

07

Динамика формирования инверсного базового слоя в туннельных МДП-транзисторах в сильных электрических полях

© С.В. Белов, Е.В. Остроумова, Е.А. Рогачева

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

E-mail: elena.ostroumova@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 7 октября 2014 г.

Исследовались динамические процессы установления коллекторного тока и скорость формирования инверсной базы в туннельных транзисторных МДП-структурах с туннельно-тонким слоем диэлектрика и с протяженным эмиттерным окном, выполненные на основе гетероперехода $\text{Al-SiO}_2-n\text{-Si}$.

В работе исследовались динамические процессы установления коллекторного тока и скорость формирования базы, индуцированной сильным внешним электрическим полем, в структуре $\text{Al-SiO}_2-n\text{-Si}$ с туннельно-тонким слоем окисла в приборе типа оже-транзистора (Auger transistor) [1,2]. Особыми свойствами оже-транзистора являются: инжекция горячих носителей из металла в коллекторную область транзистора сквозь туннельно-тонкий слой диэлектрика и индуцированная электрическим полем база транзистора, формирующаяся у поверхности полупроводника в виде самосогласованного квантового колодца [3,4] для неосновных носителей под действием сверхсильного электрического поля (до 10^7 V/cm). Толщина индуцированной базы — это ширина квантового колодца для неосновных носителей, в данном случае — дырок. Гетеропереход металл–диэлектрик–полупроводник на основе $\text{Al-SiO}_2-n\text{-Si}$ является широкозонным эмиттером, который включает в себя туннельно-тонкий слой окисла кремния толщиной 2–3 nm, а это позволяет инжектировать в полупроводник горячие электроны с энергией более 1 eV [5,6].

В отличие от традиционных биполярных транзисторов с диффузионной базой, в оже-транзисторе базовый слой для неосновных носителей появляется только под действием внешнего электрического поля

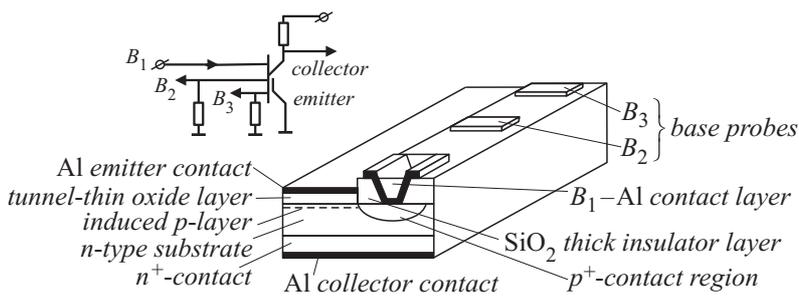


Рис. 1. Конструкция экспериментального туннельного МДП-прибора.

непосредственно под эмиттерным окном у поверхности полупроводника после подачи коллекторного напряжения и подачи напряжения на контактный электрод к инверсному базовому слою [7,8]. Исследование динамики формирования индуцированного базового слоя необходимо для оценки возможностей достижения теоретического предела быстродействия этих приборов как в импульсном, так и в малосигнальном режимах. Для таких исследований была специально сконструирована туннельная транзисторная структура с протяженным эмиттером и толщиной окисла 2 nm на основе структуры Al–SiO₂–n–Si (рис. 1), к индуцированному базовому слою сбоку от эмиттера подведен омический контакт. Впервые в этих структурах экспериментально наблюдалась динамика формирования инверсного базового слоя в сильном электрическом поле, перпендикулярном к поверхности, и измерялось время перехода транзистора от режима с малым коэффициентом усиления по току β (в схеме с общим эмиттером) до начала ударной ионизации к режиму сильного роста коэффициента усиления β в условиях появления и развития ударной ионизации в полупроводнике [1]. Такое усиление наблюдается в оже-транзисторе при генерации в процессе ударной ионизации электронно-дырочных пар в полупроводнике горячими электронами, туннельно инжектированными сквозь окисел из металла в полупроводник, — оже-генерация (Auger generation). В оже-транзисторе с развитием ударной ионизации коэффициент усиления по току α (в схеме с общей базой) может достигать величины $\alpha \geq 1$ ($\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$).

Ударная ионизация — это один из самых быстрых процессов с длительностью 10^{-13} s [9], поэтому теоретически в оже-транзисторе может быть достигнута частота 10^{13} Hz. Возможность повышения быст-

родействия в этих транзисторах до теоретически достижимой величины обсуждалась в работах [2,5]. Определяющую роль в быстрой оже-транзистора играют процессы, формирующие инверсный слой, а именно скорость распространения базового напряжения вдоль эмиттера и скорость накопления положительного заряда у поверхности полупроводника при генерации неравновесных дырок в процессе ударной ионизации в кремнии. Неравновесные электронно-дырочные пары генерируются в области перехода база–коллектор на расстоянии около 100 \AA от границы раздела диэлектрик–полупроводник („длина ударной ионизации“), поэтому все дырки, генерированные в процессе ударной ионизации, достигают поверхности полупроводника без рекомбинации. В свою очередь, скорость распространения индуцированного дырочного слоя под эмиттером зависит от скорости притока неравновесных дырок к поверхности в разных точках, поскольку инжекция горячих электронов не может произойти одновременно по всей площади эмиттера. В оже-транзисторе [6] при падении напряжения на слое окисла $U_{ox} \geq 1 \text{ V}$ энергии инжектированных электронов уже достаточно для преодоления порога ударной ионизации (1.5 eV для кремния) благодаря дополнительному разогреву горячих инжектированных электронов в поле базы транзистора, так как глубина самосогласованного квантового колодца для дырок у поверхности в кремнии n -типа около 0.5 eV [1,2]. При падении напряжения на слое окисла $U_{ox} \sim 2 \text{ V}$ преобладающими токами в транзисторе становятся токи оже-генерации. Сравнение расчетных и экспериментальных ВАХ [1,2,5] показало, что ударная ионизация вначале происходит локально как вероятностный процесс туннелирования электронов из металла в полупроводник сквозь окисел в какой-либо одной точке, где есть флуктуация напряженности электрического поля в области потенциального барьера, и распространяется со временем по всей площади эмиттера.

Очевидно, что чем больше величина приложенного базового напряжения (при достаточном напряжении на коллекторе), тем быстрее сформируется дырочный слой под эмиттером вследствие лавинообразного нарастания дырочного тока Оже.

В оже-транзисторе основные процессы переноса тока протекают с очень высокой скоростью; так, время пролета электронами промежутка эмиттер–коллектор не превышает 10^{-12} s , а баллистический пролет базы происходит за время не более 10^{-13} s . Это существенно затрудняет получение прямых экспериментальных данных о рабочих параметрах

транзистора. Поэтому была сконструирована специальная экспериментальная структура с протяженным эмиттером прямоугольной формы с существенно увеличенными размерами эмиттерного окна ($80\ \mu\text{m}$ при ширине $20\ \mu\text{m}$). В этой структуре базовое управление осуществляется от точечного базового электрода на одном из концов структуры. Дополнительно сконструированы зондовые электроды к середине базы и к ее противоположному концу, максимально удаленному от управляющего электрода (рис. 1). В результате удалось существенно затянуть по времени переходные процессы установления коллекторного тока, а также потенциала вдоль базового слоя. Проведенные на дополнительных базовых контактах B_2 и B_3 измерения зависимости нарастания потенциала от времени при различных напряжениях на базе показали, что время формирования индуцированного базового слоя в сильных электрических полях в значительной степени определяется скоростью иницирования ударной ионизации по всей площади эмиттера.

На рис. 2 показана динамика включения такой структуры. После подачи на структуру коллекторного напряжения величиной $3\text{--}4\ \text{V}$ через прибор начинает протекать небольшой ток ($10\text{--}20\ \mu\text{A}$). Затем подается достаточно продолжительный (более $60\ \mu\text{s}$) импульс напряжения положительной полярности с крутизной фронта $0.1\ \mu\text{s}$ на управляющий базовый электрод и одновременно регистрируются коллекторный ток и изменение потенциала на зондовых контактах. Непосредственно после подачи управляющего импульса через прибор начинает протекать ток порядка $0.3\ \text{mA}$, который остается неизменным по времени вплоть до $7\ \mu\text{s}$. За это время напряжение на базовом зонде B_2 , отстоящем от контактного зонда B_1 на величину $40\ \mu\text{m}$, возрастает до $2.2\ \text{V}$. С этого момента начинается второй рост тока продолжительностью $3\ \mu\text{s}$, в результате его величина достигает $0.7\ \text{mA}$ и стабилизируется при этом значении тока. Одновременно прекращается рост напряжения на зондовом выводе B_2 . Структура переходит во второе стационарное состояние, которое продолжается $20\ \mu\text{s}$, и по достижении потенциала на дальнем зондовом электроде B_3 величиной примерно $2\ \text{V}$ начинается очередной рост тока продолжительностью около $7\ \mu\text{s}$; при этом приращение тока составляет величину, сопоставимую со второй ступенькой, а суммарное значение тока достигает величины $1\ \text{mA}$. Примерно через $50\ \mu\text{s}$ процесс выравнивания потенциалов на зондовых электродах заканчивается, все процессы стабилизируются и структура выходит на стационарный режим в соответствии со статической вольт-амперной характеристикой. Таким образом, в эксперименте наблюдается нетривиальное ступен-

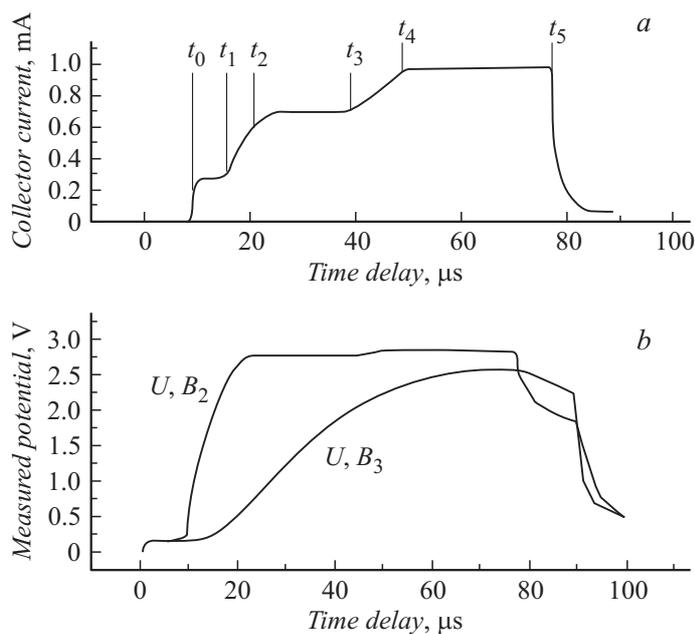


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока и напряжения в структуре: *a* — осциллограмма импульса тока в коллекторной цепи, *b* — осциллограммы напряжения на базовых контактах B_2 и B_3 .

чатое нарастание коллекторного тока при подаче постоянного управляющего напряжения на базу прибора. Сопоставляя осциллограммы коллекторного тока и напряжения на зондовых выводах B_2 и B_3 (рис. 3), приходим к выводу, что ступенчатый рост тока обусловлен накоплением критической величины заряда в базовом слое и скоростью распространения потенциала U_b вдоль поверхности под эмиттером.

На рис. 3 представлена диаграмма распределения потенциала вдоль базы исследуемой транзисторной структуры в моменты времени, последовательно определяющие переходы прибора из одного состояния в другое. Эта диаграмма наглядно показывает, что временные интервалы ступенчатого (t_1-t_2 и t_3-t_4) роста тока последовательно чередуются с гораздо более длительными интервалами (t_0-t_1 и t_3-t_4) накопления заряда в областях индуцированного базового слоя между контактами

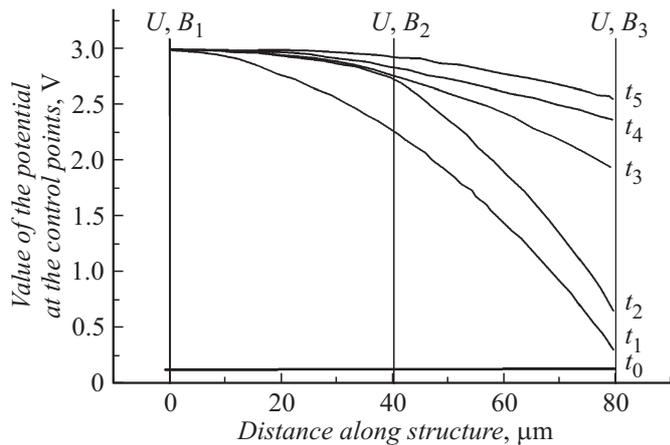


Рис. 3. Формирование индуцированного базового p -слоя в зависимости от времени t накопления положительного заряда и распространения импульса напряжения вдоль слоя под эмиттерным окном. Измерения проведены на зондовых контактах B_2 и B_3 в моменты времени $t_0 = 0$, $t_1 = 7 \mu\text{s}$, $t_2 = 10$, $t_3 = 30$, $t_4 = 40$, $t_5 = 50 \mu\text{s}$.

B_1 – B_2 в течение времени t_0 – t_1 и между B_2 – B_3 за время t_3 – t_4 . Особенно интересен интервал t_3 – t_4 (вторая токовая ступенька); в это время, по сути, происходит включение оже-генерации во второй, дальней части эмиттера, где влияние управляющего электрода B_1 значительно ослаблено расстоянием. Прирост тока Δi на величину 0.3 mA можно с большой точностью отнести за счет механизма оже-генерации в приповерхностном слое полупроводника и, таким образом, оценить величину темпа генерации электронно-дырочных пар как $\nu = 2.3 \cdot 10^{24} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ — основного параметра, определяющего эффективность работы туннельного Al–SiO₂– n -Si MIS-транзистора. По величине падения напряжения между базовыми выводами B_2 – B_3 можно оценить удельное сопротивление индуцированного слоя к моменту выхода прибора на стационарное состояние как $\rho = 3.85 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{m}$. Аналогичные оценки можно провести и для предшествующих моментов времени.

Таким образом, в работе впервые экспериментально наблюдались динамика формирования индуцированной базы в туннельных MIS-

транзисторах в сверхсильном электрическом поле напряженностью до 10^7 V/cm и переход транзистора, находящегося в активном режиме еще до начала оже-генерации, к режиму с ростом коэффициента усиления β по току после появления ударной ионизации. В этом режиме появляются неустойчивости тока в виде S-образной ВАХ в оже-транзисторе [2,6].

Результаты эксперимента подтверждают, что при туннельной инжекции электронов из металла в полупроводник сквозь туннельно-тонкий слой диэлектрика (Al-SiO₂-n-Si оже-транзистор) инжекция электронов происходит не одновременно и не равномерно по всей площади эмиттера, а возникает вначале в одной какой-либо точке из-за локального повышения напряженности электрического поля вплоть до величины более 10^7 V/cm так же, как это происходит при катодной эмиссии электронов в вакууме [10,11]. Это могут быть флуктуации толщины окисла, флуктуации плотности электрического заряда на границе раздела полупроводник-диэлектрик и ряд других особенностей, что вызывает понижение высоты потенциального барьера eV_i в этой локальной точке и затем распространяется по площади эмиттера по мере последующих включений и, как следствие, общего понижения высоты потенциального барьера eV . Этот процесс является также причиной появления N-образных вольт-амперных характеристик в оже-транзисторе [5,6].

Следует отметить, что на базе приборов с туннельным МДП-эмиттером и индуцированной протяженной базой, используя переход от режима работы „до оже-генерации“ к состоянию с „включенной оже-генерацией“, можно формировать ступенчатые динамически перестраиваемые импульсы тока в широких пределах.

Список литературы

- [1] *Остроумова Е.В., Рогачев А.А.* // ФТП. 1994. Т. 28. В. 8. С. 1411–1423.
- [2] *Ostroumova E.V., Rogachev A.A.* // Appl. Surf. Sci. 2000. V. 166. P. 480–484.
- [3] *Ando T., Fowler A.B., Stern F.* // Rev. Modern Physics. 1982. V. 54. P. 438–672.
- [4] *Rogachev A.A.* // Handbook on Semiconductors / Rev. ed., T.S.Moss (Ed.) V. 1. Basic properties of semiconductors / P.T. Landsberg (Ed.). Elsevier Science B.V. 1992. Ch. 9. P. 449–487.
- [5] *Ostroumova E.V., Rogachev A.A.* // Microelectronics J. 1998. V. 29. P. 701–708.
- [6] *Остроумова Е.В., Рогачев А.А.* // ФТП. 1999. Т. 33. В. 9. С. 1126–1129.

- [7] *Tiwary S., Wang W.I.* // East. J. R. IEEE Trans. ED. 1990. V. 37. P. 1121–1131.
- [8] *Ching-Fuh Lin, Wei-Fang Lin, Eih-Zhe Liang, Ting-Wei Su* // US patent 2003/0201434 A1.
- [9] *Chang C., Hu Ch., Brodersen R.W.* // J. Appl. Phys. 1985. V. 57(20). P. 302–309.
- [10] *Kalганов В.Д., Милешкина Н.В., Сапронов С.А., Остроумова Е.В., Рогачева Е.А.* // Proc. 24th IC (MIEL 2004). V. 2. Nis, Serbia and Montenegro, 2004. P. 195–197.
- [11] *Калганов В.Д., Милешкина Н.В., Остроумова Е.В.* // ФТП. 2006. Т. 40. В. 9. С. 1062–1068.