РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ ИМЕНИ ПАТРИСА ЛУМУМБЫ

ИНЖЕНЕРНАЯ АКАДЕМИЯ

Базовая кафедра нанотехнологий и микросистемной техники

Методические рекомендации по подготовке к заключительному этапу открытой универсиады федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» «RUDN-ON» в 2026 уч. г.

Предметное направление

«Нанотехнологии и микросистемная техника»

название предметного направления

Москва, 2026

1. Информация о предметном направлении:

Предметное направление «Нанотехнологии и микросистемная техника» включает в себя области разработки материалов, проектирования, диагностики и испытаний устройств фотоники, наноэлектроники, оптоэлектроники и микросистемной техники, разработки технологических процессов изготовления изделий нано- и оптоэлектроники.

2. Заключительный этап:

Заключительный этап универсиады проводится очно. Участники, допущенные к заключительному этапу по итогам отборочного тестирования, последовательно вытягивают по одному билету и занимают свободные места в аудитории.

Билет содержит три задачи, соответствующие предметному направлению:

- **задача 1** (25 баллов) – базовая задача на связь энергии фотона с длиной волны излучения и шириной запрещённой зоны полупроводника;
- **задача 2** (35 баллов) – задача средней сложности на расчёт концентрации носителей заряда и электропроводности примесного полупроводника;
- **задача 3** (40 баллов) – задача повышенной сложности по лазерной и оптоэлектронной технике, в которой рассчитывается несколько взаимосвязанных величин (энергия фотона, поток фотонов, КПД и квантовая эффективность полупроводникового лазера).

Все билеты и задачи с одним и тем же номером равноценны. Все необходимые для решения данные приводятся в условии задачи или в раздаточном материале.

Участнику выдаются бланк задания, бланк ответов (титульный лист и отдельный лист для решения каждой задачи) и раздаточный материал (раздел 7). Разрешается пользоваться инженерным калькулятором и раздаточным материалом.

Общая продолжительность испытания составляет 90 минут. Максимальное количество баллов за верное решение всех трёх задач – 100.

3. Критерии оценивания:

Каждая задача оценивается по трём критериям: **А – оформление условия**, **Б – ход решения**, **В – результат**. Баллы по критериям суммируются; максимальный балл за задачу ставится за верно записанное условие, ясный и проверяемый ход решения и верный результат.

Ход решения (Б) – основной критерий. Баллы по нему ставятся за исходные физические законы и формулы, записанные в общем (буквенном) виде, за последовательный вывод рабочей формулы и подстановку чисел с единицами измерения. Если ход решения верен, баллы по критерию Б сохраняются даже при ошибке в окончательном ответе.

Если участник выбрал верные формулы и последовательно вёл расчёт, но ошибся в переводе единиц измерения или в арифметике, за соответствующий результат ставится половина балла критерия В. Баллы по критериям А и Б не снижаются.

Ответ без решения (только число) оценивается не более чем баллами за результат, если в условии требовалось решение. Ответ считается верным, если он отличается от эталона не более чем на 10 % (погрешность округления) и указан в требуемых единицах.

Таблица 1. Распределение баллов по критериям

Критерий	Что оценивается	Задача 1	Задача 2	Задача 3
А. Оформление условия	«Дано»: все заданные величины с обозначениями и единицами, перевод в СИ (или в согласованные единицы), используемые константы; «Найти»: искомые величины	5	7	8
Б. Ход решения	исходные законы и формулы в общем (буквенном) виде; вывод рабочей формулы; подстановка чисел с единицами; логическая последовательность расчёта	12	18	20
В. Результат	верное числовое значение каждой искомой величины с единицами измерения (допуск ±3 %)	8	10	12
	Максимальный балл за задачу	**25**	**35**	**40**
	Итого за билет	**100**		

По критерию Б баллы ставятся с учётом полноты решения: верные формулы, вывод и подстановка – полный балл; формулы верны, но вывод неполон или пропущена подстановка – около двух третей балла; записаны отдельные верные формулы без связного решения – около трети балла; неверный физический подход – 0 баллов.

4. Требования к оформлению решения:

Решение каждой задачи записывается на отдельном листе бланка ответов по схеме «Дано – Найти – Решение – Ответ»:

- **Дано:** все величины из условия с буквенными обозначениями и единицами измерения, перевод в СИ (или в согласованные единицы), используемые константы из раздаточного материала;

- **Найти:** обозначения всех искомых величин;
- **Решение:** исходные физические законы и формулы в общем (буквенном) виде, вывод рабочей формулы, подстановка чисел с единицами, промежуточные результаты; пояснения к каждому шагу приветствуются;
- **Ответ:** числовые значения всех искомых величин с единицами измерения.

Ниже приведён пример оформления решения задачи 1 демонстрационного билета.

Пример оформления (демоверсия, задача 1)

Дано: $E_g = 1{,}74$ эВ $= 1{,}74 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Дж $= 2{,}787 \cdot 10^{-19}$ Дж; $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; $c = 2{,}998 \cdot 10^{8}$ м/с; $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Найти: $\lambda_{гр}$, $E_ф$ (Дж), область спектра.

Решение:

1) Энергия фотона связана с длиной волны соотношением

$$E_ф = h\nu = \frac{hc}{\lambda}.$$

2) Собственное (межзонное) поглощение возможно, если энергия фотона не меньше ширины запрещённой зоны: $h\nu \geq E_g$. Граничной длине волны соответствует равенство $E_ф = E_g$, откуда

$$\lambda_{гр} = \frac{hc}{E_g}.$$

3) Подстановка (ширина зоны переведена в джоули):

$$\lambda_{гр} = \frac{6{,}626 \cdot 10^{-34} \cdot 2{,}998 \cdot 10^{8}}{2{,}787 \cdot 10^{-19}} = 7{,}13 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 713 \text{ нм}.$$

Проверка по формуле-подсказке: λ[нм] $\approx 1240/E_g$[эВ] $= 1240/1{,}74 \approx 713$ нм.

4) Энергия фотона с длиной волны $\lambda_{гр}$ равна ширине запрещённой зоны: $E_ф = E_g = 2{,}79 \cdot 10^{-19}$ Дж.

5) Так как 380 нм $\leq \lambda_{гр} = 713$ нм ≤ 780 нм, излучение относится к области: видимая область.

Ответ: $\lambda_{гр} \approx 713$ нм; $E_ф \approx 2{,}79 \cdot 10^{-19}$ Дж; видимая область.

5. Список рекомендуемой литературы для подготовки:

1. Борейшо А. С., Ивакин С. В. Лазеры: устройство и действие: Учебное пособие, СПб.: Издательство «Лань», 2023, 304 с. (Учебники для вузов. Специальная литература)
2. Киселев Г. Л. Квантовая и оптическая электроника: Учебное пособие, изд. 3-е, СПб.: Издательство «Лань», 2021, 313 с. (Учебники для вузов. Специальная литература)

3. Борейшо А.С., Борейшо В.А., Евдокимов И.М., Ивакин С.В. Лазеры: применения и приложения: Учебное пособие, СПб.: Издательство «Лань», 2022, 520 с. (Учебники для вузов. Специальная литература)

4. Борейшо А.С., Страхов С.Ю. Системное проектирование лазерной и оптоэлектронной техники: учебное пособие // Вологда: Инфра–Инженерия, 2024. 204 с. (Учебники для вузов. Специальная литература)

5. Малюков С. П., Саенко А. В., Клунникова Ю. В, Палий А. В. Лазеры в микро- и наноэлектронике: Учебное пособие, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Южный федеральный университет, Инженерно-технологическая академия, Ростов-на-Дону; Таганрог: Южный федеральный университет, 2019, 113 с.

6. Воротынцев В.М., Скупов В.Д. Базовые технологии микро- и наноэлектроники: Учебное пособие, Москва: Издательство Проспект, 2023, 519 с.

7. Гуртов В.А., Беляев М.А., Бакшаева А.Г. Микромеханические системы: Учебное пособие, Петрозаводск: Издательство ПетрГу, 2016, 171 с.

8. Гуртов В.А. Твердотельная электроника: учебное пособие. – 3-е изд., доп. – М.: Техносфера, 2008. – 512 с.

6. Демоверсия билета заключительного этапа:

Билет (демонстрационный)

Задача 1 (25 баллов). Определите граничную длину волны собственного поглощения $\lambda_{гр}$ полупроводника – селенида кадмия CdSe, ширина запрещённой зоны которого при 300 К равна E_g = 1,74 эВ, и энергию фотона с этой длиной волны в джоулях. К какой области спектра (ультрафиолетовой, видимой или инфракрасной) относится $\lambda_{гр}$?

Задача 2 (35 баллов). Образец германия Ge легирован донорами с концентрацией $N_D = 1 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$ (все доноры ионизированы), T = 300 К. Собственная концентрация носителей $n_i = 2{,}4 \cdot 10^{13}$ см$^{-3}$, подвижность электронов μ_n = 3500 см^2/(В·с). Определите: а) концентрации электронов n и дырок p; б) удельную электропроводность σ (в См/см) и удельное сопротивление ρ (в Ом·см). Вкладом неосновных носителей в проводимость пренебречь.

Задача 3 (40 баллов). Полупроводниковый лазерный диод (лазерный модуль датчика положения) излучает на длине волны λ = 670 нм. При токе накачки I = 50 мА напряжение на диоде U = 2,2 В, выходная оптическая мощность излучения P = 5 мВт. Определите: а) энергию фотона (в Дж и эВ); б) число фотонов, излучаемых диодом за 1 с; в) коэффициент полезного действия диода; г) внешнюю квантовую эффективность диода – отношение числа излучённых фотонов к числу электронов, прошедших через диод за то же время.

7. Раздаточный материал:

На заключительном этапе каждому участнику выдаётся раздаточный материал объёмом одна страница (приведён на следующей странице). В нём собраны константы, необходимые для решения задач, их обозначения и связанные с ними формулы-подсказки, а также правила перевода единиц измерения.

Раздаточный материал для заключительного этапа

предметное направление «Нанотехнологии и микросистемная техника»

Величина	Обозначение и связь с другими величинами (подсказки)	Значение
Скорость света в вакууме	c; $\lambda = c/\nu$	$2{,}998\cdot10^{8}$ м/с
Постоянная Планка	h; энергия фотона $E_ф = h\nu = hc/\lambda$	$6{,}626\cdot10^{-34}$ Дж·с $4{,}136\cdot10^{-15}$ эВ·с
Произведение hc	hc; λ[нм] ≈ 1240 / E[эВ]; граничная длина волны $\lambda_{гр} = hc/E_g$	$1{,}986\cdot10^{-25}$ Дж·м 1240 эВ·нм
Элементарный заряд	e; 1 эВ = $1{,}602\cdot10^{-19}$ Дж; число электронов за 1 с $N_e = I/e$	$1{,}602\cdot10^{-19}$ Кл
Ширина запрещённой зоны (300 К)	E_g; собственное поглощение при $h\nu \geq E_g$	Si – 1,12 эВ Ge – 0,66 эВ GaAs – 1,42 эВ
Собственная концентрация носителей (300 К)	n_i; закон действующих масс $n\cdot p = n_i^2$; n-тип: $n \approx N_D$; p-тип: $p \approx N_A$	Si – $1{,}5\cdot10^{10}$ см$^{-3}$ Ge – $2{,}4\cdot10^{13}$ см$^{-3}$ GaAs – $2\cdot10^{6}$ см$^{-3}$
Удельная электропроводность и удельное сопротивление	$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p)$; $\rho = 1/\sigma$; μ_n, μ_p – подвижности (заданы в условии)	при n в см$^{-3}$ и μ в см^2/(В·с): [σ] = См/см, [ρ] = Ом·см
Электрическая мощность, КПД	$P_{эл} = IU$; $\eta = P_{опт}/P_{эл}$	–
Поток фотонов, квантовая эффективность	$N_ф = P/E_ф = P\lambda/(hc)$; $\eta_{вн} = N_ф/N_e = eP/(I\,E_ф)$	–
Области спектра	УФ: $\lambda < 380$ нм; видимая: 380–780 нм; ИК: $\lambda > 780$ нм	–
Десятичные приставки и перевод единиц	н = 10^{-9}; мк = 10^{-6}; м = 10^{-3}; к = 10^{3}; М = 10^{6}	1 см$^{-3}$ = 10^{6} м$^{-3}$ 1 см^2/(В·с) = 10^{-4} м^2/(В·с) 1 Ом·см = 10^{-2} Ом·м

Числовые данные, приведённые в условии задачи, имеют приоритет над табличными. Решение записывается по схеме: **Дано** (с переводом в СИ или согласованные единицы) – **Найти** – **Решение** (формулы в общем виде, вывод, подстановка) – **Ответ** (с единицами).