

Применение графена в строительстве и архитектуре

С. И. Тузик, В. В. Янушкевич, Д. О. Колос, Д. Ч. Гвоздовский

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Приведены различные варианты применения графена в строительстве и архитектуре. Благодаря своей прочности и устойчивости к трению графен используется при производстве бетона повышенной прочности, стальных конструкций. Графеновые панели нашли широкое применение для обшивки домов, так как они отводят тепло лучше традиционных материалов. Благодаря высокой теплопроводности графена, краски на его основе позволяют улучшить термическую регулировку зданий. Ученными разработана краска на основе графена, которая сообщает о повреждении зданий. На местах трещин и повреждений фасада краска начинает иначе отражать свет, окрашиваясь в яркие цвета. Смазки, в состав которых входит графен, обладают низким коэффициентом трения, эффективно отталкивают воду и защищают металлы от повреждений.

Ключевые слова: Графеновые панели, Бетон повышенной прочности, Краска на основе графена, Велосипедная смазка, Многослойный металл-графен.

Графен состоит из плотно соединенных атомов углерода, выстроенных в решетке толщиной в один атом. Это делает его самым тонким веществом в мире, которое при этом в 200 раз прочнее стали. Он также очень устойчив к трению и погодным условиям. Квадратный метр графена весом всего в 0,0077 грамма может выдерживать четыре килограмма нагрузки. Десятки исследователей продемонстрировали, что добавление даже незначительного количества графена к пластику, металлу или другим материалам может сделать эти материалы намного прочнее или легче. Так, если включить графен в состав стальных конструкций, они станут не только крепче, но и легче [1].

Для создания бетона повышенной прочности исследователи из Эксетерского университета (Великобритания) использовали технологии инкорпорирования графена в бетон [2]. Ученные установили, что добавление графена в бетон делает получившийся композитный материал в 4 раза прочнее обычного и в 2 раза повышает его водоустойчивость. Углеродный след при производстве улучшенного цемента оказался значительно более слабым. Такого эффекта удалось достичь из-за уменьшения в два раза объемов исходного материала, необходимого для производства бетона. В результате выбросы углерода при производстве одной тонны материала уменьшились на 446 кг. По оценке ученых, разработка позволит сократить объем необходимых для производства бетона материалов почти на 50%, что приведет к экономии и снижению выбросов парниковых газов. Наиболее важными сферами применения являются столбы, трубы, дороги, бетонные экраны и плотины, элементы, которые требуют большей долговечности с течением времени.

Компания GraphenanoSmartMaterials произвела графеновые панели для обшивки дома в Дубае — они отводят тепло лучше традиционных материалов. Кроме того, у нового материала повышается прочность: производитель уверяет, что срок службы зданий из «графенобетона» выше на 50%. Компания GrapheneSA разработала свою версию графеновой добавки в бетон, которую использовали при строительстве Экспоцентра в Мексике. Благодаря повышенным антикоррозийным свойствам материал особенно востребован в регионах с влажным климатом [3].

Впервые идея использовать графен для улучшения свойств красок была предложена испанской компанией Graphenano для укрепления фасада здания оперного театра в Валенсии «на молекулярном уровне», однако не была реализована. Вскоре британская компания

Graphenstone выпустила краску на основе извести с добавлением графена. Благодаря высокой теплопроводности графена новые краски позволяют улучшить термическую регулировку зданий. При покраске внутренних поверхностей стен подобной краской, окрашенные поверхности не передают тепло сквозь стену, графен, входящий в её состав позволяет его удерживать. Владельцы помещений смогут экономить на отоплении и кондиционировании [4].

Немецкими учеными разработана краска на основе графена, которая сообщает о повреждении зданий: на местах трещин и повреждений фасада изменяется цвет покрытия. Чешуйки графена наносятся на здание под специальным углом и в нормальных условиях остаются бесцветными. В случае повреждений угол наклона чешуек меняется и они начинают иначе отражать свет, окрашиваясь в яркие цвета. Существует возможность усовершенствовать технологию так, чтобы определенные цвета говорили, насколько срочно необходим ремонт [4].

Ученые из Китая создали самый легкий в мире твердый материал – графеновый аэрогель [5]. Он в 7,5 раз легче воздуха – его вес составляет $0,16 \text{ мг/см}^3$. Графеновый аэрогель – самый эффективный теплоизоляционный материал, что позволяет использовать его для получения высокоэффективных энергосберегающих решений. В качестве изоляции можно использовать листы графенового аэрогеля толщиной около 5 мм, при этом речь идет о гораздо меньших толщинах, чем у традиционных изоляторов. Это позволяет значительно сэкономить пространство и повысить энергоэффективность не только при строительстве зданий, но и при производстве солнечных панелей. Помимо минимальной толщины, это очень гибкий и прочный материал, обладающий высокой устойчивостью к механическим воздействиям и простой в обращении [6].

При производстве экологически безопасных смазок графен и оксид графена выступают в качестве перспективных материалов. Они являются эффективными загустителями, то есть дисперсной фазой и присадкой, которая существенно улучшает трибологические характеристики смазки. Авторами [7] проведены изменения трибологических свойств пластичных резьбовых смазок с различными наполнителями. Установлено, что уменьшение диаметра пятна износа наблюдалось при концентрации многослойного графена в масле начиная с 0.1 %. Максимальное уменьшение диаметра пятна износа на 33 % зафиксировано при концентрации многослойного графена 0.25 %.

Британский производитель absoluteBLACK в состав своей новой велосипедной смазки GRAPHENlube добавил крошечные пластинки графена высокой чистоты в раствор, состоящий из воды и углеводородного парафина. Сообщается, что продукт не содержит токсичных растворителей и является биоразлагаемым. Как только вода из смазки испаряется, остается черное пастообразное твердое вещество, которое чрезвычайно эффективно отталкивает воду, не притягивает грязь, а одного слоя хватает примерно на 1800 км движения по сухим асфальтированным дорогам. У нее «крайне низкий» коэффициент трения при любых условиях, а значит цепь будет крутиться очень плавно. Также она защищает металл от повреждений и минимизирует его окисление [8].

Физики из Корейского ведущего научно-технического института (KAIST) представили результаты своей работы [9], в ходе которой они создали сверхпрочный материал из графена и металла. Новый материал представляет собой сплав из меди, никеля и графена. При этом графен, на который приходится всего 0,00004 % веса всей конструкции делает медь прочнее в 500 раз, а никель — в 180. Строительство сверхпрочного вещества проходило в несколько этапов. Физики использовали технологию химического парофазного осаждения (CVD-процесс) для того, чтобы вырастить однослойный пласт графена на металлическом субстрате, после чего к конструкции присадили ещё один слой металла. Повторив несколько раз эти

шаги, учёные получили многослойный металл-графен. Производство такого материала позволит производить легкие и сверхпрочные детали для авиа- и машиностроения, конструкционные детали зданий.

Главное препятствие на пути распространения графена — сложность его производства. Ученые постоянно придумывают новые способы удешевить и упростить выработку материала. На сегодняшний день основная задача графена в строительстве и архитектуре — защищать различные конструкции от воды, химикатов и агрессивной окружающей среды, улучшать термическую регулировку зданий и сооружений.

Благодарность

Исследования проводились при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф21М-122) и Государственной программы научных исследований «Конвергенция – 2025» (задание 3.02.3).

Список источников

- [1] **Bunch, J. S.** Electromechanical resonators from graphene sheets / J.S. Bunch et al. // *Science*. — 2007. — V. 315. — № 5811. — P. 490–493.
- [2] **Dimov, D.** Ultrahigh performance nanoengineered graphene – concrete composites for multifunctional applications / D. Dimov et al. // *Advanced functional materials*. — 2018. — V. 28. — № 23. — P. 1705183.
- [3] **Сверхпрочный мир: как графен изменит архитектуру и нашу жизнь** / URL: <https://birdinflight.com/ru/architectura/20201215-sverhprochnyj-mir-kak-grafen-izmenit-arhitekturu>
- [4] **9 amazing uses for graphene, from filtering seawater to smart paint** / URL: <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/9-amazing-graphene-applications>
- [5] **Графеновый аэрогель. Самый легкий материал в мире поможет с ликвидацией разливов нефти** / URL: <https://neftegaz.ru>
- [6] **Sun, H.** Multifunctional, ultra-flyweight, synergistically assembled carbon aerogels / H. Sun, Z. Xu, C. Gao // *Advanced materials*. — 2013. — V. 25. — № 18. — P. 2554-2560.
- [7] **Першин, В. Ф.** Создание экологичных смазок, модифицированных графеном / В. Ф. Першин и др. // *Российские нанотехнологии*. — 2018. — Т. 13. — № 5-6. — С. 131-135.
- [8] **Graphene-boosted (and very long-lasting?) bike lube costs almost \$150** / URL: <https://newatlas.com/bicycles/graphenlube-graphene-bicycle-lubricant>
- [9] **Kim, Y.** Strengthening effect of single-atomic-layer graphene in metal–graphene nanolayered composites / Y. Kim et al. // *Nature communications*. — 2013. — V. 4. — № 1. — P. 2114.

Applications of graphene in construction and architecture

S. I. Tuzik, V. V. Yanushkevich, D. O. Kolos, D. C. Hvezdouski

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Various options for the use of graphene in construction and architecture are given. Due to its strength and resistance to friction, graphene is used in the production of high-strength concrete and steel structures. Graphene panels have found widespread use in house cladding, as they conduct heat better than traditional materials. Due to the high thermal conductivity of graphene, paints based on it can improve the thermal regulation of buildings. Scientists have developed graphene-based paint that reports damage to buildings. In places of cracks and damage to the facade, the paint begins to reflect light differently, turning into bright colors. Lubricants containing graphene have a low coefficient of friction, effectively repel water and protect metals from damage.

Keywords: Graphene panel, Concrete of increased strength, Graphene-based paint, Bicycle lubricant, Multilayer metal-graphene.

Ап-конверсионная фотолюминесценция в многослойных структурах $\text{BaTiO}_3:(\text{Er}, \text{Yb})$, сформированных золь-гель методом

Е.И. Лашковская, Ю.Д. Корнилова, Н.В. Гапоненко

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация

Экспериментально исследована ап-конверсионная фотолюминесценция ксерогелей $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ и $\text{BaTiO}_3:(\text{Er}, \text{Yb})$ на подложках монокристаллического кремния и с подслоем пористого SrTiO_3 . Установлено, что интенсивность люминесценции многократно усиливается при введении в ксерогель $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ ионов Yb , а также при наличии пористого подслоя SrTiO_3 .

Ключевые слова: ап-конверсионная фотолюминесценция, эрбий, иттербий, титанат бария, титанат стронция.

Введение

Недорогие покрытия с ап-конверсионной фотолюминесценцией (ФЛ) лантаноидов представляют интерес для обратной стороны солнечных батарей в качестве спектральных преобразователей. Люминесценция трехвалентного эрбия усиливается в присутствии сенсibiliзирующих ионов, в частности, иттербия для эрбия. Недавно мы установили, что ап-конверсионная ФЛ эрбия в ксерогеле титаната бария может быть усилена, если ксерогели изготовлены на мезопористых и макропористых слоях, таких как пористый ксерогель титаната стронция [1], а также в виде микрорезонаторов [2].

Основная часть

Для изготовления многослойных структур со слоями ксерогеля титаната бария, легированного эрбием ($\text{BaTiO}_3:\text{Er}$) или солегированного эрбием и иттербием $\text{BaTiO}_3:(\text{Er}, \text{Yb})$, было приготовлено несколько зольей. Описание полученных образцов (обозначенных как А, В, С, D) представлено в таблице 1.

Таблица 1. Описание исследуемых образцов многослойных структур $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ и $\text{BaTiO}_3:(\text{Er}, \text{Yb})$.

Обозначение образца	Тип ксерогеля	Подложка и подслоя
A	$\text{BaTiO}_3:\text{Er}$	Si
B	$\text{BaTiO}_3:\text{Er}$	пористый- SrTiO_3/Si
C	$\text{BaTiO}_3:(\text{Er}, \text{Yb})$	Si
D	$\text{BaTiO}_3:(\text{Er}, \text{Yb})$	пористый- SrTiO_3/Si

Сравнение многослойных структур $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$, осажденных непосредственно на монокристаллическую подложку Si (образец А) и полученных с использованием дополнительного макропористого подслоя ксерогеля SrTiO_3 между подложкой Si и $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ (образец В), показало значительное увеличение интенсивности ап-конверсионной ФЛ в образце с подслоем SrTiO_3 . Спектры ап-конверсионной ФЛ образцов В, С, D, записанные при возбуждении на длине волны 980 нм, показаны на рисунке 1. Для образца А без пористого подслоя SrTiO_3 ап-конверсионной ФЛ не было обнаружено при тех же условиях возбуждения. Причиной усиления ап-конверсионной ФЛ ксерогеля, легированного эрбием, может быть многократное рассеяние возбуждающего излучения в присутствии пористого слоя титаната стронция [1]. Наблюдаемые спектры ап-конверсионной ФЛ характеризуются несколькими полосами ФЛ на 410, 523, 546, 658, 800 и 830 нм, соответствующими $^2\text{H}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^2\text{H}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ и $^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ переходам трехвалентных ионов эрбия. Значительное усиление ап-конверсионной ФЛ наблюдалось для пленок ксерогеля BaTiO_3 , солегированных ионами Er и Yb (образцы С и D). Как видно из рисунка 1, интенсивная ап-конверсионная ФЛ наблюдалась для пленок ксерогеля $\text{BaTiO}_3:(\text{Er}, \text{Yb})$, полученных как с пористым подслоем

SrTiO₃ (образец D), так и без него (образец C). Для обоих образцов общая интенсивность ап-конверсионной ФЛ была более чем на порядок выше по сравнению со слоем BaTiO₃:Er, легированном только ионами Er.

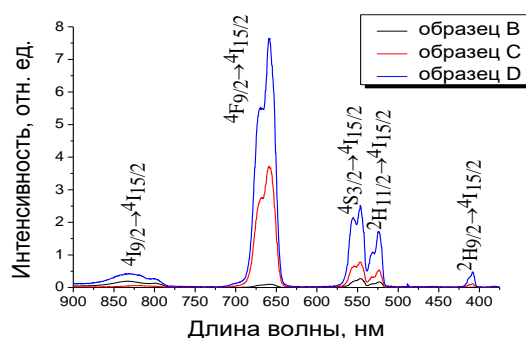


Рис. 1 – Спектры ап-конверсионной ФЛ многослойных пленочных структур BaTiO₃:Er (образец В) и BaTiO₃:(Er, Yb) (образцы С и D) на подложке Si, снятые при возбуждении на длине волны 980 нм

Заключение

Синтезированы структуры BaTiO₃:Er/Si, BaTiO₃:Er/пористый-SrTiO₃/Si и BaTiO₃:(Er, Yb)/Si, BaTiO₃:(Er, Yb)/пористый-SrTiO₃/Si. Установлено, что интенсивность ап-конверсионной ФЛ ионов эрбия значительно усиливается при введении в ксерогель BaTiO₃:Er ионов иттербия. Наличие пористого подслоя титаната стронция приводит к усиленному рассеянию возбуждающего излучения и увеличению его эффективного коэффициента поглощения и сечения поглощения иттербия и эрбия в пористых перовскитных средах.

Список источников

- [1] **Lashkovskaya, E. I.** Optical properties and upconversion luminescence of BaTiO₃ xerogel structures doped with erbium and ytterbium / E. I. Lashkovskaya, N. V. Gaponenko, M. V. Stepikhova, A. N. Yablonskiy, B. A. Andreev, V. D. Zhivulko, A. V. Mudryi, I. L. Martynov, A. A. Chistyakov, N. I. Kargin, V. A. Labunov, T. F. Raichenok, S. A. Tikhomirov and V. Yu. Timoshenko // *Gels*. — 2022. — Vol. 8, N 6. — P. 347 (15 pages). — DOI:10.3390/gels8060347
- [2] **Gaponenko, N. V.** Upconversion luminescence from sol-gel-derived erbium- and ytterbium-doped BaTiO₃ film structures and the target form / N. V. Gaponenko, N. I. Staskov, L. V. Sudnik, P. A. Vityaz, A. R. Luchanok, Yu. D. Karnilava, E. I. Lashkovskaya, M. V. Stepikhova, A. N. Yablonskiy, V. D. Zhivulko, A. V. Mudryi, I. L. Martynov, A. A. Chistyakov, N. I. Kargin, V. A. Labunov, Yu. V. Radyush, E. B. Chubenko and V. Yu. Timoshenko // *Photonics*. — 2023. — Vol. 10, N 4. — P. 359 (12 pages). — DOI:10.3390/photonics10040359

Upconversion photoluminescence from multilayer BaTiO₃:(Er, Yb) structures formed by the sol-gel method

E.I. Lashkovskaya, Yu.D. Karnilava, N.V. Gaponenko

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Annotation

The upconversion photoluminescence of BaTiO₃:Er and BaTiO₃:(Er, Yb) xerogels on monocrystalline silicon substrates and with a porous SrTiO₃ sublayer was investigated. It was found that the luminescence intensity increases significantly when Yb ions are introduced into BaTiO₃:Er xerogel as well as when a porous SrTiO₃ sublayer is present.

Keywords: upconversion photoluminescence, erbium, ytterbium, barium titanate, strontium titanate.