

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.315.592; 621.3.049; 621.382.3

МДП-ТРАНЗИСТОРЫ НА ОСНОВЕ Ge — ПУТЬ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ КМОП-ТЕХНОЛОГИИ

И. Г. Неизвестный

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: neizv@isp.nsc.ru*

Рассмотрена возможность дальнейшего улучшения параметров полупроводниковых интегральных схем путём замены слоя кремния в МДП-транзисторе материалом с более высокой подвижностью носителей заряда. Показано, что по совокупности свойств для этого больше всего подходит германий. Приведены разработки, созданные в данном направлении в различных лабораториях как в России, так и за рубежом.

Ключевые слова: полевой транзистор, быстродействие, германий.

DOI: 10.15372/AUT20160501

Введение. В 1948 году был открыт транзисторный эффект и опубликована работа [1], что послужило началом развития эры полупроводниковой электроники. Первый точечно-контактный транзистор создан на базе монокристалла германия, и на протяжении последующих 15 лет германий являлся основным материалом для создания полупроводниковых приборов.

В первой половине 1960-х годов удалось разработать технологию синтеза монокристаллов кремния, а затем открыть маскирующие свойства малодефектной границы раздела кремний — двуокись кремния ($\text{Si} - \text{SiO}_2$) [2]. Такая граница создаётся методом термического окисления в глубине монокристаллического кремния, где относительно мало дефектов и возможного разупорядочения кристаллической решётки, возникающего при первичной обработке поверхности. Поэтому граница характеризуется малой плотностью поверхностных состояний.

На основе этой структуры был создан полевой МДП-транзистор [3, 4]. Необходимо отметить, что первые патенты на подобные приборы, выданные ещё в 1930-е годы [5, 6], долгое время не были реализованы именно из-за отсутствия совершенной во всех отношениях пары полупроводник—диэлектрик, подобной $\text{Si}-\text{SiO}_2$.

В данной работе обсуждается проблема увеличения быстродействия МДП-транзистора с помощью замены кремния полупроводником с более высокой подвижностью носителей заряда. На основании анализа публикаций на эту тему и собственных разработок в качестве наиболее подходящего материала предлагается использовать германий.

Борьба за быстродействие. После создания МДПТ возникла проблема увеличения его быстродействия. Основной принцип, характеризующий направление усилий разработчиков, определяется простым соотношением $f_T \sim \mu/L_k$, т. е. для увеличения быстродействия необходимо либо уменьшать длину канала L_k , либо увеличивать подвижность носителей заряда в канале μ .

На протяжении нескольких десятилетий разработчики повышали скорость работы микропроцессоров, просто уменьшая размеры транзисторов. Это давало возможность не

только увеличить быстродействие, но и повысить количество транзисторов на единице площади, что соответственно снижало стоимость интегральной схемы. В 1965 году Г. Мур обнаружил, что при уменьшении длины канала в 2 раза тактовая частота микропроцессоров удваивается, а стоимость чипа падает вдвое каждые 18–20 месяцев. Ход этого процесса в зависимости от времени имеет линейный характер [7]. Далее разработчики всего мира ориентировались на это эмпирическое наблюдение, названное «законом Мура», так как соблюдение данной закономерности позволяло не только поддерживать прогресс в развитии микроэлектроники, но и успешно конкурировать с другими фирмами во всех областях информационной технологии.

Сокращение длины канала (масштабирование) производилось по определённому закону (правилу), который ввёл Р. Деннард в 1972 году [8, 9]. Он заключается в том, что при уменьшении размеров необходимо сохранять неизменным значение напряжённости электрического поля в любом элементе транзистора, т. е. если уменьшить длину затвора в k раз и одновременно понизить рабочее напряжение во столько же раз, то время задержки логического элемента сократится в k раз. Также было определено, что толщина подзатворного диэлектрика d соотносится с длиной канала L_k по зависимости $d = L_k/45$. При приближении длины канала к размерам меньше микрона (примерно в конце 1990-х годов) возникли проблемы, требующие введения ряда дополнительных технологических операций для того, чтобы уменьшение длины канала приносило желаемый результат. Например, уже при $L_k \sim 45\text{--}65$ нм толщина подзатворного диэлектрика достигает единиц нанометров, что приводит к неприемлемо большим туннельным токам утечки канал—затвор, что, в свою очередь, значительно увеличивает рассеяние мощности и уменьшает крутизну вольт-амперной характеристики транзистора. Эту проблему решили с помощью замены общепринятого оксида (или оксинитрида) кремния диэлектриком с высокой диэлектрической проницаемостью (high- k диэлектриком) [10]. В данном случае можно получить необходимую величину ёмкости затвор—канал при большей толщине диэлектрика, что исключает нежелательное туннелирование. Однако важно помнить, что под high- k диэлектриком по-прежнему находится тонкий слой SiO_2 , определяющий параметры границы раздела. Следует отметить, что при расчётах МДП-ёмкости применяется параметр «эквивалентная толщина окисла» (EOT — Equivalent Oxide Thickness).

Для обеспечения неизменной ёмкости запишем выражение для эквивалентной толщины high- k диэлектрика:

$$\text{EOT} = d_{\text{high-}k} = \left(\frac{k_{\text{high-}k}}{k_{\text{ox}}} \right) d_{\text{ox}}.$$

Таким образом, использование альтернативных диэлектриков с более высокой диэлектрической проницаемостью позволяет во столько раз повысить толщину слоя диэлектрика по сравнению с толщиной диоксида кремния, во сколько раз диэлектрическая проницаемость вещества больше диэлектрической проницаемости диоксида кремния, а увеличение толщины слоя диэлектрика, в свою очередь, даёт возможность уменьшить токи утечки.

Кроме того, при нанометровых длинах канала возникает опасность смыкания областей пространственного заряда (ОПЗ) истока и стока. Для его предотвращения надо увеличивать уровень легирования подложки под затвором, что повысит интенсивность рассеяния носителей заряда на примесях и приведёт к уменьшению величины их подвижности, т. е. сработает в сторону понижения быстродействия! Выход нашли в применении «ретроградного легирования», при котором уровень легирования минимален у границы раздела полупроводник — диэлектрик и увеличивается в глубину подложки [11]. Это позволяет уменьшить ширину ОПЗ и сохранить на приемлемом уровне подвижность у границы раздела. Использовалось дополнительное легирование (ореол и расширение) в горизонтальном направлении для устранения возрастающих сопротивлений исток—сток и нежелательно-

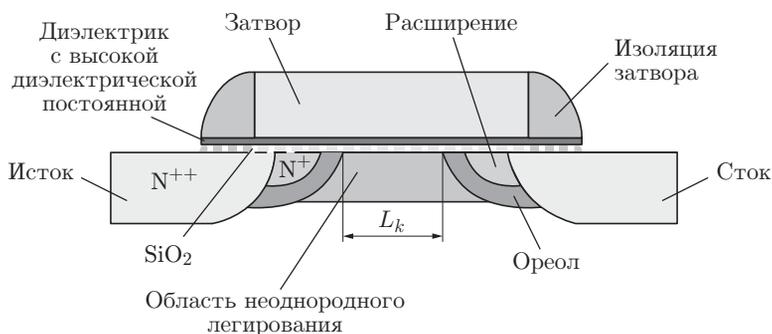


Рис. 1. МДП-транзистор. Применение $high-k$ диэлектрика для ослабления нежелательных короткоканальных эффектов, изменение профиля легирования при формировании областей истока и стока в горизонтальном направлении (расширение и ореол) и неоднородное легирование области канала и подложки под ним в вертикальном направлении (ретроградное легирование)

го повышения порогового напряжения. Упрощённая схема некоторых таких нововведений представлена на рис. 1.

Для решения проблемы увеличения подвижности в транзисторах с коротким каналом без дальнейшего сокращения его длины применяется механически напряжённый кремний. Введение механического напряжения в область канала осуществлялось либо нанесением слоя напряжённого нитрида кремния над областью канала, либо использованием в качестве истока и стока слоёв GeSi [12], либо выращиванием кремния на слоях GeSi [13]. Эти приёмы меняют расстояние между атомами кремния в кристалле. В результате изменения энергетической структуры кремния большинство электронов переходит в долины с более низкими энергиями, где электроны обладают меньшей эффективной массой, при этом увеличивается их подвижность.

Конечно, одновременно развивались и другие направления исследований и разработок по увеличению быстродействия, которые, в свою очередь, сдерживали развитие параметров нанoeлектроники согласно закону Мура. Они подробно рассматриваются в многочисленных обзорах (например, [14]) и не обсуждаются в данной работе. Но необходимо вновь отметить, что все результаты достигались значительным усложнением технологии и, следовательно, удорожанием полученного транзистора. Поэтому несмотря на большие успехи в развитии кремниевой МДП-электроники (микро-, нанoeлектроники) одновременно велись исследования по прямой замене кремния в МДПТ полупроводниковыми материалами с более высокой подвижностью. В качестве таких материалов рассматривались Ge, GaAs, InGaAs, InAs [15].

Как видно из таблицы, самая высокая подвижность электронов наблюдается в InAs, а дырок — в германии. Понятно, что для КМОП-схем, где, как известно, участвуют n - и p -МДПТ, наиболее предпочтительными по величине подвижности являются InGaAs и Ge для n -MOS и p -MOS соответственно.

Материал	Подвижность электронов, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	Подвижность дырок, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
Si	1350	480
Ge	3600	1800
GaAs	8000	300
InGaAs	11200	300
InAs	30000	450

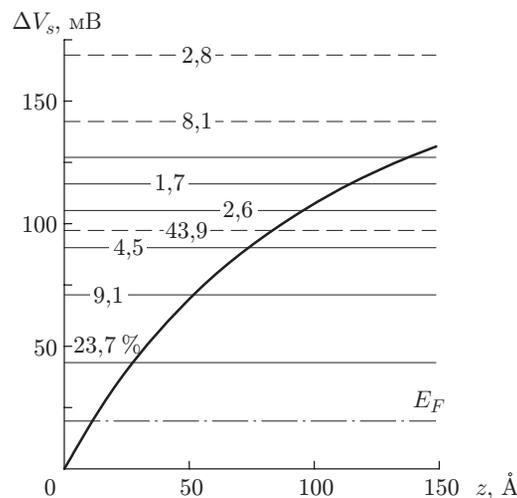


Рис. 2. Ход потенциала ΔV_s , спектр моноуровней первой и второй квантовых подзон для инверсионного слоя на поверхности германия. Цифры на графиках — заселённость уровней электронами; z — расстояние от поверхности

В то же время ясно, что сразу перевести всю элементную базу кремниевой наноэлектроники на новый материал будет очень сложно. Поэтому считается перспективным введение нового материала в кремниевые интегральные схемы, а это, в свою очередь, требует решения проблемы нанесения материалов с высокой подвижностью на поверхность кремния. Однако эпитаксиальный рост InGaAs на кремнии из-за большого рассогласования решёток всё ещё остаётся очень сложной задачей. Эпитаксия германия на промежуточную подложку SiGe давно успешно применяется в различных разработках [16, 17].

Введение Ge в кремниевую технологию может, кроме того, реализоваться при использовании структуры «германий на изоляторе», в которой можно получать тонкие слои бездефектного германия [18].

При выборе материала с высокой подвижностью для проектирования новых МДПТ необходимо учитывать ещё один фактор: переход в состояние инверсии на поверхности приводит к квантованию энергетического спектра носителей заряда. Квантово-механический расчёт, основанный на совместном решении уравнений Шрёдингера — Пуассона для германия [19], в случае инверсионного изгиба зон заменяет сплошной спектр набором моноэнергетических уровней (рис. 2).

В связи с этим центроид носителей заряда будет находиться не вблизи границы раздела полупроводник — диэлектрик, а на определённом расстоянии от неё, зависящем от материала (рис. 3) [15]. Из рисунка видно, что после кремния ближе всех к границе раздела располагается центроид заряда в германии. Такое квантово-механическое отделение центроида заряда от границы раздела как бы увеличивает ЕОТ подзатворного диэлектрика и тем самым уменьшает инверсионную ёмкость. Так как рабочий ток $I_d \sim \mu C_{inv}$, это становится дополнительным аргументом в пользу германия.

МДПТ на основе германия. Необходимо отметить, что возникновение проблемы использования материалов с высокой подвижностью носителей заряда в МДП-технологии академик А. В. Ржанов предсказывал ещё в начале 70-х годов прошлого столетия [20]. Тогда же было решено проводить в Институте физики полупроводников СО АН СССР научные исследования по разработке Ge-МДПТ. Основанием для этого послужил богатый опыт изучения поверхности германия в целях разработки технологии получения материала с наименьшей концентрацией состояний захвата и низкой поверхностной рекомбинацией. Данные исследования проводились для обеспечения производства стабильных германиевых диодов и транзисторов в отечественной промышленности [21–24]. Надо отметить,

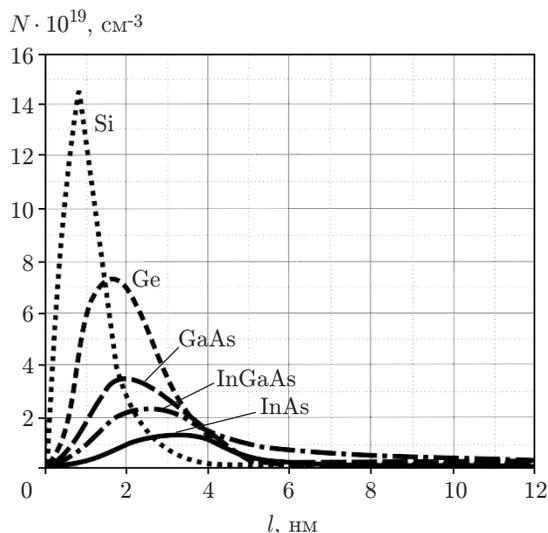


Рис. 3. Зависимость концентрации электронов N в кремнии и других материалах с высокой подвижностью от расстояния до границы раздела полупроводник — диэлектрик l

что непосредственные технологические разработки в этой области техники в то время не публиковались.

Первая стадия в технологии Ge-МДПТ — создание многослойного «диэлектрического пакета» на поверхности Ge. Началом этого процесса стала обработка поверхности в окислительно-растворительном химическом травителе. Его действие, как и в случае термического окисления кремния, позволяло отодвигать границу раздела от дефектной первичной поверхности вглубь малодефектного кристалла. Одновременно на поверхности формировался слой аморфного GeO_2 .

Далее была отработана методика нанесения двухслойного диэлектрика $\text{SiO}_2\text{—Si}_3\text{N}_4$ при достаточно низких температурах (650–700 °С) для предотвращения деградации сфор-

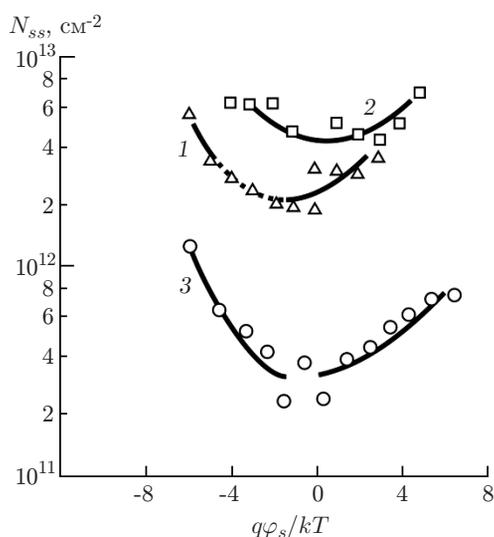


Рис. 4. Распределение плотности поверхностных состояний в запрещённой зоне Ge для структур Ge— SiO_2 (кривая 1), Ge— Si_3N_4 (кривая 2), Ge— $\text{SiO}_2\text{—Si}_3\text{N}_4$ (кривая 3)

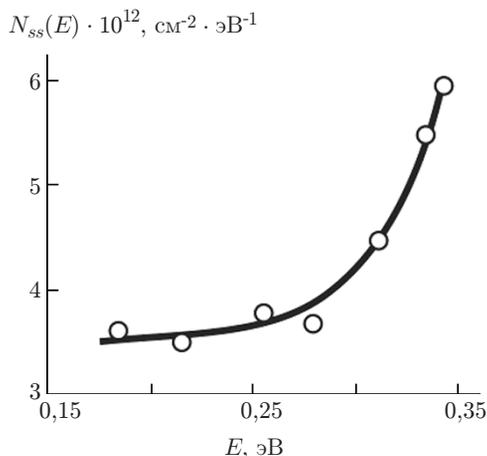


Рис. 5. Распределение плотности поверхностных состояний (энергия отсчитывается от середины запрещённой зоны)

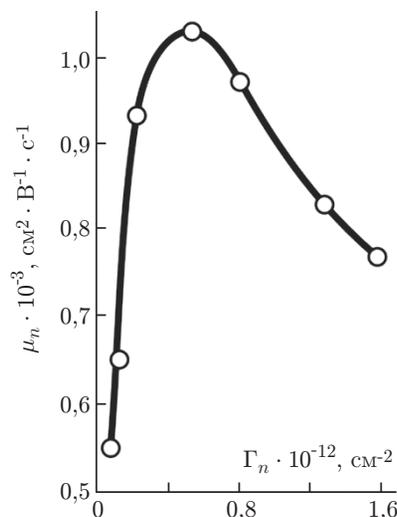


Рис. 6. Зависимость дрейфовой подвижности электронов от их концентрации в канале

мированной ранее границы раздела Ge — GeO₂. В результате граница раздела такой структуры обладает в середине запрещённой зоны концентрацией быстрых состояний $\sim(3 \cdot 10^{11}) \text{ cm}^{-2} \cdot \text{V}^{-1}$ (рис. 4). Заряд плоских зон составляет величину $2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ [25].

Необходимо также отметить, что присутствие двойного диэлектрика обеспечило высокую стабильность структуры как к окружающей среде, так и к подаваемому на затвор напряжению. Достаточно надёжное маскирующее действие даёт возможность проводить фотолитографические процессы. Маской для формирования истока и стока диффузией мышьяка служил слой SiO₂ толщиной $\sim 1200 \text{ \AA}$. В результате процесса диффузии получались легированные области глубиной 1–1,2 мкм со средней концентрацией доноров 10^{19} – 10^{20} cm^{-3} . Далее на поверхность Ge между истоком и стоком после удаления маски наносился двойной диэлектрик SiO₂—Si₃N₄ и напылялся Al для создания с помощью фотолитографии контактов к истоку, стоку и электроду затвора.

Как видно из рис. 5, плотность поверхностных состояний после проведения всех технологических операций немного повысилась. Но всё же параметры границы раздела обеспечивают высокую подвижность электронов в канале, которая значительно превышала величину подвижности в канале кремниевой МДПТ в середине 1970-х годов (рис. 6), и лучшие выходные характеристики, слабо изменяющиеся при снижении температуры (рис. 7) [26, 27].

Несмотря на перспективность разработанной технологии МДПТ на германии на тот период развития кремниевой полупроводниковой электроники она осталась невостребованной.

Как было отмечено, улучшение параметров кремниевой микро- и нанoeлектроники за счёт уменьшения размеров, изменения конструкции и т. д. с начала XXI века стало быстро продвигаться к насыщению. В то же время Ge вновь привлёк пристальное внимание в качестве материала для создания транзистора с высокой подвижностью носителей заряда в канале [28, 29].

Одной из основных проблем при разработке Ge-МДПТ является получение качественной границы Ge — диэлектрик. Причём весь диэлектрический пакет должен обеспечивать возможность маскирования при проведении фотолитографии, легирования и других технологических операций в процессе формирования транзистора. Учитывая опыт развития

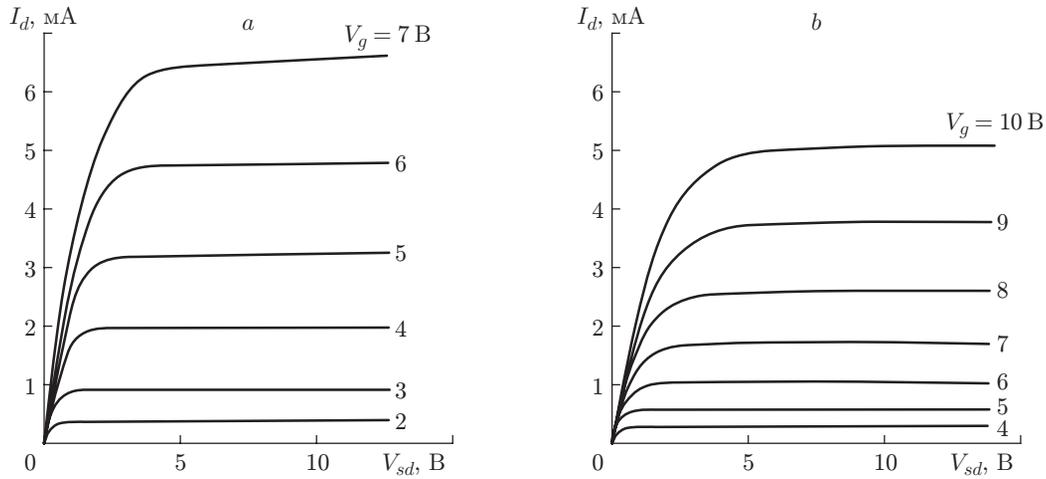


Рис. 7. Выходные характеристики Ge-МДПТ: *a* — при комнатной температуре ($T = 295$ K), *b* — при $T = 77$ K [27]

кремниевой наноэлектроники, чтобы получить высокие параметры масштабируемого (малого размера) Ge-МДПТ, необходимо использовать диэлектрик с высокой диэлектрической постоянной (*high-k*), но при этом граница раздела Ge — диэлектрик должна сохранить малую плотность поверхностных состояний N_{ss} и высокую подвижность носителей заряда в приповерхностном слое. Поэтому большинство разработчиков пытались нанести *high-k* диэлектрик на Ge, а уже потом формировать границу раздела Ge — GeO₂. Хорошо известно, что *high-k* диэлектрик может быть поликристаллическим и в процессе термической обработки атомы Ge могут в него диффундировать по границам зёрен, а это резко ухудшает электрические свойства МДПТ. Поэтому необходимо создать диффузионный барьер для предотвращения реакции на границе раздела между *high-k* окислами металла и поверхностью германия. Для пассивации поверхности применялись: обработка в NH₃ и в HF₂, нанесение SO₂ и плазменная окислительная обработка. Однако эти усилия не привели к получению достаточно качественных структур.

Наиболее удачным решением для создания Ge-МДПТ с высокими параметрами оказалось термическое выращивание тонкого промежуточного слоя GeO₂ и последующее нанесение слоя Al₂O₃ [30, 31]. В этих работах получены величины подвижности в канале $\mu_n \sim \sim 800$ см²/В · с и $\mu_p \sim 400$ см²/В · с, а минимальная плотность поверхностных состояний была на уровне 10^{11} см⁻² · эВ⁻¹, что значительно превышало результаты для Si-МДПТ.

Исследователи присматриваются и к другим разработанным для кремния технологиям применительно к германию. Например, интересны результаты [32] по использованию механических напряжений в Ge-МДПТ для ещё большего увеличения подвижности. Данным методом удалось более чем в 3 раза повысить значение подвижности электронов и в 2 раза подвижность дырок в канале по сравнению с ненапряжённым случаем.

Конечно, всё это не означает, что уже завтра появятся коммерческие интегральные схемы на основе германия или хотя бы начнётся его интенсивное внедрение в Si-технологии, но то, что это произойдёт в обозримом будущем, несомненно.

Заключение. Исходя из того, что процесс улучшения параметров кремниевых интегральных схем, основанный на уменьшении длины канала (масштабировании), приблизился к физическому ограничению, делается вывод о необходимости применения полупроводника с большей, чем у кремния, подвижностью носителей заряда. На роль такого материала предлагается германий. Приведены примеры макетов МДПТ на германии, созданных как за рубежом, так и в Институте физики полупроводников СО РАН. Высокий технологический уровень наших разработок опередил другие на десятилетия.

Пользуясь возможностью, выражаю глубокую, искреннюю благодарность своему учителю Анатолию Васильевичу Ржанову, а также соавторам Ю. Ф. Новотоцкому-Власову и С. В. Покровской за многолетнее творческое сотрудничество при исследовании поверхности германия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bardeen J., Brattain W. H.** The transistor, a semi-conductor triode // *Phys. Rev.* 1948. **74**. P. 230–231.
2. **Atalla M. M., Tannenbaum E., Scheibner E. J.** Stabilization of silicon surfaces by thermally grown oxides // *Bell Syst. Techn. Journ.* 1959. **38**, Is. 3. P. 749–783.
3. **Frosch C. J., Derick L.** Surface protection and selective masking during diffusion in silicon // *Journ. Electrochem. Soc.* 1957. **104**, Is. 9. P. 547–552.
4. **Kahng D., Atalla M. M.** Silicon-silicon dioxide field induced surface devices // *IRE-AIEE Solid-State Device Research Conference. USA, Pittsburgh, 1960.*
5. **Pat. 1745175 US.** Method and apparatus for controlling electric currents /J. E. Lilienfeld. Publ. 28.01.1930.
6. **Pat. 439457 GB.** Improvements in or relating to electrical amplifiers and other control arrangements and devices /O. Heil. Publ. 06.12.1935.
7. **Moore G. E.** Cramming more components onto integrated circuits // *Proc. IEEE.* 1998. **86**, N 1. P. 82–85.
8. **Dennard R. H., Gaensslen F. H., Kuhn L., Yu H.-N.** Design of micron MOS switching devices // *IEEE Electron Devices Meet.* 1972. **18**. P. 168–170.
9. **Dennard R. H., Gaensslen F. H., Yu H.-N. et al.** Design of ion-implanted MOSFET's with very small physical dimensions // *Proc. IEEE.* 1999. **87**, N 4. P. 668–678.
10. **Kingon A. I., Maria J.-P., Streiffer S. K. et al.** Alternative dielectrics to silicon dioxide for memory and logic devices // *Nature.* 2000. **406**, Is. 6799. P. 1032–1038.
11. **De I., Osburn C. M.** Impact of super-steep-retrograde channel doping profiles on the performance of scaled devices // *IEEE Trans. Electron Devices.* 1999. **46**, Is. 8. P. 1711–1717.
12. **Неизвестный И. Г., Гридчин В. А.** Использование напряженного кремния в МДП-транзисторах и КМОП-структурах // *Микроэлектроника.* 2009. **38**, № 2. С. 83–98.
13. **Rim K., Hoyt J. L., Gibbons J. F.** Fabrication and analysis of deep submicron strained-Si n-MOSFET's // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2000. **47**, Is. 7. P. 1406–1415.
14. **Veloso A., Hoffmann T., Lauwers A. et al.** Advanced CMOS device technologies for 45 nm node and below // *Sci. and Technol. Adv. Mater.* 2007. **8**, N 3. P. 214–218.
15. **Lubow A., Ismail-Beigi S., Ma T. P.** Comparison of drive currents in metal-oxide-semiconductor field-effect transistors made of Si, Ge, GaAs, InGaAs, and InAs channels // *Appl. Phys. Lett.* 2010. **96**, N 12. 122105.
16. **Hrauda N., Zhang J., Wintersberger E. et al.** X-ray nanodiffraction on a single SiGe quantum dot inside a functioning field-effect transistor // *Nano Lett.* 2011. **11**, Is. 7. P. 2875–2880.
17. **Van Dal M. J. H., Vellianitis G., Duriez B. et al.** Germanium p-channel finFET fabricated by aspect ratio trapping // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2014. **61**, Is. 2. P. 430–436.
18. **Germanium-based technologies: From Materials to Devices** /Eds. C. Claeys, E. Simoen. Amsterdam: Elsevier, 2007. 480 p. Ch. 8: Electrical performance of Ge devices /M. Houssa, A. Satta, E. Simoen et al. P. 233–265.
19. **Квон З. Д., Неизвестный И. Г., Овсюк В. Н., Ржанов Ю. А.** Аномальный холл-фактор в электронных инверсионных каналах германия // *Письма ЖЭТФ.* 1979. **30**, вып. 3. С. 189–192.

20. **Ржанов А. В.** Электронные процессы на поверхности полупроводников. М.: Наука, 1971. 480 с.
21. **Ржанов А. В.** О соотношении поверхностной и объемной рекомбинации в кремниевых триодах с вплавленными электронно-дырочными переходами // ЖТФ. 1956. **26**, вып. 1. С. 239–240.
22. **Ржанов А. В.** Поверхностная рекомбинация и ее влияние на характеристики полупроводниковых приборов // Радиотехника и электроника. 1956. **1**, вып. 8. С. 1086–1092.
23. **Ржанов А. В., Неизвестный И. Г., Росляков В. В.** Исследование поверхностной проводимости и поверхностной рекомбинации в образцах германия // ЖТФ. 1956. **26**, вып. 10. С. 2142–2153.
24. **Ржанов А. В., Новотоцкий-Власов Ю. Ф., Неизвестный И. Г.** Исследование эффекта поля и поверхностной рекомбинации в образцах германия // ЖТФ. 1957. **27**, вып. 11. С. 2440–2450.
25. **Горохов Е. Б., Каменкович Е. Л., Неизвестный И. Г., Покровская С. В.** Электрофизические свойства МДП-структур на основе Ge—SiO₂—Si₃N₄—Al // Микроэлектроника. 1976. **5**, № 4. С. 354–358.
26. **Золотарев В. И., Поспелов В. В., Фетисов Е. А., Хафизов Р. З.** Исследование подвижности неосновных носителей заряда в инверсионных каналах МДП-структур // Микроэлектроника. 1974. **3**, № 5. С. 413–417.
27. **Rzhanov A. V., Neizvestny I. G.** Germanium MIS structures // Thin Solid Films. 1979. **58**, Is. 1. P. 37–42.
28. **Dimoulas A., Brunco D. P., Ferrari S. et al.** Interface engineering for Ge metal-oxide-semiconductor devices // Thin Solid Films. 2007. **515**, Is. 16. P. 6337–6343.
29. **Toriumi A., Lee C.-H., Nishimura T. et al.** Recent progress of Ge technology for a post-Si CMOS // ECS Trans. 2011. **35**, N 3. P. 443–456.
30. **Zhang R., Lin J.-C., Yu X. et al.** Impact of plasma postoxidation temperature on the electrical properties of Al₂O₃/GeO_x/Ge p-MOSFETs and n-MOSFETs // IEEE Trans. Electron Devices. 2014. **61**, Is. 2. P. 416–422.
31. **Ma J., Zhang J. F., Ji Z. et al.** Energy distribution of positive charges in Al₂O₃/GeO₂/Ge pMOSFETs // IEEE Electron Device Lett. 2014. **35**, Is. 2. P. 160–162.
32. **Zhang R., Chern W., Yu X. et al.** High mobility strained-Ge pMOSFETs with 0,7-nm ultrathin EOT using plasma post oxidation HfO₂/Al₂O₃/GeO_x gate stacks and strain modulation // IEEE Intern. Electron Devices Meet. 2013. P. 633–636.

Поступила в редакцию 30 марта 2016 г.