

Задача N 10

ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ В p-n- ПЕРЕХОДАХ И ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТОДИОДОВ

Автор разработки - проф. А.Э.Юнович

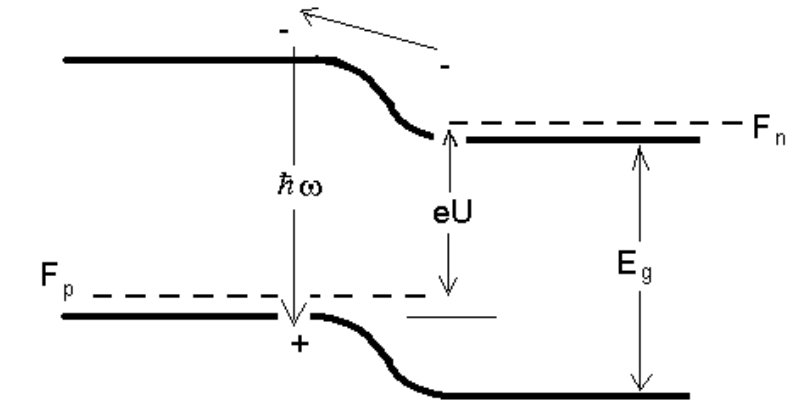
Аннотация

Целью работы является исследование излучательной рекомбинации в электронно-дырочных переходах и гетероструктурах в полупроводниках. Задачами работы является исследование спектров излучения светодиодов на основе полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$ и их твердых растворов (GaAs, GaAs/AlGaAs, GaP, AlInGaP/GaP, GaN/InGaN), зависимости мощности и внешнего квантового выхода излучения от тока и напряжения. Результаты анализируются на основе теорий излучательной рекомбинации в p-n-переходах и гетероструктурах прямозонных и непрямозонных полупроводников.

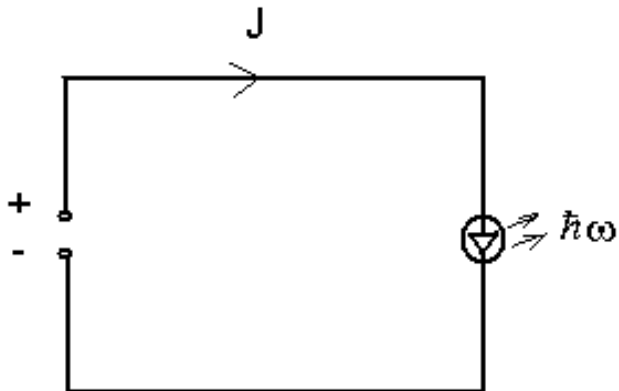
I. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Если в полупроводнике возбудить неравновесные электронно-дырочные пары, то, для достижения равновесия, эти пары должны рекомбинировать, т.е. возбужденный электрон из зоны проводимости должен перейти в валентную зону на пустой уровень - на уровень дырки. Энергия электронно-дырочной пары при рекомбинации может быть передана либо излучаемым квантам света, либо колебаниям решетки, либо примесным атомам. Если энергия передается квантам света, то такой процесс называется излучательной рекомбинацией.

Один из наиболее удобных способов возбуждения полупроводников – пропускание прямого тока через p-n- переход, т.е. инжекция неосновных носителей. Излучательная рекомбинация в этом случае называется инжекционной люминесценцией. В полупроводниковых диодах с p-n- переходами – светодиодах - происходит прямое преобразование энергии электрического тока в световую энергию (рис. 1). Эффективность этого преобразования может быть велика. Светодиоды имеют важные практические применения в оптоэлектронике и в светотехнике.



a)



б)

Рис. 1. а) Энергетическая диаграмма р-п- перехода при прямом смещении U , при котором инжектируемые носители тока могут рекомбинировать с излучением квантов света $\hbar\omega$; б) схема включения светодиода.

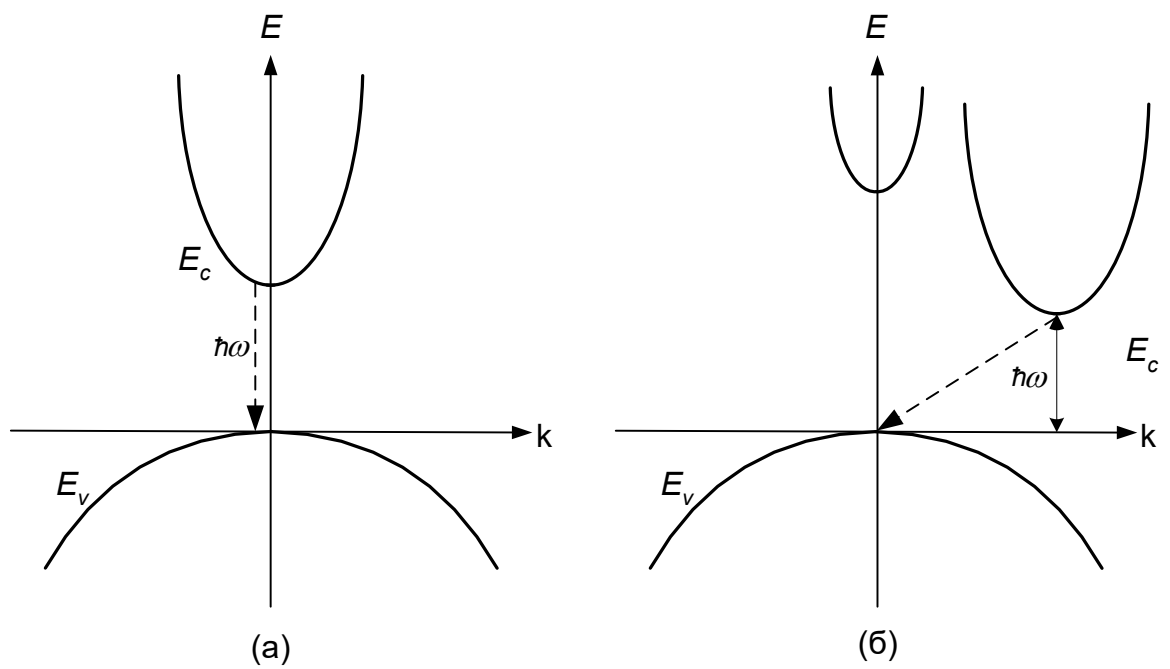


Рис. 2. Прямые (а) и непрямые (б) межзонные переходы в полупроводниках.

1. МЕХАНИЗМЫ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ

Процесс рекомбинации электронов и дырок сопровождается излучением квантов света $\hbar\omega$ с большой вероятностью, если выделяемая при этом энергия значительно повышает энергию, которую может поглотить кристаллическая решетка. Так, при межзонной рекомбинации электронов и дырок выделяемая энергия близка к ширине запрещенной зоны: в арсениде галлия, GaAs, $\hbar\omega \approx E_g = E_c - E_v \approx 1,4$ эВ; в фосфиде галлия, GaP, $E_g \approx 2,2$ эВ; в нитриде галлия, GaN, $E_g \approx 3,4$ эВ. Энергия же теплового движения атомов при комнатной температуре, составляет $kT \approx 0,026$ эВ, а энергия оптических фононов – квантов колебаний решетки – порядка $\hbar\Omega \approx 0,03-0,05$ эВ.

Вероятность межзонной излучательной рекомбинации во многом зависит от энергетического спектра полупроводника. Если абсолютный минимум зоны проводимости E_c и абсолютный максимум валентной зоны E_v полупроводника расположены при одном и том же значении квазиимпульса \mathbf{p} в зоне Бриллюэна, то излучательные переходы происходят без изменения квазиимпульса \mathbf{p} , – это прямые переходы (рис 2, а). Если положения абсолютных экстремумов E_c и E_v расположены в разных точках \mathbf{p} в зоне Бриллюэна (рис. 2, б), то при излучательном переходе должно происходить изменение квазиимпульса электрона. Для соблюдения законов сохранения часть энергии и избыточный квазиимпульс должны передаваться третьему “телу” – атому примеси или кванту колебаний решетки – фонону. Такие переходы называются непрямыми. Поскольку для непрямого перехода необходимо взаимодействие трех тел, то его вероятность много меньше вероятности прямого перехода.

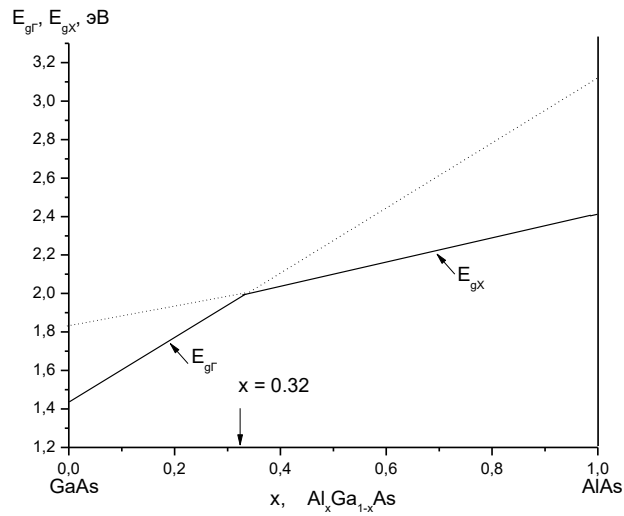
В тройных и четверных твердых растворах типа $A^{III}B^V$, например, $Al_xGa_{1-x}As$, $GaAs_{1-y}P_y$ или $Al_xIn_yGa_{1-x-y}P$ расстояние между минимумами зоны проводимости в точках Γ и X относительно потолка валентной зоны при изменении состава изменяется так, что при малых x полупроводник является прямозонным, а при больших – непрямоzonным (энергетические диаграммы на рис. 3). Точка пересечения, соответствующая этому изменению, указана на диаграмме стрелкой. Поскольку величина E_g в $Al_xGa_{1-x}As$ увеличивается с параметром x , излучение переходит из инфракрасной в видимую область. Однако квантовый выход излучения при увеличении x может резко упасть, если значение E_g соответствует непрямым переходам ($\Gamma - X$).

В процессе рекомбинации через примесные центры энергия, выделяемая при захвате электрона на акцепторный уровень E_A (или дырки - на донорный E_D), меньше E_g . Если акцепторы или доноры – мелкие водородоподобные центры, то энергия излучения того же порядка, что и E_g (рис. 4, а,б,в):

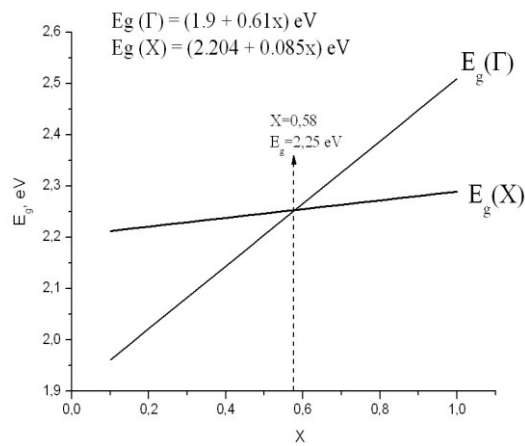
$$\hbar\omega \approx E_c - E_A = E_g - \Delta E_A, \text{ или } \hbar\omega \approx E_D - E_v = E_g - \Delta E_D.$$

Если в полупроводнике есть глубокие примесные центры, рекомбинация на которых идет безызлучательно, то доля излучательной рекомбинации понижается и может быть пренебрежимо мала. Таким образом, спектры и интенсивность излучения светодиода существенно зависят от концентрации различных примесей в полупроводнике.

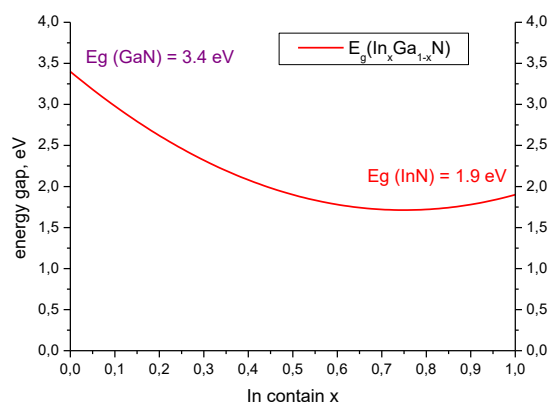
В непрямоzonных полупроводниках излучательный механизм может давать существенный вклад в полную рекомбинацию, если и электрон и дырка последовательно захватываются на примесный центр, а затем возбуждение, локализованное вблизи центра (связанный экситон), передается кванту света.



a)



б)



в)

Рис. 3. Зависимость ширины запрещенной зоны для прямых ($E_{g\Gamma}$) и непрямых (E_{gX}) межзонных переходов для тройных твердых растворов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (а) и четверных твердых растворов $(\text{Al}_x\text{In}_{1-x})_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{P}$ (б); ширина запрещенной зоны тройного раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ в зависимости от состава x (в).

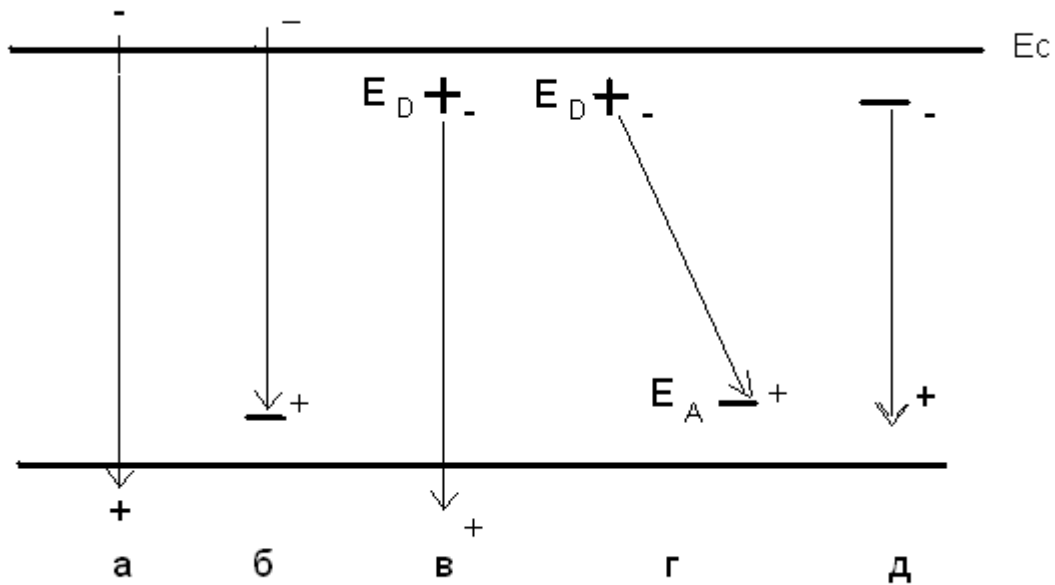


Рис. 4. Схема электронных переходов при разных механизмах излучательной рекомбинации: а) межзонная рекомбинация, б) рекомбинация зона проводимости – акцептор, в) рекомбинация донор – валентная зона, г) межпримесная рекомбинация, д) рекомбинация экситона, локализованного на примеси.

Возбужденный комплекс, состоящий из электронно-дырочной пары и примесного центра, называется связанным экситоном (рис. 4, д). В светодиодах из GaP при комнатной температуре наиболее интенсивно излучение экситонов, связанных на примеси азота N (зеленая полоса с максимумом вблизи 2,2 эВ). При более низких температурах преобладает излучательная рекомбинация на парах примесных атомов донор-акцептор, расположенных в решетке на некотором расстоянии друг от друга. В этом случае электрон, предварительно захваченный донором, рекомбинирует с дыркой, предварительно захваченной акцептором (рис. 4, г).

Число межзонных излучательных переходов в единицу времени в единице объема при малых уровнях возбуждения R в невырожденном полупроводнике пропорционально произведению концентраций электронов n и дырок p :

$$R [\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}] = V \cdot np = V \cdot (n_0 + \delta n)(p_0 + \delta p); \quad (1)$$

где n_0 и p_0 – равновесные концентрации, δn и δp – неравновесные избыточные концентрации носителей тока. Постоянные V для прямозонных V_{dir} и непрямозонных V_{indir} полупроводников различны по порядку величины, соответственно:

$$V_{\text{dir}} \approx 10^{-10} \text{ см}^3\text{с}^{-1} \text{ и } V_{\text{indir}} \approx 10^{-14} \text{ см}^3\text{с}^{-1}. \quad (2)$$

Если излучательная рекомбинация дырок (в полупроводнике n -типа) идет через донорные уровни или рекомбинация электронов (в полупроводнике p -типа) – через акцепторные уровни, то число излучательных переходов пропорционально концентрации соответствующих уровней (центров):

$$R = V_D \cdot N_{Dp}; \quad R = V_A \cdot N_{An}. \quad (3)$$

В прямозонном полупроводнике постоянные величины V_D и V_A – того же порядка, что и постоянные для межзонных переходов. В непрямозонном полупроводнике эти постоянные намного меньше.

При малых уровнях возбуждения концентрация неосновных носителей много меньше концентрации основных носителей тока:

$$n \approx \delta n \ll p \approx p_0 \text{ для полупроводника } p\text{- типа; } p \approx \delta p \ll n \approx n_0 \text{ для } n\text{- типа.}$$

При таких приближениях можно ввести излучательное время жизни τ_r , следуя формулам (1 - 3):

$$1/\tau_r = \delta(R - R_0)/\delta n = [B(n_0 + \delta n)(p_0 + \delta p) - B \cdot n_0 p_0] / \delta n \approx 1/(B \cdot p_0) \text{ (} p\text{-тип)}$$

$$\text{или } \tau_r = 1/(B \cdot n_0) \text{ (} n\text{-тип). \quad (4)}$$

В настоящей работе экспериментально исследуется излучательная рекомбинация в светодиодах из прямозонных полупроводников (GaAs, AlGaAs, AlInGaP, InGaN) и из непрямозонного полупроводника GaP.

2. СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Положение максимума спектральной полосы излучения зависит от ширины запрещенной зоны полупроводника и от энергий ионизации примесей, участвующих в рекомбинации. Если $E_g < 1,6$ эВ, то излучение лежит в инфракрасной (ИК) области спектра ($\lambda > 0,8$ мкм). Если $1,6$ эВ $< E_g < 3,1$ эВ, то межзонное и близкое к нему примесное излучение лежат в видимой части спектра ($0,8 > \lambda > 0,4$ мкм).

Если $E_g > 3,1$ эВ, то межзонное излучение лежит в ультрафиолетовой (УФ) части спектра ($0,4 < \lambda$ мкм). Выбирая полупроводник с заданной шириной запрещенной зоны, можно получить излучение в нужном диапазоне длин волн λ (рис. 5).

Поскольку излучение диодов люминесцентное, а не тепловое, его спектральное распределение намного уже спектрального излучения черного тела, к которому близок спектр ламп накаливания.

Задача о теоретическом анализе формы спектра излучения полупроводника очень сложна, если необходимо учитывать особенности взаимодействия электронов с примесями и фононами. В простейшем случае, если рекомбинация обусловлена межзонными излучательными переходами в невырожденном прямозонном полупроводнике, спектр излучения может быть записан в виде

$$I(\hbar\omega) \sim (\hbar\omega - E_g)^{1/2} \cdot \exp[-(\hbar\omega - E_g)/kT]. \quad (5)$$

Заметим, что спектр в этом виде может быть нормирован так, чтобы его значение в максимуме, $I_{\max}(\hbar\omega_{\max})$, было равно единице:

$$I(\hbar\omega) = (2e/kT)^{1/2} (\hbar\omega - E_g)^{1/2} \cdot \exp[-(\hbar\omega - E_g)/kT], \quad (5a)$$

где e – основание натуральных логарифмов.

Если рекомбинация обусловлена межзонными излучательными переходами электронов на заполненные мелкие уровни акцепторов в прямозонном полупроводнике p -типа, спектр излучения может быть представлен в виде

$$I(\hbar\omega) \sim [\hbar\omega - (E_g - \Delta E_A)]^{1/2} \cdot \exp[-(\hbar\omega - (E_g - E_A))/kT], \quad (6)$$

где $(E_g - \Delta E_A) = (E_c - E_A)$ – энергетическое расстояние от дна зоны проводимости до акцепторного уровня (рис. 4).

Характерным для простых модельных спектров межзонного излучения является положение максимума в точке

$$\hbar\omega = E_g + kT/2, \quad (7a)$$

а для спектров излучения зона проводимости – акцептор:

$$\hbar\omega_{\max} = (E_g - E_A) + kT/2. \quad (7b)$$

Ширина спектральной полосы на половине интенсивности в этих случаях равна

$$\Delta(\hbar\omega)_{1/2} = 1.8 kT, \quad (8)$$

а со стороны малых энергий (длинных волн) спектр падает сравнительно резко.

Если концентрация электронов в активной области велика, так что их статистическое распределение вырождено, то экспоненциальный спад спектра в сторону высоких энергий может быть описан законом

$$I(\hbar\omega) \sim \exp[-(\hbar\omega - E_g)/mkT], \quad (5a)$$

где величина m зависит от соотношения эффективных масс электронов и дырок и принимает значения в пределах $1 < m < 2$.

Все взаимодействия электронов и дырок между собой, с примесями и фононами, с дефектами должны приводить к более широким спектрам, в особенности в его длинноволновой части. Во многих случаях интенсивность излучения в сторону малых энергий (длинных волн) падает по экспоненциальному закону

$$I(\hbar\omega) \sim \exp(+\hbar\omega/E_0), \quad (5б)$$

где характерная энергия E_0 в знаменателе показателя экспоненты имеет порядок флуктуаций потенциальной энергии электронов, обусловленных различными причинами (рис. 6).

В настоящей работе экспериментально наблюдаемые спектры излучения светодиодов сравниваются с теоретическими формулами (5-8).

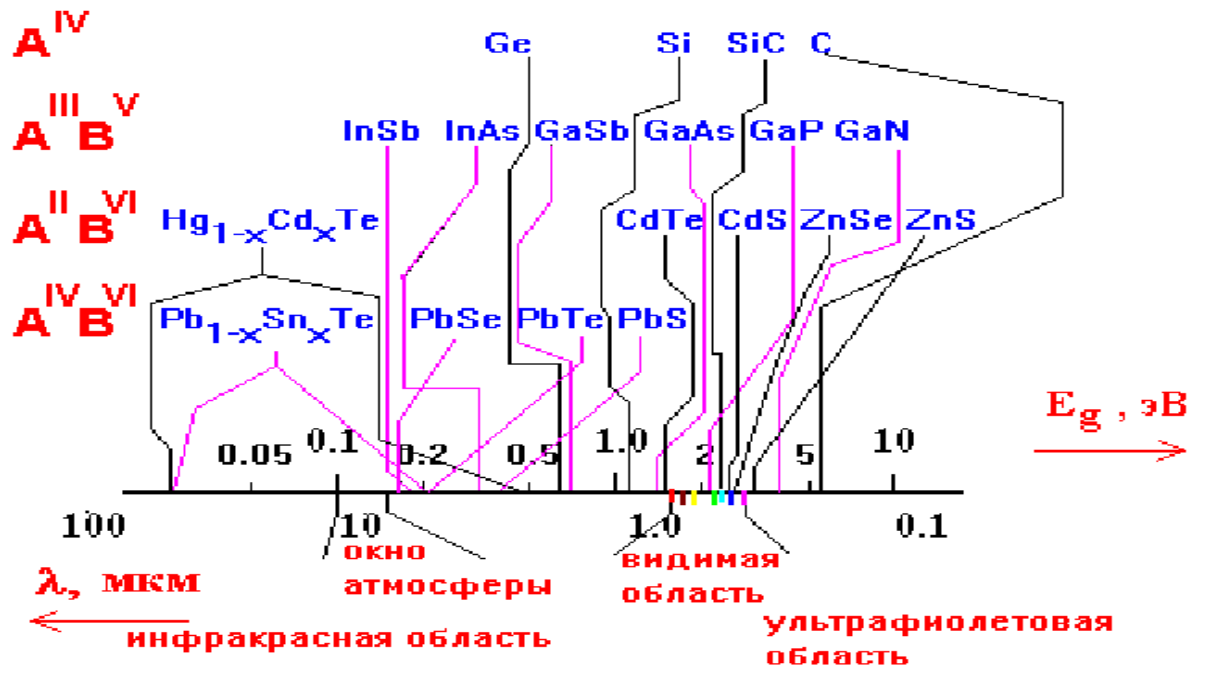


Рис. 5. Шкала электромагнитных волн и ширина запрещенной зоны разных полупроводников.

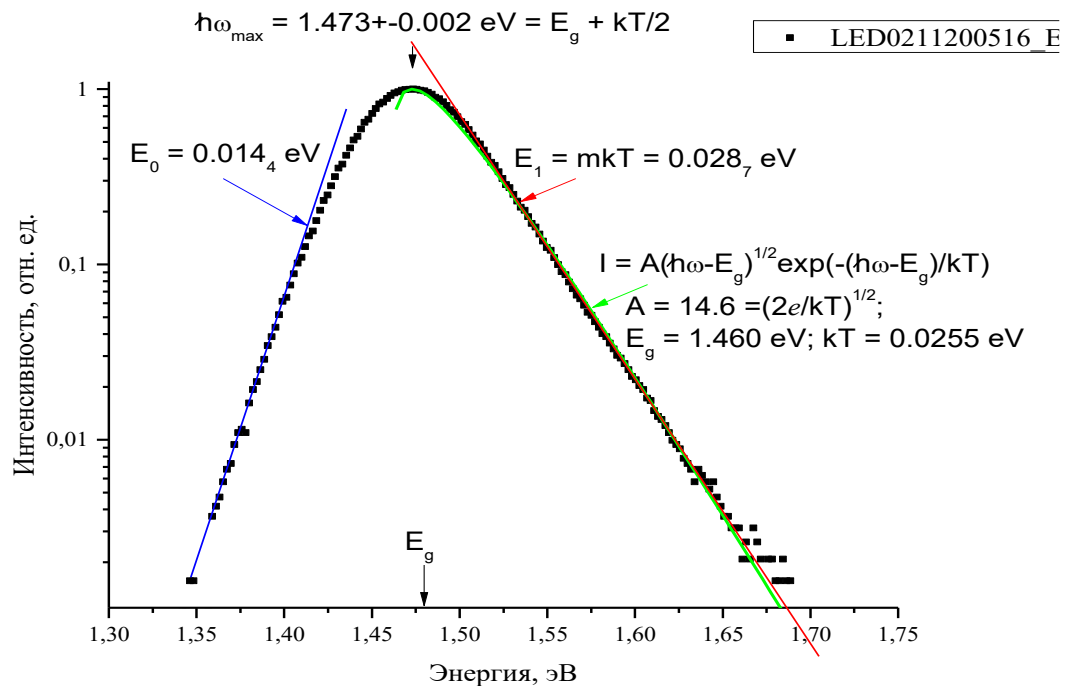
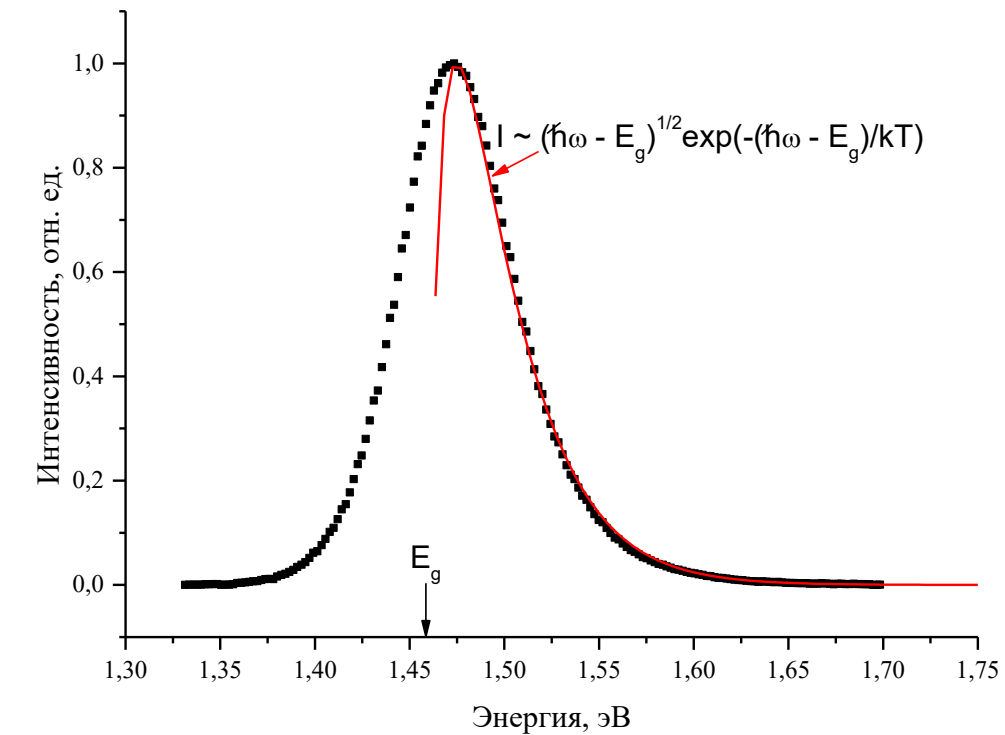


Рис. 6. Характерный вид спектров межзонного излучения прямозонного полупроводника, который описывается формулами (5-7); а) – в линейном масштабе, б) – в полулогарифмическом масштабе. Точки - экспериментально наблюдаемые спектры, с обычными отклонениями формы от простых теоретических кривых.

3. ОСОБЕННОСТИ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ В P-N-ПЕРЕХОДАХ

Рассмотрим простой случай рекомбинации в светодиоде, соответствующий теории Шокли для тонкого p-n- перехода (см. описание задачи N 8). В этом случае основная часть тока при прямых напряжениях U определяется инжекцией электронов (или дырок) через p-n- переход, их диффузией и рекомбинацией в p- (или в n-) области. Если n- область легирована сильнее, чем p- область, то:

$$J \cong e \cdot n \cdot (SL_n / \tau_n), \quad (9)$$

где S – площадь, L_n – диффузионная длина, τ_n – время жизни неосновных носителей (в этом случае – электронов). Если уровень инжекции небольшой, то на границе p-области и области пространственного заряда концентрация электронов n определяется приложенным напряжением U и контактной разностью потенциалов ϕ_c :

$$n = n_p \cdot \exp(eU/kT), \quad (10)$$

$$J \cong e \cdot n_p \cdot (SL_n / \tau_n) \cdot \exp(eU/kT); \quad n_p = n_n \exp(-e\phi_c/kT). \quad (11)$$

Если и полный ток J , и интегральный поток излучательной рекомбинации R (формулы (1-3)) пропорциональны концентрации инжектированных электронов, то R пропорционально J .

Пусть I есть полное число излучаемых квантов, т.е. интеграл от R по всему объему $v = SL_n$, где идет рекомбинация. В этом случае поток излучательной рекомбинации I пропорционален току через p-n- переход:

$$I = R \cdot (SL_n) \sim J. \quad (12)$$

Тогда внутренний квантовый выход излучения η_i , т.е. отношение полного числа излучаемых квантов к полному числу электронов, пересекающих p-n- переход в единицу времени, равно

$$\eta_i = I/(J/e) = R/(\delta n/\tau) = (1/\tau_r)/(1/\tau) = \tau/\tau_r. \quad (13)$$

Физический смысл внутреннего квантового выхода понятен: он характеризует отношение вероятности излучательной рекомбинации ($1/\tau_r$) к полной вероятности рекомбинации ($1/\tau$) в активной области перехода, которая в этом простом случае имеет толщину порядка диффузионной длины электронов. Полная вероятность рекомбинации может быть представлена как сумма вероятностей излучательной ($1/\tau_r$) и безызлучательной ($1/\tau_{nonr}$) рекомбинации:

$$(1/\tau) = (1/\tau_r) + (1/\tau_{nonr}), \quad (14)$$

так что внутренний квантовый выход можно представить в виде:

$$\eta_i = (1/\tau_r)/(1/\tau) = 1/(1 + \tau_r/\tau_{nonr}). \quad (15)$$

Во многих случаях рассмотренная нами простая картина не описывает реальные условия. В частности, при рекомбинации в области пространственного заряда, когда простая теория Шокли (формулы (9-11)) неприменима, зависимость тока от напряжения имеет показатель в экспоненциальной зависимости, отличающейся от eU/kT :

$$J = J_0 \cdot \exp(eU/m \cdot kT), \quad (16)$$

где постоянная величина m может меняться в пределах от 1 до 2. Если при этом излучательная рекомбинация определяется диффузионным током, т.е.

$$I = I_0 \exp(eU/kT), \quad (17)$$

то зависимость интенсивности излучения от тока имеет степенной вид

$$I \sim J^m. \quad (18)$$

с показателем степени m в пределах от 1 до 2.

В диодах часто наблюдается переход от квадратичной зависимости ($m = 2$) к линейной. В этом случае понятие внутреннего квантового выхода не имеет простого смысла, выражаемого формулой (13), так как времена жизни могут характеризовать рекомбинацию в разных точках образца и быть функциями концентраций носителей.

В настоящей работе экспериментально исследуются зависимости интенсивности излучения светодиодов от тока и напряжения. Результаты анализируются с помощью формул (16-18).

4. ОСОБЕННОСТИ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ В P-N-ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

Поток излучательной рекомбинации R пропорционален концентрации неосновных носителей (формулы (1-3)), т. е. обратно пропорционален объему, в котором идет рекомбинация при определенном значении тока J . Поэтому область, в которой идет рекомбинация, желательно сделать тонкой. Но толщина этой области в гомогенном p-n-переходе не может быть меньше диффузионной длины L_r , определяемой только излучательным временем жизни, $L_r = (D\tau_r)^{1/2}$.

Принципиальным шагом в создании полупроводниковых приборов с малой толщиной области рекомбинации были работы Ж.И.Алферова по выращиванию и исследованию p-n-гетероструктур на основе соединений типа $A^{III}B^V$ и их твердых растворов (типа AlGaAs/GaAs) в Физико-Техническом Институте им. А.Ф.Иоффе. Эти работы были удостоены Нобелевской премии 2000 года.

На рисунке 7 показана энергетическая диаграмма двойной гетероструктуры (ДГС) типа p-Al_xGa_{1-x}As – GaAs – n-Al_xGa_{1-x}As. В такой структуре тонкий активный слой полупроводника с более узкой запрещенной зоной E_{g1} (например, GaAs) расположен между двумя областями полупроводника с более широкой запрещенной зоной E_{g2} , E_{g3} (например, Al_xGa_{1-x}As).

Важно, что постоянные кристаллической решетки a_0 на границах этих полупроводников близки друг к другу, их изменение порядка $\delta a_0/a_0 \leq 10^{-3}$. При этом условии можно вырастить гетерогенные структуры с не деформированными границами, содержащими мало дефектов и дислокаций. В таких структурах, близких к идеальным кристаллам, вероятность безызлучательной рекомбинации мала по сравнению с вероятностью излучательной рекомбинации в слое узкозонного полупроводника.

Если к p-n-гетеропереходу приложить внешнее напряжение U в прямом направлении (+ к p-области), то электроны из широкозонной n-области будут инжектироваться через гетерограницу в узкозонный слой с одной стороны, а дырки из широкозонной p-области – с другой (рис. 7 б).

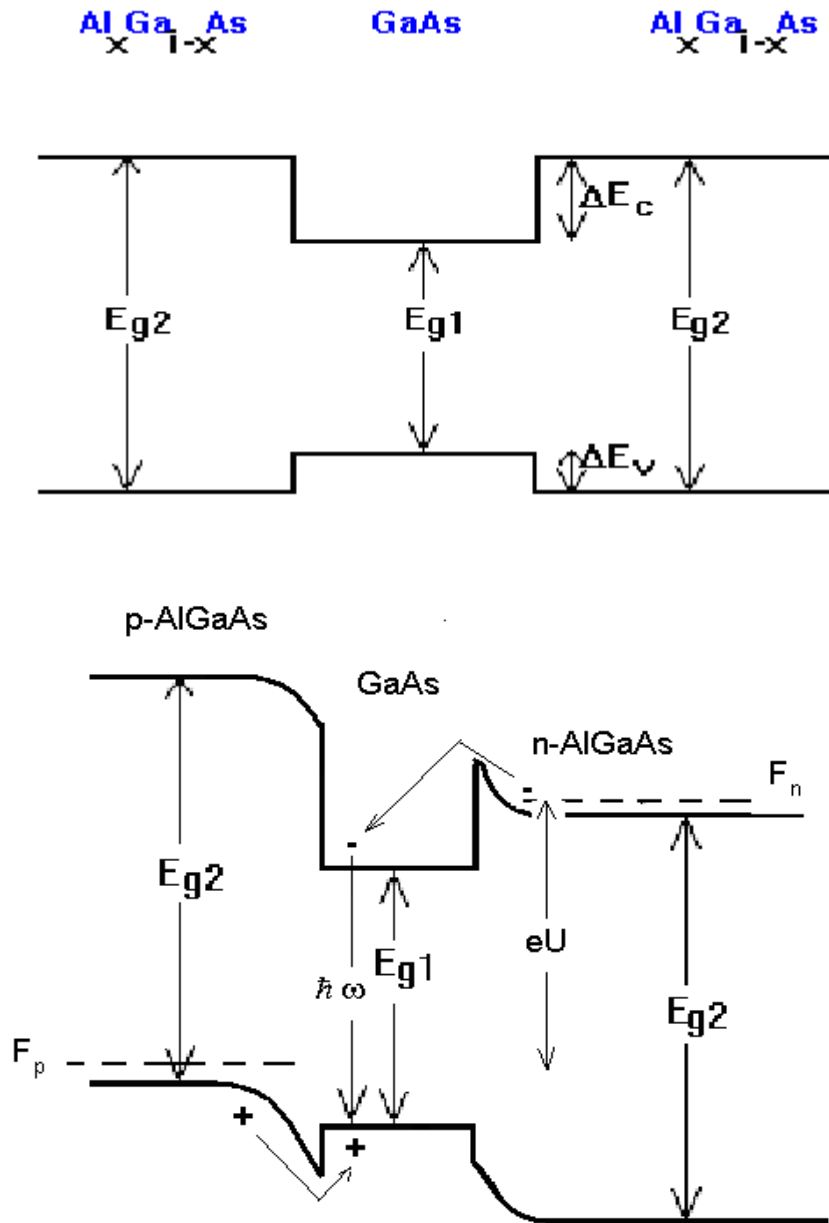


Рис. 7. а) Гетероструктура $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$;
 б) Двойная гетероструктура (ДГС) $\text{p-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{n-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с
 приложенным прямым напряжением U : $eU = F_n - F_p$.

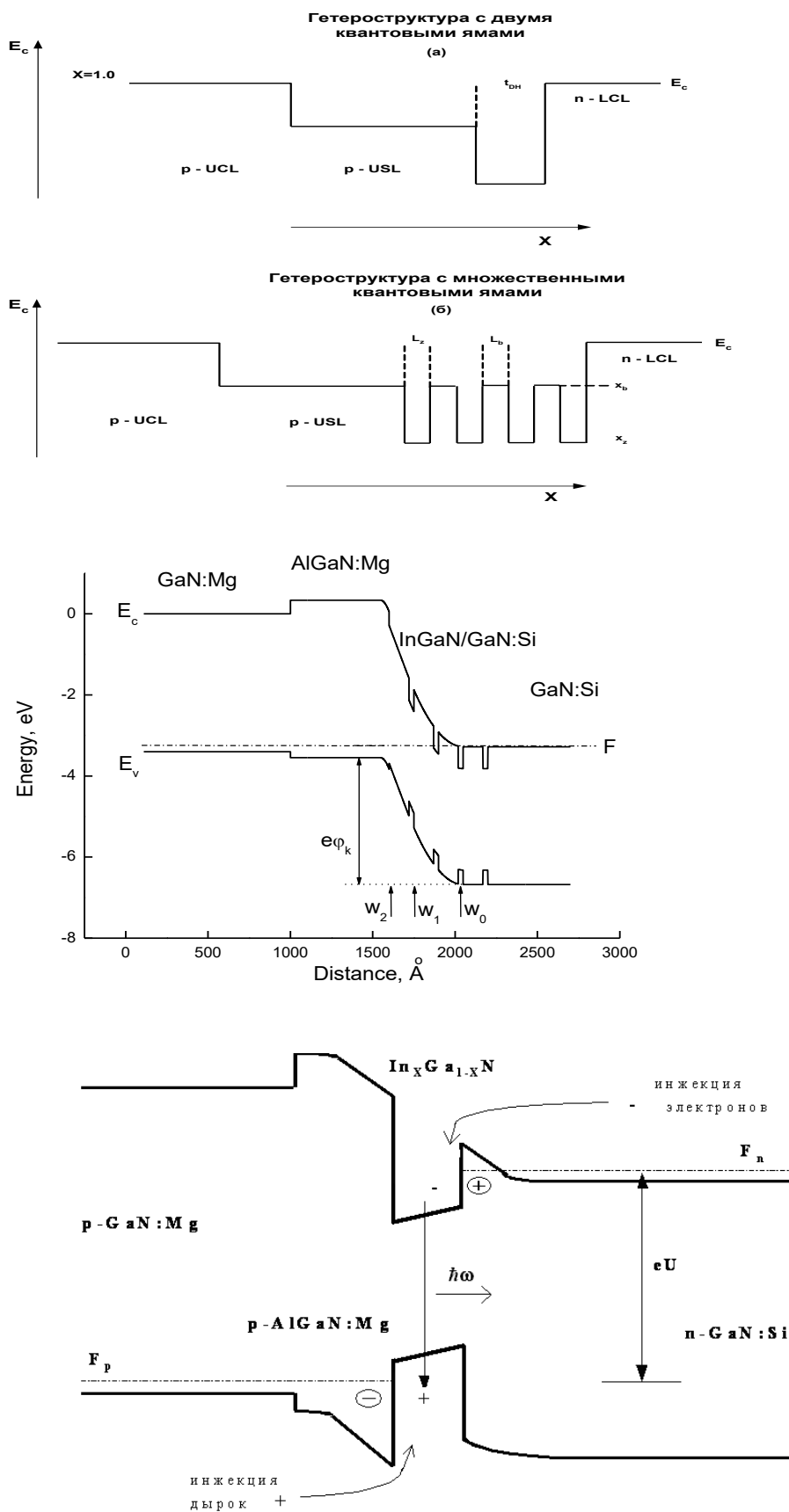


Рис. 8. Энергетические диаграммы гетероструктур дна зоны проводимости для гетероструктур типа AlInGaP/GaP с одиночными (а) и множественными (б) квантовыми ямами и типа p-GaN - p-Al_yGa_{1-y}N - In_xGa_{1-x}N - n-GaN с множественными (в) и одиночными (г) квантовыми ямами.

Электроны на границе узкозонной области с широкозонной p- областью встречают потенциальный барьер, равный энергетическому разрыву зон проводимости $\Delta E_c = E_{c2} - E_{c1}$. Дырки на границе узкозонной области с широкозонной n- областью встречают потенциальный барьер, равный энергетическому разрыву валентных зон $\Delta E_v = E_{v1} - E_{v2}$. Электронно-дырочные пары оказываются локализованными в активном слое полупроводника с более узкой запрещенной зоной. Толщина такого слоя может быть много меньше диффузионных длин носителей тока в однородном материале:

$$d \ll L_p, L_n . (19)$$

Условие (19) называют «электронным ограничением» в гетероструктурах. Благодаря электронному ограничению уменьшается объем области, в которой идет рекомбинация. В активной области p-n- гетероструктур можно создать большую концентрацию неравновесных электронно-дырочных пар, чем в гомогенных p-n- переходах. Это обеспечивает большую вероятность излучения.

Усовершенствования технологии эпитаксиального выращивания слоев в гетероструктурах позволили создать слои толщиной $d \approx 10 - 100$ нм, т.е. порядка десятков атомных слоев. Возможно выращивать структуры с гетерограницами, гладкими с точностью до 1-2 атомных слоев. Если толщина d оказывается сравнимой или меньше, чем длина волны Де-Бройля:

$$d \leq \lambda_{D-B} , (20)$$

то волновые функции и энергии электронов и дырок оказываются зависящими от размеров потенциальных ям. Такие квантово-размерные эффекты в последние годы широко используются в полупроводниковых приборах с гетероструктурами (рис. 8).

В настоящей работе экспериментально исследуется излучательная рекомбинация в светодиодах на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs; и структур с квантово-размерными эффектами типа AlInGaP/GaP, InGaN/GaN.

5. УСТРОЙСТВО СВЕТОДИОДОВ, ВНЕШНИЙ КВАНТОВЫЙ ВЫХОД И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Создание светодиодов включает ряд сложных технологических процессов. Прежде всего, это - выращивание гетероструктур на монокристаллических подложках эпитаксиальными методами. Приведенный выше (рис. 7) пример двойной гетероструктуры – наиболее простой. Реальные структуры для светодиодов содержат несколько слоев полупроводников разного состава с разной шириной запрещенной зоны (рис. 8). Кристаллические пластины с эпитаксиальными структурами вытравливаются и нарезаются методами планарной технологии на заготовки («чипы») площадью $10^{-3} - 10^{-1}$ см². На этих заготовках создаются металлические пленки для контактов и диэлектрические пленки, изолирующие и защищающие поверхность кристалла.

На рис. 9 показана фотография заготовки для светодиода с гетероструктурами типа $In_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N/GaN$ (фотография сделана в растровом электронном микроскопе в режиме катодolumинесценции). Электронный пучок проникает вглубь кристаллической пластины и возбуждает люминесценцию активного узкозонного слоя гетероструктуры. Зеленое свечение на приведенном рисунке обусловлено квантовыми ямами $In_xGa_{1-x}N$. Размеры квадрата – 350×350 мкм², видны контакты к p- и к n- областям.

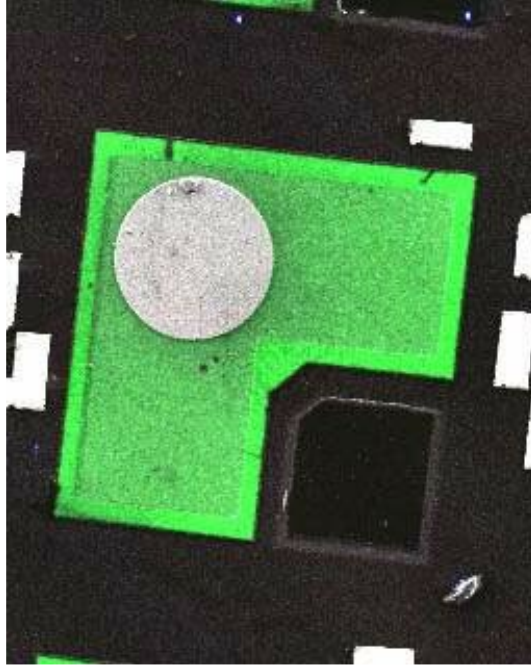
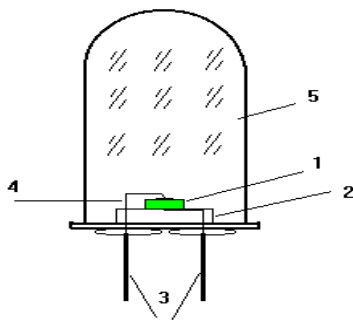


Рис. 9. Вид заготовки для светодиода ("чипа") в растровом электронном микроскопе с гетероструктурами типа $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{GaN}$. Размеры квадрата – $350 \times 350 \text{ мкм}^2$, видны контакты к р- и к n- областям.

Рис. 10. Конструкция светодиода; 1 - кристалл с р-n- переходом, 2 - подложка, 3- контактные вводы, 4 - проволочка к верхнему контакту, 5 - пластиковый купол.



По самому принципу действия светодиоды должны быть сделаны так, чтобы обеспечить не только большой внутренний квантовый выход излучения, но и вывод излучения во внешнюю среду. На рис. 10 показано устройство люминесцентных диодов, исследуемых в настоящей работе. Свет из активной области выводится через поверхность, расположенную сверху от р-п- перехода; часть света выводится через боковую поверхность. Излучение, возникающее вблизи р-п- перехода, должно пройти через объем полупроводника, часть его при этом поглощается и превращается в тепло. Свет, достигающий поверхности, частично отражается обратно в полупроводник. Так как показатель преломления n большинства полупроводников велик, при больших углах падения происходит полное внутреннее отражение. Например, для GaP и GaAs углы полного внутреннего отражения ($\sin\varphi = 1/n$), равны соответственно $17,2^\circ$ и $16,2^\circ$. Чтобы уменьшить полное внутреннее отражение, в светодиодах прибегают к куполообразным покрытиям поверхности прозрачным пластиком с показателем преломления, приблизительно равным $n_l = n^{1/2}$ (рис. 10).

Поглощение излучения перед выходом во внешнюю среду искажает форму спектра и уменьшает квантовый выход излучения. Спектр искажается сильнее в области собственного поглощения; со стороны высоких энергий наблюдаемый спектр может обрываться более круто, чем излучаемый в объеме.

Поэтому р-п- гетероструктуры имеют преимущества по сравнению с гомогенными р-п- переходами, связанные с оптическим выводом излучения из активного узкозонного слоя. Если выполнено условие:

$$E_{g2} - E_{g1} \gg kT,$$

а энергия излучаемых квантов порядка $\hbar\omega \cong E_{g1}$, это излучение не поглощается в слоях широкозонного полупроводника (см. рис. 7 - 9). В светодиодах с гетероструктурами коэффициент оптического вывода излучения η_{opt} и, следовательно, внешний квантовый выход излучения η_e больше, чем в светодиодах с гомогенным р-п- переходом.

Внешний квантовый выход η_e определяется как отношение интегрального по всему спектру числа излученных квантов Φ в единицу времени, выходящих во внешнюю среду интегрально по различным углам и на различных длинах волн $I_e(\Omega, \lambda)$, к числу электронов, пересекающих р-п- переход в единицу времени:

$$\Phi = \int d\Omega \int d\lambda \cdot I_e(\lambda, \Omega); \quad (21)$$

$$\eta_e = \eta_i \eta_{opt} = \Phi / (J/e), \quad (22)$$

где η_{opt} – коэффициент вывода света, или оптическая эффективность, определяющая потери излучения вследствие поглощения и отражения. Внешний квантовый выход η_e представляет важнейшую характеристику светодиода, определяющую долю преобразования энергии возбужденных электронно-дырочных пар в энергию световых квантов, выходящих из диода.

Если поток излучения Φ нелинейно зависит от тока (формулы (16-18)), то имеет смысл понятие дифференциального внешнего квантового выхода:

$$\eta_e = d\Phi / d(J/e). \quad (22a)$$

Другим важным параметром светодиода является коэффициент полезного действия η_p , характеризующий отношение полной выходящей мощности излучения W :

$$W = \int I_e(\hbar\omega)(\hbar\omega) d(\hbar\omega) = \int e I_e(\hbar\omega)(\hbar\omega/e) d(\hbar\omega) = \int W_e(\hbar\omega) d(\hbar\omega), \quad (22b)$$

к затраченной электрической мощности $P = JV$. Размерности величин под интегралом соответствуют размерностям тока (А) и напряжения (В):

$$[eI_e(\hbar\omega)d(\hbar\omega)] = A; [\hbar\omega/e] = B.$$

Энергия квантов $\hbar\omega$ может быть и меньше ширины запрещенной зоны E_g (при примесной рекомбинации), и больше ее (если электроны имеют достаточно большую энергию относительно края зоны проводимости). Кроме того, часть электрической энергии определяется не только падением напряжения на активной области U , но и падением напряжения JR_s на сопротивлениях контактов и толщи полупроводника, которая расходуется на Джоулево тепло, $V = U + JR_s$. Поэтому

$$\eta_p = W/P = W/JV = \int I_e(\hbar\omega)\hbar\omega d(\hbar\omega)/J(U + JR_s). \quad (22b)$$

Учитывая, что для приближенных расчетов значение $\hbar\omega$ в максимуме спектральной интенсивности $\hbar\omega_{\max}$ узкой спектральной полосы можно вынести за знак интеграла, получим:

$$\eta_p \cong \hbar\omega_{\max} \int I_e(\hbar\omega)d(\hbar\omega)/JV \cong \hbar\omega_{\max} I_e(\hbar\omega_{\max})d(\hbar\omega_{\max})/J(U + JR_s). \quad (23)$$

$$\eta_p \cong (\hbar\omega_{\max}/e) \int eI_e(\hbar\omega)d(\hbar\omega)/JV = \eta_e [(\hbar\omega_{\max}/e)/V]. \quad (23a)$$

Таким образом, для наилучшего преобразования электрической энергии в энергию света следует по возможности уменьшать R_s . В диодах из GaAs величина R_s обычно $R_s \approx 1$ Ом; в диодах на основе GaP и GaN, полупроводников более высокоомных, $R_s \approx 10$ Ом.

Для определения η_p необходимо измерять абсолютную мощность излучения W , проинтегрированную по всем направлениям. Поскольку диод всегда должен иметь подложку и подводящие контакты, часть излучения неизбежно теряется на контактах вследствие поглощения. Телесный угол, с которого обычно удается собрать излучение при показанной на рис. 10 конструкции, порядка 1 стерадиан.

Кроме энергетических характеристик для светодиода важно положение спектра излучения относительно спектральной чувствительности человеческого глаза $V(\lambda)$, имеющий максимум $V_{\max} = 683$ лм/Вт в зеленой области спектра ($\lambda_{\max} = 0,55$ мкм). В красной и фиолетовой областях чувствительность глаза падает приблизительно в 30 раз относительно максимума (рис. 11).

Световой поток Φ_v [лм] можно рассчитать, зная спектр излучения $\Phi_v(\lambda)$:

$$\Phi_v [\text{лм}] = 683 \cdot \int \Phi_e(\lambda)V(\lambda)d(\lambda). \quad (24)$$

Эффективность преобразования электрической энергии в световой поток, т.е. с учетом чувствительности глаза, η_v , характеризуется световой отдачей, размерность которой люмен/Ватт = лм/Вт:

$$\eta_v [\text{лм/Вт}] = \Phi_v/P = 683 \cdot \int \Phi_e(\lambda)V(\lambda)d(\lambda)/JV. \quad (25)$$

Диоды с зеленым свечением при меньшем квантовом выходе η_e могут иметь большую световую отдачу, чем красные или фиолетовые (рис. 11).

В настоящей работе экспериментально определяются внешний квантовый выход и коэффициент полезного действия светодиодов, рассчитывается световая отдача светодиодов с разным цветом свечения.

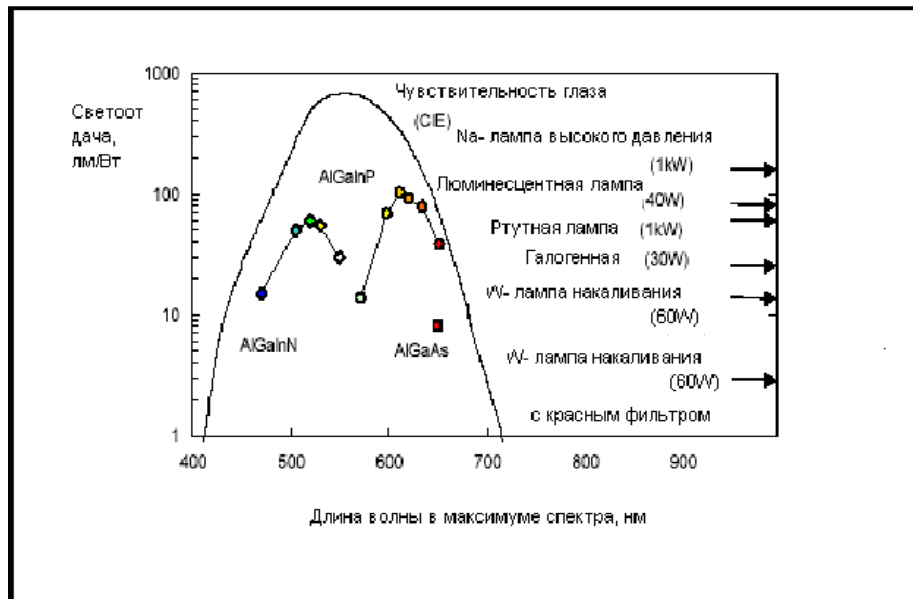


Рис.11. Спектральная чувствительность человеческого глаза $V(\lambda)$ в сравнении со световой отдачей светодиодов из различных материалов и со световой отдачей других источников света.

Следует заметить, что сейчас белые светодиоды на основе GaN, покрытые люминофорами, достигли рекордной световой отдачи до **300 лм/Вт**.

II. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка для исследования спектра излучения полупроводниковых светодиодов изображена на рис. 12. Установка состоит из монохроматора, фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), держателя образцов, генератора импульсного тока и источника постоянного тока, блока питания ФЭУ, цифрового вольтметра АРРА-207, цифрового вольтметра MXD-4660А, компьютера, осциллографа – вольтметра С-1-112, миллиамперметра, кремниевого фотоэлемента в оправе, микроамперметра.

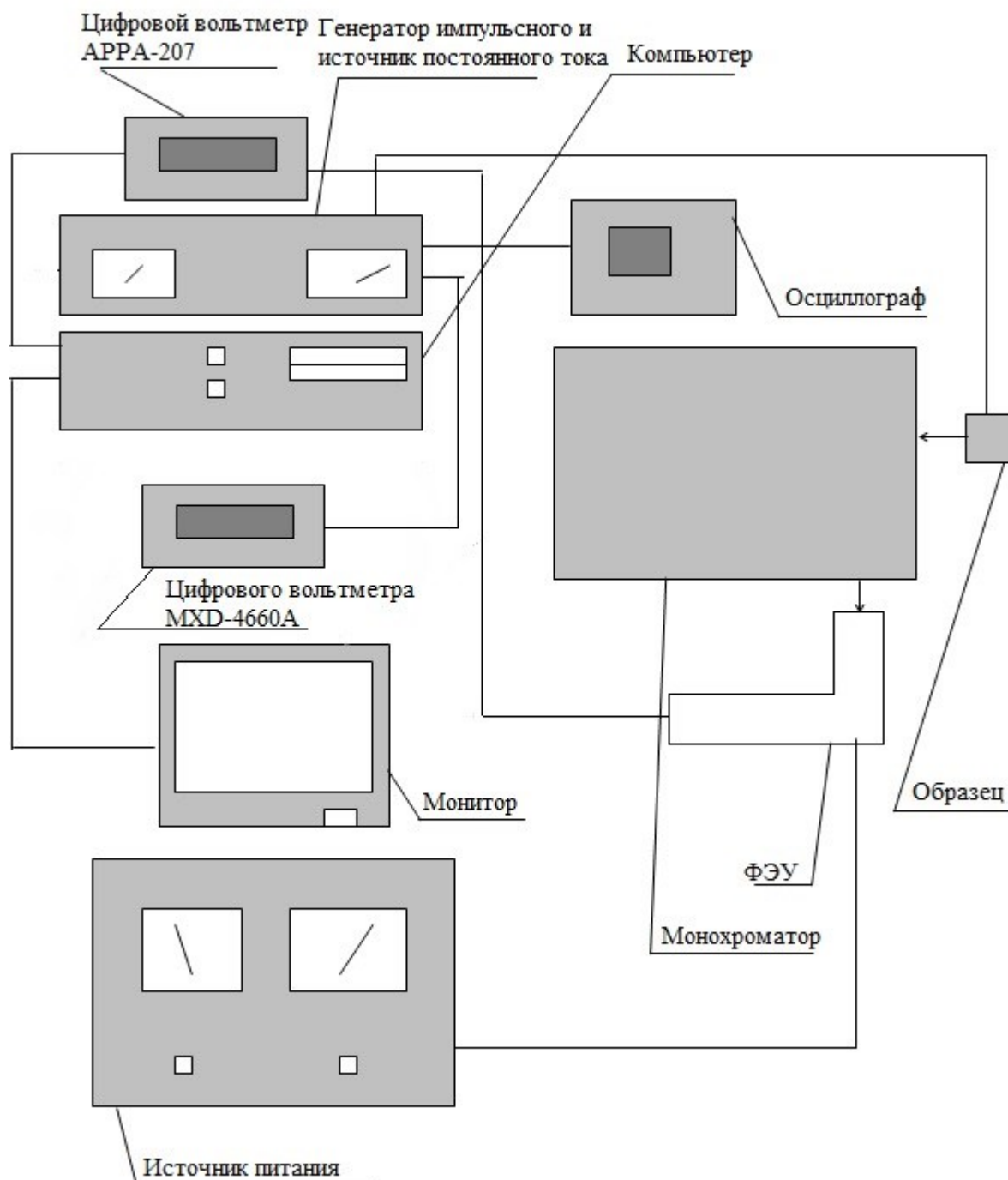


Рис. 12. Схема экспериментальной установки.

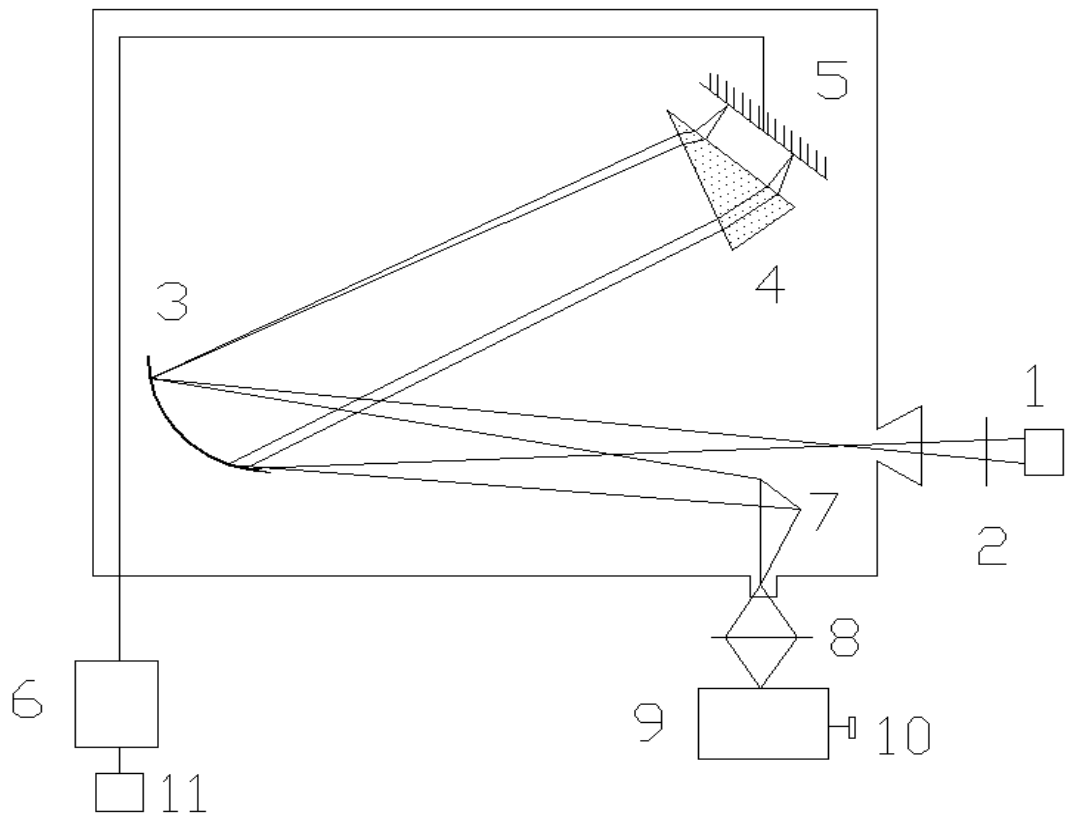


Рис. 13. Оптическая схема монохроматора ЗМР-3:

1 - камера со светодиодом и линзой, 2 - юстировочный винт, 3 - сферическое зеркало, 4 - призма, 5 - плоское зеркало Литрова, 6 - барабан вращения зеркала, 7 - выходное зеркало, 8 - фокусирующая линза, 9 - фотоумножитель, 10 - ручка крепления и юстировка ФЭУ, 11 - мотор барабана.

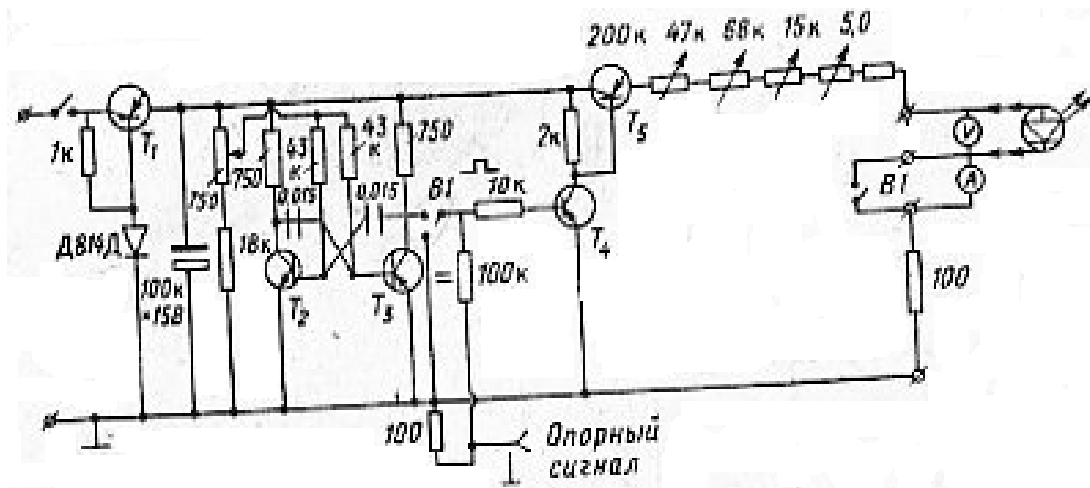


Рис. 14. Принципиальная схема источника постоянного тока и генератора прямоугольных импульсов тока.

2. МОНОХРОМАТОР ЗМР-3

Монохроматор ЗМР-3 предназначен для разложения света в спектр и выделения света с определённой длиной волны. Перед входной щелью монохроматора установлен держатель образца со светодиодом и фокусирующей линзой. Величина входной щели может регулироваться от 4 мм и меньше, с точностью 10 мкм (цена деления микрометрического винта). Свет от щели (рис. 13) поступает на сферическое зеркало, которое направляет параллельный пучок на призму. После призмы пучок попадает на плоское зеркало Литтрова, которое может вращаться с помощью рычага и барабана длин волн. Отражаясь от зеркала, свет снова через призму попадает на сферическое зеркало и, отражаясь от выходного зеркала, фокусируется на выходную щель.

На барабане длин волн имеется шкала, на которой указаны длины волн в нанометрах. Для автоматического сканирования спектра к барабану монохроматора сделана приставка - мотор с редуктором, который может вращать барабан с 4 скоростями. Зависимость длины волны на выходе монохроматора от времени вращения барабана с максимальной скоростью, определяемой редуктором, представлена в Приложении. Шестеренка, включающая сцепление редуктора с барабаном и переключающая скорости, передвигается вручную. Мотор включается в сеть 220 В. Обратная линейная дисперсия монохроматора $\approx 44 \text{ \AA/мм}$; она слабо меняется с λ .

Измерения могут проводиться в двух режимах – на постоянном токе и в режиме импульсной модуляции излучения. В режиме модуляции на светодиод подаются прямоугольные импульсы частотой 800 Гц. Постоянный ток через светодиод измеряется стрелочным миллиамперметром, постоянное напряжение на светодиоде – цифровым вольтметром MXD-4660A.

В режиме импульсного тока сигнал с сопротивления нагрузки ФЭУ, пропорциональный интенсивности излучения, поступает на вход осциллографа и, параллельно, на цифровой вольтметр АРРА-207. Удобно наблюдать сигналы при шкале усиления осциллографа с масштабом по оси ординат 0.5 – 1.0 В/дел, и при шкале вольтметра АРРА-207 до 4 В. По форме импульса с фронтами, имеющими вид нарастающей и падающей экспонент, можно судить о том, работает ли ФЭУ в линейном режиме или, если сигнал имеет вид прямоугольных импульсов – в нелинейном режиме. Амплитуду сигнала следует подбирать, изменяя щели спектрометра так, чтобы ФЭУ работал в линейном режиме.

В режиме импульсного тока сигнал с сопротивления нагрузки ФЭУ-22 поступает на цифровой вольтметр АРРА-207 в режиме импульсных измерений. **Значение измеренного напряжения поступает от цифрового вольтметра через "Comport" в компьютер, где обрабатывается и записывается.** Для записи спектров предназначена программа с названием «N10» на Рабочем столе компьютера. Рабочий экран программы см. ниже, при описании работы с компьютером (смотри также Приложение).

3. ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ, ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Для модуляции излучения довольно часто используют механические прерыватели света; через образец при этом пропускают постоянный ток. Однако светодиод дает возможность модуляции потока света изменением тока. Благодаря малым временам релаксации (порядка 10^{-8} – 10^{-6} с) возможно практически безынерционно управлять потоком света. В настоящей работе применено питание диода прямоугольными импульсами тока с частотой 800 Гц.

Импульсные генераторы питания собраны на транзисторах, имеющих малое выходное сопротивление и дающие импульсы тока до 80 мА при напряжениях порядка

одного-трех вольт. В условиях настоящей работы токи, при которых можно исследовать спектры излучения, $J = 1 - 60$ мА. Токи, при которых сказывается разогрев диодов и возможен их выход из строя, зависят от конструкции теплоотвода. Рекомендуется проводить измерения при $J = 12 - 15$ мА.

Блок-схема источника постоянного тока и генератора импульсов тока необходимой частоты и амплитуды представлена на рис. 14.

Генератор состоит из стабилизирующих ток транзисторов T_1 и T_5 , задающего мультивибратора на транзисторах T_2 , T_3 и прерывателя на транзисторе T_4 , формирующего импульсы. При нижнем положении тумблера B_1 мультивибратор отключен от прерывателя, транзистор T_4 задает постоянное смещение на базе транзистора T_5 и через светодиод течет постоянный ток. Ток регулируется четырьмя последовательными сопротивлениями от 200 до 15 кОм, ручки которых выведены на переднюю панель блока. В режиме постоянного тока ток J и напряжение V на диоде измеряются с помощью миллиамперметра и вольтметра, которые подключены к клеммам на передней панели блока.

В импульсном режиме тумблер B_1 устанавливается в верхнее положение, и импульсы мультивибратора с частотой 800 Гц и скважностью $Q = 2$ поступают на прерыватель. Частота мультивибратора может подстраиваться ручкой резистора 750 Ом, выведенной на переднюю панель. Рабочие токи транзисторов T_4 и T_5 подобраны так, что амплитуда импульсов тока при открытом транзисторе T_5 равна значению постоянного тока. При закрытом транзисторе ток пренебрежимо мал. Таким образом, измерив J и V на постоянном токе, мы знаем амплитуды их импульсных значений. В импульсном режиме тумблер B_1 закорачивает миллиамперметр постоянного тока, а вольтметр показывает среднее напряжение, вдвое меньшее импульсного.

Источник питания 10 В не заземлен (левая половина блока источника питания). Поскольку исследуемый светодиод не заземлен, измерения постоянного напряжения на диоде вольтметром MXD-4660A с заземленным входом следует проводить на каждом контакте светодиода относительно земли.

4. ДЕРЖАТЕЛЬ ОБРАЗЦА И ЕГО ЮСТИРОВКА

Исследуемый диод запаян в держателе с фиксированной полярностью. Держатель вставляется в оправу и закрепляется винтом. Оправа вместе с фиксирующим устройством располагается на рейтере оптической скамьи монохроматора и перемещается относительно оптической оси системы винтом. Точность юстировки изображения диода на выходную щель монохроматора регулируется вращением фокусирующей линзы, юстировочным винтом и смещением рейтера вдоль оптической скамьи.

5. ФОТОУМНОЖИТЕЛЬ И ЕГО БЛОК ПИТАНИЯ

Свет от выходной линзы фокусируется на чувствительный фотокатод фотоэлектронного умножителя ФЭУ-22. Для предотвращения влияния рассеянного света выходное отверстие монохроматора и фокусирующая линза закрыты блендой. ФЭУ закреплен на оптической скамье и отъюстирован так, чтобы изображение выходной щели было сфокусировано на чувствительную точку фотокатода. Без преподавателя не сдвигать фокусировку ФЭУ!

На катод ФЭУ и через сопротивления на его диоды подается напряжение 1.10-1.20 кВ от высоковольтного выпрямителя ВС-23. Заметим, что заземлен "плюс" источника питания ФЭУ. Тонкой регулировкой напряжения в пределах ± 50 В можно добиться оптимального отношения полезного усиленного сигнала к шуму. Сигнал с

нагрузочного сопротивления (1 МОм) на выходе ФЭУ подается на осциллограф и цифровой вольтметр.

6. ЦИФРОВЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ

Цифровой мультиметр АРРА-207 служит для регистрации сигналов от выхода фотомножителя ФЭУ-22. В режиме постоянного тока данный прибор для шкал до 4 В и до 40 В имеет разрешения 100 мкВ и 1 мВ, соответственно. Погрешность измерений на обеих шкалах 0.06% + 2 ед. В режиме переменного тока этот мультиметр имеет те же разрешения для шкал до 4 В и до 40 В. Для частоты сигнала 800 Гц погрешность измерений напряжения для обеих шкал составляет 1.0% + 5 ед. Для режима переменного напряжения при измерении величин менее 30% от установленного предела к значению погрешности необходимо дополнительно добавить 40 единиц младшего разряда.

Сигнал от ФЭУ-22 подается коаксиальным кабелем на вход в правой части передней панели АРРА-207.

Цифровой вольтметр МХD-4660А служит для измерения напряжения на светодиоде. В режиме измерения постоянного напряжения для шкал до 2 В и до 20 В имеет разрешения 100 мкВ и 1 мВ, соответственно. Погрешность измерений на обеих шкалах 0.05% + 3 ед.

7. КОМПЬЮТЕР

Системный блок и монитор компьютера включаются черной кнопкой на передней панели блока. При его включении на экране монитора появляется календарь и часы, следует проверить соответствие даты и времени началу работы. После этого на рабочем столе экрана монитора появляется несколько иконок, соответствующих различным программам. Для данной задачи используется программа “N10” на Рабочем столе компьютера. Обратим внимание, что запуск программы и закрытие могут занять несколько минут.

Рабочий экран программы “N10” изображён на рис. 15.

В поле **Experiment Conditions** предлагается ввести основные условия эксперимента, которые потом будут записаны в отчет:

- Operator(s)** - Оператор(ы), проводящий измерения
- Sample** – Измеряемый образец
- Conditions** – Важные условия, например, измерения на постоянном токе (“const”) или в импульсном режиме (“pulse”)
- Voltage** – напряжение (V), подаваемое на исследуемый образец
- Current** – Ток через образец (mA)
- Split** – Ширина входной и выходной щелей

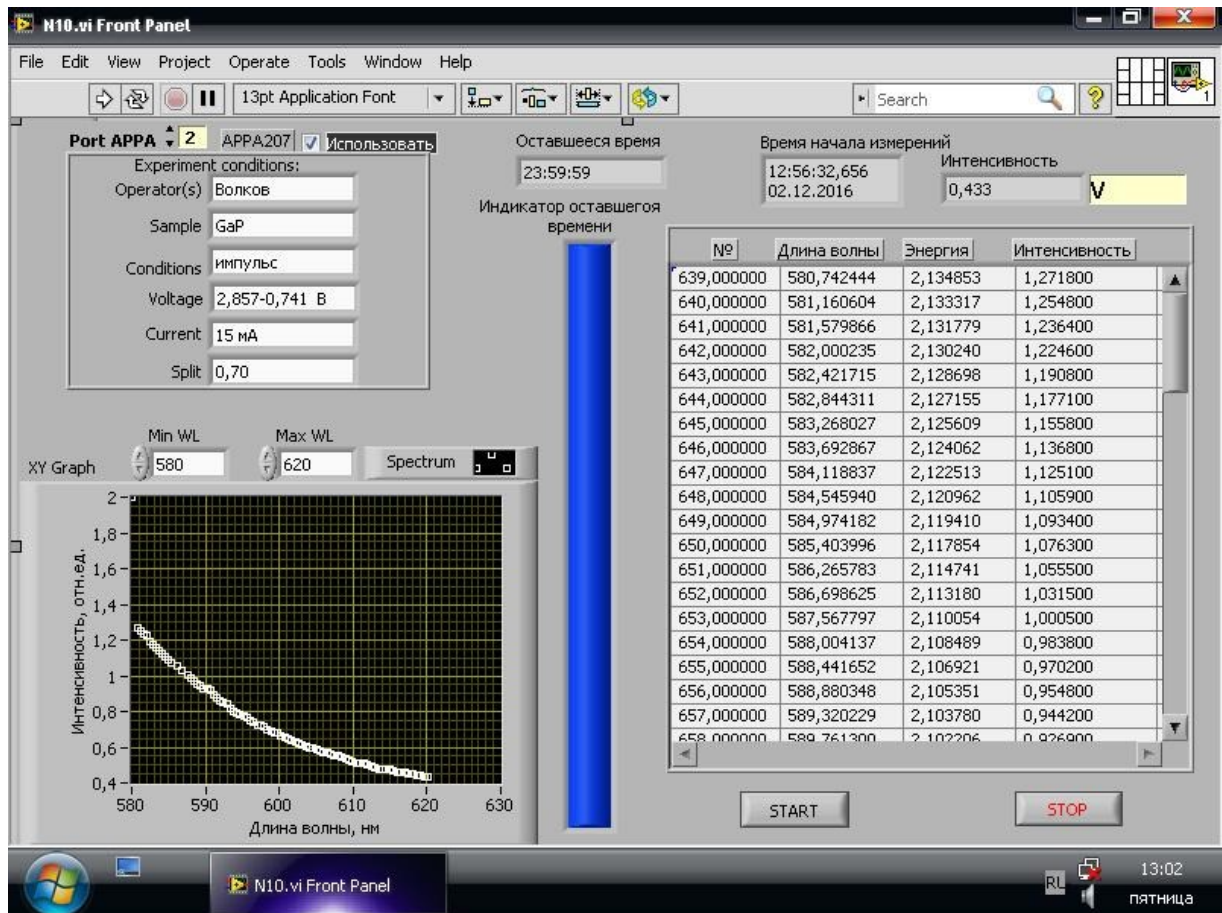


Рис. 15. Рабочий экран программы записи спектров «N10».

Под полем с условиями эксперимента располагается экран, отображающий измеренные данные графически. В поля **MinWL** и **MaxWL** необходимо ввести минимальную и максимальную длину волны (нм), соответственно. Данный экран используется исключительно для визуального наблюдения текущих измерений. Дальнейшую обработку и интерпретацию рекомендуется проводить пакетом математических программ, например, программой «Origin».

В центре окна программы располагается индикатор оставшегося времени до окончания измерения и линейка процесса.

Верхняя строчка справа отображает дату, время начала измерений и данные с цифрового вольтметра.

Правое поле отображает ход эксперимента. Формат, в котором данные записываются в отчет:

OP, SMP, COND, VOLT, CURR, SPLT – основные условия эксперимента, записанные в поля слева.

0001 – 600.0 – 2.0663 – 0.0000

Номер, длина волны в нм, энергия в эВ и напряжение с вольтметра, прямо пропорциональное интенсивности.

Ниже расположены 2 клавиши управления программой:

Start – кнопка запуска измерений

Stop – кнопка остановки измерений

Остановимся более подробно на особенностях измерения спектра.

Особенность установки заключается в том, что электропривод вращает барабан с постоянной скоростью и управляется вручную. Шкала длин волн барабана нелинейна. Программа получает данные о положении барабана следующим образом:

1. Барабан устанавливается в минимальное положение.
2. Включается редуктор и замеряется время, прошедшее с начала движения до каждой метки с шагом 10-20 нм. Дополнительная программа, сама измеряет время. От пользователя требуется лишь в начальный момент времени нажать кнопку **Start**.
3. График зависимости длины волны от времени аппроксимирован многочленом 5 степени (см. Приложение) так, что в рабочих пределах монохроматора приближение достаточно точно.
4. На основе полученного многочлена и минимальной длины волны, указанной в программе, определяется положение барабана в каждый момент времени, прошедшее с начала измерений.

Программа снимает данные с цифрового вольтметра 1 раз в секунду (сравнительно медленная скорость обусловлена величиной скорости измерений цифрового вольтметра). Таким образом, на основании введенных данных о минимальной длине волны, каждую секунду программа определяет положение барабана, используя градуировочный многочлен.

Передачи редуктора относятся как 1:25, то есть вторая скорость в 25 раз медленнее первой, 3 – в 25 раз медленнее второй и т.д. Однако в данной задаче мы используем только одну, самую высокую, скорость.

Время до окончания измерений рассчитывается на основании данных о максимальной длине волны.

ФОТОЭЛЕМЕНТ, ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ И ВНЕШНЕГО КВАНТОВОГО ВЫХОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

Для измерения мощности излучения светодиодов используется кремниевый фотоэлемент, спектральная чувствительность которого представлена на рис. 16. Для того чтобы фототок элемента J_{ph} был пропорционален потоку квантов света, необходимо, чтобы фотоэлемент работал в режиме тока короткого замыкания. Поэтому измерения J_{ph} проводятся микроамперметром с малым внутренним сопротивлением.

Ток фотоэлемента J_{ph} определяется его спектральной чувствительностью $Q_e(\lambda)$ [электронов/фотон] или $Q(\lambda)$ [Ампер/Ватт], коэффициентом собирания потока фотонов k от светодиода с определенной конструкцией в данной геометрии, полным потоком фотонов Φ и мощности W (формулы (21)).

$$J_{ph} = e \cdot \int Q_e(\lambda) \cdot \int d\Omega I_e(\lambda, \Omega) d\lambda = e k \int Q_e(\lambda) \cdot I_e(\lambda) d\lambda. \quad (26)$$

Спектр $I_e(\lambda)$ имеет максимум в точке λ_{max} , он - сравнительно узкий; поэтому для приближенных расчетов можно вынести значение $Q_e(\lambda_{max})$ за знак интеграла:

$$J_{ph} \approx e k Q_e(\lambda_{max}) \cdot \int I_e(\lambda) d\lambda. \quad (27)$$

Из (27) можно получить, в соответствии с формулами (21) и (22), что:

$$J_{ph} \approx e k Q_e(\lambda_{max}) \cdot \Phi = k Q_e(\lambda_{max}) \cdot \eta_e \cdot J; \quad (28)$$

$$\eta_e = [1/kQ_e(\lambda_{max})] \cdot (J_{ph}/J). \quad (28a)$$

Формула (28а) показывает, что отношение непосредственно измеряемых токов J_{ph}/J дает нижнюю границу внешнего квантового выхода. Поправки на спектральную чувствительность фотоэлемента ($Q_e(\lambda_{max}) < 1$) и коэффициент собирания света в камере с фотоэлементом ($k < 1$) показывают, во сколько раз больше $[1/kQ_e(\lambda_{max})]$ истинное значение η_e .

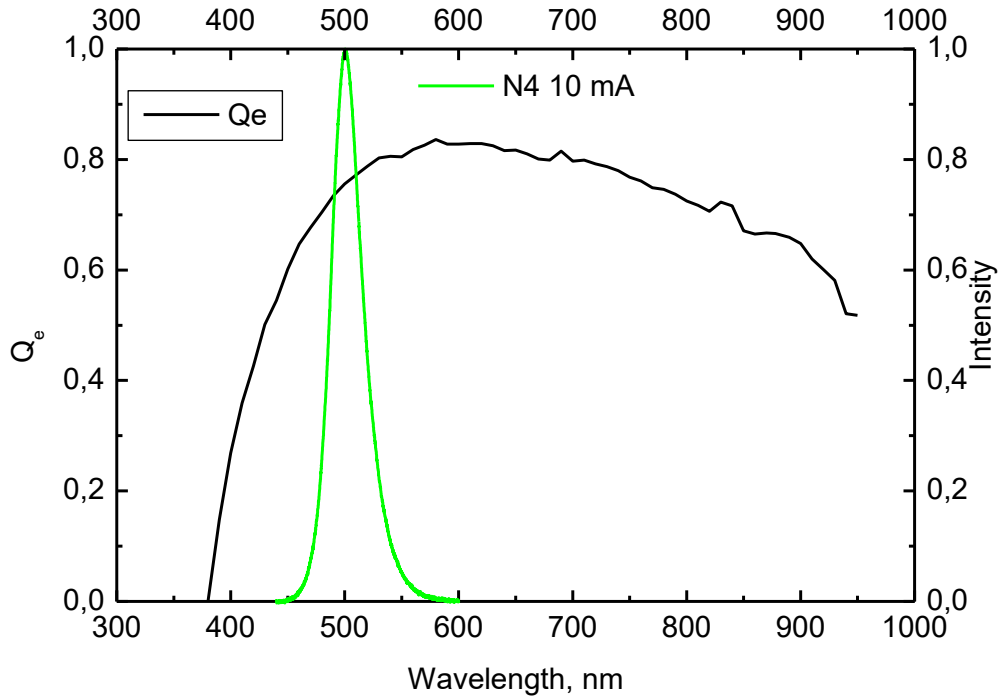


Рис. 16. Спектральная чувствительность Si- фотоэлемента в сравнении со спектром излучения зеленого светодиода на основе InGaN/GaN; шкала слева - $Q_e(\lambda)$ [электронов/фотон], шкала справа – интенсивность излучения, в относительных единицах.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ

3.1. Включение установки на первом светодиоде – красном, на основе гетеропереходов GaAs/AlGaAs. Запись первого спектра.

ВКЛЮЧЕНИЕ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДИОДА И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Подключить фишку с красным светодиодом (AlGaAs) к кабелю питания. Проверить, что кабель подключен к источнику постоянного и импульсного тока. Установить фишку в юстировочную камеру, проверив, что паз фишки соответствует шпильке камеры; закрепить фишку винтом.

Установить тумблер на схеме источника питания в положение постоянного тока (=). Включить источник питания диода, установить на левом приборе напряжение 10 В. Проверить, что миллиамперметр подключен к клеммам последовательно с клеммами кабеля питания светодиода. Проверить, что потенциометры регулировки тока находятся в крайнем положении против часовой стрелки. Постепенно вводить по часовой стрелке сначала левый, потом последующие потенциометры, следя по миллиамперметру (шкала "15 мА") за увеличением I .

Установить ток в пределах $I = 12 - 15$ мА. Проверить, что диод светится.

Мультиметром MXD-4660А измерить напряжение на светодиоде V с точностью до 1мВ; для этого измерить напряжение на обеих клеммах, к которым подключен кабель диода, и найти разность этих значений. Записать I и V .

ЮСТИРОВКА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ВКЛЮЧЕНИЕ МОНОХРОМАТОРА И ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ФЭУ.

Отъюстировать камеру регулировочными винтами и сфокусировать излучение светодиода на входную щель спектрометра. Установить входную и выходную щели спектрометра равными 0.1-0.2 мм.

Проверить, что зубчатая передача вращения от мотора к барабану монохроматора освобождена. Установить вручную барабан монохроматора на длины волн вблизи красной области.

Переключить тумблер питания светодиода в импульсное положение (| |). Проверить подключение кабеля от выхода ФЭУ к входу осциллографа и включить его в режим осциллографа.

Включить переключателем сети высоковольтный выпрямитель питания фотоумножителя. Выждать около минуты, пока прогреются лампы. Включить тумблер питания высокого напряжения. Установить регулятором слева напряжение по левому прибору около 1100-1250 В.

Вращая в обе стороны барабан монохроматора, наблюдать за сигналом на экране осциллографа, шкалу по оси u установить в положении 0.5-1.0 В/дел. Увидев импульсный сигнал, установить барабан в положение, соответствующее максимуму сигнала. Если он велик, уменьшить ширину щелей так, чтобы амплитуда сигналов на осциллографе была порядка 2.0÷4.0 В. Вновь отъюстировать камеру регулировочными винтами по максимуму сигнала на осциллографе. По форме сигнала (экспоненциальные фронты подъема и спада) убедиться в линейном режиме работы ФЭУ.

ВКЛЮЧЕНИЕ КОМПЬЮТЕРА

Включить черный тумблер на системном блоке компьютера. Проверить на экране монитора дату и время. Убедиться в правильности их записи. Ознакомиться с «Рабочим столом» на экране компьютера.

Запустить программу "N10" на Рабочем столе компьютера, ознакомиться с рабочим окном программы.

Порядок работы с программой:

Заполнить все информационные поля с условиями эксперимента, которые потом будут записаны в отчет:

Operator(s) - Оператор(ы), проводящий измерения

Sample – Измеряемый образец (AlGaAs или InGaN и т.д.)


Conditions – Условия измерений:

на постоянном токе ("const") или в импульсном режиме ("pulse")

Voltage – напряжение (V, с точностью до 1 mV), подаваемое на исследуемый образец

Current – Ток через образец (mA)

Split – Ширину входной и выходной щелей

- Установить минимальное (**MinWL**) и максимальное (**MaxWL**) значения длин волн (нм), меньше и больше которых, соответственно, APPA-207 измеряет лишь шумовой сигнал
- Установить барабан спектрометра на 2-3 деления меньше, чем минимальная длина волны. Включить зубчатую передачу в положение 1 (передвинуть шестеренку в ближайшее к себе положение).
- Нажать кнопку запуска программы (большая белая стрелка) **на верхней панели программы** – 

программы – 

- После этого появится окно для выбора места сохранения измерений (создать папку с Вашей фамилией в папке "Студенты" на Рабочем столе и сохранить там)
- Включить мотор редуктора и нажать **Start**, когда указатель барабана совпадет с минимальным значением длины волны
- Наблюдать за записью спектра; следить за временем до ее окончания
- **Выключить мотор вращения барабана монохроматора и вывести из зацепления зубчатую передачу!**
- Открыть записанный файл (с помощью Блокнота или Текстового документа), проверить правильность указанных параметров и т.д.
- Кнопкой "**Stop**" можно остановить запись спектра, файл с измерениями все равно будет сохранён и содержать измерения до остановки эксперимента.

ВАЖНО! 1) Если выбрать щели так, что максимум сигнала будет больше 4 В, то спектр может "потерять" точки около 4 В. Это связано со временем, которое требуется APPA-207 для перехода на следующую шкалу. 2) Иногда могут появляться точки, которые выпадают из спектра, их не следует принимать во внимание.

Далее записанный спектр, как и все последующие, нужно будет математически обработать, например, с помощью пакета программ "Origin". Рекомендуется иметь с собой флешку, вставив которую в фишку сзади системного блока, скопировать файлы спектров для домашней обработки.

Переключить тумблер питания светодиода в положение постоянного тока, измерить по миллиамперметру значение J. Мультиметром MXD-4660A вновь измерить напряжение на диоде V. Записать значения тока и напряжения J и V, при которых был измерен спектр. Проверить, что они соответствуют начальным значениям.

3.2. Спектр инфракрасного светодиода – на основе GaAs – прямозонного полупроводника.

Освободить винт крепления держателя светодиода в юстировочной камере, вынуть фишку с красным светодиодом (AlGaAs). Подключить фишку с инфракрасным светодиодом (GaAs) к кабелю питания. Вставить фишку в юстировочную камеру и закрепить ее винтом. Поскольку инфракрасное излучение зрительно не регистрируется, настройку и юстировку установки следует проводить только по показаниям приборов.

Убедиться, по показаниям миллиамперметра, что ток идет. Установить ток в пределах 10-15 мА. Измерить напряжение на диоде мультиметром MXD-4660A, записать значения J , V . Обратит внимание на то, как изменилось напряжение по сравнению с предыдущим светодиодом. Переключить положение тумблера питания в положение импульсного тока.

Расширить обе щели спектрометра до 1 мм. Освободить зубчатую передачу монохроматора. Установить барабан монохроматора в положение, близкое к максимуму инфракрасного излучения диода (около 900 нм). Вращая барабан монохроматора в обе стороны, найти положение спектрального максимума. Отрегулировать щели так, чтобы сигнал был в пределах 2-4 В. Отъюстировать винтами положение камеры со светодиодом, так чтобы сигнал был максимален. Отрегулировать щели, сделав их равными, так, чтобы сигнал в максимуме был в пределах около 2-4 В. Записать значения щелей (обратить внимание на то, как они отличаются от положения щелей при записи предыдущего спектра). Закрывать экраном входную щель монохроматора и проверить положение нулевого сигнала. Открыть входную щель монохроматора.

Вручную вращать барабан монохроматора в сторону коротких волн, пока сигнал не будет соответствовать темновому току. Записать нижний предел спектра для этого диода. Вращать барабан монохроматора в сторону длинных волн, пока сигнал не будет соответствовать темновому току. Записать верхний предел спектра для этого диода. Вернуть барабан монохроматора в сторону коротких волн и установить его на несколько малых делений меньше нижнего предела спектра. Включить зубчатую передачу в положение скорости 1.

Заполнить все информационные поля на мониторе компьютера с условиями эксперимента для диода из GaAs, которые потом будут записаны в отчет.

Записать спектр инфракрасного светодиода, повторив все операции, описанные в предыдущем параграфе. Сохранить файл в ту же папку с Вашей фамилией в папке “Студенты”.

После окончания измерения открыть этот файл и убедиться, что он правильно записан.

Переключить тумблер питания светодиода в положение постоянного тока, измерить по миллиамперметру значение J . Мультиметром MXD-4660A вновь измерить напряжение на диоде V . Записать значения тока и напряжения J и V , при которых был измерен спектр. Проверить, что они соответствуют начальным значениям.

3.3. Спектр желто-зеленого светодиода – на основе p-n- перехода в GaP – непрямоном полупроводнике.

Установить светодиод на основе GaP в юстировочной камере, повторив все операции, описанные в предыдущем пункте. Излучение этого светодиода можно юстировать на входную щель визуально. При регулировке заметить, что значения щелей монохроматора нужно сделать больше, чем для двух предыдущих светодиодов (почему?).

Записать значения постоянного тока $J = 10-15$ мА и напряжения V , обратить внимание на отличие V от значений напряжения для предыдущих светодиодов.

Переключить положение тумблера питания в положение импульсного тока. Записать спектр диода, повторив все операции, описанные в предыдущем параграфе.

3.4. Спектр желтого светодиода – на основе p-n- гетероструктур с квантовыми ямами типа AlInGaP/GaP (прямозонные твердые растворы AlInGaP на прозрачной подложке из GaP).

Установить светодиод на основе AlInGaP/GaP в юстировочной камере, повторив все операции, описанные в предыдущем пункте. Излучение этого диода можно юстировать на входную щель визуально.

Записать значения постоянного тока – 12-15 мА и напряжения, обратить внимание на отличие напряжения от значений напряжения для предыдущих светодиодов. **Переключить положение тумблера питания в положение импульсного тока.** При регулировке установки заметить, что щели монохроматора меньше, чем для предыдущих светодиодов. Записать спектр диода, повторив все операции, описанные в предыдущем параграфе.

3.5. Спектр голубого светодиода – на основе p-n- гетероструктур с квантовыми ямами типа InGaN/AlGaN/GaN – прямозонных структур (на прозрачной сапфировой подложке).

Установить светодиод (InGaN) в юстировочной камере, повторив все операции, описанные в предыдущем пункте. Излучение этого диода можно юстировать на входную щель визуально.

Записать значения постоянного тока J – 10-15 мА и напряжения V , обратить внимание на отличие напряжения от значений для предыдущих светодиодов.

Переключить положение тумблера питания в положение импульсного тока. При регулировке установки заметить значения щелей монохроматора. Записать спектр диода, повторив операции, описанные выше.

После проведения спектральных измерений выключить тумблер высокого напряжения и выключатель сети на высоковольтном выпрямителе ВС-23.

Определить температуру в комнате (по термометру на 8-й задаче), записать ее значение (°C и K). Ее значение необходимо для теоретической обработки результатов.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНОСТИ И ВНЕШНЕГО КВАНТОВОГО ВЫХОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

3.6. Измерения выполняются на светодиодах AlGaAs и GaAs, для которых известны спектры излучения из предыдущих упражнений. Перед началом работы проверить подключение амперметра и вольтметра постоянного тока, подключение микроамперметра для измерения тока короткого замыкания кремниевого фотоэлемента. Спектральная чувствительность Si фотоэлемента приведена на рис. 16.

Исследуемый светодиод должен быть вставлен в камеру с Si фотоэлементом приблизительно в ее центре; кабель от блока генератора и переключателей подключить к светодиоду; тумблер рода работ на этом блоке перевести в положение постоянного тока «|».

Проверить, чтобы ручки регулировки постоянного тока на блоке генератора были выведены влево. Установить переключатель шкал миллиамперметра в положение "15 мА". Установить ток через светодиод в пределах 10-15 мА. Проверить показания микроамперметра на шкале 150 мкА; убедиться, что он показывает ток от Si фотоэлемента. Подобрать положение светодиода в камере фотоэлемента так, чтобы ток от фотоэлемента был максимален. Закрепить светодиод в этом положении винтом.

Уменьшить ток через светодиод до такого значения, чтобы ток от Si фотоэлемента был около 1-2 мкА. Начиная от этого значения, измерить зависимость тока фотоэлемента от тока и напряжения на светодиоде. Напряжение измерять, переключив осциллограф в режим цифрового вольтметра и проверив подключение кабеля с пробником для измерений напряжения на диоде. Измерять напряжение V с точностью $\delta V = 1$ мВ (по разности напряжений на обоих контактах). Медленно вращая ручку регулировки тока на блоке генератора, наблюдать по миллиамперметру за изменением тока через светодиод и увеличением тока через фотоэлемент по микроамперметру. Измерять и записывать одновременно ток фотоэлемента J_{ph} , пропорциональный интенсивности излучения, и напряжение на диоде V при изменении тока через светодиод J . Следить за тем, чтобы шаг по напряжению был не более 10 мВ. В области малых J (до ≈ 5 мА) обратить внимание на изменение степенной зависимости интенсивности (тока J_{ph}) от тока J к линейной зависимости. Увеличивать ток до 30 мА (переключив шкалу миллиамперметра на "60 мА"), при увеличении J_{ph} выше 150 мкА изменить шкалу микроамперметра ("0.6 мА"). Составить таблицу измерений J , V , J_{ph} для светодиодов из GaAlAs и GaAs.

Вставить светодиод из GaP в камеру с Si фотоэлементом. Измерить напряжение V и ток микроамперметра J_{ph} при токе через светодиод $J = 30$ мА.

IV. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

1. Обработка и анализ экспериментальных данных должна быть сделана с помощью одного из пакетов математических программ, с которыми знаком и умеет работать студент.
2. В качестве примера приведен порядок работы с пакетом программ "Origin", записанным в отдельной директории в памяти компьютера. Ознакомьтесь с этим пакетом. Перевести измеренный спектр диода в Таблицу программы "Origin" (командой "Import"), добавляя нужные столбцы (λ , $\hbar\omega$, $I_e(\lambda)$) в эту Таблицу. Заметим, что:

$$\hbar\omega [\text{эВ}] = hc/\lambda [\text{нм}] = 1239.8/\lambda [\text{нм}].$$

3. Скопировать столбец $I_e(\lambda)$ в новый столбец. Вычесть, по правилам изменения столбцов по программе "Origin", значение сигнала, соответствующего фоновому сигналу: $I_e(\lambda) \rightarrow I_e(\lambda) - I_{e0}(\lambda)$. Нормировать спектр, по правилам изменения столбцов по программе "Origin", на значение интенсивности в максимуме:

$$I_{\text{norm}}(\lambda) = [I_e(\lambda) - I_{e0}(\lambda)]/[I_{\text{emax}}(\lambda_{\text{max}}) - I_{e0}(\lambda)].$$

4. Повторить операции нормировки для всех измеренных спектров. Построить все нормированные спектры светодиодов на одном графике $I_{\text{norm}}(\hbar\omega)$ по правилам построения графиков по программе "Origin", отложив по ординате нормированные значения интенсивности, а по оси абсцисс – $\hbar\omega$ (на параллельной верхней оси указать значения длин волн λ).
5. Зная дисперсию прибора ($D = 44 \text{ \AA}/\text{мм}$) и ширину щели (мм), указать на графиках спектральную ширину щели $\rightarrow||\leftarrow$. **На каждом спектре указать энергию в**

максимумах спектров $\hbar\omega_{\max}$ и точность ее определения, (с учетом точности отсчета начала спектра) $\hbar\omega_{\max} = a \pm \delta a$, длину волны λ_{\max} . Отметить ширину полос на половине интенсивности $\delta(\hbar\omega)_{1/2}$.

Для спектра каждого светодиода отметить стрелкой на оси абсцисс значение напряжения V (в единицах энергии eV).

5. Сравните ширину спектров на половине интенсивности $\delta(\hbar\omega)_{1/2}$ для разных светодиодов с теоретической оценкой (формула (1.8)).

Для каких СД ширина ближе к теоретической оценке? Для этих СД предположите, что спектры могут быть описаны формулой (5а) для прямых межзонных переходов. Постройте на графиках функции (5а), приняв значения E_g соответствующими формуле (7а) ($\hbar\omega_{\max} = E_g + kT/2$). Принять температуру диода равной измеренному значению комнатной температуры T). Воспользуйтесь командой программы «Origin»: “add function graf”.

6. В какой области спектров теоретическое описание и экспериментальные результаты согласуются между собой? В какой области они не согласуются? Сравните значения E_g , определенные для красного и желтого светодиодов с зависимостью E_g от состава твердых растворов на рисунках 3. Почему для создания светодиодов были выбраны соответствующие составы (параметры x)?

7. Для каких СД ширина спектров заметно больше теоретической оценки? Почему?

8. Сравните значения напряжений V (eV) со значениями максимумов $\hbar\omega_{\max}$. Почему они близки? Как отличаются разности (eV - $\hbar\omega_{\max}$) для разных светодиодов? С чем можно связать это различие?

9. Построить нормированные спектры светодиодов в полулогарифмическом масштабе на одном графике $\lg[I_{\text{norm}}(\hbar\omega)]$, отложив по ординате значения интенсивности в логарифмическом масштабе, а по оси абсцисс – $\hbar\omega$.

10. Соответствует ли спад интенсивности в коротковолновой области экспоненциальному закону $\sim \exp(-\hbar\omega/mkT)$? Определить в этом случае показатели экспонент для разных диодов. Для каких диодов знаменатель в показателе экспоненты близок к величине kT ($m \cong 1$) (формулы (5, 5а))? Для какого диода величина m в показателе экспоненты наибольшая? Почему?

11. Соответствует ли спад интенсивности в длинноволновой области формуле (5б), т. е. экспоненциальному закону $\sim \exp(+\hbar\omega/E_0)$? Определить в этом случае величину E_0 в показателях экспонент для разных диодов. Для каких диодов величина E_0 - меньшая, т.е. спектр падает более резко?

Результаты обработки и анализа спектров, кроме указанных графиков, представляются в виде таблицы, в которой надо указать известное значение ширины запрещенной зоны полупроводника при комнатной температуре:

ТАБЛИЦА

Полупроводник	Тип структуры	$\hbar\omega_{\max}$,	$\delta(\hbar\omega)_{1/2}$,	E_0 ,	$E_1 = mkT$,	E_g , эВ	E_g , эВ
		эВ	эВ	мэВ	мэВ	(эксп.)	(табл.)
GaAs	GaAs/AlGaAs (ДГС)	1.473	0.069	14.4	25.5	1.461	
AlGaAs	AlGaAs/AlGaAs (ДГС)	1.882	0.082	21.8	25.5	1.861	
AlInGaP	AlInGaP/GaP (МКЯ)	2.103	0.082	31.4	27	2.090	
GaP	GaP:N (p-n-)	2.161	0.124	73	29		
InGaN	InGaN/AlGaIn/GaN (МКЯ)	2.570	0.138	64.7	25.7		

ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНОСТИ И ВНЕШНЕГО КВАНТОВОГО ВЫХОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

1. Построить зависимость тока фотоэлемента J_{ph} от тока J для исследованных светодиодов в линейном масштабе. Отметить область соблюдения пропорциональности и более общего степенного закона (формулы (12, 18)).
2. Предположить, что коэффициент собирания света в камере с фотоэлементом $k = 0.5$; определить по графику на рис. 16. спектральную чувствительность фотоэлемента в максимуме спектра каждого светодиода $Q_e(\lambda_{\max})$. **Рассчитать по формулам (28, 28а) внешний квантовый выход излучения для каждого диода.**
3. Построить на одном графике зависимость логарифма тока и логарифма интенсивности излучения от напряжения. В какой области наблюдается экспоненциальная зависимость? **Определить показатель экспоненты; сравнить его с теоретической величиной (формула (17)).** Если в области больших токов наблюдается отклонение от экспоненты, ввести поправку на то, что измеряется полное падение напряжения V , а в формулу (17) входит напряжение на p-n- переходе $U = V - JR_s$.
4. Пользуясь формулами (28а), (22в), (23а) и спектральной чувствительностью кремниевого фотоэлемента (рис. 16), **вычислить из внешнего квантового выхода η_e коэффициент полезного действия η_r и мощность W излучения светодиодов в зависимости от тока.** Объяснить различие результатов для разных светодиодов.
5. Оценить световую отдачу светодиодов по формуле (24, 25), пользуясь графиком чувствительности человеческого глаза на рис. 11.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Экспериментальная установка для измерения спектров электролюминесценции была автоматизирована программой, написанной в LabVIEW 2012. Для написания программ использовался стандартизированный интерфейс ввода-вывода VISA (Virtual Instrument Software Architecture). В данной задаче компьютер считывает показания мультиметра APPA 207. На рисунках 1 и 2 приведены блок-схемы программы для автоматизации цифрового мультиметра APPA 207.

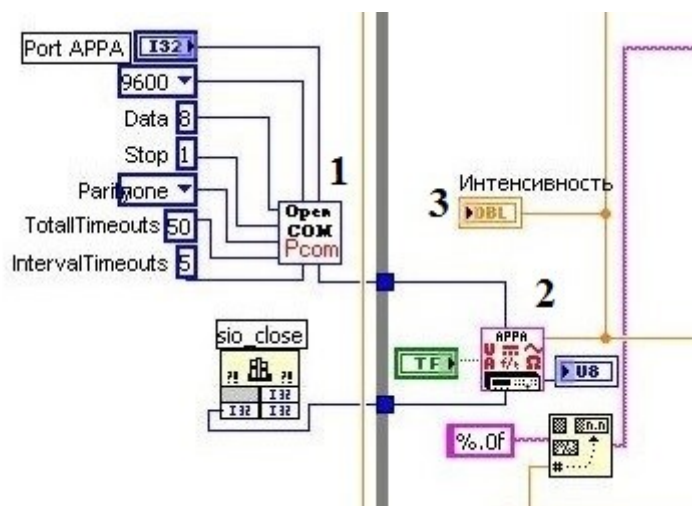


Рисунок 1. Блок-схема программы для снятия значения напряжения с прибора APPA 207.

Для программирования этого прибора требовалась его собственная библиотека, которая есть в свободном доступе в сети Интернет (http://mylab.wmsite.ru/moi-ivlechenija/labview/primery-raboty-s_). Через Open COM (1) задаются номер COM-порта и его параметры (скорость, стоп-бит, четность и т.д.), значения этих параметров должны быть указаны в инструкции к прибору. Далее используется подпрограмма Appa (2) для отправки команды прибору и считыванию показаний с него.

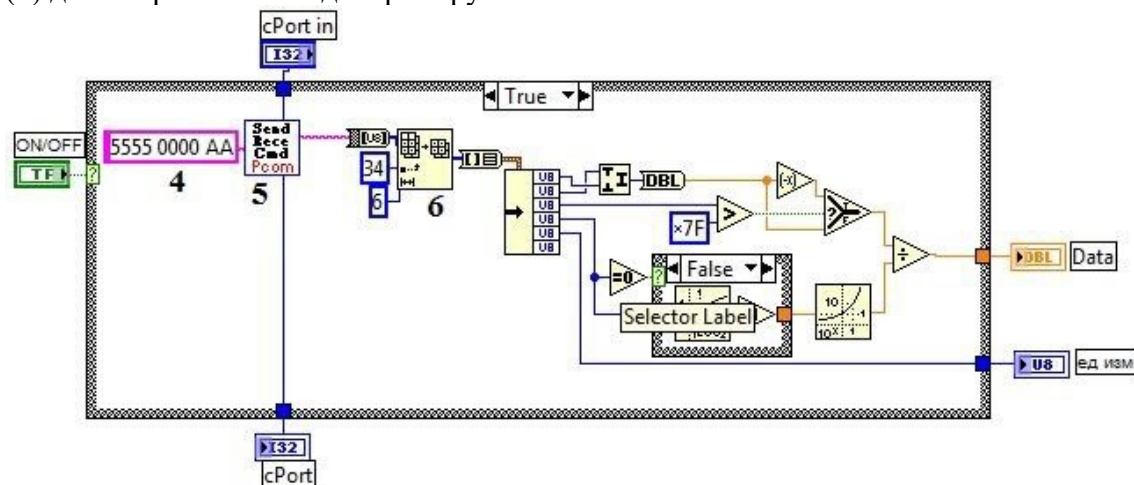


Рисунок 2. Блок-схема подпрограммы Appa (2) для считывания значения напряжения.

Данному прибору можно отправить одну единственную команду в формате данных ASCII – 5555 0000 AA, которая записывается в виде строковой постоянной (4). Для её отправки используется подпрограмма Send Cmd (5). После отправки команды прибор возвращает нам длинный массив, в который входит вся информация о приборе: начиная с того, включена ли подсветка на приборе, и заканчивая нужным нам численным значением величины напряжения (относительная интенсивность света). Для

получения этого значения используется алгоритм (6) для извлечения конкретного участка из этого длинного массива и его перевода в привычное для нас десятичное представление. На выходе (3) мы получаем значение напряжения и единицы измерения (В или мВ).

Так как мотор монохроматора крутится независимо и шкала, в соответствии с которой изменяется длина волны с течением времени, нелинейная, то зависимость изменения длины волны со временем на самой высокой скорости была аппроксимирована полиномом 5-й степени. Результаты показаны на рисунке 3.

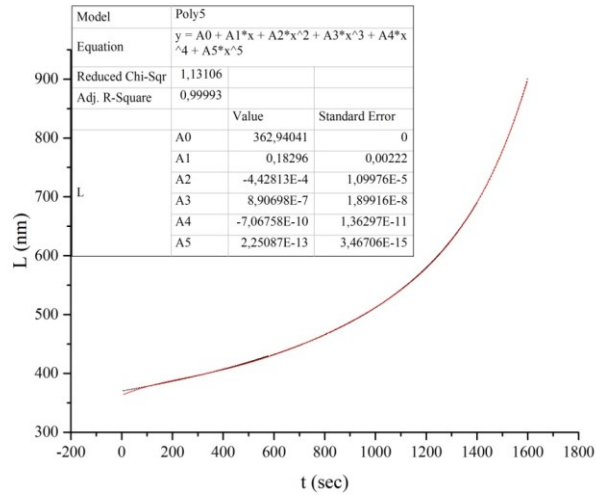


Рисунок 3. Зависимость длины волны от времени измерения.

На рисунке 4 представлена окончательная блок-схема программы. Цикл While Loop(7) работает в холостую, пока мы не нажмём кнопку Start для начала измерений. Элемент Open/Create/Replace File(8) создаёт файл, в который с помощью Write to Text File(9) в ходе измерений записываются шапка с параметрами эксперимента и сами измерения(10). Case Structure(11) используется для исключения нулевых измерений мультиметра, отображающихся в таблице на лицевой панели программы. XY Graph(12) и другие элементы рисуют график для визуального контроля измерений. Элементы (14) с формулами, показанными выше на рисунке 3, используются для согласования прошедшего с начала измерений времени с длиной волны, на которой измеряется сигнал.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Берг, П.Дин. Светодиоды. Перевод с англ. под ред. А.Э.Юновича, М., "Мир", 1979.
2. А.И.Лебедев, Физика полупроводниковых приборов. «Физматлит», 2005.
3. Ф.Е.Шуберт, Светодиоды. Перевод с англ. под ред. А.Э.Юновича, М., «Физматлит», 2008, 496 стр.
4. А.Э.Юнович. Двумерные структуры и сверхрешетки в полупроводниках. Учебное пособие. Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова. 2016 г., 184 стр.

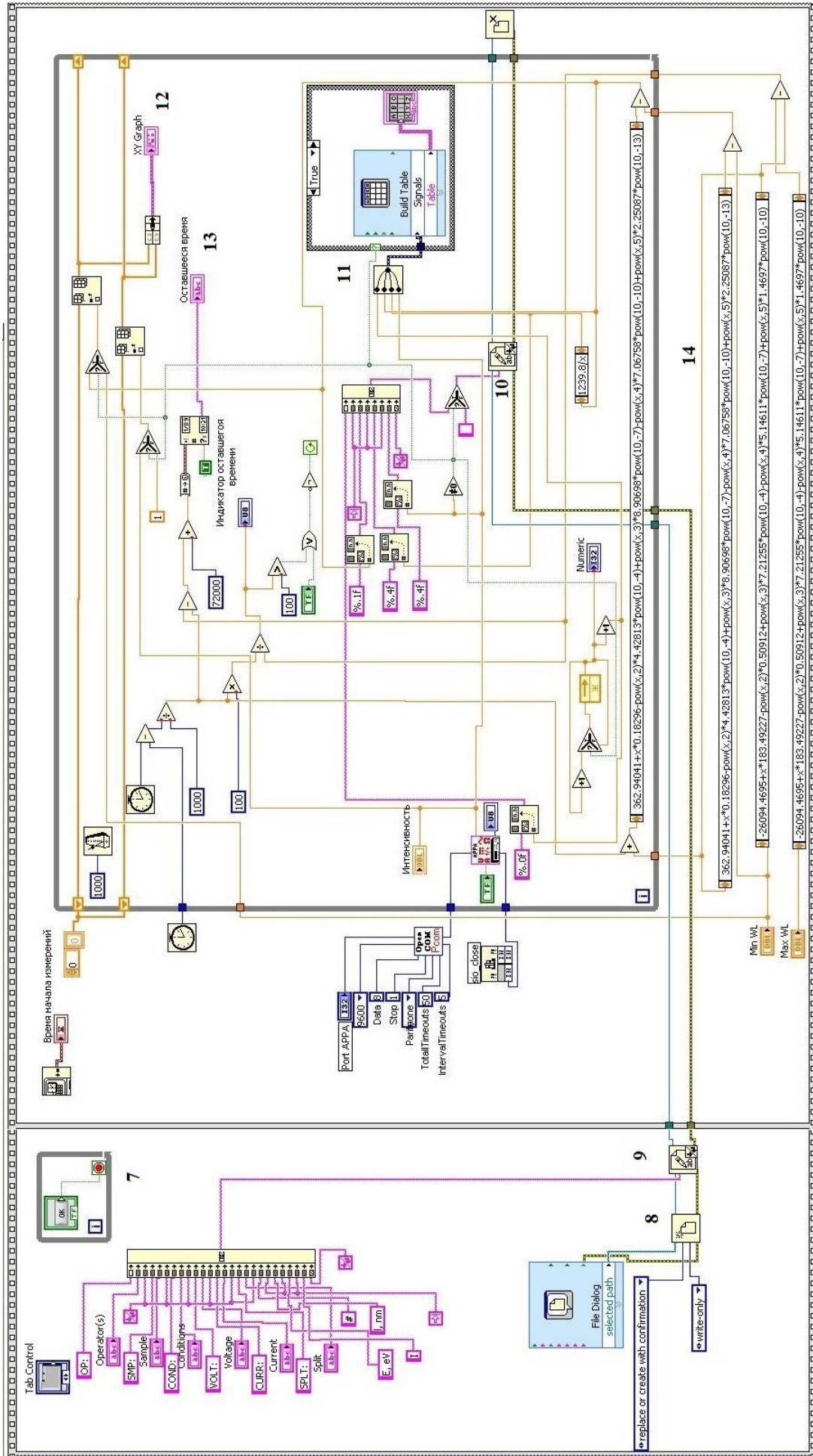


Рис. 4

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. а) Энергетическая диаграмма p-n- перехода при прямом смещении U , при котором инжектируемые носители тока могут рекомбинировать с излучением квантов света $\hbar\omega$; б) схема включения светодиода.

Рис. 2. Прямые (а) и непрямые (б) межзонные переходы в полупроводниках.

Рис. 3. Зависимость ширины запрещенной зоны для прямых (Г-Г)) и непрямых (Г-Х) межзонных переходов от состава твердого раствора (параметра x): а) $Al_xGa_{1-x}As$. б) $(Al_xGa_{1-x})_{0.52}In_{0.48}P$. (Изменение прямозонной структуры к непрямозонной).

Рис. 4. Различные механизмы излучательной рекомбинации в полупроводнике.

а) Межзонная рекомбинация электрон-дырка; б, в) рекомбинация с-зона - акцептор и донор - v-зона; г) межпримесная рекомбинация донор-акцептор; д) рекомбинация экситона, связанного на локальном изоэлектронном центре.

Рис. 5. Шкала электромагнитных волн и ширина запрещенной зоны различных полупроводников.

Рис. 6. Характерный вид спектров межзонного излучения прямозонного полупроводника, который описывается формулами (5-7); а) – в линейном масштабе, б) – в полулогарифмическом масштабе. Точки - экспериментально наблюдаемые спектры, с обычными отклонениями формы от теоретических кривых.

Рис. 7. Энергетические диаграммы а) двойной гетероструктуры типа $Al_xGa_{1-x}As - GaAs - n-Al_xGa_{1-x}As$ и б) p-n гетероструктуры $p-Al_xGa_{1-x}As - GaAs - n-Al_xGa_{1-x}As$ при прямом напряжении U на p-n- переходе.

Рис. 8. Энергетические диаграммы гетероструктур дна зоны проводимости для гетероструктур типа $AlInGaP/GaP$ с одиночными (а) и множественными (б) квантовыми ямами и в) типа $p-GaN - p-Al_yGa_{1-y}N - In_xGa_{1-x}N - n-GaN$ с множественными квантовыми ямами.

Рис. 9. Вид заготовки для светодиода ("чипа") в растровом электронном микроскопе с гетероструктурами типа $In_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N/GaN$. Размеры квадрата – 350×350 мкм², видны контакты к p- и к n- областям.

Рис. 10. Конструкция светодиода с пластиковой куполообразной линзой.

1, 2 - вводы (контактные ножки); 3) изоляция ввода; 4) корпус с основанием (теплоотводом); 5) подложка; 6) кристалл с p-n- структурой; 7) пластиковый купол.

Рис.11. Спектральная чувствительность человеческого глаза $V(\lambda)$ в сравнении со светоотдачей светодиодов из различных материалов и с светоотдачей других источников света.

Рис. 12. Схема экспериментальной установки.

Рис. 13. Оптическая схема монохроматора ЗМР-3:

1 - камера со светодиодом и линзой, 2- юстировочный винт, 3 - сферическое зеркало, 4 - призма, 5 - плоское зеркало Литтрова, 6 - барабан вращения зеркала, 7 - выходное зеркало, 8 - фокусирующая линза, 9 - фотоумножитель, 10 - ручка крепления и юстировка ФЭУ, 11 - мотор барабана.

Рис. 14. Принципиальная схема источника постоянного тока и генератора прямоугольных импульсов тока.

Рис. 15. Рабочий экран программы записи спектров «Final.exe».

Рис. 16. Спектральная чувствительность Si- фотоэлемента в сравнении со спектром излучения зеленого светодиода на основе $InGaN/GaN$; шкала слева - $Q_e(\lambda)$ [электронов/фотон], шкала справа – интенсивность излучения, в относительных единицах.