

## Полевые транзисторы с управляющим переходом металл – полупроводник и гетеропереходом.

Другие названия этих транзисторов: транзисторы на электронах с высокой подвижностью, ГМеП транзисторы, полевые транзисторы с модулированным легированием, селективно-легированные гетероструктурные транзисторы (СЛГТ). В зарубежной литературе их обозначают HEMFET, НЕМТ, MODFET, TEGFET, SDHT.

ГМеП транзисторы являются перспективными элементами для цифровых сверхскоростных микросхем и аналоговых микросхем СВЧ диапазона. В них используют свойства гетероперехода (гетеропереходом называется переход, между двумя разными п/п, как правило с разной шириной запрещенной зоны), образованного тонкими монокристаллическими слоями 2-х полупроводниковых материалов с близкой кристаллической структурой, но разной шириной запрещенной зоны.

Существует достаточно много изоструктурных аналогов GaAs – п/п материалов, имеющих близкий к GaAs шаг кристаллической решетки. Это позволяет использовать GaAs в качестве основы для создания широкого класса гетероструктурных транзисторов, обладающих уникальными характеристиками. Параметры некоторых из таких п/п приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры некоторых п/п материалов, применяемых для создания гетероструктур на основе GaAs.

Полупроводник	$a_0$ , нм	$\Delta E_3$ , эВ	$\mu_n$ , $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$\mu_p$ , $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$
GaAs	0,5654	1,42	8500	420
AlAs	0,5661	2,95	-	-
Ge	0,5658	0,67	3800	1820
InP	0,5869	1,26	4600	150
InAs	0,6057	0,35	27000	450
AlSb	0,6135	2,5	-	-
InSb	0,6479	0,17	78000	750

Примечание:

1.  $a_0$  – шаг кристаллической решетки.
2. Кроме приведенных в таблице, для создания гетероструктур широко применяются различные твердые растворы ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ,  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ ,  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ ,  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$  и др.).

Практически невозможно подобрать пару разных п/п, у которых было бы идеальное согласование и кристаллических структур и коэффициентов термического расширения. Поэтому на границе раздела г/п обычно возникают механические напряжения, вызывающие появление дислокаций несоответствия, создающих на границе раздела п/п граничные состояния. Например, даже у хорошей пары Ge и GaAs возникает пластическая деформация. Выручают твердые растворы. Например, замена Ge на твердый раствор  $\text{Ge}_{0,98}\text{Si}_{0,02}$  приводит к снижению напряжений на границе раздела до уровня, исключающего возможность пластической деформации GaAs, и улучшает характеристики гетероперехода. У него резко уменьшается обратный ток.

В ГМет транзисторах чаще всего применяют гетеропереход GaAs- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Величина  $x$  показывает относительное содержание Al. С ростом  $x$  плавно увеличивается ширина запрещенной зоны  $\Delta E_z$   $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Например, при изменении  $x$  в пределах 0-0,4  $\Delta E_z$  линейно увеличивается от 1,42 до 1,92 эВ. Для состава с  $x = 0,3$   $\Delta E_z = 1,8$  эВ и различие в ширине запрещенной зоны составляет  $\sim 0,38$  эВ.

Равновесная энергетическая диаграмма гетероперехода между нелегированным GaAs и легированным донорными примесями, например, Si,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  показана на рисунке 1.

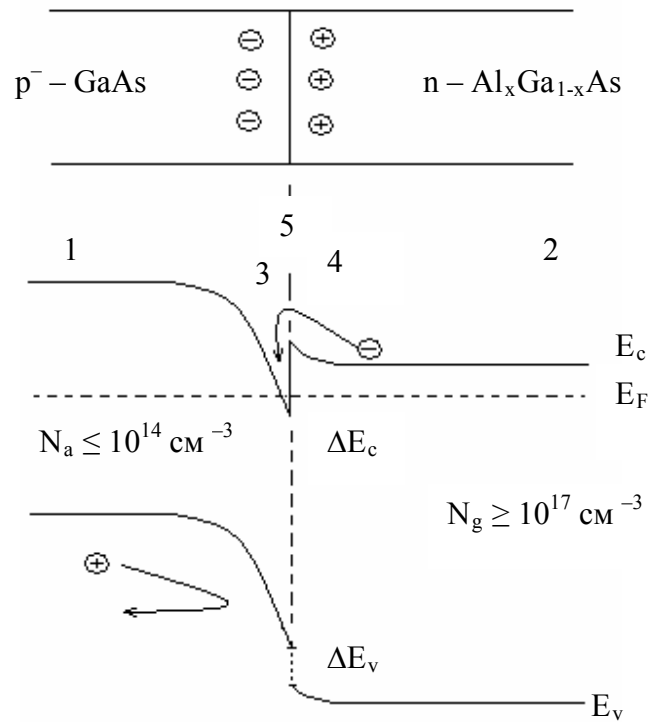


Рисунок 1. Равновесная энергетическая диаграмма гетероперехода  $p^- \text{GaAs} - n \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

В нелегированном GaAs уровень Ферми располагается почти посередине запрещенной зоны, а в легированном  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  вблизи дна зоны проводимости ( $E_c$ ). В GaAs у границы раздела 5 2-х п/п образуется область 3 с минимальной энергией электронов. В эту область “скатятся” из п/п с более широкой запрещенной зоной свободные электроны ионизированных атомов примеси. В результате произойдет пространственное разделение электронов и компенсирующих их ионизированных атомов примеси. Электроны, накопленные в области 3, находятся в потенциальной яме и в слабых электрических полях могут перемещаться только вдоль границы 5 в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка. Поэтому совокупность электронов в области 3 называют двумерным электронным газом, подчеркивая тем самым, что в слабых полях эти  $e^-$  не могут перемещаться в третьем измерении, т.е. переходить, например, из области 3 в область 4, т.к. этому препятствует потенциальный барьер  $\Delta E_c \approx (0,6 \div 0,65)(\Delta E_{32} - \Delta E_{31})$ .

Вследствие хорошего соответствия кристаллических решеток GaAs и  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  в гетеропереходе обеспечивается низкая плотность

поверхностных состояний и дефектов. По этим причинам для  $e^-$ , накопленных в области 3 (область накопления – ОН), в слабых электрических полях достигается очень высокая подвижность, близкая к объемной подвижности для нелегированного GaAs  $[(8..9) \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}]$  при  $T = 300\text{К}$ . Причем эта подвижность резко увеличивается при понижении температуры, т.к. в нелегированном GaAs преобладает решетчатое рассеяние.

Для лучшего пространственного разделения двумерного электронного газа и рассеивающих центров между нелегированным GaAs и легированным донорами  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  вводят тонкий (несколько нм) разделительный слой нелегированного  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Концентрация рассеивающих центров в нелегированном слое ниже, чем в легированном, поэтому  $\mu_n$ , накопленных в ОН 3, дополнительно увеличивается.

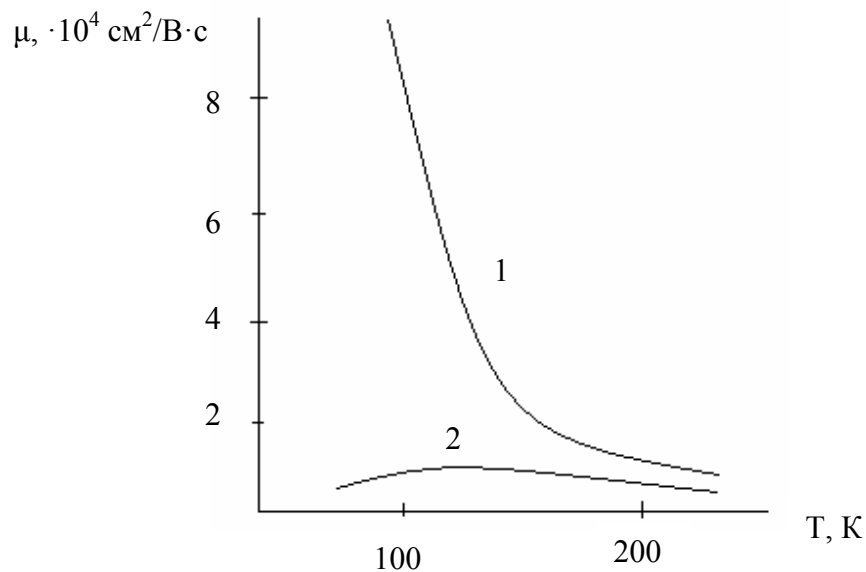


Рисунок 2. Температурная зависимость подвижности электронного газа.  
1 – гетероструктура; 2 – GaAs.

На рисунке 2 (кривая 1) показана температурная зависимость подвижности электронного газа, полученная в этом случае. При температурах жидкого азота (77 К) и жидкого гелия (4 К)  $\mu_n$  соответственно возрастает до  $1,4 \cdot 10^5$  и  $2 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . На этом же рисунке (кривая 2) показана температурная зависимость  $\mu_n$  в GaAs с концентрацией  $N_d = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Рассмотренный гетеропереход используют в структурах полевых транзисторов с управляющим переходом Me – п/п. Примеры конструкции нормально открытого (н.о.) и нормально закрытого (н.з.) ГМеП транзисторов показана на рисунке 3.

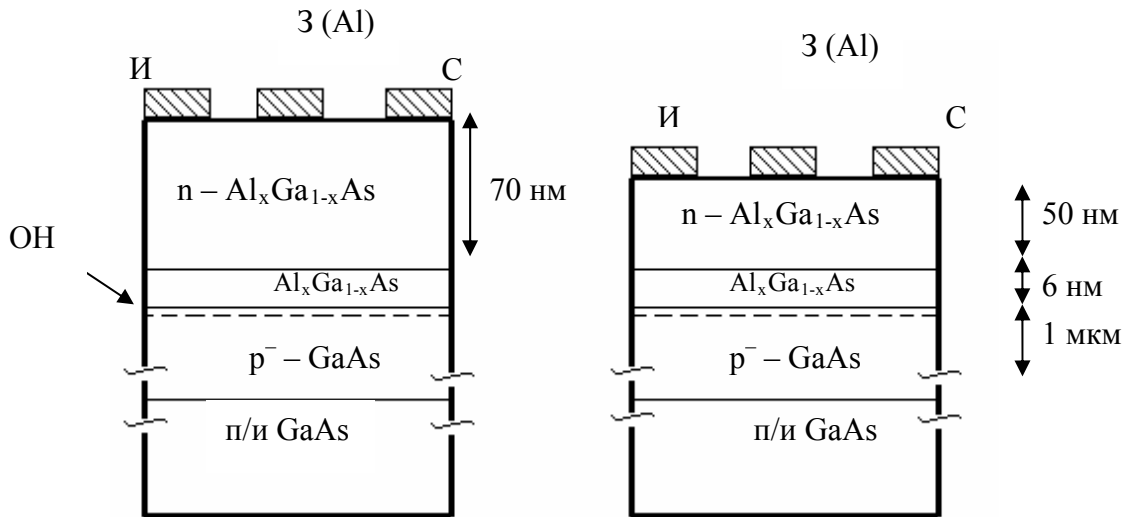


Рисунок 3. Примеры конструкции нормально открытого (слева) и нормально закрытого (справа) ГМеП транзисторов.

При изготовлении н.о. транзисторов на легированную Cr полуизолирующую подложку из GaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии последовательно наносят: нелегированный слой GaAs p<sup>-</sup> типа, нелегированный слой Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, легированный Si ( $N_d = 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) слой Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As. Для формирования затвора используют Al, для получения омических контактов истока (И) и стока (С) – сплав Au-Ge/Ni. В н.з. транзисторе верхний слой Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As частично стравливают до толщины 50 нм. Таким образом, на одной пластине можно получить н.о. и н.з. ГМеП транзисторы.

$$U_{п} = \varphi_{о3} - \Delta E_c/q - (qN_d d^2)/(2\epsilon_0 \epsilon_{п2}), \text{ где}$$

$\varphi_{о3}$  – равновесная высота потенциального барьера металл (затвор) – п/п (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As)  $\approx 1\text{В}$ ;

$d$  – суммарная толщина нелегированного и легированного Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As;

$\epsilon_{п2}$  – его относительная диэлектрическая проницаемость.

Принцип действия ГМеп – транзистора аналогичен принципу действия Меп–транзистора. Между металлическим затвором и расположенным под ним слоем из  $Al_xGa_{1-x}As$ , образуется управляющий переход Ме – п/п. Обедненная область этого перехода располагается, в основном, в слоях  $Al_xGa_{1-x}As$ . Канал н.о. транзистора при  $U_{зи} < 0$  формируется в слое нелегированного GaAs на границе с гетеропереходом в области накопления (ОН) двумерного электронного газа. Под действием управляющего напряжения  $U_{зи}$  изменяется толщина обедненной области перехода Ме – п/п, концентрация  $e^-$  в ОН и ток стока. Электроны поступают в ОН из истока. При достаточно большом (по модулю) отрицательном  $U_{зи} = U_{п}$  обедненная область расширяется настолько, что перекрывает ОН электронов. Ток стока при этом прекращается.

В нормально закрытом транзисторе вследствие меньшей толщины верхнего слоя  $Al_xGa_{1-x}As$  при  $U_{зи} = 0$  проводящий канал отсутствует, т.к. ОН двумерного электронного газа перекрыта обедненной областью управляющего перехода. Канал возникает при некотором положительном  $U_{зи} = U_{п}$ , когда обедненная область управляющего перехода сужается настолько, что ее нижняя граница попадает в ОН электронов.

Стокзатворные характеристики н.о.(1) и н.з.(2) транзисторов приведены на рисунке 4.

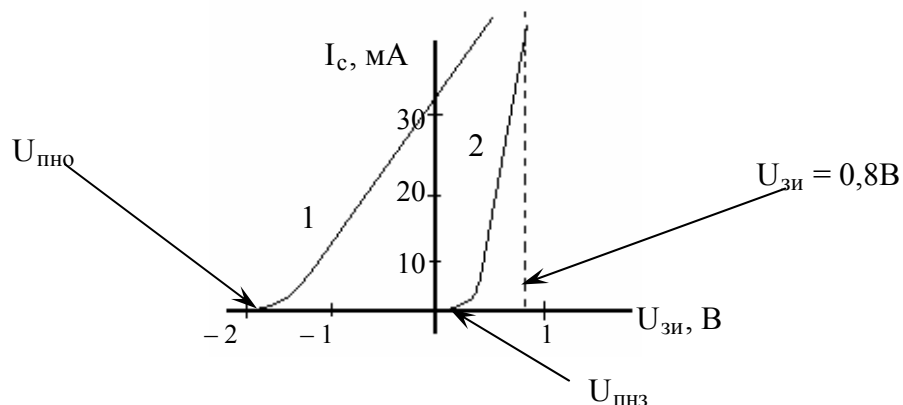


Рисунок 4. Стокзатворные характеристики нормально открытого (1) и нормально закрытого (2) ГМеп – транзисторов ( $L_3 = 0,8$  мкм,  $L_{си} = 4$  мкм, толщины слоев соответствуют значениям, приведенным на предыдущем рисунке).

Благодаря высокой подвижности электронов и малой  $L_3$  практически во всем диапазоне  $U_{зи}$  достигается насыщение дрейфовой скорости электронов в канале ( $v_{нас}$ ) и наблюдается линейная зависимость  $I_c$  от  $U_{зи}$ .

$$I_c = S^* \cdot (U_{зи} - U_{п} - E_{кр}L_3), \text{ где}$$

$E_{кр}$  – критическая напряженность поля;

$S^* = S/(1 + R_{и}S)$ , где  $R_{и}$  – сопротивление И,  $S = \epsilon_0\epsilon_{п2}v_{нас}b/d_k$ .

Для кривой (1)  $S^*/b = 117$  мСм/мм, для кривой (2) – 173 мСм/мм.

Большее значение крутизны н.з. транзистора обусловлено меньшей толщиной легированного донорами  $Al_xGa_{1-x}As$ .

Важным достоинством ГМеП транзисторов, по сравнению со структурой МеП транзисторов являются меньшая плотность поверхностных состояний на границе между  $Al_xGa_{1-x}As$  и диэлектриком, и большая высота барьера Шоттки ( $\phi_{03} \approx 1В$ ). Вследствие меньшей плотности поверхностных состояний уменьшается отрицательный поверхностный заряд и толщина обедненных областей в промежутках И – З и З – С. Это позволяет получить меньшие паразитные сопротивления обедненных областей без самосовмещения. Вследствие большей высоты барьера Шоттки, для ГМеП транзисторов возможно большее (до 0,8В) прямое напряжение  $U_{зи}$ , что особенно важно для н.з. транзисторов, рабочие напряжения на затворах которых могут изменяться лишь в узком диапазоне, ограниченном сверху напряжением управляющего перехода Ме – п/п.

Импульсные и частотные свойства ГМеП транзисторов в основном определяются временем пролета электронов через канал, где они движутся со скоростью насыщения:  $t_{прк} = L_3/v_{нас}$ . При  $T = 300К$   $v_{нас} \approx 2 \cdot 10^7$  см/с. При понижении температуры скорость насыщения увеличивается по закону  $v_{нас} \sim 1/T$ .

Одним из важнейших параметров, характеризующих семейство логических ИМС, является произведение быстродействия на мощность ( $P \times \tau_3$ ), представляющее собой произведение мощности, рассеиваемой одним вентиляем, на время задержки в этом вентиле. Другой сравнительной

характеристикой служит произведение мощности, рассеиваемой одним вентиляем, на квадрат времени задержки в этом вентиле ( $P \times \tau_3^2$ ), что представляет собой произведение энергии на время. В таблице 2 приведены сравнительные характеристики КМОП, МеП, ГМеП ИМС при комнатной температуре.

Таблица 2. Сравнительные характеристики КМОП, МеП, ГМеП ИМС при комнатной температуре.

	$l_k$ , мкм ( $L_3$ , мкм)	$P$ , мВт/вент	$\tau_3$ , нс	$P \times \tau_3$ , Дж· $10^{-15}$ (фДж)	$P \times \tau_3^2$ , Дж·с· $10^{-26}$
МеП	0,3	0,75	16	12	19,2
ГМеП	1,0	1,1	12,2	13,4	16,4
КМОП	1,0	1,8	50	90	450

Из таблицы видно, что для получения близких значений основных характеристик МеП и ГМеП ИМС в первом случае необходима значительно более короткая длина канала, а это приводит к большим технологическим трудностям при их производстве.