

Высокочастотные неустойчивости тока в кремниевом оже-транзисторе

© Е.В. Остроумова, А.А. Рогачев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 1 марта 1999 г. Принята к печати 2 марта 1999 г.)

В оже-транзисторе, образованном гетеропереходом Al-SiO₂-n-Si с туннельно-тонким слоем окисла, исследовались высокочастотные неустойчивости *S*- и *N*-типа в коллекторном токе, возникающие при туннельной инжекции горячих электронов из металла в полупроводник. Оже-транзистор — прибор нового типа, в котором в качестве широкозонного полупроводникового эмиттера использован гетеропереход металл-диэлектрик, а база транзистора индуцируется электрическим полем в виде самосогласованного квантового колодца для дырок на поверхности кремния. Инжектированные из металла в полупроводник электроны с высокой кинетической энергией (более 1 эВ) в процессе ударной ионизации генерируют электронно-дырочные пары в области перехода база-коллектор. Это нарушает токовый баланс транзистора и приводит к появлению неустойчивостей тока *S*- и *N*-типа в коллекторных характеристиках (в схеме с общим эмиттером). Природа неустойчивостей связана с большим коэффициентом усиления тока в оже-транзисторе ($\alpha > 1$).

Использование гетероструктуры Al-SiO₂-n-Si с туннельно-тонким слоем окисла [1,2] для создания оже-транзистора до сих пор является единственной реализацией идеи Крёмера создать транзистор с широкозонным гетероэмиттером [3], несмотря на то, что теоретически делались неоднократные попытки подбора гетеропар. В оже-транзисторе усиление тока достигается за счет ударной ионизации, производимой горячими электронами, инжектированными из широкозонного эмиттера в узкозонную базу [3]. В транзисторной структуре Al-SiO₂-n-Si вместо полупроводникового широкозонного эмиттера используется гетеропереход металл-окисел кремния (рис. 1), причем окисел должен быть туннельно-прозрачным для электронов (несколько нм) [1,2]. В этом случае кинетическая энергия электронов, туннелирующих из металла в полупроводник, столь велика, что становится возможной генерация электронно-дырочных пар в кремнии в процессе ударной ионизации (оже-генерация). Другим прибором, использующим оже-генерацию в полупроводниках, является диод типа диода Рида [4]. Этот прибор работает в области частот 10¹¹–10¹² Гц, но это двухконтактный прибор, что создает большие трудности в его применении. В биполярных транзисторах усиление тока связано с диффузией или дрейфом носителей через базу транзистора. В оже-транзисторе, основанном на структуре Al-SiO₂-n-Si, в отличие от диода Рида области генерации и дрейфа носителей пространственно разделены практически полностью. Ударная ионизация происходит вблизи базы транзистора, а дрейф — в области перехода база-коллектор. Темп генерации электронно-дырочных пар определяется напряжением, поданным на базу [6,7]. База транзистора формируется по действием электрического поля окисла в виде самосогласованного квантового колодца для дырок на поверхности в кремнии *n*-типа и имеет толщину около 10 Å при глубине колодца до 0.7 эВ. Электроны, туннельно инжектированные из металла и поэтому обладающие большой

кинетической энергией, существенно увеличивают ее в поле базы транзистора, пролетая над поверхностным самосогласованным квантовым колодцем для дырок, и затем теряют ее в процессе генерации электронно-дырочных пар и фононов при ударной ионизации [2]. Дополнительный разогрев и охлаждение электронов происходит на длине пробега 10⁻⁶ см. В то же время область дрейфа, т.е. ширина области объемного заряда перехода база-коллектор, обычно имеет величину не менее 10⁻⁵ см.

Сверхтонкая база оже-транзистора позволяет электронам пролетать сквозь базу баллистически (рис. 1). Поэтому время пролета электронов через базу не может ограничивать рабочую частоту оже-транзистора так же, как и время ударной ионизации (порядка 10⁻¹³ с). Быстродействие оже-транзистора определяется практически только временем заряда емкости эмиттер-база. При плотности тока 10⁴ А/см² и площади эмиттера 0.2 мкм² предельная частота может быть доведена до величины 10¹¹–10¹² Гц [7]. Эта частота приближается к предельной рабочей частоте диода Рида, который в настоящее время обладает наибольшим быстродействием среди полупроводниковых приборов.

Кинетическая энергия, получаемая электроном при баллистическом пролете базы, равна глубине колодца (0.7 эВ) и составляет примерно половину от величины порога (1.5 эВ) ударной ионизации в кремнии. Существование глубоких самосогласованных квантовых колодцев на поверхности кремния позволяет управлять энергией быстрых электронов, участвующих в ударной ионизации, и по существу определяет возникновение неустойчивостей *S*- и *N*-типа в коллекторном токе оже-транзистора (в схеме с общим эмиттером) [5–7]. При малых токах в базовой цепи коллекторные характеристики оже-транзистора похожи на характеристики биполярных транзисторов. Но с ростом базового тока коллекторные характеристики показывают характерный

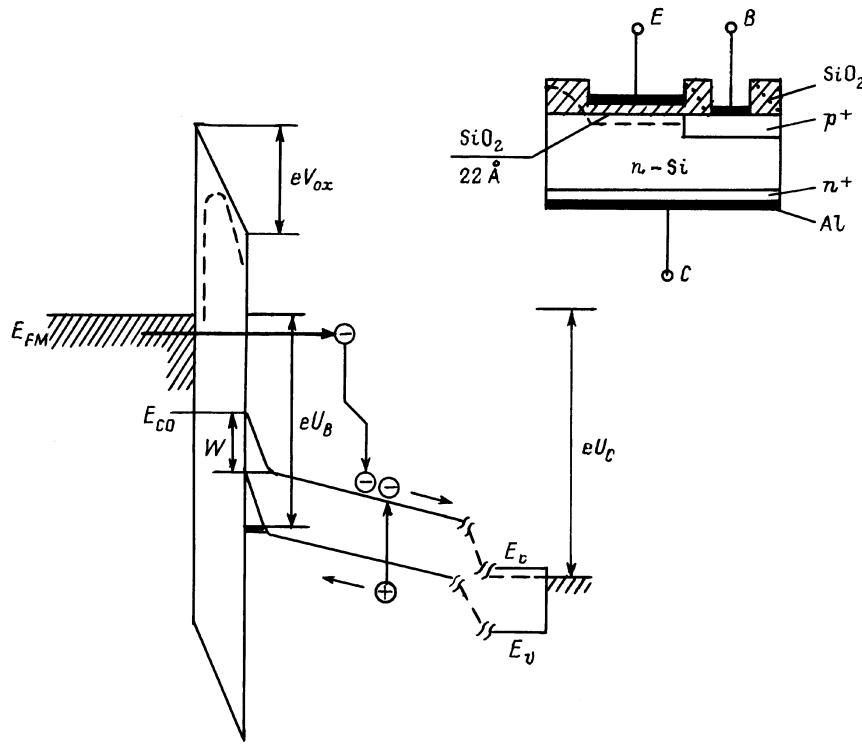


Рис. 1. Энергетическая диаграмма оже-транзистора на основе Al-SiO₂-n-Si с туннельно-тонким слоем окисла. Металл смещен отрицательно по отношению к полупроводнику. На вставке — схема транзистора.

для оже-транзистора рост коэффициента усиления тока β ; когда β становится отрицательным, возникают неустойчивости. Появление S-образных неустойчивостей тока коллектора (рис. 2) является типичным уже при плотностях коллекторного тока 10^3 А/см². При более высоких плотностях тока (более $5 \cdot 10^3$ А/см²) в оже-транзисторе наблюдаются неустойчивости N-типа в области достаточно низких напряжений на коллекторе (рис. 3). В некоторых случаях наблюдается переход от неустойчивостей S-типа к неустойчивостям N-типа (рис. 4) [6,7].

Для описания туннельных токов электронов и дырок сквозь потенциальный барьер обычно используется квазиклассическое приближение. Пользуясь этим приближением, туннельный ток можно записать в виде

$$I = \frac{eN}{\tau} \exp \left[-(2/\hbar) \int p dx \right], \quad (1)$$

где интеграл $(2/\hbar) \int p dx$, определяющий вероятность туннелирования, берется по классически недоступной области; N — двумерная концентрация электронов, которые могут участвовать в туннелировании, и τ — характерное время столкновений электронов, находящихся в колодце, со стенками потенциальной ямы. Все туннельные токи, протекающие в оже-транзисторе, мы можем представить в виде, аналогичном, например, току для электронов, туннелирующих из металла в полупро-

водник сквозь слой окисла [7]:

$$I_{mc} = \frac{eV}{16\pi^2 \hbar d^2} \exp \left\{ -\frac{4\sqrt{2m^*d}}{3\hbar V_{ox}} \left[V^{3/2} - (V - V_{ox})^{3/2} \right] \right\}, \quad (2)$$

где $eV = \varphi_m$ — работа выхода электронов из металла в зону проводимости окисла кремния; $m^* = 0.29m_0$ — эф-

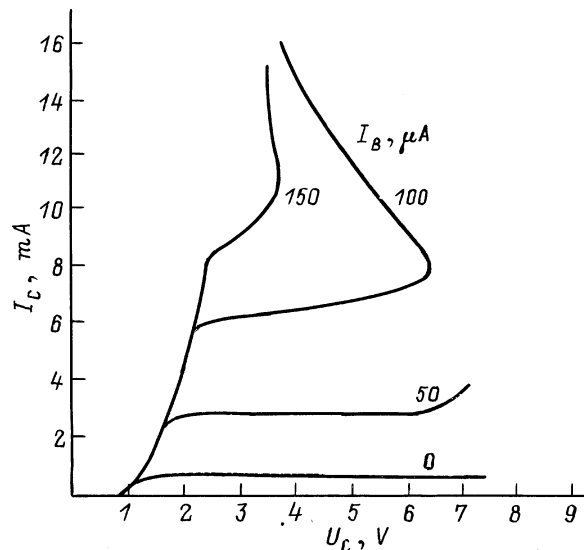


Рис. 2. Экспериментальные S-образные коллекторные характеристики оже-транзистора в схеме с общим эмиттером; $T = 300$ К. Числами у кривых указаны значения тока базы I_B .

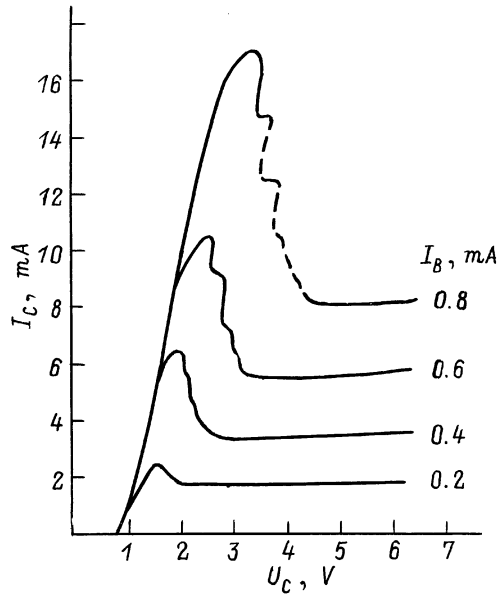


Рис. 3. Экспериментальные N -образные коллекторные характеристики оже-транзистора в схеме с общим эмиттером; $T = 300$ К.

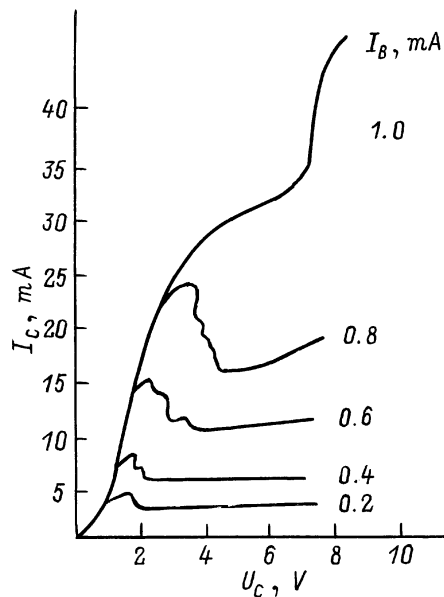


Рис. 4. Экспериментальные коллекторные характеристики оже-транзистора в схеме с общим эмиттером. При малых напряжениях на коллекторе неустойчивости S -типа переходят в неустойчивости N -типа; $T = 300$ К.

фактивная масса туннельных электронов в окисле кремния; d — толщина слоя окисла, а $V_{ox} = (E_{FM} - E_{CO})/e$ — падение напряжения на окисле. Более подробно детали расчета опубликованы авторами в работах [6,7].

Генерация пар электрон–дырка при ударной ионизации приводит к усилению тока, так как вместо одного инжектированного электрона возникают сразу три носителя

тока. Появляются дополнительные токи — электронный и дырочный токи Оже, и если электронный ток Оже течет в коллектор, увеличивая величину коллекторного тока, то дырочный ток Оже течет из области генерации (переход база–коллектор) в базу транзистора, в то время как ток в базовой цепи (дырочный ток) течет из базы в эмиттер. Базовый ток $I_B = I_{ms} + I_{mv}$ и ток Оже (I_{Auger}) протекают в противоположном направлении по отношению к токам утечек I_{ms} и I_{mv} :

$$I_B + I_{Auger} - I_{ms} - I_{mv} = 0. \quad (3)$$

Это уравнение определяет баланс токов в оже-транзисторе. Ток Оже не входит в эмиттерный ток $I_E = I_C + I_{ms} + I_{mv}$, но он пропорционален туннельному току электронов из металла в зону проводимости полупроводника, I_{mc} , и зависит от коэффициента ударной ионизации A : $I_{Auger} = AI_{mc}$ [7]. Коэффициент A отражает зависимость генерационного тока Оже от энергии инжектированных электронов (см. рис. 1). Уравнение (3) имеет два решения, поскольку дырочный ток Оже растет с ростом коэффициента ударной ионизации, т.е. любому значению тока базы соответствуют два значения напряжения на базе и соответственно два значения тока коллектора. Каждое значение тока базы может быть реализовано в двух случаях: в первом — при малом токе Оже и малом напряжении на базе ($I_B = I_{mc} + I_{mv}$) и во втором — при большом токе Оже и большом напряжении на базе ($I_B = I_{mc} + I_{mv} - I_{Auger}$). В первом случае ток коллектора I_C мал, во втором — коллекторный ток может быть на несколько порядков больше.

Неустойчивости N -типа (рис. 3) появляются, когда напряжение на коллекторе мало, и зависят не только от напряжения на базе и на коллекторе, но и от концентрации вблизи поверхности кремния электронно-дырочных пар, образованных при ударной ионизации ранее, за время, меньшее, чем время рассасывания. Неустойчивости N -типа подобны неустойчивостям, наблюдаемым в диоде Рида. Это наиболее высокочастотная неустойчивость тока в оже-транзисторе. Существует два пути рассасывания электронно-дырочного облака. Первый — в электрическом поле коллектора, второй — в виде тока утечек, т.е. туннельного дырочного тока из полупроводника в металл. Первый процесс приводит к неустойчивостям N -типа в коллекторном токе, а второй вызывает неустойчивости S -типа. Оба типа неустойчивостей высокочастотные. Природа этого явления чисто квантовая и связана с сильными электрическими полями на поверхности кремния.

Работа поддержана грантами РФФИ (97-02-18358), Министерства науки РФ ”Перспективные технологии и приборы микро- и нанoeлектроники” (039.04.213.68.4.2) и программой ”Интеграция” (326.37).

Список литературы

- [1] И.В. Грехов, Е.В. Остроумова, А.А. Рогачев, А.Ф. Шулекин. Письма ЖТФ, **17**(7), 44 (1991) [Sov. Tech. Phys. Lett., **17**(7), 476 (1991)].
- [2] Е.В. Остроумова, А.А. Рогачев. ФТП, **28**(2), 1411 (1994) [Semiconductors, **28**(8), 793 (1994)].
- [3] Н. Кромер. In: A.G. Milns, J.J. Feucht. *Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junctions* (N.Y., Academic Press, 1972).
- [4] W.T. Read. Bell. Syst. Techn. J., **37**, 401 (1958).
- [5] E.V. Ostroumova, A.A. Rogachev. *Proc. 21st Int. Conf. on Microelectronics (MIEL'97)*, Sept. 14–17 1997 (Nish, Yugoslavia) v. 1, p. 227. Publish. Elect. Dev. Soc. IEEE, IEEE Catalog № 97TH8232 (1997).
- [6] E.V. Ostoumova, A.A. Rogachev. In: *Fundamental Aspects of Ultrathin Dielectrics on Si-Based Devices: Towards an Atomic-Scale Understanding*. NATO Science Series, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (Boston–London, 1998) p. 383.
- [7] E.V. Ostroumova, A.A. Rogachev. *Microelectronics J.*, **29**, 701 (1998).

Редактор Т.А. Полянская

High-frequency current instabilities in silicon Auger-transistor

E.V. Ostroumova, A.A. Rogachev

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia