

**АНОМАЛЬНОЕ СЖАТИЕ СПЕКТРА
КАК СРЕДСТВО ПОЛУЧЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХПЛАНКОВСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ**

В. П. ХОДУНКОВ

*Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева
Санкт-Петербург, Россия
walkerearth@mail.ru*

Аннотация. С целью обоснования возможности создания узкополосного излучения сверхпланковской интенсивности исследованы методы создания высокоинтенсивного теплового излучения с заданной полосой спектра. Разработан метод, основанный на принципиально новом подходе к созданию высокоинтенсивных лучистых тепловых потоков. Метод заключается в сжатии исходного спектра излучения до спектра заданной ширины. Согласно методу, энергию исходного сплошного оптического излучения переизлучают в заданном, более узком, диапазоне спектра, для чего используют модификацию излучающей поверхности в виде упорядоченной твердотельной микроструктуры, трансформирующей спектр исходного излучения. Модифицированная излучающая поверхность создается системой одинаковых выступающих из плоской поверхности структурных элементов заданной формы. Размеры элементов и расстояния между ними рассчитывают исходя из требуемых интенсивности генерируемого излучения и диапазона его частот. Установлена и показана возможность генерации узкополосного излучения, превышающего по интенсивности планковское излучение в несколько раз. Разработанный метод востребован в метрологии температурных и оптических измерений, в научных исследованиях и промышленности. Метод может быть использован для сбора энергии, в производстве высокоэффективных оптических источников в инфракрасном диапазоне, в ИК-спектроскопии и в лазерной оптике, а также при разработке и создании настраиваемых источников инфракрасного излучения и других эффективных приложений в области энергетики.

Ключевые слова: аномальное сжатие, планковское излучение, переизлучение, интенсивность, упорядоченная структура, спектр

Ссылка для цитирования: Ходунков В. П. Аномальное сжатие спектра как средство получения сверхпланковской интенсивности // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 2. С. 162—170. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-162-170.

**ANOMALOUS SPECTRUM COMPRESSION AS A MEANS OF OBTAINING RADIATION
OF SUPER-PLANCK INTENSITY**

V. P. Khodunkov

*D. I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology,
St. Petersburg, Russia
walkerearth@mail.ru*

Abstract. In order to substantiate the possibility of creating narrow-band radiation of super-Planck intensity, methods for creating high-intensity thermal radiation with a given spectral band have been studied. A method based on a fundamentally new approach to the creation of high-intensity radiant heat fluxes has been developed. The method consists in compressing the initial radiation spectrum to a spectrum of a given width. According to the method, the energy of the initial continuous optical radiation is re-emitted in a given, narrower range of the spectrum, for which a modification of the radiating surface is used in the form of an ordered solid-state microstructure that transforms the spectrum of the initial radiation. The modified radiating surface is created by a system of identical structural elements of a given shape protruding from a flat surface. The elements dimensions of the distances between them are found by calculation based on the required intensity and frequency range of the generated radiation. The possibility of generating narrow-band radiation exceeding Planck radiation by several times in intensity is established and demonstrated. The developed method is in demand in the metrology of temperature and optical measurements, in scientific research and in industry. The method can be used for energy harvesting, in the production of high-performance optical sources in the infrared range, in IR spectroscopy and laser optics, as well as in the development and creation of tunable infrared sources and other efficient applications in the field of energy.

Keywords: anomalous compression, Planck radiation, reradiation, intensity, ordered structure, spectrum

Введение. Узкополосное оптическое излучение с заданной полосой спектра традиционно получают из сплошного оптического излучения, для чего используют различные полосовые оптические фильтры. При этом интенсивность получаемого узкополосного излучения полностью зависит от интенсивности исходного излучения, но вследствие его частичного поглощения полосовым фильтром она всегда существенно меньше исходной (на 20—50 %). В свою очередь, для получения сплошного оптического излучения применяются следующие основные группы методов, которые основаны на использовании:

- инфракрасных излучателей, являющихся моделью абсолютно черного тела;
- оптического или дугового разряда (плазмы);
- плазмон-поляритонов (разновидности неизлучающих p -поляризованных поверхностных электромагнитных волн);
- явления частотного уширения (или аномального частотного уширения, или суперконтинуума белого света).

В первой группе методов получение сплошного оптического излучения достигается путем нагрева тугоплавких тел (например, вольфрамовой спирали, штифта Нернста, глобара и др.) до температуры 1273—2273 К либо использования графитовых или пирографитовых излучателей, выполненных в виде модели абсолютно черного тела (АЧТ), обеспечивающих достижение максимальной температуры 3200 К [1, 2]. Указанные методы обеспечивают получение инфракрасного излучения с высокими точностью и энергетической стабильностью, но не позволяют получать излучения, по интенсивности эквивалентные температурам плавления используемых тугоплавких тел.

Вторая группа методов основана на использовании оптического или дугового газового разряда, представляющего собой плазму. Плазма оптического разряда в различных газах, например в ксеноне, создаваемая сфокусированным лучом непрерывного лазера, является источником сплошного излучения с одним из самых высоких значений интенсивности. Плазма, создаваемая дуговым разрядом, обладает меньшей интенсивностью, но лучшей энергетической стабильностью. Для получения интенсивного излучения на основе плазмы используются различные методы [3—5]. Основным недостатком методов этой группы заключается в том, что энергетическая стабильность излучения невысока — флуктуации интенсивности излучения достигают 5 %.

Третья группа методов основана на явлении порождения фононами кристаллической решетки твердого тела поверхностных плазмон-поляритонов, являющихся разновидностью неизлучающих p -поляризованных поверхностных электромагнитных волн [6, 7]. Эти методы не позволяют получать излучение с требуемой высокой интенсивностью, эквивалентной, например, температуре АЧТ 3200 К или выше. Кроме этого, относительно невысока энергетическая стабильность генерируемого излучения.

Четвертая группа методов основана на генерации так называемого суперконтинуума, замещающего белый свет (видимый и инфракрасный диапазон) [8, 9]. Лазерные устройства (так называемые белые лазеры, или лазеры-суперконтинуумы), реализующие указанный способ генерации, позволяют получать узкополосное излучение в заданной полосе частот с высокой энергетической стабильностью. Преимущество указанных лазеров — обеспечение высокой стабильности излучения. Так, например, лазер-суперконтинуум „SuperK EVO-04“ совместно с акустооптическим фильтром „SuperK Varia“, выпускаемыми фирмой „NKT Photonics“ (Дания), обеспечивают флуктуации мощности излучения 1 %, а при введении в схему излучателя оптической отрицательной обратной связи флуктуации интенсивности

излучения составляют 0,01—0,001 %. Это полностью обеспечивается благодаря отрицательной обратной связи, традиционно используемой в лазерных системах стабилизации [10]. Недостаток данных методов — невозможность генерации интенсивного излучения. В частности, самые мощные лазеры типа „суперконтинуум“ в диапазоне длин волн 500—700 нм обеспечивают получение спектральной мощности в пучке не выше 6 мВт/(нм·мм²) [11]. Такая мощность излучения соответствует спектральной энергетической яркости модели АЧТ при термодинамической температуре ≈ 3600 К.

Не так давно разработан метод генерации стабилизированного квазимонохроматического инфракрасного высокоинтенсивного излучения, в котором осуществляется последовательная пространственная интеграция нескольких фоновых излучений высокой интенсивности с дополнительным излучением малой интенсивности. При этом выполняется селекция флуктуационной составляющей суммарного излучения, величину которой минимизируют за счет регулирования интенсивности дополнительного излучения [12]. Данный метод позволяет получать довольно интенсивное стабилизированное квазимонохроматическое излучение в диапазоне длин волн от 400 до 2000 нм с шириной полосы от 5 до 100 нм.

Главный и общий неустранимый недостаток всех перечисленных методов — необходимость применения полосового оптического фильтра, что существенно снижает интенсивность получаемого узкополосного излучения.

Известно устройство сжатия оптического импульса на дифракционных решетках с возможностью регулировки длительности сжатого импульса [13]. Такой эффект достигается за счет дифракционных решеток, которые образуют две зеркально симметричные группы. В результате достигается возможность регулирования дисперсии групповой скорости импульса, в то же время устройство не обеспечивает сжатия непрерывного оптического излучения из широкого диапазона спектра.

В работе [14] представлена идея трехмерного фотонного кристалла, который при нагреве способен генерировать излучение с интенсивностью, выходящей за пределы закона Планка. Кристаллическая структура такого фотонного кристалла похожа на структуру алмаза, а материал кристалла имеет оптический резонатор, который дополнительно сужает спектр излучения. Фотонный кристалл сжимает испускаемый спектр до диапазона шириной около одного микрометра. Резонатор позволяет сократить это значение до 0,07 мкм. Интенсивность излучения такого фотонного кристалла в восемь раз выше, чем у черного тела, таким образом, кристалл обеспечивает восьмикратное превышение интенсивности планковского излучения. Недостаток данной разработки — возможность ее применения ограничена частным случаем длины волны излучения ($\lambda=1,7$ мкм) и не может быть распространена на другие длины волн и другие температуры, так как взаимосвязь параметров фотонного кристалла с пиковой длиной волны, температурой кристалла авторами разработки не раскрыта.

Достигнутый уровень развития науки и техники в этой области может быть охарактеризован следующим образом. Известные методы и реализующие их устройства генерации узкополосного излучения:

— обеспечивают генерацию интенсивного узкополосного излучения, но с низкой энергетической стабильностью (вторая группа способов);

— либо обеспечивают генерацию узкополосного излучения с заданной высокой энергетической стабильностью, но с недостаточно высокой интенсивностью излучения (первая, третья и четвертая группа способов);

— либо обеспечивают генерацию строго монохроматического излучения (но не узкополосного) с заданными высокими энергетической стабильностью и интенсивностью (монохроматические лазеры),

— либо обеспечивают получение излучения сверхвысокой интенсивности, но только в одном частном случае.

Цель настоящего исследования — разработать метод генерации теплового излучения, в заданном узком спектре превосходящего по интенсивности планковское излучение.

Описание метода. В результате проведенного исследования для достижения поставленной цели предложено энергию исходного сплошного оптического излучения переизлучать в заданном более узком диапазоне спектра, т.е. выполнять аномальное сжатие спектра. Для этого разработана упорядоченная твердотельная поверхностная микроструктура, состоящая из расположенных на твердотельном основании одинаковых структурных элементов заданной формы, с геометрическими размерами и расстоянием между ними, заданными исходя из требуемой интенсивности генерируемого излучения [15, 16]. Разработанный метод несколько схож с методом, предложенным в работе [14] — здесь также используется новый базовый принцип формирования излучения: структурные элементы объемной упорядоченной структуры, аккумулирующие энергию падающих фотонов, выполняют функцию фотонных резонаторов и образуют, используя терминологию зарубежных ученых, „фотонный кристалл“. Этот кристалл напоминает лазер, который излучает в заданном узком диапазоне длин волн. Интенсивность генерируемого излучения связана с геометрическими размерами упорядоченной структуры соотношением:

$$I = \varepsilon \left(\frac{S + 2h - a}{h + a} \right) I_0,$$

где I — средняя по заданному спектру интенсивность генерируемого узкополосного оптического излучения, Вт/м³; I_0 — средняя по исходному спектру интенсивность исходного сплошного оптического излучения, Вт/м³; ε — излучательная способность материала структурных элементов, осредненная по заданному узкому диапазону спектра генерируемого излучения, о.е.; S — расстояние между смежными структурными элементами, которое принимают равным центральной длине волны заданного узкого диапазона спектра генерируемого излучения, м; h , a — высота и характерный размер поперечного сечения структурного элемента соответственно, м.

В предложенном методе в качестве исходного источника излучения либо используют стабилизированное сплошное оптическое излучение от внешнего источника и с помощью микроструктуры переизлучают его, либо используют стабилизированное тепловое излучение нагретого твердого тела, при этом упорядоченную твердотельную микроструктуру формируют непосредственно на излучающей поверхности нагретого твердого тела, а для расчета интенсивности исходного оптического излучения используют формулу Планка. Кроме того, структурные элементы выполняют в форме параллелепипедов квадратного сечения (или стержней), одна из граней (торцевых поверхностей) которых находится в механическом и тепловом контакте с твердотельным основанием.

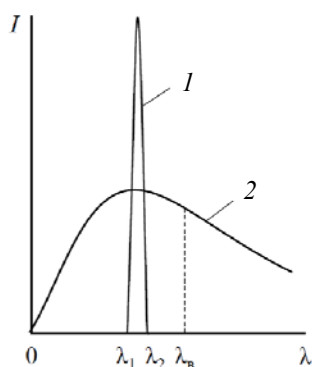


Рис. 1

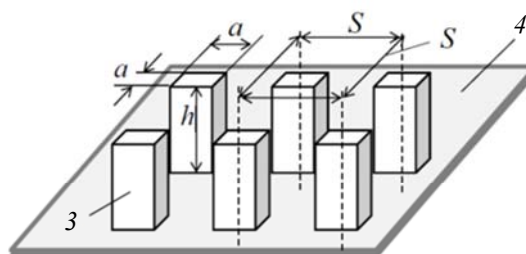


Рис. 2

На рис. 1 представлена графическая интерпретация метода — приведено спектральное распределение интенсивности генерируемого узкополосного излучения (кривая 1) и исходного сплошного оптического излучения (2). На рис. 2 приведена упорядоченная твердотельная микроструктура, с помощью которой обеспечивается генерация заданного узкополосного

излучения. Упорядоченная твердотельная микроструктура состоит из одинаковых структурных элементов 3, выполненных в виде одинаковых параллелепипедов либо цилиндров, которые расположены на твердотельном основании 4.

Сущность метода заключается в следующем. Предварительно еще раз необходимо отметить, что аналогичные технические решения предложены зарубежными учеными, в частности, недавно (2019—2020 гг.) ученые из США и Канады продемонстрировали работу принципиально нового источника излучения, которому для работы необходим только нагрев, но при этом он излучает в узкой полосе в инфракрасной области ярче АЧТ. Устройство на основе фотонных кристаллов сужает диапазон излучения, из-за чего светимость в нем оказывается более чем в восемь раз выше, чем у нагретого до такой же температуры тела. Авторы называют такой феномен сверхпланковским излучением и считают, что он может найти применение в области преобразования рассеиваемого тепла в полезную энергию, системах обнаружения объектов в темноте и как яркий источник в оптических исследованиях [14, 17]. Кроме того, в последнее время появлялись работы, в которых говорилось о похожих результатах. Однако в них речь шла либо о ближней зоне излучения, из чего нельзя сделать вывод о полноценном выходе таких электромагнитных волн из материала, либо сравнение с чернотельным источником проводилось недостаточно тщательно. Также исследователи пока не могут предложить полноценную теорию этого эффекта, но в качестве наиболее вероятной гипотезы они используют влияние локализованных поверхностных плазмонов — квазичастиц колебаний электронного газа, которые ограничены структурой излученного вещества.

В одном из отмеченных выше методов-аналогов генерация заданного узкополосного излучения осуществляется с помощью суперконтинуума, замещающего белый свет, т.е. так называемого „белого лазера“, принцип действия которого основан на искусственном экстремальном уширении исходного спектра излучения — процессе, зеркально противоположном процессу в предложенном методе, который заключается в экстремальном (аномальном) сжатии исходного спектра оптического излучения.

Предложенный метод позволяет с помощью упорядоченной микроструктуры переизлучать энергию, сосредоточенную в заданном диапазоне исходного спектра сплошного оптического излучения, в более узком спектре излучения с заданной шириной полосы (см. рис. 1). Математически этот процесс переизлучения энергии можно описать следующим образом:

$$E_0 \sim \int_0^{\lambda_B} I_0(\lambda) d\lambda \rightarrow E = \varepsilon E_0 \sim \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где E_0 — энергия, сосредоточенная в диапазоне $\lambda = 0—\lambda_B$ исходного спектра сплошного оптического излучения; E — переизлученная энергия в заданном более узком спектральном диапазоне $\lambda = \lambda_1—\lambda_2$; $\varepsilon < 1$; λ — длина волны; $I_0(\lambda)$ — спектральная интенсивность исходного сплошного оптического излучения; $I(\lambda)$ — спектральная интенсивность переизлученного (сгенерированного) излучения в заданном более узком спектральном диапазоне $\lambda = \lambda_1—\lambda_2$, при этом $(\lambda_2 - \lambda_1) \ll \lambda_B$ (λ_B — верхняя спектральная граница диапазона аккумулируемого излучения).

При оценке ожидаемой интенсивности генерируемого излучения оперируют средними значениями интенсивности по соответствующему диапазону спектра:

$$I_0 = \frac{1}{\lambda_B} \int_0^{\lambda_B} I_0(\lambda) d\lambda \text{ — средняя по исходно заданному спектру (0—}\lambda_B\text{) интенсивность ис-}$$

ходного сплошного оптического излучения, Вт/м³,

$$I = \frac{\varepsilon}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) d\lambda \text{ — средняя по заданному спектру (}\lambda_1—\lambda_2\text{) интенсивность генери-}$$

руемого узкополосного оптического излучения, Вт/м³.

Главное условие, при котором структурные элементы 3 (см. рис. 2) начинают аккумулировать энергию фотонов из заданного диапазона исходного сплошного оптического излучения $\lambda = 0—\lambda_b$ и переизлучать ее в более узком диапазоне $\lambda = \lambda_1—\lambda_2$, формулируется следующим образом: $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 \approx h + a$.

При этом верхняя спектральная граница λ_b диапазона аккумулируемого излучения равна длине контура полости $S+2h-a$, образованной двумя смежными структурными элементами. Переизлучение накопленной энергии в заданном более узком спектральном диапазоне осуществляется благодаря резонаторам, образованным полостями между смежными структурными элементами 3.

Если используется стабилизированное излучение от внешнего источника, которое с помощью микроструктуры переизлучается, для оценки интенсивности генерируемого узкополосного излучения по соотношению (1) необходимо знать спектральную интенсивность излучения внешнего источника, значение которой берут либо из паспортных данных данного источника, либо измеряют экспериментально с помощью спектрометра.

В случае, когда используется стабилизированное тепловое излучение нагретого твердого тела, а упорядоченная твердотельная микроструктура формируется непосредственно на излучающей поверхности данного нагретого твердого тела, спектральная интенсивность исходного оптического излучения рассчитывается по формуле Планка:

$$L_{b,\lambda}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 (\exp(c_2/\lambda T) - 1)},$$

где c_1, c_2 — первая и вторая радиационные постоянные; T — термодинамическая температура нагретого твердого тела.

При составлении расчетного соотношения (1) принято допущение, что спектральная излучательная способность материала структурных элементов ϵ незначительно изменяется в рассматриваемом спектральном диапазоне $\lambda_1—\lambda_2$, поэтому она принята величиной постоянной, осредненной по заданному спектру, и вынесена за знак интеграла. Для оценочных расчетов это вполне допустимо.

Пример реализации метода. Пусть, например, требуется получить интенсивное узкополосное излучение в заданном спектральном диапазоне $\lambda = 1,5—1,7$ мкм ($\lambda_1 = 1,5$; $\lambda_2 = 1,7$ мкм). Для получения искомого излучения задают следующие геометрические параметры структурных элементов 3 твердотельной упорядоченной микроструктуры: $S = (\lambda_1 + \lambda_2)/2 = 1,6$ мкм; $a = 0,1$ мкм; $h = 0,1$ мкм. При этом размеры структурных элементов h, a задают такими, чтобы было соблюдено условие $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = h + a = 0,2$ мкм.

Для лучшей демонстрации преимуществ представленного метода рассмотрим случай, когда в качестве исходного оптического излучения используется стабилизированное тепловое излучение нагретого твердого тела, а упорядоченная твердотельная микроструктура формируется непосредственно на его излучающей поверхности, при этом в качестве твердого тела возьмем модель АЧТ, выполненную из графита ($\epsilon = 0,95$) и находящуюся при максимально достижимой в настоящее время температуре 3473 К. В этом случае для расчета спектральной интенсивности исходного оптического излучения используют формулу Планка:

$$I = \epsilon \left(\frac{S + 2h - a}{h + a} \right) I_0 = 0,95 \left(\frac{1,6 + 2 \cdot 0,1 - 0,1}{0,1 + 0,1} \right) 4,013 \cdot 10^{12} = 3,24 \cdot 10^{13} \text{ Вт/м}^3.$$

Интенсивность полученного узкополосного излучения эквивалентна излучению традиционного АЧТ (без упорядоченной микроструктуры) на центральной длине волны 1,6 мкм и при термодинамической температуре $\approx 12\ 100$ К. Для сравнения: с помощью традиционного АЧТ, находящегося при 3473 К, с учетом поглощения полосового фильтра (20 %) на центральной длине волны 1,6 мкм можно получить максимально достижимую интенсивность излучения $2,32 \cdot 10^{12}$ Вт/м³, что эквивалентно термодинамической температуре 3215 К и на 8885 К ниже, чем обеспечивает предложенный метод.

Заключение. Таким образом, подобрав геометрические размеры твердотельной упорядоченной микроструктуры, возможно получать требуемое узкополосное излучение высокой интенсивности. В качестве основы упорядоченной структуры можно использовать известные технологии, например, представленные в работах [18, 19].

Предложенный метод позволит, например, существенно повысить верхний температурный предел воспроизводимой температуры моделями АЧТ, основанными на применении нагрева тугоплавких тел: для длины волны $\lambda_p = 0,65$ мкм верхний предел может быть увеличен с 3356 до 3800 К. Кроме того, предложенный метод может быть использован для сбора энергии в производстве высокоэффективных оптических источников в инфракрасном диапазоне, в ИК-спектроскопии и лазерной оптике, а также при разработке и создании настраиваемых источников инфракрасного излучения и других эффективных приложений в области энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов. радио, 1978. 400 с.
2. Пат. РФ 2148801, МПК G01J 5/02. Модель черного тела / Б. Б. Хлевной, В. Б. Хромченко и др. Заяв. № 98116351 от 25.08.1998. Оpubл. 10.05.2000. Бюл. № 13.
3. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
4. Пат. РФ 2497227, МПК H01J 61/72. Способ генерации излучения на резонансных переходах атомов металлов / В. А. Долгих, Л. П. Менахин и др. Заяв. № 2012101983 от 27.01.2012. Оpubл. 27.10.2013. Бюл. № 30.
5. Пат. РФ 2501146, МПК H02J 17/00. Способ генерации электромагнитного излучения / И. А. Иванов, А. В. Аржанников и др. Заяв. № 2012130121 от 16.07.2012. Оpubл. 10.12.2013. Бюл. № 34.
6. Виноградов Е. А., Жижин Г. Н., Мальшиков А. Г. Термостимулированное излучение поверхностных поляритонов // ЖЭТФ. 1977. Т. 73, № 4. С. 1480—1485.
7. Пат. РФ 2642912, МПК G01J 3/08, G01J 1/08. Способ генерации непрерывного широкополосного инфракрасного излучения с регулируемым спектром / А. К. Никитин, И. Ш. Хасанов, Та Тху Чанг. Заяв. № 2016140354 от 13.10.2016. Оpubл. 29.01.2018. Бюл. № 4.
8. Fork R. L., Tomlinson W. J., Shank C. V., Hirliman C., Yen R. Femtosecond white-light continuum pulses // Optic Letters. 1983. Vol. 8, N 1. P. 1—3.
9. Камынин В. А. Генерация суперконтинуума двухмикронного диапазона в оптических волокнах на основе кварцевого стекла: Дис. ... канд. физ.-мат. наук, М.: Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 2014. 112 с.
10. Климкина Ю. Ю., Биленко И. А. Нестационарные флуктуации интенсивности и направления излучения YAG-лазера // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2012. Т. 76, № 12. С. 1431—1433.
11. Каталог фирмы „NKT Photonics“ [Электронный ресурс]: <<http://www.nktphotonics.com>>.
12. Пат. РФ 2727350, МПК G05D 25/00, H05B 47/10. Способ генерации стабилизированного квазимонохроматического инфракрасного излучения высокой интенсивности / В. П. Ходунков. Заяв. № 2019141903 от 13.12.2019. Оpubл. 21.07.2020. Бюл. № 21.
13. Пат. РФ 2684929, МПК H01S 3/10, G02B 26/00. Устройство сжатия оптического импульса на дифракционных решетках с возможностью регулировки длительности сжатого импульса / А. А. Маслин, А. В. Жаворонкин. Заяв. № 2018111595 от 16.04.2019. Оpubл. 16.04.2019. Бюл. № 11.
14. Hsieh M.-L., Lin Sh.-Y., Sajeev J., Bur J. A., Wang X., Narayanan Sh. and Luk T.-Sh. Super Planckian Thermal Radiation Emitted From a Nano-Filament of Photonic Crystal: A Direct Imaging Study // IEEE Photonics J. 2019. Vol. 11, N 6. DOI:10.1109/JPHOT.2019.2948995.
15. Пат. РФ 2759698, МПК G05D 25/00, G02F 1/39, G01J 3/10. Способ получения узкополосного отраженного излучения, превосходящего по интенсивности исходное падающее излучение / В. П. Ходунков. Заяв. № 2020133723 от 23.11.2020. Оpubл. 16.11.2021. Бюл. № 32.
16. Пат. РФ 2020 125 709 А, МПК G05D 25/0. Способ генерации узкополосного излучения сверхпланковской интенсивности / В. П. Ходунков. Заяв. № 2020138457 от 27.17.2020. Оpubл. 27.01.2022. Бюл. № 3.

17. Lin Sh.-Y., Hsieh M.-L., Sajeev J., Frey B., Bur J. A., Luk T.-Sh., Wang X. & Narayanan Sh. An In-situ and Direct Confirmation of Super-Planckian Thermal Radiation Emitted from a Metallic Photonic-Crystal at Optical Wavelengths // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. P. 5209. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62063-2>.
18. Пат. РФ 2 368 030 C2, МПК H01L 21/205. Полупроводниковая подложка, полупроводниковое устройство и способ получения полупроводниковой подложки / М. Одноблюдов, В. Бугров, А. Романов, Т. Ланг. Заявл. 19.05.2005. Оpubл. 20.09.2009. Бюл. № 26.
19. Пат. РФ 2014 127 476 А, МПК G02B 5/18. Элемент отображения, фольга переноса и изделие с элементом отображения / Кубо Акира, Савамура Тикара, Ясики Кадзухиро. Заявл. 05.12.2012. Оpubл. 10.07.2016. Бюл. № 19.

Сведения об авторе

Вячеслав Петрович Ходунков

— канд. техн. наук; Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, отдел эталонов и научных исследований в области термодинамики; старший научный сотрудник, аналитик; E-mail: walkerearth@mail.ru

Поступила в редакцию 31.05.22; одобрена после рецензирования 11.07.22; принята к публикации 27.12.22.

REFERENCES

1. Kriksunov L.Z. *Spravochnik po osnovam infrakrasnoy tekhniki* (Handbook of Fundamentals of Infrared Engineering), Moscow, 1978, 400 p. (in Russ.)
2. Patent RU 2148801, *Model' chernogo tela* (Black Body Model), B.B. Khlevnoy, V.B. Khromchenko, N.A. Ibragimov, V.I. Shapoval, V.I. Sapritskiy, Published 05.2000 (in Russ.)
3. Raiser Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* (Physics of a Gas Discharge), Moscow, 1992, 536 p. (in Russ.)
4. Patent RU 2497227, H01J 61/72, *Sposob generatsii izlucheniya na rezonansnykh perekhodakh atomov metallov* (Method of Radiation Generation on Resonant Transitions of Metal Atoms), V.A. Dolgikh, L.P. Menakhin et al., Patent application no. 2012101983, Priority 27.01.2012, Published 27.10.2013, Bulletin 30. (in Russ.)
5. Patent RU 2501146, H02J 17/00, *Sposob generatsii elektromagnitnogo izlucheniya* (Method for Generating Electromagnetic Radiation), I.A. Ivanov, A.V. Arzhannikov et al., Patent application no. 2012130121, Priority 16.07.2012, Published 10.12.2013, Bulletin 34. (in Russ.)
6. Vinogradov E.A., Zhizhin G.N., Malshukov A.G. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1977, no. 4(73), pp. 1480–1485. (in Russ.)
7. Patent RU 2642912, G01J 3/08, G01J 1/08, *Sposob generatsii nepreryvnogo shirokopolosnogo infrakrasnogo izlucheniya s reguliruyemym spektrom* (A Method for Generating Continuous Broadband Infrared Radiation with an Adjustable Spectrum), A.K. Nikitin, I.Sh. Khasanov, Ta Thu Chang, Patent application no. 2016140354, Priority 13.10.2016, Published 29.01.2018, Bulletin 4. (in Russ.)
8. Fork R.L., Tomlinson W.J., Shank C.V., Hirliman C., Yen R. *Optic Letters*, 1983, no. 1(8), pp. 1–3.
9. Kamynin V.A. *Generatsiya superkontinuuma dvukhmikronnogo diapazona v opticheskikh voloknakh na osnove kvartsevogo stekla* (Generation of a Two-Micron Supercontinuum in Optical Fibers Based on Quartz Glass), Candidate's thesis, Moscow, 2014, 112 p. (in Russ.)
10. Klimkina Y.Y., Bilenko I.A. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2012, no. 12(76), pp. 1277–1279.
11. <http://www.nktphotonics.com>.
12. Patent RU 2727350, G05D 25/00, H05B 47/10, *Sposob generatsii stabilizirovannogo kvazimonokhromaticheskogo infrakrasnogo izlucheniya vysokoy intensivnosti* (Method for Generating Stabilized Quasi-Monochromatic Infrared Radiation of High Intensity), V.P. Khodunkov, Patent application no. 2019141903, Priority 13.12.2019, Published 21.07.2020, Bulletin 21. (in Russ.)
13. Patent RU 2684929, H01S 3/10, G02B 26/00, *Ustroystvo szhatiya opticheskogo impul'sa na difraktsionnykh reshetkakh s vozmozhnost'yu regulirovki dlitel'nosti szhatogo impul'sa* (Device for Compression of an Optical Pulse on Diffraction Gratings with the Possibility of Adjusting the Duration of the Compressed Pulse), A.A. Mastin, A.V. Zhavoronkin, Patent application no. 2018111595; Priority 16.04.2019; Published 16.04.2019, Bulletin 11. (in Russ.)
14. Hsieh M.-L., Lin Sh.-Y., Sajeev J., Bur J.A., Wang X., Narayanan Sh. and Luk T.-Sh., *IEEE Photonics Journal*, 2019, no. 6(11), DOI:10.1109/JPHOT.2019.2948995.
15. Patent RU 2759698, G05D 25/00, G02F 1/39, G01J 3/10, *Sposob polucheniya uzkopolosnogo otrazhennogo izlucheniya, prevoskhodyashchego po intensivnosti iskhodnoye padayushcheye izlucheniye* (Method for Obtaining Narrow-Band Reflected Radiation, Exceeding the Original Incident Radiation in Intensity), V.P. Khodunkov, Patent application no. 2020133723, Priority 23.11.2020, Published 16.11.2021, Bulletin 32. (in Russ.)
16. Patent RU 2020 125 709 A, G05D 25/0. *Sposob generatsii uzkopolosnogo izlucheniya sverkhplankovskoy intensivnosti* (Method for Generating Narrow-Band Radiation of Super-Planck Intensity), V.P. Khodunkov, Priority 27.17.2020, Published 27.01.2022, Bulletin 3. (in Russ.)
17. Lin Sh.-Y., Hsieh M.-L., Sajeev J., Frey B., Bur J.A., Luk T.-Sh., Wang X., & Narayanan Sh., *Scientific Reports*, 2020, no. 10, pp. 5209, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62063-2>.
18. Patent RU 2 368 030 C2, H01L 21/205, *Poluprovodnikovaya podlozhka, poluprovodnikovoye ustroystvo i sposob*

polucheniya poluprovodnikovoy podlozhki (Semiconductor Substrate, Semiconductor Device and Method for production of Semiconductor Substrate), M. Odnobljudov, V. Bugrov, A. Romanov, T. Lang, Priority 19.05.2005, Published 20.09.2009, Bulletin 26. (in Russ.)

19. Patent RU2014 127 476 A, G02B 5/18, *Element otobrazheniya, fol'ga perenosa i izdeliye s elementom otobrazheniya* (Display Element, Transfer Foil and Product with Display Element), Kubo Akira, Savamura Tikara, Yasiki Kadzukhiro, Priority 05.12.2012, Published 10.07.2016, Bulletin 19. (in Russ.)

Data on author

Vyacheslav P. Khodunkov — PhD; D. I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology, Department of Measurement Standards and Investigations in the Field of Thermodynamics; Senior Researcher, Analyst; E-mail: walkerearth@mail.ru

Received 31.05.22; approved after reviewing 11.07.22; accepted for publication 27.12.22.