

вательно, лучшего энергетического разрешения.

На рис. 2 приведены внешний вид в корпусе ЛФД или Si-ФЭУ со сцинтиляционным материалом (боросиликатное стекло легированное Eu^{3+}Y) залитым в колпачок – макет детектора ионизирующего излучения. Сцинтиллятор и детектор были прецизионно состыкованы друг с другом механическим способом, позволяющим быстро и надежно заменить как сцинтиляционный кристалл, так и сам детектор.



Рисунок 2 – Внешний вид корпусированных ЛФД или Si-ФЭУ с сцинтиляционным кристаллом (на основе боросиликатного стекла легированного Eu^{3+}Y) в колпачке корпуса при воздействии УФ-излучения

Заключение. Таким образом, были исследованы оптические свойства неорганических оптических материалов: боросиликатного стекла и оксиселенида легированных редкоземельными эле-

ментами, полученных золь-гель методом для использования их в качестве сцинтилляторов. Полученные результаты использованы для создания макетов детекторов ионизирующих излучений.

Благодарности. Работа частично выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф20Р-256).

Литература

1. Марков, В. Ф. Технология тонкопленочных твердотельных сенсоров: учеб, пособие / В. Ф. Марков // Мин-во науки и высш, образования РФ. – Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 2019. – С. 148.
2. Шендрик, Р. Ю. Методы экспериментальной физики конденсированного состояния. Часть 3. Введение в физику сцинтилляторов : учебное пособие / Р. Ю. Шендрик. – Иркутск: издательство Иркутского государственного университета, 2013. – 110 с.
3. Кремниевые фотоприемники с внутренним усилением широкого спектра применения / В. Б. Залеский [и др.] // Приборостроение-2020 : материалы 13 международной науч.-техн. конф., 18–20 ноября 2020 г., Минск, Белорус. нац. техн. ун-т / редкол. : О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 393–394.

УДК 614.715:681.586

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР МИКРОЧАСТИЦ ГАЗОВОЙ/ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ Мухуров Н.И., Ходин А.А.

*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Национальная академия наук Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлен анализ основных параметров микрочастиц воздушной среды и их влияния на здоровье человека. Рассмотрены методы сепарации и детектирования переносимых воздухом/газом твердых микрочастиц с помощью оптических и фотоэлектрических элементов. Представлен прототип мультиспектрального детектора микрочастиц на основе алюмооксидной технологии для создания компактного Lab-on-chip сенсора.

Ключевые слова: микрочастицы, сепарация, мультиспектральный детектор, алюмооксидная технология.

MULTIWAVELENGTH SENSOR OF GAS/AIRBORNE MICROPARTICLES Mukhurov M., Khodin A.

*SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”
National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Belarus*

Abstract. The analysis of the airborne microparticles basic parameters and their effect on human health is presented. The methods of separation and detection of air/gasborne solid microparticles using optical and photoelectric elements are considered. The multiwavelength microparticle detector prototype based on alumina technology is presented to create a compact Lab-On-Chip sensor.

Key words: microparticles, separation, multiwavelength detector, alumina technology.

Адрес для переписки: Ходин А.А., Логойский тракт, 22, г. Минск 220090, Республика Беларусь
e-mail: aahodin@gmail.com

Качество воздушной среды. Чистый воздух является одной из основных задач охраны окружающей человека среды. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) [1], вредные для здоровья микрочастицы (PM) раз-

мером от десятков нанометров до микрометров глубоко проникают в легкие, в кровь и далее во внутренние органы, вызывая воспаление дыхательных путей, подавляя реакцию иммунной системы и снижая способность крови переносить

кислород. РМ оказывают негативное воздействие на большее число людей, чем какой-либо другой загрязнитель воздуха.

ВОЗ разработала «Руководящие принципы ВОЗ по качеству воздуха», определяющие пороговые и максимально допустимые уровни основных загрязнителей воздуха. В табл. 1 приведены основные характеристики и требования к качеству воздушной среды в отношении загрязнения РМ.

Технический комитет ISO/TC 146 «Качество воздуха» Международной организацией по стандартизации (ISO) разработал более 170 стандартов, определяющих допустимые уровни загрязнения воздуха и выбросов, а также оценку состояния воздушной среды на рабочем месте и в помещениях [2]. В частности, разработан межгосударственный стандарт ГОСТ ISO 16000-20-2017 «Воздух замкнутых помещений». Разработан также стандарт для новых технологий транспорта ISO 23274 «Транспорт дорожный гибридно-электрический. Измерение выхлопных газов и потребления топлива» и др.

Таблица 1. Нормативы ВОЗ для концентрации РМ в воздухе

	Класс микрочастиц	
	PM2.5	PM10
Рекомендуемый уровень	Среднегодовой 10 мкг/м ³ , среднесуточный 25 мкг/м ³	Среднегодовой 20 мкг/м ³ , среднесуточный 50 мкг/м ³
Воздействие	При размере < 2,5 мкм частицы преодолевают аэрогематический барьер, попадая в кровеносную систему	При размере < 10 мкм частицы способны проникать глубоко в легкие, осажаясь в них

Источником загрязнения воздуха микро-, наночастицами в городах являются, в частности, продукты износа тормозных систем и шин автомобилей. Например, в образцах дорожной пыли некоторых улиц Москвы аномально высокая концентрация Cu, Zn, Ag, Cd, Sn, Sb, Hg, Pb, Tl, Bi выявлена во фракции наночастиц с превышением над средними значениями до 450 раз [3].

Важной областью мониторинга переносимых воздухом и другими газами частиц являются промышленные предприятия. В частности, высокоточное производство полупроводниковых приборов, а также литиевых аккумуляторных батарей требует минимизировать загрязнение воздуха, как поступающего в чистые комнаты, так и образующегося в них при работе технологического оборудования.

Детектирование микрочастиц воздушной среды. Современные детекторы взвешенных в воздухе микро-, наночастиц включают элементы для сепарации, детектирования и количественного анализа концентрации частиц с помощью портативных сенсорных платформ. Особый интерес представляют компактные устройства микрофлюидики и микроэлектромеханики [4] Lab-on-chip типа.

В данной работе исследуются методы сепарации и детектирования микрочастиц в детекторах с использованием пленочных и мембранных элементов на основе алюмооксидной технологии.

Сепарация микрочастиц перед их детектированием позволяет повысить чувствительность и селективность детектора как по размеру, так и по материалу детектируемых частиц. Среди методов селекции микро-, наночастиц воздушной среды перед их регистрацией наиболее пригодны для интегрирования в приборе Lab-on-Chip типа следующие.

В *виртуальном импакторе* [5] воздушный микроструйный чип классифицирует микрочастицы по размеру с помощью инерциального сепаратора.

Действующие на микро-, наночастицы электрические силы при *диэлектрофорезе* (ДЭФ) являются эффективным инструментом для манипулирования с возможностью уменьшения размеров устройства до масштабов Lab-on-Chip. В частности, ДЭФ применяется для сепарации металлических и диэлектрических микрочастиц [6].

Детектирование микрочастиц классов PM1-PM10 осуществляется, как правило, с использованием оптической схемы светодиод/поток микрочастиц/фотоприемник. В компактных детекторах используется широкополосное излучение светодиода или излучение полупроводникового лазера в диапазоне длин волн 0,3–3,3 мкм. Соответственно, минимальный радиус детектируемых частиц не может быть меньше ~100 нм. Для повышения информативности измерений, в частности, для оценки распределения частиц по размерам, разработаны двухволновые оптические системы [7].

В данной работе исследуются методы сепарации микро-, наночастиц с помощью виртуального импактора, ДЭФ и их селективного мультиспектрального детектирования с применением дифракционной решетки [8] и спектральных фильтров на основе метаматериалов (рис. 1) для детектирования с помощью матрицы фотодиодов. Представленные решения позволяют повысить информативность измерений в отношении материалов и размеров детектируемых частиц с возможностью реализации полного измерительного цикла в компактном Lab-on-Chip приборе.



Рисунок 1 – Схематическое изображение принципа работы мультиспектрального детектора микрочастиц с использованием оптических фильтров на основе метаматериалов на плазмонных эффектах в сборке с матрицей фотодиодов

Литература

1. Загрязнение воздуха внутри жилых помещений и его влияние на здоровье. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>. – Дата доступа: 05.07.2021.

2. Стандарты ИСО помогут дышать легче. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iso.org/ru/news/ref2397.html>. – Дата доступа: 2.07.2021.

3. Isolation and quantitative analysis of road dust nanoparticles / M. S. Ermolin [et al.] // J. Analyt. Chem. – 2017. – Vol. 72, № 5. – P. 520–532.

4. Ultrafine particle counter using a MEMS-based particle processing chip / H.-L. Kim [et al.] // 28th IEEE

Intl. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). – Estoril, Portugal, 18-22 Jan. – 2015. – P. 559–562.

5. Electrically tunable airborne particle classifier using a virtual impactor / Y. H. Kim [et al.] // IEEE 21st Int. Conf. on Micro Electro Mech. Syst. (MEMS). – Wuhan, China, 13-17 Jan. – 2008. – P. 547–550.

6. Pesch, G. R. A review of dielectrophoretic separation and classification of non-biological particles / G. R. Pesch, F. Du // Electrophoresis – 2020. – Vol. 42, № 1–2. – P. 1–19.

7. Particle monitors and method(s) therefore : pat. US7551277B / M. T. Cole.

8. MEMS gratings and their applications / G. Zhou, [et al.] // Int. J. Optomechatronics. – 2021. – Vol. 15, № 1. – P. 61–86.

УДК 535.234+621.373.826

ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ РАВНОВЕСНЫХ СИСТЕМАХ И ПРИНЦИП ДЕТАЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ

Невдах В.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрены физические процессы, протекающие в термодинамически равновесной системе, состоящей из молекул, моделируемых осцилляторами Герца, и их теплового излучения. Показано, что все электромагнитное излучение, создаваемое осцилляторами Герца, является вынужденным излучением, свойства которого определяются природой вынуждающей силы. На основе принципа детального равновесия проанализированы излучательные переходы, дающие вклад в тепловое излучение термодинамически равновесной системы, и показано, что они являются детерминированными процессами, которые протекают со скоростями, зависящими от температуры. Установлено, что свойства равновесного теплового излучения не зависят от температуры рассматриваемой системы.

Ключевые слова: излучательный переход, термодинамически равновесная система, принцип детального равновесия, скорость излучательного перехода

RADIATIVE TRANSITIONS IN THERMODYNAMICALLY EQUILIBRIUM SYSTEMS AND THE PRINCIPLE OF DETAILED BALANCE

Nevdakh V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. The physical processes occurring in a thermodynamically equilibrium system consisting of molecules modeled by Hertzian oscillators and their thermal radiation has been considered. All electromagnetic radiation generated by Hertzian oscillators is stimulated radiation, the properties of which are determined by the nature of the driving force has been shown. On the basis of the principle of detailed equilibrium, radiative transitions that contribute to the thermal radiation of a thermodynamically equilibrium system have been analyzed, and it has been shown that they are deterministic processes that proceed with rates depending on temperature. The properties of equilibrium thermal radiation do not depend on the temperature of the system under consideration has been found.

Key words: radiative transition, thermodynamically equilibrium system, detailed balance principle, radiative transition rate

*Адрес для переписки: Невдах В.В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: nevdakh@bntu.by*

Принято считать, что простейшим источником электромагнитного излучения является осциллятор Герца – колеблющийся электрон. Энергия электромагнитного излучения, создаваемого колеблющимся электроном в единицу времени в одномерном случае колебаний вдоль оси X , дается известным выражением (см., например, [1]):

$$\delta \varepsilon = \frac{2e^2}{3c^3} \left| \frac{d^2 x}{dt^2} \right|^2, \quad (1)$$

где e – заряд электрона, c – скорость света в вакууме.

Рассмотрим замкнутую систему, состоящую из резонаторов Герца и их теплового излучения,