

УДК 621.382.323

Моделирование подвижности в тонких кремниевых GAA нанотранзисторах

Н. В. Масальский

НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ, Москва, Россия, volkov@niisi.ras.ru

Аннотация. Обсуждается влияние механизмов рассеяния на подвижность носителей в рабочей области ультратонких кремниевых полевых GAA нанотранзисторов с цилиндрической геометрией. При помощи интегрирования инструментов численного моделирования и моделей механизмов рассеяния носителей численно исследовано комбинированное влияние механизмов на подвижность носителей. Статистическими методами получена оценка разброса подвижности в диапазоне диаметров канала нанотранзистора от 3 до 8 нм и температур от 200 до 400 К.

Ключевые слова: кремниевый gate-all-around (GAA) нанотранзистор, подвижность носителей, температурная вариативность, моделирование

1. Введение

Для того чтобы раскрыть технологический потенциал ультратонких кремниевых GAA нанотранзисторов существует острая необходимость в разработке надежных методов их исследования, которые основаны на глубоком понимании физики устройства. Одним из методов моделирования является сочетание квантового подхода (уравнение Шредингера) с полуклассическим уравнением переноса Больцмана что реализовано в наших предыдущих работах. В таком подходе учитываются наиболее важные механизмы рассеяния, включая рассеяние на фононах, шероховатости поверхности, рассеяние на ионизированных примесях и ловушках на границе раздела кремний-оксид кремния. Объединение всех механизмов рассеяния необходимо учитывать при моделировании практически значимых наноструктур, отвечающих современным технологическим возможностям [1].

Концепция GAA улучшает управление зарядом в рабочей области нанотранзистора, сводя к минимуму проявление короткоканальных эффектов (ККЭ), улучшает транспортные свойства и включает в себя возможность использования материалов и технологии для повышения производительности микросхем. Актуальность применения ультратонких кремниевых нанопроволочных GAA транзисторов определяется из-за их максимального предела масштабирования до 5 нм [2-5]. При моделировании и оптимизации данных устройств методы, включающие КМЭ в полуклассические транспортные подходы

[6-8], становятся очень привлекательными благодаря их более низкой вычислительной емкости по сравнению с чисто квантовыми транспортными и атомистическими подходами [9-11]. Актуальность самосогласованного полуклассического подхода вызвана необходимостью достоверного моделирования электронно-транспортных свойств устройств с поперечными размерами менее 10 нм [8].

В настоящей работе при помощи интегрирования инструментов численного моделирования и моделей механизмов рассеяния носителей для моделирования транспортных свойств ультратонких кремниевых GAA нанотранзисторов с цилиндрической геометрией исследуются физические эффекты, влияющих на подвижность носителей в рабочей области рассматриваемых наноструктур. Внимание на подвижность определяется тем, что этот параметр, имеющий электрическую природу, связанную с эффективностью транспорта носителей через транзистор.

2. Метод/Модель

В низкоразмерных системах носители заряда (электроны или дырки) не могут рассматриваться как точечные частицы. Поэтому в направлении перпендикулярном аксиальной оси транзистора из-за соотношения неопределенностей импульс локализованного носителя точно не определен. В результате его (носителя) энергия квантуется в отдельном поддиапазоне. При этом свойства отдельных процессов рассеяния зависят от степени перекрытия собственных функций носителей

Монте-Карло [13, 14], которые размешены в канале в виде точечных потенциалов. Рассматриваются дальнедействующие и короткодействующие кулоновские потенциалы. Представленные расчеты выполнены для широкого диапазона эквивалентных ионизированных концентрации примесей (легирующих элементов) N_{di} варьируются от очень низких значений (10^{15} см^{-3}) до высоких значений (10^{18} см^{-3}). Плотность состояний на поверхности границе Si-SiO₂ варьируется в пределах $10^{11} \dots 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Шероховатость поверхности РО задается параметрическим образом, где корреляционная длина составляет 5 нм, среднеквадратичное отклонение шероховатости варьируется от 0.2 до 0.5 нм. Подвижность вычислялась при управляющих напряжения на стоке U_{ds} 0.05 В и затворе U_{gs} 0.8 В.

На рисунке 2 показана зависимость подвижности электронов $\mu(N_{di})$, ограниченной только ионизированной примесью.

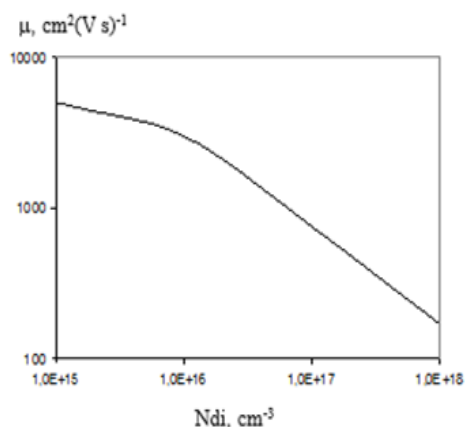


Рис. 2. Зависимость подвижности носителей, ограниченной только уровнем ионизированной примеси в канале

При высоких уровнях N_{di} больше $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, с учётом того, что скорость рассеяния на заряженной примеси прямо пропорциональна ее плотности, зависимость подвижности снижается в соответствии с соотношением $\mu \sim 1/N_{di}$. Резкое падение подвижности при росте уровня N_{di} указывает на то, что при больших концентрациях вклад этого механизма будет определяющий.

На рисунке 3 ниже приведена зависимость подвижности от плотности ловушек N_f на границе кремний – оксид кремния с учетом влияния рассеяния на акустических и оптических фононах без вклада шероховатости и ионизированной примеси.

Следует учесть, что деградация подвижности

из-за фононов практически постоянная и не зависит от внешних факторов.

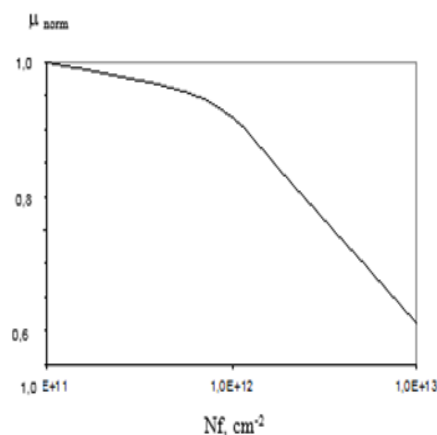


Рис. 3. Зависимость нормированной подвижности носителей от плотности ловушек на границе Si-SiO₂

При самой высокой плотности носителей подвижность, ограниченная фонон-электронными взаимодействиями, составляет $200 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. При этом скорость рассеяния на акустических фононах выше, чем скорость рассеяния на оптических фононах, и следовательно, влияние первого механизма на подвижность будет гораздо более весомым. В соответствии с предыдущим случаем наблюдается монотонно снижение подвижности, но с меньшим эффектом. Такое поведение связано с высокими значениями электрического поля в перпендикулярном направлении.

Рисунок 4 иллюстрирует изменение подвижности в рабочей области в зависимости от диаметра поперечного сечения с учетом всех механизмов рассеяния при условии наихудшего случая по примесям и ловушкам и среднеквадратичному отклонению шероховатости.

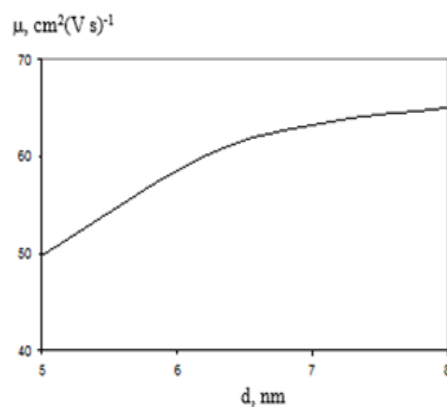


Рис. 4. Подвижность электронов в зависимости от диаметра, учитывая влияние комбинированных эффектов рассеяния

Влияние рассеяния на шероховатости поверхности при низкой плотности носителей невелико. Его интенсивность становится значительной при плотности носителей $3,25 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$. И этот механизм становится доминирующим. При этом плотность носителей регулируется непосредственно путем изменения затворного напряжения U_{gs} . С ростом напряжения на затворе она (плотность) увеличивается. Все наши выводы справедливы для всех поддиапазонов в трех представляющих интерес долинах проводимости с учетом того, что в самом нижнем поддиапазоне, где расположено большинство электронов. По мере увеличения диаметра подвижность возрастает, что связано со снижением влияния инжектированной примеси из областей стока/истока в канал транзистора. Еще большего эффекта можно достичь, увеличив линейный размер спейсера.

Рисунок 5 иллюстрирует влияние параметра Δ на подвижность во всем диапазоне N_{di} при максимальном уровне ловушек.

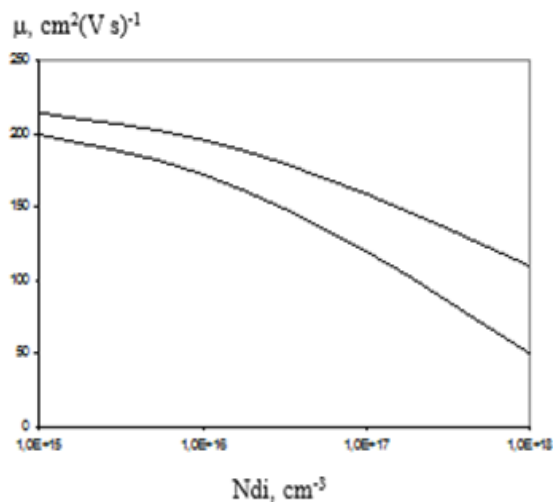


Рис. 5. Зависимость подвижности от уровня ионизированной примеси при разных Δ , где нижняя кривая $\Delta = 0.5 \text{ нм}$, верхняя кривая $\Delta = 0.2 \text{ нм}$

Данные результаты подчеркивают существенно негативное влияние инжектированной примеси на подвижность носителей. В наихудшем случае разница в процентном отношении составляет более 30%. Поэтому развитие технологических методов стоппирования диффузии примеси из областей стока/истока наряду с уменьшением шероховатости поверхности раздела Si-SiO₂ является актуальной задачей не только для ультратонких GAA, но и для FinFET транзисторов.

Одним из преимуществ кремниевых GAA нанотранзисторов является то, что они

функционируют при низком уровне легирования РО, что приводит к низкой статистической вариативности их электрофизических характеристик [15]. Следует отметить, что вклады вариативных механизмов определяют разброс значения подвижности. Шероховатость поверхности, самый значимый механизм ограничивающий подвижность и определяющий ее большую вариативность. Единственное преимущество он температурно инвариантен – то есть скорость рассеяния носителей не зависит от температуры. Поэтому и температурный разброс подвижности будет определяться только механизмами рассеяния на примеси и ловушками. Однако, уменьшение составляющих поля, перпендикулярных направлению переноса, может положительным образом ограничить влияние этих параметров на вариативность электрофизических характеристик транзистора.

На рисунке 6 представлены зависимости вариации подвижности $\sigma\mu$ (которые были определены выше) от диаметра РО.

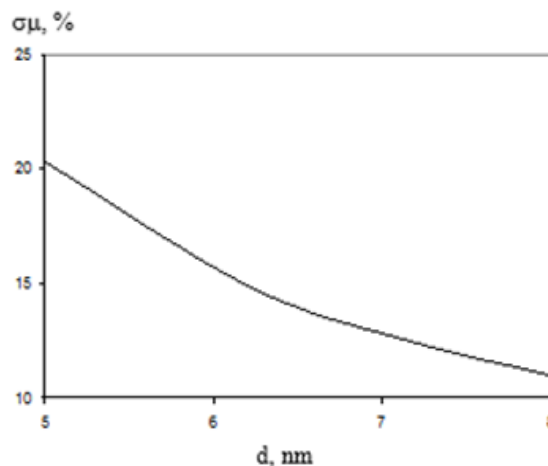


Рис. 6. Зависимость $\sigma\mu(d)$

Абсолютные значения вариаций подвижности возрастают по мере уменьшения диаметра d . Изменение величины стандартного отклонения в рассматриваемом диапазоне d составляет примерно 50%. Этот показатель также можно уменьшить при помощи увеличения линейного размера спейсера. Относительные вариации подвижности определяют тенденцию, которая характерна для относительных флуктуаций тока I_{ds} . Отметим, что их диапазон составляет примерно одинаковое значение в процентном выражении.

На рисунке 7 представлена температурная зависимость $\sigma\mu(T)$ в диапазоне температур 200...400 К, предполагая что транзистор

функционирует в обычном режиме в данном диапазоне температур.

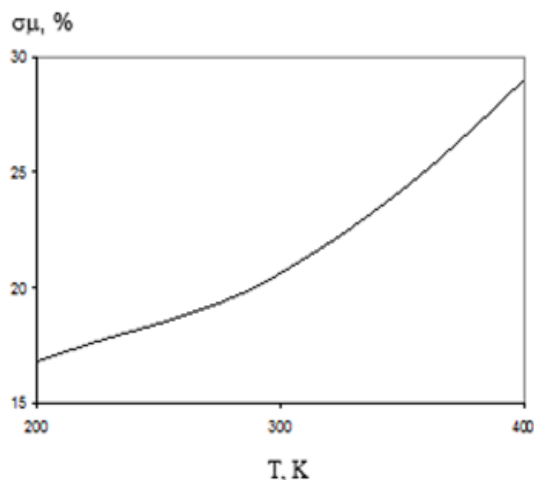


Рис. 7. Зависимость $\sigma\mu(T)$

Отметим, что зависимость $\sigma\mu(T)$ близка к параболической вида $\sigma\mu(T) \sim T^\gamma$, где $\gamma = 0.69$. Значение коэффициента γ определяется топологическими параметрами РО. На рисунке 8 в нормированных координатах относительно кривой, приведенной выше на рисунке 7 представлены зависимости $\sigma\mu_{norm}(T_{norm})$ для разных диаметров РО. В данном случае температурный диапазон 200...400 К нормируется от 0 до 1, нормированное значение параметра $\sigma\mu$ получается делением на величину $\sigma\mu(T = 400K)$ для $d=5$ нм.

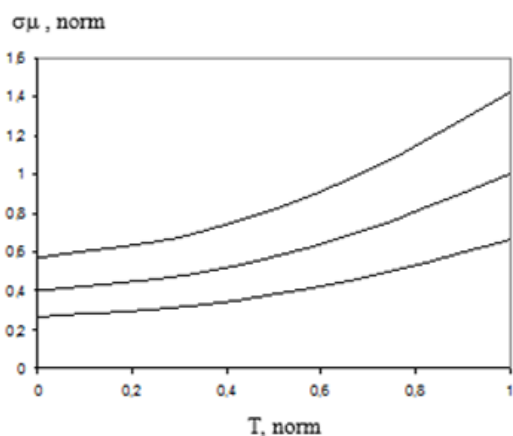


Рис. 8. Нормированная зависимость $\sigma\mu_{norm}(T_{norm})$ для разных диаметров, где верхняя кривая $d=3$ нм, средняя $d=5$ нм, нижняя $d=8$ нм

Отметим, что характер функции $\sigma\mu(T)$ сохраняется, но значение коэффициента γ для

каждого диаметра будет свое. Однако, оно не будет превышать 1.

Снижению величины $\sigma\mu(T)$ будет способствовать уменьшение затворного напряжения. При изменении U_{gs} на 0.1 В приводит к уменьшению уровня $\sigma\mu(T)$ от 3% до 9%, в зависимости от топологии РО транзистора и окружающей температуры.

5. Заключение

При помощи интегрирования инструментов численного моделирования и моделей механизмов рассеяния носителей численно исследовано комбинированное влияние механизмов на подвижность носителей в ультратонких кремниевых GAA транзисторах с цилиндрической геометрией. Практическая цель такого анализа - проиллюстрировать влияние на подвижность носителей различных механизмов и получить соответствующие оценки, которые помогут уточнить возможное снижение производительности устройства. Статистическими методами получена оценка разброса подвижности в диапазоне диаметров канала нанотранзистора от 3 до 8 нм и температур от 200 до 400 К.

Публикация выполнена в рамках НИР НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ по теме № FNEF-2024-0003 «Методы разработки аппаратно-программных платформ на основе защищенных и устойчивых к сбоям систем на кристалле и сопроцессоров искусственного интеллекта и обработки сигналов».

Simulation of Carrier Mobility in Silicon Gate-All-Around (GAA) Nanotransistors

N. V. Masalsky

Abstract. We studied the impact of scattering mechanisms on carrier mobility in the active region of ultrathin silicon gate-all-around (GAA) cylindrical nanotransistors. Using numerical simulation tools and carrier scattering models, we analyzed how these mechanisms affect carrier mobility. We applied statistical methods to estimate mobility variation across 3 to 8 nm channel diameters and 200 to 400 K temperatures.

Keywords: silicon gate-all-around (GAA) nanotransistor, carrier mobility, temperature variability, simulation

Литература

1. International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) Interconnect, 2020 Edition. [Online] Available: <https://irds.ieee.org/editions/2020> (accessed on 25 November 2025).
2. D.K. Ferry, M.J. Gilbert, R. Akis. Some considerations on nanowires in nanoelectronics // "IEEE Trans. Electron Devices", (2008), V. 55, 2820–2826.
3. J. Appenzeller, J. Knoch, M.T. Bjork, H. Riel, H. Schmid, W. Riess. Toward nanowire electronics // "IEEE Trans. Electron Device", (2008), V. 55, 2827–2845.
4. B. Yu, L. Wang, Y. Yuan, P.M. Asbeck, Y. Taur. Scaling of nanowire transistors // "IEEE Trans. Electron Device", (2008), V. 55, 2846–2858.
5. W. Lu, P. Xie, C.M. Lieber. Nanowire transistor performance limits and applications // "IEEE Trans. Electron Device", (2008), V. 55, 2859–2876.
6. I.M. Tienda-Luna, F.G. Ruiz, A. Godoy, B. Biel, F. Gamiz. Surface roughness scattering model for arbitrarily oriented silicon nanowires // "J. Appl. Phys.", (2011), V. 110, 084514.
7. S. Jin, M.V. Fischetti, T.-W. Tang. Modeling of electron mobility in gated silicon nanowires at room temperature: Surface roughness scattering, dielectric screening, and band nonparabolicity // "J. Appl. Phys.", (2007), V. 102, 083715.
8. T. Sadi, E. Towie, M. Nedjalkov, C. Riddet, C. Alexander, L. Wang, V. Georgiev, A. Brown, C. Millar, A. Asenov. One-dimensional multi-subband Monte Carlo simulation of charge transport in Si nanowire transistors// "In Proceedings of the Simulation of Semiconductor Processes and Devices", (2016), Nuremberg, Germany, 5 October 2016, 23–26.
9. W. Zhang, C. Delerue, Y.-M. Niquet, G. Allan, E. Wang. Atomistic modeling of electron-phonon coupling and transport properties in n-type [110] silicon nanowires // "Phys. Rev. B", (2010), V. 82, 115319.
10. Y.-M. Niquet, C. Delerue, D. Rideau, B. Videau. Fully atomistic simulations of phonon-limited mobility of electrons and holes in $\langle 001 \rangle$ -, $\langle 110 \rangle$ -, and $\langle 111 \rangle$ -oriented Si nanowires // "IEEE Trans. Electron Device", (2012), V. 59, 1480–1487.
11. Y.-M. Niquet, C. Delerue, C. Krzeminski. Effects of strain on the carrier mobility in silicon nanowires // "Nano Lett.", (2012), V. 12, 3545–3550.
12. Н.В. Масальский. Моделирование ВАХ ультра тонких КНИ КМОП нанотранзисторов с полностью охватывающим затвором // "Микроэлектроника", (2021), Т. 60, № 6, 387-393
13. K. Huang. Statistical mechanics. New York, U.S.A.: John Wiley & Sons, 1987.
14. M. Kubo, N. Toda, N. Hashitsume. Statistical Physics II: Nonequilibrium Statistical Mechanics. Berlin, Germany: Springer, 1991.
15. A. Asenov. Random dopant induced threshold voltage lowering and fluctuations in sub-0.1 μm MOSFETs: A 3-D atomistic simulation study // "IEEE Trans. Electron Device", (1998), V. 45, 2505–2513.

Поступила в редакцию / Received: 16.03.2026.

Поступила после рецензирования / Revised: 20.03.2026.

Принята к печати / Accepted: 31.03.2026.