Задания заключительного этапа по направлению
<u>«Нанотехнологии в электронике и радиофотонике»</u>

Категория участия: «Бакалавриат»

Задача 1 (10 баллов)

К ячейке Поккельса толщиной 1 см, являющейся кристаллом дигидрофосфата аммония $NH_4H_2PO_4$ (ADP), приложено внешнее электрическое поле 150 кВ. Коэффициент преломления дигидрофосфата аммония равен 1,525.

Задание:

1) Выведите показатель преломления электрооптической среды, как функции n(E) приложенного стационарного или медленно меняющегося электрического поля, на основе того, что функция n(E) слабо зависит от E, разложив её в ряд Тейлора в окрестностях точки E=0.
2) Рассчитайте линейный электрооптический коэффициент для дигидрофосфата аммония $NH_4H_2PO_4$ (ADP), если его коэффициент преломления уменьшился на 744×10^{-6}.

Решение:

1) Показатель преломления электрооптической среды является функцией n(E) приложенного стационарного или медленно меняющегося электрического поля E. Функция n(E) слабо зависит от E, так что её можно разложить в ряд Тейлора в окрестностях точки E=0:

$$\mathrm{n(E) = n + a_1E + \frac{1}{2}a_2E^2 + \cdots,}$$

где коэффициенты разложения:

$$\mathrm{n = n(0);\ a_1 = \left.\frac{dn}{dE}\right|_{E=0};\ a_2 = \left.\frac{d^2n}{dE^2}\right|_{E=0}.}$$

Выразим электрооптические коэффициенты:

$$\tau = -\frac{2a_1}{n^3};\ \sigma = -\frac{a_2}{n^3},$$

отсюда:

$$\mathrm{n(E) = n - \frac{1}{2}\tau n^3E - \frac{1}{2}\varsigma n^3E^2 + \cdots\ .} \qquad (1)$$

Члены второго и высших порядков этого ряда, как правило, на много порядков меньше, чем n. Ими можно с уверенностью пренебречь.

Диэлектрическая проницаемость электрооптической среды как функции E:

$$\eta = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} = \frac{1}{n^2}.$$

Диэлектрическая проницаемость η используется для описания оптических свойств анизотропных сред. Его малое приращение равно:

$$\Delta\eta = \frac{d\eta}{dn}\Delta n = -\frac{2}{n^3}\left(-\frac{1}{2}\tau n^3 E - \frac{1}{2}s n^3 E^2\right) = \tau E + s E^2,$$

так что:

$$\eta(E) \approx \eta + \tau E + s E^2,$$

где $\eta = \eta(0)$. Следовательно, электрооптические коэффициенты τ и s - это коэффициенты двух слагаемых $\Delta\eta$ величинам E и E^2 соответственно. Значения коэффициентов τ и s зависят от направления приложенного электрического поля и поляризации света.

Во многих материалах третий член выражения (1) пренебрежимо мал, по сравнению со вторым, в силу чего получается формула для эффекта Поккельса:

$$n(E) \approx n - \frac{1}{2}\tau n^3 E$$

Среда в таком случае называется ячейкой (средой) Поккельса. Коэффициент τ называется коэффициентом Поккельса или линейным электрооптическим коэффициентом.

2) Отсюда можно выразить показатель преломления электрооптической среды или коэффициент Поккельса.

Выразим внешнее электрическое поле в В/м:

$$150\ \frac{кВ}{см} = 150 \times \frac{10^3}{10^{-2}}\ \frac{В}{м} = 150 \times 10^5 \frac{В}{м} = 15 \times 10^6 \frac{В}{м}$$

Рассчитаем коэффициент Поккельса:

$$\tau \approx \frac{2 \times (n - n(E))}{n^3 E} \approx \frac{2 \times 744 \times 10^{-6}}{1{,}525^3 \times 15 \times 10^6} \approx 28 \times 10^{-12}\frac{м}{В}$$

Задача 2 (10 баллов)

На рис. 1 представлен блок комбинационной схемы с 8-входовым мультиплексором на выходе. Какая последовательность логических сигналов X1, X2, X3 должна быть на входе всей схемы, если на выходе мультиплексора Y присутствует логическая единица («1»). Вход A0 соответствует младшему разряду управляющего сигнала, A2 – старшему, комбинация A2 A1 A0 = «000» соответствует входу данных D0, комбинация A2 A1 A0 = «111» – входу D7.

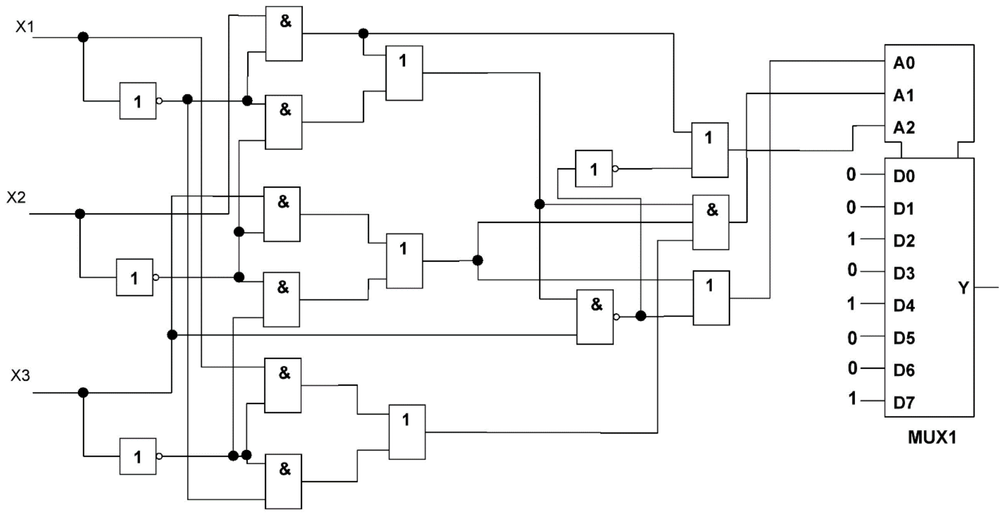


Рис. 1. Блок комбинационной схемы с 8-входовым мультиплексором на выходе.

Решение:

На управляющие входы приходят следующие сигналы:

$$A_0 = (\overline{X_2} * \overline{X_3} + \overline{X_2} * X_3) + \overline{X_3 * (\overline{X_1} * \overline{X_2} + \overline{X_1} * X_2)} = \overline{X_3 * \overline{X_1}} + \overline{X_2}$$

$$A_1 = (\overline{X_1} * \overline{X_2} + \overline{X_1} * X_2) * (\overline{X_2} * \overline{X_3} + \overline{X_2} * X_3) * (\overline{X_3} * \overline{X_1} + \overline{X_3} * X_1) = \overline{X_1} * \overline{X_2} * \overline{X_3}$$

$$A_2 = \overline{X_1} * X_2 + \overline{\overline{X_3 * (\overline{X_1} * \overline{X_2} + \overline{X_1} * X_2)}} = \overline{X_1} * X_2 + X_3 * (\overline{X_1} * \overline{X_2} + \overline{X_1} * X_2)$$
$$= \overline{X_1} * X_2 + \overline{X_1} * X_3$$

Таблица истинности, составленная для сигналов X1,X2,X3 и сигналов на управляющих входах

X1	X2	X3	A2	A1	A0
0	0	0	0	1	1
0	0	1	1	0	1
0	1	0	1	0	1
0	1	1	1	0	0
1	0	0	0	0	1
1	0	1	0	0	1
1	1	0	0	0	1
1	1	1	0	0	1

Нужные комбинации управляющих входов, необходимые для того, чтобы на выходе мультиплексора была логическая 1.

A2	A1	A0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Верный вариант

X1	X2	X3	A2	A1	A0
0	0	0	0	1	1
0	0	1	1	0	1
0	1	0	1	0	1
0	1	1	1	0	0
1	0	0	0	0	1
1	0	1	0	0	1
1	1	0	0	0	1
1	1	1	0	0	1

Ответ: 011

Задача 3 (17 баллов)

На поверхности кремниевой подложки, равномерно легированной акцепторной примесью с концентрацией $N_A = 1{,}0 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$, выращен слой окисла SiO_2. При воздействии ионизирующих излучений в окисле формируется положительный заряд. Определить при какой поверхностной плотности положительного заряда в окисле Q_{ot} произойдет сильная инверсия проводимости подложки вблизи поверхности (концентрация неосновных носителей станет равной концентрации примести в подложке). Расчеты произвести для температуры T_0 = 25°C, собственную концентрацию носителей заряда в кремнии принять равной $n_i = 1{,}45 \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$, диэлектрическую проницаемость кремния считать равной ε = 11,7, постоянная Больцмана k = $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/K, универсальная электрическая постоянная $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-14}$ Ф/см, заряд электрона $q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл, зарядом поверхностных состояний пренебречь.

Решение:

По теореме Гаусса проекция вектора напряженности электрического поля E_x на ось x (рисунок 1) связана с концентрациями электронов *n(x)* и дырок *p(x)*, а так же с концентрацией легирующей примеси N_A соотношением:

$$\frac{dE_x}{dx} = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0} \cdot (p(x) - n(x) - N_A) \quad (1)$$

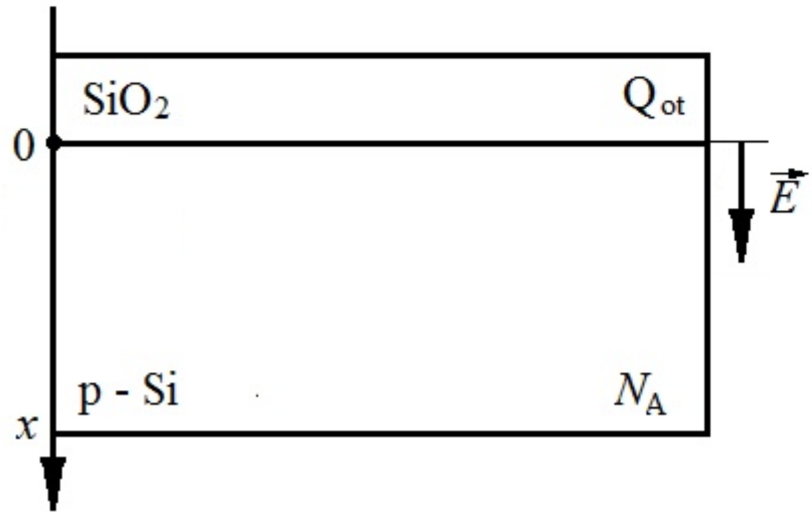


Рисунок 1. Структура Si-SiO_2

Выберем точку отсчета потенциала φ(x) в глубине подложки (при x = ∞, $\varphi(\infty) = 0$). Тогда концентрации носителей заряда n и p будут определяться соотношениями:

$$n(x) = \frac{n_i^2}{N_A} \cdot \exp\left(\frac{\varphi(x)}{\varphi_T}\right), \quad (2)$$

$$p(x) = N_A \cdot \exp\left(-\frac{\varphi(x)}{\varphi_T}\right) \quad (3)$$

где:

$$\varphi_T = \frac{kT}{q} \quad (4)$$

Подставим выражения (2) и (3) в (1):

$$\frac{dE_x}{dx} = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \left(N_A \cdot \exp\left(-\frac{\varphi(x)}{\varphi_T}\right) - \frac{n_i^2}{N_A} \cdot \exp\left(\frac{\varphi(x)}{\varphi_T}\right) - N_A\right) \quad (5)$$

Проинтегрируем обе части уравнения (5) по $d\varphi$ в пределах от 0 до φ_S, что соответствует изменению координаты x от ∞ до 0 ($\varphi(\infty) = 0$, $\varphi(0) = \varphi_S$).

$$\int_0^{\varphi_S} \frac{dE_x}{dx} d\varphi = \int_0^{\varphi_S} \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \left(N_A \cdot \exp\left(-\frac{\varphi(x)}{\varphi_T}\right) - \frac{n_i^2}{N_A} \cdot \exp\left(\frac{\varphi(x)}{\varphi_T}\right) - N_A \right) d\varphi \quad (6)$$

Учитывая что $E_x = -\,d\varphi/dx$ перейдем к интегрированию в левой части по dE_x от 0 до E_S, где E_S проекция вектора E на ось x при x = 0:

$$-\int_0^{E_S} E_x dE_x = \int_0^{\varphi_S} \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \left(N_A \cdot \exp\left(-\frac{\varphi(x)}{\varphi_T}\right) - \frac{n_i^2}{N_A} \cdot \exp\left(\frac{\varphi(x)}{\varphi_T}\right) - N_A \right) d\varphi \quad (7)$$

Вычисляя интегралы в выражении (7) приходим к соотношению:

$$E_S = \pm\sqrt{\frac{2q\varphi_T N_A}{\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \left(\exp\left(-\frac{\varphi_S}{\varphi_T}\right) + \frac{n_i^2}{N_A^2} \cdot \exp\left(\frac{\varphi_S}{\varphi_T}\right) - \frac{\varphi_S}{\varphi_T} - \frac{n_i^2}{N_A^2} - 1\right)} \quad (8)$$

Поскольку заряд инверсионного слоя отрицателен, а заряд в окисле положителен, проекция вектора E на ось x при x = 0 положительна ($E_S > 0$), следовательно выбираем решение:

$$E_S = +\sqrt{\frac{2q\varphi_T N_A}{\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \left(\exp\left(-\frac{\varphi_S}{\varphi_T}\right) + \frac{n_i^2}{N_A^2} \cdot \exp\left(\frac{\varphi_S}{\varphi_T}\right) - \frac{\varphi_S}{\varphi_T} - \frac{n_i^2}{N_A^2} - 1\right)} \quad (9)$$

На границе раздела в кремнии при x = 0 для достижения сильной инверсии необходимо чтобы выполнялось условие (концентрация электронов равна концентрации примесив подложке):

$$n(0) = N_A \quad (10)$$

Концентрация электронов связана с потенциалом на границе раздела $Si\text{-}SiO_2$ соотношением:

$$n(0) = \frac{n_i^2}{N_A} \cdot \exp\left(\frac{\varphi_S}{\varphi_T}\right) \quad (11)$$

откуда, с учетом (10), находим потенциал при x = 0:

$$\varphi_S = 2\varphi_T \cdot \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad (12)$$

Подставляя (12) в (9) находим E_S:

$$E_S = \sqrt{\frac{4 \cdot q\varphi_T N_A}{\varepsilon\varepsilon_0} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)} \quad (13)$$

По теореме Гаусса для элемента поверхности раздела $Si\text{-}SiO_2$ площадью ΔS:

$$E_S \Delta S = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} \cdot Q_{ot} \Delta S. \quad (14)$$

Комбинируя (13) и (14) с учетом (4) получаем:

$$Q_{ot} = 2 \cdot \sqrt{\varepsilon\varepsilon_0 kTN_A \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)}. \tag{15}$$

Подставляя числовые значения получаем: $Q_{ot} = 4{,}8 * 10^{-8}$ Кл/см^2

Ответ: $Q_{ot} = 4{,}8 * 10^{-8}$ Кл/см^2

Задача 4 (17 баллов)

На выходе из многомодового оптического волокна необходимо создать коллимированный пучок оптического излучения на фиксированной длине волны (см. рисунок). Диаметр пучка должен составлять $D_п$= 1 см. Какое фокусное расстояние f должно быть у линзы, которая будет использоваться для создания такого пучка, если показатели преломления сердцевины (n_1) и оболочки (n_2) оптического волокна на используемой длине волны составляют соответственно n_1=1.49 и n_2=1.46. При решении задачи считать, что диаметр пучка равен диаметру линзы.

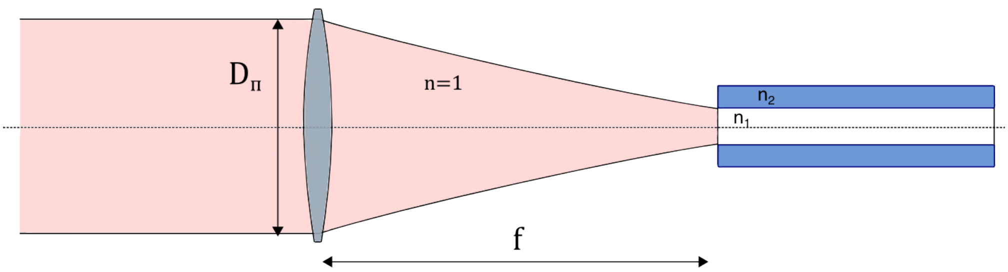
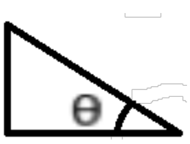


Рис. 2. Формирование коллимированного плоскопараллельного пучка оптического излучения из одномодового оптического волокна.

Решение:

Для многомодового волокна:

$$\mathrm{NA} = \sin\theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$



С другой стороны, $\sin\theta = \frac{D_n/2}{\sqrt{(D_n/2)^2 + f^2}}$, где $(D_n/2)^2 + f^2$ из

Следовательно, $\frac{D_n/2}{\sqrt{(D_n/2)^2 + f^2}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

$$\frac{(\mathrm{D_n}/2)^2}{(\mathrm{D_n}/2)^2 + \mathrm{f}^2} = \mathrm{n}_1^2 - \mathrm{n}_2^2 \Longrightarrow \mathrm{f}^2 = \frac{(\mathrm{D_n}/2)^2}{\mathrm{n}_1^2 + \mathrm{n}_2^2} - (\mathrm{D_n}/2)^2$$

$$\mathrm{f} = \left(\frac{\mathrm{D_n}}{2}\right)\sqrt{\frac{1 - \mathrm{n}_1^2 + \mathrm{n}_2^2}{\mathrm{n}_1^2 - \mathrm{n}_2^2}} = 1{,}61\ \text{см}$$

Задача 5 (23 балла)

Теоретический коэффициент межзонного оптического поглощения для очень тонкой полупроводниковой квантовой ямы (из прямозонного полупроводника) без учёта экситонных и тепловых эффектов имеет вид:

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{A}{\hbar\omega} \cdot \frac{I_{eh}}{d} \cdot \theta\left(\hbar\omega - \tilde{E}_g\right),$$

где d – толщина (ширина) квантовой ямы, A – постоянная, зависящая от материала, $\tilde{E}_g$ – эффективная ширина запрещённой зоны (с учётом размерного квантования), I_{eh} – квадрат модуля интеграла перекрытия волновых функций электронов и дырок, θ – функция Хэвисайда.

Пусть яму из InGaAs толщиной $d = 10$ нм поместили в электрическое поле, из-за которого $\tilde{E}_g$ уменьшилась на 0.1 эВ, а I_{eh} уменьшился в 2 раза (квантово-размерный эффект Штарка). Считать, что зависимость $\alpha(\hbar\omega)$ осталась прежней.

Оцените:

1) Δn - изменение показателя преломления для энергии фотона $\hbar\omega = 0.75$ эВ.

2) разность фаз $\Delta\varphi$, которая наберётся при пробеге света по двум плечам интерферометра, показатели преломления в которых отличаются на Δn, а длина L составляет 1 мм.

До приложения поля значения параметров составляли: $\tilde{\mathrm{E}}_\mathrm{g} = 0.8$ эВ, $\mathrm{I_{eh}} = 0.9$. Постоянная $\mathrm{A} = 0.1$ эВ. Использовать соотношения Крамерса-Кронига.

Решение:

Рассматривая комплексный показатель преломления n_c, обозначим n как его действительную часть. Коэффициент поглощения пропорционален коэффициенту экстинкции (мнимой части показателя преломления). При условии малости мнимой части по сравнению с действительной (которое обычно соблюдается), мы можем получить следующие соотношения для изменений коэффициента поглощения и показателя преломления:

$$\Delta\alpha = \frac{\omega}{cn_0}\Im(\Delta\chi), \qquad \Delta n = \frac{1}{2n_0}\Re(\Delta\chi)$$

Где χ – диэлектрическая восприимчивость КЯ, а n_0 – «фоновый» показатель преломления (показатель преломления объемного полупроводника).

Теперь используем соотношения Крамерса-Кронига для действительной и мнимой части комплексной функции:

$$\Delta n = \frac{c}{\pi}\int_0^\infty \frac{\Delta\alpha(\omega')d\omega'}{\omega'^2-\omega^2}$$

Можно найти:

$$\int_0^\infty \frac{\theta\left(\hbar\omega-\tilde{E}_g\right)d\omega'}{\omega'(\omega'^2-\omega^2)} = \int_{\omega_g}^\infty \frac{d\omega'}{\omega'(\omega'^2-\omega^2)} = \frac{1}{\omega^2}\int_{\frac{\omega_g}{\omega}}^\infty \frac{du}{u(u^2-1)} =$$

$$= \frac{1}{2\omega^2}\ln\left|\frac{\tilde{E}_g^2}{\tilde{E}_g^2-(\hbar\omega)^2}\right|$$

Здесь интеграл понимается в смысле главного значения Коши. Для указанного вида коэффициента поглощения, получаем:

$$\Delta n = \frac{A}{(\hbar\omega)^2}\frac{\hbar c}{2\pi d}\cdot\left[I_{eh2}\ln\left|\frac{\tilde{E}_{g2}^2}{\tilde{E}_{g2}^2-(\hbar\omega)^2}\right| - I_{eh1}\ln\left|\frac{\tilde{E}_{g1}^2}{\tilde{E}_{g1}^2-(\hbar\omega)^2}\right|\right]$$

$$\Delta n = \frac{0.1}{0.75^2}\frac{197}{6.28\cdot 10}\cdot\left[0.45\ln\left|\frac{0.7^2}{0.7^2-0.75^2}\right| - 0.9\ln\left|\frac{0.8^2}{0.8^2-0.75^2}\right|\right] = -0.58$$

Это изменение показателя преломления значительно превышает обычно наблюдаемые значения, поэтому числовые параметры задачи подобраны неудачно. Обычные значения для таких случаев $\Delta n \approx 10^{-3} - 10^{-2}$.

Тем не менее ответ на вопрос 1) найден, осталось найти ответ на вопрос 2), который тривиально находится из определения фазовой скорости:

$$\Delta\varphi = L\Delta k = \frac{L\omega}{c}\Delta n = \frac{2\pi L}{\lambda_0}\Delta n = 3800\Delta n$$

Задача 6 (23 балла)

Транзистор со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДПТ) является элементом интегральных микросхем. МДПТ имеет 4 вывода: исток (И), сток (С), затвор (З), подложка (П) и может включаться в различные электрические схемы. Простейшая схема показана на рис. 3. Через управляющий вывод (затвор) электрический ток не протекает. Если напряжение на затворе $U_З$ превышает пороговое значение U_0, то между стоком и истоком протекает ток $I_С$, значение которого при напряжении между стоком и истоком $U_С$ и $U = U_З - U_0$ для *n*- канального МДПТ определяется как:

$$I_C = \begin{cases} 0, \quad \textit{при } \mathrm{U} \le 0, \\ b\left[U - \dfrac{U_C}{2}\right]U_C, \textit{ крутая обл. ВАХ}, U_C < U_{CH}, \\ \dfrac{b}{2}(U)^2 \ , \textit{пологая обл. ВАХ}, U_C \ge U_{CH} \ , \end{cases}$$

$$U_{CH} = \sqrt{\frac{2\mathrm{I_C}}{\mathrm{b}}}$$

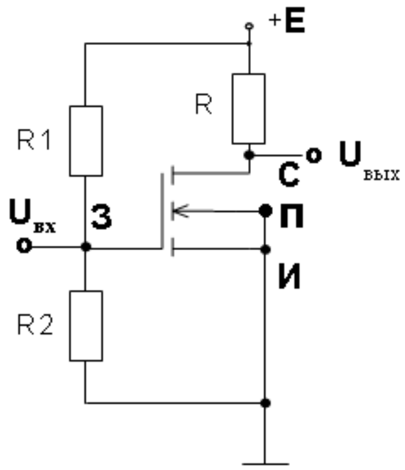


Рис. 3. Простейшая схема подключения МДП-транзистора.

Параметры транзистора: $U_0 = 1$ В и $b = 2$ мА/В^2.
Параметры схемы: E =5 В, R =1 кОм, $R_1 = 6$ кОм, $R_2 = 4$ кОм.
На вход подаётся сигнал: $\Delta U_{вх} = 0{,}2\cdot\mathrm{Sin}(100\pi\cdot t)$ В.

Определите:

1) В каких пределах изменяется потребляемая мощность данной схемы?
2) В каких пределах изменяется выходное напряжение данной схемы $U_{вых}$?
3) Среднее значение коэффициента усиления $K = \Delta U_{вых} / \Delta U_{вх}$.

Решение:

Для решения задачи 6 (варианты 1 и 2) полезно сначала определить функцию преобразования схемы $\boldsymbol{U_{вых} = f(U_{вх}) = E - R\cdot I_C = U_C}$. Граничное значение $U = U^*$ перехода из пологой в крутую область ВАХ МДПТ можно определить, решая уравнение $U_{CH} = U = E - (0{,}5\beta)\cdot U^2$ и получить

$$U^* = [(1 + 2\beta \mathrm{E})^{0{,}5} - 1]/\beta \ , \qquad (1)$$

где $\beta = bR$ (R– сопротивление в стоковой ветви). Тогда

при $U \le 0$ (МДПТ закрыт) $U_{вых} = E$,

при $0 < U \le U^*$ (пологая обл.) $U_{вых} = U_C = E - (0{,}5\beta)\cdot U^2$, (2)

а при $U > U^*$ (крутая обл.)

$$U_{вых} = U_C = \frac{1}{\beta} + U - \sqrt{\left(\frac{1}{\beta} + U\right)^2 - \frac{2E}{\beta}}\ . \qquad (3)$$

Для данной схемы **во всех вариантах U* ≈ 1,8 В,**

начальное значение $U_{вх0} = U_{З0} = E\cdot R_2/(R_1 + R_2)$ = **2 В** (в варианте 1),

начальное значение $U_{вх0} = U_{З0} = E\cdot R_2/(R_1 + R_2)$ = **3 В** (в варианте 2).

Исходное значение $U = U_{З0} - U_0$ = **1,5 В (пологая обл.**).

$$U_{вых} = U_C = E - (0{,}5\beta)\cdot U^2 = 5 - U^2.$$

$U_{мин} = U - \Delta U_м$ = **1,3 В** и $U_{макс} = U + \Delta U_м$ = **1,7 В**.

Значение статической потребляемой мощности схемы можно рассчитать как

$$P_{ст} = E\cdot I_C + E^2/(R_1 + R_2)\ , \qquad (4)$$

где ток стока определяется по заданным формулам для исходного (начального) значения параметра $U = U_{З0} - U_0$ и соответствующего режима работы транзистора.

Вариант 1: (пологая область ВАХ) → $I_C = 0{,}5b\cdot U^2$.

Вариант 2: (крутая область ВАХ) → $I_C = b\cdot(U - 0{,}5\,U_C)\cdot U_C$, где

$$U_C = 1/\beta + U - [(1/\beta + U)^2 - 2E/\beta]^{1/2}.$$

1. В каких пределах изменяется потребляемая мощность данной схемы?

Пределы изменения потребляемой мощности данной схемы $P_{мин}$ и $P_{макс}$, если на вход подаётся сигнал $\Delta U_{вх} = \Delta U_м\cdot \mathrm{Sin}(100\pi\cdot t)$ В, можно рассчитать на основе выражения (4), в которое вместо величины I_C подставить $I_{Cмин}$ и $I_{Cмакс}$, соответствующие режимам работы транзистора и значениям $U_{мин} = U - \Delta U_м$ и $U_{макс} = U + \Delta U_м$.

$$\boldsymbol{P_{мин} = E\cdot I_{Cмин} + E^2/(R_1 + R_2).}$$

$$\boldsymbol{P_{макс} = E\cdot I_{Cмакс} + E^2/(R_1 + R_2).}$$

Исходное значение $U = U_{З0} - U_0$ = 1,5 В (**пологая обл.**).

$$U_{мин} = 1{,}3 \text{ В и } U_{макс} = 1{,}7 \text{ В}.$$

$$I_C = 0{,}5bU^2. \quad I_{Cмин} = 1{,}69 \text{ мА}. \quad I_{Cмакс} = 2{,}89 \text{ мА}.$$

$P_{мин} = 5\cdot 1{,}69 + 25/10$ = **10,95 мВт** ≈ 11 мВт.

$$P_{макс} = 5\cdot 2{,}89 + 25/10 = \mathbf{16{,}95\ мВт} \approx 17\ мВт.$$

2. В каких пределах изменяется выходное напряжение данной схемы $U_{вых}$?

Если на вход подаётся сигнал $\Delta U_{вх} = \Delta U_{м}\cdot \mathrm{Sin}(100\pi\cdot t)$ В, то пределы изменения выходного напряжения данной схемы $U_{вых} = U_C$ и соответствуют значениям $U_{мин} = U - \Delta U_{м}$ и $U_{макс} = U + \Delta U_{м}$, рассчитанным по формулам (2) или (3) в зависимости от режима работы МДПТ.

$$U_{вых\ мин} = U_C = E - (0{,}5\beta)\cdot(U_{макс})^2 = 5 - 1{,}7^2 = \mathbf{2{,}11\ В}.$$

$$U_{вых\ макс} = E - (0{,}5\beta)\cdot(U_{мин})^2 = 5 - 1{,}3^2 = \mathbf{3{,}31\ В.}$$

3. Среднее значение коэффициента усиления схемы $K = \Delta U_{вых}/\Delta U_{вх}$

$K = \Delta U_{вых}/\Delta U_{вх} = (U_{ВЫХмакс} - U_{ВЫХмин})/(2\Delta U_{м})$.

$K = 1{,}2/\ 0{,}4 = \mathbf{3}$.

Ответы:

$P_{мин}$ / $P_{макс}$, мВт	$U_{ВЫХмакс}$/$U_{ВЫХмин}$, В	К
10,95 / 16 ,95	3,31 / 2,11	3