

Влияние квантования носителей в поликремниевом затворе на сдвиг порогового напряжения МДП-транзистора

А.Е. Лапин, Ю.А. Парменов

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия*

parmenov@mail.ru

При производстве МДП-транзисторов с технологическими нормами вплоть до 65 нм в настоящее время в качестве материала затвора используется сильнолегированный поликремний. Эффекты квантования носителей инверсного слоя в подложке и обеднения поликремниевого затвора обычно учитываются введением эффективной электрической толщины оксида. В то же время в сильнолегированном поликремниевом затворе проявляется еще один квантовый эффект. Он связан с квантованием носителей вблизи высокого потенциального барьера и образованием квантового диполя, приводящего к сдвигу порогового напряжения МДП-транзистора в сторону уменьшения.

Проведено моделирование квантового эффекта с помощью модели градиента плотности, которая включена в состав пакета Synopsys Sentaurus TCAD. Установлено, что сдвиг порогового напряжения МДП-транзистора не зависит от толщины подзатворного диэлектрика. Величина сдвига зависит от концентрации примеси в подложке и лежит в пределах от 40 до 110 мВ в зависимости от типа канала при изменении концентрации примеси от 10^{16} до 10^{18} см⁻³. Сдвиг порогового напряжения сильно зависит от концентрации примеси в затворе и составляет порядка 20–140 мВ для *n*-МОП-транзистора и порядка 20–200 мВ для *p*-МОП-транзистора при изменении концентрации примеси от $1 \cdot 10^{19}$ до $3 \cdot 10^{20}$ см⁻³.

Показано, что локальное изменение концентрации примеси в затворе вблизи границы раздела polySi/SiO₂ оказывает сильное влияние на сдвиг порогового напряжения и этот эффект следует учитывать при моделировании МОП-транзистора. Результаты работы могут использоваться для калибровки модели при расчете ВАХ транзисторов.

Ключевые слова: МДП-транзистор; квантовый эффект в поликремнии; обеднение поликремниевого затвора; метод градиента плотности; TCAD.

Для цитирования: Лапин А.Е., Парменов Ю.А. Влияние квантования носителей в поликремниевом затворе на сдвиг порогового напряжения МДП-транзистора // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т.22. – №2. – С. 171–179. DOI: 10.24151/1561-5405-2017-22-2-171-179

The Effect of Quantization in the Polysilicon Gate on the Shift of C-V Curves MOS-transistor

A.E. Lapin, Y.A. Parmenov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

parmenov@mail.ru

Currently polysilicon with high dopant concentration is used as a gate material in industrial manufacturing of MOST with the technological mode of up to 65 nm. The effects of quantization of inversion layer carriers in the substrate and of polysilicon gate depletion usually are taken into account by administering an effective electrical oxide thickness. At the same time, in the high-dopant polysilicon of the gate an additional quantum effect becomes apparent. It is associated with the quantization of the carriers near to high potential barrier and with the quantum dipole formation, leading to the shift of the MOS threshold voltage reduction.

The effect of the polysilicon quantization has been simulated using the density gradient model included in the Synopsys Sentaurus TCAD package. It has been found that the shift of threshold voltage of MOS transistor is not dependent on the gate dielectric thickness. The shift of threshold voltage strongly depends on the impurity concentration in the substrate and lies in the range from 40 to 110 mV order, depending on the channel type, for the change of the impurity concentration from 10^{16} to 10^{18} cm⁻³. The shift of the threshold voltage is strongly dependent on the impurity concentration in the gate and is about 20 –140 mV for n-MOSFET and from 20 to 200 mV order for p-MOSFET for the change in the impurity concentration from $1 \cdot 10^{19}$ to $3 \cdot 10^{20}$ cm⁻³.

It has been demonstrated that the local variation of the impurity concentration in the gate near the border of PolySi/SiO₂ has a strong effect on the shift of the threshold voltage and this effect should be taken into account in the transistors physics modeling. The work results can be used for the model calibration of transistors current-voltage characteristics.

Keywords: MOSFET; PDE-effect; polysilicon quantization; density gradient model; TCAD.

For citation: Lapin A.E., Parmenov Y.A. Effect of Quantization in Polysilicon Gate on Shift of Threshold Voltage MOS-Transistor // Proc. of universities. Electronics. – 2017. – Vol.22. – №2. – P. 171–179. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-2-171-179

Введение. С началом развития работ в области моделирования полупроводниковых приборов значительные усилия были направлены на теоретический анализ и моделирование квантовых эффектов в инверсных слоях МДП-структур [1–3]. В работах [4, 5] рассматривается квантовое поведение основных носителей в режиме обогащения из-за его влияния на туннельный ток и электрическую емкость затвора. Также предполагалось, что для малых изгибов энергетических зон квантовые эффекты не наблюдаются и/или не столь важны. Именно поэтому процессы обеднения и обогащения носителей в поликремнии всегда относились к классическим работам и квантовые эффекты там не учитывались. Однако, как показано в работах [6, 7], эффекты квантования в поликремнии проявляются во всех режимах работы, включая режим плоских зон.

В режиме насыщения МДП-транзистора (МДПТ), когда в подложке возникает инверсный слой, на границе поликремниевого затвора с оксидом создается обедненная

область. Эффекты квантования носителей инверсного слоя и обеднения поликремния (Polysilicon Depletion Effect – PDE) обычно учитываются с помощью введения эффективной электрической толщины оксида, отражающей факт удаления друг от друга зарядов на затворе и в подложке. Наиболее простым способом борьбы с PDE-эффектом является увеличение концентрации легирующей примеси в поликремнии до уровня 10^{20} см^{-3} и выше. Это позволяет снизить степень проявления PDE-эффекта до незначительного, однако при этом происходит усиление действия другого эффекта, связанного с поликремнием, – квантование носителей вблизи границы polySi/SiO₂.

Квантование носителей в сильнолегированном поликремниевом затворе является паразитным эффектом, так как приводят к изменению характеристик МДПТ, усложняя процесс проектирования приборов. Поэтому без глубокого понимания эффекта и его полного всестороннего описания процесс создания реалистичных приборных моделей, прогнозирования характеристик существующих приборов и разработки новых на основе имеющейся технологии затруднен.

Цель настоящей работы – исследование эффекта квантования носителей в поликремниевом затворе МДПТ с помощью методов приборно-технологического моделирования САПР Synopsys Sentaurus TCAD. В частности, исследуется влияние эффекта квантования на сдвиг порогового напряжения МДПТ, определяемого по равному ему сдвигу ВФХ МДП-структуры затвор – подложка. Калибровку компьютерной модели подобных транзисторов целесообразно начинать с моделирования ВФХ и экстракции таких параметров, как толщина подзатворного диэлектрика, профили легирования затвора и канала, что в дальнейшем обеспечит начальное приближение при моделировании ВАХ и калибровке по ним моделей подвижности в слабых и сильных полях.

Квантование носителей в сильнолегированном поликремнии. В основе квантования носителей в сильнолегированном поликремнии лежит известный факт: волновые функции электронов и их концентрация на границе с бесконечно высоким потенциальным барьером стремятся к нулю. Вследствие наличия резкого потенциального барьера происходит интерференция волновых функций носителей заряда и заряд отталкивается от границы раздела. В результате создается так называемое «темное пространство», где концентрация носителей уменьшается по отношению к концентрации легирующей примеси. В кремнии размеры «темного пространства» для электронов и дырок составляют около 2–3 нм [7, 8].

На рис.1 показано различие в распределении концентрации носителей вблизи границы polySi/SiO₂ в двух случаях: при учете эффекта квантования в затворе и при классическом моделировании. Характерные параметры структуры в данном случае следующие: толщина подзатворного диэлектрика $T_{ox} = 2 \text{ нм}$; концентрация легирующей примеси в поликремнии $N_{poly} = 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; концентрация примеси в подложке $N_{sub} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; длина затвора $L_{gate} = 1 \text{ мкм}$. Как видно из рис.1, ситуация отличается как для порогового режима ($U_{GS} = 0,3 \text{ В}$), так и для режима обогащения ($U_{GS} = -1,8 \text{ В}$), и в меньшей степени для режима сильной инверсии ($U_{GS} = 1,8 \text{ В}$). Объяснение этому факту следующее: до тех пор пока определяемый классическим подходом слой обеднения в поликремнии будет сравним по ширине или меньше, чем размер «темного пространства», обедненный слой будет определяться квантовыми эффектами и будет больше, чем его классическое значение. С ростом напряжения на затворе толщина обедненного слоя становится больше размеров «темного пространства» и классическое значение восстанавливается.

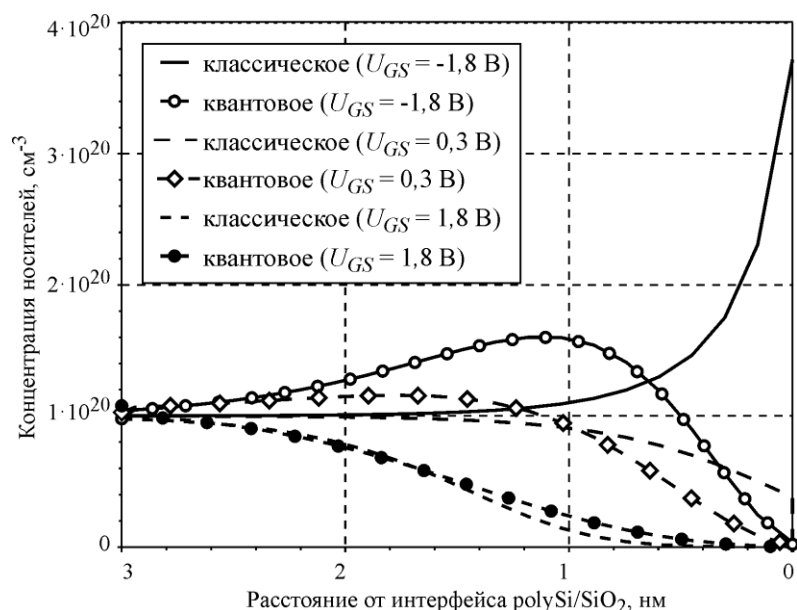


Рис.1. Сравнение классического и квантового распределений электронов в сильно-легированном поликремниевом затворе ($N_{poly} = 10^{20} \text{ см}^{-3}$) МОП-транзистора при различных напряжениях затвор-исток

Моделирование эффекта квантования. Моделирование эффекта квантования на основе самосогласованного решения уравнений Шрёдингера и Пуассона довольно трудоемко. Поэтому анализ и моделирование эффекта квантования проводились с помощью более гибкой модели градиента плотности (Density Gradient), которая включена в состав пакета Synopsys Sentaurus TCAD и обеспечивает достаточную точность моделирования эффектов [9–11]. В качестве подгоночных коэффициентов в модели Density Gradient для поликремния и кремния использовались значения $\gamma_n = 3,6$ для полупроводника n -типа и $\gamma_p = 5,6$ для p -типа.

Эффект квантования в поликремнии проявляется сдвигом порогового напряжения транзистора. При этом в результате сдвига пороговое напряжение, независимо от типа канала, уменьшается [8]. Это связано с образованием «квантового диполя», необходимым условием возникновения которого является высокая концентрация примеси вблизи границы polySi/SiO₂. Образование «квантового диполя» обусловлено тем, что вблизи границы существует минимальная область порядка 1 нм, где концентрация основных носителей меньше, чем концентрация легирующей примеси (см. рис.1). Для поликремния с концентрацией примеси 10^{20} см^{-3} это приводит к появлению поверхностного фиксированного положительного заряда примерно $q \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, где q — заряд электрона. Для достижения электронейтральности системы необходим избыточный заряд электронов в поликремнии (чтобы создать требуемый отрицательный компенсирующий заряд). Этот заряд обеспечивает выпуклость в распределении электронов на глубине примерно 2 нм (см. рис.1). Наличие двух реально существующих зарядовых областей, одной положительной и одной отрицательной, разделенных расстоянием примерно 1 нм, создает электрический диполь. На области, заключенной между этими двумя областями, падает конечное напряжение, которое проявляется как сдвиг порогового напряжения на величину порядка нескольких десятков милливольт.

При моделировании ВФХ МДП-структуры затвор – подложка влияние диполя проявляется как сдвиг всей кривой по горизонтальной оси напряжений на затворе. Как по-

казано на рис.2, для структуры при $N_{poly} = 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $N_{sub} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $T_{ox} = 2 \text{ нм}$ и $L_{gate} = 1 \text{ мкм}$ сдвиг ВФХ можно определить как сдвиг минимума емкости C_{min} в случае учета квантования в затворе относительно ситуации, когда квантование в затворе не учитывается. При этом значения емкости C_{min} не отличаются для обоих случаев, однако положение минимума на горизонтальной оси отличается заметно.

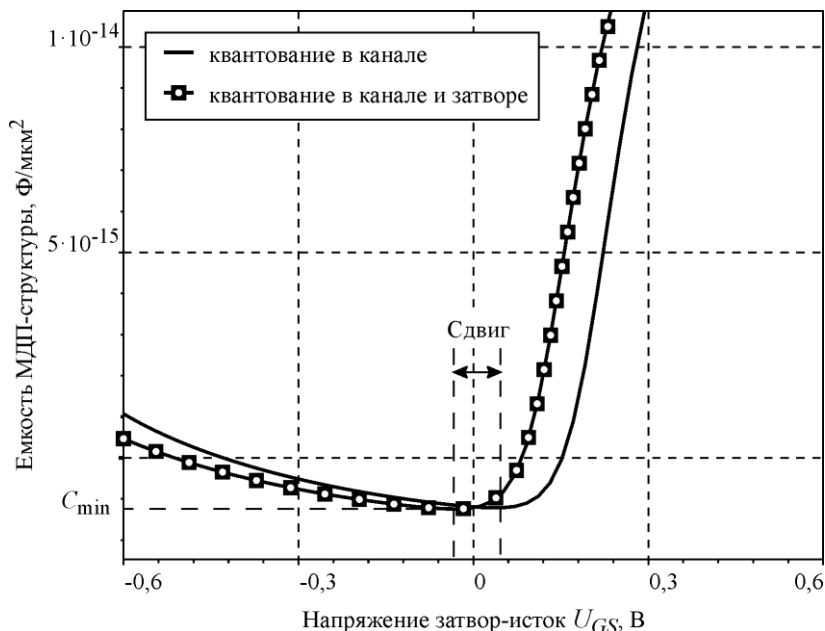


Рис.2. ВФХ МДПТ с учетом квантования носителей в канале, а также в канале и затворе

Под сдвигом ВФХ для n -МДПТ с n -затвором будем подразумевать сдвиг характеристики влево по горизонтальной оси (оси напряжений на затворе). Для p -МДПТ с p -затвором ситуация противоположная. В пакете Synopsys Sentaurus TCAD данным сдвигом можно управлять вручную, задавая дополнительный барьер к контакту с поликремниевым затвором. Подобным образом можно учитывать сдвиг характеристик, вызванный квантованием в затворе. Однако он не учитывает уменьшения емкостей в режимах обогащения и сильной инверсии и не позволяет оценить реальную концентрацию примеси в затворе.

Моделирование эффекта квантования и определение сдвига ВФХ. С помощью пакета Synopsys Sentaurus TCAD моделировалась структура МДПТ с различными уровнями легирования в поликремниевом затворе N_{poly} и в канале (подложке) N_{sub} . По смещению графиков ВФХ вычислялся сдвиг, вызванный «квантовым диполем» (см. рис.2).

Зависимость эффекта от толщины подзатворного диэлектрика. При изменении T_{ox} в пределах от 1 до 10 нм с шагом 0,1 нм не замечено изменения сдвига как для n -МОПТ, так и для p -МОПТ. При $N_{poly} = 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $N_{sub} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $L_{gate} = 1 \text{ мкм}$ сдвиг для n -канального транзистора составил 73,2 мВ, для p -канального — 98,4 мВ. Отсутствие влияния толщины подзатворного диэлектрика на данный эффект значительно упрощает разработчику калибровку компьютерной модели, а также показывает, что эффект остается актуален для любых транзисторов, производимых в рамках одного технологического процесса, но с различными толщинами подзатворного диэлектрика.

Зависимость эффекта от концентрации примеси в подложке. На рис.3 приведены зависимость сдвига порогового напряжения от концентрации примеси в подложке при постоянном уровне легирования затвора $N_{poly} = 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, а также линии, аппроксимирующие результаты моделирования с помощью полинома третьего порядка. Из рис.3 видно, что для обеих структур эффект «слабеет» при увеличении концентрации примеси в подложке. Соответственно, в рамках одного технологического процесса можно наблюдать различные сдвиги ВФХ при одинаковых конфигурациях затвора для транзисторов с разными пороговыми напряжениями.

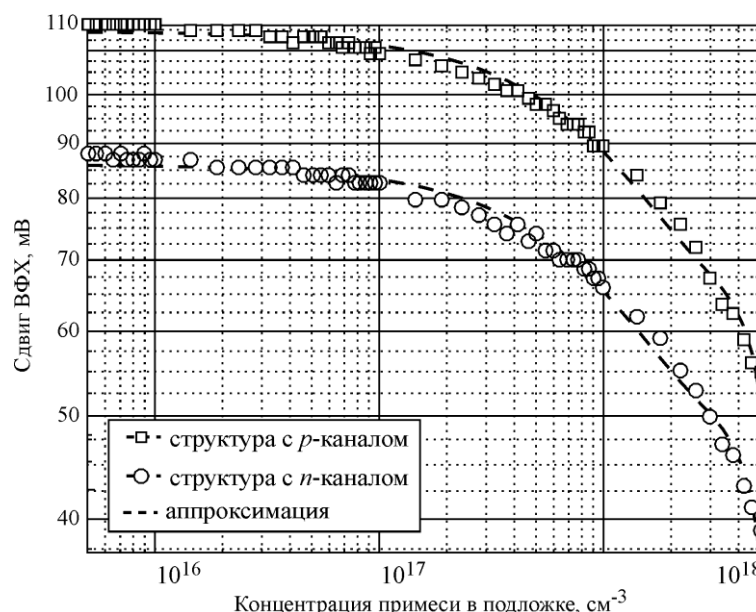


Рис.3. Зависимость сдвига порогового напряжения для n - и p -МОПТ от концентрации примеси в подложке

На рис.4 представлено распределение электронов для двух концентраций примеси в подложке ($N_{sub} = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $N_{sub} = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) при напряжениях, соответствующих C_{min} для каждого случая. Видно, что при $N_{sub} = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ квантовый диполь, отвечающий за сдвиг ВФХ, значительно больше, чем при $N_{sub} = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Уменьшение сдвига при увеличении концентрации примеси в подложке вызвано перераспределением электростатического потенциала в системе затвор – диэлектрик – подложка из-за изменения потенциала Ферми $\phi_B = \phi_T \ln(N_{sub}/n_i)$ и, следовательно, изгиба зон $2\phi_B$ в подложке при достижении границы сильной инверсии.

Зависимость эффекта от концентрации примеси в затворе. На рис.5 показано, как увеличивается сдвиг ВФХ с ростом концентрации примеси в поликремниевом затворе для структур при $T_{ox} = 2 \text{ нм}$ и $L_{gate} = 1 \text{ мкм}$. При этом концентрация примеси в затворе $N_{poly} = 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Зависимость эффекта от наличия области, обедненной примесью. Поликремниевый затвор невозможно легировать равномерно. В результате термических процессов часть примеси может выпасть из твердого раствора при низкотемпературных операциях обработки или диффундировать в оксид или в область канала при длительных высокотемпературных операциях, если подзатворный диэлектрик имеет малую толщину. Поэтому в легированном затворе на границе с оксидом может образоваться область, обедненная примесью [12]. Следовательно, взаимодействие эффекта квантования в поликремнии, который обусловлен концентрацией непосредственно на границе polySi/SiO_2 , и PDE-эффекта представляет интерес для исследователей.

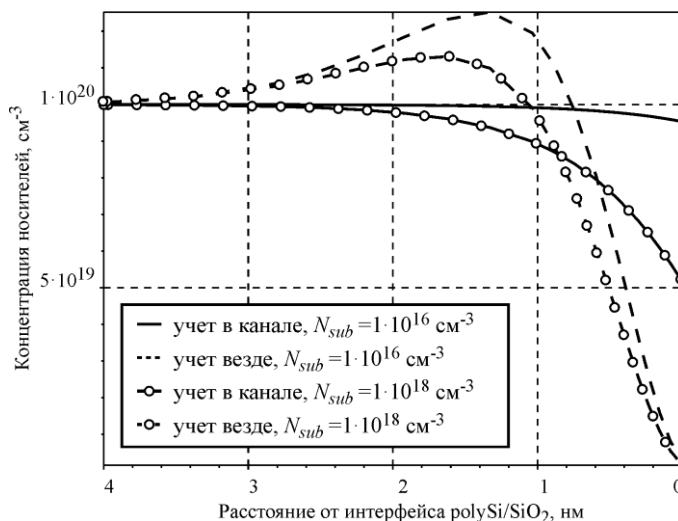


Рис. 4. Распределение электронов в сильнолегированном поликремниевом затворе при различных N_{sub} для n -МОПТ с учетом квантования

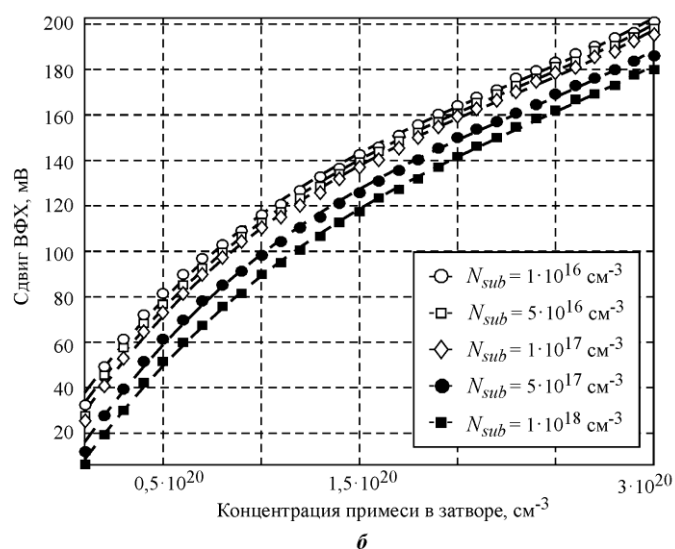
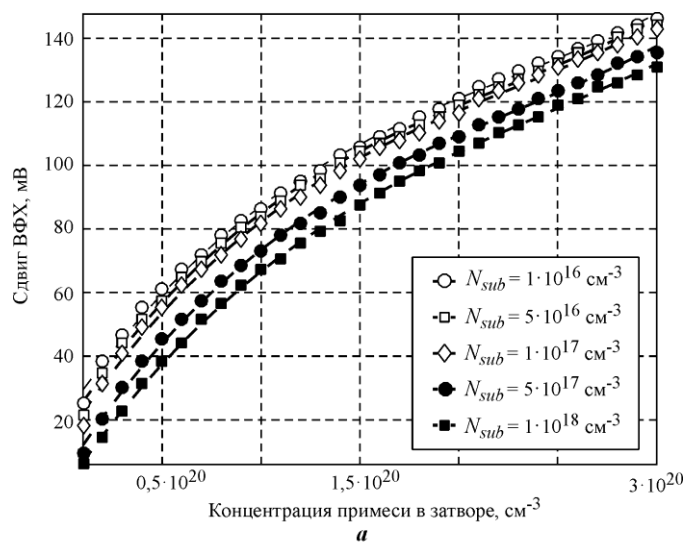


Рис. 5. Сдвиг ВФХ n -МОПТ (а) и p -МОПТ (б) в зависимости от концентрации примеси в затворе при различных N_{sub}

В современных технологических процессах поликремниевый затвор легируется достаточно сильно и спад концентрации вблизи границы polySi/SiO₂, как показывает проведенное в TCAD моделирование, происходит в области, характерная длина которой не превышает 2–3 нм. При моделировании взаимодействия эффекта квантования в поликремнии и PDE-эффекта применялась грубая, но позволяющая получить качественный результат абстракция: в моделируемом транзисторе при $T_{ox} = 2$ нм, $N_{poly} = 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $N_{sub} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $L_{gate} = 1$ мкм концентрация примеси в затворе уменьшалась скачкообразно до $N_{poly.gap}$ на расстоянии 0,5–2 нм от границы polySi/SiO₂.

Эффект квантования в поликремнии влияет на сдвиг ВФХ даже при размере обедненной примесью области 2 нм, при этом эффект проявляется достаточно сильно уже при $N_{poly.gap} = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (таблица). Такая концентрация значительно меньше концентраций примеси в поликремниевых затворах, применяемых в современных КМОП-процессах. Следовательно, при моделировании характеристик транзисторов данный эффект необходимо учитывать.

Зависимость сдвига ВФХ от размеров обедненной примесью области в затворе

Размер обедненной примесью области, нм	Тип канала	Сдвиг ВФХ, мВ		
		$N_{poly.gap} = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	$N_{poly.gap} = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$	$N_{poly.gap} = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$
0,5	<i>n</i>	32,4	37,2	52,8
	<i>p</i>	46,8	52,8	73,2
1	<i>n</i>	14,4	21,6	44,4
	<i>p</i>	24,0	31,2	61,2
2	<i>n</i>	0,0	4,8	40,8
	<i>p</i>	0,0	7,2	55,2

Заключение. Анализ влияния эффекта квантования носителей в поликремниевом затворе на сдвиг порогового напряжения МОПТ, а также технологических параметров структуры на степень проявления данного эффекта показал, что сдвиг порогового напряжения зависит от следующих параметров: концентрации примеси в подложке и поликремниевом затворе (не от толщины окисла); концентрации примеси в подложке (значение сдвига в зависимости от типа канала находится в пределах от 40 до 110 мВ при изменении концентрации примеси от 10^{16} до 10^{18} см^{-3}); концентрации примеси в затворе; локального изменения концентрации примеси в затворе вблизи границы раздела polySi/SiO₂.

Результаты работы могут использоваться для калибровки компьютерной модели МДПТ, применяться при проектировании приборов и как прогностическое средство при разработке новых технологических решений.

Литература

1. Stern F. Self-consistent results for n-type Si inversion layers // Phys. Rev. B. – 1972. – Vol. 5 – P. 4891–4899.
2. Van Dort M. J., Woerlee P.H., Walker A.J. A simple model for quantization effects in heavily-doped silicon MOSFET's at inversion conditions // Solid-State Electron. – 1994. – Vol. 37. – P. 411–414.

3. Hänsch W., Vogelsang T., Kircher R., Orlowski M. Carrier transport near the Si/SiO₂ interface of a MOSFET // *Solid-State Electron.* – 1989. – Vol. 32. – P. 839–849.
4. Suñé J., Olivo P., Riccò B. Self-consistent solution of the Poisson and Schrödinger equations in accumulated semiconductor-insulator interfaces // *J. of Appl. Phys.* – 1991. – Vol. 70. – P. 337–345.
5. Rana F., Tiwari S., Buchanan D.A. Self-consistent modeling of accumulation layers and tunneling currents through very thin oxides // *Appl. Phys. Lett.* – 1996. – Vol. 69. – P. 1104–1106.
6. Pacelli A., Spinelli A., Perron L.M. Carrier quantization at flat bands in MOS devices // *IEEE Trans. Elec. Dev.* – 1999. – Vol. 46. – P. 383–387.
7. Spinelli A., Cler R., Ghibaudo G. An analytical model for flat-band polysilicon quantization in MOS devices // *IEEE Trans. Elec. Dev.* – 2002. – Vol. 49. – P. 1314–1316.
8. Spinelli A., Pacelli A., Lacaita A. Polysilicon quantization effects on the electrical properties of MOS transistors // *IEEE Trans. Elec. Dev.* – 2000. – Vol. 47. – P. 2366–2371.
9. Schenk A., Wettstein A., Fitcher W. Quantum device-simulation with the density-gradient model on unstructured grids // *IEEE Trans. Elec. Dev.* – 2001. – Vol. 48 – P. 279–284.
10. Wettstein A., Penzin O., Lyimkis E. Integration of the density gradient model into a general purpose device simulator // *VLSI Design* – 2002. – Vol. 15. – P. 751–759.
11. Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. – М.: Техносфера, 2011. – 800 с.

Поступила 29.12.2016 г.; принята к публикации 24.01.2017 г.

Лапин Александр Евгеньевич – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), ae.lapin@gmail.com

Парменов Юрий Алексеевич – кандидат технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), parmenov@mail.ru

References

1. Stern F. Self-consistent results for n-type Si inversion layers. *Phys. Rev. B*, 1972, vol. 5, pp. 4891–4899.
2. Van Dort M. J., Woerlee P.H., Walker A.J. A simple model for quantization effects in heavily-doped silicon MOSFET's at inversion conditions. *Solid-State Electron*, 1994, vol. 37, pp. 411–414.
3. Hänsch W., Vogelsang T., Kircher R., Orlowski M. Carrier transport near the Si/SiO₂ interface of a MOSFET. *Solid-State Electron*, 1989, vol. 32, pp. 839–849.
4. Suñé J., Olivo P., Riccò B. Self-consistent solution of the Poisson and Schrödinger equations in accumulated semiconductor-insulator interfaces. *J. of Appl. Phys*, 1991, vol. 70, pp. 337–345.
5. Rana F., Tiwari S., Buchanan D.A. Self-consistent modeling of accumulation layers and tunneling currents through very thin oxides. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, vol. 69, pp. 1104–1106.
6. Pacelli A., Spinelli A., Perron L.M. Carrier quantization at flat bands in MOS devices. *IEEE Trans. Elec. Dev.*, 1999, vol. 46, pp. 383–387.
7. Spinelli A., Cler R., Ghibaudo G. An Analytical Model for Flat-Band Polysilicon Quantization in MOS Devices. *IEEE Trans. Elec. Dev.*, 2002, vol. 49, pp. 1314–1316.
8. Spinelli A., Pacelli A., Lacaita A. Polysilicon Quantization Effects on the Electrical Properties of MOS Transistors. *IEEE Trans. Elec. Dev.*, 2000, vol. 47, pp. 2366–2371.
9. Schenk A., Wettstein A., Fitcher W. Quantum Device-Simulation with the Density-Gradient Model on Unstructured Grids. *IEEE Trans. Elec. Dev.*, 2001, vol. 48, pp. 279–284.
10. Wettstein A., Penzin O., Lyimkis E. Integration of the Density Gradient Model into a General Purpose Device Simulator. *VLSI Design*, 2002, vol. 15, pp. 751–759.
11. Krasnikov G.YA. *Konstruktivno-tehnologicheskie osobennosti submikronnykh MOP-tranzistorov* [Structural and technological features of submicron MOSFETs]. Moscow, Tekhnosfera, 2011, 800 p. (In Russian).

Submitted 29.12.2016; accepted 24.01.2017