

Магнитоактивный асимметричный механический метаматериал для настраиваемой эластичной маскировки

Ссылки автора открывают панель наложения Цюань Чжан ^a, Генкай Ху ^b, Стефан Рудых ^{a,c}

Показать больше

Добавить в Mendeley

Делиться

Цитировать

<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2024.112648> Получить права и контент

Под лицензией Creative Commons

Открытый доступ

Основные моменты

- Предложен новый магнитоактивный метаматериал с интригующими свойствами нарушения симметрии.
- Стратегия проектирования использует преобразующую способность магнитно-твердых активных эластомеров в сочетании с характеристиками метаматериала нулевой моды.
- Предлагаемые магнитоактивные метаматериалы позволяют осуществлять дистанционно настраиваемую эластичную маскировку.

Абстрактный

Мы предлагаем асимметричный механический метаматериал, индуцированный магнитным полем, для настраиваемой эластичной маскировки на основе трансформации. Метаматериал разработан путем интеграции жестких магнитных активных эластомеров (hMAE) и объединения режимов коллапса с нулевым напряжением для создания уникального асимметричного поведения, контролируемого внешним магнитным полем. Представлена взаимосвязь, связывающая микроструктуру и желаемые характеристики маскировки. Эта конструкция магнитометаматериала применяется для достижения настраиваемой статической эластичной маскировки. Теоретические прогнозы вместе с численными испытаниями при различных статических нагрузках демонстрируют обнадеживающие характеристики маскировки. Исследование также подчеркивает влияние магнитомеханической связи и предлагает первое дистанционно управляемое решение маскировки на основе hMAE с многообещающим потенциалом в различных приложениях, включая экранирование напряжений и технологии скрытности.

- [Предыдущая статья в выпуске](#)
- [Следующая статья в выпуске](#)

Ключевые слова

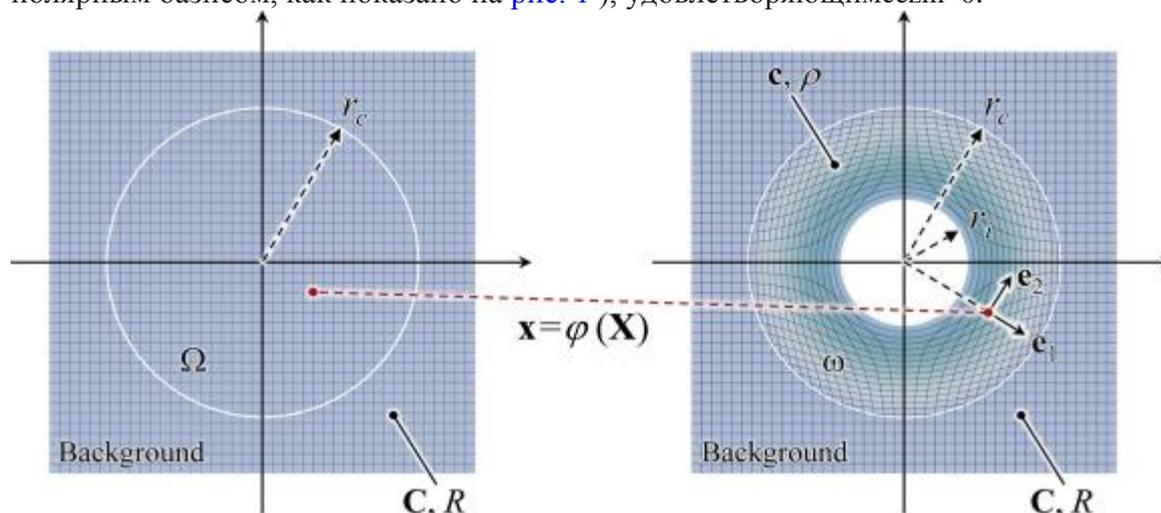
Магнитно-твердый
Механические метаматериалы
Магнитоактивные эластомеры
Метод трансформации
Эластичные плащи

1. Введение

Механические метаматериалы могут производить множество желаемых свойств и функций посредством их спроектированной базовой микроструктуры (Bertoldi et al., 2017 , Krushynska et al., 2023): от волновода субволновой длины (Bilal et al., 2017b , Wang et al., 2016 , Zhu et al., 2014) и фокусировки (Memoli et al., 2017), топологически защищенной транспортировки (Chen et al., 2019 , Chen et al., 2021b , Wang et al., 2015 , Zhang et al., 2020b , Zhang et al., 2018), поглощения энергии (Pan et al., 2019 , Wang et al., 2019) до переключения вибрации (Bilal et al., 2017a , Gross et al., 2023 , Wei et al., 2021) и изоляция (Liu et al., 2019 , Zhang et al., 2021). Более того, метаматериалы воплотили в жизнь перспективу реализации плаща-невидимки за пределами научной фантастики. Плащ — это специальная среда покрытия, разработанная для того, чтобы сделать объект полностью невидимым для его окружения. Это достигается путем применения геометрического преобразования, которое увеличивает точку на заднем плане и отображает ее на внутреннюю границу плаща. Благодаря этому процессу свойства материала плаща в физической области могут быть выявлены с помощью преобразованных управляющих уравнений. Так называемый метод преобразования, первоначально введенный для проводимости (Greenleaf et al., 2003) и геометрической оптики (Leonhardt, 2006), был успешно применен к другим классическим физическим областям, таким как электромагнетизм (Ergin et al., 2010 , Pendry et al., 2006), акустика (Chen et al., 2017 , Cummer and Schurig, 2007 , Norris, 2008) и упругость (Brun et al., 2009 , Buckmann et al., 2015 , Buckmann et al., 2014 , Milton et al., 2006). Для упругой маскировки в твердых телах материал покрытия должен подчиняться необычному конститутивному поведению, которое зависит от калибра, выбранного для контроля миграции вектора смещения из виртуального пространства в преобразованное пространство. Необходимый материал преобразования для идеальной упругой маскировки не может быть разработан с помощью средств классической упругости, таким образом, выдвигая исследование за пределы материалов Коши. Альтернативы включают либо (*i*) материалы Уиллиса (Milton et al., 2006) (связь напряжения со скоростью и импульса с деформацией), либо (*ii*) асимметричную среду (Brun et al., 2009) (отсутствие незначительной симметрии тензора упругости). Использование материалов Уиллиса создает трудности при отображении периодических структур на эффективное описание среды Уиллиса, поскольку требуемая высокочастотная гомогенизация является сложной в пределе с сильными эффектами связи Уиллиса. Асимметричная среда (характеризуемая асимметричным тензором упругости) напрямую доступна в рамках микрополярной теории; Однако недавние исследования показывают, что полная теория Коссера не сохраняет инвариантность формы при воздействии на нее общего пространственного отображения, что создает проблемы при проектировании эластичного плаща с использованием этой теории (Zhang et al., 2020a). Кроме того, стоит отметить, что теория «малое на большом» предлагает жизнеспособный подход к проектированию эластичных плащей; например, касательные модули предварительно напряженных полуплоских гиперупругих материалов имеют потенциал для удовлетворения требований, определенных теорией трансформации, — отсутствие малой симметрии (Guo et al., 2022 , Norris and Parnell, 2012 , Parnell, 2012). Такие материалы, сохраняющие линейное напряжение-деформацию, трудно достичь в нелинейном режиме конечных деформаций.

Чтобы понять, как нарушение симметрии напряжений может привести к маскировке в твердых телах, необходимо изучить фундаментальный принцип, управляющий симметрией напряжений, то есть локальный баланс углового момента. Чтобы добиться упругой маскировки, необходимо найти микроструктуры, которые позволяют поддерживать баланс углового момента уникальным образом. Основная идея вращается вокруг применения тщательно спроектированного распределения моментов тела с достаточной прочностью для изменения баланса углового момента (Nassar et al., 2020). Потенциально необходимые моменты могут быть созданы путем использования заземленных торсионных пружин (Nassar et al., 2018 , Nassar et al., 2019 , Xu et al., 2020). Эти работы делают важный шаг на пути к проектированию упругой маскировки. Однако необходимая инфраструктура заземления может привести к значительному повышению уровня сложности. Альтернативный подход может использовать эффект вращательного

получить, что уникальная нулевая мода — это $\mathbf{e}_1 \otimes \mathbf{e}_2$ (\mathbf{e}_1 и \mathbf{e}_2 являются полярным базисом, как показано на рис. 1), удовлетворяющим $\text{сез}m=0$.



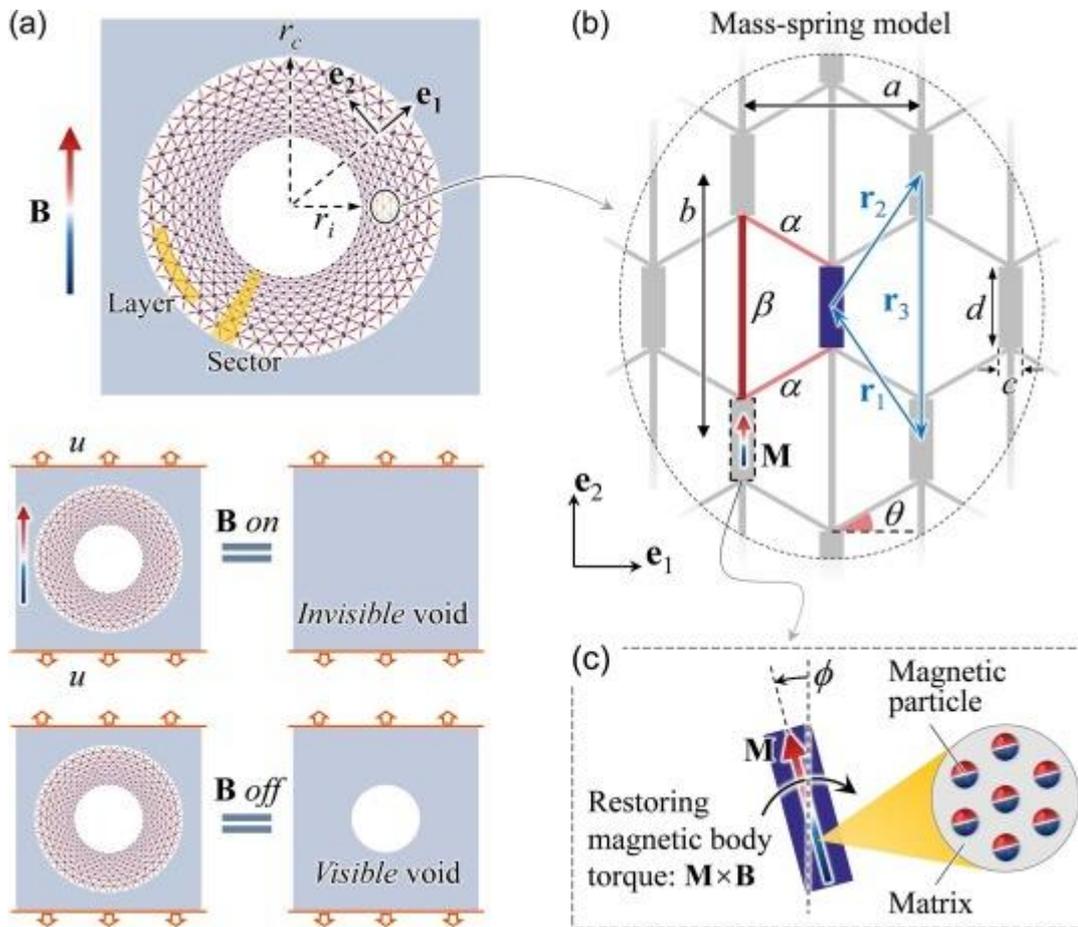
1. [Загрузить: Загрузить изображение в высоком разрешении \(300 КБ\)](#)
2. [Скачать: Загрузить полноразмерное изображение](#)

Рис. 1. Схема метода преобразования. Геометрическое преобразование φ отображает точку \mathbf{X} эталонной среды Ω в точку \mathbf{x} физической среды ω . Физическая среда (т.е. плащ) характеризуется внутренним радиусом r_i и внешним радиусом r_c . Упругий тензор и плотность в фоновой и недеформированной области обозначаются \mathbf{C} и R , соответственно. В преобразованной области они представлены \mathbf{c} и ρ , соответственно.

3. Магнитоактивные асимметричные механические метаматериалы

3.1. Модель решетки и аналитическая гомогенизация

Для реализации требуемой среды преобразования мы предлагаем новую конструкцию магнитоактивного асимметричного механического метаматериала (МАММ). Как показано на рис. 2 а, характеристики эластичного плаща на основе МАММ можно настраивать внешними магнитными полями. Магнитомеханический отклик МАММ описывается моделью массы-пружины, изображенной на рис. 2 б. Обратите внимание, что мы рассматриваем решетку, похожую на ту, которую изучали [Нассар и др. \(2018\)](#), где они достигли асимметричного эффекта в своем чисто механическом исследовании путем введения внешних заземленных пружин. Здесь мы выдвигаем новую концепцию использования крутящего момента магнитного тела для устранения необходимости в заземляющей инфраструктуре. Каждая элементарная ячейка состоит из двух диагональных пружин с постоянной α , одной вертикальных пружин с постоянной β и блока массы, изготовленного из hMAE. Блоки hMAE характеризуются остаточной намагниченностью \mathbf{M} , и ее направление в недеформированном состоянии совпадает с направлением внешнего магнитного поля \mathbf{V} . После того, как решетка деформируется под действием механических нагрузок, вращающийся блок hMAE будет подвергаться воздействию восстанавливающего магнитного момента тела $M\mathbf{V}\phi$, где ϕ — бесконечно малый угол поворота, как показано на рис. 2 с. Следовательно, эффект магнитомеханической связи можно эквивалентно рассматривать как то, что блок массы связан с виртуальной заземленной торсионной пружиной с жесткостью $M\mathbf{V}$. Кроме того, все соединения (пружины α , β) предполагаются шарнирными, что обеспечивает требуемый нулевой режим ([Nassar et al., 2018](#)).



1. [Загрузить: Загрузить изображение в высоком разрешении \(582 КБ\)](#)
2. [Скачать: Загрузить полноразмерное изображение](#)

Рис. 2. Предлагаемый магнитоактивный асимметричный механический метаматериал и его применение для упругой маскировки. (a) Система маскировки проиллюстрирована пустотой, окутанной предлагаемым магнитоактивным асимметричным метаматериалом, все в пределах изотропного фона. Характеристики упругой маскировки можно настраивать с помощью внешних магнитных полей. (b) Представительная модель масса-пружина состоит из пружин, представленных прямыми краями, и массовых блоков, сделанных из hMAE, представленных прямоугольниками; обратите внимание, что все соединения между компонентами являются шарнирными. (c) Блоки hMAE характеризуются остаточной намагниченностью \mathbf{M} , и ее направление в исходной (недеформированной) конфигурации совпадает с направлением внешнего магнитного поля \mathbf{B} . После того, как решетка деформируется под действием механической нагрузки, вращающийся блок hMAE будет подвергаться воздействию восстанавливающего магнитного момента тела $Mb\phi$, где ϕ является бесконечно малым углом поворота. Следуя чисто механической работе [Нассара и др. \(2018\)](#), мы исследуем эффективный тензор упругости предлагаемой магнитоактивной решеточной системы. Предположим, что МАММ подвергается равномерному градиенту смещения $\mathbf{u} = \nabla \mathbf{u}$ и все блоки массы испытывают поворот на угол ϕ во время деформации, полная потенциальная энергия на единицу площади может быть записана как $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3$. Первый член представляет собой механическую энергию, запасенную в пружинах с постоянной α , второй член представляет собой механическую энергию, запасенную в пружинах с постоянной β , а последний член представляет собой магнитную потенциальную энергию. Можно получить, что $(2) \mathcal{E}_1 = \frac{1}{2} \alpha \sum_{\langle ij \rangle} (\mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{u}_i - \mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{u}_j)^2 + \frac{1}{2} \beta \sum_{\langle ij \rangle} (\mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{u}_i - \mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{u}_j)^2 + \frac{1}{2} \mathbf{M} \cdot \mathbf{B} \cdot \sum_{\langle ij \rangle} (\mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{u}_i - \mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{u}_j)^2$, где $V = ab/2$ — эффективная площадь элементарной ячейки; c и d — длины сторон массового блока hMAE, и $\mathbf{r}_1 = -a \mathbf{e}_1/2 + b \mathbf{e}_2/2$; $\mathbf{r}_2 = a \mathbf{e}_1/2 + b \mathbf{e}_2/2$, и $\mathbf{r}_3 = -b \mathbf{e}_2$ — векторы решетки; $\mathbf{e}_1 = \cos \phi \mathbf{e}_1 + \sin \phi \mathbf{e}_2$ и $\mathbf{e}_2 = -\cos \phi \mathbf{e}_1 + \sin \phi \mathbf{e}_2$. Обратите внимание, что в состоянии равновесия мы имеем $\phi = 0$. Это подразумевает $(3) \mathcal{E} = -\cos \phi \sin \phi \sum_{\langle ij \rangle} \mathbf{r}_{ij} \cdot (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j) + \frac{1}{2} \alpha \sum_{\langle ij \rangle} (\mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{u}_i - \mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{u}_j)^2 + \frac{1}{2} \beta \sum_{\langle ij \rangle} (\mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{u}_i - \mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{u}_j)^2 + \frac{1}{2} \mathbf{M} \cdot \mathbf{B} \cdot \sum_{\langle ij \rangle} (\mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{u}_i - \mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{u}_j)^2$. Закон Гука $\mathcal{E} = \frac{1}{2} \mathbf{u} \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{u}$ для решетки МАММ тогда записывается

как (4) $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma_{\theta} \cos^2 \theta + \sigma_{\phi} \sin^2 \theta + \sigma_{00} \cos \theta \sin \theta + 2\sigma_{00} \cos \theta \sin \theta + 2\sigma_{00} \cos^2 \theta + 2\sigma_{00} \sin^2 \theta + 2\sigma_{00} \cos \theta \sin \theta + 2\sigma_{00} \cos^2 \theta + 2\sigma_{00} \sin^2 \theta + 2\sigma_{00} \cos \theta \sin \theta + 2\sigma_{00} \cos^2 \theta + 2\sigma_{00} \sin^2 \theta$. Обратите внимание, что предлагаемая решетка МАММ демонстрирует асимметричное напряжение и допускает наличие нулевой моды, обозначаемой как $z_m = 1 \otimes 2 - \sin \theta / \cos \theta \otimes 2 \otimes 1$, что соответствует требованиям описанного метода преобразования.

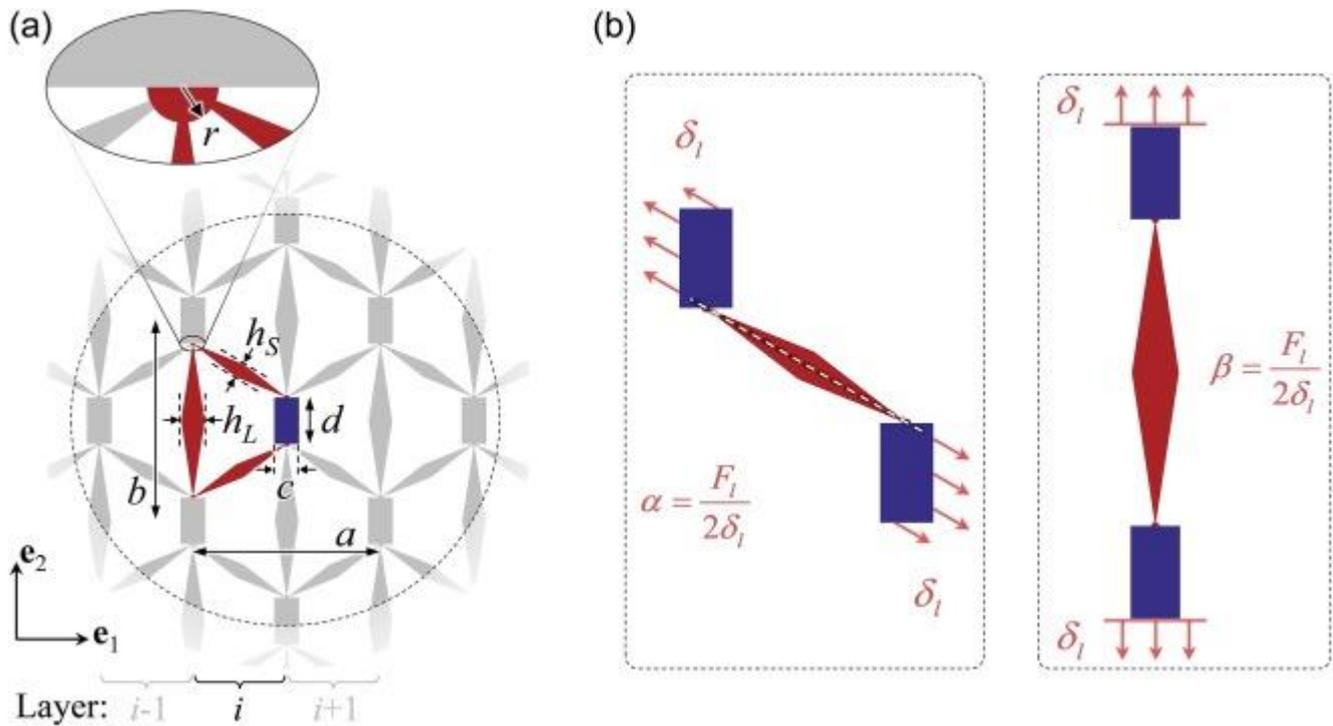
3.2 Определение параметров конструкции

Сравнивая закон Гука для МАММ (уравнение (4)) и для маскировки (уравнение (1)), мы можем получить проектные параметры решетки МАММ для целевой эластичной маскировки, (5) $MV = \sigma_{\theta} - \sigma_{\phi} - 1 -$

$\sigma_{\theta} = 2\sigma_{\theta} + \sigma_{\theta} \cos^2 \theta + \sigma_{\theta} \sin^2 \theta + \sigma_{\phi} = \arctan \theta + \sigma_{\theta} + \sigma_{\phi}$. Для иллюстрации эффективности маскировки на основе МАММ рассмотрим случай $\theta = \pi/4$, который обеспечивает соблюдение (6) $MV \rightarrow \infty, \sigma_{\theta} = 6, \sigma_{\phi} = 43, \sigma_{00} = 43, \sigma_{00} = 3$. В этом случае магнитомеханическая связь достаточно сильна и вращение блока hMAE полностью запрещено. Учитывая, что решетчатая мантия состоит из N угловых секторов и P слоев (как показано на рис. 2 а), характерные размеры ребер для блоков, расположенных в k -м слое, равны $r(k) = 2r_0 \cos(k\theta) / \sin \theta$ и $r(k) = 2r_0 \sin(k\theta) / \sin \theta$. Здесь $r(k)$ обозначает радиус положения k -го слоя. Обратите внимание, что радиус внутреннего слоя решетки, т.е. $r(1) = r_0$, приближается к теоретическому внутреннему радиусу плаща r_i в пределе $P \rightarrow +\infty$. Последним шагом в проектировании плаща является определение микроструктуры пружин (с жесткостью α и β).

Микроструктура предлагаемого МАММ, соответствующая дискретной модели масса-пружина, показанной на рис. 2 б, представлена на рис. 3 а. Здесь ромбовидные балки действуют как пружины, а шарнирные контакты соединены с помощью полукруга с радиусом r . Жесткости диагональных и вертикальных ромбовидных балок можно определить с помощью конечно-элементного моделирования реакций двух массовых блоков, соединенных одной балкой.

Численные модели вместе с нагрузкой и граничными условиями проиллюстрированы на рис. 3 б. Для определения значений жесткости α и β применяется смещение δ_i вдоль направления большой оси ромба. Жесткость можно рассчитать, измерив силы реакции F_i (полученные путем суммирования всех сил реакции в узлах, расположенных на одной из двух границ). Комбинируя с методом оптимизации, можно определить характерные ширины (h_s и h_L ; см. рис. 3 а) балок, соответствующие целевой жесткости (приведенной в уравнении (6)). В целом геометрические параметры для элементарных ячеек, расположенных в каждом слое решетчатого покрова, получены для заданных параметров фонового материала (λ и μ), числа секторов и слоев (N и P), радиуса пустоты r_0' , и теоретический внутренний радиус плаща r_i .



1. [Загрузить: Загрузить изображение в высоком разрешении \(243 КБ\)](#)
2. [Скачать: Загрузить полноразмерное изображение](#)

Рис. 3. (а) Микроструктура МАММ – ромбовидные балки действуют как пружины; шарнирные контакты соединены с помощью полукруга. (б) Моделирование методом конечных элементов для расчета жесткости ромбовидных балок.

3.3 Геометрия и численная гомогенизация решетчатого плаща

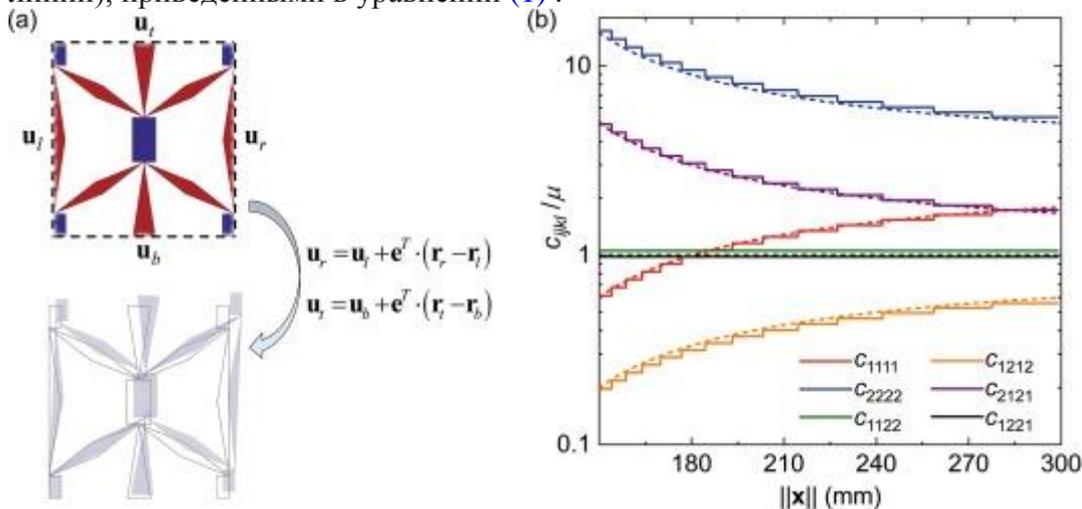
Для проверки применимости предлагаемого МАММ и соответствующей процедуры проектирования было разработано решетчатое покрытие на основе МАММ с внешним радиусом $r_c = 300$ мм, содержащее $N = 40$ секторов и $P = 14$ слоев, для покрытия пустоты радиусом $r_c - r_i = 150$ мм. Теоретический внутренний радиус, соответствующий разработанному решетчатому плащу, равен $r_i = 120$ мм. Согласно процедуре идентификации параметров в [Разделе 3.2](#), геометрические параметры элементарных ячеек в различных положениях решетчатого плаща приведены в [Таблице 1](#). В численном моделировании в этой статье принята гипотеза плоской деформации. Изотропный фон имеет константы Ламе $\lambda = \mu = 8.2 \times 10^4$ Па, а ромбовидные балки в решетке МАММ характеризуются $E = 5$ МПа и $\nu = 0,33$. Массовые блоки hMAE в решетке МАММ моделируются с достаточно большим модулем (в 100 раз больше, чем у балок) и имеют остаточную намагниченность $M_0 = 6.4 \times 10^4$ А/м. Направление намагничивания всех массовых блоков hMAE в недеформированном состоянии совпадает с направлением приложенного магнитного поля B .

Таблица 1. Геометрические параметры элементарной ячейки, расположенной в каждом слое решетчатой оболочки.

Слой (κ)	$\ x_{(\kappa)}\ $ (мм)	$a_{(\kappa)}$ (мм)	$b_{(\kappa)}$ (мм)	$c_{(\kappa)}$ (мм)	$d_{(\kappa)}$ (мм)	$z_{(\kappa)}$ (мм)	$h_{L(\kappa)}$ (мм)	$h_{S(\kappa)}$ (мм)
1	150.00	8.16	23.56	3.00	4.71	0,21	1.87	0,42
2	154.08	9.27	24.20	5.00	4.71	0,23	1.93	0,49
3	158.72	10.53	24.93	5.00	4.71	0,25	2.01	0,57
4	163,98	11.97	25.76	6.00	4.71	0,27	2.10	0,66
5	169.97	13.59	26.70	6.00	4.71	0,29	2.21	0,76
6	176.76	15.44	27.77	8.00	4.71	0,31	2.34	0,89
7	184,49	17.54	28.98	8.00	4.71	0,33	2.50	1.03

Слой (κ)	$\ \mathbf{x}_{(\kappa)} \ $ (мм)	$a_{(\kappa)}$ (мм)	$b_{(\kappa)}$ (мм)	$c_{(\kappa)}$ (мм)	$d_{(\kappa)}$ (мм)	$z_{(\kappa)}$ (мм)	$h_{L(\kappa)}$ (мм)	$h_{S(\kappa)}$ (мм)
8	193.26	19.93	30.36	10.00	4.71	0,35	2.68	1.21
9	203.23	22.64	31.92	10.00	4.71	0,37	2.89	1.41
10	214.55	25.72	33.70	13.00	4.71	0,39	3.14	1.64
11	227.41	29.22	35.72	13.00	4.71	0,41	3.43	1.91
12	242.02	33.20	38.02	15.00	4.71	0,43	3.77	2.23
13	258.62	37.71	40.62	15.00	4.71	0,45	4.16	2.60
14	277.48	42.84	43.59	17.00	4.71	0,47	4.62	3.03

Для изучения эффективного тензора упругости элементарных ячеек, расположенных на каждом слое $\| \mathbf{x}_{(\kappa)} \|$ спроектированной решетчатой оболочки, выполняется численная процедура гомогенизации. В численном моделировании представительная ячейка нагружается относительно заданного равномерного градиента смещения. Применяемое периодическое граничное условие, соответствующее заданному равномерному градиенту смещения, показано на [рис. 4 а](#). Обратите внимание, что узлы блока массы ограничены тем, что испытывают равные смещения, что эффективно предотвращает любые вращения. Плотность энергии деформации гомогенизированной эффективной среды затем может быть численно получена как $\frac{W}{ab}$, где W — полная энергия деформации представительной ячейки, а ab — ее площадь. Рассмотрим шесть равномерных градиентов смещения со следующими компонентами соответственно, (7) $\mathbf{u}_r = \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{r}_r$, $\mathbf{u}_b = \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{r}_b$, $\mathbf{u}_r = \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{r}_r$, $\mathbf{u}_b = \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{r}_b$, $\mathbf{u}_r = \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{r}_r$, $\mathbf{u}_b = \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{r}_b$, где $\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{r}_i < 1$ обозначает величину градиента смещения. Ненулевые компоненты гомогенизированного тензора упругости получаются как, (8) $C_{1111} = \frac{2}{\mu} \frac{W}{ab}$, $C_{2222} = \frac{2}{\mu} \frac{W}{ab}$, $C_{1122} = \frac{3}{\mu} \frac{W}{ab}$, $C_{1212} = \frac{2}{\mu} \frac{W}{ab}$, $C_{2121} = \frac{2}{\mu} \frac{W}{ab}$, $C_{1221} = \frac{2}{\mu} \frac{W}{ab}$, где $\frac{W}{ab} = 1, 2, \dots, 6$ являются плотностями энергии деформации, соответствующими шести равномерным градиентам смещения, соответственно. Как показано на [рис. 4 б](#), численные гомогенизированные эффективные свойства (сплошные ступенчатые линии) хорошо согласуются с аналитическими значениями (пунктирные линии), приведенными в уравнении (1).

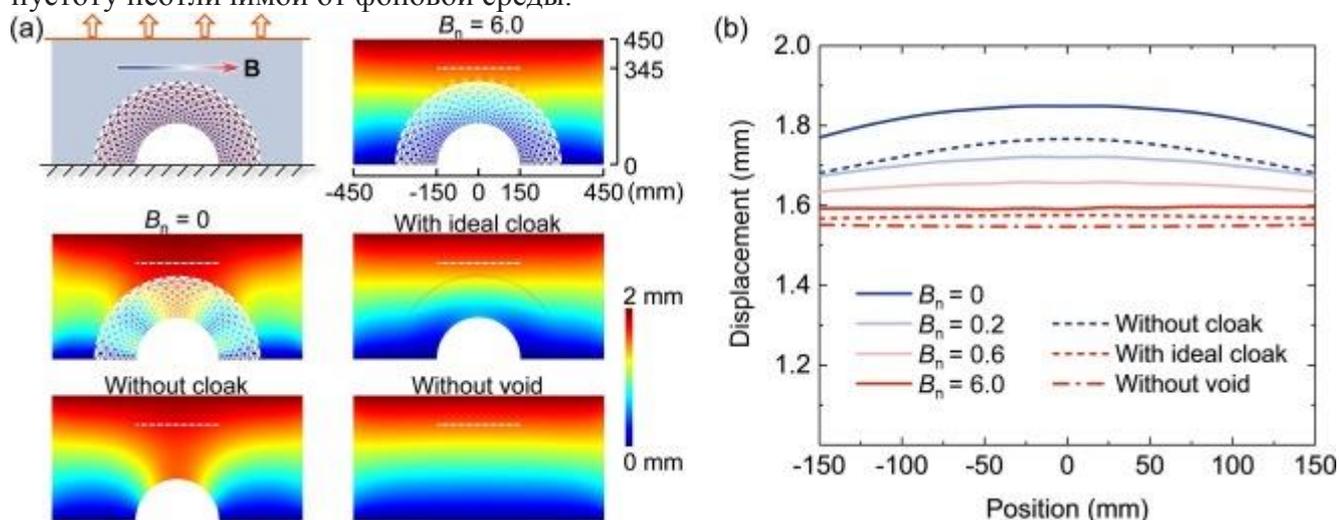


1. [Загрузить](#): Загрузить изображение в высоком разрешении (188 КБ)
2. [Скачать](#): Загрузить полноразмерное изображение

Рис. 4. (а) Граничное условие в численной гомогенизации асимметричных метаматериалов. (б) Гомогенизированный тензор упругости для элементарных ячеек в различных положениях в пласе на основе МАММ. Пунктирные кривые и сплошные ступенчатые линии показывают теоретические и численно эффективные (или гомогенизированные) свойства соответственно.

4. Эффективность маскировки на основе МАММ

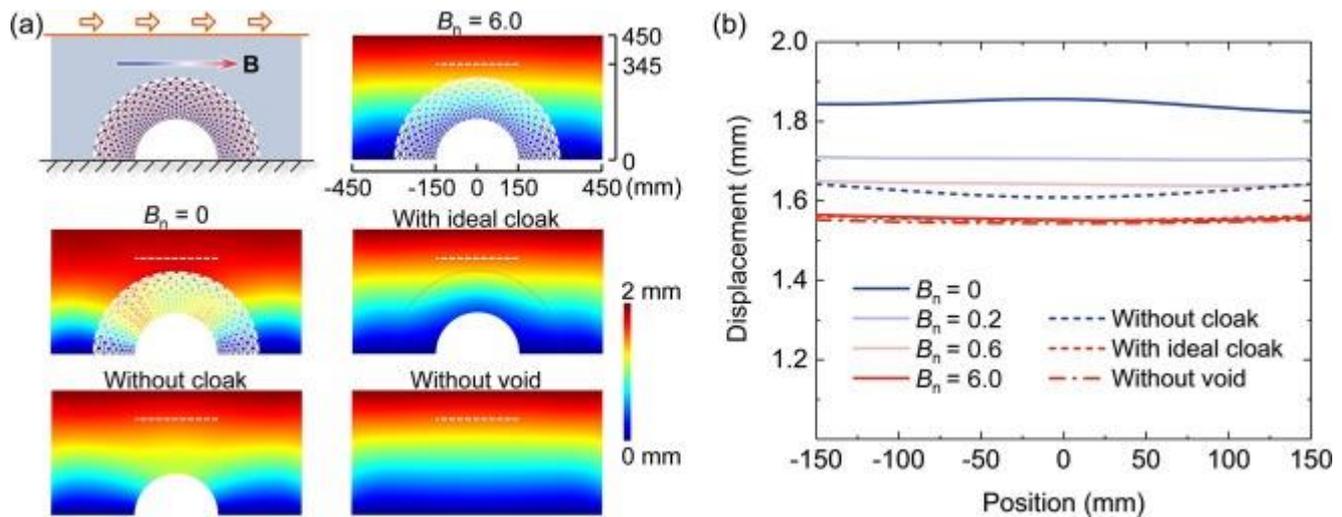
Далее проводится численное моделирование производительности плаща на основе МАММ с использованием метода конечных элементов (COMSOL Multiphysics 6.0). Численная модель, состоящая из пустоты, покрытой плащом на основе МАММ, представлена на [рис. 5 а](#). Обратите внимание, что мы рассматриваем модель полуплаща для экономии вычислительных затрат. Нижняя часть системы фиксирована, в то время как равномерное вертикальное смещение (т. е. равномерная растягивающая нагрузка) накладывается на верхнюю границу. Мы регистрируем реакции системы для различных уровней внешнего приложенного магнитного поля B . Для сравнения рассматриваются три других случая: пустота без плаща, пустота, покрытая идеальным плащом, и эталонная система без пустоты. Здесь «идеальный» плащ изготовлен из фиктивной асимметричной среды с ее материальными параметрами, заданными в уравнении (1). Для каждого случая общий профиль смещения на белой пунктирной линии (см. на [рис. 5 а](#), из -2.3×10^3 по оси x и при 2.3×10^3 по оси y) измеряется, как показано на [рис. 5 б](#). Нормализованный уровень магнитного поля определяется как $B_n = B/B_0$. Очевидно, что с ростом уровня внешнего магнитного поля реакция системы с МАММ-маскировкой приближается к реакции системы с идеальной маскировкой. В частности, когда уровень магнитного поля достаточно велик (например, $B_n = 6,0$), производительность предлагаемой МАММ-маскировки хорошо совпадает с производительностью идеальной маскировки; обе они эффективно делают пустоту неотличимой от фоновой среды.



1. [Загрузить](#): Загрузить изображение в высоком разрешении (328 КБ)
2. [Скачать](#): Загрузить полноразмерное изображение

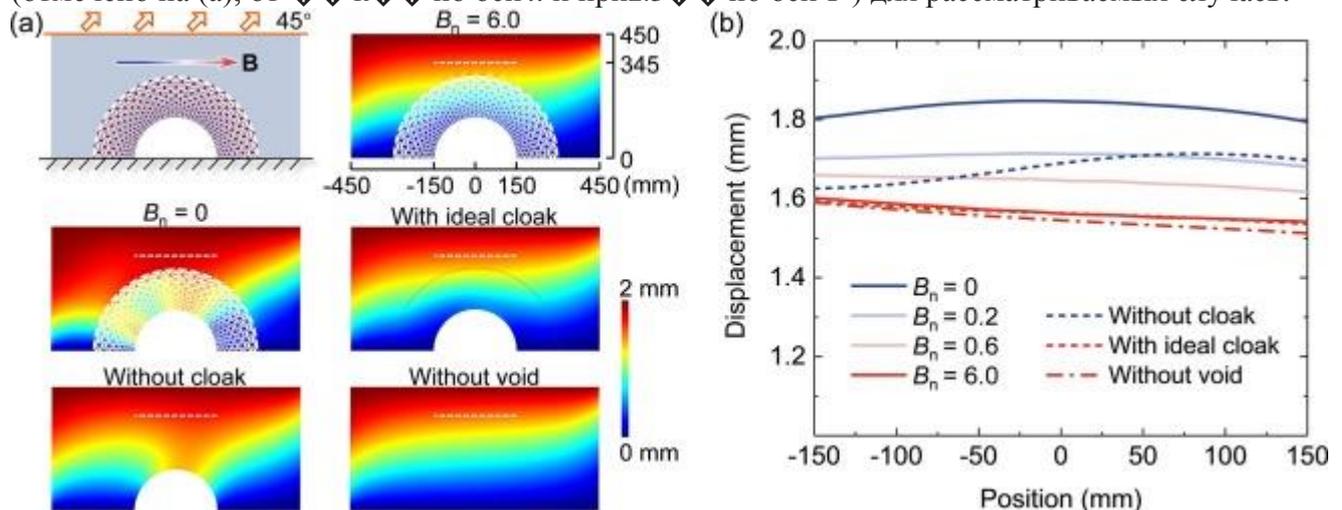
Рис. 5. Характеристики плаща на основе МАММ при равномерной растягивающей нагрузке. (а) Полное поле смещения для случаев: пустота, покрытая плащом на основе МАММ при различных уровнях магнитного поля, пустота без плаща, пустота, покрытая идеальным плащом, и система отсчета без пустоты. (б) Профиль полного смещения, измеренный на белой пунктирной линии (отмечено на (а), от -2.3×10^3 по оси x и при 2.3×10^3 по оси Y) для рассматриваемых случаев.

Обратите внимание, что из-за предположений об изотропности и линейности наш предлагаемый плащ на основе МАММ последовательно обеспечивает хорошую маскировку для различных ситуаций статической нагрузки. Для демонстрации этого на [рис. 6](#) показаны численные результаты, соответствующие сдвиговой нагрузке. Численная модель и настройка (за исключением направления статической нагрузки) идентичны показанным на [рис. 5](#). Видно, что под действием магнитного поля с достаточно большим уровнем (например, $B_n = 6,0$) характеристики предлагаемого плаща МАММ хорошо совпадают с характеристиками идеального плаща; оба они эффективно делают пустоту неотличимой от фоновой среды. Более того, общая механическая нагрузка — комбинированная нагрузка, состоящая из растяжения и сдвиговых смещений с одинаковой величиной — накладывается на верхнюю границу рассматриваемой системы плаща. Результаты моделирования представлены на [рис. 7](#), показывая хорошую маскировку.



1. [Загрузить: Загрузить изображение в высоком разрешении \(319 КБ\)](#)
2. [Скачать: Загрузить полноразмерное изображение](#)

Рис. 6. Характеристики плаща на основе МАММ при сдвиговой нагрузке. (а) Поле полного смещения для случаев: пустота, покрытая плащом на основе МАММ при различных уровнях магнитного поля, пустота без плаща, пустота, покрытая идеальным плащом, и система отсчета без пустоты. (б) Профиль полного смещения, измеренный на белой пунктирной линии (отмечено на (а), от- 2.3 'к 2.3 'по оси x и при 2.3 'по оси Y) для рассматриваемых случаев.



1. [Загрузить: Загрузить изображение в высоком разрешении \(323 КБ\)](#)
2. [Скачать: Загрузить полноразмерное изображение](#)

Рис. 7. Характеристики плаща на основе МАММ при общей механической нагрузке. (а) Полное поле смещения для случаев: пустота, покрытая плащом на основе МАММ при различных уровнях магнитного поля, пустота без плаща, пустота, покрытая идеальным плащом, и система отсчета без пустоты. (б) Профиль полного смещения, измеренный на белой пунктирной линии (отмечено на (а), от- 2.3 'к 2.3 'по оси x и при 2.3 'по оси Y) для рассматриваемых случаев.

Наконец, отметим, что хотя предлагаемый плащ на основе МАММ проверен в структурной системе с относительно большим масштабом размеров (несколько сотен миллиметров, как показано на рис. 5, рис. 6, рис. 7), наша структура проектирования универсальна и может быть применена к структурам с различными масштабами длины. Кроме того, текущее исследование сосредоточено на случае, когда фоновая среда имеет материальные параметры $\lambda = \mu$ для простоты. Требуемая магнитомеханическая связь в этом случае очень сильна (см. уравнение (6)), чтобы полностью предотвратить вращение блоков hMAE. $B_n = 0,6$ является примером уровня магнитного поля, который достаточно силен для рассматриваемых геометрических и материальных параметров (см. рис. 5, рис. 6, рис. 7). Для фоновой среды с любыми другими материальными параметрами требуемый магнитный уровень может быть однозначно определен с помощью уравнения (5).

5. Заключение

Мы предложили магнитоактивный асимметричный механический метаматериал для упругой маскировки. Конструкция позволяет достичь настраиваемой маскировки без внешнего крутящего момента тела или эффекта вращательного резонанса. Стратегия проектирования использует преобразующую способность hMAE в сочетании с характеристиками метаматериала нулевой моды. Взаимодействие между собственной намагниченностью hMAE и удаленной магнитной активацией приводит к необычному асимметричному механическому поведению (с нарушенной малой симметрией эффективного тензора упругости МАММ). Кососимметричный компонент напряжения, представляющий микромомент, действующий на элементарную ячейку, эффективно уравнивается магнитным крутящим моментом тела. Такая асимметрия, обеспечиваемая магнитным полем, может быть настроена для достижения желаемых свойств материала, требуемых упругостью преобразования и маскировкой. Описана систематическая процедура проектирования, охватывающая гомогенизацию и обратный дизайн микроструктурных параметров, адаптированных к конкретным фоновым средам и требованиям преобразования. Мы тестируем реакции предлагаемой решетчатой маскировки на основе МАММ и иллюстрируем способность маскировки при различных статических механических нагрузках. Примечательно, что благодаря магнитомеханической связи МАММ позволяет нам удаленно включать и выключать маскировку. Хотя представленные здесь результаты ограничены статикой, они могут служить руководством для разработки новых настраиваемых маскирующих решений, способных смягчать волны напряжения и динамические нагрузки. Это исследование создает прецедент в области трансформационной магнитоупругости и открывает возможности для проектирования материалов для реализации сред трансформации, которые контролируют упругую деформацию или волну, а также беспроводных интеллектуальных устройств.

Заявление об авторском вкладе CRediT

Quan Zhang: Концептуализация, обработка данных, формальный анализ, исследование, методология, валидация, визуализация, написание — исходный черновик, написание — рецензирование и редактирование. **Gengkai Hu:** Концептуализация, формальный анализ, визуализация, написание — исходный черновик, написание — рецензирование и редактирование. **Stephan Rudykh:** Концептуализация, формальный анализ, администрирование проекта, надзор, валидация, визуализация, написание — исходный черновик, написание — рецензирование и редактирование.

Декларация о конфликте интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных им конкурирующих финансовых интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в настоящей статье.

Благодарности

QZ благодарит за поддержку исследовательской и инновационной программы Европейского союза (ЕС) Horizon Europe через Marie Skłodowska-Curie Actions (грант № 101106301- MetaMagic). GH благодарит за поддержку Национальный фонд естественных наук Китая через грант № 11991030. SR благодарит за поддержку Европейский исследовательский совет (ERC) через грант № 852281-MAGIC.

Наличие данных

Данные будут предоставлены по запросу.

Ссылки

1. Алам и др., 2023 г.

З. Алам , С. Падманабхан , А.К. Шарма

Магнитно-регулируемые щели продольной волны в магнитно-твердых мягких ламинатах

Международный журнал механики , 249 (2023) , статья 108262

[Посмотреть PDF-файл](#)[Посмотреть статью](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

2. Бертольди и др., 2017

К. Бертольди , В. Вителли , Й. Кристенсен , М. ван Хек

Гибкие механические метаматериалы

Нат. Преподобный Матер. , 2 (2017) , с. 17066

[Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

3. Билал и др., 2017а

О.Р. Билал , А. Фер , К. Дарайо

Бистабильный метаматериал для переключения и каскадирования упругих колебаний

PNAS , 114 (2017) , стр. 4603 - 4606

[Посмотреть у издателя](#)[Crossref](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

4. Билал и др., 2017б

О.Р. Билал , А. Фер , К. Дарайо

Перепрограммируемые фоновые метаповерхности

Адв. Матер. , 29 (2017) , с. 1700628

[Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

5. Брун и др., 2009

М. Брун , С. Генно , А.Б. Мовчан

Достижение контроля плоских упругих волн

Письмо в журнале прикладной физики , 94 (2009) , статья 061903

[Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

6. Бакманн и др., 2014

Т. Букманн , М. Тиль , М. Кадич , Р. Шиттни , М. Вегенер

Эластомеханический нечувствительный плащ из пятимодовых метаматериалов

Нат. Коммун. , 5 (2014) , с. 4130

[Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

7. Бакманн и др., 2015

Т. Букманн , М. Кадич , Р. Шиттни , М. Вегенер

Механическая конструкция плаща с помощью прямого преобразования решетки

PNAS , 112 (2015) , стр. 4930

[Crossref](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

8. Чен и др., 2019

Y. Chen , X. Liu , G. Hu

Топологический фазовый переход в механической сотовой решетке

Журнал механики и физики твердых тел , 122 (2019) , стр . 54–68

[Посмотреть PDF-файл](#)[Посмотреть статью](#) [Google Scholar](#)

9. Чен и др., 2021a

Т. Чен , М. Паули , П. М. Рейс

Перепрограммируемый механический метаматериал со стабильной памятью

Природа , 589 (2021) , стр. 386 - 390

[Crossref](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

10. Чен и др., 2017

Ю. Чэнь , М. Чжэн , С. Лю , Ю. Би , З. Сунь , П. Сян , Цзюнь Ян , Г. Ху

Широкополосный сплошной экран для подводной акустики

Phys. Rev. B , 95 (2017) , Статья 180104

[Crossref](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

11. Чен и др., 2021b

Y. Chen , Q. Zhang , Y. Zhang , B. Xia , X. Liu , X. Zhou , C. Chen , G. Hu

Прогресс в исследовании эластичных топологических материалов

Адв. Мех. , 51 (2021) , стр . 189-256 .

[CrossRef](#) [Google Академия](#)

12. Каммер и Шуриг, 2007 г.

С.А. Каммер , Д. Шуриг

Один из путей к акустической маскировке

New J. Phys. , 9 (2007) , стр. 45

[Crossref](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

13. Эргин и др., 2010

Т. Эргин , Н. Стенгер , П. Бреннер , Дж. Б. Пендри , М. Вегенер

Трехмерный плащ-невидимка на оптических длинах волн

Наука , 328 (2010) , стр. 337

[Crossref](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

14. Гошкодерия и др., 2020

А. Гошкодерия , В. Чен , Дж. Ли , А. Юль , П. Бусколь , С. Рудых

Формирование структур, вызванное нестабильностью, в мягких магнитоактивных композитах

Phys. Rev. Lett. , 124 (2020) , Статья 158002

[Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

15. Гринлиф и др., 2003

А. Гринлиф , М. Лассас , Г. Ульманн

Анизотропная проводимость, которую невозможно обнаружить с помощью ЭИТ

Physiol. Meas. , 24 (2003) , стр. 413

[Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

16. Гросс и др., 2023

М.Ф. Гросс , Дж.Л.Г. Шнайдер , Ю. Вэй , Ю. Чен , С. Кальт , М. Кадич , Кс. Лю , Г. Ху , М. Вегенер

Тетрамодовые метаматериалы как фононные поляризаторы

Adv. Mater. , 35 (2023) , стр. e2211801

[Google Академия](#)

17. Го и др., 2022 г.

Д. Го , Ц. Чжан , Г. Ху

Рациональная конструкция гиперупругого полулинейного материала и его применение для управления упругими волнами

Мех. Матер. , 166 (2022) , статья 104237

[Посмотреть PDF-файл](#)[Посмотреть статью](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

18. Ху и др., 2018

В. Ху , Г. З. Лум , М. Мастранжели , М. Ситти

Малогобаритный мягкотелый робот с мультимодальным передвижением

Природа , 554 (2018) , стр . 81-85

[Crossref](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

19. Хейбари и Билал, 2023 г.

М. Хейбари , ОР Билал

Использование асимметрии для перепрограммирования нелинейных метаматериалов «на лету» без движущихся частей

Матер. Дес. , 233 (2023) , статья 112168

[Посмотреть PDF-файл](#)[Посмотреть статью](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

20. Ким и др., 2018

Ю. Ким , Х. Юк , Р. Чжао , С. А. Честер , К. Чжао

Печать ферромагнитных доменов для свободных быстропреобразующихся мягких материалов

Природа , 558 (2018) , стр. 274 - 279

[Crossref](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

21. Крушинская и др., 2023

А.О. Крушинская , Д. Торрент , А.М. Арагон , Р. Ардито , О.Р. Билал , Б. Бонелло , Ф . Бозиа , Ю. Чен , Дж . Кристенсен , А. Коломби , С. А. Каммер , Б. Джафари-Рухани , Ф. Фратернали , П. И. Галич , П. Д. Гарсия , Ж.-

П. Гроби , С. Генно , М.Р. Хаберман , М.И. Хусейн , С. Джанбас , Н. Хименес , А. Хелиф , В. Лауде , М.Дж. Мирзаали , П. Пако , А. Палермо , Ю. Пеннек , Р. Пико , М.Р. Лопес , С. Рудых , М. Серра-Гарсия , КМ Сотомайор

Торрес , Т.А. Старки , В. Турна , О.Б. Райт

Новые темы в области нанофононики и эластичных, акустических и механических метаматериалов: обзор

Нанофотоника , 12 (2023) , стр. 659 - 686

[Crossref](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

22. Ли и др., 2022 г.

К. Х. Ли , Х. Аль-Бабаа , К. Ю , К. Ли , Ю. Чжан , Х. Ду , С. Ф. Масри , К. Ван

Магнитоактивные акустические топологические транзисторы

Adv. Sci. , 9 (2022) , стр. e2201204

[Google Академия](#)

23. Леонхардт, 2006

У. Леонхардт

Оптическое конформное отображение

Наука , 312 (2006) , стр. 1777

[Crossref](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

24. Лю и др., 2019

Х. Лю , Ц. Чжан , К. Чжан , Г. Ху , Х. Дуань

Разработка 3D цифрового метаматериала для упругих волн: от поляризатора упругих волн до управления вибрациями

Adv. Sci. , 6 (2019) , стр. 1900-401

[Просмотреть в Scopus Google Scholar](#)

25. Лукарини и др., 2022 г.

С. Лукарини , М. Хоссейн , Д. Гарсиа-Гонсалес

Последние достижения в области магнитно-твердых мягких композитов: синтез, характеристика, компьютерное моделирование и применение

Композит. Структура , 279 (2022) , Статья 114800

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#) [Просмотреть в Scopus Google Scholar](#)

26. Лум и др., 2016

Лам, Г.З., Йе, З., Донг, Х., Марви, Х., Эрин, О., Ху, В., Ситти, М., 2016. Магнитно-мягкая материя, программируемая по форме. Учеб. Натл. акад. наук. США 113, E6007-E6015.

[Google Академия](#)

27. Мемоли и др., 2017

Дж. Мемоли , М. Калип , М. Асакава , Д. Р. Саху , Б. В. Дринкуотер , С. Субраманиан
Метаматериальные кирпичики и квантование метаповерхностей

Нат. Коммун. , 8 (2017) , с. 14608

[Просмотреть в Scopus Google Scholar](#)

28. Милтон и др., 2006

Милтон, Г. В., Брайн, М., Уиллис, Дж. Р., 2006. О маскировке для упругости и физических уравнений с инвариантной к преобразованиям формой. New J. Phys. 8, 248.

[Google Академия](#)

29. Монтгомери и др., 2020 г.

С. М. Монтгомери , С. Ву , С. Куанг , К.

Д. Армстронг , К. Земелька , К. Цзе , Р. Чжан , Р. Чжао , Х. Дж. Ци

Магнитомеханические метаматериалы с широко регулируемыми механическими свойствами и акустическими запрещенными зонами

Adv. Funct. Mater. , 31 (2020) , стр. 2005319

[Google Академия](#)

30. Морено-Матеос и др., 2022 г.

М. А. Морено-Матеос , М. Хоссейн , П. Штайнманн , Д. Гарсиа-Гонсалес

Гибридные магнитореологические эластомеры позволяют создавать универсальные мягкие приводы

НПЖ Компьютер. Матер. , 8 (2022) , с. 162

[Просмотреть в Scopus Google Scholar](#)

31. Мукерджи и др., 2021 г.

Д. Мукерджи , М. Рамбаусек , К. Данас

Явная диссипативная модель для изотропных жестких магнитореологических эластомеров

Журнал механики и физики твердых тел , 151 (2021) , статья 104361

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#) [Просмотреть в Scopus Google Scholar](#)

32. Нассар и др., 2018 г.

Х. Нассар , YY Чен , GL Хуан

Вырожденная полярная решетка для сокрытия полной двумерной эластодинамики и статики

Proc. Royal Soc. A: Математика, физика, инженерия , 474 (2018) , стр. 20180523

[Google Академия](#)

33. [Нассар и др., 2019](#)

Х. Нассар , YY Чен , GL Хуан

Изотропные полярные твердые тела для конформного преобразования упругости и маскировки

Журнал механики и физики твердых тел , 129 (2019) , стр. 229 - 243

[Посмотреть PDF-файл](#)[Посмотреть статью](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

34. [Нассар и др., 2020 г.](#)

Х. Нассар , YY Чен , GL Хуан

Полярные метаматериалы: новый взгляд на резонанс для маскирующих приложений

Phys. Rev. Lett. , 124 (2020) , Статья 084301

[Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

35. [Норрис, 2008](#)

АН Норрис

Теория акустической маскировки

Proc. Royal Soc. A: Математика, физика, инженерия , 464 (2008) , стр. 2411 - 2434

[Crossref](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

36. [Норрис и Парнелл, 2012 г.](#)

А. Н. Норрис , У. Дж. Парнелл

Теория гиперупругой маскировки: трансформационная упругость с предварительно напряженными телами

Proc. Royal Soc. A: Математика, физика, инженерия, наука , 468 (2012) , стр. 2881 - 2903

[Crossref](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

37. [Пан и др., 2019](#)

Ф. Пан , Ю. Ли , З. Ли , Дж. Ян , Б. Лю , Ю. Чен

3D Пиксельные Механические Метаматериалы

Adv. Mater. , 31 (2019) , стр. e1900548

[Google Академия](#)

38. [Парнелл, 2012](#)

У. Дж. Парнелл

Нелинейное предварительное напряжение для маскировки от антиплоских упругих волн

Proc. Royal Soc. A: Математика, физика, инженерия , 468 (2012) , стр. 563 - 580

[Crossref](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

39. [Пендри и др., 2006](#)

Дж. Б. Пендри , Д. Шуриг , Д. Р. Смит

Управление электромагнитными полями

Наука , 312 (2006) , стр. 1780

[CrossRef](#) [Google Академия](#)

40. [Сим и др., 2023 г.](#)

Дж. Сим , С. Ву , Дж. Дай , Р. Р. Чжао

Магнитомеханический двухслойный метаматериал с глобальной сохраняющей площадью настраиваемой плотностью для регулирования акустических волн

Adv. Mater. , 35 (2023) , стр. e2303541

[Google Академия](#)

41. Сим и Чжао, 2023 г.

J. Sim , RR Zhao

Магнитомеханические метаматериалы: перспектива

J. Appl. Mech. , 91 (2023) , Статья 031004

[Google Академия](#)

42. Ван и др., 2023 г.

Л. Ван , З. Чэнь , Л. Чэн

Метаматериальная пластина с магнитореологическими эластомерами и градиентными резонаторами для настраиваемой, низкочастотной и широкополосной манипуляции изгибными волнами

Тонкостенные. Конструкция. , 184 (2023) , Статья 110521

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#) [Просмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

43. Ван и др., 2021 г.

Ван, Л., Чжэн, Д., Харкер, П., Патель, А. Б., Го, К. Ф., Чжао, С., 2021. Эволюционный дизайн магнитных мягких континуальных роботов. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 118, e2021922118.

[Google Академия](#)

44. Ван и др., 2015

П. Ван , Л. Лу , К. Бертольди

Топологические фононные кристаллы с односторонними упругими краевыми волнами

Phys. Rev. Lett. , 115 (2015) , Статья 104302

[Crossref](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

45. Ван и др., 2019

Ю. Ван , Б. Рамирес , К. Карпенгер , К. Нэйфи , Д.С. Хофманн , К. Дарайо

Архитектурные решетки с адаптивным поглощением энергии

Extreme Mech. Lett. , 33 (2019) , Статья 100557

[Посмотреть PDF-файл](#)[Просмотреть статью](#) [Просмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

46. Ван и др., 2020 г.

Y.-F. Wang , Y.-Z. Wang , B. Wu , W. Chen , Y.-S. Wang

Настраиваемые и активные фононные кристаллы и метаматериалы

Appl. Mech. Rev. , 72 (2020) , Статья 040801

[Просмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

47. Ван и др., 2016

Z. Wang , Q. Zhang , K. Zhang , G. Hu

Настраиваемый цифровой метаматериал для широкополосной виброизоляции на низких частотах

Adv. Mater. , 28 (2016) , стр. 9857 - 9861

[Crossref](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

48. Уоткинс и др., 2022 г.

А.А. Уоткинс , А. Эйхельберг , О.Р. Билал

Использование перепрограммируемых фазовых переходов для управления распространением звуковых волн

Phys. Rev. Appl. , 17 (2022) , Статья 024036

[Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

49. Вэй и др., 2021 г.

Y. Wei , X. Liu , G. Hu

Квадрамодовые материалы: их метод проектирования и волновые свойства

Матер. Дес. , 210 (2021) , статья 110031

[Посмотреть PDF-файл](#) [Посмотреть статью](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

50. Сюй и др., 2020 г.

С. Сюй , К. Ван , В. Шоу , З. Ду , Ю. Чен , Б. Ли , В. Матусик , Н. Хусейн , Г. Хуан

Физическая реализация эластичной маскировки полярным материалом

Phys. Rev. Lett. , 124 (2020) , Статья 114301

[Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

51. Ян и др., 2021а

Д. Ян , А. Аббаси , ПМ Рейс

Комплексная структура для магнитно-жестких пучков: теория пониженного порядка, трехмерное моделирование и эксперименты

Int. J. Solids Struct. , 257 (2021) , Статья 111319

[Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

52. Ян и др., 2021b

Д. Ян , М. Пеццулла , Л. Крювейе , А. Аббаси , П. М. Рейс

Магнитоактивные упругие оболочки с регулируемой прочностью на изгиб

Nat. Коммун. , 12 (2021) , с. 2831

[Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

53. Ян и др., 2023

Д. Ян , БФГ Эймон , ПМ Рейс

Модель пониженного порядка, основанная на вращении, для тонких магнитно-твердых пластин

Журнал механики и физики твердых тел , 170 (2023) , статья 105095

[Посмотреть PDF-файл](#) [Посмотреть статью](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

54. Ян и Кетен, 2023 г.

С. Ян , С. Кетен

Возникающие соотношения упругости для сетей стержней с липкими магнитными концами

Extreme Mech. Lett. , 65 (2023) , Статья 102093

[Посмотреть PDF-файл](#) [Посмотреть статью](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

55. Чжан и др., 2020а

HK Zhang , Y. Chen , XN Liu , GK Hu

Модель асимметричного эластичного метаматериала для маскировки упругих волн

Журнал механики и физики твердых тел , 135 (2020) , статья 103796

[Посмотреть PDF-файл](#) [Посмотреть статью](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

56. Чжан и др., 2020b

Ц. Чжан , Ю. Чен , К. Чжан , Г. Ху

Вырождение Дирака и упругие топологические долинные моды, вызванные локальными резонансными состояниями

Phys. Rev. B , 101 (2020) , Статья 014101

[Crossref](#) [Посмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

57. Чжан и др., 2021 г.

Цюй Чжан , Д. Го , Г. Ху

Специально разработанные механические метаматериалы с программируемыми характеристиками квазиулевого жесткости для полнодиапазонной виброизоляции

Adv. Funct. Mater. , 31 (2021) , стр. 2101428

[Просмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

58. Чжан и др., 2023а

Ц. Чжан , А. В. Черкасов , Н. Арора , Г. Ху , С. Рудых

Асимметричные механические метаматериалы, создаваемые магнитным полем

Extreme Mech. Lett. , 59 (2023) , Статья 101957

[Посмотреть PDF-файл](#) [Просмотреть статью](#) [Просмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

59. Чжан и др., 2023b

Ц. Чжан , А. В. Черкасов , К. Се , Н. Арора , С. Рудых

Нелинейные упругие векторные солитоны в магнитно-твердых механических метаматериалах

Int. J. Solids Struct. , 280 (2023) , Статья 112396

[Посмотреть PDF-файл](#) [Просмотреть статью](#) [Просмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

60. Чжан и Рудых, 2022 г.

Ц. Чжан , С. Рудых

Магнитодеформация и поперечные упругие волны в магнитно-твердых мягких ламинатах

Мех. Матер. , 169 (2022) , статья 104325

[Посмотреть PDF-файл](#) [Просмотреть статью](#) [Просмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

61. Чжан и др., 2018

X. Zhang , M. Xiao , Y. Cheng , M.-H. Lu , J. Christensen

Топологический звук

Commun. Phys. , 1 (2018) , стр. 97

[Посмотреть PDF-файл](#) [Просмотреть статью](#) [Google Scholar](#)

62. Чжан и др., 2023с

В. Чжан , Дж. Чжоу , Ю. Цзя , Дж. Чен , Ю. Пу , Р. Фань , Ф. Мэн , Ц. Гэ , Ю. Лу

Магнитоактивные микрорешетчатые метаматериалы с высокорегулируемой жесткостью и высокой скоростью отклика

NPG Asia Mater. , 15 (2023) , стр. 45

[Посмотреть у издателя](#)

[CrossRef](#) [Google Академия](#)

63. Чжао и др., 2019

Р. Чжао , Ю. Ким , С. А. Честер , П. Шарма , К. Чжао

Механика магнитно-твердых мягких материалов

Журнал механики и физики твердых тел , 124 (2019) , стр. 244 - 263

[Посмотреть PDF-файл](#) [Просмотреть статью](#) [Просмотреть в Scopus](#) [Google Scholar](#)

64. [Чжу и др., 2014](#)

Р. Чжу , С. Н. Лю , Г. К. Ху , СТ Сунь , Г. Л. Хуан
Отрицательное преломление упругих волн в глубоком субволновом
масштабе в однофазном метаматериале
Нат. Коммун. , 5 (2014) , с. 5510