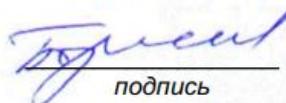


МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
физики полупроводников и микроэлектроники



(Бормонтов Е.Н.)
расшифровка подписи

31.08.2024

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
по учебной дисциплине

Б1.О.20 Физика полупроводников

Код и наименование направления подготовки/специальности: **11.03.04**

Электроника и наноэлектроника

Направленность (профиль) подготовки/специализация: _____

Интегральная электроника и наноэлектроника

Квалификация выпускника: бакалавр

Форма обучения: очная

Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины: _____

физики полупроводников и микроэлектроники

Составители рабочей программы дисциплины, в том числе фонда оценочных средств по учебной дисциплине: Бормонтов Евгений Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор

Учебный год
освоения дисциплины: 2026-2027

Семестр(ы): 6

Освоение данной дисциплины направлено на формирование следующих компетенций

| Компетенции | | Индикаторы | | Планируемые результаты обучения |
|-------------|---|------------|--|--|
| Код | Наименование компетенции | Код(ы) | Наименование индикатора(ов) | |
| ОПК-1 | Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности | ОПК-1.1 | Демонстрирует знания фундаментальных законов природы и основных физических и математических законов | <p><i>Знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - фундаментальные законы природы и основные физические математические законы; <p><i>Уметь:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - понимать главные проблемы и задачи современной физики полупроводников <p><i>Владеть:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> методами естественных наук и математики в приложении к решению задач физики полупроводников |
| | | ОПК-1.2 | Применяет физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера | <p><i>Знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - существующие теории различных физических явлений и процессов, происходящих в полупроводниковых структурах <p><i>Уметь:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - применять физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера |
| | | ОПК-1.3 | Использует положения, законы и методы естественных наук для решения инженерных задач в сфере профессиональной деятельности | <p><i>Знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - основные представления о физических идеях и принципах современной физики полупроводников <p><i>Уметь:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - использовать полученные теоретические знания и умения для решения конкретных инженерных и прикладных задач; |
| ОПК-2 | Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных | ОПК-2.4 | Выбирает способы и средства измерений для проведения экспериментальных исследований | <p><i>Знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - кинетические и контактные явления в твердых телах, фотоэлектрические и поверхностные явления; <p><i>Уметь:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - пользоваться основными формулами для оценок величин, характеризующих кинетические явления в полупроводниках и неравновесные носители заряда <p><i>Владеть:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - методиками измерений и методами расчетов параметров и характеристик приборов и устройств твердотельной электроники и микроэлектроники |

Перечень заданий для оценки уровня освоения дисциплины:

1. тестовые задания (выбор правильного(-ых) ответа(-ов) из предложенного перечня; задания на соответствие):

ЗАДАНИЕ 1.1. Зонной структуре полупроводника соответствует вариант:

| | | | |
|-------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|
| Валентная зона | Зона проводимости | Запрещенная зона | Запрещенная зона |
| Запрещенная зона | Запрещенная зона | Валентная зона | Зона проводимости |
| Зона проводимости | Валентная зона | Зона проводимости | Валентная зона |
| а) | б) | в) | г) |

ЗАДАНИЕ 1.2. Кремний (Si) является _____ полупроводником:

- а) непрямозонным;
- б) прямозонным;**
- в) длиннозонным;
- г) короткозонным.

ЗАДАНИЕ 1.3. Арсенид галлия (GaAs) является _____ полупроводником:

- а) непрямозонным;
- б) прямозонным;
- в) длиннозонным;**
- г) короткозонным.

ЗАДАНИЕ 1.4. Чтобы получить полупроводник *n*-типа в кремний Si (IV группа) необходимо ввести примесь:

- а) германий Ge (IV группа);
- б) фосфор P (V группы);**
- в) бор B (III группа);
- г) любую из вышеперечисленных.

ЗАДАНИЕ 1.5. Чему равно в идеальных структурах напряжение плоских зон ?

- а) в идеальных структурах напряжение плоских зон равно бесконечности;**
- б) в идеальных структурах напряжение плоских зон равно нулю;**
- в) в идеальных структурах напряжение плоских зон равно ширине запрещенной зоны полупроводника;

ЗАДАНИЕ 1.6. Чтобы получить полупроводник *p*-типа в кремний Si (IV группа) необходимо ввести примесь:

- а) германий Ge (IV группа);
- б) фосфор P (V группы);
- в) бор B (III группа);**
- г) любую из вышеперечисленных.

ЗАДАНИЕ 1.7. Уровень Ферми в собственном полупроводнике лежит:

- а) вблизи потолка валентной зоны;
- б) вблизи середины запрещенной зоны;**
- в) в валентной зоне;
- г) в зоне проводимости.

ЗАДАНИЕ 1.8. Уровень Ферми в полупроводнике *n*-типа лежит:

- а) **вблизи потолка валентной зоны;**
- б) вблизи середины запрещенной зоны;
- в) в валентной зоне;
- г) в зоне проводимости.

ЗАДАНИЕ 1.9. Уровень Ферми в полупроводнике *p*-типа лежит:

- а) вблизи потолка валентной зоны;
- б) вблизи середины запрещенной зоны;
- в) в валентной зоне;
- г) **вблизи дна зоны проводимости.**

ЗАДАНИЕ 1.10. В каком диапазоне варьируется ширина запрещенной зоны в полупроводниках?:

- а) **(0.1 – 3) эВ;**
- б) (5 – 10) эВ.

ЗАДАНИЕ 1.11. Какая примесь в кремнии и германии дает *p*-тип проводимости?

- а) **элементы III группы;**
- б) элементы V группы

ЗАДАНИЕ 1.12. Какая примесь в кремнии и германии дает *n*-тип проводимости?

- а) элементы III группы;
- б) **элементы V группы**

2. задания с коротким ответом (ответ на задание состоит из числа, слова или словосочетания):

ЗАДАНИЕ 2.1. Каково значение подвижности для электронов кремнии (в единицах $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$)?

Ответ: 1450

ЗАДАНИЕ 2.2. Чему равна ширина запрещенной зоны кремния при 300 К в эВ?

Ответ: 1,14

ЗАДАНИЕ 2.3. Каково значение подвижности для дырок кремнии (в единицах $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$)?

Ответ: 500

3. Расчетные, ситуационные, практико-ориентированные задачи / мини-кейсы (ответ содержит решение поставленной задачи):

ЗАДАНИЕ 3.1. Вычислить собственную концентрацию носителей заряда в Si при $T = 300$ К, если ширина запрещенной зоны $E_g = 1.12$ эВ, а эффективная масса носителей заряда $m_n/m_0 = 1.05$, $m_p/m_0 = 0.56$ (m_0 – масса свободного электрона).

Решение:

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

$$N_c = 2.5 \cdot 10^{19} \left(\frac{m_n}{m_0}\right)^{3/2} \left(\frac{T}{300}\right), \quad N_v = 2.5 \cdot 10^{19} \left(\frac{m_p}{m_0}\right)^{3/2} \left(\frac{T}{300}\right)$$

$$N_c = 2.69 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}, N_v = 1.05 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}, n_i = 6.45 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$$

ЗАДАНИЕ 3.2. Концентрация электронов в собственном полупроводнике при $T = 400 \text{ K}$ $n = 1.38 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Найти значение произведения эффективных масс электрона и дырки ($m_n m_p / m_0^2$), если известно, что ширина запрещенной зоны меняется по закону $E_g = \Delta - \xi T = 0.785 - 4 \cdot 10^{-4} T$.

Решение:

$$n = 2 \left(\sqrt{m_n m_p} \cdot k / 2\pi\hbar^2 \right)^{3/2} \exp(\xi/2k) \exp(-\Delta/2kT)$$

$$2 \left(\sqrt{m_n m_p} \cdot k / 2\pi\hbar^2 \right)^{3/2} \exp(\xi/2k) = n T^{-3/2} \exp(\Delta/2kT)$$

$$\frac{m_n m_p}{m_0^2} = \left(\frac{2\pi\hbar^2}{kT} \right)^2 \left(\frac{n}{2} \right)^{4/3} \frac{1}{m_0^2} \exp\left(\frac{2\Delta}{3kT} - \frac{2\xi}{3k} \right) = 0.21$$

ЗАДАНИЕ 3.3. При исследовании температурной зависимости носителей заряда для чистого Si в области собственной проводимости получены следующие результаты: $T_1 = 463 \text{ K}$, $n_{i1} = 10^{20} \text{ см}^{-3}$; $T_2 = 781 \text{ K}$, $n_{i1} = 10^{23} \text{ см}^{-3}$. Рассчитать ширину запрещенной зоны при $T = 300 \text{ K}$, если коэффициент ее температурного изменения $\xi = -2.84 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$.

Решение:

$$\frac{n_1}{n_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{\Delta}{2k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right)$$

$$\Delta = \frac{2kT_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \left(\frac{n_1 \sqrt{T_2^3}}{n_2 \sqrt{T_1^3}} \right), \quad E_g = \Delta - \xi T$$

$$E_g = 2.1 \text{ эВ}$$

ЗАДАНИЕ 3.4. Собственный кремний имеет удельное сопротивление $\rho = 2000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при $T = 300 \text{ K}$ и концентрации электронов проводимости $n_i = 1.4 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$. Определить удельное сопротивление образца, легированного акцепторной примесью с концентрацией 10^{21} см^{-3} и 10^{23} см^{-3} . Подвижность дырок $\mu_p = 0.25 \mu_n = 0.045$.

Решение:

$$\rho = \frac{1}{en_i(\mu_n + \mu_p)} \quad \mu = \frac{1}{en_i 1.25 \rho}$$

$$\rho = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} = 13.5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$$

ЗАДАНИЕ 3.5. Вычислить коэффициент биполярной диффузии для собственного германия при $T = 300 \text{ K}$, если подвижность электронов $\mu_n = 3800 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$, а отношение $b = \mu_n / \mu_p = 2.1$.

Решение:

$$D_n = \frac{\mu_n kT}{e}, \quad D_p = \frac{\mu_p kT}{e}$$

$$\mu_p = \mu_n / 2.1 = 1809 \text{ см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$$

$$D = \frac{2D_n D_p}{D_n + D_p} = 64.5 \text{ см}^2 / \text{с}$$

ЗАДАНИЕ 3.6. Вычислить коэффициент диффузии электронов в невырожденном кремнии при температуре 300 К, если подвижность электронов при этой температуре в кремнии равна $\mu_n = 1450 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$

Решение:

$$D_n = \frac{\mu_n kT}{e}$$

Ответ: $D_n = 37.5 \text{ см}^2 / \text{с}$.

ЗАДАНИЕ 3.7. Вычислить коэффициент диффузии дырок в невырожденном кремнии при температуре 300 К, если подвижность дырок при этой температуре в кремнии равна $\mu_p = 500 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$

Решение:

$$D_p = \frac{\mu_p kT}{e}$$

Ответ: $D_p = 12.9 \text{ см}^2 / \text{с}$.

ЗАДАНИЕ 3.8. Вычислить коэффициент диффузии электронов в невырожденном германии при температуре 300 К, если подвижность электронов при этой температуре в германии равна $\mu_n = 3800 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$

Решение:

$$D_n = \frac{\mu_n kT}{e}$$

Ответ: $D_n = 98.3 \text{ см}^2 / \text{с}$.

ЗАДАНИЕ 3.9. Вычислить коэффициент диффузии дырок в невырожденном германии при температуре 300 К, если подвижность дырок при этой температуре в германии равна $\mu_p = 1800 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$

Решение:

$$D_p = \frac{\mu_p kT}{e}$$

Ответ: $D_p = 46.6 \text{ см}^2 / \text{с}$.

ЗАДАНИЕ 3.10. Определить время жизни электронов в германии, если подвижность $\mu_n = 3800 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$, диффузионная длина $L_n = 2 \cdot 10^{-2} \text{ см}$, температура $T = 300 \text{ К}$.

Решение:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}, \quad D_n = \frac{\mu_n kT}{e}$$

$$\tau_n = \frac{L_n^2}{D_n} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

Ответ: $D_p = 4 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

ЗАДАНИЕ 3.11. Вычислить размер области пространственного заряда на контакте металл-кремний ($\epsilon=12$), если известно, что высота потенциального барьера $Y_s = 0.3 \text{ эВ}$. А концентрация электронов в объеме $n_0=5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. (Температура 300 К).

Решение:

$$L = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 Y_s}{e^2 n_0}} = 2.8 \cdot 10^{-7} \text{ см}$$

ЗАДАНИЕ 3.12. Вычислить дебаевский радиус экранирования на контакте металл-полупроводник при $T=300 \text{ К}$, если высота потенциального барьера $Y_s = 0.2 \text{ эВ}$, а размер области пространственного заряда $L=2 \cdot 10^{-4} \text{ см}$.

Решение:

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{e^2 n_0}}$$

$$L = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 Y_s}{e^2 n_0}} \quad n_0 = \frac{2\epsilon_0 Y_s}{L^2 e^2}$$

$$L_D = 2.27 \cdot 10^{-7} \text{ см}$$

ЗАДАНИЕ 3.13. Определить напряженность поля и потенциал на поверхности полупроводника при образовании запирающего контакта, если размер области пространственного заряда $L=5 \cdot 10^{-5} \text{ см}$, концентрация электронов в объеме полупроводника $n_0=2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $T=300 \text{ К}$, $\epsilon=12$.

Решение:

$$E_s = -\frac{kT}{e} \frac{L}{L_D^2} \quad U_s = \frac{kTL^2}{2eL_D^2}$$

$$E_s = -1.5 \cdot 10^5 \text{ В/см}, \quad U_s = 3.7 \cdot 10^{-13} \text{ В}$$

ЗАДАНИЕ 3.14. Определить емкость контакта металл-полупроводник при смещении $V = \pm 0.26 \text{ В}$, потенциальный барьер $Y_s = 0.36 \text{ эВ}$, $\epsilon=12$, $n_0=5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Решение:

$$C = \sqrt{\frac{\epsilon_0 n_0 e^2}{2(Y_s \pm eV)}}$$

$C = 0.65 \text{ мФ}$ (прямое смещение), $C = 0.26 \text{ мФ}$ (обратное смещение)

ЗАДАНИЕ 3.15. Вычислить фото-ЭДС в образце n-Ge при $T=300$ К, если он в зоне освещения $\Delta\sigma=0.2 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, а вне зоны освещения $\Delta\sigma=0$. В отсутствии освещения удельное сопротивление в сечении А $\rho_{0A}=15 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, а в сечении В $\rho_{0B}=5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Решение:

$$V = V_1 + V_2$$

$$V_1 = \frac{kT}{e} \ln \frac{1 + \Delta\sigma/\sigma_{0A}}{1 + \Delta\sigma/\sigma_{0B}} \quad V_2 = -\frac{kT}{e} \frac{b-1}{b+1} \ln \frac{1 + \Delta\sigma/\sigma_{0A}}{1 + \Delta\sigma/\sigma_{0B}} \quad b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$$

$$V = 1.17 \text{ мВ}$$

ЗАДАНИЕ 3.16. Вычислить вентиляющую фото-ЭДС, возникающую в p-n переходе в Ge при $T=75$ К. Освещается участок n-области, прилегающий к p-n переходу: в нем $\Delta n=10^{10} \text{ см}^{-3}$, вне его области $\Delta n=0$. В глубине n-области $n_0=n_n=10^{15} \text{ см}^{-3}$, в p-области $p_p=10^{11} \text{ см}^{-3}$, $\mu_n=3 \cdot 10^4 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$, $b=0.5$.

Решение:

$$V_1 = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_p [n_n + \Delta n(b+1)/b]}{n_n [n_p + \Delta n(b+1)/b]}, \quad n_p = n_i^2/n_n$$

$$V_1 = 0.17 \text{ В}$$

ЗАДАНИЕ 3.17. Что такое эффект поля?

Ответ: изменение концентрации свободных носителей в приповерхностной области полупроводника под действием внешнего электрического поля. Так как заряд свободных носителей или ионизованных доноров пространственно распределен в приповерхностной области полупроводника и эта область не является электронейтральной, она получила название область пространственного заряда (ОПЗ)

ЗАДАНИЕ 3.18. С чем связан фотомагнитный эффект (эффект Кикоина – Носкова)?

Ответ: связан с возникновением ЭДС при освещении сильно поглощаемым светом полупроводника, находящегося в магнитном поле

ЗАДАНИЕ 3.9. Что такое эффект поля?

Ответ: изменение концентрации свободных носителей в приповерхностной области полупроводника под действием внешнего электрического поля. Так как заряд свободных носителей или ионизованных доноров пространственно распределен в приповерхностной области полупроводника и эта область не является электронейтральной, она получила название область пространственного заряда (ОПЗ)

ЗАДАНИЕ 3.20. С чем связан фотодиффузионный эффект (эффект Дембера)?

Ответ: с возникновением ЭДС в однородном полупроводнике при освещении его сильно поглощаемым светом

ЗАДАНИЕ 3.21. Что определяет квантовый выход фотоэффекта?

Ответ: число пар носителей заряда (или число носителей заряда при примесной фотопроводимости), образуемых одним поглощенным фотоном, если интенсивность света измеряется числом квантов в секунду на единицу поверхности

ЗАДАНИЕ 3.22. Что такое фоторезистивный эффект? Дайте определение фотопроводимости.

Ответ: изменение электрического сопротивления полупроводника под действием излучения называют фоторезистивным эффектом. Добавочная проводимость, обусловленная носителями заряда, созданными оптической генерацией, носит название фотопроводимости

ЗАДАНИЕ 3.23. Дайте определение внутреннего фотоэффекта

Ответ: в случае внутреннего фотоэффекта носитель заряда (электрон или дырка) под воздействием кванта света не выходит из полупроводника, а лишь переходит в более высокое энергетическое состояние (например, из валентной зоны в зону проводимости). При этом первичным процессом является поглощение фотона (собственное, решеточное, примесное, экситонное, поглощение свободными носителями заряда)

ЗАДАНИЕ 3.24. Что такое фотоэлектрические эффекты в полупроводниках?

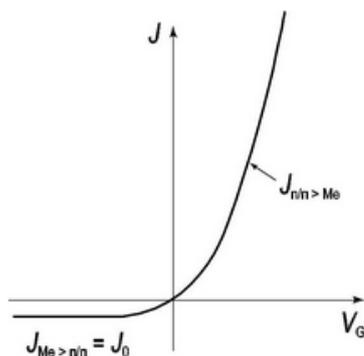
Ответ: фотоэффекты связаны с изменениями электрических свойств полупроводников под воздействием электромагнитного излучения

ЗАДАНИЕ 3.25. Дайте определение внешнего фотоэффекта

Ответ: определяется эмиссией электронов из вещества в вакуум под действием квантов света. Эмитированные электроны затем могут быть собраны анодом

ЗАДАНИЕ 3.26. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки

Ответ: ВАХ барьера Шоттки имеет ярко выраженный несимметричный вид: в области прямых смещений ток экспоненциально сильно растёт с ростом приложенного напряжения; в области обратных смещений ток от напряжения не зависит. В обоих случаях, при прямом и обратном смещении, ток в барьере Шоттки обусловлен основными носителями – электронами. По этой причине диоды на основе барьера Шоттки являются быстродействующими приборами, поскольку в них отсутствуют рекомбинационные и диффузионные процессы.



ЗАДАНИЕ 3.27. Что представляют собой контактные явления в полупроводниках?

Ответ: контактные явления в полупроводниках включают процессы, происходящие в электронно-дырочном переходе (p-n-переходе), переходе «металл-полупроводник» и гетерогенном переходе, образованном двумя полупроводниками с различной шириной запрещенной зоны

Ответ: $D_n = 98.3 \text{ см}^2/\text{с}$.

ЗАДАНИЕ 3.28. Что такое симметричный p-n-переход?

Ответ: p-n-переход, возникающий между областями акцепторного и донорного полупроводника с одинаковыми концентрациями примесей ($N_a=N_d$)

ЗАДАНИЕ 3.29. Что такое несимметричный p-n-переход?

Ответ: p-n-переход, возникающий между областями акцепторного и донорного полупроводника с неодинаковыми концентрациями примесей. Наиболее распространенный случай, когда концентрация акцепторной примеси значительно выше концентрации донорной примеси ($N_a \gg N_d$)

ЗАДАНИЕ 3.30. Как коэффициент диффузии носителей заряда связан с их подвижностью?

Ответ: соотношением Эйнштейна ($D_n = \frac{kT}{q} \mu_n$ - для электронов, $D_p = \frac{kT}{q} \mu_p$ -

для дырок

Критерии и шкалы оценивания:

Для оценивания выполнения заданий используется балльная шкала:

2) задания с коротким ответом:

- 2 балла – указан верный ответ;
- 0 баллов – указан неверный ответ, в том числе частично.

3) расчетные задачи, ситуационные, практико-ориентированные задачи / мини-кейсы:

- 5 баллов – задача решена верно (получен правильный ответ, обоснован (аргументирован) ход решения);
- 2 балла – решение задачи содержит незначительные ошибки, но приведен правильный ход рассуждений, или получен верный ответ, но отсутствует обоснование хода ее решения, или задача решена не полностью, но получены промежуточные результаты, отражающие правильность хода решения задачи, или, в случае если задание состоит из решения нескольких подзадач, 50% которых решены верно;
- 0 баллов – задача не решена или решение неверно (ход решения ошибочен или содержит грубые ошибки, значительно влияющие на дальнейшее изучение задачи).