

# Воспроизведение цвета системой «источник излучения – перестраиваемый акустооптический фильтр»

\* А.С. БЕЛЯЕВА<sup>1,2,3</sup>, Г.Э. РОМАНОВА<sup>2</sup>, В.И. БАТШЕВ<sup>1,4</sup>, М.О. ШАРИКОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научно-технологический центр уникального приборостроения (НТЦ УП) РАН, Москва

<sup>2</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (СПб ГУАП), Санкт-Петербург

<sup>4</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

E-mail: belyaeva@inbox.ru

## Аннотация

Многооконная акустооптическая фильтрация широкополосного (белого) света даёт возможность управления спектральным составом излучения в видимом диапазоне, что позволяет использовать систему «источник излучения – акустооптический фильтр» в задачах воспроизведения цвета, например, в колориметрии, психофизиологии, спектральном анализе, биомедицине и др. прикладных и научных областях, требующих управления спектральным составом излучения. В статье рассмотрена задача воспроизведения заданного цвета при использовании двух и трёх спектральных компонентов (узких полос), приведены оценки факторов, влияющих на точность воспроизведения цвета, и показана возможность достижения погрешностей ниже порога цветоразличения, а также продемонстрированы возможности воспроизведения цветов, приближённых к локусу цветности, в мультиспектральном режиме акустооптического фильтра.

**Ключевые слова:** акустооптический фильтр, спектральный состав, цветовой охват, воспроизведение цвета.

## Введение

Точное воспроизведение цвета востребовано во многих теоретических и прикладных научных областях. К основным сферам применения устройств воспроизведения цвета можно отнести колориметрию, полиграфию, психофизиологию и др. В настоящее время физическими эталонами цветов служат цветные атласы [1]. Они основаны на смесевых или триадных (СМУ – cyan, magenta, yellow) красках с известными цветовыми ха-

рактеристиками. Очевидно, возможности воспроизведения цвета данным способом недостаточно широки для задач исследования цветового зрения во всём спектральном диапазоне чувствительности глаза, в том числе в части монохроматического излучения и смесевых цветов. Применение дополнительных красок, например чёрного цвета (СМУК – cyan, magenta, yellow, key/black), как правило, даёт незначительное увеличение цветового охвата (рис. 1). Кроме того, недостаток такого способа воспроизведения цвета – постепенное изменение спектральных характеристик краски под влиянием внешних факторов [2].

Другой способ воспроизведения цвета – смешение излучений трёх цветных светодиодов (RGB – red, green, blue) или RGB лазера (рис. 1) [3–5]. Такой способ смешения применяется в светодиодных дисплеях и осветительных системах опико-электронных приборов (например, в микроскопе с управляемой цветовой температурой осветительного прибора) [6]. В этом случае приближение спектра компонентов источника к мо-

нохроматическому способствует увеличению цветового охвата, а потому наибольший цветовой охват обеспечивает RGB лазер (рис. 1).

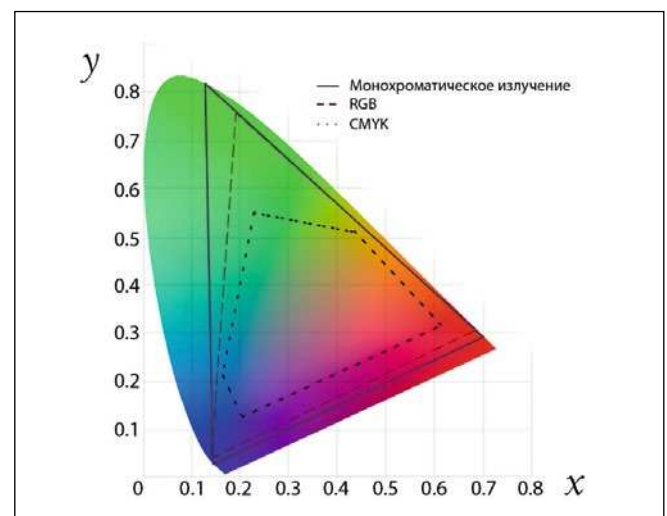
Однако использование последнего не всегда допустимо (например, в исследованиях по цветовосприятию и цветовому зрению лазерное излучение может негативно влиять на зрение [7]). Помимо того, увеличение числа спектральных компонентов в лазере (чтобы воспроизводить цвета в большем диапазоне) требует специальных доработок, что существенно влияет на его габариты и стоимость [4]. Таким образом, одна из главных проблем существующих способов воспроизведения цвета – неполный цветовой охват.

Альтернативным техническим решением, обеспечивающим воспроизведение цвета во всём цветовом пространстве МКО 1931 со спектральными компонентами, близкими к чистым цветам, служит акустооптический (АО) перестраиваемый фильтр [8–10], позволяющий выделять узкую спектральную полосу (шириной 1–10 нм).

Другие важные особенности всех АО фильтров – отсутствие подвижных элементов; немеханический (цифровой) способ управления спектральными характеристиками источника; возможность фильтрации в многооконном режиме при мультиспектральном возбуждении [11, 12].

В работе [8] показана возможность воспроизведения цветов в промежутке между одновременно выделяемой АО фильтром парой спектральных компонент. В работе [13] для регулирования соотношения интенсивностей мод RGB лазера использовалась мультиспектральная дифракция, в работе [14] продемонстрировано управление

Рис. 1. Цветовое пространство и его охват при разных способах воспроизведения цвета



также и шириной спектральных полос, а в работе [15] показана возможность корреляционного спектрального распознавания объектов. Применение АО фильтра в режиме мультичастотной дифракции в схеме с широкополосным излучением источника позволяет выбирать длины волн опорных цветов, образующих цветовой охват. Это даёт возможность не только воспроизводить цвет с высокой точностью и скоростью, но и управлять величиной цветового охвата за счёт перестройки опорных цветов.

В то же время не были исследованы следующие важные вопросы: возможность воспроизведения (синтеза) цвета по заданным цветовым координатам; возможность управления величиной цветового охвата; оценка точности воспроизведения цвета. В настоящей работе эти вопросы рассмотрены и исследованы на разработанной экспериментальной установке.

### Задача цветового синтеза

Задача синтеза цвета по заданным цветовым координатам в цветовом пространстве  $XYZ$  имеет не единственное решение, то есть разные спектральные составы могут соответствовать одному и тому же цвету. Так, цвет можно получить либо с помощью двух опорных цветов, когда координаты данного цвета лежат на отрезке между ними, либо с помощью образующих треугольник трёх, когда они лежат внутри этого треугольника [16]. Соотношение интенсивностей опорных спектральных полос при этом вычисляется с использованием метода центра тяжести [16, 17].

Для вычисления цветовых координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и координат цветности  $x$ ,  $y$ ,  $z$  источника света с относительным спектральным распределением энергии излучения  $E(\lambda)$  в колориметрической системе  $XYZ$ , с функциями (кривыми) сложения  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$ , используются формулы [18, 19]

$$X = \int \bar{x}(\lambda)E(\lambda)d\lambda,$$

$$Y = \int \bar{y}(\lambda)E(\lambda)d\lambda,$$

$$Z = \int \bar{z}(\lambda)E(\lambda)d\lambda,$$

$$x = X / (X + Y + Z),$$

$$y = Y / (X + Y + Z),$$

$$z = Z / (X + Y + Z).$$

Рис. 2. Полосы пропускания пары дифрагированных пучков ( $\pm 1$  порядков) АО фильтра при перестройке по спектру

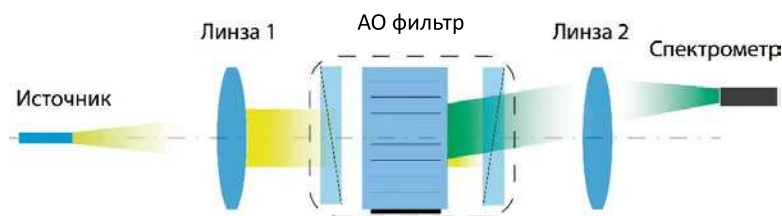
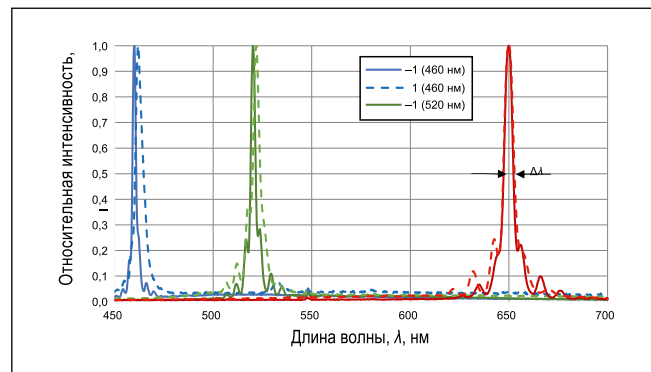


Рис. 3. Схема установки для воспроизведения цвета и его контроля

С учётом возможности регулировки положения, ширины и интенсивности выделяемых АО фильтром спектральных компонентов (узких полос) возникает возможность широкого выбора цветовых координат опорных цветов. При этом АО фильтр способен быстро перестраивать эти цвета (за доли секунды). Общий световой охват, реализуемый с помощью одного АО фильтра, определяется пределами возможных изменений его параметров, в частности диапазоном спектральной перестройки, спектральным коэффициентом передачи и полосой пропускания.

Использувавшийся в работе АО фильтр имел полосу в 3–6 нм, в зависимости от  $\lambda$ , до 4-х одновременно выделяемых полос и спектральный диапазон 440–750 нм. Для повышения энергетической эффективности АО фильтра, который в обычном режиме выделяет лишь одну поляризационную компоненту, может использоваться одновременная дифракция в +1 и в -1 порядки, что позволяет при одной и той же мощности управляющего ультразвукового сигнала повышать интенсивность отфильтрованного излучения примерно в 2 раза при незначительном увеличении ширины результирующей спектральной полосы (до 10 нм) из-за небольшого относительного сдвига двух пучков (рис. 2).

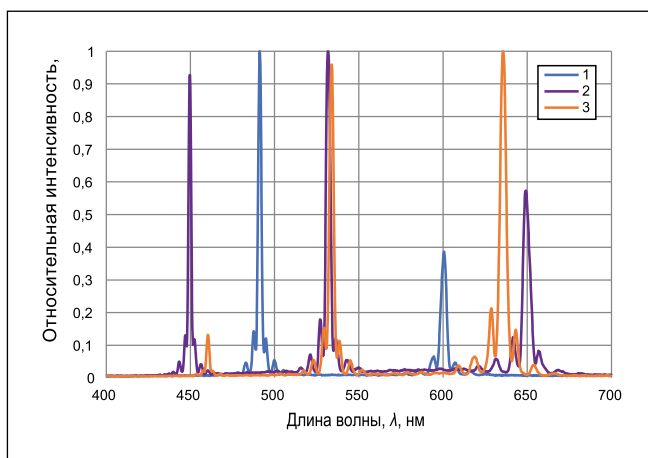
Далее рассматривается оценка точности воспроизведения цвета и величины цветового охвата для режима выделения одного пучка.

### Экспериментальное тестирование установки для синтеза цвета

Схема данной установки приведена на рис. 3. Излучение источника (галогенная лампа накаливания) коллимируется с помощью линзы 1 с фокусным расстоянием 37 мм и направляется на АО фильтр, расположенный на расстоянии 70 мм от неё, работающий в мультичастотном режиме и выделяющий несколько спектральных полос одновременно. Дифрагированные (отфильтрованные) пучки фокусируются с помощью линзы 2 с фокусным расстоянием 50 мм, расположенной в 100 мм от АО фильтра, на спектрометр, который служит для контроля за спектральным составом излучения. Отделение от недифрагированного пучка излучения (широкополосного) происходит с помощью пары скрещённых поляризаторов.

В ходе тестирования установки синтезировались цвета в широкой области цветового пространства  $XYZ$ . В частности, белый цвет с координатами цветности  $x = 0,3333$ ,  $y = 0,3333$  воспроизводился смешением излучений как на двух, 491 и 600 нм, так и на

Рис. 4. Спектральный состав излучения: при двухволновом (1) и трёхволновом (2) синтезах белого цвета и синтезе оранжевого цвета (3)



трёх, 450, 532 и 650 нм, длинах волн (рис. 4). При этом отклонения этих координат от соответствующих требуемому цвету следующие: в первом случае  $\Delta x = 0,0073$ ,  $\Delta y = -0,0020$ , а во втором  $\Delta x = 0,0004$ ,  $\Delta y = 0,0002$ .

Таким образом, погрешность воспроизведения цвета зависит от выбора опорных цветов.

Приведём другой пример – воспроизведение цвета с координатами цветности  $x = 0,3760$ ,  $y = 0,4920$  (оранжевый) при его задании тремя  $\lambda = 460, 520, 650$  нм – дало погрешности  $\Delta x = 0,0010$ ,  $\Delta y = -0,0001$ , что ниже порога цветоразличения.

Поскольку в первом приближении можно считать выделяемые АО фильтром компоненты (полосы) достаточно узкими, цветовой охват разработанной системы «источник излучения – перестраиваемый АО фильтр» близок к охвату монохроматическим перестраиваемым источником излучения (рис. 1) Учёт конечной полосы пропускания АО фильтра (3–6 нм), позволяет по вышеприведённым формулам оценить отклонения реального охвата от локуса цветности:  $\Delta x = 0,0012$ ,  $\Delta y = -0,0011$  на  $\lambda = 450$  нм;  $\Delta x = -0,0025$ ,  $\Delta y = -0,0014$  на  $\lambda = 520$  нм;  $\Delta x = 0,0004$ ,  $\Delta y = -0,0002$  на  $\lambda = 650$  нм, что соответствует почти 100-% чистоте цвета [16].

## Выводы

Перестраиваемые АО фильтры, работающие в многооконном (мультичастотном) режиме, могут быть основой систем синтеза цвета с произвольно задаваемыми координатами цветности типа «источник излучения – перестраиваемый АО фильтр». При этом скорость регулирования цвета определяется временем перестройки АО фильтра и лежит в миллисе-

кундном диапазоне, а возможность независимо управлять координатами цветности спектральных компонент (узких полос) позволяет менять цветовой охват. Разработанная система синтеза цвета позволяет воспроизводить цвета, в том числе приближённые к локусу цветности с точностью в пределах порога цветоразличения. Такая система может находить применение в исследованиях цветового восприятия и аномалий цветового зрения, а также в других областях, связанных с колориметрией, психофизиологией, спектральным анализом, биомедициной и другими прикладными и научными областями, требующими управления спектральным составом излучения [11, 15].

## Финансирование

Исследование проводилось при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20–58–18007.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hardy L. G. H., Rand G., Rittler M.C. Tests for the detection and analysis of color-blindness // JOSA. – 1945. – Vol. 35. – P. 268–275/
2. Bates I., Džimbeg-Malčić V., Itrić K. Optical deterioration of samples printed with basic Pantone inks // Acta Graphica: znanstveni časopis za tiskarstvo i grafičke komunikacije. – 2012. – Vol. 23. – P. 79–90.
3. Lei J., Xin G., Liu M. Spectral assemblage using light emitting diodes to obtain specified lighting characteristics // Applied Optics. – 2014. – Vol. 53, No. 5. – P. 8151–8156.
4. Neumann A. et al. Four-color laser white illuminant demonstrating high color-rendering quality // Optics express. – 2011. – Vol. 19/ Suppl. 4, No. 104. – P. A982–A990.
5. Жбанова В.Л. Вопросы применения цифровой колориметрии в современных

научных исследованиях // Светотехника. – 2021. – № 2. – С. 5–14.

6. Lee H. et al. Color-tunable organic light-emitting diodes with vertically stacked blue, green, and red colors for lighting and display applications // Optics express. – 2018. – Vol. 26, No. 14. – P. 18351–18361.

7. Халимов Ю.Ш. и др. Профессиональные заболевания, вызванные воздействием лазерного излучения // Вестник Российской военно-медицинской академии. – 2019. – № 2. – С. 209–214.

8. Machikhin A.S. et al. Acousto-optical tunable filter for a swept light source with variable transmission function // Optical Design and Testing VIII. – 2018. – Vol. 10815. – P. 129–134.

9. Park B. et al. AOTF hyperspectral microscopic imaging for foodborne pathogenic bacteria detection // Proceedings: Sensing for Agriculture and Food Quality and Safety III. – SPIE. – 2011. – Vol. 8027. – P. 40–50.

10. Шановалов В.В. и др. Источник света с произвольно регулируемым спектральным составом для биомедицинских спектральных анализаторов // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2009. – № 11. – С. 16–20.

11. Мазур М.М., Судденко Ю.А., Пожар В.Э. Многооконные акустооптические фильтры для корреляционной спектроскопии // Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128, Вып. 2. – С. 284–289. DOI: 10.21883/OS.2020.02.48980.211–19.

12. Проклов В.В., Бышевский-Конопко О.А., Филатов А.Л. О генерации спектрально-кодированных сигналов в некогерентных системах оптической связи на базе многополосных акустооптических фильтров // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41, № 20. – С. 37–43.

13. Мачихин А.С. и др. Атенюация интенсивностей спектральных компонент многоволновой импульсной лазерной системы за счёт брегговской дифракции излучения на нескольких акустических волнах // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52, № 5. – С. 454–458.

14. Морозов А.И., Пожар В.Э. Исследование характеристик акустооптического фильтра с частотной модуляцией / Материалы XXV Международной научной конференции «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы». – СПб, 2022. – С. 110–115.

15. Пожар В.Э., Великовский Д.Ю. Спектральное распознавание объектов с помощью многооконных акустооптических фильтров // Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128, Вып. 7. – С. 1035–1041. DOI: 10.21883/OS.2020.07.49578.107–20.

16. Гуревич М.М. Цвет и его измерение. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. – 268 с.

17. Zhang R. et al. A color-theory-based chromaticity coordinates tracking strategy for LED color-mixing system // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2020. – Vol. 36, No. 3. – P. 3269–3278.

18. Юстова Е.Н. Цветовые измерения (Колориметрия). – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2000. – 398 с.

19. Wyman C., Sloan P.P., Shirley P. Simple analytic approximations to the CIE XYZ color matching functions // J. Comput. Graph. Tech. – 2013. – Vol. 2, No. 2. – P. 11.



**Беляева Алина Сергеевна**, младший научный сотрудник НТЦ УП РАН, ассистент СПб ГУАП, аспирант Университета ИТМО. Область научных интересов: расчёт оптических систем,

неизображающая оптика, колориметрия, акустооптика



**Романова Галина Эдуардовна**, кандидат техн. наук, доцент. Окончила в 2002 г. СПб ГИТМО (ТУ). Доцент Университета ИТМО. Область научных интересов: расчёт оптических систем,

неизображающая оптика, оптическое приборостроение



**Батшев Владислав Игоревич**, кандидат техн. наук. Окончил в 2007 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Старший научный сотрудник НТЦ УП РАН, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: расчёт оптических систем, акустооптика, приборостроение

расчёт оптических систем, акустооптика, приборостроение



**Шарикова Милана Олеговна**, инженер-исследователь и аспирант НТЦ УП РАН. Область научных интересов: акустооптика, видеоспектрометрия, оптическое и акустооптическое приборостроение

акустооптика, видеоспектрометрия, оптическое и акустооптическое приборостроение

## Новый керамический материал светится при деформации

Немецкие учёные создали прозрачную и твёрдую стеклокерамику, которая люминесцирует под механическим напряжением. Такой материал может стать основой для датчиков, отслеживающих деформации мостов и другой инфраструктуры и при этом вообще не потребляющих энергии.

Разработчики из Йенского университета имени Фридриха Шиллера пишут об этом в статье, опубликованной в журнале «Optical Materials Express».

Специальный выпуск журнала посвящён Международному году стекла, которым ООН объявила 2022-й, чтобы отдать должное важности этого материала в истории и сегодняшнем дне человечества. Новинка, представленная Лотаром Вондрачеком и его коллегами, также получена на этой основе: стеклокерамические материалы используют стекло с добавлением кристаллов других минералов. В них сочетаются аморфная и кристаллическая фазы с разными характеристиками, что придаёт стеклокерамике новые полезные свойства – от расцветки до твёрдости и теплопроводности.

В новом материале используется стекло германата калия с добавлением кристаллов галлата цинка (ZGO), легированных хромом

и гомогенно, равномерно распределённых по всему объёму. Размеры кристаллов настолько малы, что никак не влияют на прозрачность стекла. Вместе с тем они придают стеклокерамике механолюминесцентные свойства – способность излучать под действием давления или другого механического стресса. Эксперименты показали, что эти свойства сохраняются со временем, а яркость свечения прямо коррелирует с приложенной силой.

Как отмечают авторы работы, до сих пор такие материалы существовали в основном в виде порошков, не слишком удобных для практического применения. В отличие от них, стеклокерамике можно придать любые устойчивые формы – от плоских до вытянутого тонкого волокна – и использовать в самых разных областях.

Учёные предполагают, что новый материал может найти применение в качестве датчика, отслеживающего движения «конечностей» роботов или напряжения, возникающие в объектах инфраструктуры. Возможно, появятся даже новые осветительные приборы, светящие под давлением.

nanonetnewsnet.ru  
29.07.2022

## «Новый чёрный» поглотитель света для солнечных элементов следующего поколения

Российские учёные создали новый материал на основе чёрного кремния, покрытого силицидом магния ( $Mg_2Si$ ). Он демонстрирует отличные антиотражающие и светопоглощающие свойства (до 96 % падающего света) в широком спектральном диапазоне, что важно для создания солнечных элементов и ИК фотодетекторов нового поколения с повышенной энергоэффективностью. Результаты работы, поддержанной грантом РФФИ, опубликованы на страницах высокорейтингового журнала «Applied Surface Science».

В основе солнечной энергетики – «зелёной» альтернативы традиционной углеводородной – лежит использование солнечных элементов, которые преобразуют энергию падающих фотонов в электрический ток. Самый популярный материал для создания солнечных элементов – кремний, а особенно перспективна его так называемая чёрная форма. Последняя представляет собой кристалл с наноконусами на поверхности – такая структура способна хорошо поглощать свет и лишь незначительно его отражать, что и обуславливает её цвет. Однако из-за особенностей энергетической структуры (диапазона возможных энергий электронов в материале) есть серьёзные ограничения по поглощению ближнего ИК излучения – значительной части солнечного света.

«Мы придумали, как преодолеть их, добавив покрытие из материала с меньшей, чем у кремния, шириной ённой зоны. Для этого пришлось, по сути, вырастить целый сад: путём испарения в вакууме мы нанесли на наноконусы чёрного кремния слой силицида магния, который, благодаря особенностям роста,

формирует силицидную оболочку вокруг наноконусов и шестигульные чешуйчатые «цветы» на его остриях. Подход простой, быстрый, масштабируемый и не требует применения высоких температур и сверхвысокого вакуума», – рассказывает руководитель проекта, поддержанного грантом РФФИ, Александр Шевлягин, кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН.

Сотрудники ИАПУ ДВО РАН (Владивосток) вместе с коллегами из Дальневосточного федерального университета (Владивосток), Института химии ДВО РАН (Владивосток) и Института физики полупроводников СО РАН (Новосибирск) изучили структуру и оптические свойства полученного наноструктурированного материала, который назвали чёрным силицидом. Предложенный метод нанесения слоя силицида магния не меняет исходную геометрию чёрного кремния, также давая возможность нарастить на нём кристаллы иной формы, придающие новые свойства, что и показали авторы.

В сравнении с исходным чёрным кремнием материал отражает примерно в пять раз меньше (3,7 %) и поглощает не менее 88 % излучения в спектральном диапазоне 200–1800 нм, тем самым захватывая весь видимый, большую часть УФ и значительную часть ИК диапазонов, которые «доходят» до Земли от Солнца. После оптимизации подхода удалось достичь максимума поглощения в 96 %, что сравнимо с другими известными ультрачёрными материалами.

indicator.ru  
27.07.2022