

УДК 681.325.088.8

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИД ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Данилов А.В., Борзов Д.А.

В ряде случаев в оптоэлектронных преобразователях механических величин с интегральным принципом считывания первичной информации вынос чувствительных к дестабилизирующим факторам функциональных электронных узлов и элементов в область комфортных условий эксплуатации продиктован техническим заданием. Линия связи между оптомеханическим блоком и оптоэлектронным узлом реализуется здесь, как правило, при помощи элементов волоконной оптики. Методическая погрешность этих преобразователей зависит от уровня оптической мощности сигналов воспринимаемых фотоприемниками и характером распределения плотности оптического излучения по площади поверхности рабочей зоны считывания. Вопрос энергетического обеспечения процесса преобразования измеряемой величины и передачи ее эквивалента в оптическом диапазоне к удаленному фотоприемнику с сохранением высоких метрологических характеристик становится в этих случаях наиболее актуальным. Такие энергетические характеристики оптоэлектронных и оптоволоконных элементов, встроенных в преобразователи, как: диаграммы направленности источников излучения, коэффициенты светопропускания волоконных световодов, оптических разъемов и т.д. во многом определяют величину отношения сигнал/шум на входах фотоприемников.

Необходимо подчеркнуть, что основной задачей, решаемой светоизлучающим диодом (СИД) или лазерным диодом (ЛД) в оптоэлектронном преобразователе является введение необходимой оптической мощности в оптомеханический блок через волоконный световод. В связи с этим к данным СИД предъявляются следующие требования: а) высокая мощность излучения для обеспечения необходимой погонной длины линии связи; б) высокая энергетическая яркость для обеспечения эффективного согласования излучателя с волокном; в) минимальная угловая расходимость лучей диаграммы направленности излучателя для обеспечения максимального ввода оптической энергии в низкоапертурное волокно; г) длина волны излучения СИД должна находиться в области минимального затухания оптического сигнала в сердечнике волокна; и т.д.

В целях удовлетворения поставленным требованиям данные излучатели должны быть снабжены элементами конструкции, которые позволяют увеличить сбор излучения с поверхности кристалла, поднять внешнюю энергетическую эффективность, обеспечить формирование необходимой диаграммы направленности, а также удобный монтаж прибора в оптическом разьеме. Так, например, СИД инфракрасного спектрального

диапазона типа АЛ107 с кристаллом из $GaAs$, содержащей мезоструктуру диаметром 0,3 мм и полусферическую поверхность излучения радиусом 1 мм позволяет увеличить внешнюю эффективность вывода оптической энергии примерно в $3 \div 4$ раза по сравнению с таким же СИД имеющим плоскую поверхность. Однако полуширина его диаграммы направленности находится в пределах $40 \div 120$ град., что в свою очередь ограничивает ввод оптической энергии в стандартный волоконный световод типа К-К125/50 до 0,7 %. Для анализа диаграммы направленности СИД с полусферой обратимся к рис.1, на котором изображен ход луча с границы p - n перехода кристалла через полусферу с показателем преломления $n_{сф}$ в переднее полупространство.

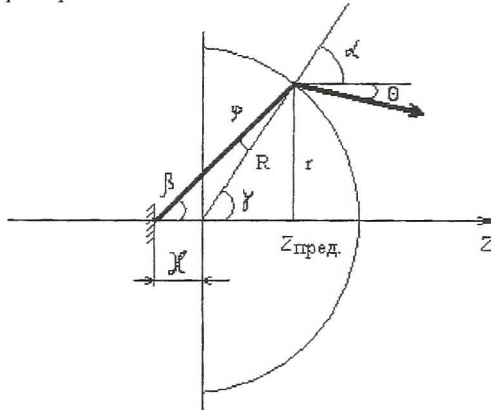


Рисунок1 К анализу диаграммы направленности СИД с полусферой

Допустим, что с поверхности кристалла излучение направлено по закону Ламбертова источника. Угол падения на внутреннюю поверхность полусферы φ , до полного внутреннего отражения, ограничен по закону Снеллиуса критическим углом $\varphi_{кр} = \arcsin(1/n_{сф})$. Коэффициент Френеля $\tau_{фр}$ для нормальных к внутренней поверхности полусферы лучей равен:

$$\tau_{фр} = (\sin 2\varphi \cdot \sin 2\alpha) / \sin(\varphi + \alpha) \quad (1)$$

Исходя из закона Снеллиуса:

$$(\sin \alpha) / (\sin \varphi) = n_{сф} / n_в, \quad (2)$$

где $n_в$ – показатель преломления воздуха, можно (1) записать в следующем виде:

$$\tau_{фр} = \frac{4 \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt{n_{сф}^2 - \sin^2 \alpha}}{[\cos \alpha + \sqrt{n_{сф}^2 - \sin^2 \alpha}]^2} \quad (3)$$

Выразим в (3) через β - угол между осью Z и лучом с поверхности кристалла:

$$\tau_{\text{фр}} = \frac{4 \cdot n_{\text{сф}} \cdot \sqrt{1 - n_{\text{сф}}^2 \frac{\chi^2}{R^2} \sin^2 \beta} \sqrt{1 - \frac{\chi^2}{R^2} \sin^2 \beta}}{\left[\sqrt{1 - n_{\text{сф}}^2 \frac{\chi^2}{R^2} \sin^2 \beta} + n_{\text{сф}} \sqrt{1 - \frac{\chi^2}{R^2} \sin^2 \beta} \right]^2}, \quad (4)$$

где χ - расстояние между центром полусферической линзы и излучающей площадкой. Конкретное значение χ принимает из условия: $0 < \chi < (f - R)$, где f - фокусное расстояние преломляющей поверхности равно $R \cdot n_{\text{сф}} / (n_{\text{сф}} - 1)$; R - радиус полусферы. Диаграмма направленности для излучателя с кристаллом, выполненным в виде полусферы (без учета преломляющих покрытий) описывается следующим выражением:

$$F(\beta) = \frac{4 \cdot n_{\text{сф}} \cdot \sqrt{1 - n_{\text{сф}}^2 \frac{\chi^2}{R^2} \sin^2 \beta} \sqrt{1 - \frac{\chi^2}{R^2} \sin^2 \beta}}{\left[\sqrt{1 - n_{\text{сф}}^2 \frac{\chi^2}{R^2} \sin^2 \beta} + n_{\text{сф}} \sqrt{1 - \frac{\chi^2}{R^2} \sin^2 \beta} \right]^2} \cdot \cos \beta \quad (5)$$

Для вычисления (5) зададимся показателем преломления $n_{\text{сф}}$ полусферы, изготовленной из материала $GaAs$: $n_{\text{сф}} = 3,54$. Варьируя параметром χ в пределах $0 < \chi < R \cdot n_{\text{сф}} / (n_{\text{сф}} - 1)$, например, $\chi_1 = 0,2$ мм; $\chi_2 = 0,26$ мм; $\chi_3 = 0,32$ мм; $\chi_4 = 0,38$ мм, получим, после нормирования, типичные диаграммы направленности излучения СИД типа АЛ107, представленные на рис.2.

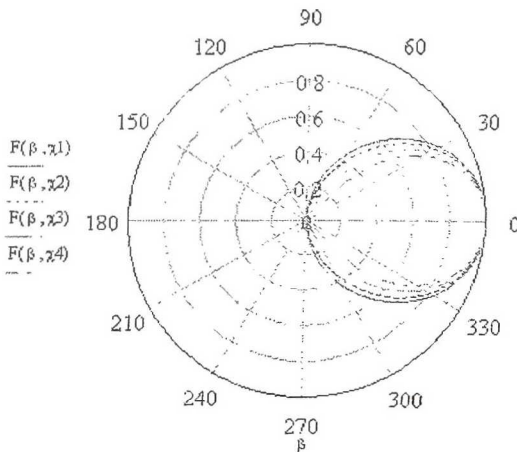


Рисунок 2 - Расчетные диаграммы направленности излучения светодиода типа АЛ107

Из рис.2 видно, что с уменьшением параметра χ диаграмма направленности СИД расширяется по уровню 0,5, что приводит к ухудшению направленности излучения. Если же χ выбрать равным $R \cdot n_{\text{сф}} / (n_{\text{сф}} - 1)$ т.е. поместить кристалл в фокус полусферы, то значительно увеличиваются потери на френелевское отражение, что приводит к снижению эффективности вывода излучения.

Апертура данного СИД может быть рассчитана по следующей зависимости:

$$n_{\text{в}} \cdot \sin \theta = \frac{\chi}{R} \cdot \sqrt{f(\chi, z_0)} \cdot \left[n_{\text{сф}} \cdot \left[1 - \frac{\chi^2}{R^2} \cdot f(\chi, z_0) \left(\frac{\chi + z_0}{\sqrt{R^2 + 2 \cdot \chi \cdot z_0 + \chi^2}} + \sqrt{1 - \frac{\chi^2}{R^2} \cdot f(\chi, z_0)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right. \quad (6)$$

$$\left. \left(\frac{\chi + z_0}{\sqrt{R^2 + 2 \cdot \chi \cdot z_0 + \chi^2}} + \sqrt{1 - \frac{\chi^2}{R^2} \cdot f(\chi, z_0)} \right) \sqrt{1 - \frac{n_{\text{сф}}^2 \cdot \chi^2}{R^2} \cdot f(\chi, z_0)} \right],$$

$$\text{где } f(\chi, z_0) = (R^2 - z_0^2) / (R^2 + 2 \cdot \chi \cdot z_0 + \chi^2)$$

Для получения узкой диаграммы направленности излучения важно отношение R/r , где r – эффективный радиус светящейся поверхности кристалла. Практически для достижения угла излучения $5 \div 15$ град. Отношение R/r должно превышать $15 / 1$.

Согласно [2] оптическая мощность излучения в переднее полупространство определяется из выражения:

$$P_u = n_{\text{с}} \cdot B_0 \cdot \kappa_u \cdot S_u \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} F(\theta, \varphi) \sin \theta d\varphi d\theta, \quad (7)$$

где B_0 – яркость поверхности излучения;
 κ_u – коэффициент использования площади излучения;
 S_u – площадь поверхности излучения;
 $F(\theta, \varphi)$ – диаграмма направленности СИД;
 $n_{\text{в}} \cdot \sin \theta$ – апертура СИД.

Выразим апертуру СИД через угол β . Подставим ее значение из (5) в (7), тогда для P_u можно записать:

$$P_u = 2 \cdot \pi \cdot B_0 \cdot \kappa_u \cdot S_u \int_0^{\beta_{\text{пред.}}} F(\beta) \cdot \sin \left[\beta - \text{Arcsin} \left(n_{\text{сф}} \cdot \frac{\chi}{R} \cdot \sin \beta \right) + \right. \quad (8)$$

$$\left. + \text{Arcsin} \left(\frac{\chi}{R} \cdot \sin \beta \right) \right] \cdot \left[1 - \frac{\chi}{R} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\chi^2}{R^2} \cdot \sin^2 \beta}} - \frac{n_{\text{сф}}}{\sqrt{1 - n_{\text{сф}}^2 \cdot \frac{\chi^2}{R^2} \cdot \sin^2 \beta}} \right) \cdot \cos \beta \right] d\beta,$$

где $\beta_{\text{пред}}$ – максимальное значение угла, под которым оптический луч еще проходит через преломляющую поверхность.

Полученное выражение справедливо для всех СИД, имеющих полусферические поверхности излучения. Так, например, для СИД типа АЛ 107, при $n_{\text{сф}} = 3.54$, $\chi_0 = 0.1$ мм, $\chi_1 = 0.2$ мм, $\chi_2 = 0.26$ мм, $\chi_3 = 0.32$ мм, $\chi_4 = 0.38$ мм, $\chi_5 = 0$ мм, $R = 1$ мм, $\kappa_n = 1$, $S_n = 2\pi R(R - Z_{\text{пред}})$ при $Z_{\text{пред}} = 0.75 R$, $B_0 = 1$ мВт/м² нормированная функция мощности излучения в переднее полупространство, в зависимости от апертурного угла, имеет вид представленный на рис.3. В отличие от СИД, лишенного полусферической поверхности излучения, в этом СИД внешняя квантовая эффективность выше в 4 раза.

Таким образом, сужение диаграммы направленности излучения сопровождается увеличением силы света. Так, для диодов с апертурным углом излучения $5 \div 15$ град. Коэффициент оптического усиления (отношение силы света диода к силе света кристалла) достигает $40 \div 60$ (GaP) и $80 \div 100$ (Ga_{0.7}Al_{0.3}As) / 3 /. Более высокий коэффициент оптического усиления диодов из Ga_{0.7}Al_{0.3}As обусловлен более узкой исходной диаграммой направленности излучения кристалла.

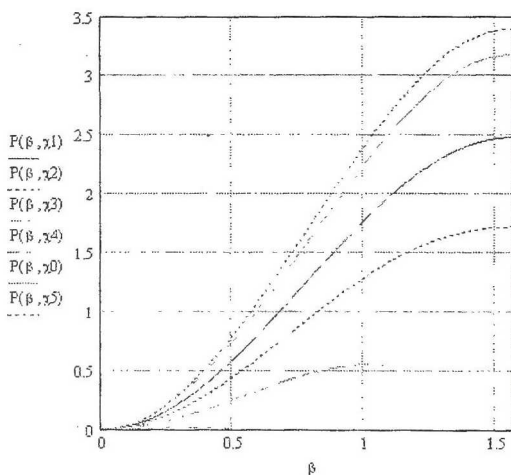


Рисунок 3 Зависимость оптической мощности излучения СИД типа АЛ 107 от β -угла наклона луча с границы p-n перехода относительно оптической оси Z и χ -расстояния между этой границей и центром полусферы кристалла.

Список использованных источников

1. Коган Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 208 с.
2. Андрушко Л.М., Гроднев И.И., Панфилов И.П. Волоконно-оптические линии связи: Учеб. пособие для вузов. - М.: Радио и связь, 1985. - 136 с.
3. Крикунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов.радио, 1978. - 400 с.