1038/nnano.2017.131
[14] D. Baranowska, B. Środa, T. Kędzierski, Z. Bowen, L. Xiaoguang, E. Mijowska, B. Zielińska. Adv. Compos. Hybrid. Mater., **8**, 264 (2025). DOI: 10.1007/s42114-025-01342-w
[15] G.V. Naik, V.M. Shalaev, A. Boltasseva. Adv. Mater., **25** (24), 3264-94 (2013). DOI: 10.1002/adma.201205076
[16] A.V. Syuy, I.V. Martynov, I.A. Zavidovskiy, D.V. Dyubo, Q. Sun, X. Yang, G.V. Tikhonowski, D.I. Tselikov, M.S. Savinov, I.V. Sozaev, A.A. Popov, S.M. Klimentov, G.I. Tselikov, V.S. Volkov, S.M. Novikov, A.V. Arsenin, X. Zhao, A.V. Kabashin. Phys. Scr., **99**, 115914 (2024). DOI: 10.1088/1402-4896/ad7cda
[17] W. Li, U. Guler, N. Kinsey, G.V. Naik, A. Boltasseva, J. Guan, V.M. Shalaev, A.V. Kildishev. Adv. Mater., **26** (47), 7959-65 (2014). DOI: 10.1002/adma.201401874
[18] R. Li, L. Zhang, L. Shi, P. Wang. ACS Nano., **11** (4), 3752 (2017). DOI: 10.1021/acsnano.6b08415
[19] D. Jiang, J. Zhang, S. Qin, Z. Wang, K.A.S. Usman, D.Y. Hegh, J. Liu, W. Lei, J.M. Razal. ACS Nano., **15** (3), 5000 (2021). DOI: 10.1021/acsnano.0c09959
[20] B. Zhang, Q. Gu, C. Wang, Q. Gao, J. Guo, P.W. Wong, C.T. Liu, A.K. An. ACS Appl. Mater. & Interfaces, **13** (3), 3762 (2021). DOI: 10.1021/acsami.0c16054
[21] A.A. Popov, G.I. Tselikov, N. Dumas, C. Bérard, K. Metwally, N. Jones, A. Al Kattan, B. Larrat, D. Braguer, S. Mensah,

A. Da Silva, M.A. Esteve, A.V. Kabashin. Sci. Rep., **9**, 1194 (2019). DOI: 10.1038/s41598-018-37519-1
[22] S. Farooq, C.V.P. Vital, G.V. Tikhonowski, A.A. Popov, S.M. Klimentov, L.A. Gómez Malagón, R.E. de Araújo, A.V. Kabashin, D. Rativa. Solar Energy Materials and Solar Cells, **252**, 112203 (2023). DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112203
[23] C.C. Chang, J. Nogan, Z.P. Yang, Wilton J.M. Kort-Kamp, R. Willard, T.S. Luk, D.A.R. Dalvit, Abul K. Azad, H.T. Chen. Sci. Rep., **9**, 15287 (2019). DOI:10.1038/s41598-019-51236-3
[24] M. Naguib, M.W. Barsoum, Y. Gogotsi. Adv. Mater., **33**, 2103393 (2021). DOI: 10.1002/adma.202103393
[25] D.A. Panova, G.I. Tselikov, G.A. Ermolaev, A.V. Syuy, D.S. Zimbovskii, O.O. Kapitanova, D.I. Yakubovsky, A.B. Mazitov, I.A. Kruglov, A.A. Vyshnevyy, A.V. Arsenin, V.S. Volkov. Opt. Lett., **49**, 25 (2024). DOI: 10.1364/OL.503636
[26] Y. Zuo, Y. Gao, Sh. Qin, Zh. Wang, D. Zhou, Zh. Li, Y. Yu, M. Shao, X. Zhang. Nanophotonics, **9**(1), 123 (2020). DOI: 10.1515/nanoph-2019-0338
[27] G.Tselikov, A. Minnekhanov, G. Ermolaev, G. Tikhonowski, I. Kazantsev, D. Dyubo, D. Panova, D. Tselikov, A. Popov, A. Mazitov, S. Smirnov, F. Lipilin, U. Ahsan, N. Orekhov, I. Kruglov, A. Syuy, A.V. Kabashin, B. Chichkov, Z. Sofer, A. Arsenin, K. Novoselov, V. Volkov. ASC Nano, **19**, 22820 (2025). DOI: 10.1021/acsnano.5c00546
[28] D.I. Yakubovsky, A.V. Arsenin, Yu.V. Stebunov, D.Yu. Fedyanin, V.S. Volkov. Opt. Express, **25**, 25574 (2017). DOI: 10.1364/OE.25.025574
[29] G.V. Naik, J. Kim, A. Boltasseva. Opt. Mater. Express, **1**(6), 1090 (2011). DOI: 10.1364/OME.1.001090