

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВОГО ОЖЕ-ТРАНЗИСТОРА С ТУННЕЛЬНЫМ МОП ЭМИТТЕРОМ И ИНДУЦИРОВАННОЙ БАЗОЙ

И. В. Грехов, А. Ф. Шулекин, М. И. Векслер¹

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 10.06.1992. Принята к печати 22.06.1992)

Приведены результаты исследования статических характеристик кремниевого оже-транзистора с туннельным МОП эмиттером и индуцированной базой.

Туннельно-тонкий окисел МОП эмиттера изготавливался путем окисления в сухом кислороде при $T = 700^\circ\text{C}$ в течение 20—60 мин, размер эмиттера $20 \times 20 \text{ мкм}^2$. Исследования показали, что на зависимости дифференциального коэффициента усиления β_d от напряжения эмиттер-база имеются участки резкого возрастания через интервалы, соответствующие возрастанию энергии туннелирующих электронов на величину порядка E_g кремния; этим участкам соответствует резкое замедление роста I_B , свидетельствующее о появлении внутреннего источника дырок. На основании этого делается вывод о возможной многокаскадной оже-ионизации в области объемного заряда коллектора, производимой туннелирующими горячими электронами. Транзисторы имели $\beta_d = 700\text{—}900$ и хорошо воспроизводились технологически, что в сочетании с ожидаемым высоким быстродействием дает возможность рассматривать их в качестве перспективной элементной базы кремниевой микроэлектроники.

Идея о возможности использования оже-процесса для увеличения коэффициента усиления гетеротранзистора впервые была высказана Х. Кремером в 1965 г. [1]; горячие носители, способные вызвать ударную ионизацию в базовом слое, предполагалось получить инжекцией из эмиттерного слоя со значительно большей, чем в базе, шириной запрещенной зоны. Возможность практической реализации этой идеи впервые была показана, насколько нам известно, в [2]. В этой работе было обнаружено, что в кремниевом транзисторе с туннельным МОП эмиттером и сверхтонкой индуцированной базой² наблюдается резкий рост дифференциального коэффициента усиления с ростом плотности тока j_c от $\beta_d = 6\text{—}8$ при $j_c = 50 \text{ А/см}^2$ до $\beta_d = 100$ при $j_c > 1000 \text{ А/см}^2$, что предположительно объяснялось развитием оже-процесса с ростом напряжения на туннельно-тонком окисле. Теоретический расчет коллекторных и базовых характеристик, выполненный с учетом ударной ионизации в области коллектора, производимой горячими электронами, туннелирующими из металла сквозь окисел в кремний и баллистически пролетающими сверхтонкую ($\sim 15 \text{ \AA}$) индуцированную базу, дал разумное согласие с экспериментом.

¹ Санкт-Петербургский государственный технический университет, 195251, Санкт-Петербург, Россия.

² Кремниевый транзистор с туннельным МОП эмиттером и индуцированной базой был довольно подробно исследован в [3]. Однако вследствие некоторых конструктивных особенностей исследованных приборов авторы не наблюдали в них оже-процесса. Коэффициент усиления и расчетное быстродействие в ключевом режиме были сравнительно невысокими, что явно не стимулировало интерес к работам в этом направлении; в вышедшей недавно работе [4] были по сути повторены результаты [3]. Сама по себе оже-ионизация, производимая туннелирующими через тонкий слой SiO_2 электронами, впервые наблюдалась в [2] на диодной структуре, где она обеспечивала $\sim 5\%$ от полного тока через диод.

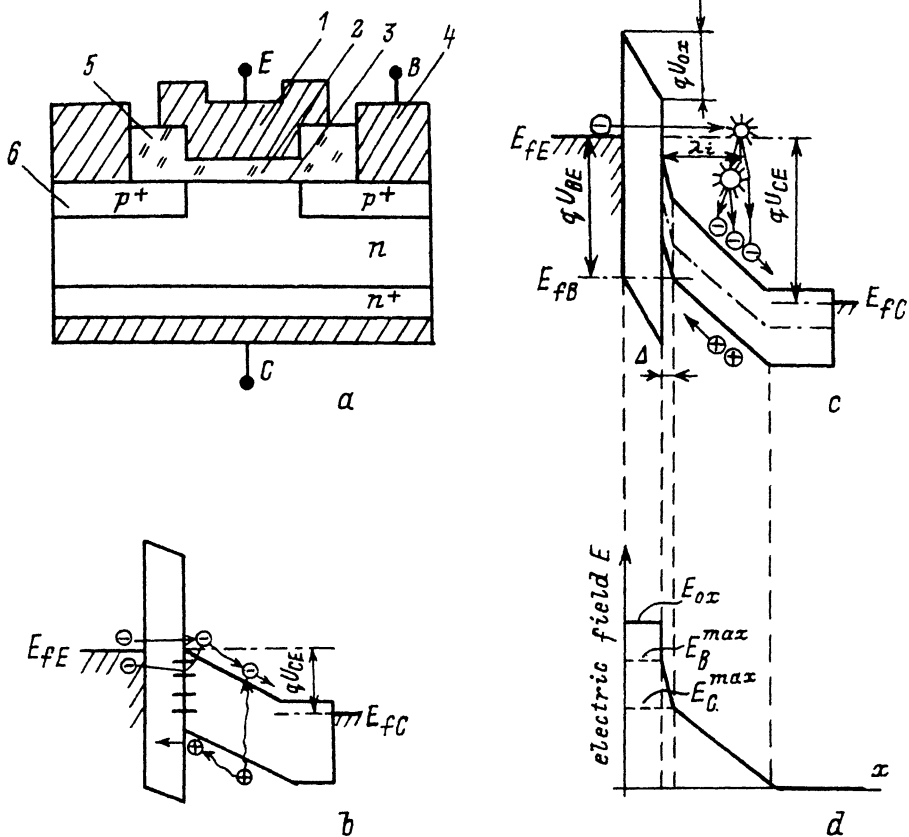


Рис. 1. *a* — конструкция оже-транзистора. 1 — металлический эмиттер, 2 — туннельно-тонкий окисел, 3 — индуцированная база, 4 — металлический базовый контакт, 5 — защитный толстый окисел, 6 — диффузионные контактные области базы. *b* — зонная диаграмма транзистора при рабочем смещении эмиттер-коллектор. E_{fE} , E_{fC} — уровни Ферми эмиттера и коллектора соответственно. *c* — зонная диаграмма транзистора при рабочих смещениях эмиттер-коллектор и эмиттер-база. E_{fB} — уровень Ферми индуцированной базы при большом напряжении U_{EB} , λ_i — длина свободного пробега электрона до ионизации, Δ — толщина индуцированной базы. *d* — распределение напряженности электрического поля в транзисторе. E_{Ox} — поле в окисле, E_B^{max} — максимальное поле в базе, E_C^{max} — максимальное поле в коллекторе.

Расчетные значения пролетных времен таких приборов чрезвычайно малы — менее 10^{-14} с для баллистического пролета через индуцированную базу и $\sim 10^{-12}$ с для пролета через область объемного заряда (ООЗ) коллекторного перехода с напряжением пробоя около 8 В. Основным процессом, определяющим быстродействие, очевидно, будет перезарядка емкости туннельного МОП эмиттера, удельная величина которой весьма высока ($\sim 10^{-6}$ Ф/см²) из-за малой толщины окисла (20–30 Å). Однако возможность работы при очень высоких плотностях тока ($j_c > 10^4$ А/см²) и сильная зависимость интенсивности оже-процесса от напряжения на окисле, позволяющая в принципе получить большую крутизну характеристики транзистора, дают возможность рассчитывать на времена перезарядки $\sim 10^{-11}$ с. Транзисторы с таким быстродействием должны иметь большие перспективы тем более, что изготовление их осуществляется стандартными технологическими методами кремниевой микроэлектроники.

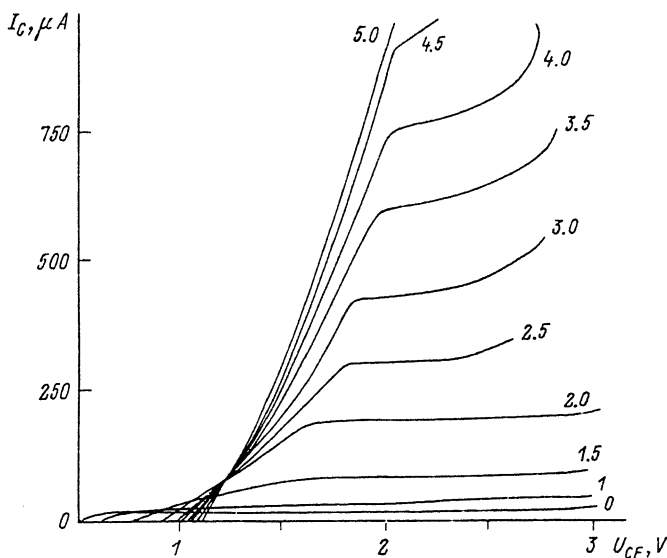


Рис. 2. Выходные характеристики транзистора. Цифры у кривых соответствуют I_B , мкА.

1. Конструкция образцов и технология их изготовления

Конструкция оже-транзистора с туннельным МОП эмиттером показана на рис. 1, а. В качестве исходного материала использовался n -Si с $\rho = 0.3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, n^+ -слой создавался диффузией фосфора с $n_s \approx 10^{21} \text{ см}^{-3}$, p^+ -слой — диффузией бора с $p_s \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ на глубину 2—3 мкм. Туннельно-тонкий окисел толщиной 20—30 Å выращивался при 700°C в токе сухого кислорода; время окисления составляло 20—60 мин. Контакты создавались напылением алюминия при температуре подложки $\sim 200^\circ\text{C}$ без последующего вжигания во избежание повреждения туннельно-тонкого окисла. Размер окна МОП эмиттера составлял 20×20 мкм. Воспроизводимость характеристик приборов в партии и от партии к партии была достаточно хорошей.

2. Принцип работы оже-транзистора

Поскольку оже-транзистор с туннельным МОП эмиттером и индуцированной сверхтонкой базой является сравнительно новым прибором, представляется необходимым обсудить вкратце основные физические процессы, определяющие его работу. Зонная диаграмма транзистора при приложенном смещении эмиттер—коллектор U_{EC} показана на рис. 1, б. Ток, протекающий через структуру, состоит из тока электронов, туннелирующих в зону проводимости полупроводника, тока через поверхностные состояния интерфейса Si—SiO₂ (электроны туннелируют на эти уровни с последующим забросом в зону проводимости) и тока термогенерации в области объемного заряда (ООЗ). При этом дырки не накапливаются на границе Si—SiO₂, а туннелируют в металл. В этих условиях с увеличением напряжения на структуре увеличивается ширина ООЗ, но практически не увеличивается напряжение на окисле.

При приложении базового смещения U_{EB} инжекция дырок из базового p^+ -контакта приводит к образованию инверсионного дырочного слоя у интерфейса Si—SiO₂ (рис. 1, с), напряжение на окисле U_{ox} резко возрастает, дно зоны проводимости начинает опускаться относительно уровня

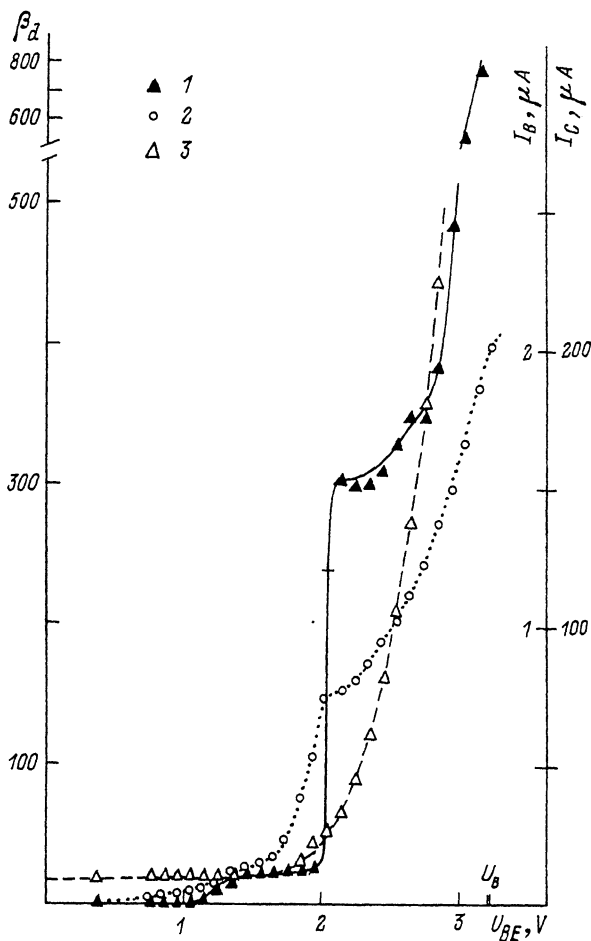


Рис. 3. Зависимости β_d (1), I_B (2) и I_C (3) от U_{EB} .

Ферми металла, что приводит к увеличению инжекции электронов сквозь туннельно-тонкий окисел и индуцированную базу в коллектор. Поскольку толщина базы (10—20 Å в наших условиях) существенно меньше длины свободного пробега (≈ 100 Å), электроны пролетают ее баллистически. При достаточно большом U_{EB} электроны, попадающие в полупроводник, могут иметь энергию, достаточную для ударной ионизации (оже-процесс); образующиеся при этом дырки дрейфуют к индуцированной p -базе. Появление такого дополнительного источника дырочного тока естественно должно приводить к увеличению коэффициента усиления транзистора. Величина критического поля при пробое тонких слоев SiO_2 очень высока (более 10^7 В/см), поэтому к туннельно-тонкому окислу толщиной $d = 20\text{--}30$ Å может быть приложено напряжение в 2—3 В и даже более; кроме того, после туннелирования все электроны имеют импульс, направленный вдоль поля, и все они приобретают дополнительную энергию в поле индуцированной базы и в ООЗ коллектора (рис. 1, d) на длине свободного пробега. Поэтому при достаточно большом напряжении $U_{ок}$ в принципе могут иметь достаточно большую вероятность многокаскадные оже-процессы, что должно резко повышать коэффициент усиления.

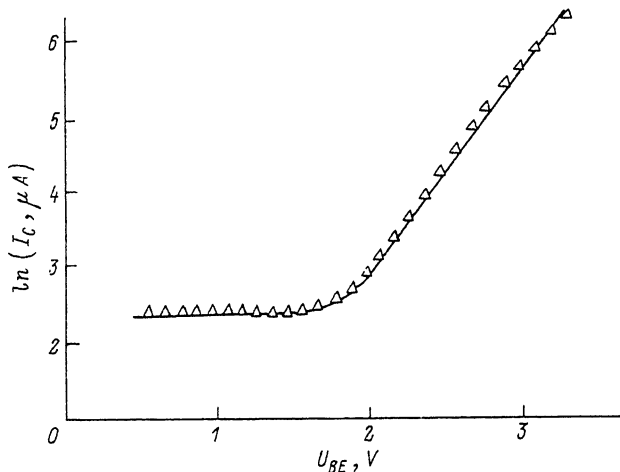


Рис. 4. Зависимость $I_C = f(U_{EB})$ в логарифмическом масштабе.

3. Исследование статических характеристик оже-транзистора

Характеристики транзистора исследовались при включении по схеме с общим эмиттером. Регистрировались одновременно токи коллектора I_C и базы I_B , напряжение эмиттер—коллектор U_{EC} и эмиттер—база U_{EB} . Для измерения дифференциального коэффициента усиления $\beta_d = dI_C / dI_B$ и крутизны характеристики $g_m = dI_C / dU_{EB}$ на напряжение или ток в базовой цепи накладывался переменный сигнал малой амплитуды и регистрировалась переменная составляющая тока коллектора; пороговая чувствительность при этом была $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ А/В. При измерении β_d коллекторное напряжение выбиралось так, чтобы во всем диапазоне U_{EB} транзистор находился в активном режиме.

На рис. 2 приведены типичные выходные характеристики $I_C = f(U_{EC})$ для различных I_B . Характеристики имеют обычный для оже-транзистора вид, но по сравнению с [2] усовершенствование технологии позволило увеличить статический коэффициент усиления β и устранить участок отрицательного сопротивления при выходе из насыщения в предельных режимах. Как и в [3], β_d растет с ростом I_C , и при $j_C \approx 10^3$ А / см² в среднем $\beta_d = 200—300$.

На рис. 3 приведены типичные зависимости β_d , I_C и I_B от напряжения эмиттер—база U_{EB} .

Как следует из модели, описанной в разделе 2, ток коллектора имеет значительную величину (~ 10 мкА) уже при $U_{EB} = 0$ и не зависит от U_{EB} до $U_{EB} = U_0 \approx 1$ В. При $U_{EB} = U_0$ начинается рост коллекторного тока, свидетельствующий об опускании дна зоны проводимости относительно уровня Ферми металла, т. е. об увеличении инжекции электронов в коллектор. Поскольку для этого необходимо формирование инверсного слоя у интерфейса, из условия сильной инверсии следует, что $U_0 \approx \frac{1}{q}(E_g - E_a) + U_{FB}$, где E_a — расстояние от дна зоны проводимости до уровня легирующей примеси в коллекторе, а U_{FB} — напряжение плоских зон. Таким образом, ожидаемая величина U_0 должна быть порядка $E_g/q \approx 1$ В. Эта величина, конечно, может колебаться от образца к образцу из-за различия условий на интерфейсе и контактах, а также из-за возможного дополнительного падения напряжения на сопротивлении базового слоя. Величина U_0 определялась дифференциальным методом по крутизне $g_m = dI_C / dU_{EB}$ с чувствительностью $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ А / В. Результаты измерений, усредненные по более чем 100 приборам, дали $U_0 = 1.13$ В (см. таблицу). С даль-

Усредненные значения напряжения эмиттер-база, соответствующие участкам роста β_d и величины интервалов между этими значениями

$U_0, \text{В}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$
1.13	2.15	3.30	4.40
$U_1 - U_0$	1.02	—	—
$U_2 - U_1$	—	1.15	—
$U_3 - U_2$	—	—	1.1

нейшим ростом $U_{EB} I_C$ монотонно нарастает, и при $U_{EB} \geq 2 \text{ В}$ эта зависимость близка к экспоненте (рис. 4). Дифференциальный коэффициент усиления $\beta_d = 0$ на участке $0 < U_{EB} < U_0$, хотя базовый ток нарастает монотонно, т. е. на этом участке нет заметной инжекции электронов через окисел. При $U_{EB} > U_0$ начинается довольно плавное нарастание β_d до ≈ 20 , а при $U_{EB} = U_1 = 2.15 \text{ В}$ β_d резко возрастает до ~ 300 ; следующее резкое нарастание до $\beta_d \approx 900$ происходит снова при увеличении U_{EB} примерно на 1.1 В ($U_{EB} = U_2$). Такое поведение наблюдалось у всех без исключения исследованных транзисторов общим количеством более 100 во всех партиях. На рис. 3 приведены наиболее типичные зависимости; однако, у некоторых транзисторов четко прослеживался еще один резкий подъем на зависимости $\beta_d = f(U_{EB})$. Результаты измерений, усредненные по большому количеству приборов из нескольких партий, приведены в таблице. Таким образом, резкое увеличение β_d наблюдается через интервалы напряжений U_{EB} , соответствующие увеличению энергии туннелирующих электронов на величину, примерно равную E_g кремния; при этом на зависимости $I_B = f(U_{EB})$ наблюдается резкое замедление скорости нарастания I_B , что при монотонном характере роста I_C свидетельствует о появлении внутреннего источника дырок.

Такой характер описанных зависимостей связан, скорее всего, с многокаскадной оже-ионизацией в ООЗ коллекторного перехода, производимой туннелирующими из эмиттера горячими электронами. Согласно [6, 7], определенная вероятность ионизации имеется уже для электронов с энергией, близкой к E_g . В нашем случае для части горячих электронов, которые после взаимодействия с решеткой продолжают двигаться вдоль поля, существующего в ООЗ ($E \approx 10^5 \text{ В / см}$), набор энергии из-за взаимодействия с полем на длине свободного пробега примерно соответствует ее потере на испускание оптического фонона. При этом следует ожидать существенного увеличения вероятности ионизации для электронов с энергией, близкой к порогу ионизации. Интересно отметить также, что первый резкий всплеск β_d при $U_{EB} = U_1$ может соответствовать несколько меньшей разности напряжений, чем последующий, т. е. $U_1 - U_0 < U_2 - U_1$. Это связано с тем обстоятельством, что до первого столкновения все туннелирующие электроны имеют примерно одинаковую энергию и импульс, направленный вдоль поля коллектора; поэтому все они приобретают от этого поля дополнительную энергию.

Заключение. Исследование статических характеристик кремниевого оже-транзистора с туннельным МОП эмиттером и индуцированной базой показало, что на зависимости $\beta_d = f(U_{EB})$ имеются участки резкого возрастания β_d , повторяющиеся через интервалы, соответствующие увеличению энергии туннелирующего электрона примерно на E_g кремния. Эти участки совпадают с резким замедлением нарастания $I_B = f(U_{EB})$, что свидетельствует о появлении внутреннего источника дырок. Такой характер зависимостей связан, по-видимому, с многокаскадной оже-ионизацией в ООЗ коллекторного перехода, производимой горячими носителями, туннелирующими из эмиттера. Исследованные транзисторы

имели $\beta_d \approx 700-900$ при $j_C \approx 10^3$ А / см² и достаточно хорошо воспроизводились технологически. Поскольку оценки показывают возможность получения очень высокого быстродействия в таких приборах, их предположительно можно рассматривать в качестве перспективной элементной базы кремниевой микроэлектроники.

Авторы выражают признательность М. Л. Павловой, С. В. Белову и О. В. Войцышенко за содействие в изготовлении образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] А. Милнс, Д. Фойхт. Гетеропереходы и переходы металл—полупроводник, 432. М. (1975).
- [2] И. В. Грехов, Е. В. Остроумова, А. А. Рогачев, А. Ф. Шулекин. Письма ЖТФ, 17, 44 (1991).
- [3] J. G. Simmons, G. W. Taylor. Sol. St. Electron., 29, 287 (1986).
- [4] T. Yoshimoto, K. Matsumoto, K. Sakamoto, T. Sakata. Japan. J. Appl. Phys., 30, 2012 (1991).
- [5] E. R. Fossum, R. C. Barker. IEEE Trans. Electron. Dev., ED-31, 1168 (1984).
- [6] W. E. Drummond, J. L. Moll. J. Appl. Phys., 42, 5556 (1971).
- [7] N. Sano, M. Tomizawa, A. Yoshii. Japan. J. Appl. Phys., 30, 3662 (1991).

Редактор В. В. Чалдышев
