

06.2;12

## НЕУСТОЙЧИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА ПО ПЛОЩАДИ В КРЕМНИЕВОМ ОЖЕ-ТРАНЗИСТОРЕ С ТУННЕЛЬНЫМ МОП-ЭМИТТЕРОМ

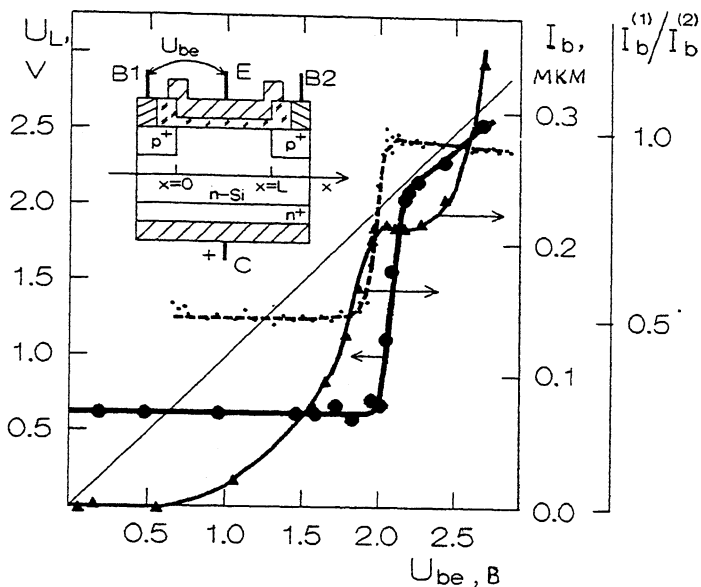
© С.В.Белов, М.И.Векслер, И.В.Грехов, А.Ф.Шулекин

В данной работе экспериментально показано, что неоднородное распределение тока по площади туннельного МОП-перехода может при определенных условиях потерять устойчивость, в результате чего происходит скачкообразное изменение этого распределения. До настоящего времени в работах, посвященных туннельным МОП-структурам ([1,2] и др.), неустойчивости распределения тока не рассматривались и, более того, предполагалось, что ток по площади перехода распределен равномерно.

В эксперименте исследовались транзисторные структуры с двумя базовыми выводами (рис. 1), один из которых обычно использовался как "задающий" электрод и подсоединялся к источнику базового напряжения  $U_{be}$ , а с другого снималось напряжение ( $U_L$ ) с помощью высокоомного (входное сопротивление  $\sim 10^{13}$  Ом) потенциального зонда. Кроме того, сравнивались характеристики прибора при подаче напряжения  $U_{be}$  на один или же оба электрода (в последней ситуации оба вывода используются как "задающие").

Туннельно-тонкий окисел формировался путем окисления подложек  $n$ -Si ( $\rho \sim 1$  Ом·см) в сухом кислороде при  $700^\circ\text{C}$  в течение 20 мин. Размеры окна эмиттера:  $w = 20$  мкм,  $L = 40$  мкм.

На рис. 1 (сплошные линии) представлены экспериментально снятые зависимости  $U_L(U_{be})$  и базового тока  $I_b(U_{be})$  при управлении по одному "задающему" электроду. Коллекторное напряжение  $U_{ce}$  было фиксированным (4В) и заведомо большим, чем базовое, так что транзистор работал в активном режиме [3]. Как следует из эксперимента, вплоть до  $U_{be} \sim 2$  В дальний электрод вообще "не чувствует" каких-либо изменений потенциала "задающего" электрода. Подключение двух базовых электродов к генератору  $U_{be}$  приводило при этом к удвоению коллекторного тока  $I_c$ . Это означает, по сути, что образец в этом диапазоне базовых напряжений представляет собой два не связанных между собой транзистора. Далее  $U_L$  очень резко становится близким к  $U_{be}$ , т. е. распределение потенциала базы  $U(x)$  вдоль эмиттера становится почти однородным. При дальнейшем росте  $U_{be}$  однородность несколько ухудшается.



**Рис. 1.** Большие кружки — напряжение  $U_L$  на “дальней” базе B2; треугольники — базовый ток  $I_b$  (при управлении по одной базе B1); точки — отношение потребляемых прибором базовых токов при управлении по одной базе B1 ( $I_b^{(1)}$ ) и по двум параллельно включенным базам B1 и B2 ( $I_b^{(2)}$ ). Все величины представлены в зависимости от напряжения  $U_{be}$  на “задающей” базе B1. Тонкой прямой линией показана зависимость  $U_L(U_{be})$ , которая бы имела место при идеальной эквипотенциальности базы. На врезке: конструкция исследуемого Оже-транзистора.

Дополнительную информацию о распределении напряжения вдоль эмиттера дает приведенное на рис. 1 сравнение потребляемых базовых токов при управлении по одному ( $I_b^{(1)}$ ) и двум ( $I_b^{(2)}$ ) электродам: построено отношение  $I_b^{(1)}/I_b^{(2)}$  в зависимости от напряжения на базе (базах), через которую подается ток. Ясно, что при идеальной эквипотенциальности это отношение равнялось бы 1, а при сильной локализации тока — 1/2. В нашем случае практически до  $U_{be} \sim 2$  В отношение токов близко к 1/2. При подавлении эффекта локализации ( $U_{be} \sim 2$  В) отношение почти достигает 1.

Приведенные данные показывают, что при  $U_{be} \leq 2$  В ток протекает через туннельный МОП-переход только вблизи “задающего” базового электрода. При  $U_{be} \sim 2$  В происходит скачкообразное расширение области протекания тока. Подчеркнем, что при этом структура не переходит во

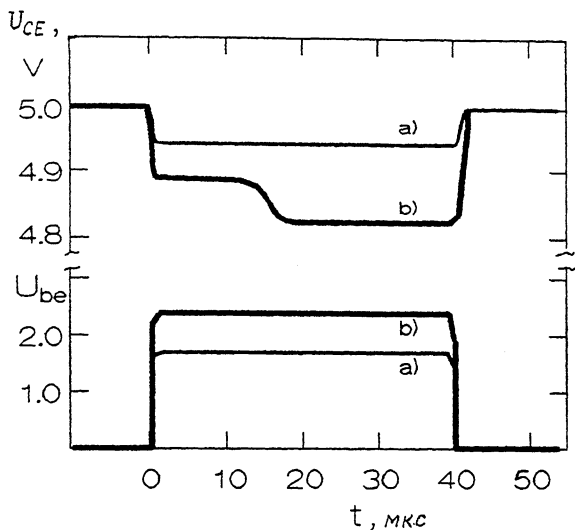
“включенное” состояние [4] и, следовательно, продолжает потреблять базовый ток [5].

Величина базового напряжения  $U_{be} \sim 2$  В примерно соответствует началу заметной Оже-ионизации в коллекторе, т. е. появлению дополнительного внутреннего источника, компенсирующего потери дырок в инверсионном слое [5]. Если при увеличении напряжения на диэлектрике (т. е. при увеличении  $U_{be}$ ) ток Оже-ионизации растет быстрее, чем утечка в металл, то количество дырок, которое необходимо поставлять из базового контакта для поддержания заданного напряжения на диэлектрике, будет уменьшаться с ростом напряжения на нем. Как показано в [5], одним из следствий такого эффекта является  $N$ -образная зависимость базового тока транзистора от напряжения на базе (это же видно на рис. 1). Наличие  $N$ -образности, в свою очередь, может приводить к неустойчивости распределения плотности тока по площади структуры. В описанном эксперименте это проявляется в скачкообразном росте  $U_L$  при увеличении  $U_{be}$  (рис. 1).

Действительно, потеря устойчивости “приэлектродного” распределения тока должна происходить из-за того, что небольшое увеличение потенциала базы  $U(x)$  в некоторой точке приводит (при  $N$ -образной зависимости плотности тока утечки в этой точке от  $U$ ) к уменьшению количества дырок, которое должно быть доставлено к этой точке из базового электрода. Следствием этого является уменьшение величины базового тока, протекающего вдоль инверсной базы к этой области. Последнее означает, что падение напряжения на толще базы уменьшается, что увеличивает напряжение  $U$  в рассматриваемой точке. Таким образом, если  $N$ -образность на локальной входной характеристике (одномерного прибора) выражена достаточно сильно, то прослеживается явная положительная обратная связь.

Наблюдающееся скачкообразное расширение области протекания эмиттерного тока связано именно с началом Оже-ионизации. Предположение о том, что оно происходит в силу каких-то других причин, неизбежно наталкивается на противоречие с экспериментальным фактом некоторого спада  $I_b$  вблизи области эффекта. Расширение рабочей области прибора не за счет Оже-эффекта должно было бы привести, напротив, к существенному росту потребления тока из “задающего” базового электрода.

Весьма специфически рассматриваемый эффект проявляется при исследовании переходного процесса установления коллекторного тока. Для соответствующих измерений использовались те же структуры; последовательно с прибором (в цепь коллектора) включалось небольшое



**Рис. 2.** Эпюры коллекторного напряжения  $U_{ce}$ , иллюстрирующие переходный процесс установления коллекторного тока  $I_c$ . Величина  $I_c$  в любой момент времени легко определяется как  $I_c = (5V - U_{ce})/R$ , где  $R = 3 \text{ кОм}$  — последовательное сопротивление в цепи коллектора. “Двухстадийность” установления  $I_c$  имеет место, только если амплитуда базового импульса  $U_{be}$  превышает  $\sim 2 \text{ В}$ .

(3 кОм) сопротивление, и на систему “прибор плюс сопротивление” подавалось постоянное напряжение 5 В. Во всех режимах напряжение  $U_{ce}$  было не менее 4 В (активный режим). В “задающую” базу транзистора подавался прямоугольный импульс напряжения длительностью  $\sim 40 \mu\text{с}$  и регистрировалась эпюра напряжения на структуре (что позволяло определять ток  $I_c$ ). Выяснилось (рис. 2), что процесс установления коллекторного тока может проходить как бы в две стадии. “Двухстадийность” установления тока имеет место, лишь если амплитуда подаваемого базового импульса превосходит примерно 2 В, т. е. то же характерное значение, что и при “статических” измерениях. Удлинение импульса с амплитудой менее 2 В не приводит к появлению характерной “ступеньки” на эпюре. С увеличением амплитуды базового напряжения (при  $U_{be} > 2 \text{ В}$ ) длительность первой стадии сокращается и, начиная с некоторого значения  $U_{be}$  (примерно 2.5–2.7 В), первая стадия трудноразличима. Нам представляется, что первая стадия соответствует неоднородному “приэлектродному” распределению напряжения вдоль эмиттера, которое устанавливается очень быстро при подаче импульса базового напряжения. Если  $U_{be}$  превышает напряжение порога, соответствующего началу Оже-процесса, то распределение напряжения трансформи-

руется в более однородное (ему соответствует вторая стадия установления  $I_c$ ). Для такой трансформации требуется заметное время (как видно на рис. 2, десятки мкс).

Было проведено математическое моделирование неоднородных эффектов в туннельной МДП-структуре с использованием модели одномерного прибора, считывающей Оже-эффект [6,7], а также модели эмиттера с распределенными параметрами [3,8]. Оно дало качественно аналогичные результаты. Однако, как было установлено, использование в расчетах значений подвижности дырок в инверсном слое  $\mu_p \sim 10-100 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  (известных для МОП-структур с нетуннельным диэлектриком [9]) приводит к существенно более слабым зависимостям потенциала базы  $U$  от координаты по сравнению с наблюдаемыми в эксперименте. Представляется, что это является свидетельством снижения подвижности в инверсных слоях туннельных МОП-структур (по оценкам, более чем на порядок). На качественном уровне такое понижение  $\mu_p$  можно трактовать как следствие значительно более сильного проникновения волновой функции дырок в слой  $\text{SiO}_2$ , что требует некоего "эффективного усреднения" подвижностей дырок в Si и  $\text{SiO}_2$ .

Сделаем одно замечание об условиях наблюдения обсуждаемого эффекта. Было установлено, что для структур с относительно более толстым слоем  $\text{SiO}_2$  Оже-процесс как "выравнивающий" фактор становится не столь актуальным, поскольку даже при малых ( $\sim 1.0-1.5 \text{ В}$ ) напряжениях на "задающей" базе распределение напряжения и так однородно. Типичные токи базы и коллектора для таких приборов (при  $U_{be} \sim 1.5 \text{ В}$ ) составляют соответственно единицы и сотни наноампер. Однако и у этих структур можно наблюдать "выравнивание", если искусственно спровоцировать локализацию тока при малых  $U_{be}$ , поставив шунт (скажем, сопротивление  $\sim 10 \text{ МОм}$ ) между "дальней" базой и эмиттером.

Работа была выполнена при финансовой поддержке в рамках Государственной научно-технической программы "Наноструктуры в физике".

#### Список литературы

- [1] *Simmons J.C., Taylor G.W.* // Solid-State Electron. 1986. V. 29. N 3. P. 287-303.
- [2] *Moravvej-Farshi M.K., Green M.A.* // IEEE. Electron Device Lett. 1986. V. EDL-7. P. 513-515.
- [3] *Спиридонов Н.С.* Основы теории транзисторов. Киев: Техника, 1975. 360 с.
- [4] *Lai S.K., Dressendorfer P.V. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1981. V. 38. N 1. P. 41-44.

- [5] Векслер М.И., Грезов И.В., Шулекин А.Ф. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 3. С. 50-55.
- [6] Остроумова Е.В., Розачев А.А., // ФТП. 1994. Т. 28. В. 8. С. 1411-1423.
- [7] Vexler M.I. // IEEE Trans. on Electr. Dev. 1995. V. ED-42. N 4. P. 656-661.
- [8] Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Ч. 1 (гл. 11). М.-Л.: Энергия, 1966. 320 с.
- [9] Гузев А.А., Курышев Г.Л., Сеница С.П. // ФТП. 1970. Т. 4. В. 11. С. 2043-2047.

Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе РАН  
С.-Петербург

Поступило в Редакцию  
10 декабря 1995 г.