

## Экзаменационный билет №3

1 Вопрос. Методы и технологии получения полупроводниковых гетероструктур.

Полупроводниковые гетероструктуры представляют собой системы, состоящие из 2х и более полупроводников с различной шириной запрещенной зоны  $E_g$ , электрическим составом  $X$  и концентрацией носителей заряда. В отличие от гомоструктур, в гетероструктурах на границе раздела материалов формируется гетеропереход, приводящий к скачкам энергетических зон и перераспределению носителей.

На рисунке 1 показана типичная гетероструктура  $AlGaAs/GaAs$ . Слои  $AlGaAs$  обладают большей шириной запрещенной зоны ( $E_g^{AlGaAs} > E_g^{GaAs}$ ) чем  $GaAs$ . На границе этих материалов образуется гетеропереход, в котором возникают скачки зон проводимости  $\Delta E_c$ , и валентной зоны  $\Delta E_v$ .

$$\Delta E_g = E_g^{AlGaAs} - E_g^{GaAs} = \Delta E_c + \Delta E_v$$

В результате электроны локализируются в слое  $GaAs$ , где их подвижность выше, что широко используется в высокочастотных и оптоэлектронных устройствах.

Физической основой работы гетероперехода является выравнивание уровней Ферми при контакте материалов:

$$E_{F1} = E_{F2}$$

Это приводит к изгибу энергетических зон и формированию потенциальной ямы. Для электронов в слое  $GaAs$  эта яма описывается условием квантования энергии:

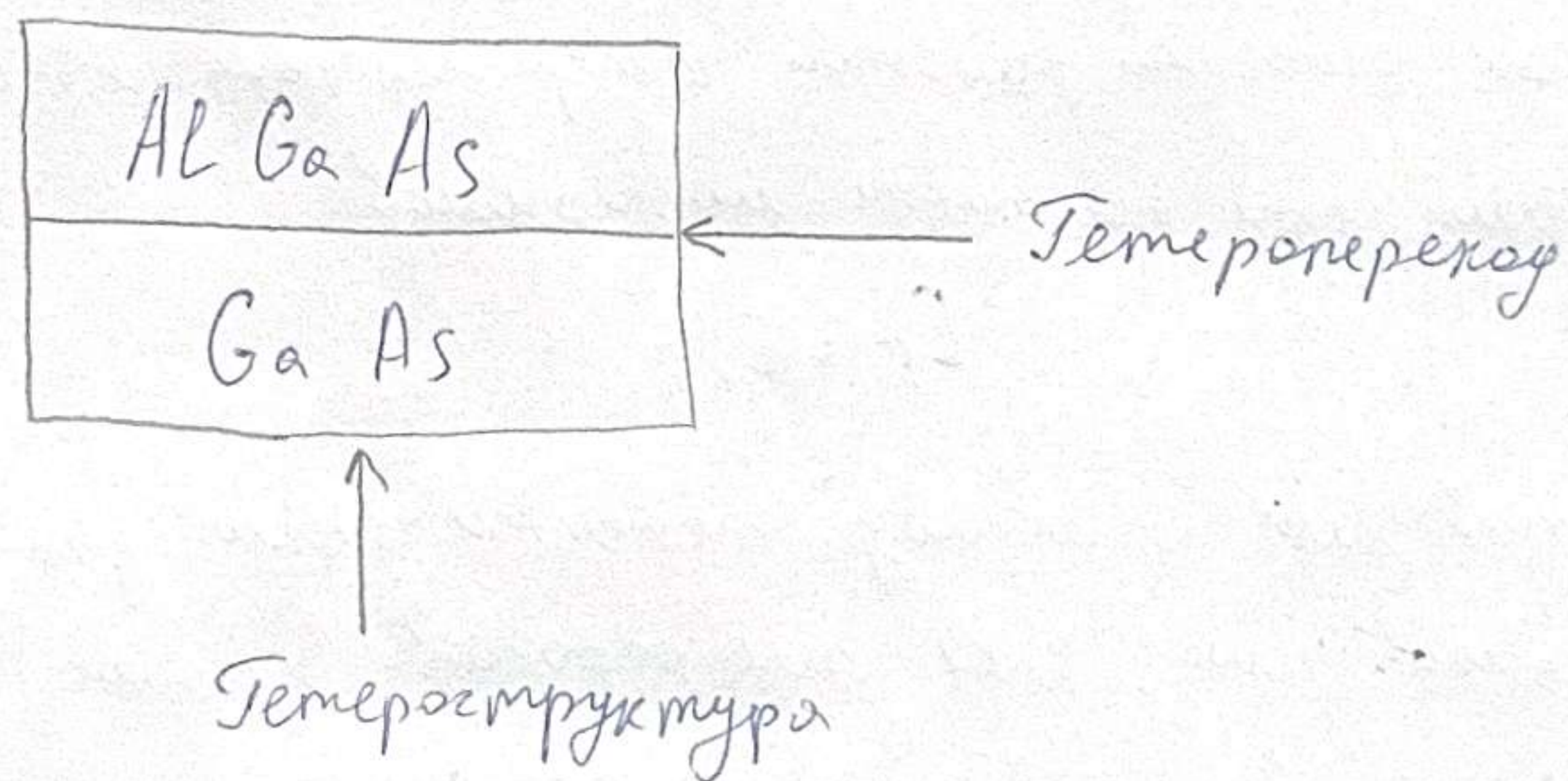
$$E_n = \frac{\hbar^2 n^2}{8m L^2}$$

где  $m$  - эффективная масса электрона;  
 $L$  - толщина квантовой ямы.

Основные методы получения полупроводников основаны на эпитаксиальном росте. Наиболее мощным является метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МВЕ), позволяющий концентрировать рост с точностью до одного атомного слоя. Скорость роста при этом составляет порядка:  $v \approx 1$  монослой в секунду. Метод широко применяется для формирования квантовых ям, сверхрешёток и гетероструктур с резкими границами.

Другим важным методом является металлоорганическая газофазная эпитаксия (МОСVD), при которой рост осуществляется за счёт разложения металлоорганических соединений. Этот метод отличается высокой производительностью и применяется в промышленности при изготовлении лазерных диодов и светодиодов.

Гетероструктура типа  $AlGaAs/GaAs$  благодаря наличию гетероперехода и зонной скачком позволяют эффективно управлять движением носителей заряда. Современное эпитаксиальное методы обеспечивают высокое качество гетерограницы, что делает такие структуры основой современной микро и оптоэлектроники.



2 Вопрос. В лазере, если уровни 1 и 2 разделены энергетически потенциалом, то энергия фотона, испускаемого при переходе с 2 уровня на 1 уровень, соответствует центру видимого спектра. Соотношение населенностей этих уровней в термодинамическом равновесии при комнатной температуре. Принцип работы лазера. Виды лазеров.

Принцип работы лазера основан на создании инверсной населенности, наличии активной среды и оптического резонатора, обеспечивающего положительную обратную связь. В зависимости от типа активной среды различают твердотельные, газовые, полупроводниковые и жидкостные лазеры.

В лазерах активная среда характеризуется наличием дискретных энергетических уровней  $E_1$  и  $E_2$ , разделенных энергетическим интервалом  $\Delta E = E_2 - E_1$ . При квантовом переходе электрона с верхнего уровня  $E_2$  на  $E_1$  испускается фотон с энергией:

$$h\nu = E_2 - E_1$$

где  $h$  - постоянная Планка, а  $\nu$  - частота излучения. Если данная энергия соответствует центру видимого спектра, то длина волны:

$$\lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1}$$

В условиях термодинамического равновесия при комнатной температуре распределение электронов по уровням подчиняется закону Больцмана. Соотношение населенностей поверхности верхнего и нижнего уровней:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right)$$

где  $k$  - постоянная Больцмана;  
 $T$  - абсолютная температура.

Для работы лазера необходимо создать инверсию населенности, при которой  $N_2 > N_1$ . Это состояние является неравновесным и достигается за счёт внешней накачки (оптической или электрической). При наличии инверсии вероятности вынужденного излучения превосходят вероятности поглощения, что приводит к усилению электромагнитной волны.

На рисунке 2 показаны основные механизмы квантовых переходов между электронными уровнями. На схеме (а) изображено спонтанное излучение: электрон самопроизвольно переходит с уровня  $E_2$  на  $E_1$ , испуская фотон с энергией  $h\nu = E_2 - E_1$ . Это излучение имеет случайное направление. Схема (б) соответствует поглощению, при котором электр. на уровне  $E_1$  поглощает фотон и переходит на уровень  $E_2$ . Схема (в) показывает вынужденное излучение: падающий фотон вызывает переход электрона с уровня  $E_2$  на уровень  $E_1$ , с испусканием второго фотона, идентичного первому по частоте, фазе и направлению.

Вероятности этих процессов описываются коэффициентами Эйнштейна  $A_{21}$ ,  $B_{12}$  и  $B_{21}$ . Условие лазерного усиления выполняется при преобладании вынужденного излучения:

$$B_{21}N_2 > B_{12}N_1$$

## Эк за менна цюмоной билет №3

3 Вопрос. Транзисторы на основе гетероструктур. Характеристика транзисторов в зависимости от материалов гетероструктур. Принцип работы биполярного гетероструктурного транзистора.

Транзисторы на основе гетероструктур используют преимущества гетеропереходов между различными полупроводниковыми материалами для улучшения электрических и частотных характеристик. За счёт разницы в ширине запрещённой зоны  $E_g$ , электронная скорость  $\chi$  и подвижность носителей достигаются более эффективное управление током по сравнению с гомоструктурными приборами.

Характеристики гетероструктурных транзисторов существенно зависят от материалов образования гетеропереходов. Скок зоны проводимости  $\Delta E_c = \chi_2 - \chi_1$  приводит к сформированию потенциальной ямы, в которой накапливаются электроны с высокой подвижностью  $\mu$ , что увеличивает ток и граничную частоту транзистора:

$$f_T \approx \frac{v_{SAT}}{2\pi L}$$

На рисунке 3 показан биполярный гетероструктурный транзистор (HBT) (HBT) и его зонная структура. Эмиттер выполнен из широкозонного полупроводника, база из узкозонного, а коллектор из материала с оптимальной проводимостью. Такое сочетание создает интень дорок из базы в эмиттер и повышает эр-сть электронной интень из эмиттера в базу.

Принцип биполярного транзистора основан на осилетри барьеров для электронов и дорок. Коэффициент усиления по току:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

и в гетероструктурном транзисторе он значительно больше, чем в гомоструктурном, за счёт подавления обратной инжекции дырок. Это достигается благодаря большому значению ширины запрещённой зоны эмиттера:

$$E_{gM} > E_{gB}$$

Кроме того, использование гетероструктур позволяет создавать более тонкую и сильно легированную базу без ухудшения качества, что снижает время пролёта носителей:

$$\tau = \frac{W_b^2}{2D_n}$$

« 11 » 14 2025 г.

Утверждено на заседании кафедры МНИИФ  
Протокол №4 от «14» 11 2025 г.

Дисциплина РНУ 3202 Полупроводниковые гетероструктуры и приборы на их основе  
«8D05301 Прикладная и инженерная физика»

Семестр: осень, 2025-2026 учебный год

### Экзаменационный билет № 3

1. Максимальное количество баллов 20. Приблизительное время на выполнение 50  
Методы и технологии получения полупроводниковых гетероструктур



Рисунок 1

2. Максимальное количество баллов 12. Приблизительное время на выполнение 40

В лазере, если уровни 1 и 2 разделены энергетическим интервалом  $E_2 - E_1$ , то энергия фотонов, испускаемых при переходе с 2 уровня на 1 уровень, соответствует центру видимого спектра. Соотношение населённости этих уровней в термодинамическом равновесии при комнатной температуре. Принцип работы лазера. Виды лазеров

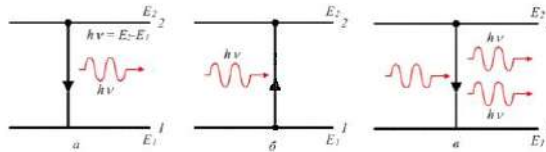


Рисунок 2 - механизмы квантовых переходов между электронными уровнями

3. Максимальное количество баллов 8. Приблизительное время на выполнение 30  
Транзисторы на основе гетероструктуры. Характеристики транзисторов в зависимости от материалов гетероструктуры. Физика работы биполярного гетероструктурного транзистора.

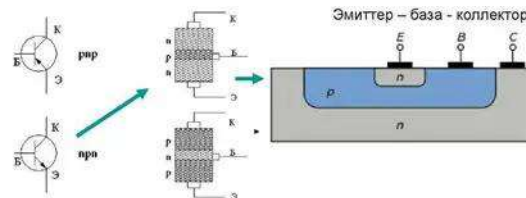


Рисунок 3

Критерий оценивания:

1. Точность ответа, аккуратность выполнения и изложения материала вес 40 %
2. Точность ответа, аккуратность выполнения и изложения материала вес 30 %
3. Точность ответа, аккуратность выполнения и изложения материала вес 30 %

Составил

Байтимбетова Б.А.

8D 05301 - Тримерная и шестимерная физика  
Дисциплина ДИУ-3202 Полупроводниковые  
гетероструктуры и приборы на их основе

Докторант 1 курса

Пискава Юлия Владимировна

Аккредитованный билет № 5

- 1) Полупроводниковые гетероструктуры: свойства и методы получения
- 3) Классификация транзисторов и принцип работы.

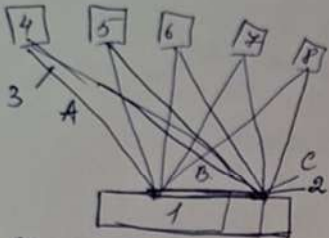
1. Полупроводниковые гетероструктуры: свойства и методы получения.

Полупроводниковые гетероструктурные материалы выражены на периодичности структура состоящая из слоев различных материалов. Это во время получения материала нужно найти переходную пару проводников. Они формируют более химическими анализами и еще для создания гетероструктур нужно выработать условия равенства поставленных решенски удобных полупроводников. невыполнением этих условий приводит к образованию высокой плотности дефектов, которые несоответствии влечет гетероэпитаксию. Это ухудшает свойства переходов.

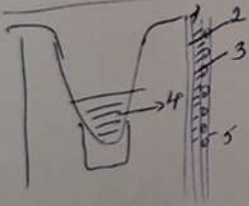
$\begin{matrix} \text{AlGaAs} \\ \text{GaAs} \end{matrix}$  - гетеропереход - они только искусственно созданны гетеропереход  $\text{AlGaAs}$  и  $\text{GaAs}$

потому что они хорошо обладают сонашем решеткам при легкой составе твердого раствора и поэтому позволяют создавать гетеропереход с различными разрывами зон на границе. Для создания гетероструктур и выращивания тонких пленок применяют методы молекулярно-лучевой эпитаксии, твердофазовой эпитаксии, газовой эпитаксии, молекулярно-лучевой эпитаксии, методом малочисленного легкого легирования.

Мембранно-лучевая типажная зрелая термическая  
 капиллярная в цифровых сверхмалых вакуумах.  
 Давление вакуумной камеры достаточно высокое,  
 и подтверждается ниже  $10^8$  Па.



- A - зона испарения пучков
- B - зона смешивания
- C - зона кристаллизации
- 1 - нагреватель
- 2, 3 - заливка
- 4-8 - электроды



- 1 - типеле
- 2 - зарядный нагреватель
- 3 - тепловое экран
- 4 - испаритель вещества
- 5 - верхнее охлаждение

Потоки атомов или молекул  
 образуются в зоне генерации  
 это у нас на рисунке А за счет  
 испарения твердых или  
 сублимирующих твердых материалов  
 в вакуумной камере, движимые  
 титаном. Линии излучения  
 вращаются из центра или борно-  
 готтирида (ВН).

Потоки испаренных веществ  
 направляются на подложку,  
 претерпевают процесс  
 и оседают на ней (с), образуя  
 пленку. Зону роста разделяют  
 на три области

- 1) подложка или выходящий слой
- 2) переходная зона
- 3) переходный слой.

МЛЗ.

2) Графит  
См

$$t = 25^\circ\text{C} =$$

$$P = 100 \text{ кПа} = 100 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

$$m = 100 \text{ г} = 0,1 \text{ кг}$$

$V_{\text{к}} = ?$

Вручную формула графита. СГС

$$M(\text{C}) = 12 \text{ г/моль}$$

$$n(\text{C}) = \frac{m}{M}$$

$$n(\text{C}) = \frac{100 \cdot 10^{-3}}{12 \text{ г/моль}} = 8,33 \cdot 10^{-3} \text{ моль}$$

по 1 моль C требуется 2C + H<sub>2</sub> → 2CH<sub>4</sub>  
0,5 моль H<sub>2</sub>, или 2 моль 1 моль H<sub>2</sub>

$$n(\text{H}_2) = \frac{1}{2} \cdot 8,33 \cdot 10^{-3} \text{ моль} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ моль}$$

$$V = \frac{nRT}{P}$$

$$V = \frac{4,17 \cdot 10^{-3} \text{ моль} \cdot 8,31 \cdot (25 + 273)}{100 \cdot 10^3 \text{ Па}} = \frac{10326 \cdot 10^{-6}}{100} = 103,26 \cdot 10^{-6}$$

$$V = 10,326 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 = 0,10326 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 0,1 \text{ л}$$

Ответ:  $V = 0,1 \text{ л}$

3. Классификация транзисторов и принцип работы.

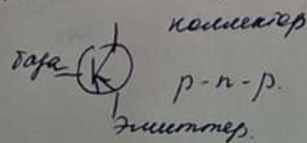
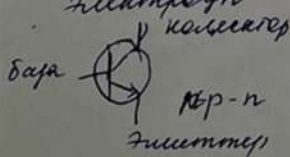
Транзисторы это полупроводниковый прибор, предназначен для усиления, переключения и управления электрическими сигналами и токами.

Транзисторы как показано на схеме делится на - биполярные и полевые

Биполярные транзисторы используют два типа несущий заряды, это электроны и дырки.

Типы: pnp или npn.

Электрон это эмиттер, база и коллектор



Они применяются в усилителях, в аналоговых схемах.

Последние транзисторы управляют током  
осуществляя электрическое поле. Они имеют

- 1) с р-п- затвором
- 2) с плавящимся затвором
- 3) с изолирующим затвором

Электроды истока, сток и затвор. Они присутствуют  
в цифровой логике, в микропроцессорах. А вот

В целом принцип работы транзистора, малый  
ток база управляет большим током коллектора  
 $I_c = \beta I_b$  - это усиление тока.  $\beta$  - коэффициент  
усиления.

Переход как на это симметрично. База включена  
в прямом направлении, переход база-коллектор  
в обратном.

А вот в полевом направлении на затворе  
управляет ток между истоком и стоком.  
Затвор создает электрическое поле, поле суживает  
ширину канала. Ток регулируется ду приложенного про-  
тяжения тока через затвор.

« 11 » 14 2025 г.

Утверждено на заседании кафедры МНиИФ  
Протокол №4 от «14» 11 2025 г.

Дисциплина РНУ 3202 Полупроводниковые гетероструктуры и приборы на их основе  
«8D05301 Прикладная и инженерная физика»

Семестр: осень, 2025-2026 учебный год

### Экзаменационный билет № 5

1. Максимальное количество баллов 20. Приблизительное время на выполнение 50  
Полупроводниковые гетероструктуры: свойства и методы получения

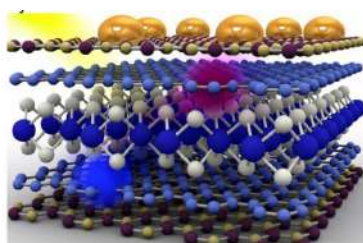


Рисунок 1. Гетероструктура из особым образом расположенных пленок нитрида бора, дисульфида молибдена и сульфида титана, заключенная между монослоями графена

2. Максимальное количество баллов 12. Приблизительное время на выполнение 40

Двумерный наноматериал графан представляет собой полностью гидрированную графитовую плоскость. Определите брутто-формулу графана. Чему равен объём водорода при 250С и 100кПа, который необходим для полного гидрирования 100 мг графена?.

Максимальное количество баллов 8. Приблизительное время на выполнение 30

3. Классификация транзисторов и принцип работы



Рисунок 2.

Критерий оценивания:

1. Точность ответа, аккуратность выполнения и изложения материала вес 40 %
2. Точность ответа, аккуратность выполнения и изложения материала вес 30 %
3. Точность ответа, аккуратность выполнения и изложения материала вес 30 %

Составил



Байтимбетова Б.А.