

Работа выполнена при поддержке в рамках Государственной программы научных исследований «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы» на 2011–2015 гг., задание 1.35 «Разработка методов синтеза, магнитные и электрические свойства и их частотные зависимости новых электро- и магнитоактивных материалов».

В.Р. Соболев,
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры общей физики БГПУ;

Б.В. Корзун,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры общей физики БГПУ;

А.В. Станчик,
студент V курса физического факультета БГПУ;

С.И. Василец,
кандидат физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой математического анализа БГПУ;

В.Ч. Круплевич,
старший преподаватель кафедры физики БГАТУ

О ГЕНЕРАЦИИ УПОРЯДОЧЕННЫХ ПОТОКОВ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ

Введение. Вопросы формирования потоков лучистой энергии большого сечения и регулярной однородности актуальны в области фундаментальных исследований и практики [1–9]. В физическом материаловедении при синтезе материалов с высокой степенью чистоты и структурного совершенства методом кристаллизации из жидкой фазы или путем газовой конденсации в рабочей полости реактора зачастую требуется особый температурный режим. В частности, для синтеза моно- и поликристаллических материалов, являющихся химически многокомпонентными соединениями, температурное поле может быть неоднородным по области позиционирования навесок, чтобы согласовывать процессы испарения высоко- и низкотемпературных исходных элементов и предотвратить чрезмерное повышение давления газовой фазы в рабочей камере. В подобных случаях высокотемпературные ячейки реакторов снабжаются цилиндрическими обогревателями с обеспечением теплового режима с конечным перепадом температур между зонами размещения ингредиентов реакции [1–2].

Кроме этого, в установках по исследованию воздействия интенсивных лучистых потоков склонных к тепловому разрушению или возгоранию конструкционных и иных материалов целесообразно использовать одномерную модель процесса. Для исключения краевых эффектов требуется обеспечить экспонирование однородным потоком большого сечения на

пробные образцы малой толщины. Также существуют потребности обеспечения достаточно равномерного освещения участков конечной площади на плоских либо криволинейных поверхностях, например, во входных каналах спектральных приборов, а также при конструировании экономичных систем освещения, бытовых и производственных помещений, при создании рационализированных неравновесных систем отопления на основе излучения в инфракрасной области спектра [3–9].

В целом, создание близких к однородным потоков излучения с высокими показателями эргономики и энергетики выдвигает определенные требования к топологии испускающих систем.

Постановка проблемы. Общие подходы по генерации лучистых потоков упорядоченной однородности. Для получения однородных потоков лучистой энергии значительного сечения в разовых случаях допускается использование точечных источников, но для массового практического применения, естественно, предпочтительнее протяженные излучатели, что обычно и предпринимается. Это позволяет, с одной стороны, снизить локальные уровни плотности испускаемой мощности при требуемом уровне однородности и существенно снизить энергетические расходы. Как известно, обеспечить однородность потока в большом сечении в случае испускания из одной точки возможно путем коллимации

потока с помощью оптической системы либо прямым дистанционированием источника от экспонируемого участка. Однако удаление источника в условиях действия закона обратных квадратов приводит к радикальному уменьшению интенсивности утилизируемого потока. При этом достаточно плавный ход гиперболы в области асимптотических значений, как будет видно ниже, усугубляется дополнительным ослаблением при учете наклона для плоской освещаемой площадки большого сечения.

В работе представлены результаты сопоставления процессов формирования пространственного энергетического потока конечного сечения при действии точечного и протяженного плоского изотропного источников. Обсуждаются преимущества и недостатки рассредоточения излучателя по пространству в сравнении с действием локального источника.

Результаты расчета и анализ. Для анализа использованы традиционные подходы расчета параметров энергетических потоков в приближении законов геометрической оптики. Иными словами, точечный источник либо локальный элемент протяженного источника формируют потоки энергии излучения независимо друг от друга, и результирующее действие определяется по принципу суперпозиции вкладов отдельных излучающих элементов. Отметим, что, как сказано выше, проблема создания светового потока высокой однородности в конечной области пространства достаточно нетривиальна, особенно, если требуется обеспечить высокие показатели по экономичности, применительно к массовому использованию. Если экспонируемая поверхность является сферой или ее частью, то источник должен отвечать этой симметрии. Соответственно, при одностороннем действии полусферического источника освещенность вдоль оси симметрии даже на сферической поверхности будет выше, чем в перпендикулярном направлении. Для их уравнивания потребуется уменьшать радиус источника к точке, что, соответственно, приведет к увеличению локальной испускаемой мощности.

Для плоских облучаемых поверхностей сферический (точечный) источник также позволяет создать равномерность освещения в том смысле, что на больших расстояниях от него, как известно, формируется близкий к однородному фронт. Однако из соображений сохранения энергии интенсивность будет незначительна, в подтверждение на рисунке 1 отображены несколько характерных зависимостей освещенности по плоскому кругу от точечного излучателя для нескольких типичных расстояний.

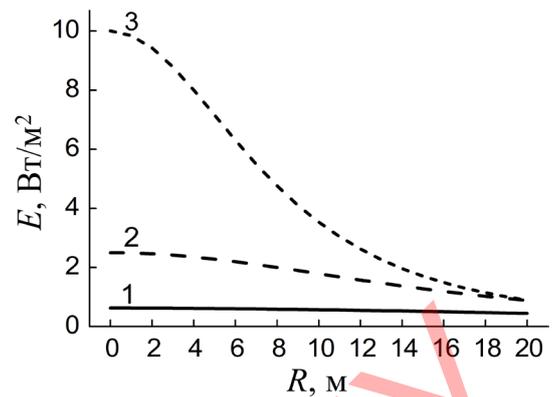


Рисунок 1 – Освещенность в пределах плоского круглого участка от точечного источника с силой света 100 кд при расстояниях h , м: 40 (1); 20 (2); 10 (3)

Из рисунка 1 следует, что световой поток в его нормальной компоненте резко ослабляется в периферийной области уже на сравнительно малых удалениях источника и при приемлемой степени однородности снижается с увеличением экспонируемой площади. К примеру, для круга радиусом 20 метров обеспечить однородность можно используя не более 5 % от достигаемой освещенности при малых расстояниях (кривая 1). Иными словами, при заданной мощности излучателя необходимо примириться со значительным уменьшением коэффициента светопередачи η , который представляет собой отношение среднего значения нормальной составляющей потока на единицу площади для плоского кругового участка с радиусом R на расстоянии h к среднему значению нормальной компоненты по всей полусфере на этом же расстоянии. Для точечного источника коэффициент η представим в виде соотношения

$$\eta = \frac{2h^2}{R^2} \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + R^2}} \right). \quad (1)$$

На рисунке 2 отображено распределение коэффициента светопередачи в зависимости от расстояния при некоторых характерных размерах экспонируемой плоской площадки, из которого следует, что достичь близкого к предельному значению η возможно при превышении расстояния до источника над радиусом плоского участка в четыре раза.

Это означает, что обращаясь к рисунку 1, можно установить площадь экспонируемого участка при эффективной светопередаче. Например, для кривой 3 искомый радиус R составит 2,5 м с соответствующим законом распределения нормальной составляющей потока. В случае, если потребуется увеличить уровень однородности потока, то необходимо удалить источник с неизбежным ослаблением интенсивности в сторону кривой 2.

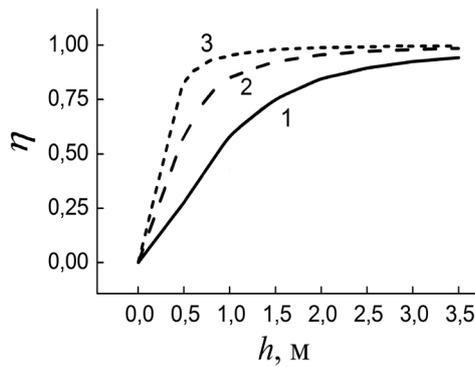


Рисунок 2 – Коефіцієнт світлопередачі η в межах круглого плоского участка при действии точечного источника. Радиус освещаемой поверхности R , м: 1 (1); 0,5 (2); 0,25 (3)

Проведенный анализ показывает, что реализовать более высокий уровень однородности и плотности нормальной компоненты потока при значительной величине η при наличествующем расходе энергии возможно путем распределения испускаемой мощности по конечной площади. В приближении плоского кругового источника (рисунок 3) поток, посылаемый под углом к оси симметрии, есть эффективная сила света как произведение яркости и видимой поверхности. Поток будет не столь однородным по всем направлениям как для точечного излучателя, но вблизи оси симметрии можно достичь его приемлемой степени регулярности при высокой плотности. Основным требованием станет условие позиционирования источника над экспонируемым участком и превышение размеров излучателя над освещаемым полем.

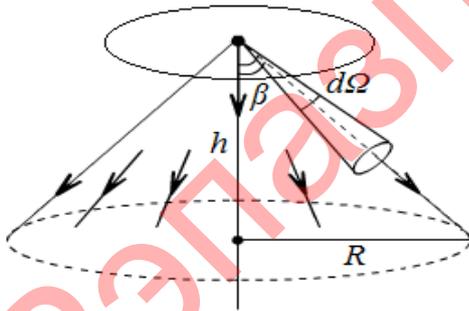


Рисунок 3 – Действие плоского излучателя: h – высота источника; $d\Omega$ – элемент телесного угла; β – угол между нормалью к источнику и направлением на облучаемый элемент; R – радиус освещаемого пятна

Это отвечает общему положению, что плоский ламбертов излучатель бесконечно больших размеров с яркостью B создает локальный однородный поток с величиной освещенности πB .

Оценим масштаб интенсивности нормальной компоненты потока, посылаемого плоским круговым источником конечных размеров. Схематическая модель задачи представлена на рисунке 4.

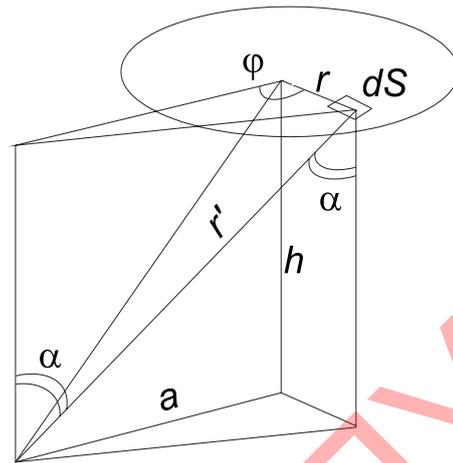


Рисунок 4 – Схематическая модель задачи при действии излучателя в виде плоского кругового источника; a – расстояние от оси симметрии до точки наблюдения; h – расстояние от источника до освещаемой плоской поверхности

Для определения характера распределения нормальной составляющей потока использованы известные принципы расчета [10–12], когда освещенность от локального участка светильника выглядит следующим образом:

$$dE = \frac{B \cos^2 \alpha dS}{r'^2}, \quad (2)$$

где B – яркость источника, dS – элемент площади источника, r' – расстояние от элемента площади источника до точки наблюдения, α – угол между нормалью к участку источника и направлением на точку наблюдения.

В приближении цилиндрической системы координат суммарная освещенность в заданной точке есть результат суммирования по площади излучателя

$$E = Bh^2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^R \frac{r dr}{(a^2 + h^2 + r^2 - 2ar \cos \varphi)^2}, \quad (3)$$

где r – расстояние от центра источника до элемента поверхности dS , φ – полярный угол, R – радиус источника.

После расчета локальное значение освещенности имеет вид

$$E = \frac{B\pi}{2} \left[\frac{R^2 - a^2 - h^2}{\sqrt{(R^2 + h^2 - a^2)^2 + 4a^2 h^2}} + 1 \right]. \quad (4)$$

Выражение (4) вполне удовлетворяет принципу предельного перехода и характеризует освещенность для любых промежуточных параметров задачи.

Закономерности пространственного распределения светового потока можно конкретизировать путем графического представления зависимости освещенности. В частности, для освещенности в функции высоты, при смещении точки наблюдения от оси симметрии, топология нормальной составляющей

потока характеризуется сложным поведением со спадающим и немонотонным участком.

Из рисунка 5 следует, что резкое уменьшение освещенности, начиная с незначительных начальных высот, характерно как раз для области вблизи оси симметрии (кривые 1, 2). Вне геометрической тени источника за счет большого наклона освещенность на два-три порядка меньше и возрастает по мере отдаления до некоторой высоты, отвечающей оптимальному сочетанию расстояния и угла между обобщенной нормалью и направлением. Дальнейшее увеличение высоты источника приводит к асимптотическому сближению всех кривых. Это означает переход к ситуации точечного излучателя с близким к однородному потоком излучения. Степень регулярности нормальной составляющей потока при обеспечении условия его достаточной интенсивности определяется соотношением между размерами охватываемой области, размером самого источника и его высотой.

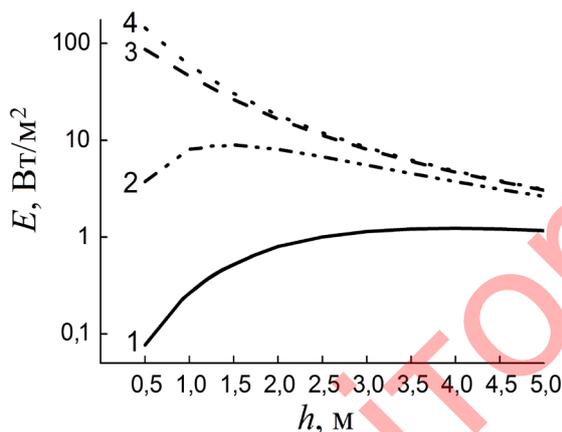


Рисунок 5 – Освещенность от плоского источника радиуса $R = 1$ м с яркостью $V=100$ Вт/ср·м² как функция высоты для точек наблюдения с a , м: 4 (1); 1,5 (2); 0,5 (3); 0,2 (4)

Таким образом, полученное выражение для нормальной освещенности лучистым потоком энергии, посылаемым плоским круглым источником, позволяет оценить распределение локальной плотности потока в различных точках поверхности, с учетом размеров источника, расстояния до плоскости излучателя, величины смещения точки наблюдения от центра по ширине. Выполненный расчет показывает, что в целом зависимость светового или теплового потока от положения точки наблюдения достаточно существенна. Для рассмотрения случая с реализацией заданного градиента энергетической освещенности требуется промоделировать распределение нормальной составляющей вдоль радиуса рассматриваемого освещаемого участка исходя из выражения (4).

ЛИТЕРАТУРА

1. T(x) phase diagram of the $\text{CuSbS}_2\text{-CuInS}_2$ system and solubility limit of Sb in CuInS_2 / B.V. Korzun [et al.] // Crystal Research and Technology. – 2013. – Vol. 48, № 9. – P. 641–648.
2. DTA studies of formation of $\text{BaPbO}_{3-\delta}$ from oxalates: в 3 т. / V.R. Sobol [et al.] // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. докл. Междунар. науч. конф., Минск, 15–18 окт. 2013 г. – Минск: Ковчег, 2013. – Т. 2. – С. 107–109.
3. Гоман, П.Н. Аппроксимация температурного поля лабораторной установки на воспламеняемость аналитической функцией / П.Н. Гоман, А.В. Станчик, Ю.С. Кедич // Актуальные вопросы физики и техники: I Респ. науч. конф. студ., магистрантов и аспирантов, Гомель, 17 апр. 2012 г.: в 2 ч. / ГГУ им. Ф. Скорины; редкол.: А.В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2012. – Ч. 1. – С. 248–249.
4. Джемиссон, Дж.Э. Физика и техника инфракрасного излучения / Дж.Э. Джемиссон; пер. с англ. Н.В. Васильченко, Н.Ф. Кошавцева, В.И. Проскуракова; под ред. Н.В. Васильченко. – М.: Советское радио, 1965. – 634 с.
5. Хадсон, Р. Инфракрасные системы / Р. Хадсон; пер. с англ. Я.Б. Герчикова, Ю.Е. Голубчина, С. Г. Кина; под общ. ред. Н.В. Васильченко. – М.: Мир, 1972. – 529 с.
6. Станчик, А.В. К выбору оптимальных параметров освещенности плоским круглым источником / А.В. Станчик, В.В. Писляков // VII Машеровские чтения: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Витебск, 24–25 сент. 2013 г. / Витеб. гос. ун-т им. П.М. Машерова; редкол.: А.П. Солодков [и др.]. – Витебск, 2013. – С. 43–44.
7. Дейнего, В. Выбор концепции построения безопасной и энергосберегающей системы освещения / В. Дейнего // Информационно-аналитическое издание: Кабель-news. – 2012. – № 2. – С. 50–64.
8. Ахрамович, А.П. Автоматизированные электрические системы инфракрасного обогрева / А.П. Ахрамович, Г.М. Дмитриев, В.П. Колос // Проблемы региональной энергетики. – 2011. – № 1. – С. 56–59.
9. Токарев, П.С. Газовые горелки инфракрасного излучения и их применение в промышленности / П.С. Токарев // Теоретические знания – в практические дела: сб. науч. ст. X Междунар. науч.-инновац. конф. аспирантов, студ. и молодых исслед. с элементами научной школы, Омск, апр. 2009 г.: в 2 ч. / филиал ФГБОУ ВПО МГУТУ имени К.Г. Разумовского; редкол.: З.В. Владова [и др.]. – Омск, 2009. – Ч. 1. – С. 323 с.
10. Ландсберг, Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг. – 5-е изд. – М.: Наука, 1976. – 926 с.
11. Сивухин, Д.В. Общий курс физики: учеб. пособие для вузов: в 5 т. / Д.В. Сивухин. – 3-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – Т. 4: Оптика. – 792 с.
12. Градштейн, И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – М.: Гос. издат. физико-математической литературы, 1962. – 1100 с.

SUMMARY

The main aspects the of generation of similar to uniform radiant energy streams in space unfer the effect of point and extended, that sorces are compared. The problem embraces the questions of providing uniform exposure over the surface under illumination, infrared heating, as wellas the creation of gradient thermal fields in cells synthesizing monocrystal and ceramic samples with complex chermical composition.

Поступила в редакцию 15.04.2014 г.