

Полевой транзистор с двумерными системами носителей в затворе и канале

© В.Г. Попов*+

* Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук, 142432 Черноголовка, Россия

+ Московский физико-технический институт (НИУ), Факультет физической и квантовой электроники, 141700 Долгопрудный, Россия

E-mail: popov@iptm.ru

(Получена 27 мая 2015 г. Принята к печати 5 июня 2015 г.)

Рассмотрено применение эффекта резонансного туннелирования носителей в транзисторах. Показано, что использование резонансного характера туннелирования позволяет снизить токи утечки, которые являются одной из основных причин кризиса в развитии транзисторов на сегодняшний день. В работе предложен новый тип полевых транзисторов с затвором и каналом на основе двумерных систем носителей. Рассмотрены перспективы дальнейшей миниатюризации транзисторов. Для транзисторов с резонансным туннелированием чрезмерная миниатюризация подавляет резонансное туннелирование носителей и, таким образом, увеличивает токи утечки.

1. Введение

Радикальная миниатюризация современных транзисторов привела не только к повышению их граничных частот, но и к повышению энергопотребления вычислительных устройств. Наряду с энергопотреблением возросли также токи утечки таких транзисторов. Среди токов утечки выделяют ток утечки сток–исток (I_{sd}) из-за перекрытия $p-n$ -переходов в контактных областях истока и стока, а также ток прямого туннелирования носителей из канала в затвор. Причем при уменьшении размеров активной области роль затворного тока утечки (I_g) только возрастает. Так, при технологии масштабирования активной области размером 130 нм I_g меньше 5% от полного тока утечки, для 90 нм I_g порядка 40%, для 65 нм I_g больше 90% [1]. Основным способом уменьшения I_{sd} и тока перезарядки на сегодняшний день является использование подложек с тонким слоем кремния-на-изоляторе (КНИ) подложек. Это, с одной стороны, уменьшает емкость транзистора, а с другой — резко уменьшает объем для протекания I_{sd} , что при том же напряжении питания существенно уменьшает I_{sd} . Отметим, что характер движения носителей в Si слое КНИ подложек является существенно двумерным [2]. Для уменьшения I_g прибегают к использованию подзатворных high-k диэлектриков для увеличения емкости затвор-канал, что позволяет существенно уменьшить затворное напряжение отсечки, а значит, и энергию туннелирующих носителей. Другим решением является использование каналов со встроенными квантовыми ямами (КЯ), например на основе слоя InSb [3]. В этом случае удалось существенно снизить затворное напряжение, поскольку отпала необходимость инвертирования проводимости в канале. В результате удалось существенно поднять граничную частоту транзистора до 300 ГГц. Как видно, использование двумерных систем носителей в канале на сегодняшний день представляет собой назревшую необходимость.

В данной работе предлагается использование двумерных систем носителей тока в затворе для дальнейшего снижения тока утечки I_g , что будет способствовать дальнейшему уменьшению толщины слоя подзатворного диэлектрика и увеличению граничной частоты работы транзистора.

2. Резонансное туннелирование в наноструктурах

Одним из квантовых эффектов является процесс туннелирования носителей. Процессы туннелирования в полупроводниковых диодах были впервые использованы Эсаки [4] в 1958 г. Примерно в это же время Шриффер [5] высказал идею о размерном квантовании в тонких пленках полупроводников, которое и было обна-

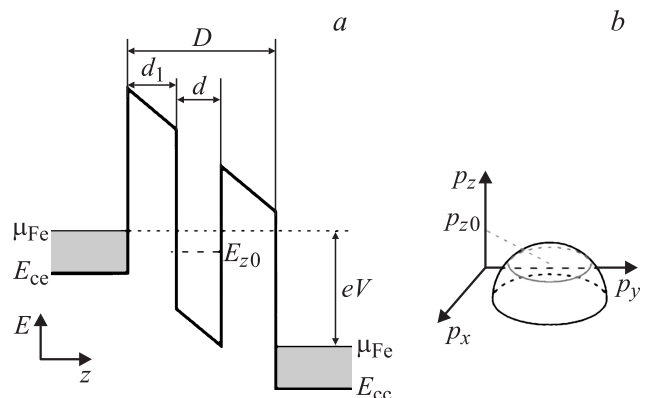


Рис. 1. *a* — профиль дна зоны проводимости резонансно-туннельного диода при приложенном напряжении V . Серым цветом закрашены заполненные состояния в коллекторе и в эмиттере. *b* — полусфера Ферми для электронов в эмиттере в фазовом пространстве, налетающих на двойной барьер. Серым контуром обозначено множество импульсов электронов, резонансно туннелирующих в квантовую яму между барьерами.

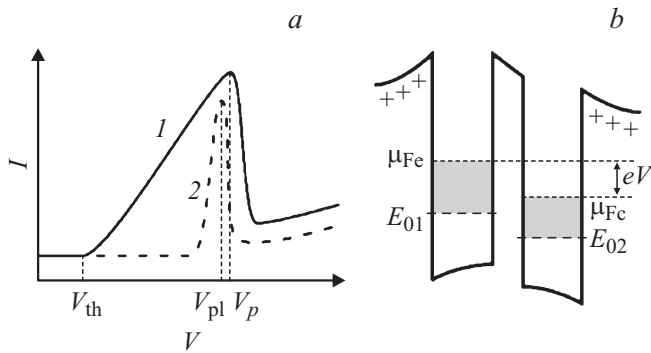


Рис. 2. *a* — вольт-амперные характеристики резонансно-туннельных диодов с туннелированием между трехмерной и двумерной системами (1) и между двумерными системами носителей (2). *b* — профиль дна зоны проводимости полупроводниковой гетероструктуры с двумя квантовыми ямами, разделенными туннельным барьером.

ружено D.C. Tsui в туннельной структуре на основе InAs в 1970 г. [6]. Впоследствии Эсаки [7] и Казаринов с Сурисом [8] высказали идею о возможности резонансного туннелирования в полупроводниковых гетероструктурах. В 1974 г. данный эффект был впервые экспериментально обнаружен. На эффекте резонансного туннелирования реализованы резонансно-туннельный диод (РТД) [9] и резонансно-туннельный транзистор (РТТ) [10] — приборы, обладающие рекордными параметрами на сегодняшний день. Как хорошо известно, в современных CMOS транзисторах, созданных по технологии 45 нм и ниже, туннелирование носителей играет, скорее, негативную роль и увеличивает ток утечки. Но пример уже созданных приборов РТД и РТТ говорит о том, что правильное использование туннельного эффекта способно существенно улучшить работу полупроводниковых приборов. Для осознания того, как этот эффект можно использовать, необходимо его рассмотреть более подробно. Рассмотрим двухбарьерную гетероструктуру, профиль дна зоны проводимости которой изображен на рис. 1, *a*. В тонком слое между барьерами (толщина около 10 нм) формируются локализованные квантовые состояния, одно из которых представлено на рис. 1, *a* как E_{z0} . Образование таких уровней приводит к тому, что туннельная прозрачность таких двойных барьеров начинает осциллировать по энергии, достигая резкого максимума вплоть до 1, когда энергия движения электрона в направлении барьеров совпадает с энергией уровня и значительно уменьшается при энергии между уровнями (вплоть до $T = 10^{-4}$ [9]). В этом случае, записывая закон сохранения энергии и планарной компоненты импульса, легко получить, что в туннелировании могут участвовать лишь электроны с энергией E_z^0 . Электроны с энергией E_z^0 имеют компоненту импульса p_{z0} электронов. Количество участвующих в резонансном туннелировании электронов можно определить из фазового пространства электронов в эмиттере (см. рис. 1, *b*). Для этого надо посчитать площадь резонансного диска

и разделить на площадь одного квантового состояния, т.е. $(2\pi\hbar)^2$, где \hbar — постоянная Планка. Здесь мы рассматриваем случай низких температур, когда $kT \ll \min(\mu_{Fe} - E_{ce}, E_{z0} - E_{ce}, eV)$, где k — постоянная Больцмана. Теперь рассмотрим смещение уровня E_{z0} при приложении напряжения смещения. Будем считать, что эмиттер заземлен, т.е. $\mu_{Fe} = \text{const}$, тогда вольт-амперная характеристика диода определяется зависимостью энергии уровня в КЯ от напряжения смещения. Если ширина барьерного промежутка D значительно больше ширины КЯ, т.е. $D \gg d$, для описания зависимости $E_{z0}(V)$ можно воспользоваться линейным приближением или эффектом Штарка:

$$E_z^0(V) = E_z^0(0) - eV/\alpha, \tag{1}$$

где $\alpha = D/(d_1 + d/2)$ — фактор плеча. Поскольку при $E_{z0}(V) > \mu_{Fe}$ резонансный туннельный ток равен 0, существует пороговое напряжение для тока V_{th} , начиная с которого появляется ток. Величина его определяется из условия: $E_z^0(V_{th}) = \mu_{Fe}$ (или $p_{z0} = p_F$, тогда из (1) можно получить

$$I = \frac{eg_{2D}}{\alpha\tau} (V - V_{th}), \tag{2}$$

здесь e , g_{2D} , τ — заряд электрона, плотность двумерных состояний и время туннелирования. Выражение (2) выполняется пока $\mu_{Fe} > E_{z0}(V) > E_{ce}$. При $E_{z0}(V_p) = E_{ce}$ ток резко прекращается по причине отсутствия состояний в запрещенной зоне эмиттера. Уменьшение тока с увеличением напряжения соответствует отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП). Вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода представлена на рис. 2, *a* сплошной линией. Необходимо сказать, что наряду с процессами резонансного туннелирования существует туннелирование сквозное и некогерентное туннелирование, что приводит к появлению тока при $V < V_{th}$ и $V > V_p$. Как видно из ВАХ диода, наличие размерного квантования в яме подавляет процессы туннелирования в широком диапазоне напряжений и оставляет туннелирование в резонансном диапазоне $\mu_{Fe} > E_{z0}(V) > E_{ce}$. Этот диапазон можно существенно сузить, для этого необходимо создать квантовый уровень в эмиттере, например использовать гетероструктуру с двумя квантовыми ямами (рис. 2, *b*). В этом случае условия резонансного туннелирования выполняются лишь только при совпадении уровней E_{01} , E_{02} , т.е. только при одном значении напряжения смещения V_{pl} . Таким образом, диапазон туннелирования будет минимальным и определяться лишь уширением уровней. На ВАХ диода будет наблюдаться узкий токовый пик (рис. 2, *a*). Таким образом, видно, что использование эффектов размерного квантования существенно уменьшает туннелирование в широком диапазоне напряжений. Отсюда следует перспективность использования таких структур в транзисторах. Причем наибольшего успеха в уменьшении эффекта туннелирования можно добиться при использовании квантовых ям как для проводящего канала, так и для затвора в полевых транзисторах. Гетероструктуры с

двумя двумерными системами уже исследуются и уже показаны принципиальные возможности их работы [11]. Однако исследования транзисторов с учетом подавления туннелирования на сегодняшний день не проводилось.

3. Транзистор с двумя квантовыми ямами

Ранее исследовались резонансно-туннельные транзисторы, в которых использовался резонансный характер туннелирования между трехмерными системами в контактах и состояниями квантовой ямы [10]. Как уже было упомянуто в разд. 2, ситуацию можно значительно улучшить, используя структуры с двумя квантовыми ямами. В этом случае в качестве затвора транзистора (контакт 3, см. рис. 3, *b*) может выступать двумерная электронная система с концентрацией носителей, отличной от концентрации в канале (рис. 3, *a*). Для создания такой транзисторной структуры необходима целая система затворов. Проблема заключается в том, что два проводящих слоя находятся в непосредственной близости друг от друга, что существенно затрудняет создание отдельных омических контактов непосредственно к каждому слою.

В этом случае создают омические контакты сразу к двум слоям, а затем дополнительными затворами (1, 2 на рис. 3, *c*) обедняют один из слоев. Затвор 1 (см. рис. 3, *b*) можно использовать, подавая на него отрицательное напряжение для обеднения верхнего электронного слоя, а двойной затвор 2 используется для обеднения нижнего слоя. Разницу электронных концентраций и энергий E_{g0} и E_{ch0} в электронных слоях можно создать, задав разные толщины квантовых ям. Из-за разницы энергий туннелирование между слоями будет

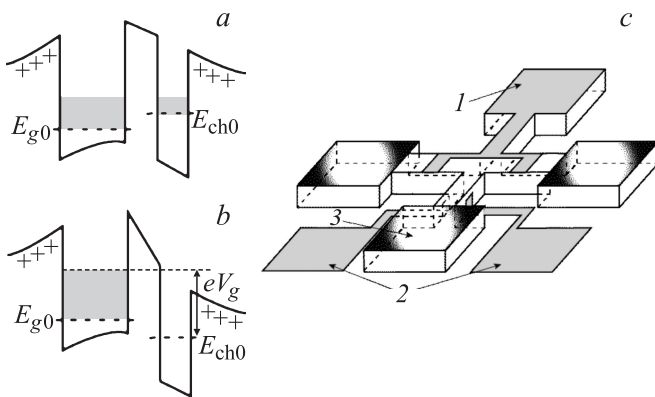


Рис. 3. Транзистор с двумя квантовыми ямами. *a* — схематическая диаграмма дна зоны проводимости в канале и затворе при приложенном напряжении V_g на затвор и открытом канале, содержащем квантовую яму с уровнем E_{ch0} . *b* — диаграмма гетероструктуры с закрытым каналом. *c* — топология туннельного транзистора с омическими контактами (обозначены полупрозрачным цветом) и дополнительными затворами 1, 2 (обозначены серым цветом). Затворное напряжение V_g подается на контакт 3.

подавлено и ток утечки из затвора в канал станет заметно ниже, что позволит создать более высокочастотный транзистор. Необходимо отметить, что при использовании данного транзистора полностью исключить туннелирование невозможно, поскольку при обеднении канала необходимо пройти через резонансное напряжение V_r , при котором $E_{g0}(V_r) = E_{ch0}(V_r)$ (рис. 4, *b*). Однако даже в этом случае ток не будет превышать максимальный ток, наблюдаемый при туннелировании из трехмерного контакта в КЯ (рис. 2, *b*).

4. Миниатюризация транзисторов и ее перспективы

Как уже упоминалось во Введении, миниатюризация транзисторов является основным направлением развития микроэлектроники уже более 50 лет и причина тому не только привлечение инвестиций или удобство использования электронных устройств. Основной причиной миниатюризации является повышение граничной частоты полупроводниковых приборов. Рассмотрим подробнее, как уменьшение размеров приводит к увеличению частоты работы транзистора. На рис. 4, *a* приведена стандартная топология полевого транзистора с металлическими электродами. Транзистор включен в цепь смещения через контакты 1 (исток) и 2 (сток). Смещение E_c необходимо для перевода тока транзистора в насыщение, что видно на исток-стоковой характеристике транзистора, приведенной на рис. 4, *b*. В режиме насыщения скорость носителей в канале (обозначен серым цветом) не меняется с приложенным напряжением и можно получить следующее выражение для тока:

$$I_{c-u} = nevS_{ch}, \tag{3}$$

здесь n — концентрация носителей в канале, v — скорость носителей, S_{ch} — площадь поперечного сечения в канале. Для изменения концентрации используется третий электрод — затвор (см. 2 на рис. 4, *a*). При подаче напряжения V_{in} в силу конечной емкости C_g между каналом и затвором:

$$n = n_0 + q/(W_{ch}e) = n_0 + C_g V_{in}/(W_{ch}e), \tag{4}$$

где n_0 — концентрация носителей в канале при нулевом напряжении на затворе, q — заряд, индуцированный затворным напряжением V_{in} ; $W_{ch} = S_{ch}L_{ch}$ — объем канала, L_{ch} — длина затвора или канала (рис. 4, *a*). Подставляя выражение (3) в выражение (4), получаем следующее выражение для тока:

$$I_{c-u} = I_0 + vC_g V_{in}/L_{ch} = I_0 + gV_{in}, \tag{5}$$

где g — крутизна транзистора, имеет вид

$$g = vC_g/L_{ch}. \tag{6}$$

На рис. 4, *a* штриховыми линиями представлены элементы эквивалентной схемы транзистора, т. е. элементы,

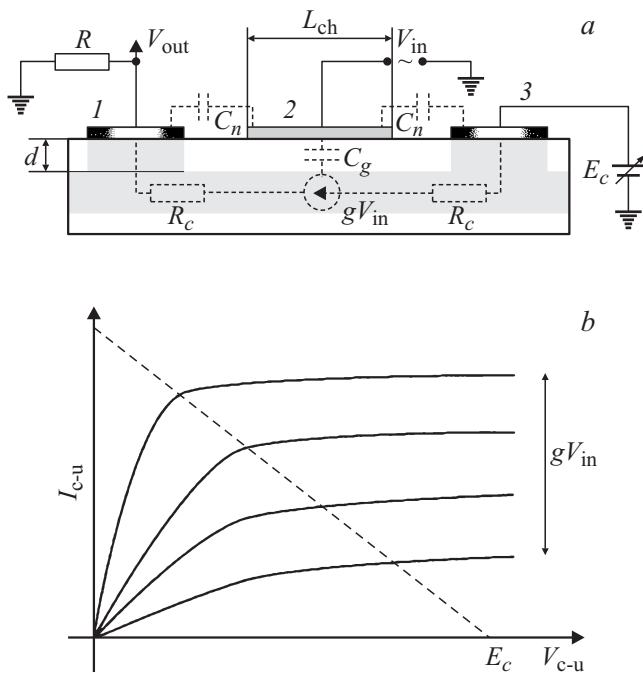


Рис. 4. Топология и характеристики полевого транзистора. *a* — топология полевого транзистора и схема его подключения. Пунктиром обозначены элементы эквивалентной схемы транзистора. *b* — исток-стоковые характеристики полевого транзистора при разных затворных напряжениях V_{in} . Наклонная прямая соответствует нагрузочной прямой, ее пересечение с исток-стоковой характеристикой соответствует рабочей точке транзистора, т. е. определяет ток I_{c-u} и напряжение V_{c-u} .

которыми работу транзистора можно смоделировать. В данном случае поведение полупроводникового канала можно смоделировать генератором тока, зависящим от затворного напряжения V_{in} . Рассмотрим теперь переменный сигнал V_{in} , тогда возникает ток смещения δI_c через паразитную емкость C_n и емкость затвора C_g . Ток через емкость увеличивается при увеличении частоты переменного напряжения V_{in} , поэтому существует граничная частота, при которой ток через емкости сравнивается с током в полупроводниковом канале δI_{c-u} , т. е.

$$\delta I_c = \omega V_{in}(C_n + C_g) = gV_{in} = \delta I_{c-u}. \quad (7)$$

Тогда с учетом (6) получаем следующее выражение для граничной частоты:

$$\omega = vL_{ch}^{-1}(1 + C_n/C_g)^{-1}. \quad (8)$$

Отсюда видно, что увеличивая C_g и уменьшая C_n и L_{ch} , можно повышать частоту работы транзистора. Увеличивать C_g можно, например, за счет уменьшения расстояния между каналом и затвором d . Кстати, использование подзатворных диэлектриков с высоким ϵ это другой способ повышения C_g . Уменьшение C_n возможно также за счет уменьшения ширины затвора и увеличения расстояния между контактами и затворным контактом.

Однако увеличение расстояния между электродами имеет ограничение, связанное с увеличением последовательного сопротивления R_c . Действительно, выражение (8) описывает граничную частоту рабочей области транзистора, т. е. области канал–затвор, выходной переменный сигнал измеряется при протекании тока через нагрузочное сопротивление R . Сопротивление R зашунтировано емкостью C_n , поэтому предельная частота передачи переменного сигнала не может превышать $\omega_1 = 1/(R_c C_n)$. Поскольку R_c растет с увеличением межэлектродного расстояния, эффект от увеличения этого расстояния существенно уменьшается. В предлагаемом транзисторе расстояние между затворной КЯ и ямой в канале может быть уменьшено радикально, что может значительно увеличить граничную частоту полевого транзистора.

Таким образом, уменьшение размеров рабочей области транзисторов приводит к увеличению граничной частоты. Однако, как уже упоминалось во Введении, миниатюризация транзисторов привела к возрастанию токов утечки, которые существенно увеличивают энергопотребление и сводят дальнейшие перспективы развития в этом направлении к нулю. Использование резонансного туннелирования способно существенно снизить токи утечки, но при этом необходимо использовать системы носителей пониженной размерности. Данные системы возникают в полупроводниковых гетероструктурах. В последнее время также активно изучаются углеродные наноматериалы. Здесь возникают новые проблемы с миниатюризацией, а именно при уменьшении размера L_{ch} до 20 нм возникает поперечное размерное квантование, которое существенно ухудшает резонансный характер туннелирования и сводит к нулю усиления по его подавлению, что было продемонстрировано при исследовании РТД наноразмеров [9]. Однако на сегодняшний день было показано, что РТД с поперечным размером 5 мкм способен работать на частотах выше 2 ТГц, что на 2 порядка выше частот современных высокочастотных транзисторов. Серьезным препятствием широкого использования РТД является дороговизна создания полупроводниковых наногетероструктур, что требует привлечения молекулярно-пучковой эпитаксии. Однако развитие относительно дешевых способов получения углеродных наноматериалов создает серьезные перспективы использования таких материалов для создания РТД. Уже успешно созданы РТД на основе графеновых пленок [12], но качество их пока уступает полупроводниковым аналогам.

5. Заключение

Подводя итог, можно утверждать, что использование в затворах полевых транзисторов двумерных слоев носителей позволит заметно снизить ток утечки и значительно увеличить их граничные частоты. Однако использование таких затворов вносит новые ограничения на миниатюризацию приборов, поскольку резонансный характер туннелирования подразумевает, что

продольный квазиимпульс носителей остается хорошим квантовым числом и сохраняется при туннелировании. Предел миниатюризации таких транзисторов является темой отдельного исследования, так как высокочастотные свойства таких транзисторов являются перспективными для дальнейших исследований. Основной проблемой широкого использования таких приборов на сегодняшний день является значительная дороговизна технологии молекулярно-пучковой эпитаксии. Дальнейшее развитие технологии возможно в направлении создания углеродных наноматериаллов, которые позволят создать РТД высокого качества существенно дешевле, чем это достигается на полупроводниковых материалах. В этом случае следует ожидать серьезных изменений в архитектуре классических компьютеров и появление новых решений в области квантовых вычислений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-02-0102513.

Список литературы

- [1] E.N. Shauly. *J. Low Power Electron. Appl.*, **2**, 1 (2012).
- [2] А.А. Орликовский, В.Ф. Лукичев, К.В. Руденко, А.С. Рудый. *Нанотехнологии и наноматериалы*, **54** (4), 10 (2010).
- [3] T. Ashley, L. Buckle, S. Datta, M.T. Emeny, D.G. Hayes, K.P. Hilton, R. Jefferies, T. Martin, T.J. Phillips, D.J. Wallis, P.J. Wilding, R. Chau. *Electron. Lett.*, **43**, 14 (2007).
- [4] L. Esaki. *Phys. Rev.*, **109**, 603 (1958).
- [5] J.R. Shriver. *Semiconductor Surface Physics* ed. by R.H. Kingston (Univ. of Pennsylvania Press, Philadelphia, 1956) p. 68.
- [6] D.C. Tsui. *Phys. Rev. Lett.*, **24**, 303 (1970).
- [7] L.L. Chang, L. Esaki, R. Tsu. *Appl. Phys. Lett.*, **24**, 593 (1974).
- [8] Р.Ф. Казаринов, Р.А. Суриц. *ФТП*, **5**, 707 (1971).
- [9] H. Mizuta, T. Tanoue. *The Physics and Applications of Resonant Tunneling Diodes* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1995).
- [10] A.C. Seabaugh, E.A. Beam, Y.-C. Kao, J.H. Luscomber, J.N. Randall. *USA Proc. on Ultrafast and Optoelectron.*, **14**, 65 (1993). A.C. Seabaugh, W.R. Frensley, J.N. Randall, M.A. Reed, D.L. Farrington, R.J. Matyi. *IEEE Trans. Electron Dev.* **36**, 2328 (1989). J. Genoe, C. Van Hoof, K. Fobelets, R. Mertens, G. Borghs. *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 1051 (1991). U.K. Reddy, I. Mehdy, R.K. Mains, G.I. Haddad. *Sol. St. Electron.*, **32**, 1377 (1989). A.C. Seabaugh, Y.-C. Kao, J. Randall, W. Frensley. *Khatibzadeh. Jpn. J. of Appl. Phys.* **30**, 921 (1991). T. Mori, H. Ohnishi, K. Imamura, S. Muto, N. Yokoyama. *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 1779 (1986).
- [11] J.S. Moon, R. Rajavel, S. Bui, D. Wong, D.H. Chow. *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 183110 (2005).
- [12] L. Britnell, R.V. Gorbachev, R. Jalil, B.D. Belle, F. Schedin, A. Mishchenko, T. Georgiou, M.I. Katsnelson, L. Eaves, S.V. Morozov, N.M.R. Peres, J. Leist, A.K. Geim, K.S. Novoselov, L.A. Ponomorenko. *Science*, **335**, 947 (2012). L. Britnell, R.V. Gorbachev, A.K. Geim, L.A. Ponomorenko, A. Mishchenko, M.T. Greenaway, T.M. Fromhold, K.S. Novoselov, L. Eaves. *Nat. Commun.*, **4**, 1794 (2013).

Редактор А.Н. Смирнов

Field effect transistor with two-dimensional gate and channel

V.G. Popov*+

* Institute of Microelectronics Technology
of Russian Academy of Science,
142432 Chernogolovka, Russia
+ Moscow Institute of Physics and Technology,
141700 Dolgoprudny, Russia

Abstract An application of resonant tunneling of carriers is considered in transistors. It is shown that the resonant character of the tunneling allows to reduce the leakage currents, which is one of the main causes of the crisis in the development of transistors today. In this paper a new type of field-effect transistor is proposed with a gate and a channel on the basis of two-dimensional systems of carriers. Prospects of further transistor miniaturization are discussed. For transistors with 2D gate and channel excessive miniaturization suppresses resonant tunneling of carriers and, thus, increases the leakage current.