

УДК 621.396.967.7

В. Е. Карасик, М. Д. Хотяков

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

Приведены основные принципы проектирования оптических систем формирования излучения для многоэлементных полупроводниковых лазеров. Рассмотрено распространение излучения в оптическом интеграторе с переменным сечением. Предложена методика оптимизации параметров оптических систем формирования излучения.

При разработке осветителей для активных оптико-электронных приборов наиболее серьезной проблемой является создание оптимальной оптической системы формирования излучения (ОСФИ). ОСФИ должна концентрировать лазерное излучение в заданном угле подсвета, передавать энергию излучения в требуемом направлении с минимальными потерями, формировать пятно подсвета требуемой формы и размеров с однородным распределением энергетической яркости.

Для создания малогабаритных осветителей целесообразно использовать в качестве источника излучения полупроводниковые лазеры. Это обусловлено, в первую очередь, тем, что по сравнению с другими типами лазеров они обладают наибольшим КПД и минимальными массой, габаритными размерами и энергопотреблением, имеют большой срок службы и устойчивость к механическим и климатическим воздействиям. Особый интерес представляют многоэлементные полупроводниковые лазеры — решетки, не требующие охлаждения. Данные источники излучают импульсы мощностью до 2500 Вт и длительностью порядка сотен наносекунд с частотой повторения до нескольких килогерц, поэтому они могут применяться в активно-импульсных лазерных системах видения, обладающих повышенной помехозащищенностью за счет использования стробирования. Помимо присущих всем полупроводниковым источникам недостатков, таких как большая угловая расходимость излучения, лазерные решетки имеют резко выраженную дискретную структуру тела свечения, что усложняет создание оптимальной ОСФИ. Действительно, для ОСФИ, построенной по схеме прожектора на основе обычных или анаморфотных проекционных объективов, пятно подсвета в дальней зоне имеет дискретную структу-

ру, свойственную телу свечения решетки. Попытки гомогенизировать пятно подсвета при помощи расфокусировок объектива приводят к существенному увеличению пятна подсвета и соответствующим энергетическим потерям, которые достигают 60–70 %.

Наиболее эффективным методом получения гомогенного пятна подсвета при допустимых габаритных размерах ОСФИ и минимальных энергетических потерях является исполнение ОСФИ в виде оптического смесителя — интегратора, перед входным торцом которого установлена лазерная решетка (целесообразнее всего устанавливая ее вплотную), а выходной торец расположен в передней фокальной плоскости проекционного объектива [1]. Излучение лазерной решетки, распространяясь по интегратору и отражаясь от его внутренних поверхностей (эффект полного внутреннего отражения), создает на его выходном торце гомогенное распределение энергетической яркости за счет суммирования потоков излучения элементарных лазерных диодов решетки. Выходной торец интегратора непосредственно проектируется на местность с помощью объектива.

Интегратор может быть выполнен в виде одножильного стеклянного световода с внешней оболочкой или без нее, а также в виде полого металлического световода с зеркально отражающими поверхностями. Применение металлических полых интеграторов приводит к устранению френелевских потерь энергии излучения, возникающих при отражении от торцов, а также вследствие светопоглощения материала, что характерно для стеклянных световодов. Однако технология изготовления металлических интеграторов сложнее, чем стеклянных. Кроме того, возникает проблема защиты внутренних отражающих поверхностей интегратора от пыли. В связи с этим целесообразнее использовать стеклянные интеграторы с внешней оболочкой или без нее. При реальных продольных размерах интеграторов энергетические потери, связанные с отсутствием внешней оболочки, пренебрежимо малы. Снижение френелевских потерь на торцах интегратора может быть достигнуто за счет просветления. Форма и размеры поперечного сечения интегратора зависят от габаритных размеров тела свечения лазерной решетки, а также от требуемой формы и размеров пятна подсвета. Если не нужно изменять габаритные размеры тела свечения лазерной решетки, то используется интегратор постоянного сечения. Для изменения соотношения габаритных размеров тела свечения используется интегратор переменного сечения; это также позволяет снизить габаритные размеры ОСФИ.

Задача оптимизации параметров ОСФИ заключается в разработке ОСФИ минимальных габаритных размеров, обеспечивающей требуемую угловую расходимость излучения при заданных коэффициентах

использования $K_{ис}$ и неравномерности распределения освещенности в плоскости анализа $K_{н}$.

В соответствии с методикой решения поставленной задачи на первом этапе определяется функция, характеризующая зависимость продольного габаритного размера $L_{ОСФИ}$ от поперечного сечения D_2 выходного торца интегратора. При этом длина ОСФИ представляется в виде двух слагаемых:

$$L_{ОСФИ} = L_{и} + f'_{об},$$

$$L_{ОСФИ}(D_2) = L_{и}(D_2) + \frac{D_2}{2\text{tg}\alpha},$$

где $L_{и}$ — длина интегратора; $f'_{об}$ — фокусное расстояние объектива; D_2 — размер поперечного сечения выходного торца интегратора; 2α — угол подсвета.

Далее для функции $L_{ОСФИ}(D_2)$ находятся значения размеров выходного торца, при которых она имеет минимум. ОСФИ, построенная на основе такого интегратора, имеет минимальные габаритные размеры. Величина фокусного расстояния проекционного объектива выражается через D_2 просто, зависимость же величины длины интегратора от D_2 имеет неявный вид. Для нахождения этой зависимости рассмотрим ход лучей в интеграторе с переменным сечением (рис. 1).

На рис. 1 использованы следующие обозначения: $\varphi_{вх}$ — угол падения луча на входной торец; $\varphi_{вых}$ — угол преломления луча на выходном торце; $x_{вх}$, $x_{вых}$ — координаты луча на входном и выходном торцах соответственно; D_1 , D_2 — размеры поперечных сечений входного и выходного торцов соответственно; i — угол между осью z и образующей отражающей поверхности интегратора; $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m$ — углы падения лучей на боковые грани интегратора; φ_0 — угол преломления входного луча в интеграторе; n — показатель преломления стекла интегратора.

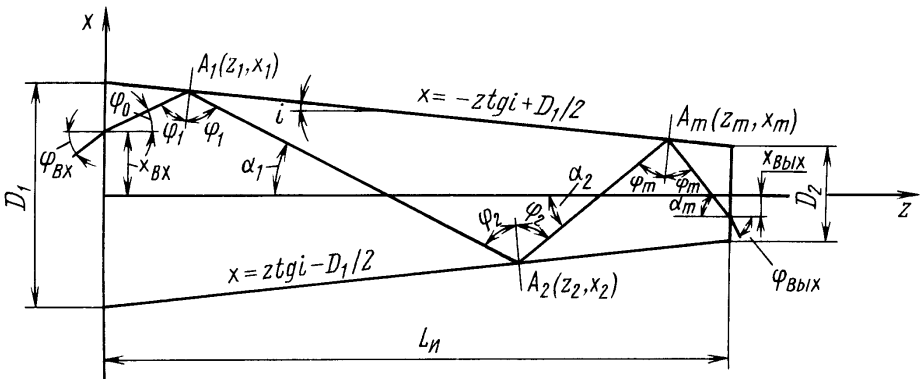


Рис. 1. Ход лучей в оптическом интеграторе с переменным сечением

Анализируя ход лучей в интеграторе, получим

$$\varphi_m = 90^\circ - (2m - 1)i - \varphi_0, \quad (1)$$

$$\alpha_m = 2mi + \varphi_0, \quad (2)$$

$$\varphi_0 = \arcsin \frac{\sin \varphi_{\text{вх}}}{n};$$

здесь m — количество отражений луча от боковых граней интегратора (луч лежит в меридиональной плоскости интегратора).

Поскольку принцип действия интегратора основан на эффекте полного внутреннего отражения, то очевидно, что угол падения луча после m отражений должен превышать некоторое критическое значение

$$\varphi_{\text{кр}} = \arcsin \frac{1}{n}.$$

Тогда первое необходимое условие работы интегратора имеет следующий вид:

$$90^\circ - (2m - 1)i - \varphi_0 > \arcsin \frac{1}{n}. \quad (3)$$

Угол, под которым луч выходит из интегратора, находим из выражения

$$\varphi_{\text{вых}} = \arcsin(n \sin(2mi + \varphi_0)).$$

Второе необходимое условие работы интегратора имеет вид

$$2mi + \varphi_0 \leq \arcsin \frac{1}{n}. \quad (4)$$

Можно показать, что число m отражений луча от боковых граней интегратора определяется из следующих выражений:

$$m = \frac{\arcsin \left(|a| \frac{2 \cos \varphi_0 \cos i}{D_2} \right) + i - \text{sign}(a) |\varphi_0|}{2i},$$

$$a = \text{sign}(\varphi_0) x_{\text{вх}} \text{tg } i + \frac{D_1}{2} \text{tg } |\varphi_0|, \quad (5)$$

$$i = \arctg \left(\frac{D_1 - D_2}{2L_{\text{н}}} \right), \quad \text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } x > 0, \\ -1 & \text{при } x < 0. \end{cases}$$

Поскольку m — целое число, то следует взять целую часть значения, полученного из выражения (5).

Очевидно, что в выражении (5) должно выполняться условие

$$\left(|a| \frac{2 \cos \varphi_0 \cos i}{D_2} \right) < 1.$$

Полагая $x_{\text{вх}} = D_1/2$ и $\varphi_0 = 0$, получим

$$i < \arcsin\left(\frac{D_2}{D_1}\right) - \varphi_0. \quad (6)$$

Это означает, что если величина угла i превышает некоторое критическое значение, то луч не выйдет из интегратора, даже если его боковые грани будут зеркальными поверхностями, а отклонится в обратную сторону.

Из неравенства (6) следует, что если значение D_2 меньше некоторого критического значения $D_{2\text{кр}}$, то угол i является отрицательной величиной и, в то же время, имеем $D_2 < D_1$. Это означает, что луч не сможет выйти из интегратора при любой его длине:

$$D_{2\text{кр}} = D_1 \left(\frac{\sin \varphi_{\text{вх}}}{n} \right).$$

Вернемся к рассмотрению ненарушения условия эффекта полного внутреннего отражения от боковых граней интегратора. Полагая $x_{\text{вх}} = D_1/2$ и $\varphi_0 = 0$, с учетом выражения (5) условие (3) преобразуем к виду

$$L_{\text{и}} > \frac{D_1 - D_2}{2 \operatorname{tg} \left(\arcsin \left(\frac{D_2}{D_1} \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n} \right)^2} \right) - \arcsin \left(\frac{\sin \varphi_{\text{вх}}}{n} \right) \right)}. \quad (7)$$

На рис. 2 представлен график зависимости $L_{\text{и}}(D_2)$ для минимальной длины интегратора, при которой условие эффекта полного внутреннего отражения от боковых граней не нарушается. Расчеты проведены для интегратора из стекла К8 с параметрами $D_1 = 10$ мм и $\varphi_{\text{вх}} = 10^\circ$.

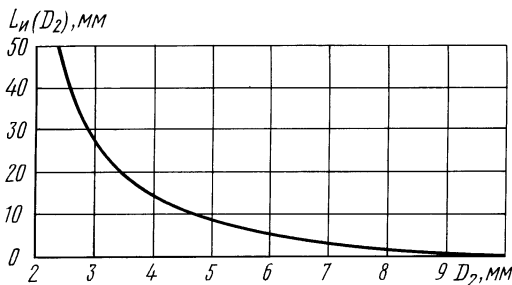


Рис. 2. Зависимость длины интегратора от размера поперечного сечения выходного торца

Координату $x_{\text{ВЫХ}}$ выхода луча из интегратора и выражение для угла $\varphi_{\text{ВЫХ}}$, который образует этот луч с оптической осью, определим из следующих выражений:

$$a = \text{sign}(\varphi_0) x_{\text{ВХ}} \text{tg } i + \frac{D_1}{2} \text{tg } |\varphi_0|,$$

$$m = \left[\frac{\arcsin \left(\left| a \right| \frac{2 \cos \varphi_0 \cos i}{D_2} \right) + i - \text{sign}(a) |\varphi_0|}{2i} \right],$$

$$\alpha_m = |2mi + \text{sign}(a) |\varphi_0||,$$

$$x_m = (-1)^{m+1} \left(a \frac{\cos \varphi_0 \cos i}{\sin(\alpha_m - i)} \right),$$

$$z_m = \frac{D_1}{2 \text{tg } i} - \frac{|x_m|}{\text{tg } i} \text{sign}(\alpha_m - 1) \text{sign}(1,5 + \text{sign}(m - 0,5) + \text{sign}(a)),$$

$$b = (-1)^m \text{sign}(a) \text{sign}(m + 0,5 \text{sign}(a)),$$

$$x_{\text{ВЫХ}} = \text{sign}(\varphi_0) (b \text{tg } \alpha_m L_{\text{И}} + (x_m - b \text{tg } \alpha_m z_m)), \quad (8)$$

$$\varphi_{\text{ВЫХ}} = \arcsin(n \sin(\alpha_m)), \quad (9)$$

где $[x]$ — целая часть x .

На рис. 3 представлены графики зависимости $\varphi_{\text{ВЫХ}}(L_{\text{И}})$ для рассматриваемого интегратора. Из приведенных графиков видно, что зависимость угла $\varphi_{\text{ВЫХ}}$ от длины интегратора имеет периодический ступенчатый вид. Действительно, при возрастании длины интегратора угол $\varphi_{\text{ВЫХ}}$

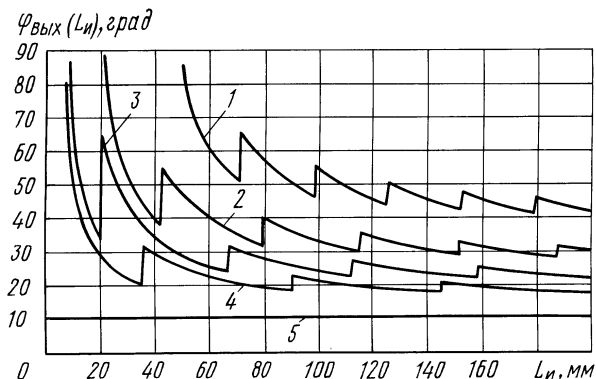


Рис. 3. Зависимость угла $\varphi_{\text{ВЫХ}}$ от длины интегратора для различных размеров поперечного сечения выходного торца: $D_2 = 3$ (1); 4 (2); 5 (3); 6 (4); 10 (5)

плавно уменьшается, но при достижении некоторого значения величина угла $\varphi_{\text{вых}}$ скачкообразно возрастает на величину, равную двойному углу наклона боковой грани интегратора к оптической оси. Графики имеют ступенчатый вид, потому что величина m (количество отражений) может быть только неотрицательным целым числом. Исключением из данного правила является интегратор в виде параллелепипеда: в нем угол $\varphi_{\text{вых}}$ не зависит от длины интегратора и равен углу $\varphi_{\text{вх}}$.

Из приведенных на рис. 3 графиков видно, что для интегратора с переменным сечением выходного торца угол $\varphi_{\text{вых}}$ не будет равен углу $\varphi_{\text{вх}}$, как для интегратора с постоянным сечением, а будет больше его. При небольших длинах интегратора с переменным сечением выходного торца данный луч будет виньетироваться проекционным объективом. Это имеет важное значение, поскольку от этого зависит коэффициент использования излучения.

На основе формул (8) и (9) написаны программы, с помощью которых определяют коэффициент неравномерности распределения энергетической яркости на выходном торце интегратора и коэффициент использования излучения ОСФИ. Пользуясь данными программами, можно найти зависимость $L_{\text{н}}(D_2)$, для которой выполняются следующие условия:

- 1) коэффициент неравномерности распределения освещенности $K_{\text{н}}$ составляет не более 10 %;
- 2) коэффициент использования излучения ОСФИ $K_{\text{ис}}$ составляет не менее 90 %.

По разработанной методике спроектирована ОСФИ на основе лазера, формирующая пятно подсвета с угловыми размерами $1^\circ \times 2^\circ$ и относительным отверстием проекционного объектива 1:1,5. Технические характеристики полупроводникового лазера, на основе которого спроектирована ОСФИ, следующие:

Выходная мощность	400 Вт
Длина волны	808 нм
Спектральная ширина	менее 4 нм
Длина импульса	до 0,4 мс
Частота импульсов	до 20 Гц
Размеры излучающей площадки	$10 \times 5 \text{ мм}^2$
Шаг между линейками диодов	0,5 мм (20 линеек)
Расходимость	10×5 град

На рис. 4 представлены зависимости коэффициента использования излучения ОСФИ от длины интегратора, построенные программой на

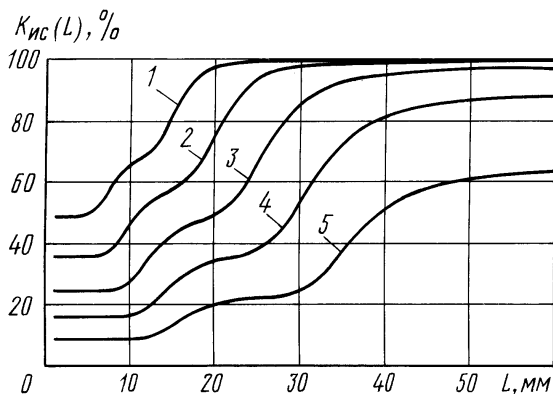


Рис. 4. Зависимость коэффициента использования излучения ОСФИ от длины интегратора для различных размеров выходного торца:

1 — $D_{2x} = 3,5$ мм, $D_{2y} = 7$ мм; 2 — $D_{2x} = 3$ мм, $D_{2y} = 6$ мм; 3 — $D_{2x} = 2,5$ мм, $D_{2y} = 5$ мм; 4 — $D_{2x} = 2$ мм, $D_{2y} = 4$ мм; 5 — $D_{2x} = 1,5$ мм, $D_{2y} = 3$ мм

основе формулы (9). По данным графикам для каждого размера выходного торца определена минимальная длина интегратора $L_{и1}$, при которой $K_{ис} > 90\%$.

Далее для каждого размера выходного торца при помощи разработанной программы определена минимальная длина интегратора $L_{и2}$, при которой коэффициент неравномерности

$$K_n = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \cdot 100\%$$

составляет менее 10%. В качестве примера на рис. 5 изображена зависимость K_n от длины интегратора для выходного торца размером 2,5 мм×5 мм. Из графика находим $L_{и2} = 25$ мм.

Из двух длин интегратора $L_{и1}$ и $L_{и2}$, соответствующих условиям 1), 2), выберем наибольшую:

$$L_n(D_2) = \max(L_{и1}(D_2), L_{и2}(D_2)).$$

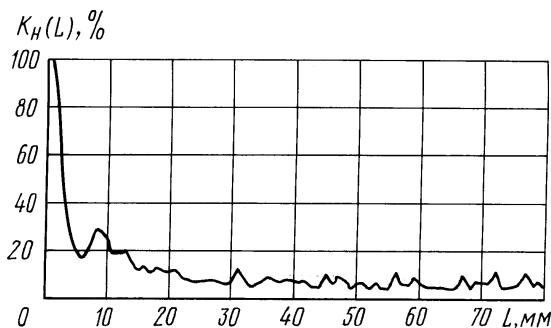


Рис. 5. Зависимость коэффициента неравномерности от длины интегратора

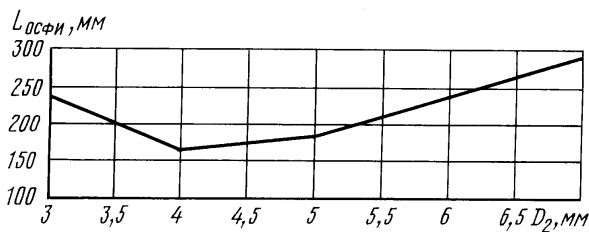


Рис. 6. Зависимость продольного габаритного размера ОСФИ от размера поперечного сечения выходного торца интегратора

Далее построим график функции $L_{\text{ОСФИ}}(D_2)$, представленный на рис. 6. Из графика видно, что минимальные габаритные размеры ОСФИ достигаются при $D_2 = 4 \text{ мм}$, т.е. при размерах выходного торца интегратора $2 \text{ мм} \times 4 \text{ мм}$ и длине интегратора, равной 50 мм . Тогда оптимальный интегратор из стекла К8 имеет следующие габаритные размеры: размер поперечного сечения входного торца $5 \text{ мм} \times 10 \text{ мм}$, длину 50 мм , размер поперечного сечения выходного торца $2 \text{ мм} \times 4 \text{ мм}$. При таком интеграторе фокусное расстояние проекционного объектива равно 114 мм , а продольный габаритный размер ОСФИ составляет 164 мм .

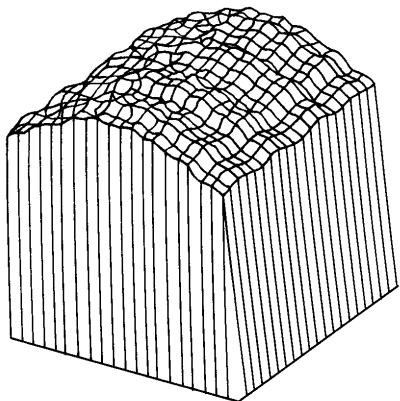


Рис. 7. Распределение освещенности в пятне подсвета

На рис. 7 представлено распределение освещенности в пятне подсвета с коэффициентом неравномерности 10% и коэффициентом использования излучения 90% .

Рассчитанный для сравнения продольный габаритный размер ОСФИ, построенной на основе интегратора с постоянным сечением, составляет 300 мм . Размеры этой ОСФИ столь велики из-за необходимости применения длиннофокусных объективов для обеспечения малых углов подсвета. Следовательно, построение ОСФИ на основе интегратора с переменным сечением позволяет значительно уменьшить габаритные размеры ОСФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гейхман И. Л., Волков В. Г. Основы улучшения видимости в сложных условиях. – М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 1999. – 286 с.

Статья поступила в редакцию 27.06.2002