

КОЛЛИМАТОР ДЛЯ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Введение

Инфракрасные светодиоды и фотоприемники в диапазоне 800 – 1600 нм широко используются для передачи информации по атмосферному каналу связи на расстояния до нескольких десятков метров, например, в пультах дистанционного управления электронной техникой, системах безопасности и видеонаблюдения в банках, аэропортах, магазинах, супермаркетах, школах, детских садах, офисах и заводах [1].

Для организации атмосферного канала связи на расстоянии сотни метров применяются лазерные модули, поскольку они обладают расходимостью излучения на три порядка меньшей, чем у инфракрасных светодиодов. Цена инфракрасных лазерных модулей значительно выше, чем у инфракрасных светодиодов в том же диапазоне длин волн. Инфракрасные лазерные модули используются на открытой местности, где требуется направленность излучения, например, в фазовых дальномерах, охранных системах, в индустрии развлечений и играх типа «лазертаг» и др.

Задача коллимации излучения светодиода для создания светодиодных устройств прожекторного типа, светосигнальных устройств, светотехнических устройств автомобиля с расходимостью до 4 градусов решена в работе [2].

В данной работе рассматривается возможность расширения области применения инфракрасных светодиодов на расстояния до нескольких сотен метров путем установки специального коллиматора, значительно уменьшающего расходимость излучения до десятых долей градуса.

Постановка задачи

Требуется разработать оптическую систему для светодиодного излучателя, которая обеспечит на расстоянии $L=100\lambda$ диаметр пятна $d_{spot}=0,5\lambda$. Размеры тубуса: длина не более 140 мм, внешний диаметр не более 35 мм, внутренний диаметр не более 28 мм.

В качестве излучателя используется одиночный светодиод в импульсном режиме TSAL6100. Фотоприемником является TSOP32-156 с минимальной регистрируемой мощностью излучения $W_{min}=10^{-4} \text{ Вт} / \lambda^2$. Светодиод излучает на длине волны $\lambda=9,8 \cdot 10^{-7} \lambda$. Согласно описанию светодиода расходимость составляет $\varphi=\pm 10^\circ$ при относительном уменьшении интенсивности излучения в два раза. Мощность излучения $W=3,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}$ при силе тока $I_F=10^{-2} \text{ А}$ и длительности импульса $t_p=2 \cdot 10^{-2} \text{ с}$. В конструкции светодиода предусмотрена сферическая линза радиусом $R=2,49 \cdot 10^{-3} \lambda$ для уменьшения расходимости излучения. В результате прохождения лучей через эту линзу диод можно рассматривать как виртуальный источник диаметром $D_V=3,7 \cdot 10^{-3} \lambda$ и расходимостью $\varphi=\pm 10^\circ$. В этом приближении учитывается 63 % энергии излучения $W_{63\%}=2,2 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}$. Излучающая поверхность кристалла находится на расстоянии $s_1=4,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ от переднего края сферической линзы.

Оптическая схема светодиода

Рассмотрим ход лучей от кристалла светодиода через сферическую линзу по аналогии с работой [3]. Показатель преломления материала линзы светодиода $n_1 = 1,5$. Показатель преломления воздуха $n_2 = 1$. Фокусное расстояние линзы определяется по формуле

$$f = \frac{n_1 \cdot R}{n_1 - n_2} = \frac{1,5 \cdot 2,49 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{1,5 - 1} = 7,47 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (1)$$

Исходя из этих данных необходимо найти положение виртуального изображения светодиода s_2 и размер самого кристалла h_1 . Ход лучей в светодиоде и обозначения переменных приведены на рис.1.

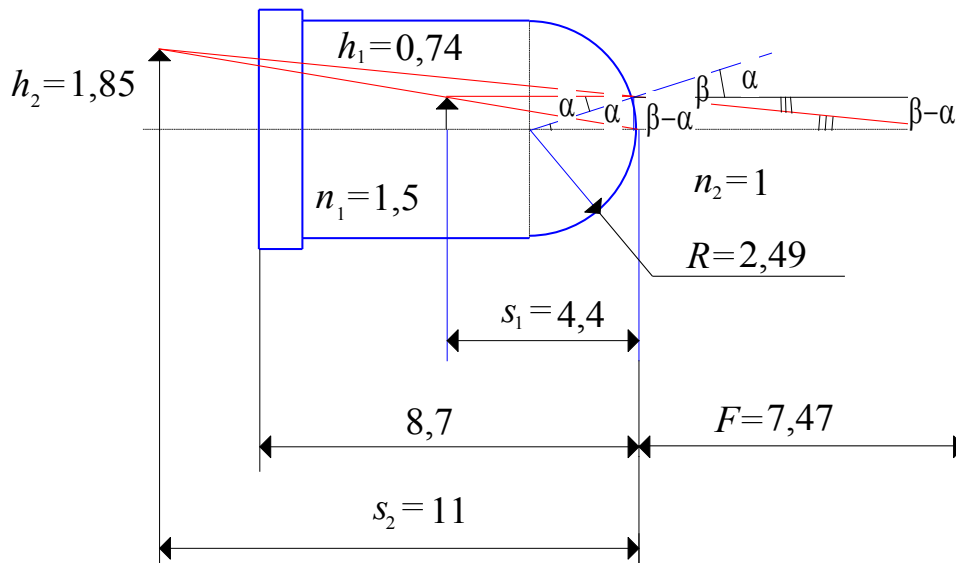


Рис. 1

Согласно закону преломления запишем соотношение

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2)$$

Согласно дополнительному построению рис.1

$$\frac{h_1}{R} = \sin(\alpha), \quad (3)$$

$$\frac{h_1}{F} = \frac{h_2}{s_2 + F} = \operatorname{tg}(\beta - \alpha), \quad (4)$$

$$\frac{h_1}{s_1} = \frac{h_2}{s_2}. \quad (5)$$

Выразим h_1 из (5) и подставим в (4).

$$h_1 = \frac{h_2 \cdot s_1}{s_2}, \quad (6)$$

$$\frac{h_2 \cdot s_1}{s_2 \cdot F} = \frac{h_2}{s_2 + F} = \operatorname{tg}(\beta - \alpha). \quad (7)$$

Выразим из (7) s_2 .

$$(s_2 + F) \cdot s_1 = s_2 \cdot F, \quad (8)$$

$$F \cdot s_1 = s_2 \cdot F - s_2 \cdot s_1, \quad (9)$$

$$s_2 = \frac{F \cdot s_1}{F - s_1} = \frac{7,47 \cdot 10^{-3} \cdot 4,4 \cdot 10^{-3}}{7,47 \cdot 10^{-3} - 4,4 \cdot 10^{-3}} = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}. \quad (10)$$

Из соотношения (6) вычислим h_1 :

$$h_1 = \frac{h_2 \cdot s_1}{s_2} = \frac{1,85 \cdot 10^{-3} \cdot 4,4 \cdot 10^{-3}}{1,1 \cdot 10^{-2}} = 7,6 \cdot 10^{-4}. \quad (11)$$

Рассчитанные линейные и угловые размеры совпали с размерами, полученными путем геометрических построений, что подтверждает их достоверность.

В последующих рассуждениях светодиод заменяем виртуальным источником диаметром $D_V = 2 \cdot h_2 = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и расходимостью $\varphi = \pm 10^\circ$. Положение виртуального источника находится на расстоянии $s_2 = 11 \text{ м}$ от края сферической линзы.

Дифракционная расходимость

Следующий этап заключается в том, чтобы уменьшить расходимость излучения до требуемого уровня и предусмотреть возможность юстировки.

Поскольку требуется на расстоянии $L = 100 \text{ м}$ обеспечить диаметр пятна $d_{spot} = 0,5 \text{ м}$, то допустимый угол в радианах, в котором сконцентрирована энергия излучения, определяется по формуле

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{d_{spot}}{2 \cdot L}\right) = \arctan\left(\frac{0,5}{2 \cdot 100}\right) = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ рад} = 0,143^\circ = 8,6'. \quad (12)$$

Определим минимальный диаметр апертурной диафрагмы D_{dif} исходя из дифракционной расходимости равномерного распределения:

$$\varphi_{dif} = \frac{1,22 \cdot \lambda}{D_{dif}}, \quad (13)$$

$$D_{dif} = \frac{1,22 \cdot \lambda}{\varphi_1} = \frac{1,22 \cdot 9,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 4,782 \cdot 10^{-4} \text{ м}. \quad (14)$$

Минимальный диаметр диафрагмы примерно в 10 раз меньше диаметра светодиода. Размещение такой диафрагмы перед светодиодом обеспечит требуемый уровень расходимости излучения, но энергия этого излучения будет недостаточной для практических задач.

Чтобы свести к минимуму дифракционную расходимость, диаметр оптической системы должен быть в 10 раз больше, чем D_{dif} , т.е. соответствовать размерам светодиода.

Уменьшение расходимости излучения светодиода

Для уменьшения расходимости используем первую линзу, расположенную вблизи светодиода, чтобы сохранить минимальный диаметр светового пучка, который не должен превысить заданный внутренний диаметр оптической системы.

Вторая линза обеспечит окончательную коррекцию расходимости до требуемого уровня.

Изменяя расстояния между линзами и светодиодом, оптическую систему можно юстировать.

В работе используется итерационный метод, предполагающий сначала выбор параметров оптической системы, а потом – расчета угла выхода апертурного луча, определяющего расходимость. Если этот угол удовлетворяет требованиям, то расчет прекращается. Если нет – то необходимо изменить исходные параметры оптической системы и повторить расчет. Поскольку расчет происходит автоматически по заранее подготовленным формулам, то данный метод решения достаточно эффективен для получения практических результатов.

Выполним расчет первой линзы. Расположим ее на расстоянии $a = 15\lambda$ от края светодиода для того, чтобы была возможность перемещать светодиод, как к линзе, так и от линзы при юстировке (рис.2).

Определим положение виртуального точечного источника на главной оптической оси системы, который заменяет мнимое изображение кристалла светодиода радиусом h_2 с апертурным лучом под углом $u_1 = 10^\circ$. В качестве изображения для первой линзы рассматривается точка на главной оптической оси, находящаяся от оптического центра линзы на расстоянии d_1 :

$$d_1 = 13 \cdot 10^{-3} + \frac{h_2}{\tan(u_1)} = 0.03649\lambda . \quad (15)$$

Изображение, формируемое первой линзой с оптической силой $D_1 = 19$ диоптрий, будет мнимым. Оно находится на расстоянии f_1 от оптического центра первой линзы:

$$f_1 = \frac{1}{D_1 - \frac{1}{d_1}} = \frac{1}{19 - \frac{1}{0.03649}} = -0.119\lambda . \quad (16)$$

Определим расстояние от оптической оси до точки входа апертурного луча в первую линзу h_{11} :

$$h_{11} = d_1 \cdot \operatorname{tg}(u_1) = 0.03649 \cdot \operatorname{tg}(10^\circ) = 6.435 \cdot 10^{-3} \lambda . \quad (17)$$

Определим угол u_{11} выхода луча из первой линзы:

$$u_{11} = \operatorname{arctg} \left(\frac{h_{11}}{-f_1} \right) = 3.095^\circ . \quad (18)$$

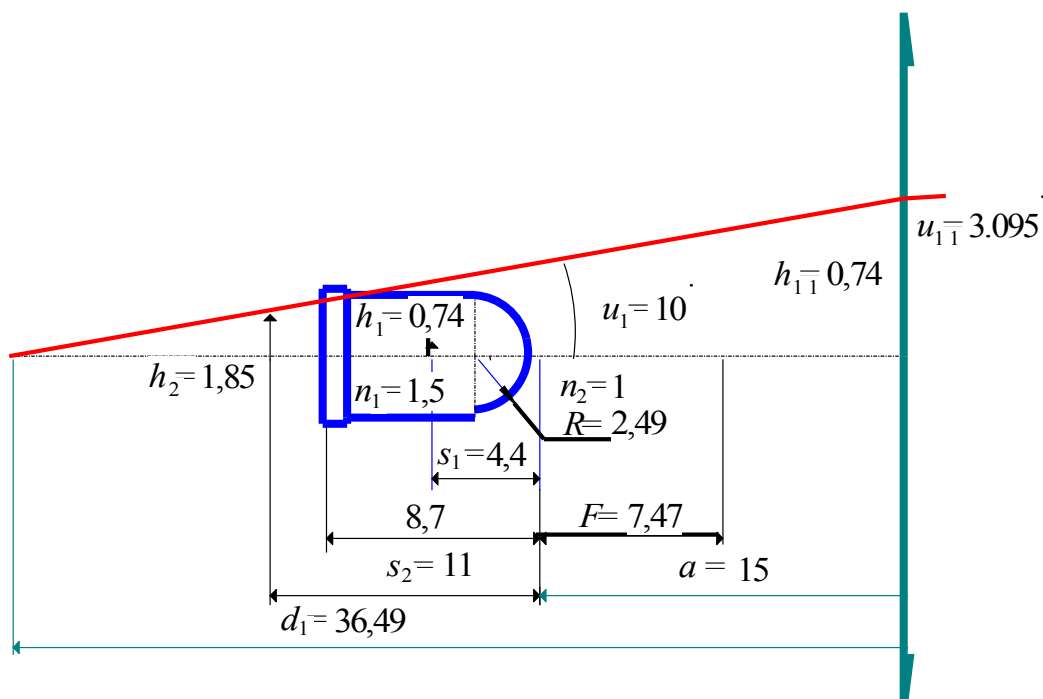


Рис. 2

Угол u_{11} также является углом входом луча во вторую линзу. Расположим вторую линзу на расстоянии $dd = 100\lambda$ от первой линзы (рис. 3).

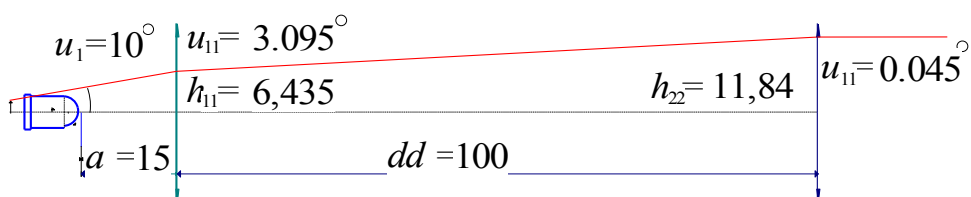


Рис. 3

Определим расстояние от мнимого изображения, формируемого первой линзой, до второй линзы:

$$d_2 = -f_1 + dd = 0.219\lambda . \quad (19)$$

Определим расстояние от мнимого изображения, формируемого второй линзой, до второй линзы:

$$f_2 = \frac{1}{4.5 - \frac{1}{0.219}} = -15.103\lambda . \quad (20)$$

Определим расстояние от оптической оси до точки входа апертурного луча во вторую линзу:

$$h_{22} = h_{11} + dd \cdot \text{tg}(u_{11}) = 6.435 \cdot 10^{-3} + 10^{-1} \cdot \text{tg}(3.095^\circ) = 0.01184\lambda . \quad (21)$$

Определим угол выхода луча из второй линзы:

$$u_{22} = \arctg\left(\frac{h_{22}}{-f_2}\right) = \arctg\left(\frac{0.01184}{15.103}\right) = 0.045^\circ. \quad (22)$$

Это значение меньше допустимого $0,143^\circ$, поэтому данное размещение можно реализовать на практике.

Юстировка и допуски

Известно, что процесс изготовления деталей и сборки изделия связан с некоторыми погрешностями, которые нельзя полностью устранить. Причем, как правило, чем выше требования к качеству изготовления деталей, тем выше их цена. Во многих случаях высокая цена комплектующих является неоправданной.

Чтобы снизить требования к комплектующим компонентам и точности установки деталей в готовое изделие, необходимо предусмотреть возможность настройки и юстировки.

Для решения поставленной задачи желательно применять стандартные изделия, поскольку они обычно выпускаются серийно с высокой точностью и имеют невысокую себестоимость. Поэтому в оптической системе применены очковые линзы. Первая линза имеет оптическую силу +19 диоптрий, а вторая, более слабая, +4,5 диоптрии.

Зависимость угла $u_{22}(\delta)$ апертурного луча оптической системы от расстояния x между светодиодом и первой линзой приведена на рис. 4. Поскольку первая линза наиболее сильная, то это расстояние оказывает наибольшее влияние на угол выхода апертурного луча из оптической системы.

Из рис. 4. видно, что изменение расстояния между светодиодом и первой линзой в диапазоне от 14,4 до 16,2 мм обеспечивает значение апертурного угла в пределах $\pm 0,143^\circ$.

Зависимость угла $u_{22}(15, dd)$ апертурного луча оптической системы от расстояния dd между первой и второй линзой приведено на рис. 5. Изменение расстояния dd между первой и второй линзой в диапазоне от 94 до 113 мм обеспечивает значение апертурного угла в пределах $\pm 0,143^\circ$ при сохранении расстояния между светодиодом и первой линзой 15 мм (рис.5).

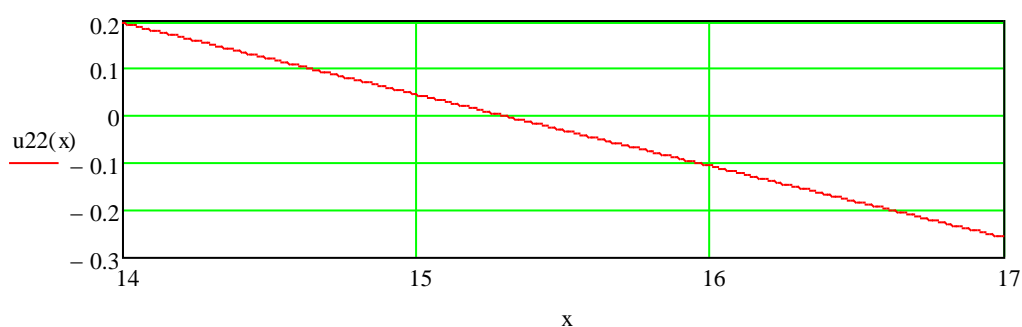


Рис. 4

Поскольку оптическая сила второй линзы меньше, чем первой, то ее влияние на расходимость также меньше, поэтому шире поле допуска на ее относительное положение в оптической системе. Изменяя ее положение, можно выполнять плавную настройку расходимости. Передвижение диода относительно первой линзы сильно меняет расходимость и используется для грубой настройки.

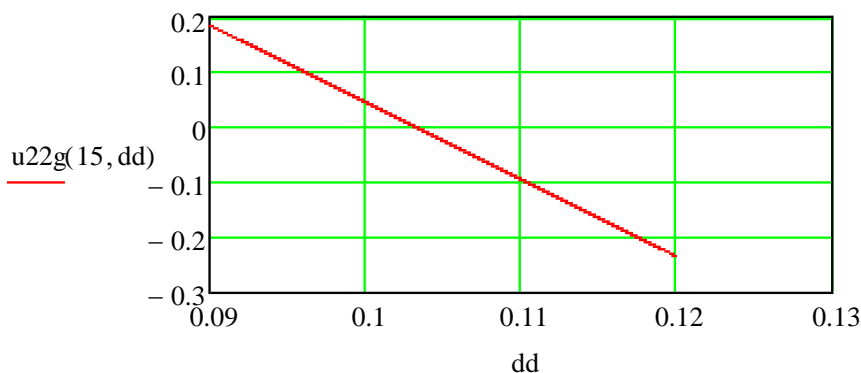


Рис. 5

Целесообразно в конструкцию тубуса заложить следующие размеры: положение светодиода относительно первой линзы $15,3 \pm 0,5$ мм; расстояние между первой и второй линзой 103 ± 1 мм.

Выводы

На основе приближений геометрической оптики построена математическая модель двухлинзового коллиматора для светодиодного излучателя. Показано, что при помощи рассчитанного коллиматора можно уменьшить расходимость излучения светодиода до $\pm 0,143^\circ$ и, в результате, расширить область применения инфракрасных светодиодов для передачи информации по атмосферному каналу на сотни метров. Определены зависимости угла апертурного луча оптической системы от расстояний между светодиодом и линзами. На основе этих зависимостей выбраны допуски на точность установки оптических элементов. В конструкцию коллиматора заложены стандартные очковые линзы, которые выпускаются серийно с хорошим качеством и имеют невысокую себестоимость.

Список литературы: 1. Чайка В. Улыбнитесь, Вас снимают, или Практическое применение инфракрасных светодиодов // Полупроводниковая светотехника 2010, №6, С. 44-45. http://www.led-e.ru/articles/led-application/2010_6_44.php. 2. Асланов Э.Р., Досколович Л.Л. Тонкий коллиматор для светодиодов // Компьютерная оптика 36(1), 96-101 (2012). <http://www.computeroptics.smr.ru/KO/PDF/KO36-1/13.pdf>. 3. http://www.orafol.com/tl_files/EnergyUSA/papers/LED-Source-Modeling-for-Optical-Design-workbook_Davis_2004.pdf

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 08.11.2013