**Содержание**

ВВЕДЕНИЕ

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

1.1 Светоизлучающиие диоды

1.1.1 Области применения и требования к приборам

1.1.2 Светоизлучающий кристалл

1.1.3 Устройство светоизлучающих диодов

1.1.4 Светоизлучающие диоды с управляемым цветом свечения

1.1.5 Индикаторы состояния

1.1.6 Индикаторы на светодиодах

1.2 Полупроводниковые материалы, используемые в производстве светоизлучающих диодов

1.2.1 Арсенид галлия

1.2.2 Фосфид галлия

2 РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЕТОДИОДА

2.1 Основные параметры светодиода

2.2 Расчет светодиода

2.2.1 Расчет эффективности светодиода

2.2.2 Расчет телесного угла

2.2.3 Примерный расчет эффективности

2.2.4 Уточненный расчет эффективности

2.2.5 Расчет составляющих эффективности

2.2.6 Расчет инжекции не основных носителей тока

2.2.7 Расчёт светодиодного резистора

ВЫВОДЫ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

# **ВВЕДЕНИЕ**

Полупроводниковые светоизлучающие диоды (СИД) или светодиоды - это класс твердотельных приборов, в которых электрическая энергия непосредственно преобразуется в световую. В основе их действия лежит инжекционная электролюминесценция, эффективная в соединениях типа АIIIВV. Так же светодиоды решают задачу преобразования электрических сигналов в оптические, служат эффективными по КПД источниками света.

На сегодняшний день СИД активно применяются в различных областях: оптоэлектроника, системы отображения информации (как табло «бегущих» строк текста, так и достаточно качественных панелей вывода статичного и динамического изображений). Круг задач, при решении которых используются светодиоды, обусловлен высокой эффективностью преобразования электрической энергии в световую (15-20 лм/Вт, лампы накаливания – 10-15 лм/Вт), высокой яркостью и квантовым выходом (при небольшой площади СИД сила света по оси – 30-50 кд), высоким быстродействием (малая инерционность – порядка единиц наносекунд), характерным спектральным составом, возможностью модуляции излучения питанием, малым потреблением энергии (доли или единицы ватт), электробезопасностью (единицы вольт), надежностью, большим сроком службы (десятки тысяч часов), высокой устойчивостью к механическим и климатическим воздействиям.

Первые явления, связанные с появлением светодиодов, были обнаружены Лосевым О.В. в 1923 г. Активное развитие технологии изготовления СИД с различными параметрами продолжается и сегодня.

Кроме вышеперечисленных сфер СИД задействованы в освещении. Применение СИД для освещения обусловлено, как указывалось выше, высоким КПД преобразования энергии, надёжностью конструкции, хорошо развитой на сегодняшней день технологией изготовления СИД с различными параметрами свечения.

Как и практически любой источник излучения, СИД функционирует совместно с оптической системой, формирующей требуемую кривую силы света (КСС).

Огромный интерес, проявляемый к светоизлучающим диодам специалистами в области радиоэлектроники, отображения информации, оптоэлектроники, обусловлен их замечательными характеристиками: высокой эффективностью преобразования электрической энергии в световую, высоким быстродействием, малым потреблением энергии, надежностью, большим сроком службы, высокой устойчивостью к механическим и климатическим воздействиям.

# **1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ**

#

# **1.1 Светоизлучающиие диоды**

## **1.1.1 Области применения и требования к приборам**

Светоизлучающий диод состоит из кристалла полупроводника с электронно-дырочным переходом и омическими контактами и элементов конструкции, предназначенных для сбора излучения, увеличения внешней оптической эффективности, улучшения восприятия свечения и формирования необходимой диаграммы направленности излучения, а также обеспечения электрического контактирования с внешней цепью и удобного монтажа прибора в аппаратуре. Таким образом, светоизлучающий диод - прибор, в котором осуществляется не только генерация света, но и перераспределение его в пространстве.

Рисунок 1.1 – Схематическое изображение светодиода

Требования к устройству и характеристикам светоизлучающих диодов определяются областями их применения:

1. Сигнальная индикация;
2. Подсветка постоянных надписей, меток на экране, шкалах;
3. Отображение шкальной информации в бесстрелочных измерительных приборах;
4. Разнообразные функциональные применения - маркировка фотопленок, контроль быстродействующих ФЭУ и т. п.

При рассмотрении применения светоизлучающих диодов в качестве сигнальных индикаторов различают панельную и внутрисхемную индикацию. К светоизлучающим диодам для панельной индикации предъявляются следующие требования:

а) сила света, как правило, должна превышать 1 мкд, причем яркость светоизлучающего диода должна превосходить яркость выключенного диода и яркость фона при максимально допустимой внешней освещенности;

б) площадь светящейся поверхности должна быть достаточна для уверенного восприятия сигнала: при наблюдении с близкого расстояния (0,5-1м) она должна быть не менее 1-3 мм2, при наблюдении с большего расстояния - не менее 8-10 мм2;

в) диаграмма направленности излучения должна быть достаточно широкой (угол излучения, как правило, должен превышать 50 °);

г) светоизлучающие диоды должны изготавливаться, по крайней мере, трех цветов свечения: красного, зеленого и желтого; желательно расширение цветности;

д) конструкция диодов должна иметь высокое отношение диаметра (поперечного размера) светящейся поверхности к наружному диаметру (размеру) прибора для обеспечения плотного монтажа диодов на панели.

Особенность применения светоизлучающих диодов для внутрисхемной индикации заключается в том, что они в этом случае наблюдаются с близкого расстояния (около 0,5 м) и монтируются, в основном, на печатной плате, включая ее торец. В связи с этим для внутрисхемной индикации могут использоваться диоды с малой площадью светящейся поверхности. Выводы диодов должны быть удобны для распайки на печатной плате. [7].

К светоизлучающим диодам, применяемым для подсветки, предъявляются требования большей силы света - десятки милликандел. При этом допустимо сужение диаграммы направленности излучения до 5-25°. Для отображения цифро-буквенной и графической информации на экранах, собранных из дискретных приборов, могут применяться широкоугольные светоизлучающие диоды, например используемые для панельной индикации. Для отображения шкальной информации используются миниатюрные светоизлучающие диоды и линейки из них. К этим приборам предъявляются требования широкого угла излучения и возможности бесшовной стыковки в линию.

В разнообразных фотоэлектрических устройствах и малоразмерных табло применяют бескорпусные светоизлучающие диоды. К ним предъявляют требования миниатюрности и наличия выводов, пригодных для монтажа методами микротехнологии.

Ко всем видам светоизлучающих диодов предъявляют следующие требования:

1) низкие токи питания (5-10 мА) И входные напряжения (менее 3 В) этим обеспечиваются совместимость светоизлучающих диодов с транзисторными интегральными схемами и низкая рассеиваемая мощность; последняя необходима для осуществления плотного монтажа приборов;

2) высокая надежность, больший срок службы, устойчивость к механическим и климатическим воздействиям;

3) высокая технологичность изготовления и низкая стоимость.

##

## **1.1.2 Светоизлучающий кристалл**

Для изготовления светоизлучающих кристаллов используют эпитаксиальные структуры. Выбор вида эпитаксиальных структур определяется назначением диода и основными характеристиками кристаллов на основе рассматриваемых структур.

Для получения максимальной силы излучения предпочтительны структуры Ga0,7Al0,3As, GaP: Zn, О. Следует иметь в виду, что кристаллы на основе структур с прозрачной подложкой, например структур на GaP-подложке, имеют значительное боковое излучение, что позволяет при его сборе и использовании существенно увеличить силу света и силу излучения.

В производстве светоизлучающих диодов используются кристаллы весьма малых. Это вызывается следующими обстоятельствами: высокой стоимостью и дефицитностью исходных материалов; повышением квантового выхода излучения с увеличением плотности тока для большинства материалов; повышением эффективности оптической системы светоизлучающего диода для сбора и преобразования излучения при уменьшении размера кристалла; возможностью получить светящееся пятно необходимых размеров за счет различных конструктивных решений по прибору в целом.

Ограничивающие факторы в уменьшении размера кристалла: возрастающие трудности сборки, особенно автоматизированной, и деградация оптических характеристик приборов в процессе работы. В связи с изложенным, в настоящее время кристалл светоизлучающих диодов в большинстве случаев имеет размер грани от 0,35 до 0,5 мм.

Омические контакты к кристаллам изготавливают методами тонкопленочной технологии. Тонкий слой контактного металла более теплопроводен и электропроводен, чем толстый, вызывает меньшие механические напряжения в кристалле и позволяет скалывать или вырезать кристалл вместе с контактным металлом. Одновременно контакты в виде плоских пленок позволяют применить высокопроизводительную технологию приварки гибкого вывода и пайки кристаллов на кристаллодержатель с использованием современного микросборочного оборудования. [1].

При изготовлении контактов к кристаллам светоизлучающих диодов верхний омический контакт должен быть, с одной стороны, минимальной площади для уменьшения потерь света, с другой стороны, содержать площадку, согласованную по размерам со сварочным инструментом, а также иметь элементы, обеспечивающие равномерное растекание тока по площади р-n-перехода. Для достижения последней цели применяют также дополнительное поверхностное легирование структуры, например методом диффузии. Равномерное растекание тока по площади р-n-перехода улучшает стабильность диодов в процессе работы и вывод излучения из кристалла.

Нижний контакт может быть сплошным, если подложка непрозрачна для генерируемого излучения, и может быть отражающим свет для кристаллов с прозрачной подложкой. Во втором случае площадь омических контактов должна быть, с одной стороны, минимальной для обеспечения максимальной доли отраженного света, а с другой стороны, достаточной для обеспечения необходимого теплоотвода от кристалла и необходимой величины прямого напряжения.

Отражение света отражающим нижним контактом основано на эффекте полного внутреннего отражения света, падающего на границу раздела полупроводник-диэлектрик под углом, большим критического. Отраженный от нижней грани свет повторно падает на верхнюю или боковые грани кристалла и увеличивает долю выводимого из кристалла света. Этот процесс может повторяться несколько раз.

В последнее время изготавливают также кристаллы с мезаструктурой на основе высокоэффективных жидкостно-эпитаксиальнйх структур со сплошным р-n-переходом. Достоинства таких кристаллов следующие:

1) для структур с сверхлинейной зависимостью квантового выхода излучения от плотности тока (например, GaP : N) применение мезаструктур позволяет увеличить плотность тока и, тем самым, эффективность приборов;

2) уменьшение размеров светящейся области кристалла повышает эффективность оптической системы диода и, тем самым, эффективность прибора в целом;

3) увеличение плотности тока способствует повышению эффективности диодов при малых токах питания, что позволяет применять их в устройствах с батарейным питанием;

4) расширяется диапазон токов, в котором наблюдается линейная зависимость мощности излучения от тока, что позволяет использовать светоизлучающие диоды в аналоговых оптоэлектронных устройствах;

5) наличие травленой поверхности в месте выхода р-n-перехода наружу и отсутствие разрушенного резкой слоя повышает стабильность и надежность приборов в эксплуатации;

6) снижается трудоемкость монтажа кристаллов на держатель благодаря применению кристаллов приемлемых размеров.

Кристаллы с мезаструктурой на основе GaP : N из-за увеличения плотности тока в 2-3 раза позволили получить в 1,3-1,5 раза большую силу света, чем дают кристаллы плоской конфигурации с площадью р-n-перехода 0,25/мм2. Увеличение силы света обусловлено характерной для GaP : N зависимостью η≈Jn, где J - плотность тока; n≈l,5.

Получают некоторое развитие также кристаллы с планарной структурой на основе жидкостно-эпитаксиальных структур со сплошным р-n-переходом, получаемые разделительной диффузией цинка (например, на основе Ga1-xAlxAs гетероструктур р+-р-n-типа). Достоинства приборов на основе таких планарных кристаллов - высокая эффективность, а также стабильность и надежность в процессе эксплуатации. По-видимому, применение жидкостно-эпитаксиальных кристаллов с мезаструктурой или планарным р-n-переходом в дальнейшем будет расширяться для создания приборов с повышенной эффективностью и надежностью.

Следует отметить, что из структур с прозрачной подложкой (например, из GaP структур) могут быть изготовлены также кристаллы полусферической конфигурации. Б этом случае внешний квантовый выход излучения увеличивается за счет уменьшения потерь на полное внутреннее отражение света. В одной из работ получены диоды с зеленым свечением с ηвн=0,41 % (на сравнительных диодах с плоским кристаллом ηвн=0,17 %). Спектр излучения полусферических диодов более зеленый. Это объясняется тем, что в полусфер ических кристаллах большая часть света выводится после первого падения излучения на поверхность, благодаря чему уменьшается поглощение света в кристалле, особенно в коротковолновой части спектра. Однако полусферические кристаллы из GaP не нашли практического применения в связи с увеличением стоимости прибора.

##

## **1.1.3 Устройство светоизлучающих диодов**

Выпускаемые промышленностью светоизлучающие диоды по конструкции могут быть разделены на следующие группы:

1) в металло-стеклянном корпусе;

2) в конструкции с полимерной герметизацией на основе металло-стеклянной ножки или рамочного держателя

3) бескорпусные диоды.

а)

б)

в)

а – плоская; б – плоскопланарная; в – волусферическая;

1 – выводы; 2 – кристалл; 3 – полимерная линза.

Рисунок 1.2 Конструкция светодиодов.

Диоды в металло-стеклянном корпусе отличаются высокой надежностью и стабильностью параметров, механической и климатической устойчивостью.

Диоды с полимерной герметизацией по некоторым характеристикам имеют преимущества перед диодами в металло-стеклянной конструкции

а) полимерная герметизация в большей степени позволяет осуществить перераспределение света в пространстве как в направлении сужения диаграммы направленности излучения (с увеличением силы света), так и в направлении ее расширения;

б) полимерная герметизация увеличивает внешний квантовый выход излучения за счет увеличения угла полного внутреннего отражения на границе кристалл –полимер,

в) герметизированные полимерами приборы обладают большей стойкостью к ударным и вибрационным нагрузкам, чем приборы в металло-стеклянных корпусах

г) полимерная герметизация позволяет получить при необходимости малое отношение объема (габарита) прибора к объему (габариту) кристалла;

д) полимерная герметизация благодаря своей технологичности позволяет существенно снизить трудоемкость изготовления приборов и их стоимость. Однако диоды с полимерной герметизацией в настоящее время уступают диодам в металло-стеклянном корпусе в отношении устойчивости к длительному воздействию влажности и резкой смене температур.

Бескорпусные диоды - самые миниатюрные светоизлучающие диоды, используемые в герметизируемой аппаратуре. Кристаллодержатель светоизлучающего диода содержит, как правило, посадочное место для кристалла с отражающими свет стенками. Отражающие стенки охватывают боковое излучение в угле примерно 45-50°. Они в значительной степени сужают диаграмму направленности излучения и увеличивают силу света в осевом направлении. Помещение в посадочное место кристалла с непрозрачной подложкой (например, из Ga0,7Al0,3As) приводит к несколько меньшему эффекту: сужению диаграммы направленности с 120 до 75 ° и увеличению осевой силы света примерно в 1,5 раза.

Одновременно с увеличением силы света и сужением диаграммы направленности излучения применение описанного кристаллодержателя в металло-стеклянных конструкциях приводит к улучшению восприятия излучения за счет увеличения светящейся площади и повышения контрастности. Кристалл и светящееся кольцо отражателя разделены более темным кольцом. Наличие на светящейся поверхности ярких и темных участков увеличивает ее контрастность и способствует лучшему визуальному восприятию.

Значительное перераспределение светового излучения осуществляется полимерной линзой, которая формирует необходимую диаграмму направленности излучения. Форму полимерной линзы выбирают, как правило, такой, что излучающий кристалл располагается между фокусом преломляющей поверхности, образованиой полусферической линзой, и центром этой линзы. Фокусное расстояние определяется по формуле:

f =Rnl(n-1) (1.1)

где R - радиус полусферической полимерной линзы;

n –показатель преломления компаунда.

Расстояние от центра кристалла до центра сферической поверхности определяется в зависимости от заданной диаграммы направленности излучения.

Рассмотрим, каким образом осуществить оптимизацию размеров полимерной линзы для светоизлучающих диодов различного назначения. Угол вывода излучения по отношению к оси прибора равен:

Q=Θ-r+I (1.2)

С учетом закона Снелла:

sinr=nsint (1.3)

Получаем выражение для зависимости угла Q от Θ отношения S/R:

Q=Θ-arcsin[n(S/R-1)sinΘ]+arcsin[S/R-1)sinΘ] (1.4)

Для диодов с узконаправленным излучением (с углом излучения 5-15°) наиболее целесообразно использовать величину S/R =1,9–2,0. Конкретные значения S/R обычно подбирают с учетом действия отражателя света и рассеивающего эффекта, возникающего при в компаунд диспергирующего наполнителя.

В качестве материала для полимерной герметизации светоизлучающих диодов в большинстве случаев используется эпоксидный компаунд на основе прозрачной диановой смолы. Компаунд отличается весьма высоким светопропусканием. Хранение образцов компаунда при температуре +70-80°C практически не приводит к ухудшению светопропускания. Снижение светопропускания начинает наблюдаться при длительном хранении при температуре +100°C и выше, причем наибольшее поглощение света наблюдается в коротковолновой части видимого спектра. Введение красителя (например, красного) вызывает резкое увеличение поглощения коротковолнового света, но практически не влияет на поглощение света длинноволновой части видимого диапазона. Введение красителей способствует повышению контрастности свечения за счет поглощения рассеянного света окружающего пространства. Физико-механические характеристики компаунда позволяют получать диоды в полимерной герметизации, устойчивые к жестким климатическим и механическим воздействиям.

Для изготовления сигнальных светоизлучающих дидов, как правило, применяется компаунд, диспергированный светорассеивающим наполнителем. Наполнитель позволяет увеличить размер светящегося пятна и расширить диаграмму направленности излучения (увеличить угол излучения). Одновременно он резко понижает интенсивность отраженного диодом внешнего света и, тем самым, снижает эффект отсвечивания для невключенных диодов.

Основное требование, которому должен отвечать светорассеивающий компаунд, максимальное рассеяние света при минимальном поглощении. В основе явления рассеяния света лежит нарушение оптической однородности среды, которое обуславливает различие в скорости распространения света в ее разных частях. Нарушение оптической однородности среды может быть вызвано какими-либо включениями, показатель преломления которых отличается от показателя преломления среды, в результате чего возникают эффекты преломления и рассеяния света. За счет этих эффектов свет отклоняется от своего первоначального направления. Оптимальным светорассеивающим наполнителем следует считать оптически прозрачный аморфный материал с коэффициентом преломления, близким к коэффициенту преломления основного вещества. Этому условиюхорошо отвечает, например, стекло кварцевое, оптическое, с показателем преломления n≈1,46, измельченное до частиц размером не более 15 мкм.

Диоды с полимерной герметизацией, в основном, изготавливают на многокадровых рамочных держателях. В некоторых случаях для получения высокоэффективных приборов используются рамочные держатели с встроенным отражателем света. Преимущества диодов, изготавливаемых на основе многокадровых держателей, заключаются в следующем:

1) технологичность производств а, Основанная на изготовлении держателя методом штамповки, использовании типовых высокопроизводительных установок для разводки вывода, применении групповой технологии полимерной герметизации (например, свободная заливка в многоместной форме), а также автоматизированном измерении фотометрических и электрических параметров приборов;

2) более высокая устойчивость к механическим и климатическим воздействиям по сравнению с конструкцией в полимерной герметизаций на основе металлостеклянной ножки; повышенная устойчивость обусловлена разветвленным профилем поверхности сцепления эпоксидного компаунда с держателем.

##

## **1.1.4 Светоизлучающие диоды с управляемым цветом свечения**

Светоизлучающие диоды - одни из немногих источников света, которые позволяют реализовать управляемое изменение цвета свечения. В настоящее время рассмотрено несколько путей создания светоизлучающих диодов с управляемым цветом свечения: двухпереходный однокристальный GaP диод; однопереходный двухполосный однокристальный GaP диод; двухкристальный биполярный диод с параллельным соединением кристаллов; двухкристальный диод с независимым включением кристаллов; двухпереходный однокристальный диод. один из р-n-переходов которого излучает красный свет, а другой - инфракрасное излучение, преобразуемое с помощью антистоксового люминофора в зеленое свечение.

Рисунок 1.3 – Структура светодиода с управляемым цветом свечения (а); его принципиальная схема (б).

Анализ оптических и электрических характеристик, технологичности и применения вышеуказанных видов светоизлучающих диодов с управляемым цветом свечения показал, что наибольший интерес в настоящее время представляет двухпереходный однокристальный GaP диод. Основные преимущества этого вида светоизлучающих диодов следующие:

1) позволяет получить более широкий, чем у однопереходного двухполосного GaP диода, диапазон изменения цвета свечения;

2) рабочий ток во всем спектральном диапазоне не более 20 мА в отличие от однопереходного GaP диода, у которого диапазон изменения тока существенно шире;

3) сила света примерно одинакова во всем спектральном диапазоне в отличие от однопереходного GaP диода, у которого сила света существенно различна для разных цветов свечения;

4) обеспечивает эффективное смешивание излучений двух полос, благодаря чему желтый и оранжевый цвета свечения имеют значительно лучшее качество, чем у двухкристальных диодов (последние фактически являются только двухцветными диодами);

5) позволяет отображать до пяти состояний объекта с помощью цветов: красный-оранжевый-желтый-зеленый-выключено (число отображаемых состояний может быть по крайней мере удвоено за счет использования мигающего свечения);

6) позволяет осуществить аналоговое отображение информации путем непрерывного изменения цвета свечения от красного до зеленого (через все оттенки);

7) имеет симметричную диаграмму направленности излучения в отличие от двухкристального диода, у которого кристаллы смещены относительно центра прибора, благодаря чему оси диаграмм направленности излучения расположены под углом к оптической оси прибора;

8) двухпереходный диод значительно эффективнее светоизлучающего диода, использующего преобразование инфракрасного излучения в видимое, так как Эффективность процесса антистоксового преобразования весьма низка.

Однако двухпереходный однокристальный GaP диод имеет и недостатки, а именно - более сложную технологию эпитаксиального выращивания структуры и изготовления кристаллов с тремя контактными областями.

Максимальная плотность тока через p-n-переход c зеленым свечением составляет 5,5 , через р-n-переход с красным свечением-9,0 . Омический контакт к верхней p-области занимает примерно 20 % ее площади, а контакт к нижней р-области примерно 40% площади нижней грани. Омический контакт к базовой n-области выполнен сплошным и непрозрачным, как для улучшения цветовой характеристики прибора, так и для повышения надежности получения низкоомного омического контакта к n-GаР.

Для получения повышенной мощности излучения применяют суперлюминесцентные диоды, занимающие промежуточное положение между инжекционными светодиодами и полупроводниковыми лазерами. Они обычно представляют собой конструкции, работающие на том участке ватт-амперной характеристики, на котором наблюдается оптическое усиление (стимулированное излучение). Этот участок характеризуется тем, что внешний квантовый выход на нем существенно больше, чем у обычного светодиода. Суперлюминесцентные диоды имеют уменьшенную спектральную ширину полосы излучения и требуют для работы больших плотностей тока (при мощности излучения 60 мВт плотность тока 3 кА/см2). Их применяют при работе с волоконно-оптическими линиями связи.

В ряде случаев в качестве управляемых источников света применяют инжекционные лазеры. Они отличаются от светодиодов тем, что излучение сконцентрировано в узкой спектральной области и является когерентным. Лазеры имеют относительно высокий КПД и большое быстродействие.

При когерентном излучении все частицы излучают согласованно (вынужденное стимулированное излучение) и синфазно с колебаниями, установившимися в резонаторе. Для обычных светодиодов характерны спонтанное излучение, складывающееся из волн, посылаемых различными частицами независимо друг от друга, и хаотическое изменение амплитуды и фазы суммарной электромагнитной волны.

Стимулированное излучение возникает при высокой концентрации инжектированных в полупроводник носителей заряда и наличии оптического резонатора. Поэтому объем зоны, где происходит излучательная рекомбинация, в полупроводниковых лазерах ограничивают с помощью конструктивных и технологических мер (площадь поперечного сечения 0,5-2 мкм2, протяженность зоны 300-500 мкм) и эту активную область выполняют из материала с другим показателем преломления, чем у окружающей ее среды. В итоге получается световод, торцы которого ограничены с обеих сторон зеркальными гранями (полупрозрачными зеркалами, получающимися при сколе кристалла). Он выполняет роль резонатора.

При токе инжекции, меньшем порогового значения (Іпор) наблюдается спонтанное излучение, как и в обычном светодиоде. При увеличении тока до Іпор (Іпор > 50-150 мА) и выше возникает стимулированное излучение и наблюдается резкое увеличение выходной оптической мощности, например с 5 мкВт/мА, характерной для спонтанного излучения, до 200 мкВт/мА. Благодаря тому что фотоны, появившиеся в процессе рекомбинаций, многократно проходят через световод, отражаясь от зеркальных граней, прежде чем им удается выйти за пределы кристалла через полупрозрачное зеркало, наблюдается монохроматичность и когерентность излучения.

Из-за дифракционных явлений в резонаторе сечение светового луча имеет эллипсоидную форму. Угол расходимости светового пучка около 20-50°.

Полупроводниковые лазеры широко применяются при создании световодных линий связи большой протяженности и в измерительных устройствах различного назначения.

Конструктивно диод выполнен в полимерной герметизации на основе металлостеклянной ножки, содержащей отражающую свет коническую поверхность, что позволяет использовать боковое излучение и увеличить в 2-3 раза силу света. Наличие заглубленного посадочного места облегчает центровку кристалла относительно оптической оси прибора. Высота полимерной линзы определена исходя из необходимости обеспечения заданной диаграммы направленности излучения (угол излучения 35°). Отношение высоты полимерной линзы S к радиусу сферы R выбрано равным 1,7.

Зависимость силы света от тока для зеленого цвета свечения сверхлинейна, для красного-сублинейна. Зависимость силы света от температуры для обоих р-n-переходов примерно одинакова. Температурный коэффициент составляет минус (5-8) 10-3 К-1.

Диод позволяет, управляемо изменять цвет свечения от красного до зеленого с получением промежуточных цветов: оранжевого, желтого и др.

В последнее время появились сообщения о создании двухпереходных однокристальных GaP диодов повышенной эффективности, содержащих оба р-n-перехода с одной стороны подложки. Первый р-n-переход (n1-p1) излучает красный свет, второй (n2-р2) –зеленый.

##

## **1.1.5 Индикаторы состояния**

Ламповые индикаторы имеют широкую область применения. В некоторых случаях они указывают на наличие рабочих условий, например на включение питания в различных приборах или на занятость линии в клавишном телефоне. В других случаях они служат предупреждающими сигналами, например в различных указателях на приборной панели современного автомобиля. Во всех перечисленных случаях необходимо, чтобы наблюдатель сразу замечал момент включения лампы и чтобы включенное и выключенное состояния четко различались. Выполнение первого требования обычно обеспечивается соответствующим оформлением индикатора. а выполнение второго требования - конструкцией самой лампы. Обычно требуется, чтобы свет лампы был приятен для глаз, т. е. чтобы был обеспечен световой комфорт, Точные условия светового комфорта указать трудно; они определяются специальной системой тестов. Для достижения светового комфорта необходима оптимальная комбинация зрительного восприятия, размеров, яркости и контраста. Обычно размеры полупроводникового кристалла выбирают как можно малыми при заданном световом выходе. Типичные габариты кристалла колеблются от 250х250 до 500х500 мкм. Видимый размер лампы определяется диаграммой распределения света рефлектором или рассеиванием света покрытием. Если необходимость в широком угле наблюдения отсутствует, то видимое изображение лампы можно увеличить с помощью пластмассовых линз. Линейное увеличение в зависимости от угла наблюдения дается формулой:

Увеличение =[1/(1-cosΘ)]1/2. (1.5)

Для многих применений достаточно угла наблюдения 60-90°, что позволяет использовать линейное увеличение в 1,8-2,7 раза и соответственно уменьшить потребляемую мощность в ~2-4 раза.

Контраст изображения обычно достигается добавлением красителя в пластмассовое покрытие или с помощью внешнего светофильтра. Идеальный светофильтр поглощает свет, падающий на него снаружи, так что выключенная лампа кажется темнее фона. Кроме отсутствия блеска (что будет рассмотрено при обсуждении цифровых индикаторов), основное требование, предъявляемое к светофильтру, состоит в том, чтобы пропускание им окружающего света (за два прохождения через фильтр) было не больше, чем отражение этого света от поверхности, окружающей индикатор.

Вместе с тем основная функция светофильтра состоит в усилении светового воздействия лампы в включенном состоянии. Анализ требований к идеальному светофильтру для красных и желто-зеленых светодиодов из GaP можно провести следующим образом. Рассмотрим конструкцию лампы, в которой большая часть излучаемого света отражается от элементов, окружающих светодиод. Такой рефлектор, имеющий коэффициент отражения R(λ), отражает также и окружающий свет, попадающий на лампу. Обозначим через Ie(Θ, &fi , λ ) спектральною силу света лампы на длине волны К в направлении (Θ, &fi);тогда световой поток Φvd, излучаемый в направлении наблюдателя, равен:

Φvd= Iе(λ) V(λ)R(λ) d(λ), (1.6)

если предположить, что свет диода (а также и окружающий свет) отражается от корпуса прибора только один раз. При наличии светофильтра со спектром пропускания Т (К) выходящий из лампы световой поток равен:

Φ'vd= Iе(λ) V(λ)R(λ)T(λ)dλ (1.7)

Коэффициент пропускания светофильтра для излучения со спектральной силой Iе(λ) определяется выражением:

T=Φ'vd/Φvd (1.8)

А величина T представляет собой соответственно потери излучения, связанные с фильтром. Для идеального фильтра эти потери сведены до минимума.

Аналогичным образом можно определить величину Та, которая характеризует вызванное светофильтром ослабление окружающего излучения, отраженного от лампы (учитывая, что окружающий свет проходит через фильтр дважды). Наибольший интерес представляет величина яркостного контраста С между включенным (излучение светодиода и окружающий свет) и выключенным (только окружающий свет) состояниями:

С=(Φvd+Φ"va)/Ф"va, (1.9)

где Φ'va –световой поток, идущий от лампы в выключенном состоянии (индекс а означает окружающий свет, а два штриха соответствуют двум прохождениям света через фильтр).

Показатель качества фильтра ηF можно определить как произведение воспринимаемого светового потока на контраст:

ηF=C·Φ'vd. (1.10)

Если предположить, что отражение от корпуса лампы постоянно во всем видимом спектре и что Φ'vd >> Φ"va, то уравнение (1.10) можно записать в виде:

ηF=T2/T'a·Φ2vd/Φva (1.11)

Первый сомножитель в этом равенстве является мерой спектральной избирательности фильтра и называется индексом цветовой корреляции. Для нейтрального светофильтра, для которого Т(λ)= const., эта величина равна 1. Таким образом, индекс цветовой корреляции определяется не абсолютным коэффициентом пропускания светофильтра, а спектральной согласованностью фильтра с излучением светодиода и окружающим светом.

Величины Т и Т'a можно легко рассчитать из данных по спектральному коэффициенту пропускания светофильтра. Если имеются образцы светофильтров, то проще всего измерить эти величины непосредственно с помощью фотоприемника, спектральная чувствительность которого совпадает с кривой чувствительности глаза. В этом случае величина Т равна просто отношению токов фотоприемника со светофильтром между диодом и приемником и без светофильтра. Аналогично величина Т'a равна отношению тока фотоприеминка, когда окружающий cвет попадает на него, пройдя через двойной слой фильтра, к току при непосредственном падении окружающего света на фотоприемник.

Кроме описанной спектральной избирательности, большое значение имеет общий “нейтральный” коэффициент ослабления фильтра. Он должен быть подобран так, чтобы обеспечить желаемый контраст при минимальном токе через светодиод. Например, при очень ярком освещении может понадобиться очень плотный фильтр (для уменьшения T'a даже несмотря на уменьшение пропускания излучения светодиода и соответственно на необходимость повышения тока через диод. Оптимальный фильтр всегда представляет собой компромисс между яркостью индикатора и ослаблением окружающего света.

Для излучения, приходящегося на край видимой части спектра (красные светодиоды из GaAs1-xРx или GaP: Zn, I), наиболее эффективен красный светофильтр с резким краем полосы пропускания. С другой стороны, для излучения в середине видимой части спектра более эффективен светофильтр с узкой полосой пропускания.

Кроме выполнения функций светофильтра, пластмассовое покрытие может также формировать различные диаграммы направленностн излучения. Ламбертовскую диаграмму направленности, которую имеет открытый свстодиод из прямозонного полунроводника, можно существенно изменить с помощью прозрачных пластмассовых линз; при этом увеличение силы спета в направлении оси линзы за счет уменьшения угла наблюдения равно приблизительно квадрату коэффициента линейного увеличения. Включения частичек материала с высоким показателем преломления, например Si02 или TiO2 приводят к равномерному распределению света по пластмассо-вому покрытию, что увеличивает угол наблюдения и видимые размеры светодиода, но уменьшает аксиальную силу света.

##

## **1.1.6 Индикаторы на светодиодах**

Наиболее распространенные форматы буквенно-цифровых индикаторов на основе светодиодов показаны на рисунке 1.4.

Семиэлемептные индикаторы или матрицы из 3х5 точек обычно применяются для воспроизведения цифр от 0 до 9, хотя с их помощью можно воспроизводить некоторые прописные (A, В, С, D, E,F, G, H, I, J, L, О, S, U) и строчные (b, с, d, h, i,l, n, о, r, и) буквы. Для цифровых индикаторов наиболее широко используется формат с семью полосками, а для буквенно-цифровых индикаторов удобнее всего матрицы из 5х7 точек.

Рисунок 1.4 - Форматы буквенно-цифровых индикаторов на основе светодиодов

Размер индикатора зависит от расстояния до наблюдателя. Высота символов обычно выбирается из расчета угла наблюдения 10-24', причем угол наблюдения (в минутах) определяется выражением:

Угол наблюдения = 120 arctg (h/2d), (1.12)

где h-высота символа, a d–расстояние от глаза до индикатора.

Для электролюминесцентных индикаторов наилучшее зрительное восприятие обычно достигается уменьшением размера символов до минимума и соответственным увеличением яркости. Наиболее распространенными областями применения малогабаритных индикаторов являются ручные приборы и карманные калькуляторы. Типичная высота символов (мнимое изображение индикатора) составляет 2,5-3,5 мм, что соответствует углу наблюдения 9,5-13,4' для расстояния, равного длине вытянутой руки (~90 см). Действительный размер интегральных полупроводниковых индикаторов составляет 1,125-2,5 мм, что соответствует линейному увеличению в 1,4-2,2 раза. Следующее наиболее употребительное значение для высоты символов равно 8-12 мм; такие индикаторы применяются на приборных панелях или на пультах управления. При расстоянии 3 м это соответствует углу наблюдения 9,2-13,8'. Типичное отношение ширины символа к его высоте для индикаторов обоих типов составляет 0,6-0,8.

Цифровые индикаторы различаются в основном формой полосок (прямые или скругленные), видом освещения полосок (равномерное или точечное) и углом наклона цифр (90 или ~80°). При сравнении различных цифровых индикаторов размером 7-15 мм был сделан вывод, что прямые линии распознаются значительно лучше, чем скругленные, что четкость точечного изображения выше, чем изображения, образованного штрихами, и что прямые и наклонные цифры воспринимаются одинаково. Было замечено также, что четкость контура является очень важным параметром, от которого зависит разборчивость цифр. Цифры, образованные относительно широкими штрихами, имели размытые контуры, и поэтому при их чтении возникало много ошибок. Рекомендуемое отношение ширины к высоте для белых штрихов на черном фоне составляет 1 : 10; вместе с тем при ярком освещении или для ярких индикаторов (например, малогабаритных цифровых светодиодных матриц) это отношение можно уменьшить до 1 : 20.

С целью снижения ошибок в распознавании также интенсивно исследовались буквенно-цифровые индикаторы в виде матриц с 5х7 элементами. Оказалось, что некоторые ошибки встречаются намного чаще других, и это нужно учитывать при разработках новых индикаторов. Наиболее часто неправильно воспринимаются Q (читают как 0), 5 (читают как S), V (читают как Y), Z (читают как 2) и I (читают как Г). В другой работе была проведена оценка числа ошибок для 3-миллиметровой матрицы из 5х7 красных светодиодов из GaAsP при угле наблюдения 14'. Подробные исследования с привлечением 371 наблюдателя в возрасте от 9 до 78 лет позволили сделать ценные выводы относительно конструирования индикаторов на основе светодиодов. Эти исследования показали, что число ошибок не постоянно для разных символов: одни дают намного больше, а другие намного меньше ошибок, чем в среднем.

Выяснилось, что при использовании начертаний, отличных от использованных в упомянутой работе, наибольшее количество ошибок падает на Q (читают как О), А (читают как Н) и S (читают как 5). Эти ошибки необратимые, т. е. О не читают как Q и т. д. Было показано, что суммарное число ошибок для всех символов монотонно возрастало при увеличении освещенности фона. Это означает, что распознавание любых символов затрудняется при снижении яркостного контраста. Число ошибок при максимальной освещенности (8000 лк) составляло ~20% для наблюдателей в возрасте до 35 лет, а затем резко начинало расти, достигая 60% для наблюдателей в возрасте 50 лет. Частично это вызвано увеличением расстояния наилучшего зрения с возрастом от 35 до 55 лет примерно в 5 раз (с ~0,2 до ~1,0 м): для близоруких число ошибок было меньше среднего. Эта возрастающая трудность фокусировки глазом излучения наиболее заметна для красной части спектра, в которой проводился эксперимент. В красной части спектра возрастает роль хроматической аберрации и дифракции - двух явлений, определяющих размытие изображения на сетчатке глаза. Отсюда можно сделать вывод, что для индикаторов лучше подходит желтый или зеленый цвет, и можно ожидать, что высококачественные малогабаритные индикаторы со временем будут изготавливаться именно таких цветов (вместо более дешевых красных индикаторов, используемых в настоящее время).

Технология изготовления маленьких (~3 мм) и больших (~9 мм) полосковых индикаторов различна, что диктуется экономическими соображениями. Для малогабаритных индикаторов более пригодны монолитные конструкции, поскольку при уменьшении размеров резко возрастает стоимость монтажа отдельных элементов. В больших же семиполосковых индикаторах ограничивающим фактором является стоимость материала; поэтому в таких индикаторах свет семи маленьких светодиодов распределяется по необходимой поверхности с помощью дешевых пластмассовых рефлекторов. Например, в 9-миллиметровом индикаторе площадь, занимаемая полупроводником, составляет ~5% площади всей освещаемой поверхности. Рефлекторы можно сконструировать так, чтобы полоски освещались равномерно или чтобы в отдельных частях полосок яркость была выше (при этом цифра будет казаться состоящей из светящихся точек). Изображение в маленьких или больших матрицах с 5х7 элементами аналогичным образом формируется с помощью 35 отдельных светодиодов. Необходимый контраст изображения в большинстве индикаторов достигается с помощью цветных светофильтров. В условиях сильного освещения также важно уменьшать отражение внешнего света от передней поверхности светофильтра, т.е. снижать его блеск. Зеркальное отражение можно уменьшить, делая поверхность светофильтра матовой. При нормальном падении коэффициент зеркального отражения от матовой поверхности Rs равен:

Rs=R0ехр[(4·π·σ)2/λ2], (1.13)

## где R0 - коэффициент отражения от гладкой поверхности, а σ – среднеквадратичное отклонение матовой поверхности от среднего уровня гладкой поверхности.

#

# **1.2 Полупроводниковые материалы, используемые в производстве светоизлучающих диодов**

Таблица 1.1 - Основные материалы для светодиодов

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Полупроводник | 4050710, А | Цвет | Эффективность% | Быстродействие,Нс |
| GaAs | 9500 9000 | ИК | 12; 50 5\* 02 | 10 5-7 0...10 5-6 0 10 5-9 0...10 5-8 0  |
| GaP | 69005500 | КрасныйЗелёный | 70,7 | 10 5-7 0...10 5-6 0 10 5-7 0...10 5-6 0  |
| GaN | 52004400 | Зелёный Голубой  | 0,01 0,005  |  |
| GaAs 41-x 0P 4x 0  | 66006100 | КрасныйЯнтарный | 0,50,04 | 3 77 010 5-8 03 77 010 5-8 0  |
| Ga 41-x 0Al 4x 0As | 80006750 | ИККрасный | 121,3 | 10 5-8 0 3 77 010 5-8 0  |
| In 41-x 0Ga 4x 0P  | 65905700 | КрасныйЖелто-зеленый | 0,20,1 |  |

##

## **1.2.1 Арсенид галлия**

Полупроводниковые светоизлучающие диоды изготавливают в настоящее время на основе бинарных и нтерметаллических соединений типа AIIIBV и многокомпонентных твердых растворов этих соединений. В данной главе будут кратко рассмотрены основные электрофизические свойства наиболее широко применяемых в производстве ветоизлучающих диодов полупроводниковых соединений –GaAs и GaP.

Большое внимание к GaAs в начальный период исследования соединений типа АIIIВV было связано с представлением о том, что На основе GaAs возможно создание высокочастотных и высокотемпературных транзисторов, так как подвижность электронов в нем значительно выше, а их эффективная масса почти на порядок меньшие, чем в Ge. Однако эти ожидания не оправдались, так как время жизни носителей в GaAs оказалось весьма малым.

Первые важные области применения GaAs были связаны с использованием его для производства туннельных диодов. Значительную и все возрастающую роль GaAs играет в производстве фотопреобразователей солнечной энергии в электрическую.

Наиболее массовое применение GaAs нашел в производстве диодных источников спонтанного и когерентного излучений. На основе GaAs созданы высокоэффективные излучающие диоды инфракрасного диапазона, находящие разнообразные применения в оптоэлектронике. Широкое применение в производстве светоизлучающих диодов, знаковых индикаторов, лазеров и ИК диодов находят твердые растворы GaAs с GaP и AlAs.

Основной промышленный метод получения GaAs - метод Чохральского. Значительное распространение находит также горизонтальная направленная кристаллизация по методу Бриджмена. Монокристаллы GaAs по параметрам распределяются на несколько марок. Монокристаллы n-типа легируются Те, Sn или ничем не легируются, монокристаллы р-типа легируются Zn [1].

Содержание посторонних примесей в GaAs n- и р-типов не превышает (% по массе): 1·10-5% Cu; 6·10-5% Со; 1·10-4% Fe; 5·10-6% Mn; 5·10-5% Cr; 2·10-5% Ni.

##

## **1.2.2 Фосфид галлия**

GaP, так же как и GaAs, кристаллизуется в структуре цинковой обманки с ребром элементарной кубической ячейки 5,4506 А. Кратчайшее расстояние между центрами ядер элементов решетки GaP равно 2,36 А, что составляет сумму атомных радиусов Р (1,1 А) и Ga (1,26 А).

Промышленное получение монокристаллического GaP осуществляется в две стадии: синтез-получение крупных поликристаллических слитков и выращивание монокристаллов по методу Чохральского из расплава, находящегося под слоем флюса. Монокристаллы GaP по параметрам делятся на несколько марок. Монокристаллы n-типа легируются Те или S или ничем не легируются, монокристаллы р-типа легируются Zn, монокристаллы высокоомного GaP легируются хромом или другими примесями с глубокой энергией залегания. Следует отметить, что в связи с условиями выращивания (высокая температура, высокое противодавление Р, наличие флюса, отсутствие стойких контейнерных материалов) монокристаллы GaP характеризуются высоким уровнем неконтролируемых фоновых примесей (примерно 5·1016-1·1017 см-3), а также высокой плотностью дислокации (более 104 см-2). Поэтому монокристаллы GaP не обладают пригодной для практики люминесценцией и для получения светоизлучающих р-n-переходов необходимо выращивать эпитаксиальные слои GaP.

# **РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЕТОДИОДА**

# **2.1 Основные параметры светодиода**

Uгас. – напряжение гасящее;

Uпит. – напряжение питания;

Uсв. – напряжение светодиода;

Iсв. – ток светодиода ;

Rсв. – нагрузочный резистор светодиода;

Есв. – эффективность светодиода;

F – световой поток;

Р – мощность;

Ω – телесный угол;

α – угол наблюдения;

# I – сила света.

# **2.2 Расчет светодиода**

Исходные данные:

Ток светодиода – 20 mA;

напряжение сети – 9 В;

напряжение светодиода – 3,6 В;

угол наблюдения – 15°;

сила света – 6,4 кд

#

# **2.2.1 Расчет эффективности светодиода**

Эффективность E светодиодов (далее СИД) определяется отношением светового потока F, производимого СИД к «закачанной» в него мощности P. Это общая эффективность, включающая в себя энергетическую эффективность самого СИД, зависящую от физики работы, материала и конструкции СИД и световую эффективность зрения для спектра излучения данного СИД. Общая эффективность измеряется в люменах (лм) на ватт (Вт):

E=F/P, лм/Вт (2.1)

Но, так как производители указывают, как правило, в качестве основного светотехнического параметра СИД силу света I, измеряемую в канделах, то нужно пересчитать канделы в люмены. Сила света определяет пространственную плотность (интенсивность) светового потока (luminous intensity):

I=F/Ω, лм/ср (2.2)

где Ω – телесный угол, измеряемый в стерадианах (ср).

# **2.2.2 Расчет телесного угла**

Для того чтобы ознакомиться с понятием телесного угла, придется совершить краткий экскурс в стереометрию. Площадь поверхности шара радиусом R составляет 4πR2. Если выделить на поверхности шара область площадью R2, то мы получим конус с пространственным углом как раз в один стерадиан. Запомним, что полная площадь поверхности шара составляет 4π стерадиан. Полезно знать, что телесный угол Ω связан с плоским углом α соотношением:

Ω=2π(1-cosα/2), ср (2.3)

Тогда α(1ср)=65°32', α(πср)=120°, α(2πср)=180°, α(4πср)=360°. Угол α это и есть угол, приводимый изготовителями панели как угол наблюдения или угол излучения (viewing angle или radiation angle), определяемый по спаду силы света на 50%.

# **2.2.3 Примерный расчет эффективности**

Теперь, зная приводимый изготовителями угол наблюдения, можно приблизительно определить световой поток СИД: F=IΩ.

Для примера возьмем белый светодиод NSPL500S (Nichia) с углом наблюдения α1=15°. Тогда телесный угол, рассчитанный по формуле (2.3):

Ω=2π(1-cosα/2)=2\*3,14(1-cos15/2)=0.0538

Сила света этого СИД 6.4 кд. Значит световой поток, рассчитанный по (2.2) составит:

I=F/Ω, →F=I Ω= 6.4\*0,0538=,0344лм.

F1=0.344 лм.

Прямое падение напряжения на СИД составляет 3.6 В при токе 20 mА. Следовательно, «закачиваемая» в СИД мощность составит:

P=U\*I=3.6B\*20mA=0.072Вт

а эффективность, в соответствии с (2.1) составит:

E1= F/P =0.344лм /0.072Вт=4.78 лм/Вт.

# **2.2.4 Уточненный расчет эффективности**

Более точно телесный угол можно определить по диаграмме излучения, обычно приводимой изготовителями в полярных или декартовых координатах. Для СИД NSPL500S диаграмма выглядит так:

Рисунок 2.1 Диаграмма излучения

Когда мы рассчитываем телесный угол по углу наблюдения, то предполагаем, что излучение сосредоточено в прямоугольнике шириной 15 градусов, высотой единица и площадью S1=15 условных единиц (прямоугольник с зеленой штриховкой). Но если рассчитать площадь под кривой диаграммы направленности (сосчитать интеграл), то она составит S2=17.5 условных единиц (на графике показан равный по площади прямоугольник с красной штриховкой). Это эффективный угол наблюдения. Следовательно, для более точного расчета нужно использовать угол α2=17.5°. Тогда:

Ω=2π(1-cosα/2)=2\*3,14(1-cos17,5/2)=0.0731;

I=F/Ω, →F=I Ω= 6.4.\*0,0731=0,47лм;

E2= F/P =0.47лм /0.072Вт=6.5 лм/Вт.

Ω2=0.0731, F2=0.47 лм, E2=6.5 лм/вт.

# **2.2.5 Расчет составляющих эффективности**

Общая эффективность светоизлучающего прибора Е определяется двумя составляющими: энергетической эффективностью прибора Ee и световой эффективностью Ev.

Первая составляющая. Энергетическая эффективность Ее - это отношение выходной оптической к входной электрической мощности. В англоязычной литературе для энергетической эффективности принято сокращение WPE (Wall-Plug-Efficiency). На рисунке показаны энергетические потери в светодиоде.

Рисунок 2.2 Схема энергетических потерь в светодиоде.

Вторая составляющая - это световая эффективность Ev. Слово «свет» предполагает наблюдателя – человека. Спектр зрения человека ограничен диапазоном длин волн от 380 до 780 нм. Вне пределов этого диапазона слово «свет» неприменимо (хотя и употребляется, например инфракрасный или ультрафиолетовый свет вместо излучение). Мало того, чувствительность зрения к различным длинам волн различна и определяется т.н. кривой видности V(λ).

Светодиод излучает не на одной длине волны, а в некотором промежутке длин волн. Интенсивность распределения оптической мощности в пределах этого промежутка описывается кривой, называемой энергетическим (или оптическим) спектром излучения Fe(λ). Оптическая мощность определяется площадью под кривой спектра и измеряется в ваттах. Для расчета световой мощности нужно перейти от энергетических величин (ватт) к световым (люменам), для чего необходимо перемножить энергетический спектр Fe(λ) на кривую видности – V(λ) (для выполнения данной операции используем приложение Microsoft Office – Excel ):

Рисунок 2.3 Графический расчет световой мощности

Тогда световая эффективность определится как отношение световой мощности к оптической:

Ev=Fv/Fe (2.5)

где Fe, Fv - интегралы функций Fe(λ), Fv(λ).

Максимальное значение световой эффективности приходится на длину волны 555 нм и составляет 683 лм/вт.

Теперь, зная энергетическую и световую эффективность, можно определить общую эффективность:

E=Ee\*Ev (2.6)

На рисунке 2.4 показана структурные составляющие эффективности светодиода:

Рисунок 2.4 Структурные составляющие эффективности светодиода.

Вернемся к примеру со светодиодом NSPL500S. Рассчитанная вышеуказанным способом световая эффективность этого светодиода составляет 320 лм/вт. Ранее рассчитанная общая эффективность составляет E=6.5 лм/вт. Тогда энергетическая эффективность, или КПД светодиода составит Ee=0.02 (вт/вт), или 2%.

Энергетическая эффективность светодиодного кристалла составляет от 5 до 20%. Существенная доля потерь связана с потерями фотонов при выводе из корпуса светодиода. Чем шире диаграмма направленности светодиода, тем меньше эти потери. Характерные значения КПД светодиодов - от 1 до 10%. Для сравнения, КПД парового двигателя 5 - 7%.

**2.2.6 Расчет инжекции не основных носителей тока**

В основе работы полупроводниковых светоизлучающих диодов лежит ряд физических явлений, важнейшие из них: инжекция не основных носителей в активную область структуры электронно-дырочным гомо- или гетеропереходом; излучательная рекомбинация инжектированных носителей в активной области структуры.

Явление инжекции не основных носителей служит основным механизмом введения неравновесных носителей в активную область структуры светоизлучающих диодов (эти приборы часто называют инжекционными источниками света). Вопросы физики протекания инжекционного тока в р-n-переходах рассмотрены в работах Шокли и многих монографиях. В обобщенном виде инжекция носителей р-п-переходом может быть представлена следующим образом (рисунок 2.5).

Когда в полупроводнике создается р-n-переход, то носители в его окрестностях распределяются таким образом, чтобы выровнять уровень Ферми. В области контакта слоев p- и n-типов электроны с доноров переходят на ближайшие акцепторы и образуется дипольный слой, состоящий из ионизованных положительных доноров на n-сторон и ионизованных отрицательных акцепторов на р-стороне. Электрическое поле дипольного слоя создает потенциальный барьер, препятствующий дальнейшей диффузии электрических зарядов [5].

При подаче на р-n-переход электрического смещения в прямом направлении U потенциальный барьер понижается, вследствие чего в р-область войдет добавочное количество электронов, а в n-область - дырок. Такое диффузионное введение не основных носителей называется инжекцией.

І- зона проводимости; ІІ –запрещённая зона; ІІІ – валентная зона

Рисунок 2.5 - Энергетическая диаграмма, поясняющая механизм действия инжекционного светодиода (а); его яркостная характеристика (б) и эквивалентная схема.

Концентрация инжектированных электронов на границе р-n-перехода и р-области n'(хp) определяется выражением:

п'(Хр)=np·exp(еU/kT), (2.7)

где nр-концентрация равновесных электронов в р-области;

k-константа Больцмана;

Т-температура;

e-заряд электрона.

Концентрация инжектированных носителей зависит только от равновесной концентрации не основных носителей и приложенного напряжения.

Поскольку инжектированные носители рекомбинируют с основными носителями соответствующей области, то их концентрация п'р в зависимости от расстояния от р-n-перехода изменяется следующим образом (для электронов в р-области):

n'p=n(xp)exp[-(x-xp)/Ln], (2.8)

где Ln - Диффузионная длина электронов.

Как следует из формулы (2.8) концентрация избыточных носителей экспоненциально спадает по мере удаления от р-n-перехода и на расстоянии Ln (Lр) уменьшается в e раз, где e ≈ 2,72 (основание натурального логарифма).

Диффузионный ток In, обусловленный рекомбинацией инжектированных электронов, описывается выражением:

In=eDnnp[exp(eU/kT)-1]/Ln  (2.9)

где Dn - коэффициент диффузии электронов. Диффузионный ток дырок In описывается аналогичным выражением. В случае, когда существенны оба компонента тока (электронный и дырочный), общий ток I описывается формулой:

I = (In0 + Iр0)·[exp(eU/kT) - 1], (2.10)

где

In0 = eDn·np/Ln; Ip0=eDp\*pn/Lp. (2.11)

Особенность решения вопросов инжекции при конструировании светоизлучающих диодов, в которых, как правило, одна из областей p-n-структуры оптически активна, т.е. обладает высоким внутренним квантовым выходом излучения, заключается в том, что для получения эффективной электролюминесценции вся инжекция неосновных носителей должна направляться в эту активную область, а инжекция в противоположную сторону-подавляться [4].

Если активна область р-типа, то необходимо, чтобы электронная составляющая диффузионного тока преобладала над дырочной, а интенсивность рекомбинации в области объемного заряда была низка. Коэффициент инжекции γп , т.е. отношение электронной компоненты тока In0 к полному прямому току I=In0+Ip0, определяется по формуле:

γn=LpNd/[LpNd+(Dp/Dn)·LnNa], (2.12)

где Nd и Na - концентрации доноров и акцепторов в л- и р -областях.

Из выражения (2.6) следует, что для получения величины γп, близкой к 1, необходимо, чтобы Nd>>Na, Lp>Ln, Dn>Dp. Решающую роль, безусловно, имеет обеспечение соотношения Nd>>Na. Однако повышение концентрации носителей в инжектирующей области имеет свои пределы. Как правило, значения Nd (или Na) не должны превышать (1-5)·I019 см-3, так как при более высоком уровне легирования возрастает концентрация дефектов в материале, что приводит к увеличению доли туннельного тока и ухудшению, тем самым, инжектирующих свойств р-n-перехода [2]. Как будет видно из дальнейшего изложения, для повышения внутреннего квантового выхода излучательной рекомбинации в прямозонных полупроводниках необходимо повышать концентрацию носителей и в активной области, в связи с чем возникают дополнительные трудности с обеспечением одностороннего характера инжекции. Таким образом, в гомопереходах существуют трудности по обеспечению высокого коэффициента инжекции носителей в активную область, обусловленные противоречивыми требованиями к легированию p- и n-областей структуры для достижения высокого коэффициента инжекции и максимального квантового выхода электролюминесценции в активной области. В некоторых полупроводниках высокий коэффициент инжекции носителей в одну из областей р-n-перехода может быть обеспечен разницей в подвижности электронов и дырок. Так, в GaAs и других прямозонных соединениях высокий коэффициент инжекции электронов в р-область может быть осуществлен за счет более высокой подвижности электронов.

# **2.2.7 Расчёт светодиодного резистора**

Светодиод должен иметь резистор последовательно соединенный в его цепи, для ограничения тока, проходящего через светодиод, иначе он выйдет из строя практически мгновенно.

Резистор R определяется по формуле :

R = (V S - V L) / I

Рисунок 2.6 - Схема подключения .

V S = напряжение питания

V L= прямое напряжение, расчётное для каждого типа диодов (как правило от 2 до 4 волт)

I = ток светодиода (например 20мA), это должно быть меньше максимально допустимого для выбраного диода

Например: Если напряжение питания V S = 9 В, и есть красный светодиод (V = 2V), требующие I = 20мA = 0.020A,

R = ( 9 В) / 0.02A = 350 Ом.

Вычисление светодиодного резистора с использованием Закон Ома

Закон Ома гласит, что сопротивление резистора R = V / I, где :

V = напряжение через резистор (V = S - V L в данном случае)

I = ток через резистор

Итак R = (V S - V L) / I =(9В-3,6В)/0,02А=270Ом.

# **ВЫВОДЫ**

В ходе данной курсовой работы:

были рассмотрены свойства светоизлучающих диодов, а также их типы, устройство, светоизлучающий кристалл и полупроводниковые материалы, используемые в производстве ;

были произведены расчеты некоторых параметров светодиода, а именно рассчитана эффективность светодиода, инжекции не основных носителей и нагрузочного резистора.

В ходе данных расчетов было установлено, что эффективность бывает, как приблизительная, так и уточнённая (E1=4.78 лм/Вт и E2=6.5 лм/вт). Был рассмотрен теоретический расчет инжекции не основных носителей в светодиодах и приведён пример расчёта светодиодного резистора (R=270 Ом).

Данные расчеты необходимы при проектировании, выборе и применение в какой либо цепи, светодиода.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. В. И. Иванов, А. И. Аксенов, А. М. Юшин “Полупроводниковые оптоэлектронные приборы. / Справочник.”- М.: Энергоатомиздат, 1984 г..
2. Коган Л.М. Дохман С.А. Технико-экономические вопросы применения светодиодов в качестве индикации и подсветки в системе отображения информации. – Светотехника, 1990 – 289с.
3. Коган Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды, М.1989г. – 415 с.
4. Воробьев В.Л., Гришин В.Н. Двухпереходные GaP-светодиоды с управляемым цветом свечения. – Электронная техника. 1977 г. – 368 с.
5. Федотов Я.А. Основы физики полупроводниковых приборов.М.: Советское радио 1969г. – 294 с.
6. Амосов В.И. Изергин А.П. Диодные источники красного излучения на GaP, полученном методом Чахральского. 1972г. – 183 с.
7. Нососв Ю.Р. Оптоэлектроника. Физические основы, приборы и устройства. М. 1978г. – 265 с.
8. Мадьяри Б. Элементы оптоэлектроники и фотоэлектрической автоматики. М. 1979г. – 315 с.
9. Ефимов И.Е., Горбунов Ю.И., Козырь И.Я. Микроэлектроника. Проектирование, виды микросхем, функциональная электроника. – М.: Высшая школа, 1987. – 416 с.
10. Ефимов И.Е., Козырь И.Я. Основы микроэлектроники. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1983. – 384 с.
11. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. – М.: Сов. радио, 1980. – 424 с.
12. Полупроводниковые приборы: транзисторы. Справочник. Под ред. Н. Н. Горюнова – М.: Энергоатомиздат, 1985г. – 904 с.
13. Ю П. Основы физики полупроводников /П. Ю, М. Кардона. Пер. с англ. И.И. Решиной. Под ред. Б.П. Захарчени. 3-е изд. М.: Физматлит, 2002. 560 с.
14. Федотов Я. А. Основы физики полупроводниковых приборов. М., “Советское радио”, 1970. – 392 с.
15. Тейлор П. Расчет и проектирвание тиристоров: Пер с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. 208с.
16. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники: Учебник. – 4-е изд., К.: Вища школа,1983 г . –384 с.