

06.1; 06.2

© 1991

КРЕМНИЕВЫЙ ОЖЕ-ТРАНЗИСТОР
С ТУННЕЛЬНЫМ МОП-ЭМИТТЕРОМИ.В. Грехов, Е.В. Остроумова,
А.А. Рогачев, А.Ф. Шулекин

В 1965 г. Х. Крёмер высказал предположение¹ о том, что на основе гетеропереходов с сильно различающимися величинами ширины запрещенной зоны E_g можно получить транзистор с инжекцией горячих электронов, способных вызвать ударную ионизацию в области базы (Оже-транзистор). Коэффициент усиления в таком транзисторе в схеме с общей базой может быть больше единицы ($\alpha > 1$).

Однако эта идея до сих пор не была реализована, т.к. обычно в гетеропереходах носители попадают из эмиттера в базу с энергией меньшей, чем E_g узкозонной базы. Это происходит из-за того, что носители туннелируют в базу сквозь барьер, образованный разрывом зон и областью объемного заряда перехода, для чего достаточно термической активации носителей лишь на малую долю высоты барьера, но этой энергии не достаточно для ударной ионизации в базе.

По нашему мнению, системой, в которой возможна инжекция горячих носителей с энергией большей, чем ширина запрещенной зоны базы, является МДП-структура с туннельно-тонким (несколько нм) слоем диэлектрика, например переход металл-окисел кремния-кремний. При смещении такой структуры в обратном направлении в полупроводнике *p*-типа у границы раздела $Si - SiO_2$ появляется индуцированный внешним полем слой дырок толщиной $\sim 10^{-7}$ см, которые образуют самосогласованный квантовый колодец у поверхности кремния [2] (рис. 1). Сочетание в структуре индуцированного слоя противоположного по отношению к объему знака проводимости с инжектирующим контактом металл-туннельный тонкий окисел-полупроводник дает транзисторную МОП-структуру с высокоэффективным туннельным эмиттером, с индуцированной базой предельно малой толщины ($\sim 10 \text{ \AA}$) и высокой концентрацией носителей в ней ($p \geq 10^{20} \text{ см}^{-3}$); коллектором в этом транзисторе служит объем *p*-типа (рис. 1, вставка).

Впервые о возможности получения МОП-транзисторов с индуцированной базой было сообщено в работе [3], где, как и в более ранних работах (см., например, [4]), туннельные эмиттеры металл-

¹Работа Х. Крёмера цитируется по книге [1].

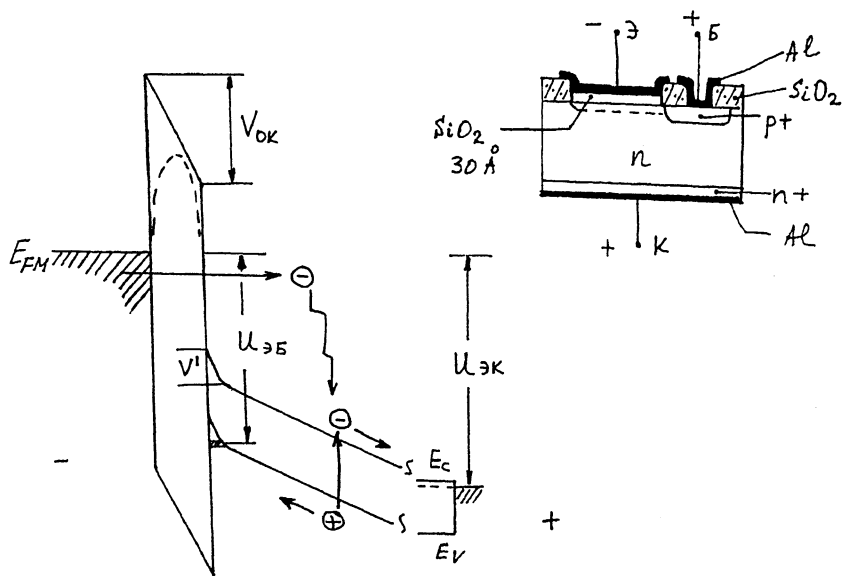


Рис. 1. Зонная диаграмма МОП-структуры с туннельно-тонким слоем окисла (Оже-транзистора), смещенной в обратном направлении. Пунктиром показан потенциальный барьер для электронов с учетом сил изображения и глубины проникновения волновой функции электрона в окисел. На вставке - схема Оже-транзистора. Пунктиром обозначена индуцированная база; p^+ - контакт к базе.

окисел кремния имели малый коэффициент инжекции. Проведенный нами ранее [5] анализ излучательных характеристик кремниевых МОП-диодов с туннельно-прозрачным слоем окисла показал, что эффективность туннельного эмиттера γ' приближается к единице, когда ток, текущий через структуру, превышает 10 А/см^2 . Высокий коэффициент инжекции является необходимым условием для создания транзистора с коэффициентом усиления $\alpha \sim 1$ или больше, причем $\alpha \geq 1$ может быть только при условии, если есть ударная ионизация в объеме базы или коллектора.

Нами были изготовлены и предварительно исследованы Оже-транзисторы на структурах $Al - SiO_2 - nSi$ [КЭФ 0.5 (111)] с туннельно-тонким термическим окислом. Слой окисла толщиной $\sim 30 \text{ \AA}$ ($700 \text{ }^\circ\text{C}$, сухой O_2) был выращен в эмиттерных окнах размером $(10 \times 40) \text{ мкм}^2$; p^+ - контакты к индуцированному базовому слою получены диффузией бора ($p = 10^{18} \text{ см}^{-3}$) в кремний p -типа в окна для базовых контактов, а p^+ -контакт к коллектору - диффузией фосфора ($n = 10^{20} \text{ см}^{-3}$) в подложку p -типа. Металлизация структуры осуществлялась напылением алюминия при температуре подложки $200 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 1, вставка).

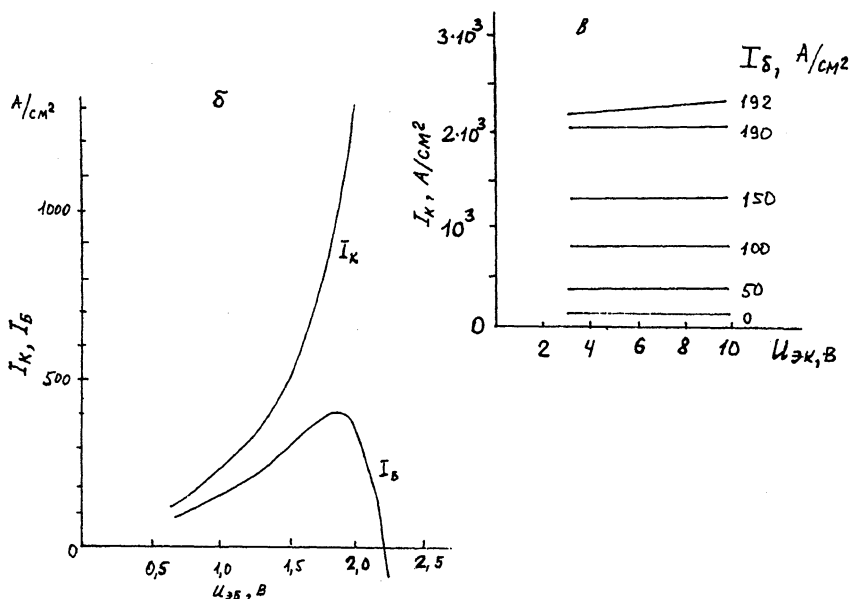
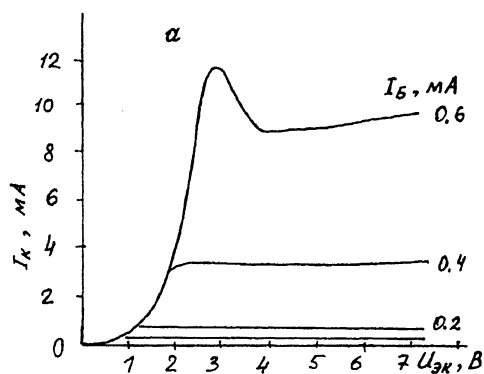


Рис. 2. Токовые характеристики кремниевого Оже-транзистора с туннельным МОП-эмиттером: а - выходные характеристики в схеме с общим эмиттером ($S_{\text{эмит}} = 4 \cdot 10^{-6}$ см²); б, в - теоретические зависимости коллекторного (I_K) и базового (I_B) токов от напряжения на базе - (б) и коллекторного тока от напряжения на коллекторе и тока базы - (в), рассчитанные с учетом ударной ионизации в области перехода база-коллектор; $N_d = 10^{16}$ см⁻³, $N_s = 5 \cdot 10^{12}$ см⁻², $d_{ок} = 12$ Å.

На рис. 2, а приведены выходные характеристики МОП-транзистора в схеме с общим эмиттером. Коэффициент усиления по току

$\beta = \frac{\partial I_K}{\partial I_B}$ растет с ростом тока от значений 6-8 при $I_K = 50-60 \text{ А/см}^2$ до величины $\beta = 40-100$ при $I_K \geq 10^3 \text{ А/см}^2$. Рост β является следствием ударной ионизации, производимой горячими электронами, инжектированными из металла, и, в принципе, при высокой эффективности эмиттера β может неограниченно расти, т.к. в результате ударной ионизации появляется дополнительный дырочный ток, который течет от коллектора к базе, в то время как ток от внешнего источника течет от базы к эмиттеру. Возникает положительная обратная связь, и при достижении величины $\alpha > 1$ появляется отрицательное сопротивление по базе (рис. 2, а).

Был проведен теоретический расчет коллекторных и базовых характеристик транзистора с учетом ударной ионизации в области объемного заряда коллектора, для чего рассматривались туннельные токи электронов из металла в зону проводимости кремния и на поверхностные состояния в запрещенной зоне; туннельные токи дырок из полупроводника в металл, а также токи электронов и дырок, возникших в результате ударной ионизации на границе база-коллектор. Расчет потенциальной ямы для дырок вблизи поверхности полупроводника выполнен в приближении Хартри в предположении, что спин-орбитальное взаимодействие в валентной зоне кремния мало. Поправка на обменно-корреляционное взаимодействие, приводящая к уменьшению ширины запрещенной зоны вблизи поверхности, рассчитана в приближении локальной плотности [2]. Результаты расчета показывают, что при плотности дырок у поверхности $P_S = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, что соответствует полю в диэлектрике $E_{СК} = 10^7 \text{ В/см}$ (или же туннельному току электронов сквозь диэлектрик 10^3 А/см^2), толщина дырочного слоя составляет 13 Å, глубина самосогласованного колодца $V' = 0.6 \text{ эВ}$, а энергия Ферми для дырок $E_F = 0.07 \text{ эВ}$.

Расчет коллекторных характеристик (рис. 2, б) показывает, что учет ударной ионизации в области объемного заряда база-коллектор приводит к сильному росту коэффициента усиления β , что наблюдается на экспериментальных зависимостях коллекторного тока I_K ($U_{ЭК}$) (рис. 2, а). Верхняя теоретическая кривая I_K на рис. 2, б соответствует $\beta = \infty$ а верхняя экспериментальная кривая $I_K = 10^3 \text{ А/см}^2$ на рис. 2, а соответствует началу генерации.

На рис. 2, в приведены рассчитанные токовые характеристики транзистора ($I_K; I_B$) в зависимости от напряжения на базе. Результаты расчета показывают, что с ростом напряжения на базе ($U_{ББ}$) ток базы (I_B) после достижения максимального значения падает в результате появления дырочного тока за счет ударной ионизации, в то время как коллекторный ток продолжает нарастать ($\beta \rightarrow \infty$). Возникающая неустойчивость при $\beta \rightarrow \infty$ может вызвать колебания тока в цепи базы, что должно отразиться на выходных характеристиках транзистора. Экспериментально это проявляется на кривых коллекторного тока $I_K(U_{ЭК})$ в виде *N*-образного участка (рис. 2, а).

Наиболее важным подгоночным параметром в расчетах является толщина слоя окисла, которая для количественного согласования с экспериментальными данными принимается равной 12 \AA . Это величина существенно меньше измеренной в образцах геометрической толщины окисла, во-первых, потому, что плотность электронов в слое окисла в перпендикулярном к поверхности направлении $(|\psi(\bar{z})|^2)$ остается очень высокой вплоть до удаления вглубь окисла от металла на 10 \AA ; и, во-вторых, учет сил изображения также уменьшает ширину и высоту барьера. Кроме того, в окисле имеются локальные утоньшения, через которые преимущественно течет туннельный ток. Поэтому выбор значения эффективной толщины окисла 12 \AA является оправданным.

В отличие от Оже-транзистора, предложенного Х. Крёмером, где ударная ионизация происходит в базе (в которой в основном протекают диффузионные токи), в исследуемом МОП-транзисторе база, индуцированная внешним полем, имеет толщину 13 \AA и инжектированные электроны пролетают базу без потери энергии (баллистический пролет), производя ударную ионизацию в области объемного заряда на границе база-коллектор. Характерное время баллистического пролета сверхтонкой индуцированной базы горячими электронами $\tau_b < 10^{-14} \text{ с}$, а время пролета области объемного заряда коллектора ($N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $W_{012} = 1 \text{ мкм}$) в транзисторе при падении напряжения на коллекторе $U = 7 \text{ В}$ составляет $\tau_k = 10^{-11} \text{ с}$.

Заряд емкости база-эмиттер производится током Оже-дырок за время, примерно равное $\tau \approx 10^{-9} \text{ с}$, что определяет инерционность транзистора в импульсном режиме. В то же время при генерации синусоидальных колебаний время зарядки емкости база-эмиттер практически не играет роли; предельная частота транзистора в данном случае составляет 10^{11} Гц и определяется временем пролета электронами области объемного заряда между базой и коллектором.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] М и л н с А., Ф о й х т Д. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник. М.: Мир, 1975.
- [2] А н д о Т., Ф а у л е р А., С т е р н Ф. Электронные свойства двумерных систем. М.: Мир, 1985.
- [3] S i m m o n s J.G., T a y l o r G.W. // Solid-St. Electr. 1986. V. 29. P. 287-303.
- [4] C a r d H.C., R h o d e r i c k E.H. // Solid-St. Electr. 1973. V. 16. P. 365-374.
- [5] Г р е х о в И.В., О с т р о у м о в а Е.В. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 19. С. 1209-1212.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
31 мая 1991 г.