КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

В.В. ПАРФЕНОВ, Р.Х. ЗАКИРОВ, А.Т. ХАСАНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

Казань
2013

УДК 537.311.322

Печатается по решению Редакционно-издательского совета ФГАОУВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

методической комиссии Института физики
Протокол №2 от 13 мая 2013 г.

заседания кафедры физики твердого тела
Протокол №8 от 11 декабря 2012 г.

Авторы
доктор физ.-мат. наук, проф. В.В. Парфенов
инженер Р.Х. Закиров
инженер А.Т. Хасанов

Рецензент
к.ф-м.н., доцент кафедры теоретической физики Деминов Р.Г.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ. Учебно-методическое пособие/ В.В. Парфенов, Р.Х. Закиров, А.Т. Хасанов // Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2013. – 14 с.

Аннотация
Учебно-методическое пособие предназначено для студентов, приступивших к изучению спецкурсов «Физические основы микро- и наносистемной техники» и «Квантовые электронные свойства наносистем» по направлению «Нанотехнологии и микросистемная техника». Задачей настоящей лабораторной работы, предназначенной для спецпрактикума «Материаловедение наноструктурированных материалов», является изучение физических основ работы полупроводниковых светодиодов. Предлагается выполнить измерение спектров электролюминесценции полупроводниковых светодиодов видимого диапазона.

© Казанский федеральный университет, 2013
© В.В. Парфенов, Р.Х. Закиров, А.Т. Хасанов, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Светоизлучающий диод (СИД) является одним из основных излучателей в оптоэлектронике. СИДы пришли на смену уже устаревшим лампам накаливания и газоразрядным лампам. Популярность светодиодов объясняется их надёжностью, долговечностью, более высоким КПД (т.е. меньшим энергопотреблением при большей излучательной способности), отсутствием необходимости в светофильтрах для получения света в узком спектральном диапазоне и т.д. Области применения светодиодов в современной специальной и бытовой электронной аппаратуре очень разнообразны: различные индикаторные устройства, энергосберегающие осветительные панели, источники излучения для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), телевизионные экраны (LED – технология) и т.д.

В предлагаемом методическом пособии представлены основные сведения по физике электролюминесценции в *p-n* переходах и гетероструктурах, описание лабораторной установки и методики измерения спектров излучения светодиодов из различных полупроводниковых материалов.

ПРИНЦИП РАБОТЫ СВЕТОДИОДОВ

Работа СИДа основана на *спонтанной* рекомбинационной люминесценции избыточных носителей свободного заряда, инжектируемых в активную область (базу) СИДа. Этот процесс схематически можно изобразить в виде следующего элементарного процесса, происходящего непосредственно или при участии центра рекомбинации в объеме полупроводника:

электрон проводимости + дырка → валентный электрон + фотон.

СИД представляет собой включенный чаще всего в прямом направлении *p-n* - переход в полупроводнике, как показано на рис. 1.

Прямое смещение от внешнего источника (’’+’’ на *p*-полупроводнике, ’’-’’ на *n*-полупроводнике) понижает энергетический барьер на границе *p*- и *n*-областей и создает условия для инжекции электронов проводимости в *p*-область из *n*- полупроводника и дырок в *n*- область из *p*- полупроводника. При типичном значении прямого смещения U=1,5÷3 В в переходе устанавливается некоторый прямой ток

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eU}{kT}\right). \qquad (1)$$

Типичное значение тока I =10÷30 мА.

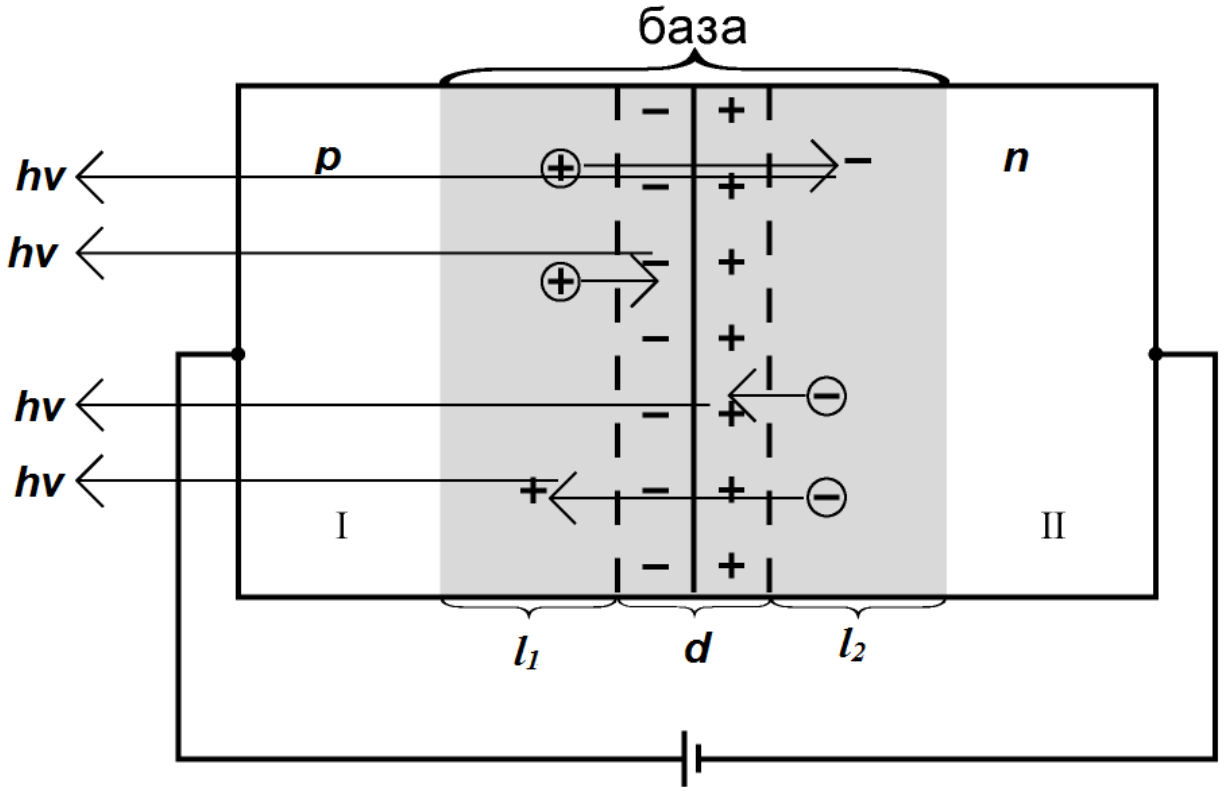

Рисунок 1. Схема работы светодиода

В области объемного заряда *p-n* перехода *d*, а также на расстояниях диффузионных длин для электронов проводимости в *p*-полупроводнике l_1 и для дырок в *n*-полупроводнике l_2 (совокупность этих областей составляет активную область – базу СИДа), на которые электроны проводимости и дырки могут проникнуть за время их жизни τ до рекомбинации, устанавливаются высокие концентрации электронов проводимости *n* и дырок *p* (10^{16} – 10^{17} см$^{-3}$). Высокие значения *n* и *p* одновременно необходимы для получения большой скорости фоторекомбинации (большому числу актов фоторекомбинации в единице объема за единицу времени),

$$R \propto np, \tag{2}$$

а отсюда и большого значения мощности излучения единицы объема (ее называют удельной мощностью излучения),

$$P_{изл} = R \cdot h\nu. \tag{3}$$

Отметим, что другие области полупроводника вне базы (области I и II на рис. 1) не дают заметного вклада в излучение именно из-за того, что в них нет

одновременно больших значений n и p (в области I $\boldsymbol{p >> n}$, в области II $\boldsymbol{n >> p}$).

Характерны два механизма спонтанной фоторекомбинации (в литературе ее еще называют излучательной рекомбинацией):

1) прямая (межзонная) рекомбинация электронов и дырок, при которой электрон из зоны проводимости непосредственно переходит в валентную зону с излучением, как показано на рис. 2. Прямая рекомбинация важна для прямозонных полупроводников: GaAs, InAs, InSb, некоторых составов твердых растворов типа $A^{III}B^{V}$: GaAlAs, InGaAsP, большинства соединений типа $A^{II}B^{VI}$ – ZnS и т.д., а также для ряда других бинарных соединений – PbSe, PbTe и твердых растворов PbSnTe, PbSnSe и т.д.

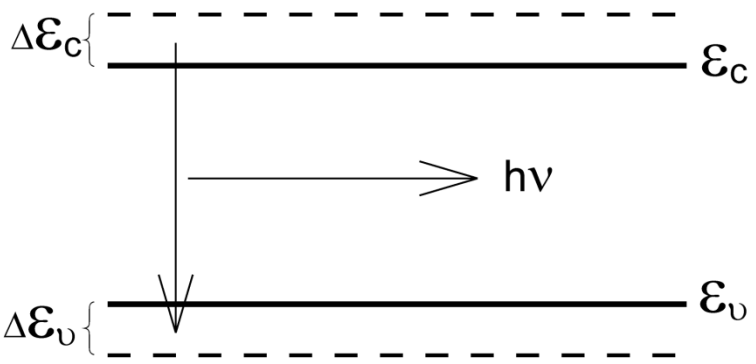

Рисунок 2. Схема прямой рекомбинации

2) примесная рекомбинация с участием экситонов, связанных с примесными изоэлектронными (электрически нейтральными) центрами (ловушками). Примесная рекомбинация важна в непрямозонных полупроводниках, где прямая излучательная рекомбинация маловероятна. Классическим примером является GaP. В GaP ловушки образуются путем легирования кристалла атомами азота N (при этом атом N заменяет атом P) или одновременно атомами кислорода O и цинка Zn (атомы O и Zn замещают в кристаллической решетке соседние атомы P и Ga соответственно). Энергетическая структура этих центров (ловушек) такова, что они эффективно притягивают к себе электроны проводимости и дырки (комплекс Zn-O сначала захватывает электрон проводимости и становится отрицательным) с образованием экситонов, как схематически показано на рис. 3 (для GaP с примесью N энергия связи экситона $\varepsilon_{св.}$ по величине не превышает 0,03 эВ; для GaP с примесью Zn-O по величине $\varepsilon_{св} \approx 0{,}3$ эВ). После локализации свободных носителей заряда на примесном центре или, как

говорят, «тяжелом» центре, излучательная рекомбинация, показанная на рис. 3, происходит так же, как в прямозонном полупроводнике – электрон переходит с экситонного уровня непосредственно в валентную зону с излучением фотона, при этом квазиимпульс электрона передается примесному центру, роль которого на рис. 3 играет комплекс Zn-O. Комплекс Zn-O после излучения становится электрически нейтральным и снова захватывает электрон проводимости и далее дырку с образованием нового экситона. Светодиод на GaP(N) (с примесью атомов азота N) излучает в основном в области длин волн 565÷580 нм (желто-зеленая область спектра). Светодиод на GaP(Zn,O) (с примесью атомов цинка Zn и кислорода O) имеет λ_{max}≈700 нм (красный цвет свечения - он обусловлен сравнительно большой энергией связи экситона $\varepsilon_{св} \approx 0{,}3$ эВ) при ширине спектральной линии $\Delta\lambda$=80 нм (рис. 4).

Для ИК-области имеются следующие светодиоды: GaAlAs – λ_{max}=0,8 мкм; GaAs – λ_{max}=0,9 мкм; InPAs – λ_{max}=1,5 мкм; InAs – λ_{max}=3 мкм; PbS – λ_{max}=4,5 мкм; InSb – λ_{max}=5,5 мкм; PbTe – λ_{max}=6,5 мкм; PbSe – λ_{max}=9 мкм.

Естественно, что при обоих механизмах излучения имеет место и безызлучательная рекомбинация, бесполезно расходующая часть энергии возбуждения.

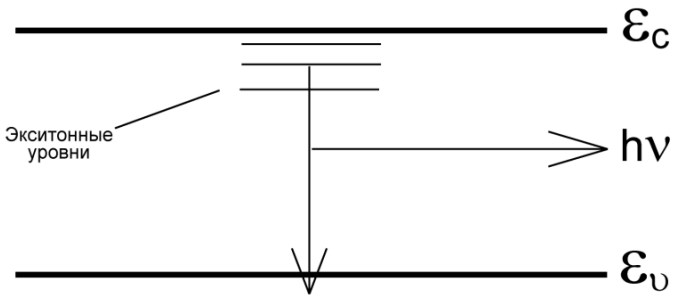

Рисунок 3. Схема примесной рекомбинации

Спектр излучения светодиода характеризуют спектральной мощностью $P_{изл}(\lambda)$, которая связана с интегральной мощностью излучения $P_{изл}$ по всему спектру светодиода очевидным соотношением $P_{изл}=\int P_{изл.}(\lambda)d\lambda$. Типичный вид спектра излучения светодиода показан на рис.4.

В случае прямой фоторекомбинации граничное значение длины волны $\lambda_{гр.}$ совпадает с красной границей внутреннего фотоэффекта и определяется значением ширины запрещенной зоны полупроводника ε_g. Кривая $P_{изл}(\lambda)$ имеет вид колокола с максимумом при $\lambda_{max}<\lambda_{гр.}$ Значение λ_{max} определяется в

первую очередь значением ε_g, и во вторую очередь – наличием примесей. Ширина кривой $\Delta\lambda$ на половине максимальной мощности P_{max} обычно сравнительно невелика (типично $\Delta\lambda$=30÷40 нм). Сравнительно небольшое значение $\Delta\lambda$ связано с тем, что электроны проводимости при не очень высокой температуре (T≈300 К) в основном находятся у дна зоны проводимости и их энергии приходятся на сравнительно небольшой интервал энергии $\Delta\varepsilon_c$, как показано на рис. 2.

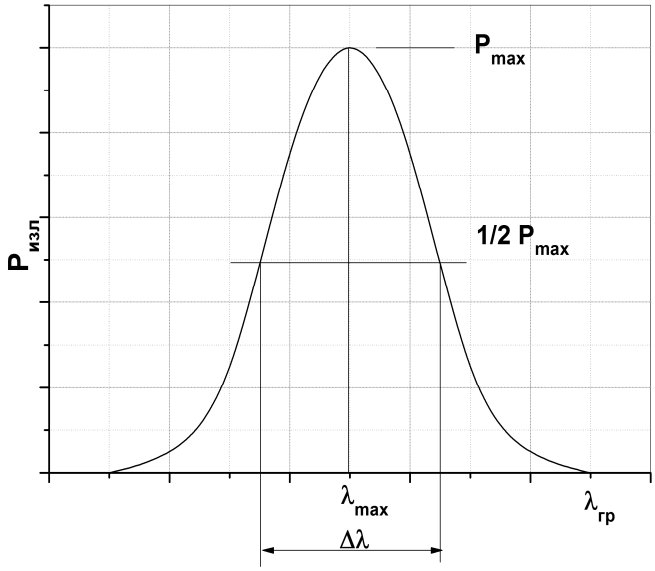

Рисунок 4. Типичный спектр излучения светодиода

Аналогично, энергии дырок (рассматриваем уровни энергии в валентной зоне, свободные от электронов) приходятся на сравнительно небольшой интервал энергии $\Delta\varepsilon_v$ у верха валентной зоны, который также показан на рис. 2. В основном, спектр излучения определяется перескоками электронов с интервала энергии $\Delta\varepsilon_c$ на интервал энергии $\Delta\varepsilon_v$, что при сравнительно небольших значениях $\Delta\varepsilon_c$ и $\Delta\varepsilon_v$ по сравнению с $\varepsilon_g=\varepsilon_c-\varepsilon_v$ приводит к сравнительной узости кривых $P_{изл}(\lambda)$.

Полная мощность излучения светодиода $P_{изл}$ зависит от величины прямого тока $i_{пр}$. Типичный вид зависимости $P_{изл}$ от $i_{пр}$ (ватт-амперная характеристика) показан на рис. 5 для GaP(Zn,O).

Участок I низкой эффективности свечения при малых $i_{пр}$ обусловлен значительным вкладом безызлучательной примесной рекомбинации на поверхности и в объеме полупроводника, далее при увеличении тока соответствующие центры безызлучательной рекомбинации «забиваются» рекомбинирующими свободными носителями тока и их роль ослабевает – в

результате на участке II происходит резкое возрастание мощности излучения с ростом тока. Загиб кривой (участок III) чаще всего связан с ухудшением инжектирующей способности p-n–перехода и с разогревом полупроводника при больших токах.

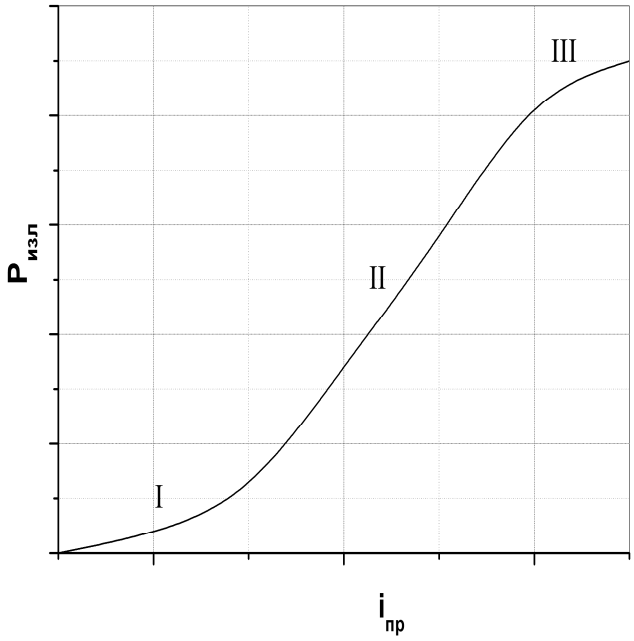

Рисунок 5. График зависимости мощности излучения от тока

У GaP(Zn,O) – светодиодов загиб кривой объясняется эффектом насыщения (заполнения) центров излучательной рекомбинации, концентрация которых из-за малой растворимости кислорода невелика.

Инерционность СИДа (быстрота нарастания или спада $P_{изл}$ при резком росте или спаде $i_{пр}$) определяется в основном временем диффузии электронов проводимости и дырок в диффузионных областях базы, показанных на рис. 1, и составляет $10^{-7} \div 10^{-6}$ с.

Мы рассмотрели СИДы на гомопереходах, которые в основном используются на практике. В случае СИДов на гомопереходах *p-n* - переходы созданы в одном и том же полупроводнике (*p*- и *n*- полупроводники обладают практически одинаковыми физико-химическими свойствами, в том числе одинаковой шириной запрещенной зоны ε_g и одинаковым показателем преломления $n_{пп}$). Такие СИДы из-за заметного поглощения излучения в полупроводнике обладают сравнительно небольшим коэффициентом полезного действия (КПД). Следует иметь в виду, что на практике используют также СИДы на гетеропереходах ("гетеро" – значит "другой"). Гетеропереходом называют контакт двух различных по химическому составу материалов - при этом *p*- и *n*- полупроводники имеют разные физико-химические свойства, разные ε_g и $n_{пп}$. Комбинацию гетеропереходов

называют гетероструктурой. Гетероструктуры, состоящие из одного перехода, называют простыми, из двух – двойными, из большого числа переходов мультиструктурами). СИДы на гетеропереходах имеют ряд преимуществ: более эффективное использование инжектируемых в базу электронов проводимости и дырок, возможность вывода излучения без потерь на поглощение через слабопоглощающий широкозонный полупроводник. Все это приводит к более высокому КПД СИДов на гетеропереходах по сравнению с СИДами на гомопереходах.

По спектральному диапазону и, как следствие, по основному функциональному назначению светодиоды подразделяют на две группы:

1). СИДы видимого диапазона спектра, предназначенные для устройств визуального отображения информации. КПД СИДов видимого диапазона составляет от 0,01 % до нескольких процентов.

2). Полупроводниковые ИК-светодиоды, предназначенные для работы с физическими фотоприемниками, главным образом в ВОЛС, оптопарах и т.д. Для ИК-светодиодов КПД может достигать значения 40 %.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА.

Целью настоящей работы является получение спектров нескольких светодиодов, излучающих в разных диапазонах длин волн. Для этого используются следующие приборы (рис. 6):

1. Монохроматор ML 44;
2. Управляющий компьютер;
3. Светодиоды (производства фирмы Vishay):

•красный – TLCR5200 – 4000 мКд (милликандел);
•зелёный – TLCTG5100 – 5000 мКд;
•синий – TLCB5800 – 2500 мКд;
•жёлтый – TLCY5200 – 4000 мКд;
•белый – TLCW5100 - 4000мКд.

4. Низкочастотный генератор ГЗ-111;
5. Фотодиод ФД-24К;
6. Цифровой вольтметр GDM-8135;

Рисунок 6. Лабораторный стенд

Переменное напряжение со звукового генератора подаётся на светодиодный блок. Свет, проходя через оптическую схему монохроматора, попадает на фотодиод, соединённый экранированным проводом с цифровым вольтметром GDM-8135 .

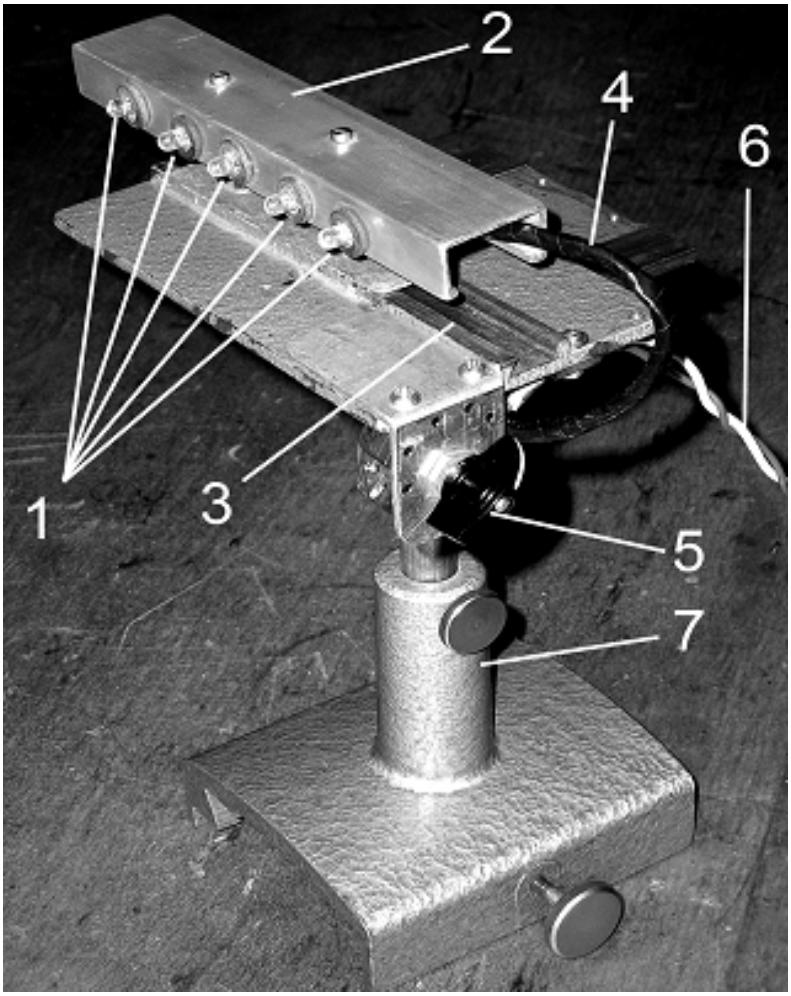

Рисунок 7. Блок светодиодов

Светоизлучающие диоды 1 смонтированы на металлическом ползунке 2 , который может свободно скользить по рельсу 3 (рис. 7). К светодиодам подведено питание по гибкому многожильному кабелю 4. Переключение между диодами осуществляется при помощи многопозиционного переключателя 5. Напряжение на схему устройства подаётся по проводам 6. Установка крепится на штативе 7, который позволяет фиксировать её на рельсе монохроматора ML 44.

На рис. 8 представлена электрическая схема светодиодного блока. Сопротивления R1-R5 подобраны таким образом, чтобы ток, протекающий через каждый светодиод, был равен ~ 6 мА. Диод VD1 включён в схему для пропускания через светодиоды только прямого тока. Это необходимо, т.к. светодиоды нежелательно подавать обратное напряжение.

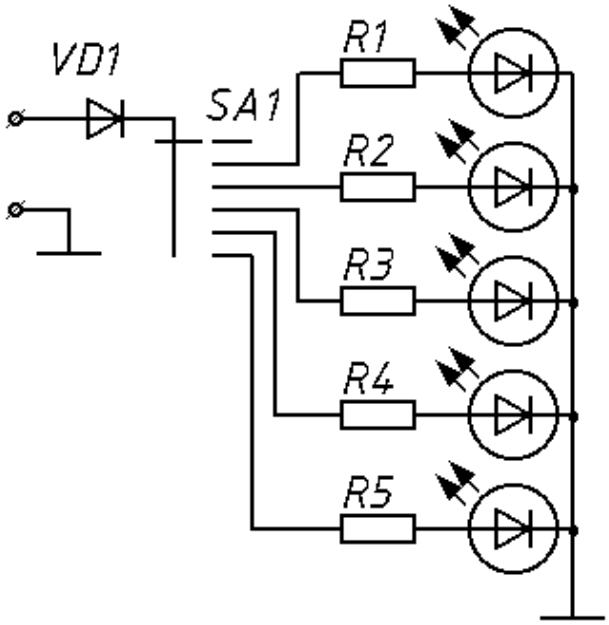

Рисунок 8. Принципиальная электрическая схема светодиодного блока

ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Включить низкочастотный генератор **Г3-111** в режиме синусоидальных напряжений. Задать напряжение 5 В с частотой 100 Гц.
2. Вручную, по делениям на регулировочной головке, установить ширину входной и выходной щелей монохроматора 0,02 мм.
3. Передвигая ползунок 2 по рельсу 3 (рис. 7) установить первый из светодиодов перед входной щелью монохроматора ML-44.
4. Найти ярлык **ML-44** на рабочем столе компьютера и открыть главное окно (рис. 9).

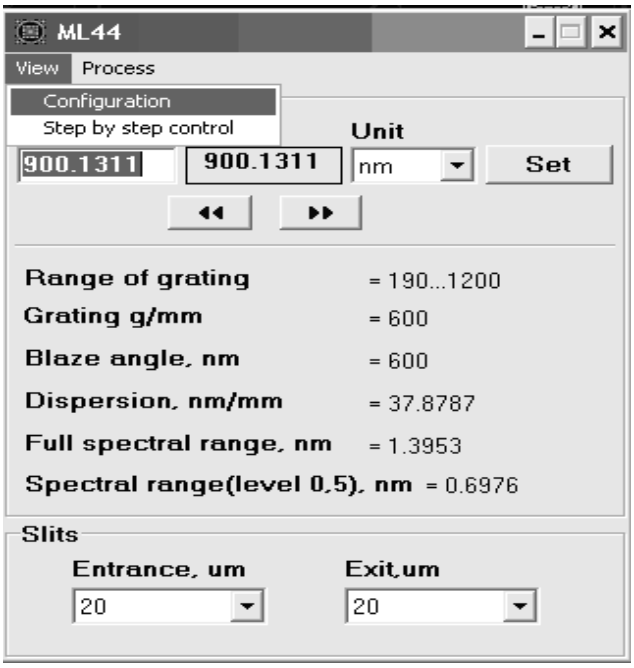

Рисунок 9. Главное окно монохроматора ML44

5. В главном окне последовательно нажать **View** и **Configuration.**
6. В окне **Configuration** (рис. 10) выбрать порт **COM4** и нажать кнопку **Connect.**

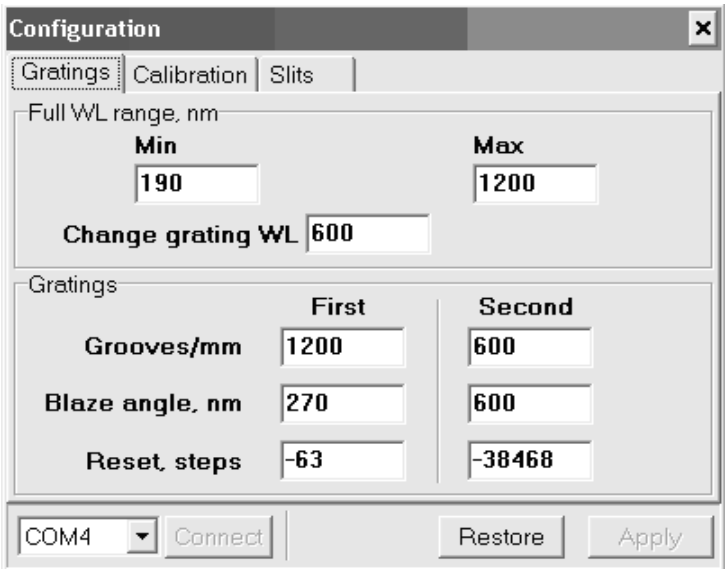

Рисунок 10. Окно ***Configuration***

7. Выйти опять в главное окно (закрыв окно **Configuration**) и установить одинаковую ширину (20 μm) входной и выходной щели в окнах **Slits** (рис. 9).
8. В окне **New** установить **400,** в окне **Unit** установить **nm.** Нажать кнопку **Set.**
9. Пользуясь пошаговым перемещением привода активной решетки вперед/назад с помощью кнопок << и >> главного окна монохроматора, измерить зависимость энергии светового излучения светодиодов от длины волны для всех пяти светодиодов. Текущая длина волны указывается при этом в окне **Current,** а интенсивность излучения регистрируется фотодиодом ФД-24К, подключенным к входу милливольтметра **GDM-8135.**
10. По окончании работы выключить приборы **Г3-111**, **GDM-8135** и компьютер. Отключить все сетевые вилки от сети.
11. Построить графики зависимости энергии излучения от длины волны для всех светодиодов. Предварительно выполнить нормировку, т.е. принять интенсивность излучения в максимуме для каждого светодиода за 100%. Определить $\lambda_{\max}$ и полуширину спектра излучения $\frac{1}{2}P_{\max}$ (рис.4) для всех светодиодов.
12. Обсудить распределение спектральной интенсивности излучения «белого» светодиода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники: 5-е изд. / В.В.Пасынков, В.С.Сорокин – СПб: Лань, 2003. – 368 с.: ил.
2. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев - М.: Физматлит, 2007. – 414 с.: ил.
3. Шуберт, Ф.Е. Светодиоды / Ф.Е.Шуберт –М.: Физматлит, 2008. – 496 с. : ил.