

Министерство науки и высшего образования РФ

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

С.Г. Еханин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

Методические указания к лабораторному занятию по дисциплине
«Методы диагностики полупроводниковых структур»

Томск
2022

УДК 53.097; 537.9

ББК 30.3-1

Е 930

Рецензент

Романовский М.Н., доцент кафедры конструирования узлов и деталей
РЭА, канд. техн. наук

Еханин Сергей Георгиевич

Е 930 Определение температуры активной области светоизлучающих диодов: методические указания к лабораторному занятию по дисциплине «Методы диагностики полупроводниковых структур / С.Г. Еханин. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 14 с.

В методических указаниях кратко изложены описание наиболее известных косвенных методов определения температуры активной области светоизлучающих диодов на основе полупроводниковых гетероструктур со множественными квантовыми ямами, описание и технические характеристики устройства для бесконтактного определения температуры активной области СИД оптическим методом. Приводятся порядок выполнения лабораторной работы, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы. Предназначено для студентов, магистрантов и аспирантов, интересующихся проблемами диагностики полупроводниковых гетероструктур.

Одобрено на заседании каф. КУДР протокол № 233 от 17 февраля 2022 г.

УДК 53.097; 537.9

ББК 30.3-1

© Еханин С.Г., 2022

© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022

Оглавление

1 ВВЕДЕНИЕ	4
2 МЕТОД ПРЯМОГО ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА СВЕТОДИОДЕ.....	4
3 СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ АКТИВНОЙ ЗОНЫ СИД	8
4 ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ СИД.....	10
4.1 Технические характеристики.....	10
4.2 Устройство спектрофотометра	11
4.3 Подготовка к работе	11
5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	13
6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	13
7 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	14

1 ВВЕДЕНИЕ

В последнее время светоизлучающие диоды (СИД) с множественными квантовыми ямами (МКЯ) все чаще применяются в качестве основных источников света в быту, на производстве и в уличном освещении [1-4]. Однако известно, что рабочие характеристики полупроводниковых материалов, из которых изготовлены СИД, сильно зависят от температуры [1]. Например, при повышении температуры гетероструктуры СИД понижается внутренний квантовый выход излучения и существенно сокращается время безотказной работы устройства [2-4]. Это вынуждает внимательно относиться к вопросам определения температуры активной области гетероструктуры и отвода тепла от СИД при создании светотехнических устройств на их основе.

С помощью методов непосредственного измерения невозможно измерить температуру активной области СИД, т. к. ее размеры очень малы и составляют менее 100 нм. Кроме того, градиент температуры вблизи этой зоны велик, что резко снижает точность измерений.

Вследствие этого обычно используют косвенный метод измерения температуры активной области СИД с помощью какого-либо термочувствительного параметра. Существуют различные методы косвенного определения температуры *p-n*-перехода [1].

В данном методическом пособии рассматриваются два косвенных метода определения температуры активной области СИД: метод прямого напряжения [1] и спектральный метод бесконтактного определения температуры активной области СИД [5].

2 МЕТОД ПРЯМОГО ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА СВЕТОДИОДЕ

В качестве термочувствительного параметра в этом случае используется прямое падение напряжения на светодиоде. Преимущество этого параметра в том, что прямое напряжение линейно зависит от температуры в широком интервале изменения. Вывод теоретической зависимости прямого падения напряжения светодиода от температуры был получен в [1] из уравнения для вольт-амперной характеристики идеального *p-n*-перехода (уравнение Шокли):

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{e \cdot V_d}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right], \quad (2.1)$$

где J_s – плотность тока насыщения, n – коэффициент идеальности. Все приведенные параметры зависят от температуры *p-n*-перехода.

Учитывая их температурные зависимости, запишем производную производную от прямого падения напряжения V_d по температуре:

$$\frac{dV_d}{dT} = \frac{e \cdot V_d - E_g}{e \cdot T} + \frac{1}{e} \cdot \frac{dE_g}{dT} - \frac{3 \cdot k}{e}, \quad (2.2)$$

где E_g – ширина запрещенной зоны.

Светодиоды обычно работают при напряжениях близких к пороговому напряжению p-n перехода, поэтому [1]:

$$e \cdot V_d - E_g \approx k \cdot T \cdot \ln \left(\frac{N_d \cdot N_a}{n_i^2} \right) - k \cdot T \cdot \ln \left(\frac{N_c \cdot N_v}{n_i^2} \right) = k \cdot T \cdot \ln \left(\frac{N_d \cdot N_a}{N_c \cdot N_v} \right), \quad (2.3)$$

где N_c, N_v – эффективные концентрации носителей в зоне проводимости и валентной зоне, N_d, N_a – концентрации доноров и акцепторов.

Второй член в уравнении (2.2) отображает изменение ширины запрещенной зоны от температуры. Как известно, с повышением температуры ширина запрещенной зоны уменьшается практически линейно [1].

В уравнении (2.2) второй член и определяет основную зависимость прямого падения напряжения светодиода от температуры.

Процедура измерения зависимости прямого падения напряжения от температуры состоит из двух этапов:

1. калибровочного измерения прямого напряжения на светодиоде в импульсном режиме;
2. измерения этого напряжения в режиме постоянного тока.

На этапе калибровочных измерений исследуемый светодиод помещается в термостат с регулятором. Температура в термостате изменяется в заданном диапазоне значений: от 20 до 90 °С.

В ходе калибровочных измерений на светодиод подаются импульсы напряжения длительностью 1 мс со скважностью 1000, что необходимо для исключения внутреннего разогрева светодиода из-за инжекционного тока. Прямое напряжение измеряем в заданном интервале температур для разных значений тока.

Из рис. 2.1 видно, что при увеличении температуры прямое падение напряжения на светодиоде уменьшается.

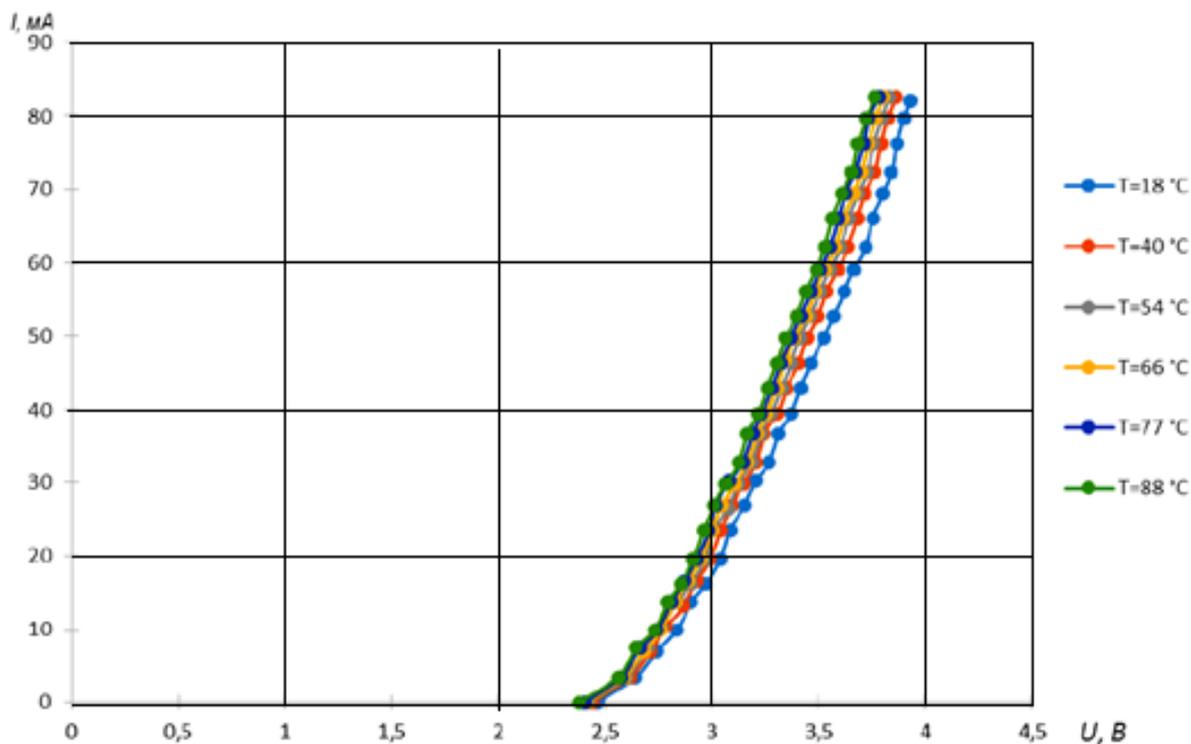


Рисунок 2.1 - Зависимости ВАХ СИД на основе нитрида галлия (марки FYL-5013UBC) от температуры в термостате (калибровочные кривые)

На рис. 2.2 представлены калибровочные кривые полученные из данных вольтамперных характеристик.

Из рис. 2.2 видно, что калибровочные кривые имеют практически линейный вид и относительно друг друга параллельны, это объясняется тем что зависимость прямого падения напряжения на диоде от температуры в рассматриваемом диапазоне температур линейна.

На втором этапе при комнатной температуре проводились измерения в режиме постоянного тока, изменяющегося в интервале значений от 5 до 100 мА. В моменты стабилизации температуры измеряем прямое падение на светодиоде.

На основе результатов этих измерений и результатов калибровочных измерений находим зависимость температуры *p-n*-перехода при различных значениях прямого тока, см. рис. 2.3.

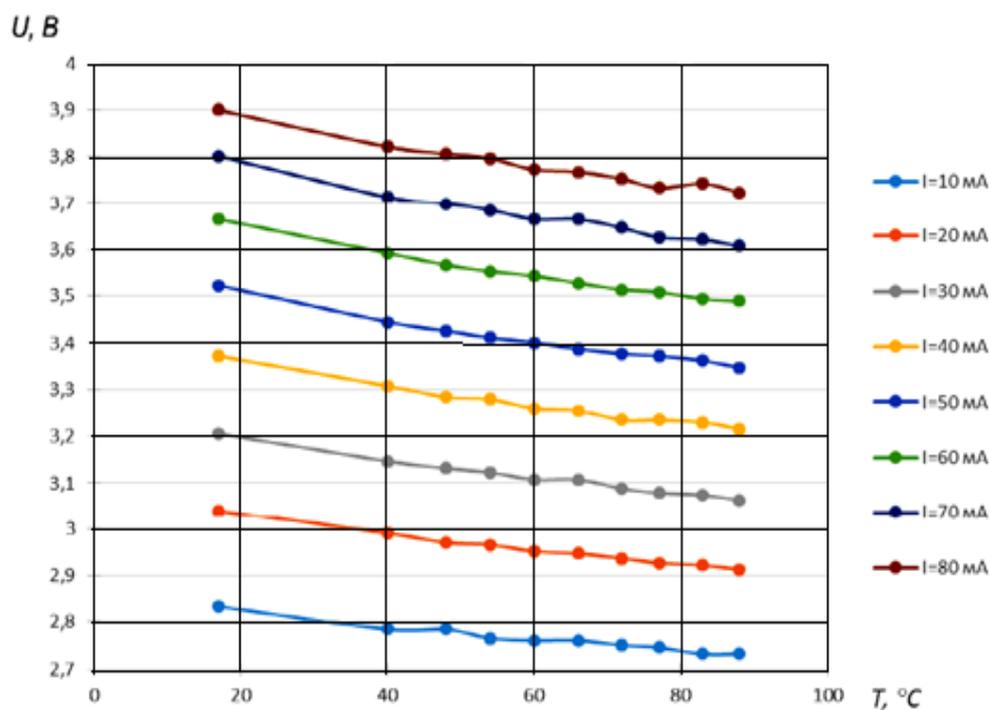


Рисунок 2.2 - Зависимости прямого напряжения от температуры $p-n$ перехода

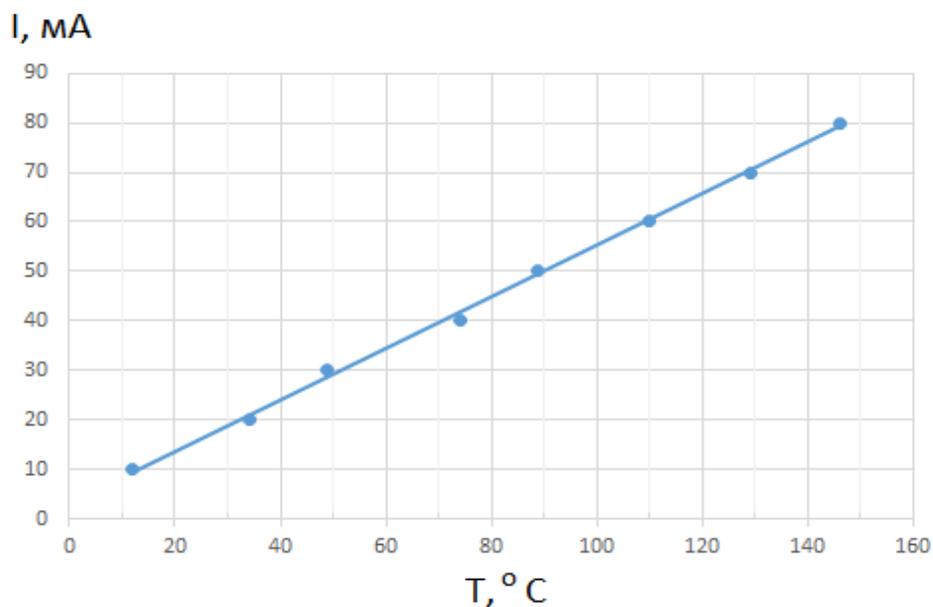


Рисунок 2.3 – Расчетная температура активной зоны СИД при различных значениях прямого тока

Эти результаты следует учитывать при расчетах электрических режимов работы светодиодов, которые будут работать в устройствах при различных температурах окружающей среды. В таких устройствах следует обратить внимание на режимы оконечных каскадов и ключей, электронных схем, нагрузкой, которых являются светодиоды. Выбор оптимальных режимов не должен сказаться на потере излучаемой мощности светодиодов.

3 СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ АКТИВНОЙ ЗОНЫ СИД

Известно, что форма спектра рекомбинационного излучения в полупроводниковом материале может быть описана выражением [2]:

$$I(h\nu) = B(h\nu - \Delta E_g)^{1/2}, \quad (3.1)$$

где $I(h\nu)$ – интенсивность излучения; h – постоянная Планка; ν – частота колебаний фотонов; ΔE_g – ширина запрещенной зоны; B – постоянная, которая рассчитывается по формуле:

$$B = \frac{2 \cdot g^2 \cdot m_r^{3/2}}{n \cdot c \cdot h^2 \cdot m_c}, \quad (3.2)$$

где m_c – эффективная плотность электронов; m_r – приведенная эффективная масса электрона и дырки; n – показатель преломления. Форма спектра зависит от температуры. Так, интенсивность излучения изменяется по экспоненциальному закону как:

$$I(h\nu) = \sqrt{h\nu - E_g} \cdot \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right) \quad (3.3)$$

При увеличении температуры спектр излучения также уширяется, а его максимум сдвигается в сторону низких энергий. Ширина спектра на уровне 0,5 от максимального значения, зависит от температуры и равна:

$$\Delta E_{0,5} \sim 1,8 \cdot kT \quad \text{или} \quad \Delta l_{0,5} = \frac{1,8 \cdot k \cdot T \cdot l^2}{h \cdot c}, \quad (3.4)$$

где $\Delta l_{0,5}$ – ширина спектра на уровне 0,5 в нм, l – длина волны максимума в нм. Но подобная температурная зависимость справедлива только для гомоперехода.

Для гетероструктуры GaN/InGaN со множественными квантовыми ямами зависимость формы спектра от температуры обусловлена изменением эффективной ширины запрещенной зоны ΔE_g^* , в простейшем случае определяемой как [3]:

$$\Delta E_g^* = \Delta E_g(\text{InGaN}) + E_{c1} + E_{v1} + \sum_i \Delta E_i, \quad (3.5)$$

где $\Delta E_g(\text{InGaN})$ – ширина запрещенной зоны InGaN; E_{c1} и E_{v1} – положения первых уровней размерного квантования для электронов и дырок в ямах; под знаком суммы содержатся другие виды вкладов в эффективную ширину зоны вследствие деформации пьезоэффектов, кулоновского взаимодействия электронов и дырок и др.

Все входящие в формулу параметры зависят от температуры и, следовательно, дают свой вклад в форму и ширину спектра излучения. Кроме того, значения этих параметров могут изменяться в зависимости от содержания индия в гетероструктуре, от количества и ширины квантовых ям и особенностей технологии их получения.

Для исследуемых в работе гетероструктур GaN-InGaN со множественными квантовыми ямами, используемых при изготовлении источников света, температурная зависимость ширины линии излучения на уровне 0,5 от

максимального значения имеет следующий вид: $\Delta E_{0,5} \approx 3 \div 4kT$, причем уширение спектра происходит в основном в сторону меньших энергий (больших длин волн). Следовательно, температурную зависимость ширины спектра возможно использовать для контроля температуры активной области.

Для этого необходимо определить температурный коэффициент (приращение ширины спектра при нагреве на один градус, нм/К), проводя измерения ширины при нескольких значениях температуры кристалла [4, 5]. На практике это реализуется путем измерения в термостате в импульсном и непрерывном режимах при одном значении прямого тока. Очень важен импульсный режим измерений, исключая процесс саморазогрева источника. Поэтому измерения проводят при длительности импульсов порядка 1 мкс и скважности не менее 1000.

На рис. 3.1 показаны зависимости ширины спектра на уровне 0,5 от максимального значения для импульсного тока для двух источников синего света производства АО НИИПП (Россия) типа КИПД154А и фирмы SemiLed (Китай) в пластмассовом корпусе типа 5050. Измерения проведены с помощью волоконного спектрометра типа USB 2000.

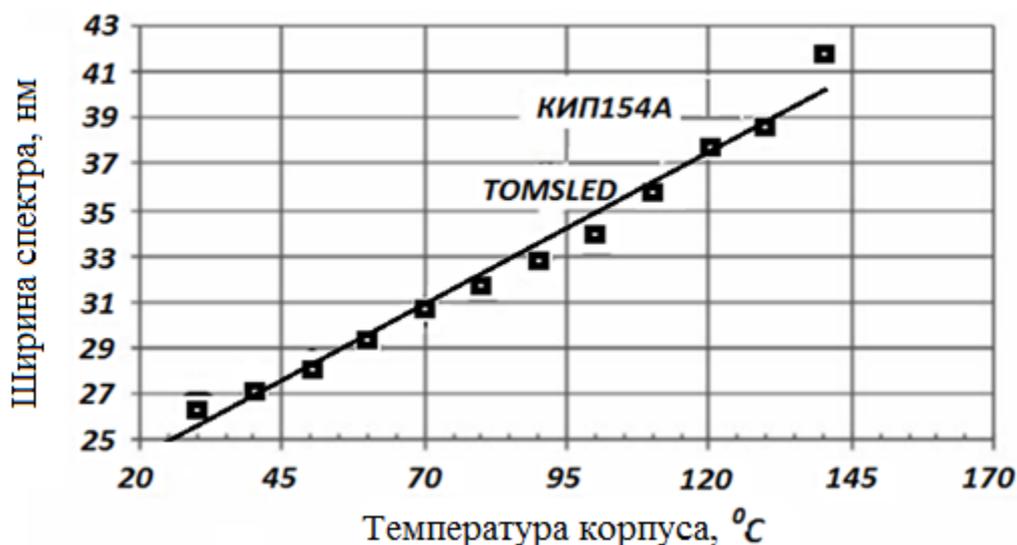


Рисунок 3.1 - Зависимость ширины спектра на уровне 0,5 от максимального значения для двух типов источников света при импульсном токе 350 мА и различной температуре корпуса.

На рис. 3.2 представлены измеренные зависимости перепада температур кристалл–корпус источников света при постоянном токе.

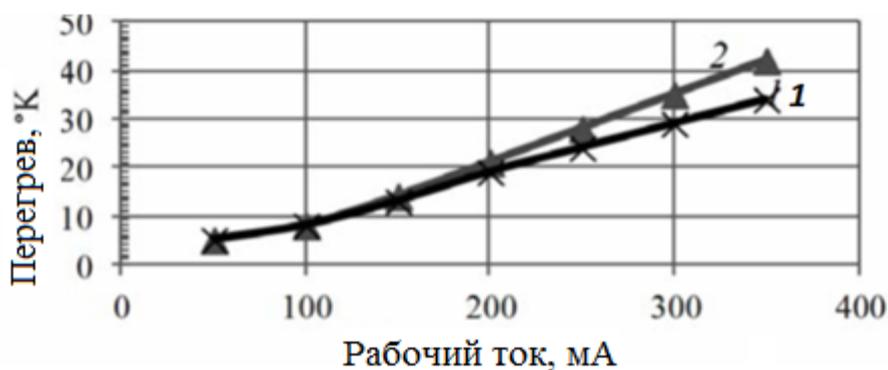


Рисунок 3.2 - Зависимость перепада температур ΔT активная область кристалла - окружающая среда от рабочего тока: 1–SemiLed; 2–КИПД 154А. ($T_{\text{ср}}=21^{\circ}\text{C}$)

В заключение раздела следует отметить, что разработанный бесконтактный метод измерения температуры полупроводниковых источников света является весьма перспективным для осуществления контроля температуры как отдельных изделий, так и в составе светотехнических устройств, например в лампах освещения.

4 ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ СИД

Измерение спектров излучения будет производиться с помощью спектрофотометра СФ-26, см. рис.6.

4.1 Технические характеристики

Спектральный диапазон, нм от 186 до 1100

Относительное отверстие монохроматора 1:11

Диапазон показаний шкалы коэффициентов пропускания, % от 0 до 110

Возможна растяжка на всю шкалу: 10% от любого целого числа десятков процентов и 1% в области от 0 до 10%.

Диапазон измерений коэффициента пропускания (%) от 3 до 100

Основная погрешность измерений коэффициента пропускания в области спектра от 190 до 1100 нм, % абс., не более 1.

Среднее квадратическое отклонение измерений коэффициента пропускания, % абс., не более: по шкале стрелочного прибора 0—110% 0,25

4.2 Устройство спектрофотометра

На рис. 4.1 представлен внешний вид спектрофотометра СФ-26

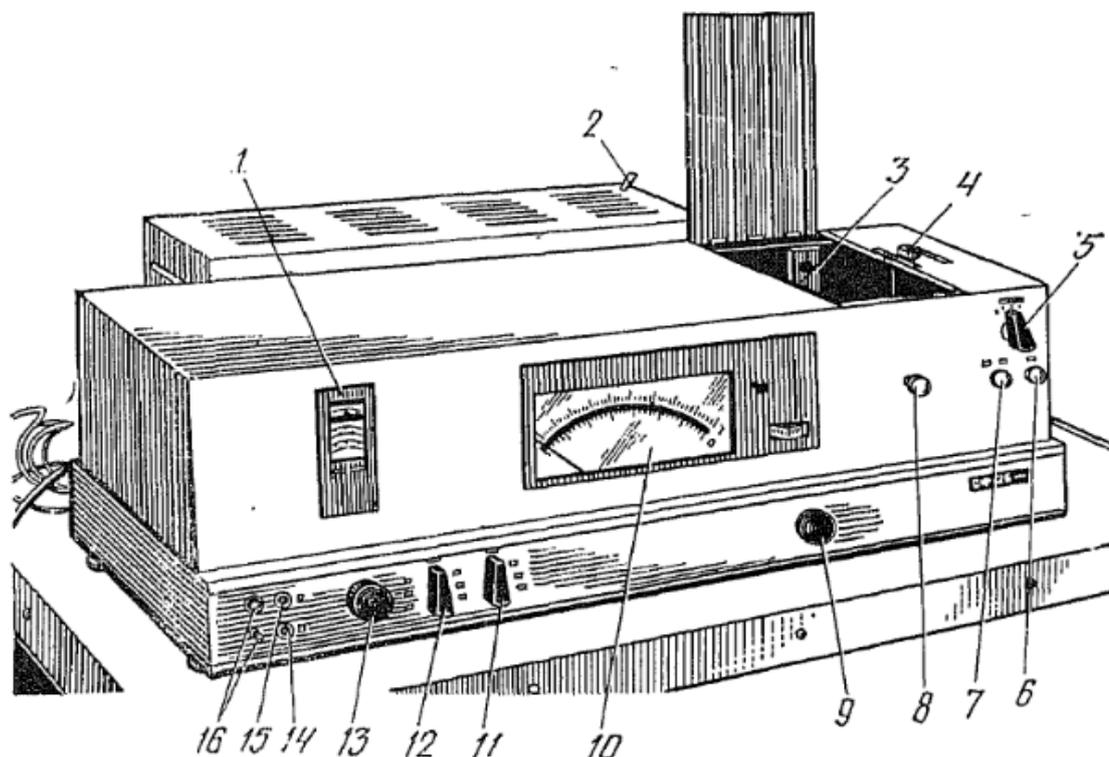


Рисунок 4.1 – Спектрофотометр СФ-26

Где - 1— шкала монохроматора; 2 — рукоятка переключения источника излучения; 3 кюветное отделение; 4 — рукоятка переключения фотоэлементов; 5 — рукоятка установки чувствительности; 6 — рукоятка установки стрелки измерительного прибора на нуль; 7 — рукоятка шторки; 8 — рукоятка перемещения каретки с кюветами; 9— рукоятка регулирования ширины щели; 10 — шкала измерительного прибора; 11 — рукоятка отсчета для выбора шкалы измерений (имеет четыре положения); 12 — рукоятка компенсации; 13 — рукоятка установки длин волны; 14 — сигнальная лампа включения лампы накаливания «Н»; 15 — сигнальная лампа включения дейтериевой лампы «Д»; 16 — тумблер включения прибора в сеть и сигнальная лампа «Сеть».

4.3 Подготовка к работе

Установите в рабочее положение фотоэлемент (5) и источник излучения (2), соответствующие выбранному спектральному диапазону измерений, см. рис. 4.1.

Закройте фотоэлемент, поставив рукоятку шторки (7) в положение ЗАКР, и рукояткой установите ширину щели примерно 0,1 мм.

Включите тумблер СЕТЬ (16), после чего должны загореться сигнальная лампа СЕТЬ и сигнальная лампа Д (15) или сигнальная лампа Н (14) в соответствии с выбранным источником света.

Для включения после лампы накаливания дейтериевой лампы переключите конденсор рукояткой (2), после минутного прогрева лампа автоматически загорается, одновременно загорается индикаторная лампа Д на передней панели.

Выключение спектрофотометра производите тумблером СЕТЬ (16).

4.4 Порядок измерения спектра

Включите спектрофотометр, как указано в разделе 3.1.

Установите на пути потока света от источника излучения (лампа накаливания) плату с исследуемым светодиодом. После этого необходимо подсоединить светодиод к источнику питания и установит требуемый по заданию ток, например 200 мА (или напряжение).

Установите требуемую длину волны (примерно в середине диапазона 450 – 470 нм), вращая рукоятку (13) (см. рис. 6) в сторону увеличения длин волн. Если при этом шкала повернется на большую величину, то возвратите ее назад на 3-5 нм и снова подведите к требуемому делению. Установите стрелку измерительного прибора спектрофотометра на нуль рукояткой (6) НУЛЬ.

Откройте фотоэлемент, поставив рукоятку (7) шторки в положение ОТКР. Установите стрелку измерительного прибора на деление «90%», вращая рукоятку (9) механизма изменения ширины щели. Медленно вращая рукоятку (13) найдите длину волны в диапазоне 450-470 нм, при которой стрелка измерительного прибора покажет максимальное значение. Вращая рукоятку (9) механизма изменения ширины щели установите такое положение, чтобы стрелка измерительного прибора показала «100%».

Теперь можно измерять спектр свечения светодиода. Начинать измерение можно с самой короткой длины волны, например, 430 нм и записать показания стрелочного прибора спектрофотометра. Измерения проводить через 5 нм до значения 500 нм.

Таким образом, будет получен спектр излучения исследуемого светодиода при данном токе нагрузки (напряжения на СИД).

5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

- Ознакомиться с косвенными методами определения температуры активной зоны гетероструктуры СИД, см. разд. 1 и 2.
- Подготовить к измерению спектров спектрофотометр СФ-26, см. разд. 3.1 – 3.3.
- Ознакомиться с порядком измерения спектров излучения СИД (разд. 3.4).
- Провести измерения спектров СИД при двух разных токах нагрузки или напряжения на СИД, величина токов (или напряжений) сообщается преподавателем.
- По результатам измерений сравнить (качественно и количественно) полученные спектры друг с другом, выполнить необходимые расчеты, определить температуру активной зоны гетероструктуры СИД, сделать выводы, написать отчет.
- Сдать отчет по лабораторной работе с защитой (ответами на тестовые вопросы преподавателя).

6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего необходимо контролировать температуру активной зоны гетероструктуры СИД.
2. Какие существуют методы оценки температуры активной зоны СИД.
3. В чем сущность метода прямого падения напряжения на СИД.
4. В чем сущность спектрального метода оценки температуры активной зоны СИД.
5. Для чего предназначен спектрофотометр.
6. Порядок измерения спектра спектрофотометром.
7. От чего зависит точность определения температуры активной зоны СИД спектральным методом.

7 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуберт Ф. Светодиоды / Пер. с англ. под ред. А. Э. Юновича – 2-е издание - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008, - 496 с.
2. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. – М.: Мир, 1973. – 456с.
3. Кудряшев В.Е. Спектры и квантовый выход излучения светодиодов с квантовыми ямами на основе гетероструктур и GaN-зависимость от тока и напряжения / В.Е. Кудряшев, С.С. Мамакин, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович // ФТП. – 2001. – Т. 35, № 7. – С. 861–868.
4. Смирнов С.В. Температурная зависимость спектров излучения светодиодов белого свечения на основе нитрида галлия и его твердых растворов / С.В. Смирнов, Е.В. Саврук, Ю.С. Гончарова // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2 (24), ч. 2. – С. 55–58.
5. Пат. 2538070 РФ, МПК G01 R31/265 G01 K 7/00 Способ бесконтактного определения неравномерности температурного поля в полупроводниковых источниках света / С.В. Смирнов (РФ), Е.В. Саврук (РФ), Ю.С. Гончарова (РФ). – № 2013133512/28; заявл. 18.07.2013; опубл. 10.01.2015. Бюл. № 1.