

**РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ ИМЕНИ
ПАТРИСА ЛУМУМБЫ
ИНЖЕНЕРНАЯ АКАДЕМИЯ**

Базовая кафедра нанотехнологии и микросистемная техника

**Методические рекомендации по подготовке к заключительному этапу
открытой универсиаде федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования «Российский университет
дружбы народов имени Патриса Лумумбы» «RUDN-ON»
в 2025/26 уч. г.**

**Предметное направление
«Нанотехнологии и микросистемная техника»**

название предметного направления

Москва, 2025

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.

Информация о заключительном этапе

Заключительный этап универсиады проходит очно.

Задание заключительного этапа включает экзаменационный билет с тремя задачами, соответствующими предметному направлению «Нанотехнологии и микросистемная техника».

Участники, допущенные к заключительному этапу, последовательно вытягивают по одному билету и занимают свободные места в аудитории.

Для выполнения задания участнику предоставляются чистые листы бумаги формата А4, авторучка, калькулятор и справочные материалы в виде таблиц.

Общая продолжительность испытания составляет 60 минут.

Максимальное количество баллов за верные ответы и правильное решение по всем терем задачам – 100:

- первая верно решенная задача оценивается в 25 баллов;
- вторая верно решенная задача оценивается в 35 баллов;
- третья верно решенная задача оценивается в 40 баллов.

Критериями оценивания являются: правильное оформление задачи (что дано, что требуется найти, перечень используемых дополнительных констант для решения), наличие формул для расчета, символьное обозначение всех используемых величин, сокращение/преобразование единиц измерений. Решение должно быть логически понятным, а ответ верным.

Нарушение данных рекомендаций может привести к снижению итогового балла даже при наличии верного ответа.

Участник может набрать 100 баллов по итогам заключительного этапа (финал).

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 нанoeлектронике: 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 нанoeлектроники: 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.

Демонстрация билетов заключительного этапа

Билет №1

Задача 1: Свет с длиной волны 250 нм падает на поверхность металла, в следствии чего возникают фотоэлектроны с максимальной скоростью равной $5,18 \cdot 10^5$ м/с. Определить работу выхода $A_{\text{вых}}$ фотоэлектронов для данного металла. Ответ дать в эВ. Необходимые постоянные: постоянная Планка в электронвольтах $h = 4,136 \cdot 10^{-15}$ эВ·с, скорость света $C = 3 \cdot 10^8$ м/с, масса электрона $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ кг, элементарный заряд $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Задача 2: Рассчитайте положение уровня Ферми E_f в запрещенной зоне кремния Si при температуре $T = 300$ К. Собственная концентрация $n_i = 1,5 \cdot 10^{10}$ см⁻³, концентрация доноров $n = 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³, постоянная Больцмана $k = 8,6 \cdot 10^{-5}$ эВ/К, $E_i = E_g/2$, ширина запрещенной зоны $E_g = 1,12$ эВ

Задача 3: Плотность пиковой мощности полупроводникового лазера составляет 3000 Вт/см². Излучающая площадка имеет размер 10х60 мм². Рассчитайте энергопотребление лазера, если частота следования импульсов 100 Гц, а КПД преобразования электрической энергии в излучение достигает 45%.

Билет №2

Задача 1: Термопара, состоящая из проводников A и B , образует контур с электросопротивлением 10 Ом. Коэффициенты термоЭДС проводников A и B равны $\alpha_A = 40$ мкВ/°С и $\alpha_B = 20$ мкВ/°С. Определить электрический ток в контуре, если температура одного спая термопары равна 100°С, а другого – 20°С.

Задача 2: Рассчитайте положение уровня Ферми E_f в запрещенной зоне германия Ge при температуре $T = 300$ К. Собственная концентрация $n_i = 2,4 \cdot 10^{13}$ см⁻³, концентрация дырок $p = 8 \cdot 10^{16}$ см⁻³, постоянная Больцмана $k = 8,6 \cdot 10^{-5}$ эВ/К, $E_i = E_g/2$, ширина запрещенной зоны $E_g = 0,72$ эВ

Задача 3: Определить величину смещения интерференционных полос в интерферометре, использованном Майкельсоном и Морли для измерения скорости вращения Земли.

Раздаточные материалы для использования во время прохождения финального этапа

Таблица. 1. Основные физические константы и фундаментальные физические постоянные

Постоянная величина	Обозначение или формула	Числовое значение
Скорость света в вакууме	c	$2,99792458 \cdot 10^8$ м/с
Постоянная Планка	h $\hbar = h/2\pi$	$6,62606876(52) \cdot 10^{-34}$ Дж·с $1,054571596(82) \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Больцмана	k	$1,3806503(24) \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Постоянная Авогадро	N_A	$6,02214199(47) \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Атомная единица массы	1 а.е.м	$1,66053873(13) \cdot 10^{-27}$ кг
Газовая постоянная	$R = kN_A$	$8,314472(15)$ Дж/(моль·К)
Объём моля идеального газа при нормальных условиях ($T_0 = 273,15$ К, $P_0 = 101325$ Па)	$V_0 = RT_0 / P_0$	$22,413996(39) \cdot 10^{-3}$ м ³ /моль
Число Лошмидта	$N_L = N_A / V_0$	$2,68677(5) \cdot 10^{19}$ см ⁻³
Гравитационная постоянная	G	$6,673(10) \cdot 10^{-11}$ Н · м ² /кг ²
Постоянная Фарадея	$F = N_A e$	$9,6485341(39) \cdot 10^4$ Кл/моль
Постоянная Стефана–Больцмана	$\sigma = \pi^2 k^4 / 60 \hbar^3 c^2$	$5,670400(40) \cdot 10^{-8}$ Вт/(м ² · К ⁴)
Постоянная Ридберга	$R_\infty = \mu_0^2 m_e c^3 e^4 / 8 \hbar^3$	$1,0973731568549(83) \cdot 10^7$ м ⁻¹
Постоянная тонкой структуры	$\alpha = \mu_0 c e^2 / 2 \hbar$ α^{-1}	$7,297352533(27) \cdot 10^{-3}$ 137,03599976(50)
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	$1,2566370614... \cdot 10^{-6}$ Гн/м

Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$	$8,854187817 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Радиус первой боровой орбиты для атома водорода	$a_0 = a/4\pi R_\infty$	$0,5291772083(19) \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Радиус электрона классический	$r_e = \mu_0 e^2 / 4\pi m_e$	$2,817940285(31) \cdot 10^{-15} \text{ м}$
Элементарный заряд (заряд электрона)	e	$1,602176462(63) \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ $4,8032042 \cdot 10^{-10} \text{ ед. СГСЭ}$
Удельный заряд электрона	e/m_e	$1,758820174(71) \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Масса электрона	m_e	$0,910938188(72) \cdot 10^{-30} \text{ кг}$
Масса протона	m_p	$1,67262158(13) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса нейтрона	m_n	$1,67492716(13) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Магнетон Бора	$\mu_B = e\hbar/(2m_e)$	$9,27400899(37) \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2$
Ядерный магнетон	$\mu_N = e\hbar/(2m_p)$	$5,05078317(20) \cdot 10^{-27} \text{ А} \cdot \text{м}^2$
Магнитный момент протона	μ_p	$1,410606633(58) \cdot 10^{-26} \text{ А} \cdot \text{м}^2$
Магнитный момент электрона	μ_e	$9,28476362(37) \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2$
Энергия покоя электрона	$m_e c^2$	$0,510998902(21) \text{ МэВ}$
Энергия покоя протона	$m_p c^2$	$938,271998(38) \text{ МэВ}$
Энергия покоя нейтрона	$m_n c^2$	$939,565330(38) \text{ МэВ}$

Таблица. 2. Длины волн распространенных лазеров

Активная среда		Спектральная область	Длина волны, нм
Фтор (Fluorine)	F ₂	экимерн. УФ	157
Фторид аргона (Argon Fluoride)	ArF	экимерн. УФ	193
Хлорид криптона (Krypton Chloride)	KrCl	экимерн. УФ	222
Фторид криптона (Krypton Fluoride)	KrF	экимерн. УФ	248
4-я гармоника Nd:YAG (Frequency Quadrupled Nd:YAG)		УФ	266
Хлорид ксенона (Xenon Chloride)	XeCl	экимерн. УФ	308
Фторид ксенона (Xenon Fluoride)	XeF	экимерн. УФ	351
Гелий-кадмий (Helium-Cadmium)	He-Cd	УФ	325
Азот (Nitrogen)	N ₂	УФ	337
3-я гармоника Nd:YAG (Frequency Tripled Nd:YAG)		ближн. УФ	355
Ионизир. пары кальция (Calcium Vapor Ion)		ближн. УФ	374
Нитрид галлия (Gallium Nitride)	GaN	фиолетов./ближн. УФ	400
Ионизир. пары стронция (Strontium Vapor Ion)		фиолетов.	431
Гелий-кадмий (Helium-Cadmium)	He-Cd	фиолетов.-синий	442
2-я гармоника Nd:YVO ₄ (Frequency Doubled Nd:YVO ₄)		синий	457

2-я гармоника Nd:YAG (Frequency Doubled Nd:YAG)		синий	473
Криптон (Krypton Ion)	Kr ⁺	синий	476
Аргон (Argon Ion)	Ar ⁺	зелен.-синий	488
Ксенон (Xenon)	Xe	зелен.-синий	499
Пары меди (Copper Vapor)	Cu	зелен.	510
Аргон (Argon Ion)	Ar ⁺	зелен.	514
Ксенон (Xenon)	Xe	зелен.	526
Криптон (Krypton Ion)	Kr ⁺	зелен.	528
2-я гармоника Nd:YVO ₄ (Frequency Doubled Nd:YVO ₄)		зелен.	532
2-я гармоника Nd:YAG (Frequency Doubled Nd:YAG)		зелен.	532
Ксенон (Xenon)	Xe	зелен.	541
Гелий-неон (Helium-Neon)	He-Ne	зелен.	543
Гелий-ртуть (Helium-Mercury)	He-Hg	зелен.	567
Криптон (Krypton Ion)	Kr ⁺	желт.-зелен.	568
Пары меди (Copper Vapor)	Cu	желт.	578
Гелий-неон (Helium-Neon)	He-Ne	желт.	594
Гелий-неон (Helium-Neon)	He-Ne	оранж.	612
Гелий-ртуть (Helium-Mercury)	He-Hg	красн.-оранж.	615
Пары золота (Gold Vapor)	Au	оранж.-красн.	627

Гелий-неон (Helium-Neon)	He-Ne	оранж.-красн.	633
Криптон (Krypton Ion)	Kr ⁺	красн.	647
Александрит (Alexandrite)		красн.-ближн. ИК	655-860
Галлий-алюминий арсенид (Gallium Aluminum Arsenide)	GaAlAs	красн.-ближн. ИК	670-830
Хром:сапфир (Chromium:Sapphire)	Рубин (Ruby), Cr:AlO ₃	красн.	694
Хром:LiCaF (Chromium:LiCaF)	Cr:CaF	ближн. ИК	760
Хром:LiSAF (Chromium:LiSAF)	Cr:LiSrAlF ₆	ближн. ИК	780-920
Арсенид галлия (Gallium Arsenide)		ближн. ИК	840
Хром:LiSGaF (Chromium:LiSGaF)	Cr:LiSGaF	ближн. ИК	840
Титан-сапфир (Titanium:Sapphire)	Ti:Sapphire	красн.-ближн. ИК	675-1100
Неодим:YVO (Neodymium:YVO ₄)	Nd:YVO ₄	ближн. ИК	914
Неодим:YAG (Neodymium:YAG)	Nd:YAG	ближн. ИК	946
Иттербий:КГВ (Ytterbium:KGW)	Yb:KGW	ближн. ИК	1025-1045
Иттербий:YAG (Ytterbium:YAG)	Yb:YAG	ближн. ИК	1031
Неодим:YLF (Neodymium:YLF)	Nd:YLF	ближн. ИК	1053
Неодимовое стекло (Neodymium:Glass)	Nd:Glass	ближн. ИК	1060
Хром, неодим:ГСГГ (Chromium,Neodymium:GSGG)		ближн. ИК	1061
Неодим:LSB (Neodymium:LSB)	Nd:LSB	ближн. ИК	1062

Неодим, хром:LSB (Neodymium,Chromium:LSB)	Nd,Cr:LSB	ближн. ИК	1062
Неодим:YAG (Neodymium:YAG)	Nd:YAG	ближн. ИК	1064
Неодим:YVO (Neodymium:YVO ₄)	Nd:YVO ₄	ближн. ИК	1064
Неодим:КГВ (Neodymium:KGW)	Nd:KGW	ближн. ИК	1067
Гелий-неон (Helium-Neon)	HeNe	ближн. ИК	1152
Неодим:YAG (Neodymium:YAG)	Nd:YAG	ближн. ИК	1330
Эрбиевое стекло (Erbium:Glass)		ближн. ИК	1540
Тулий:YAG (Thulium:YAG)	Tm:YAG	средн. ИК	2008-2018
Хром, тулий:YAG (Chromium,Thulium:YAG)	Cr,Tm:YAG	средн. ИК	2010
Тулий:LuAG (Thulium:LuAG)	Tm:LuAG	средн. ИК	2020-2030
Тулий, гольмий:YLF (Thulium,Holmium:YLF)	Tm,Ho:YLF	средн. ИК	2047-2059
Гольмий:YLF (Holmium:YLF)	Ho:YLF	средн. ИК	2060
Хром, тулий, гольмий:YAG (Chromium,Thulium,Holmium:YAG)	Cr,Tm,Ho:YAG	средн. ИК	2090
Гольмий:YAG (Holmium:YAG)	Ho:YAG	средн. ИК	2100
Фторид водорода (Hydrogen Fluoride)	HF	средн. ИК	2700
Эрбий:YAG (Erbium:YAG)	Er:YAG	средн. ИК	2940
Гелий-неон (Helium-Neon)	He-Ne	средн. ИК	3391
Фторид дейтерия (Deuterium Fluoride)	DF	средн. ИК	3600-4200

Углекислый газ (Carbon Dioxide)	CO2	дальн. ИК	9600
Углекислый газ (Carbon Dioxide)	CO2	дальн. ИК	10600

- УФ - ультрафиолетовая [область спектра](#); ИК - инфракрасная область спектра.
- Длины волн приведены округленно.
- KGW = калий-гадолиниевый вольфрамат, $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$.
- YAG = алюмо-иттриевый гранат.
- YLF = фторид иттрия-лития.

Таблица 3. Некоторые константы к расчёту концентрации электронов

	Ge	Si	GaAs	InSb
E_g , эВ	0,72	1,12	1,43	0,18
E_a , эВ	4,0	4,05	4,07	4,59
n_i , см^{-3}	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,5 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^{16}$
N_C , см^{-3}	$1,04 \cdot 10^{19}$	$2,8 \cdot 10^{19}$	$4,7 \cdot 10^{17}$	$4,2 \cdot 10^{16}$
N_V , см^{-3}	$6,1 \cdot 10^{18}$	$1,02 \cdot 10^{19}$	$7,0 \cdot 10^{17}$	$7,3 \cdot 10^{18}$
m_n	$0,22m$	$0,33m$	$0,072m$	
m_p	$0,31m$	$0,56m$	$0,5m$	
m – масса изолированного электрона, E_a – электронное сродство.				