

Инженерная академия

Базовая кафедра «Нанотехнологии и микросистемная техника»

Методические рекомендации

по подготовке к заключительному этапу

**по предметному направлению «Нанотехнологии и микросистемная
техника»**

**открытой универсиады федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования «Российский
университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» «RUDN-ON»
(Универсиады РУДН)**

в 2023/24 уч. г.

Москва, 2023

1. 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. 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.

Общая продолжительность испытания составляет 60 минут.

По истечении отведенного для испытания времени, участники обязаны сдать чистовой листы с решенными задачами. На чистовом листе должны быть указаны ФИО участника и номер экзаменационного билета.

Участник обязан сдать все исписанные листы, включая черновики. При этом данные на черновых листах, не учитываются при определении итогового балла.

Максимальное количество баллов за верные ответы и правильное решение по всем трем 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 дополнительных констант для решения), наличие формул для расчета, символьное обозначение всех используемых величин. Решение должно быть логически понятным, а ответ верным.

Критерии оценивания отдельных заданий представлены в таблице 1.

Таблица 1. Критерии оценивания результатов

Вид	Полнота	Полнота и	Правильность	Баллы за	Итоговый
-----	---------	-----------	--------------	----------	----------

испытания	заполнения исходных данных	логичность выполнения расчётов	полученного ответа	отдельное испытание	балл
Задача №1	5	10	10	25	100
Задача №2	5	20	10	35	
Задача №3	5	25	10	40	

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

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

На рабочем месте участника не должно быть никаких посторонних предметов, за исключением:

- бланки заданий, бланки ответов;
- бумага формата А4 для записей (использование других бумажных носителей, например, тетрадей/блокнотов и др., запрещено);
- калькулятор;
- ручка (с чернилами черного или синего цвета);
- вода в прозрачной ёмкости (бутылка без этикетки, стакан и т.п.), шоколад, печенье и т.п.;
- оригинал документа, удостоверяющего личность;
- необходимые лекарства без упаковки;
- справочные материалы в виде таблиц.

3. Список рекомендуемой литературы для подготовки

1. Борейшо А. С., Ивакин С. В. Лазеры: устройство и действие: Учебное пособие, СПб.: Издательство «Лань», 2021, 304 с. (Учебники для вузов. Специальная литература)
<https://e.lanbook.com/book/167409>
2. Киселе Г. Л. Квантовая и оптическая электроника: Учебное пособие, изд. 3-е, СПб.: Издательство «Лань», 2017, 313 с. (Учебники для вузов. Специальная литература)
<https://reader.lanbook.com/book/13018>
3. Борейшо А.С., Борейшо В.А., Евдокимов И.М., Ивакин С.В. Лазеры: применения и приложения: Учебное пособие, СПб.: Издательство «Лань», 2021, 520 с. (Учебники для вузов. Специальная литература) <https://e.lanbook.com/book/168977>
4. 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, 2018, 113 с.

<https://e.lanbook.com/book/125039>

5. Воротынцев В.М., Скупов В.Д. Базовые технологии микро- и нанoeлектроники: Учебное пособие, Москва: Издательство Проспект, 2019, 519 с.

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

4. Демоверсия заданий заключительного этапа по предметному направлению «Нанотехнологии и микросистемная техника»

Билета №1

Задача 1: Свет с длиной волны 250 нм падает на поверхность металла, вследствие 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 10x60 мм². Рассчитайте энергопотребление лазера, если частота следования импульсов 100 Гц, а КПД преобразования электрической энергии в излучение достигает 45%.

Раздаточные материалы для использования во время прохождения заключительного этапа

Таблица. 2. 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 <u>нормальных условиях</u> ($T_0 = 273,15$ 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	$\alpha = \mu_0 e^2 / 2 \hbar \alpha^{-1}$	$7,297352533(27) \cdot 10^{-3}$ 137,03599976(50)

Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	$1,2566370614... \cdot 10^{-6}$ Гн/м
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$	$8,854187817 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Радиус первой боровской орбиты для атома водорода	$a_0 = a/4\pi R_\infty$	$0,5291772083(19) \cdot 10^{-10}$ м
Радиус электрона классический	$r_e = \mu_0 e^2 / 4\pi m_e$	$2,817940285(31) \cdot 10^{-15}$ м
Элементарный заряд (заряд электрона)	e	$1,602176462(63) \cdot 10^{-19}$ Кл $4,8032042 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЭ
Удельный заряд электрона	e/m_e	$1,758820174(71) \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Масса электрона	m_e	$0,910938188(72) \cdot 10^{-30}$ кг
Масса протона	m_p	$1,67262158(13) \cdot 10^{-27}$ кг
Масса нейтрона	m_n	$1,67492716(13) \cdot 10^{-27}$ кг
Магнетон Бора	$\mu_B = e\hbar/(2m_e)$	$9,27400899(37) \cdot 10^{-24}$ А · м ²
Ядерный магнетон	$\mu_N = e\hbar/(2m_p)$	$5,05078317(20) \cdot 10^{-27}$ А · м ²
Магнитный момент протона	μ_p	$1,410606633(58) \cdot 10^{-26}$ А · м ²
Магнитный момент электрона	μ_e	$9,28476362(37) \cdot 10^{-24}$ А · м ²
Энергия покоя электрона	$m_e c^2$	$0,510998902(21)$ МэВ
Энергия покоя протона	$m_p c^2$	$938,271998(38)$ МэВ
Энергия покоя нейтрона	$m_n c^2$	$939,565330(38)$ МэВ

Таблица. 3. 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)	HeCd	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)	HeCd	фиолетов.-синий	442
2-я гармоника Nd:YVO ₄ (Frequency Doubled)		синий	457

Nd:YVO ₄)			
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)	HeNe	зелен.	543
Гелий-ртуть (Helium-Mercury)	HeHg	зелен.	567
Криптон (Krypton Ion)	Kr ⁺	желт.-зелен.	568
Пары меди (Copper Vapor)	Cu	желт.	578
Гелий-неон (Helium-Neon)	HeNe	желт.	594
Гелий-неон (Helium-Neon)	HeNe	оранж.	612

Гелий-ртуть (Helium-Mercury)	HeHg	красн.-оранж.	615
Пары золота (Gold Vapor)	Au	оранж.-красн.	627
Гелий-неон (Helium-Neon)	HeNe	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)	HeNe	средн. ИК	3391
Фторид дейтерия (Deuterium Fluoride)	DF	средн. ИК	3600-4200
Углекислый газ (Carbon Dioxide)	CO ₂	дальн. ИК	9600
Углекислый газ (Carbon Dioxide)	CO ₂	дальн. ИК	10600

- УФ - ультрафиолетовая [область спектра](#); ИК - инфракрасная область спектра.
- Длины волн приведены округленно.
- KGW = калий-гадолиниевый вольфрамат, K₂Gd(WO₄)₂.
- YAG = алюмо-иттриевый гранат.
- YLF = фторид иттрия-лития.

Таблица 4. 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	0,22 <i>m</i>	0,33 <i>m</i>	0,072 <i>m</i>	
m_p	0,31 <i>m</i>	0,56 <i>m</i>	0,5 <i>m</i>	
<i>m</i> – масса изолированного электрона, E_a – электронное сродство.				