

УДК 539.8

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ  
МЕТАМАТЕРИАЛОВ****Марк Максим Александрович,**

студент

4 курс, факультет «Ракетно-космической техники»

Балтийский государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова  
Россия, г. Санкт-Петербург**Савиных Алексей Александрович,**

студент

6 курс, факультет «Ракетно-космической техники»

Балтийский государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова  
Россия, г. Санкт-Петербург**Костюк Сергей Сергеевич,**

студент

3 курс, факультет «Ракетно-космической техники»

Балтийский государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова  
Россия, г. Санкт-Петербург**Юрьев Виктор Алексеевич,**

студент

5 курс, факультет «Оружие и системы вооружения»

Балтийский государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова  
Россия, г. Санкт-Петербург**Аннотация**

В статье представлен комплексный анализ метаматериалов – перспективного класса искусственно структурированных сред, свойства которых определяются особенностями их микроархитектуры, а не химическим составом. Рассматриваются фундаментальные физические принципы, обеспечивающие уникальные волновые характеристики данных материалов, включая явление отрицательного преломления и возможности управления электромагнитными, акустическими и механическими волнами. Особое внимание уделяется современным методам синтеза и практическому применению метаматериалов в телекоммуникационных системах нового поколения, медицинской диагностике, энергетике и оборонной отрасли. Анализируются перспективные направления внедрения метаматериальных технологий, а также ключевые вопросы, связанные с масштабированием производства и интеграцией в существующие технологические процессы. Статья предназначена для специалистов в области материаловедения, фотоники и смежных научно-технических направлений.

**Ключевые слова:** метаматериалы, материалы, метаповерхности, нанотехнологии, суперлинза, телекоммуникации 6G, стелс-технологии.

---

## **CURRENT STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF METAMATERIALS**

**Mark Maxim Aleksandrovich,**

student

4th year, faculty of "Rocket and Space Engineering"

Baltic State Technical University "VOENMEKH" named after D.F. Ustinov

Russia, Saint Petersburg

**Savinykh Aleksey Aleksandrovich,**

student

6th year, faculty of "Rocket and Space Engineering"

Baltic State Technical University "VOENMEKH" named after D.F. Ustinov

Russia, Saint Petersburg

**Kostyuk Sergey Sergeevich,**

student

3rd year, faculty of "Rocket and Space Engineering"

Baltic State Technical University "VOENMEKH" named after D.F. Ustinov

Russia, Saint Petersburg

**Yuryev Viktor Alekseevich,**

student

5th year, faculty of "Weapons and Weapon Systems"

Baltic State Technical University "VOENMEKH" named after D.F. Ustinov

Russia, Saint Petersburg

---

### **ABSTRACT**

---

The article presents a comprehensive analysis of metamaterials, a promising class of artificially structured media whose properties are determined by their microarchitecture rather than their chemical composition. The fundamental physical principles that ensure the unique wave characteristics of these materials, including the phenomenon of negative refraction and the ability to control electromagnetic, acoustic and mechanical waves, are considered. Special attention is paid to modern methods of synthesis and practical application of metamaterials in new generation telecommunication systems, medical diagnostics, energy and defense industries. The article analyzes promising areas for the introduction of metamaterial technologies, as well as key issues related to scaling production and integration into existing technological processes. The article is intended for specialists in the field of materials science, photonics and related scientific and technical fields.

---

**Keywords:** metamaterials, materials, metasurfaces, nanotechnology, superlensing, 6G telecommunications, stealth technologies.

Современное материаловедение переживает эпоху серьезных перемен, связанных с переходом от использования природных материалов к созданию искусственных композитных структур с исключительными свойствами. Метаматериалы представляют собой искусственно сконструированные композиты, чьи характеристики определяются не столько химическим составом, сколько точно спроектированной периодической микроструктурой [5]. Эти материалы обычно состоят из диэлектрических и металлических компонентов – кремния, диоксида кремния, различных полимеров, алюминия, меди и золота, сформированных в сложные повторяющиеся структуры на микро- и наноуровне. Именно архитектура этих структур, а не их химическая природа, придает метаматериалам их уникальные свойства, позволяющие управлять электромагнитными, акустическими и тепловыми волнами способами, невозможными для природных материалов.

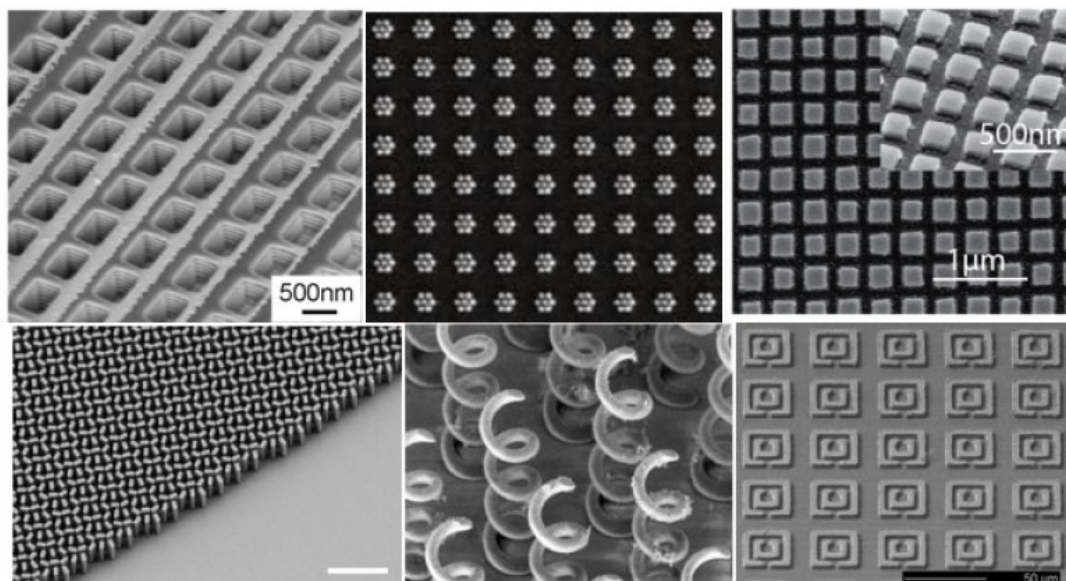


Рисунок 1. Различные типы включений, используемые в качестве мета-атомов для построения метаматериала [7]

Ключевой особенностью метаматериалов является их способность взаимодействовать с волнами различной природы [2]. Наиболее известным свойством, предсказанным теоретически, является создание устройств невидимости. Однако это лишь частное применение. Потенциал метаматериалов простирается от революции в беспроводной связи и создания суперлинз, преодолевающих дифракционный предел, до управления сейсмическими волнами и разработки принципиально новых медицинских диагностических инструментов.

Принципиальное отличие метаматериалов от традиционных материалов заключается в концепции «мета-атома». Свойства метаматериала определяются формой, размером и пространственным расположением искусственно созданных повторяющихся элементов, размер которых меньше длины волны внешнего излучения. Теоретической основой послужила работа советского физика Виктора Веселаго, предсказавшего в 1968 году существование сред с одновременной отрицательной диэлектрической и магнитной проницаемостью [1]. Это приводит к явлению отрицательного коэффициента преломления, открывающему путь к созданию идеальных плоских линз, способных преодолеть дифракционный предел [3].

Метаматериалы классифицируются по природе взаимодействующих волн и геометрической организации структуры. Наиболее развиты электромагнитные метаматериалы, работающие в различных частотных диапазонах [2]. Радио- и микроволновые метаматериалы с размером элементов от миллиметров до сантиметров

находят применение в создании миниатюрных антенн и стелс-покрытий. Терагерцевые метаматериалы перспективны для создания компактных спектрометров, а оптические — для управления светом на наноуровне. Акустические метаматериалы управляют звуковыми волнами для создания акустического камуфляжа и медицинской диагностики, а механические — для защиты от сейсмических волн [6].

Особое практическое значение имеют метаповерхности — двумерные аналоги метаматериалов, представляющие собой ультратонкие пленки толщиной в одну метаячейку. Конкретное применение метаматериалов корпорациями демонстрирует их практическую ценность. Компания Kymeta Corporation разрабатывает и производит плоские электронно-сканирующие антенны на основе метаповерхностей для спутниковой связи. Их антенна «Kymeta Hawk» не имеет движущихся частей, что позволяет поддерживать связь на движущихся объектах через динамическую перестройку свойств метаповерхности. Компания Echodyne создает компактные радары с электронным сканированием для беспилотников и автономных автомобилей, используя метаповерхности для мгновенного переключения между целями. Компания Meta Materials Inc. работает над широким спектром применений, включая прозрачные проводящие пленки «NANOWEB» для сенсорных экранов и умных окон, а также платформы для создания сверхбезопасных голограмм на основе структурного цвета.



Рисунок 2. Плоскопанельные антенны Kymeta Hawk [8]

В телекоммуникационной отрасли метаматериалы революционизируют сети 5G/6G. Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности позволяют создавать «умные среды» с динамическим управлением сигналами. Ведущие телеком-компании, включая Huawei и Ericsson, инвестируют в эти технологии для улучшения покрытия и энергоэффективности сетей. Крупнейшие технологические корпорации, такие как Samsung, Apple и Huawei, ведут внутренние исследования по интеграции метаповерхностей в потребительскую электронику для создания антенн 5G/6G следующего поколения и ультратонких камер на основе металинз.

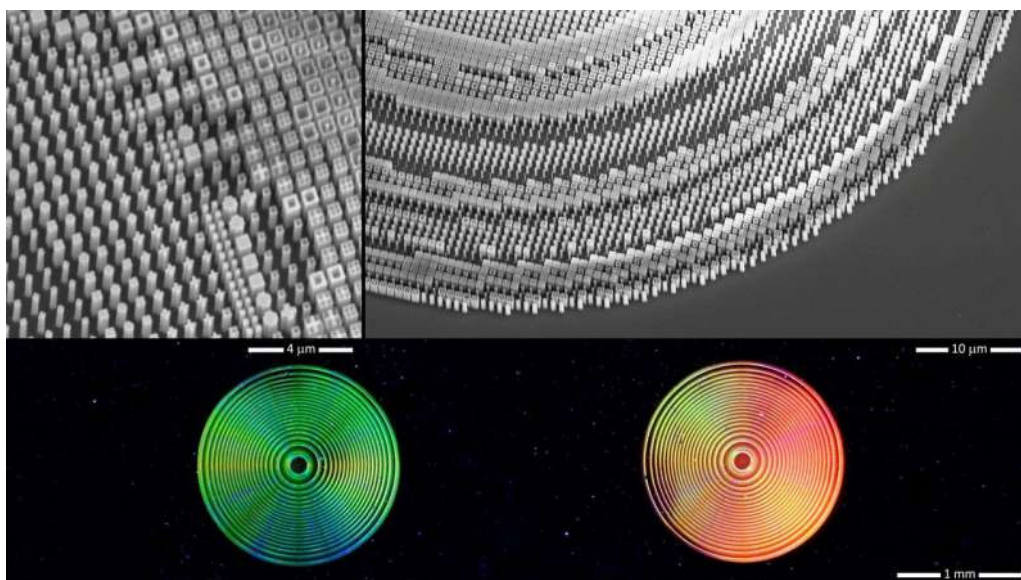


Рисунок 3. Сканирующие электронные микрофотографии сечений широкополосных мета-линз [9].

В медицинской диагностике метаматериалы обеспечивают прорыв в качестве визуализации. Суперлинзы [4] позволяют микроскопам достигать нанометрового разрешения, а гиперспектральные сенсоры обеспечивают раннюю диагностику заболеваний. Такие компании, как Siemens Healthineers и Philips активно внедряют эти технологии в новое поколение диагностического оборудования. В оборонной и аэрокосмической отраслях компании Lockheed Martin, BAE Systems и Northrop Grumman применяют метаматериалы для создания стелс-технологий нового поколения, многофункциональных антенн, интегрированных в корпуса летательных аппаратов, и передовых систем радиоэлектронной борьбы.

В энергетической отрасли метаматериалы радикально повышают КПД солнечных элементов за счет эффективного улавливания света. Компании First Solar и SunPower активно внедряют метаматериальные покрытия в свои фотоэлектрические панели. Перспективным направлением является создание сейсмических щитов для защиты критической инфраструктуры от землетрясений.

Производство метаматериалов представляет собой сложную многоуровневую задачу, требующую применения технологий микро- и нанофабрикации. Выбор конкретного метода определяется целевым рабочим диапазоном частот, который диктует необходимый размер и точность изготовления мета-атомов. Для радио- и микроволнового диапазона размер элементов структуры составляет от миллиметров до сантиметров, что делает их производство относительно доступным. Наиболее распространенными методами здесь являются технологии печатных плат: фотолитография и травление. На диэлектрическую подложку (чаще всего стеклотекстолит или полиимид) наносится слой меди, из которого формируются заданные узоры (резонаторные кольца с разрезом, проводящие дорожки). Для создания объемных (3D) структур используются многослойные печатные платы или аддитивные технологии (3D-печать) композитными материалами, наполненными проводящими частицами. Это позволяет создавать сложные периодические структуры с точностью до десятков микрометров.

Для перехода в терагерцевый (0.1 – 10 ТГц), инфракрасный и, тем более, оптический диапазон (~300 – 750 ТГц) требуются методы микро- и нанотехнологий с высочайшим разрешением, так как размер элементов должен быть соизмерим с длиной волны и составлять от единиц микрометров для терагерцевого диапазона до менее 100 нанометров для видимого света. Электронно-лучевая литография (ЭЛЛ) является «золотым стандартом» для создания прототипов и исследований. Сфокусированный пучок

электронов «рисует» заданный узор на слое электронного резиста с разрешением до 3-5 нм. Метод обеспечивает высочайшую точность, но он последовательный, медленный, дорогой и плохо подходит для массового производства из-за низкой пропускной способности.

Альтернативой для создания наноструктур является ионно-лучевое травление, которое использует пучок ионов (например, галлия) для точного удаления материала (спаттеринга) и формирования 3D-рельефа. Оно часто используется в комбинации с другими методами литографии для травления рисунка, перенесенного в слой резиста.

Наиболее перспективным методом для массового производства метаповерхностей для оптического диапазона считается наноимпринтная литография. Этот метод напоминает штамповку. Твердый шаблон (штамп) из кварца или кремния с нанесенным нанорельефом вдавливается в слой термопластичного или фотоотверждаемого полимерного резиста, нанесенного на подложку. После отверждения и снятия штампа на поверхности остается его точный негативный отпечаток. NIL – это высокопроизводительный, параллельный процесс, позволяющий достигать высокого разрешения (менее 10 нм) при относительно низкой стоимости, что делает его идеальным для коммерциализации устройств на основе метаповерхностей, таких как металинзы.

Для создания мета-атомов в виде коллоидных частиц (наносфер, наностержней, нанокубов) применяются методы химического синтеза. Эти частицы затем могут быть организованы в упорядоченные массивы методами самосборки (самосборные пленки) – под действием капиллярных сил, при испарении растворителя или в внешних электрических и магнитных полях. Этот подход дешев и масштабируем, но часто страдает от дефектов упаковки и ограничен в сложности создаваемых паттернов.

Для создания сложных трехмерных наноструктур с произвольной геометрией используется двухфотонная лазерная литография. Это метод прямого лазерного письма в объеме фоточувствительного полимера, позволяющий создавать сложные 3D-объекты с разрешением около 100 нм. Он является мощным инструментом для прототипирования и фундаментальных исследований, но также слишком медленный для массового производства.

Основными проблемами в производстве метаматериалов, особенно для оптического диапазона, остаются высокая цена оборудования и низкая скорость процессов, сложность осуществления сверхточного совмещения слоев материала, а также обеспечение отсутствия дефектов при производстве материалов.

Таким образом, технологический ландшафт производства метаматериалов разнообразен: от хорошо освоенных методов печатных плат для радиочастот до передовых и дорогостоящих методов нанолитографии для оптики. Развитие именно наноимпринтной литографии и методов самосборки видится ключевым для преодоления разрыва между лабораторными демонстрациями и массовыми коммерческими применениями. В перспективе следующего десятилетия метаматериалы станут ключевым технологическим драйвером, интегрировавшись в городскую инфраструктуру, системы связи, медицинское оборудование и потребительские устройства. По мере решения текущих проблем мы можем ожидать взрывного роста применения метаматериалов в самых неожиданных сферах.

Несмотря на значительный прогресс, существуют перспективные области, где применение метаматериалов остается нереализованным. Например, метаматериалы могли бы применяться для создания современных систем звукоизоляции помещений за счет создания акустических метапокрытий, избирательно поглощающих шумы определенных частот. Такие системы звукоизоляции могли бы применяться на предприятиях для соблюдения условий безопасности труда или при постройке различных сооружений.

В сельскохозяйственной отрасли метаматериалы могли бы использоваться в «умных» теплицах с управляемым светопропусканием для оптимизации спектрального состава излучения для разных культур. В текстильной промышленности «умные» ткани на основе метаповерхностей могли бы обеспечивать динамическую терморегуляцию и беспроводную коммуникацию.

Другими перспективными областями являются музейное дело и сохранение культурного наследия (оптические фильтры для защиты экспонатов), спортивная индустрия (оборудование с улучшенными аэродинамическими характеристиками), а также нейроинтерфейсы (улучшение точности считывания нейронных сигналов). Главными причинами медленного проникновения метаматериалов в эти области являются высокая стоимость производства больших площадей, проблемы масштабирования технологий, недостаточная механическая прочность и долговечность, консерватизм традиционных отраслей, отсутствие стандартов и нормативной базы.

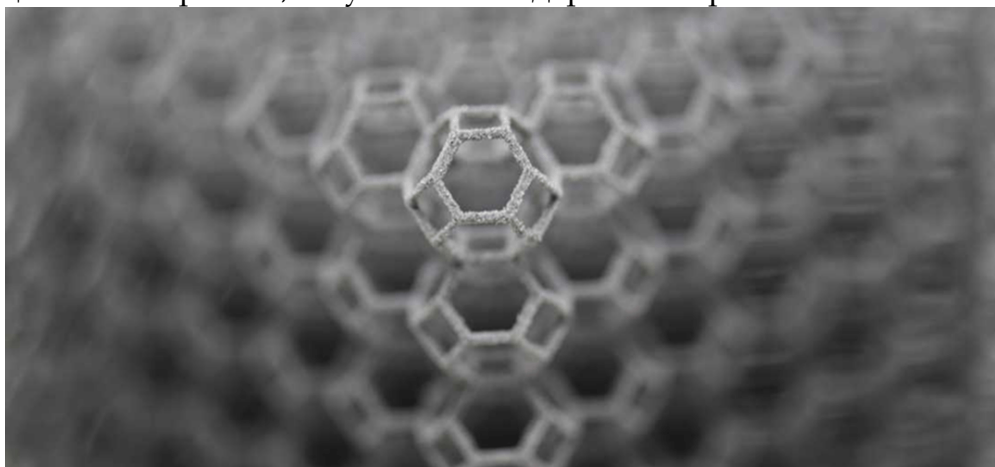


Рисунок 4. Метаматериал, напечатанный порошком на SLS-принтере. Фото: J.-С. Tse, ETH Zürich [10].

Метаматериалы постепенно становятся «невидимым» фундаментом четвертой промышленной революции, обеспечивая переход к принципиально новому уровню взаимодействия с волновой природой. Их уникальная способность обеспечивать беспрецедентный контроль над электромагнитными, акустическими и тепловыми полями открывает путь к созданию технологий, которые еще недавно считались научной фантастикой. Как показывает опыт ведущих технологических корпораций, будущее будет принадлежать тем, кто сможет наиболее эффективно интегрировать эти перспективные материалы в свои продукты и решения, создавая тем самым новую технологическую реальность, где метаматериалы принципиально изменят взаимодействие человека с волновой природой окружающего мира, открывая новые возможности для технологического прогресса.

#### Список литературы:

1. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  // Успехи физических наук. – 1967. – Т. 92, № 3. – С. 517–526.;
2. Пендри Дж.Б., Холден А.Дж., Роббинс Д.Дж., Стюарт У.Дж. Магнетизм от проводников и усиленные нелинейные явления // IEEE Труды по теории и технике СВЧ. – 1999. – Т. 47, № 11. – С. 2075–2084.;
3. Смит Д.Р., Пендри Дж.Б., Уилтшир М.К. Метаматериалы и отрицательный показатель преломления // Наука. – 2004. – Т. 305. – С. 788–792.;

4. Ю Н., Капассо Ф. Плоская оптика с дизайнерскими метаповерхностями // Природа. Материалы. – 2014. – Т. 13. – С. 139–150.;
5. Энгета Н., Зиолковски Р.В. (ред.) Метаматериалы: физические и инженерные исследования. – John Wiley & Sons, 2006. – 414 с.;
6. Глыбовский С.Б., Третьяков С.А., Белов П.А., Кившар Ю.С., Симовский К.Р. Метаповерхности: от микроволн до видимого света // Физические обзоры. – 2016. – Т. 634. – С. 1–72.;
7. Интернет-ресурс: <https://news.itmo.ru/ru/blog/17/>. Статья: «X-materials-2: как ученые работают за природу». Блог университета ИТМО. Дата обращения: 28.08.2025.;
8. Интернет-ресурс: <https://seacomm.ru/dokumentaciya/novosti/kymeta-i-intelsat-debyutiruyut-so-sputnikovym-servisom-kalo/>. Статья: «Кумета и Intelsat дебютируют со спутниковым сервисом Kalo» (По материалам издания GeekWire и конференции «Satellite 2017»). Дата обращения: 28.08.2025.;
9. Интернет-ресурс: <https://phys.org/news/2018-10-revolutionary-ultra-thin-meta-lens-enables-full-color.html?deviceType=mobile>. Статья: «Революционная ультратонкая "мета-линза" обеспечивает полноцветное изображение». Дата обращения: 28.08.2025.;
10. Интернет-ресурс: <https://globatek.ru/blog/cases/3dprint-metamaterial-zvuk>. Статья: «Как 3D-печать позволяет создавать новые суперматериалы для управления звуком». Дата обращения: 28.08.2025.

#### References:

1. Veselago V.G. Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of  $\epsilon$  and  $\mu$  // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. - 1967. - Vol. 92, No. 3. - Pp. 517-526.;
2. Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., Stewart W.J. Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena // IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology. - 1999. - Vol. 47, No. 11. - Pp. 2075-2084.;
3. Smith D.R., Pendry J.B., Wiltshire M.K. Metamaterials and the Negative Refractive Index // Nauka. - 2004. - Vol. 305. - Pp. 788-792.;
4. Yu N., Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces // Priroda. Materials. - 2014. - Vol. 13. - Pp. 139-150.;
5. Engheta N., Ziolkowski R.W. (eds.) Metamaterials: Physical and Engineering Research. - John Wiley & Sons, 2006. - 414 p.;
6. Glybovsky S.B., Tretyakov S.A., Belov P.A., Kivshar Yu.S., Simovsky K.R. Metasurfaces: From Microwaves to Visible Light // Physical Reviews. - 2016. - Vol. 634. - Pp. 1-72.;
7. Internet resource: <https://news.itmo.ru/ru/blog/17/>. Article: "X-materials-2: How scientists work for nature". ITMO University Blog. Accessed: August 28, 2025.;
8. Online resource: <https://seacomm.ru/dokumentaciya/novosti/kymeta-i-intelsat-debyutiruyut-so-sputnikovym-servisom-kalo/>. Article: "Kymeta and Intelsat Debut with Kalo Satellite Service" (Based on materials from GeekWire and the Satellite 2017 conference). Accessed: August 28, 2025.;
9. Online resource: <https://phys.org/news/2018-10-revolutionary-ultra-thin-meta-lens-enables-full-color.html?deviceType=mobile>. Article: "Revolutionary Ultra-Thin "Meta-Lens" Provides Full-Color Imaging." Accessed: August 28, 2025.;

10. Online resource: <https://globatek.ru/blog/cases/3dprint-metamaterial-zvuk>. Article: "How 3D printing enables the creation of new supermaterials for sound control." Accessed: August 28, 2025.