

# Экспериментальное исследование влияния типа фотоприёмника на характеристики оптических министиков унифицированных человеко-машинных интерфейсов

С.А. ГОЛУБИН<sup>1,4</sup>, А.Н. ЛОМАНОВ<sup>2</sup>, В.С. НИКИТИН<sup>3</sup>, В.М. КОМАРОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «НПП «Тензосенсор», г. Рыбинск

<sup>2</sup> ФГБОУ ВПО «РГТУ им. П.А. Соловьёва», г. Рыбинск

<sup>3</sup> ООО «НТЦ «Интрофизика», г. Рыбинск

<sup>4</sup> E-mail: 707gsa@mail.ru

## Аннотация

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований влияния разных типов фотоприёмников цифровых оптических министиков на их функцию преобразования, т.е. на зависимость полезного сигнала министика от величины отклонения его управляющей рукоятки. Поставленная задача решалась методами экспериментальных исследований. Исследовались схемы с фотодиодом (*PIN*-фотодиод *PD15–21B/TR8* компании *Everlight*) и схемы с фототранзистором (фототранзистор *KP2012P3C* компании *Kingbright*). Для исследования использовался автоматизированный испытательный стенд, который позволяет задавать угол поворота министика и величину отклонения рукоятки министика от центрального положения влево или вправо. Воздействие на министика задавалось программным обеспечением стенда. По результатам тестирования программа стенда автоматически строила лучевую диаграмму. Качество сигнала министика оценивалось по разрешению, точности, нелинейности и гистерезису. В результате экспериментов получены следующие результаты. Министик, используемый в качестве фотоприёмника фототранзистор, обеспечивает амплитуду выходного сигнала и разрешение, в 3,5–4 раза большие, чем у министика с фотодиодом. Это позволяет использовать министики с фототранзисторами для высокоточного управления сложной робототехникой, манипуляторами и летательными аппаратами, а также для построения на их основе джойстиков и унифицированных человеко-машинных интерфейсов. Показатели точности, нелинейности и гистерезиса у министиков обоих типов сопоставимы и удовлетворяют

основным требованиям, предъявляемым к средствам управления.

Таким образом, наилучшими с точки зрения качества сигнала могут быть признаны министики на основе фототранзисторов. Учитывая одинаковые для обоих фотоприёмников схемотехнику, габаритные размеры и стоимость элементной базы фотоприёмников, следует признать министики на основе фототранзисторов более перспективными коммутационными устройствами.

**Ключевые слова:** оптический министик, управление робототехникой, коммутационное устройство, упругодеформируемый полимерный элемент, фотодиод, фототранзистор, экспериментальное исследование.

## 1. Введение

В настоящее время роботизация постепенно входит в стадию, когда применение получают робототехнические комплексы, состоящие из множества разнотипных роботов, дистанционно управляемых операторами. Примером является роботизированный комплекс для тушения лесных пожаров, разрабатываемый компанией ООО «НПП «Тензосенсор» [1], содержащий три разных специализированных типа сухопутных роботов и дрон воздушной разведки. Для эффективного управления роботами таких комплексов необходимы компактные, многофункциональные и унифицированные устройства ввода. Таким требованиям удовлетворяют цифровые оптические министики. Министик представляет собой двухкоординатный миниджойстик, который управляется пальцем руки. Движение пальцев в 5–7 раз быстрее движения кисти руки, что позволяет намного быстрее и точнее формировать управляющие

воздействия. Малые размеры министиков позволяют размещать их по несколько штук на панели или ручке управления.

Компанией ООО «НПП «Тензосенсор» в сотрудничестве со специалистами РГТУ им. П.А. Соловьёва была разработана конструкция оптического министика, рассмотренная в [2–8] и отражённая в патенте [10] (рис. 1, 2). По сравнению с аналогами, оптические министики отличаются простотой конструкции, технологичностью и высокой надёжностью. За счёт возможности перепрограммирования выполняемых функций, они обладают многофункциональностью, а также бесшумностью, пожаро- и взрывобезопасностью, травмо- и взрывобезопасностью, малым весом и габаритами [11, 12].

Оптический министик состоит из печатной платы 1 и упругодеформируемого элемента 2 (рис. 2). На упругодеформируемом элементе 2 расположена управляющая рукоятка 3. Упругодеформируемый элемент из эластичного полимера содержит светоотражающую поверхность 4, обра-



Рис. 1. Внешний вид оптического министика

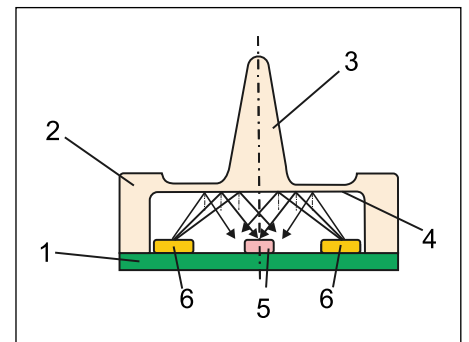


Рис. 2. Оптический министик: 1 – печатная плата; 2 – упругодеформируемый элемент; 3 – управляющая рукоятка; 4 – светоотражающая поверхность; 5 – фотоприёмник; 6 – светодиод

щённую к печатной плате 1. На плате 1 установлены фотоприёмник 5 и несколько источников света 6, которые соединены с управляющим микропроцессором и обращены к светоотражающей поверхности 4.

Принцип работы оптического министика основан на эффекте отражения света от светоотражающей поверхности упругодеформируемого элемента. При нажатии на управляющую рукоятку светоотражающая поверхность деформируется в зависимости от направления и величины нажатия. Деформация светоотражающей поверхности изменяет распределение отражённого света, которое фиксируется фотоэлектрическими преобразователями. На основании показаний фотоэлектрических преобразователей микропроцессор министика производит вычисление текущего положения управляющей рукоятки.

Так как тип фотоэлектрических преобразователей чрезвычайно сильно влияет на качество работы министика, было очень важно выяснить влияние разных типов фотоприёмника на характеристики оптических министиков.

## 2. Методы исследования

**Научной задачей** исследования являлось определение влияния типа фотоприёмника министика на его функцию преобразования, т.е. на зависимость полезного сигнала министика от величины отклонения его управляющей рукоятки.

Поставленная задача решалась методами экспериментальных исследований.

Полезный сигнал министика представляет собой два числовых значения, которые соответствуют величинам отклонения рукоятки министика по координатам  $X$  и  $Y$ . Единицей измерения выходного сигнала являются отсчёты аналого-цифрового преобразователя управляющего микроконтроллера министика, которые соответствуют отношению напряжения на фотоэлектрическом преобразователе министика к опорному напряжению аналого-цифрового преобразователя. Напряжение на фотоэлектрическом преобразователе определяется интенсивностью падающего на него отражённого света, которая зависит от величины отклонения управляющей рукоятки министика.

Методом проведения эксперимента являлся метод регистрации показаний министика по осям  $X$  и  $Y$  в точках с заданными величиной отклонения рукоятки министика от центрального положения и направлением отклонения, которое задаётся углом поворота корпуса министика.

Для исследования функции преобразования министика использовался специальный испытательный стенд для автоматизированного исследования характеристик министиков. Стенд позволял задавать угол поворота министика и величину отклонения рукоятки министика от центрального положения влево или вправо. Воздействие на исследуемый министик задавалось программным обеспечением стенда. Более подробное описание стенда приведено в [3–4, 6–7, 9].

Для обеспечения адекватности эксперимента по исследованию влияния типа фотоприёмника на показания министиков экспериментальные образцы были изготовлены со следующими параметрами:

- упругодеформируемый элемент – с одинаковыми размерами и формой;
- тип источников света – инфракрасные светодиоды *KP-3216F3C* производства компании *Kingbright*;
- тип измерителя – 10-разрядный аналогово-цифровой преобразователь, интегрированный в микроконтроллер *PIC16F1704-I/ML* производства компании *Microchip*.

В качестве фотоэлектрических преобразователей были использованы:

- в схеме с фотодиодом – *PIN*-фотодиод *PD15–21B/TR8* производства компании *Everlight*;
- в схеме с фототранзистором – фототранзистор *KP2012P3C* производства компании *Kingbright*.

Измерение показаний министиков проводилось в следующих условиях:

- пределы отклонения рукоятки министика от центра: в пределах  $\pm 5$  мм с шагом 0,5 мм;
- направление изменения величины отклонения рукоятки: от крайнего левого положения ( $-5$  мм) до крайнего правого положения ( $+5$  мм) и обратно, от крайнего правого положения ( $+5$  мм) до крайнего левого положения ( $-5$  мм);
- угол поворота министика: от 0 до  $157,5^\circ$  с шагом  $22,5^\circ$ ;
- число замеров показаний: 5, с последующим усреднением полученных значений.

По результатам тестирования программа стенда автоматически строила лучевую диаграмму. На лучевой диаграмме результаты измерений полезного сигнала министика представлены в виде точек с координатами  $X$  и  $Y$ , соответствующими числовым значениям выходного сигнала министика. Результаты измерений, полученные при отклонении рукоятки вправо и влево представлены, соответственно, точками красного и зелёного цвета. Лучевая диаграмма позволяет визуально оценить качество выходного сигнала министика: амплитуду сигнала, разрешение, точность, нелинейность, гистерезис.

Качество полезного сигнала реального министика оценивалось по следующим показателям:

1. Разрешение – параметр, характеризующий чувствительность министика.
2. Точность – параметр, характеризующий разброс значений полезного сигнала при определённом отклонении рукоятки.
3. Нелинейность – параметр, характеризующий отклонение кривой функции преобразования исследуемого министика от прямой линии.
4. Гистерезис – параметр, характеризующий различие значений выходного сигнала при одном и том же значении отклонения рукоятки, но разных направлениях его изменения.

Разрешение представляет собой изменение числа значений полезного сигнала на единицу величины отклонения рукоятки. Разрешение определяет чувствительность министика: более высокое разрешение позволяет более точно определить положение управляющей рукоятки министика.

Разрешение министика определяется по формуле

$$R = |\Delta x / \Delta L|, \quad (1)$$

где  $R$  – разрешение министика,  $\Delta L$  – шаг изменения величины отклонения рукоятки министика,  $\Delta x$  – величина изменения показаний министика при изменении величины отклонения рукоятки министика на  $\Delta L$ .

Для оценки точности применялось значение среднеквадратического отклонения измеренных показаний в точке с заданным отклонением рукоятки. Относительное значение точности показаний  $\delta$  вычислялось по формуле:

$$\delta = |\text{СКО}/\Delta X|, \quad (2)$$

где  $\delta$  – относительное отклонение показаний министика по данной координате, СКО – среднее квадратическое отклонение показаний министика по данной координате,  $\Delta X$  – диапазон значений (амплитуда) функции преобразования по данной координате.

Для оценки нелинейности при помощи метода наименьших квадратов строилась аппроксимирующая прямая  $X = k \cdot x + b$ . Далее вычислялась нелинейность  $N_L$ :

$$N_L = |X - X_{\text{РАСЧ}}|/\Delta X, \quad (3)$$

где  $X$  – фактическое значение показаний министика по данной координате в данной точке;  $X_{\text{РАСЧ}}$  – значение показаний министика, вычисленное при помощи аппроксимирующей функции;  $\Delta X$  – диапазон значений (амплитуда) функции преобразования по данной координате.

Гистерезис  $G$  показаний оценивается по формуле:

$$G = |X_{\text{ПР}} - X_{\text{Л}}|/\Delta X, \quad (4)$$

где  $X_{\text{ПР}}$  и  $X_{\text{Л}}$  – значения показаний министика по данной координате в данной точке при перемещении рукоятки, соответственно, вправо и влево;  $\Delta X$  – диапазон значений (амплитуда) функции преобразования по данной координате.

### 3. Результаты экспериментальных исследований

Лучевые диаграммы исследованных министиков приведены на рис. 3.

Графики функции преобразования министиков по осям  $X$  (угол поворота  $0^\circ$ ) и  $Y$  (угол поворота  $90^\circ$ ) представлены, соответственно, на рис. 4 и 5.

Для возможности сравнения графики функций различных министиков наложены друг на друга.

Результаты расчётов представлены в таблице.

### 4. Выводы и рекомендации

1. Выбранные схемы министиков на основе упругодеформируемого элемента, инфракрасных светодиодов и фотоприёмников на основе фотодиода и фототранзистора позволяют создавать работоспособные устройст-

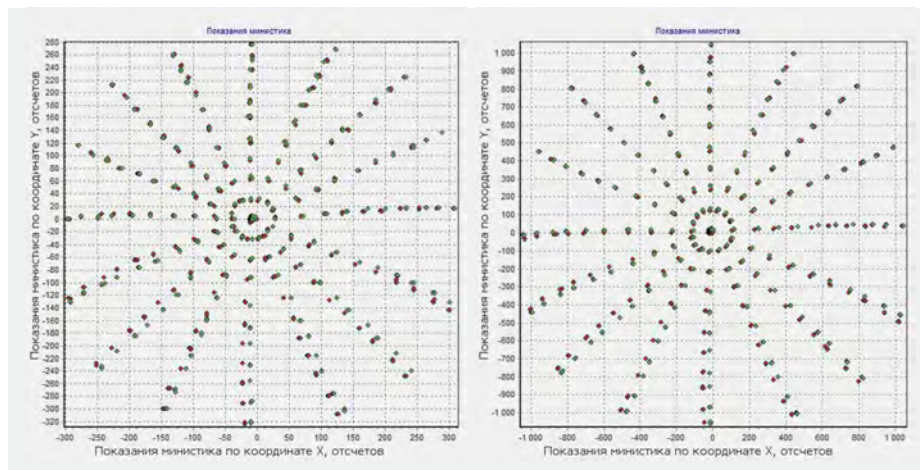


Рис. 3. Лучевые диаграммы показаний министиков. Отклонения рукоятки вправо и влево представлены, соответственно, точками красного и зелёного цвета: а – министик с фотодиодом; б – министик с фототранзистором

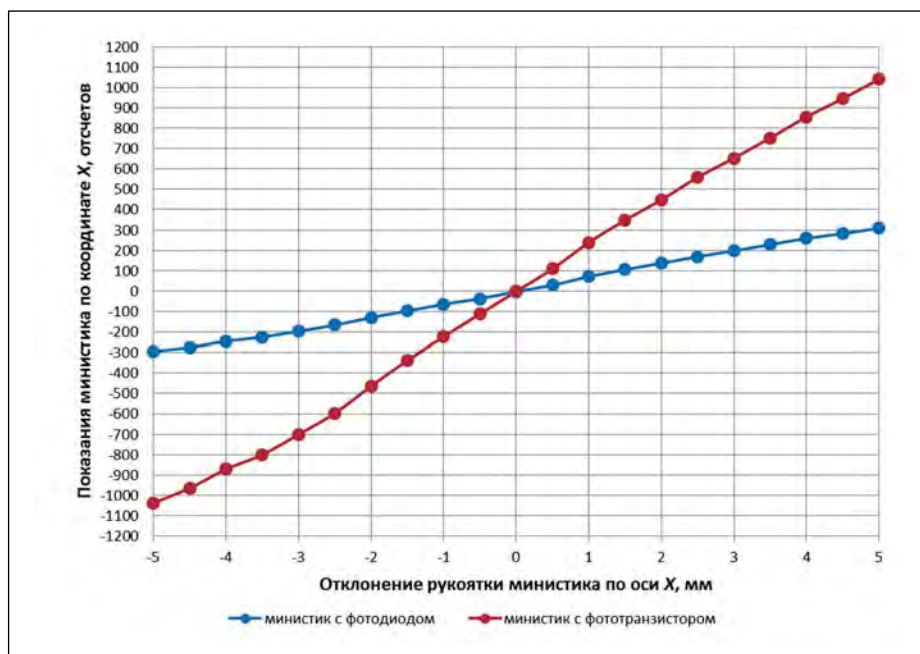


Рис. 4. Функции преобразования министиков различных схем по координате  $X$  (при угле поворота министика  $0^\circ$ )

ва, обеспечивающие приемлемые для применения в органах управления характеристики. Использование выходного сигнала министика в средствах управления не требует математически сложной и ресурсоёмкой обработки, что упрощает реализацию и увеличивает скорость реагирования.

2. Министик, использующий в качестве фотоприёмника фототранзистор, обеспечивает амплитуду выходного сигнала и разрешение в 3,5–4 раза большие, чем у министика с фотодиодом. Минимальное разрешение министика с фототранзистором значительно превышает 100 отсчётов на миллиметр, что значительно превосходит все существующие анало-

ги и обеспечивает гарантированную чувствительность министика 0,01 мм. Это позволяет использовать министики с фототранзисторами для высокоточного управления сложной робототехникой, манипуляторами и летательными аппаратами, а также для построения на их основе джойстиков и унифицированных человеко-машинных интерфейсов.

3. Показатели точности, нелинейности и гистерезиса у министиков обоих типов сопоставимы и удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к средствам управления. Министики на основе фототранзисторов обеспечивают несколько более высокие показатели.

Параметры качества сигналов министиков

Тип фотоприёмника министика	Министик с фотодиодом	Министик с фототранзистором
Диапазон значений (амплитуда) по оси X, отсчётов	602	2078
Диапазон значений (амплитуда) по оси Y, отсчётов	599	2106
Мин. разрешение по оси X, отсчётов/мм	37	142
Мин. разрешение по оси Y, отсчётов/мм	39	162
Макс. разброс значений	< 0,5	< 0,5
Макс. нелинейность по оси X, %	3,24	2,58
Макс. нелинейность по оси Y, %	4,25	2,64
Макс. гистерезис по оси X, %	1,83	2,02
Макс. гистерезис по оси Y, %	2,34	1,66

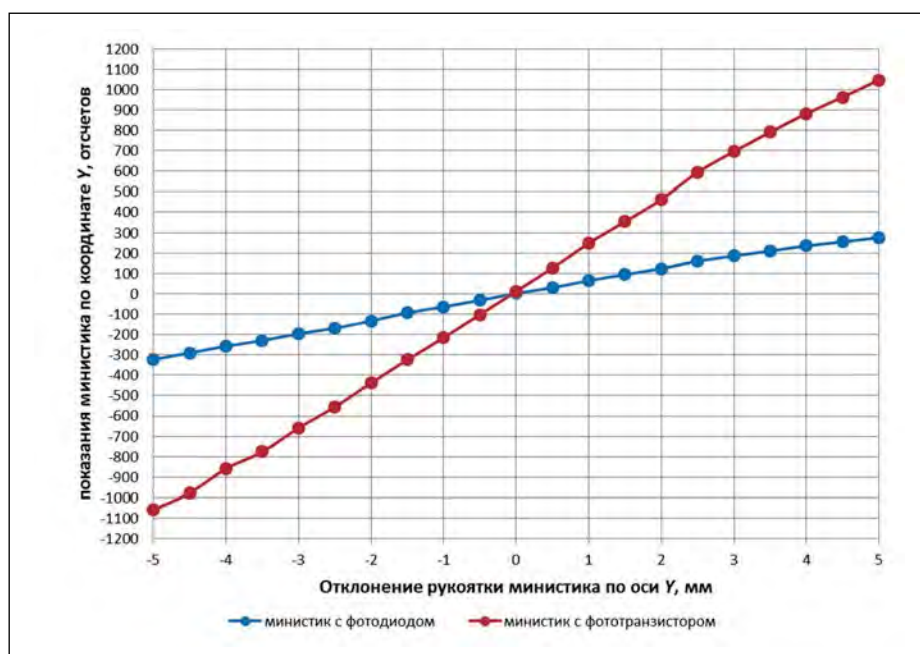


Рис. 5. Функции преобразования министиков различных схем по координате Y (при угле поворота министика 90°)

4. К недостаткам фототранзисторов по сравнению с фотодиодами обычно относят их более низкое быстродействие. Время нарастания и время спада для использованных в эксперименте фототранзисторов составляют не более чем 15 мкс. Однако время реакции человека в среднем составляет не менее чем 100 мс, что в 6,6 тысяч раз дольше, и для использования в министиках задержку при работе фототранзисторов можно считать несущественной.

Таким образом, наилучшими с точки зрения качества сигнала могут быть признаны министики на основе фототранзисторов. Учитывая

одинаковые для обоих фотоприёмников схемотехнику, габаритные размеры и стоимость элементной базы, следует признать министики на основе фототранзисторов более перспективными коммутационными устройствами.

Исследования проводятся при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения Соглашения от 26 сентября 2017 г. № 14.579.21.0151. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований и экспериментальных разработок RFMEFI57917X0151. Авторы призна-

тельны мониторам и экспертам Дирекции НТП за корректное и доброжелательное обсуждение полученных результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин В.С., Белов Р.Б. Роботизированный комплекс для тушения лесных пожаров // Materials of the 13<sup>th</sup> Int. Scientific and Practical Conf. «FUNDAMENTAL AND APPLIED SCIENCE – 2017» – Sheffield, Science and Education LTD.– 2017. – Volume 3. – P. 24–27. //URL: <http://www.rusnauka.com/books/2017-10-28-A4-tom-3.pdf>
2. Голубин С.А., Ломанов А.Н., Никитин В.С., Комаров В.М., Семенов Э.И. Экспериментальное исследование характеристик оптических министиков // Светотехника.– 2015.– № 6. – С. 17–20.
3. Голубин С.А., Ломанов А.Н., Никитин В.С., Комаров В.М., Семенов Э.И. Исследование влияния светотехнической схемы оптических министиков на их характеристики // Светотехника.– 2016.– № 6. – С. 34–38.
4. Голубин С.А., Ломанов А.Н., Никитин В.С., Комаров В.М., Семенов Э.И. Исследование характеристик оптического министика с VCSEL-лазером // Светотехника.– 2017.– № 1. – С. 24–27.
5. Golubin, S.A., Lomanov, A.N., Nikitin, V.S., Komarov, V.M. Experimental research on the performance of optical ministicks with a common receiver // Light&Engineering.– 2015. – Vol. 23, No. 4. – P. 81–87.
6. Golubin, S.A., Lomanov, A.N., Nikitin, V.S., Komarov, V.M., Semenov, E.I. Experimental study of how lighting patterns affect optical ministicks characteristics // Light&Engineering.– 2016. – Vol. 24, No. 4. – P. 105–110.

7. Golubin, S.A., Lomanov, A.N., Nikitin, V.S., Komarov, V.M., Semenov, E.I. Study of Characteristics of VCSEL-based Optical Ministicks // Light&Engineering.– 2016. – Vol. 24, No. 4. – P. 111–116.

8. Голубин С. А., Никитин В. С., Белов Р.Б. Цифровые оптические министикки для управления робототехническими комплексами // Электросвязь.– 2015.– № 11. – С. 68–69.

9. Никитин В.С., Белов Р.Б. Управлять без рычагов // Наука и жизнь.– 2012. – № 12. – С. 73–76.

10. Патент РФ № 2594992, 26.01.2015.

11. Патент РФ № . 2455678, 13.01.2011.



**Голубин Сергей Александрович**, инженер. Окончил в 2013 г. РГАТУ им. П.А.Соловьёва. Инженер-системотехник ООО «НПП Тензосенсор». Аспирант ФГБОУ ВПО «РГАТУ им. П.А. Соловьёва»



**Ломанов Алексей Николаевич**, кандидат техн. наук. Окончил в 2003 г. РГАТУ им. П.А.Соловьёва. Декан факультета радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВПО «РГАТУ им. П.А. Соловьёва»



**Никитин Владимир Степанович**, кандидат техн. наук. Окончил в 1976 г. Тбилисское Высшее артиллерийское командное училище. Директор ООО «НТЦ «Интрофизика»



**Комаров Валерий Михайлович**, кандидат техн. наук, профессор. Окончил 1972 г. РГАТУ им. П.А.Соловьёва. Зав. кафедрой «Вычислительные системы» ФГБОУ ВПО «РГАТУ им. П.А.Соловьёва»

## Минэнерго США выделяет до \$15 млн на исследования в области освещения

Министерство энергетики США объявило о выделении до \$15 млн на проведение предварительных инновационных исследований в целях стимулирования прогресса в области освещения СД. Это финансирование ускорит разработку высококачественных изделий с СД и органическими СД (ОСД), способных сократить расходы американских семей и бизнеса на электроэнергию и увеличить конкурентоспособность США на мировом рынке.

Объявленное финансирование будет способствовать реализации стоящей перед правительством США задачей обеспечения лидирующего положения США в области освещения СД путём поддержки проведения инновационных исследований в следующих четырёх направлениях:

### 1. Базовые исследования в области СД и ОСД и междисциплинарные исследования в области освещения

Эти проекты будут способствовать развитию научных основ разработки СД, включая научные подходы, технические вопросы и вопросы физиологического воздействия и эффективности использования света СД.

### 2. Подтверждение работоспособности концепции и разработка опытных образцов СД, ОСД и изделий с ними

Эти проекты будут направлены на проведение предварительных исследований с целью создания опытных образцов изделий с СД, равно как и на подтверждение подхода к выбору материалов для СД, устройств и све-

тильников с СД. Проводимые в этой области исследования будут сосредоточены на создании опытных образцов высокоэффективных СД, усовершенствованных систем освещения с СД, электронных устройств для СД большой мощности, ОСД генераторов света, платформ освещения с ОСД, а также на выведении света из ОСД панелей и его использовании.

### 3. НИОКР по развитию производственных технологий

Эти проекты будут сосредоточены на химических и физических основах изготовления СД и ОСД, в том числе, на прогрессивных методах изготовления СД, изготовлении подложек для ОСД и их инкапсуляции, а также на изготовлении ОСД панелей.

### 4. Инновационное освещение при его ограниченном условии («учебном») применении

Эти проекты обеспечат оценку прогрессивных систем освещения в режиме ограниченной условной эксплуатации. Полученные в результате технические заделы и базы данных помогут исследователям усовершенствовать или перенацелить выполняемые ими предварительные исследования и разработку, светильников и других изделий, и систем с СД.

В целом, Министерство профинансирует примерно 10–15 проектов с долевым участием, предложенных промышленностью, университетами и национальными лабораториями.

ies.org/  
08.2018

## Эксперимент опроверг один из фундаментальных физических законов

Проведён эксперимент, в котором опровергнут один из основополагающих законов современной физики. Результаты исследования могут изменить наше понимание передачи энергии.

Закон излучения Планка был в центре интенсивных проверок почти целый век, и в результате нового анализа обнаружено, что он не работает «на самых малых масштабах». Пока не ясно, что именно это значит для науки, но обычно, когда законы перестают работать, можно ожидать новых открытий. Описание и результаты исследования опубликованы в журнале «Nature».

Этот фундаментальный закон квантовой физики недавно испытали исследователи из Мичиганского университета и Колледжа Вильгельма и Марии, которые решили выяснить, сможет ли вековой закон описать тепловое излучение наномасштабных объектов.

Закон не просто не сработал: результаты эксперимента превысили предсказанное число в 100 раз. Следовательно, наномасштабные объекты способны излучать и поглощать тепло намного эффективнее, чем могут объяснить существующие модели.

Физики, хорошо знакомые с динамикой электромагнетизма, прекрасно понимают, что странно в так называемом ближнем поле – обычное дело. С одной стороны, соотношение между электрическим и магнитным аспектами электромагнитного поля становятся сложнее в свете этого открытия.

Перед исследователями стояла непростая задача. Им потребовалось спроектировать объекты размером меньше 10 мкм (приблизительная длина волны в ИК диапазоне). Учёные использовали две мембраны из нитрида кремния толщиной в 0,5 мкм, разделённые расстоянием, достаточным для того, чтобы считаться дальним полем. Нагрев одной и измерение температуры другой позволили протестировать закон Планка с достаточно высокой степенью точности.

«Закон излучения Планка говорит, что если вы примените идеи, сформулированные им, к двум объектам, то получите определённую степень передачи энергии между ними, – объясняет один из исследователей. – Мы экспериментально наблюдали, что эта степень в 100 раз превышает показатели, предсказанные законом Планка, если объекты крайне малы».

При этом точное понимание физики проведённого эксперимента может иметь серьёзные последствия – и не только для нанотехнологий. Такая сверхэффективная степень передачи энергии может сильно изменить наше понимание передачи тепла в макромире.

nanonewsnet.ru  
06.09.2018

