

Снижение подвижности электронов в канале металл–окисел–полупроводник транзистора при уменьшении длины затвора

© А.А. Французов[¶], Н.И. Бояркина, В.П. Попов

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 14 мая 2007 г. Принята к печати 24 мая 2007 г.)

Измерена эффективная подвижность $\mu_{\text{эф}}$ электронов в каналах металл–окисел–полупроводник транзисторов с длиной канала L от 3.8 до 0.34 мкм, изготовленных на пластинах типа кремний-на-изоляторе. Обнаружено, что $\mu_{\text{эф}}$ уменьшается при уменьшении L . Показано, что объяснить это уменьшение влиянием последовательных сопротивлений истока и стока можно, только если предположить быстрое возрастание сопротивлений при уменьшении затворного напряжения. Такое предположение трудно объяснить. Предложена более реалистичная модель, объясняющая наблюдаемое снижение $\mu_{\text{эф}}$ при уменьшении L . Модель предполагает возникновение на краях затвора зон с меньшей подвижностью, чем в средней части канала. Анализ показал, что при этом график зависимости величины $1/\mu_{\text{эф}}$ от $1/L$ должен быть линейным, что и наблюдается в действительности. Использование этого графика позволяет определить подвижность электронов μ_0 в средней части канала и некоторую величину A , характеризующую зоны со сниженной подвижностью на краях затвора.

PACS: 73.40.-c, 73.40.Qv, 73.25.+i, 73.20.-r

1. Введение

При уменьшении длины канала металл–окисел–полупроводник (МОП) транзистора начинают играть все большую роль сопротивления областей истока и стока, величина которых становится соизмеримой с величиной сопротивления канала транзистора. В результате понижается крутизна транзистора. Это понижение часто описывают, используя уменьшенную эффективную величину подвижности электронов в канале $\mu_{\text{эф}}$. В ряде работ [1–7] предложены многочисленные способы определения сопротивления истока и стока из характеристик транзистора. Как оказалось, величины этих сопротивлений оказались зависящими от напряжения на затворе и соответственно от тока в канале [1–4]. Удовлетворительного объяснения этому факту не было найдено, хотя предложены полуэмпирические формулы, описывающие эту зависимость [1,2].

В нашей работе [8] было обнаружено, что $\mu_{\text{эф}}$ уменьшается при уменьшении длины канала МОП-транзистора. Это также может объясняться наличием сопротивления областей истока и стока. Поскольку сопротивление короткого канала меньше, чем длинного, влияние последовательных сопротивлений сильнее и соответственно $\mu_{\text{эф}}$ уменьшается при уменьшении длины канала. В настоящей работе изготовлены транзисторы с различными длинами затворов и проанализированы причины снижения эффективной подвижности при уменьшении длины затвора.

2. Технология изготовления экспериментальных транзисторов

Были изготовлены и исследованы две партии n -канальных транзисторов. В первой партии транзисторы изготавливались с помощью оптической литографии и имели затворы длиной 3.6 и 1.7 мкм. Длина измерялась на электронном микроскопе. Для этого удалялись межслойный и защитный окислы. Это выполнялось после того, как были измерены характеристики транзисторов, так как такие измерения разрушающие. Транзисторы изготавливались на КНИ-пластинах, полученных методом Dele-Cat [9]. Отсеченный слой кремния имел толщину 300 нм и лежал на захороненном окисле такой же толщины. В слое КНИ изготавливались островки кремния, а между ними кремний окислялся посредством локоупроцесса. Островки кремния легировались бором путем имплантации, так что концентрация бора на поверхности составляла $3.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Далее выращивался подзатворный окисел толщиной 6.4 нм при температуре 900°C в 30% кислороде в течение 30 мин. Окисел азотировался отжигом в N_2O . Далее наносился поликремний толщиной 250 нм, который легировался имплантацией фосфора до концентрации $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. После нанесения резиста и фотолитографии поликремний травился в плазме $\text{SF}_6 + \text{CFCl}_3$ (85 и 15%), и образовывались затворы транзисторов. После травления выполнялось окисление затворов в кислороде при 900°C в течение 10 мин.

После этого производилась имплантация истоков и стоков в два приема. Сначала имплантировался мышьяк дозой $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и энергией 30 кэВ, маской при этом служил затвор. Таким образом, создавались области слабого легирования возле затвора с концентрацией около 10^{19} см^{-3} и глубиной около 50 нм.

[¶] E-mail: aa_fran@academ.org

На втором этапе изготавливались области сильного легирования. Имплантировался фосфор с высокой энергией до 160 кэВ, чтобы легированные области истоков-стоков доходили до захороненного окисла. Затвор при таких энергиях уже не может служить маской, и маской служил фоторезист. Для этого выполнялась еще одна фотолитография: резист закрывал затвор и отступал от его края на 1 мкм со стороны истока и на 2 мкм со стороны стока. Концентрация фосфора в сильно легированных областях составляла 10^{20} см^{-3} .

После изготовления областей истоков-стоков выполнялись обычные операции нанесения межслойного пиролитического окисла, травления окон в этом окисле, напыления алюминия, фотолитографии и травления алюминия.

Во второй партии транзисторов использовалась более простая технология. Транзисторы также изготавливались на КНИ-пластинах, полученных методом Dele-Cat. Отсеченный слой кремния имел толщину 480 нм. Он легировался бором посредством имплантации, так что концентрация бора на поверхности составляла $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Далее выращивался подзатворный окисел толщиной 10 нм при температуре 900°C в кислороде в течение 30 мин.

Короткий затвор длиной до 150 нм получали при помощи обычной фотолитографии. При помощи нее на пластине с нанесенным поликремнием получали полосы фоторезиста шириной около 1 мкм. Далее проводилось плазменное травление поликремния, причем выполнялось некоторое перетравливание, т.е. время травления было больше, чем нужно для удаления поликремния с не покрытых резистом мест. Меняя время травления, можно было получать полосы поликремния различной ширины, т.е. затворы различной длины. Наиболее короткие затворы которые при этом получались, были длиной около 150 нм. При попытке получить еще более короткий затвор происходило перетравливание затвора насквозь. Транзисторы, на которых выполнялись измерения, имели затворы длиной 3800, 880 и 380 нм. Воспроизводимость длины затвора для разных транзисторов составляла ± 30 нм.

Так же, как на первой партии, имплантация для создания истоковых и стоковых областей проводилась в два приема. Сначала имплантировался мышьяк дозой $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и энергией 30 кэВ. Маской при этом служил затвор. Далее создавались области сильного легирования фосфором. Поскольку толщина КНИ в этой партии была больше, максимальная энергия при имплантации была тоже больше — 240 кэВ, чтобы области истоков и стоков доходили до захороненного окисла. Заключительная часть маршрута такая же, как для первой партии.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Затворные характеристики транзисторов измерялись при малом напряжении на стоке $V_d = 0.1 \text{ В}$ с использованием платы LabVIEW, позволяющей автоматизировать измерения [10].

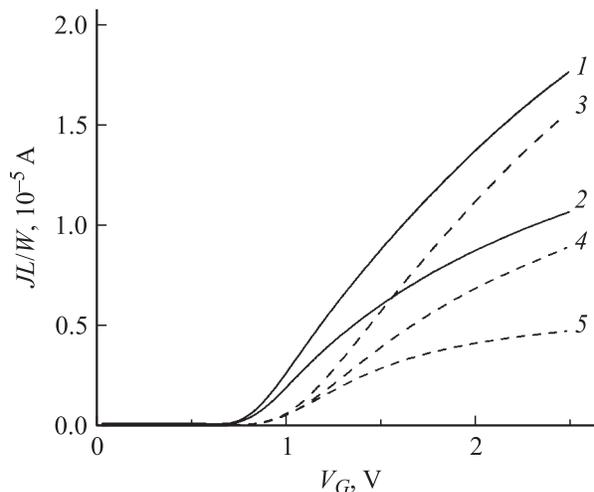


Рис. 1. Зависимости JL/W от напряжения на затворе для исследованных транзисторов. Номера у кривых соответствуют номеру транзистора. $V_D = 0.1 \text{ В}$.

На рис. 1 даны эти характеристики для транзисторов первой и второй партии с разными длинами затворов, причем по ординате отложены величины JL/W , где J — ток в канале, L — длина канала, W — его ширина, т.е. ток, приведенный к единичной величине W/L . Величины W составляли 6 мкм для первой партии и 10 мкм для второй. Расчет показал, что мышьяк диффундирует под край затвора приблизительно на 20 нм при температурных операциях после его имплантации. Поэтому L взята на 40 нм меньше длины затвора.

Из рис. 1 видно, что величина JL/W уменьшается при уменьшении длины затвора. Следует отметить, что повторяемость характеристик транзисторов с одинаковой L при измерении на разных кристаллах была достаточно высокой. Пороги воспроизводились с точностью $\pm 20 \text{ мВ}$, а токи повторялись с точностью $\pm 2\%$.

Из данных, представленных на рис. 1, можно найти μ_{meas} — измеренную подвижность электронов в канале — для всех транзисторов, используя известную формулу:

$$J = C_{\text{ox}} \mu_{\text{meas}} W/L (V_G - V_T - V_D/2) V_D. \quad (1)$$

Или, дифференцируя по V_G ,

$$dJ/dV_G = C_{\text{ox}} \mu_{\text{meas}} W/L V_D.$$

Отсюда

$$\mu_{\text{meas}} = dJ/dV_G L (C_{\text{ox}} W V_D)^{-1}. \quad (2)$$

Взяв производную в начальной, наиболее крутой области, получили значения измеренной подвижности транзисторов 1 партии 260 и $185 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ соответственно для первого и второго транзисторов с длинами затвора 3.6 и 1.7 мкм. Для третьего, четвертого и пятого транзисторов 2 партии с длинами канала 3.8, 0.84

и 0.34 мкм получили эффективные подвижности 320, 180 и 135 см²В·с. Обращает на себя внимание меньшая величина подвижности на транзисторах с большой длиной затвора первой партии по сравнению со второй. Аналогичное уменьшение подвижности на структурах с азотированным окислом наблюдалось в работах [11,12].

Первое предположение для объяснения уменьшения эффективной подвижности при уменьшении длины канала — влияние последовательных сопротивлений областей истока и стока R_S и R_D , поскольку при уменьшении длины канала уменьшается сопротивление транзистора, и влияние последовательных сопротивлений становится больше.

Была оценена величина этих сопротивлений. Каждое из этих сопротивлений состоит из трех частей: сопротивление области слабого легирования R_w , области сильно-го легирования R_{st} и контактов металл–кремний R_c :

$$R_S = R_{wS} + R_{stS} + R_{cS}, \quad (3)$$

$$R_D = R_{wD} + R_{stD} + R_{cD}. \quad (4)$$

Для расчета величин R_w , R_{st} и R_c на тестовых структурах были измерены удельные сопротивления (проводимости) легированных областей и контактов 4-зондовым методом. Основной вклад в R_S и R_D вносит сопротивление области слабого легирования. Величины

$$r_S = R_S W, \quad r_D = R_D W \quad (5)$$

— сопротивления, пересчитанные на 1 мкм ширины канала. Для обеих партий r_S составило 1100 Ом·мкм, а r_D — 2100 Ом·мкм.

Далее по измеренной характеристике находилась подвижность с учетом сопротивления областей истока и стока. При этом мы использовали следующие формулы:

$$V_D = V_D^* - jr_S - jr_D, \quad (6)$$

$$V_G = V_G^* - jr_S, \quad (7)$$

где V_D — напряжение между стоковой и истоковой областями канала транзистора; V_G — напряжение между затвором и истоковой областью канала; V_D^* — напряжение, подаваемое на стоковый электрод относительно земли; V_G^* — напряжение, подаваемое на затворный провод относительно земли; j — приведенный ток транзистора, т.е. ток на 1 мкм ширины канала $j = J/W$; r_S — сопротивление области истока (рассчитанное на 1 мкм ширины канала); r_D — сопротивление области стока (рассчитанное на 1 мкм ширины канала).

Подвижность несколько возрастает после учета влияния последовательных сопротивлений. Этот учет можно сделать следующим образом: приведенный ток в канале

$$j = 1/LC_{ox}\mu_{\text{eff}}\{V_G^* - jr_S - V_t - 0.5[V_D^* - j(r_S + r_D)]\} \times [V_D^* - j(r_S + r_D)]. \quad (8)$$

Из равенства (8) можно найти μ_{eff} при известных j , V_G^* , V_D^* .

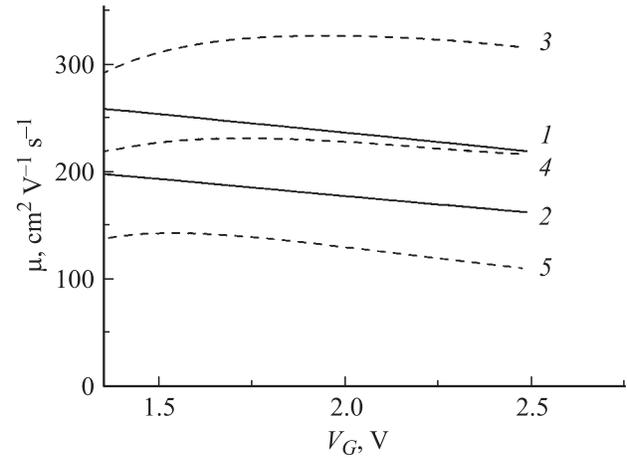


Рис. 2. Зависимости эффективной подвижности электронов в канале транзисторов от напряжения на затворе, вычисленные с учетом измеренных сопротивлений истока и стока по формуле (8). Номера у кривых соответствуют номеру транзистора.

На рис. 2 показаны величины μ_{eff} , полученные таким способом, для транзисторов обеих партий. Из рисунка видно, что учет сопротивлений не изменяет принципиально того положения, что подвижность существенно уменьшается при уменьшении длины канала.

Следует, однако, заметить, что сопротивления, которые мы закладываем в расчет, могут не учитывать всех причин возникновения последовательных сопротивлений. Например, если при травлении затвора возникает по какой-то причине сопротивление на его границе, то сопротивления r_S и r_D должны быть увеличены на некоторую величину r_0 . Нами составлены системы из уравнений типа (8) для двух транзисторов из каждой партии с учетом этого сопротивления r_0 :

$$j_1 = 1/L_1 C_{ox} \mu \{V_G^* - j(r_S + r_0) - V_t - 0.5[V_D^* - j(r_S + r_D + 2r_0)]\} [V_D^* - j(r_S + r_D + 2r_0)], \quad (9)$$

$$j_2 = 1/L_2 C_{ox} \mu \{V_G^* - j(r_S + r_0) - V_t - 0.5[V_D^* - j(r_S + r_D + 2r_0)]\} [V_D^* - j(r_S + r_D + 2r_0)]. \quad (10)$$

Индексы 1 и 2 при j и L относятся к первому и второму выбранному транзистору. Система уравнений (9) и (10) решалась относительно μ и r_0 , т.е. мы считали эти величины для обоих транзисторов одинаковыми.

На рис. 3 и 4 показаны результаты решения системы для первого и второго транзисторов 1 партии и третьего и четвертого транзисторов 2 партии. В результате решения систем получилось сопротивление r_0 , быстро возрастающее при уменьшении V_G , что получалось и в работах других авторов [1–4]. Такое поведение не получило пока удовлетворительного объяснения.

Величина μ на рис. 3 очень медленно уменьшается с ростом V_G , а на рис. 4 даже несколько подрастает.

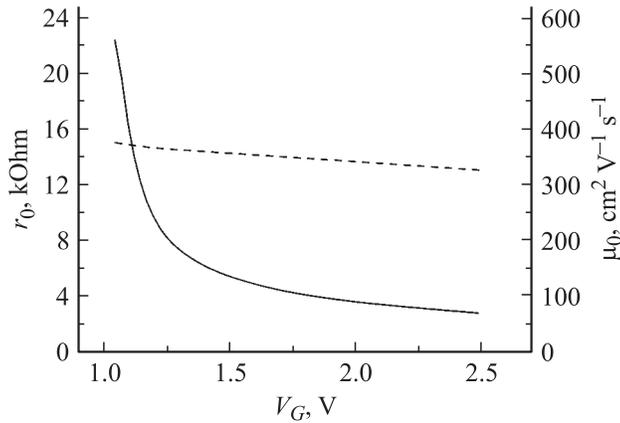


Рис. 3. Величины подвижности электронов (штриховая кривая) и добавочного последовательного сопротивления (сплошная кривая), полученные при решении системы уравнений (9) и (10) для транзисторов 1 и 2 первой партии.

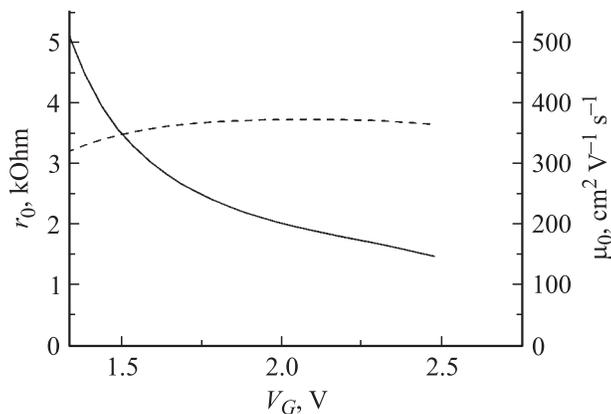


Рис. 4. То же, что и на рис. 3 для транзисторов 3 и 4 второй партии.

Такая зависимость не совпадает с тем, что получено в экспериментах на транзисторах с длинным каналом [13], где всегда наблюдалось существенное уменьшение подвижности при росте напряжения на затворе.

Таким образом, попытка объяснить снижение подвижности влиянием последовательных сопротивлений приводит к зависимостям μ и r_0 от V_G , которые непонятно как объяснить.

4. Модель для объяснения снижения эффективной подвижности при уменьшении длины затвора

Влияние последовательных сопротивлений постоянной величины на эффективную подвижность должно заметно уменьшаться при уменьшении V_G , так как при этом возрастает сопротивление канала и, значит, последовательные сопротивления истока и стока влияют слабее на ток в канале. Иная картина имеет место, если

на краю затвора образуются области с меньшей подвижностью электронов, чем в середине затвора. В этом случае будет происходить снижение эффективной подвижности и при малых величинах V_G . Если объяснять это уменьшение последовательными сопротивлениями, то надо предполагать быстрое увеличение последовательных сопротивлений при снижении V_G . В предлагаемой модели мы предполагаем, что по краям затвора образуются области с низкой подвижностью, и влияние этих областей на общую эффективную подвижность возрастает по мере снижения длины канала. Если длина нарушенных областей L_{00} , а подвижность в них μ_{00} существенно ниже, чем подвижность μ_0 в средней части канала, то падение напряжения V_{D0} в средней части канала выражается как

$$V_{D0} = J \left[\frac{W}{L_0} C_{ox} \mu_0 (V_G - V_T) \right]^{-1}, \quad (11)$$

где L_0 — длина средней части канала.

Падение напряжения на нарушенной части

$$V_{D00} = J \left[\frac{W}{L_{00}} C_{ox} \mu_{00} (V_G - V_T) \right]^{-1}. \quad (12)$$

Полное падение напряжения

$$\begin{aligned} V_D &= V_{D0} + 2V_{D00} \\ &= J [C_{ox} W (V_G - V_T)]^{-1} \left(\frac{L_0}{\mu_0} + 2 \frac{L_{00}}{\mu_{00}} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Из (13) и (1) получаем при V_D много меньше, чем $V_G - V_T$:

$$\frac{L}{\mu_{eff}} = \frac{L_0}{\mu_0} + 2 \frac{L_{00}}{\mu_{00}}. \quad (14)$$

Из (14) следует

$$\begin{aligned} \frac{1}{\mu_{eff}} &= \frac{1}{\mu_0} \frac{L - 2L_{00}}{L} + \frac{2}{\mu_{00}} \frac{L_{00}}{L} \\ &= \frac{1}{\mu_0} + \frac{2L_{00}}{L} \left(\frac{1}{\mu_{00}} - \frac{1}{\mu_0} \right) = \frac{1}{\mu_0} + \frac{A}{L}, \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$A = 2L_{00} \left(\frac{1}{\mu_{00}} - \frac{1}{\mu_0} \right). \quad (16)$$

На рис. 5 приведена зависимость $1/\mu_{eff}$ от $1/L$ для двух транзисторов первой партии и трех транзисторов второй. Из тангенса угла наклона этого графика можно найти величину A , а пересечение его с вертикальной осью дает значение $1/\mu_0$. Найденная таким способом величина μ_0 составила $420 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ для первой партии и 320 для второй. Величина A для первой партии значительно больше, чем для второй. Это объясняется тем, что подвижность μ_{00} в нарушенной части канала для этой партии меньше или длина этой части L_{00} больше, чем для второй партии (см. формулу (16)).

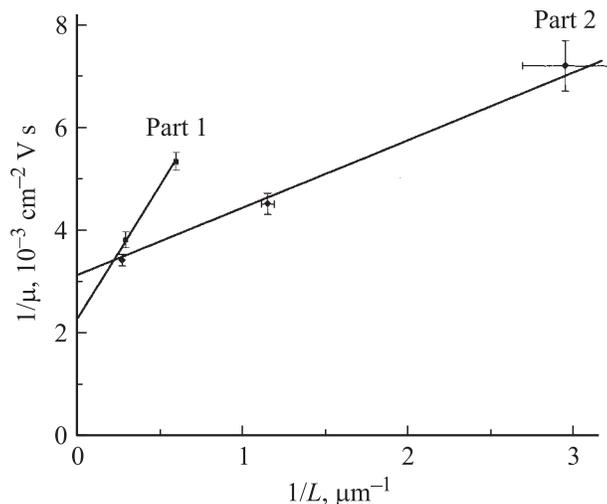


Рис. 5. Зависимости $1/\mu$ от $1/L$ для транзисторов первой и второй партии.

Остается вопрос — почему по краям затвора образуются области с малой подвижностью. Гипотеза состоит в том, что в этих областях имеет место большая плотность поверхностных состояний. В результате значительная часть заряда, наведенного напряжением на затворе, захватывается на эти состояния и соответственно заряд в канале уменьшается. Вторая причина снижения подвижности — увеличение рассеяния в этих периферийных областях из-за рассеяния на зарядах в поверхностных состояниях.

Из-за чего образуются эти области с большой плотностью поверхностных состояний? По-видимому, происходит повреждение окисла при плазменном травлении или следы реагентов остаются на поверхности и в окисле и диффундируют потом на границу раздела окисел–кремний.

5. Заключение

1. Попытки объяснить уменьшение величины подвижности при уменьшении длины затвора наличием последовательных сопротивлений областей истока–стока или сопротивлений на краях затвора приводят к зависимостям этих сопротивлений от напряжения на затворе, которые трудно объяснить.

2. Предложена модель, которая объясняет уменьшение подвижности при уменьшении длины канала возникновением на краю затвора областей с меньшей величиной подвижности чем в середине, обусловленной, по-видимому, большей плотностью поверхностных состояний.

3. Метод сравнения подвижности в транзисторах с разной длиной канала и построение графика $1/\mu(1/L)$ может использоваться для определения параметров канала с нарушенными областями и для другой технологии изготовления транзисторов.

Список литературы

- [1] J.-C. Guo, S.S.-S. Chung, C.C.-H. Hsu. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-41**, 1811 (1994).
- [2] K.Y. Lim, X. Zhou. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-47** (6), 1300 (2000).
- [3] C.-L. Lou, W.-K. Chim, D.S.-H. Chan, Y. Pan. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-45**, 1317 (1998).
- [4] D.M. Lim, H.C. Lim, H.T. Kim. Sol. St. Electron., **47**, 1707 (2003).
- [5] S. Bisemans, M. Hendriks, S. Kubicek, K. De Meyer. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-47** (6), 1310 (1998).
- [6] S.E. Laux. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-31**, 1245 (1984).
- [7] J.F. Chen, J. Tao, P. Fang, C. Hu. IEEE Trans. Electron. Dev., **19** (7), 216 (1998).
- [8] В.П. Попов, И.В. Антонова, А.А. Французов, Л.Н. Сафронов, О.В. Наумова, Д.В. Киланов. ФТП, **35** (9), 1075 (2001).
- [9] В.П. Попов, И.В. Антонова, А.А. Французов, Л.Н. Сафронов, А.И. Попов, О.В. Наумова, А.Х. Антоненко, Д.В. Киланов, Л.В. Миронова. Микроэлектроника, **31** (4), 274 (2002).
- [10] Ф.П. Жарков, В.В. Каратаев, В.Ф. Никифоров, В.С. Панов. *Использование виртуальных инструментов LabVIEW* (М., Солон-Р, Радио и связь, Горячая линия — Телеком, 1999).
- [11] L. Perron, A.L. Lacaita, A. Pacelli, R. Bez. IEEE Electron. Dev. Lett., **18**, 235 (1997).
- [12] S. Villa, G. De Geronimo, A. Pacelli, A. Pacelli, A.L. Lagata, A. Longoni. Microelectronics Reliability, **38**, 1919 (1998).
- [13] S. Takagi, A. Toriumi, M. Iwase, H. Tango. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-41**, 2356 (1994).

Редактор Л.В. Беляков

Decrease of effective electron mobility in channel of metal-oxide-semiconductor field effect transistor with gate length decreasing

A.A. Frantsuzov, N.I. Bojarkina, V.P. Popov

Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract An effective electron mobility μ_{eff} was measured in channels of metal-oxide-semiconductor field effect transistor with length L of the channels in the range from 3.8 to 0.34 μm . The transistors were made on silicon on insulator wafers. A decrease in μ_{eff} with L decreasing was observed. It was shown, such decrease may be explained by the influence of source and drive resistances, only if rapid increase in the resistances is assumed with lowering in the gate voltage. Such assumption is difficult to explain. We proposed a more realistic model, which describes the observed decrease in μ_{eff} with L decreasing. The model supposes an origin of two regions near the edges of the gate, in which μ is much less than μ_0 in the middle of the channel. An analysis has shown a graph of the dependence $1/\mu_{\text{eff}}$ on L should be linear. This behavior takes place in a practice. Use of the graphs allows finding an mobility μ_0 in the middle of the channel and some quantity A , which describes the regions with lowered mobility at the gate edges.