

Моделирование свойств жёсткости наноразмерных структур кремниевой электроники с учётом неровности

С. О. Демидов^{1,2,*}, А. А. Шарапов^{1,2}

¹Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»
Россия, 124460, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, д. 6/1

²Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет)
Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9
(Поступила в редакцию 19.05.2022; подписана в печать 02.06.2022)

В технологии интегральных микросхем при переходе к поперечным размерам наноструктур ниже 100 нм вопрос изучения шероховатости становится всё острее, так как увеличивается влияние геометрических неравномерностей на электрофизические параметры устройств. Приведенная работа посвящена исследованию наноструктур по части механических свойств при наличии шероховатости с помощью компьютерного моделирования. В результате получены графические зависимости жесткости плавниковой структуры при разных значениях форм-фактора, а также проведен анализ собственных частот структуры.

PACS: 61.72.-y.

УДК: 53.043, 539.32.

Ключевые слова: шероховатость, плавниковая наноструктура, неровность, форм-фактор, свойства упругости, собственные частоты.

ВВЕДЕНИЕ

С уменьшением линейных размеров наноразмерных структур их неровность, обусловленная технологиями формирования и свойствами материалов, в относительном выражении проявляется всё больше, поэтому исследования в данной области становятся всё более актуальными [1–4]. Работы, в которых вопрос шероховатости является ключевым, можно разбить на три группы:

1. изучение особенностей проявления шероховатости в ходе формирования наноструктур [5–7];
2. разработка методов оценки величины шероховатости, а именно амплитуды, пространственной частоты и фрактальной постоянной с помощью РЭМ, АСМ, исследования спеклов и др. [8, 9];
3. моделирование электрофизических, механических, температурных свойств элементов кремниевой микроэлектроники с учётом неровности наноструктур [10–12].

Одной из наименее исследованных областей на текущий момент является изучение механических свойств суб-100-нм структур, сформированных с помощью технологий микроэлектроники. Определена цель с помощью численного моделирования оценить, насколько велик вклад неровности краёв наноструктур типа «плавник», формируемых с помощью технологий микроэлектроники, в изменение их поведения под воздействием внешней постоянной механической силы. Для достижения данной цели сформулирована последовательность задач:

1. Создание модели плавниковой структуры.
2. Определение диапазона параметров геометрии модели.
3. Имитация шероховатостей боковых граней наноструктуры.
4. Исследование свойств жесткости изделия.
5. Оценка реакции наноструктуры на наличие шероховатости.
6. Анализ зависимости собственных частот от параметров шероховатости и форм-фактора.

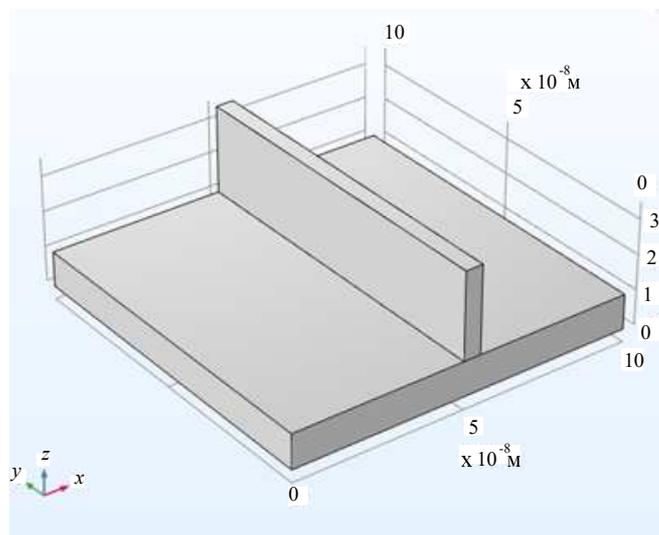


Рис. 1. Вид исследуемой структуры при отсутствии шероховатости

* demidov.so@phystech.edu

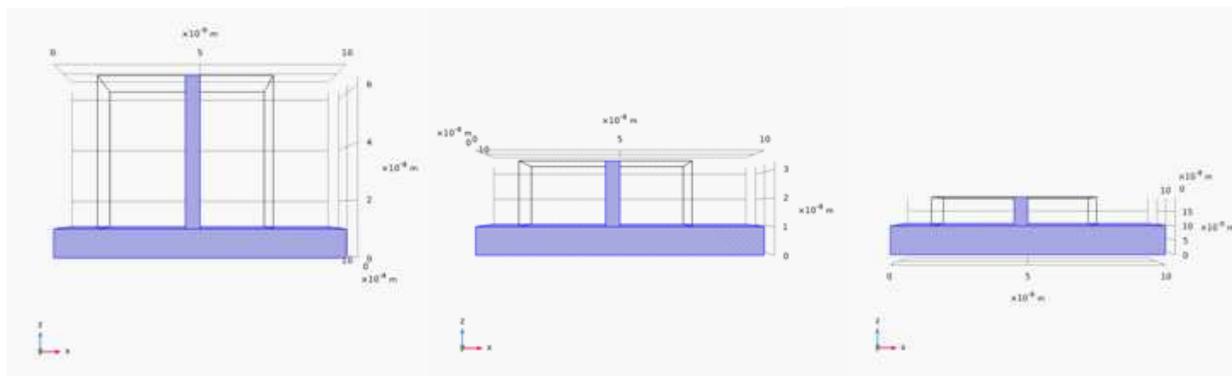


Рис. 2. Боковой срез плавниковой наноструктуры при форм-факторе (отношении ширины к высоте), равном 0.1 (слева), 0.25 (в центре) и 0.5 (справа)

1. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ УПРУГОСТИ

Построена геометрия плавниковой наноструктуры, аналогичная геометрии FinFET, со следующими параметрами: при постоянной ширине плавника (рис. 1), равной 8 нм, варьируется значение его высоты от 8 до 50 нм. Таким образом получается различное соотношение ширины и высоты, то есть форм-фактора (рис. 2). В качестве материала выбран монокристаллический кремний наиболее часто используемой ориентации (100).

Имитация неровности края боковых граней структуры выполнена с помощью разработанного авторами метода, который позволяет генерировать случайную геометрию шероховатости. В данном случае она определяется следующим выражением:

$$A \sum_{m=-n}^n (m^2)^{-b^2/2} N(s) \cos(2\pi m + U(s)),$$

где N — нормальное распределение, U — случайная фаза (из равномерного распределения), $s \in [0, 1]$ — параметр, m — пространственная частота.

Параметры в данном соотношении подбирались таким образом, чтобы итоговая шероховатость визуально соответствовала соотношениям неровности к ширине наноструктур, которые наблюдаются при контроле качества сформированных структур данного типа с помощью РЭМ (рис. 3).

Для выполнения анализа свойств упругости в программной среде COMSOL механическая сила прикладывается горизонтально (перпендикулярно боковой грани). Такая постановка задачи соответствует латеральной компоненте воздействия технологических процессов (рис. 4).

Измеряется отклонение структуры под действием постоянной механической силы, вычисляется жесткость шероховатой структуры, аналогичные вычисления проводятся для различных значений относительной неров-

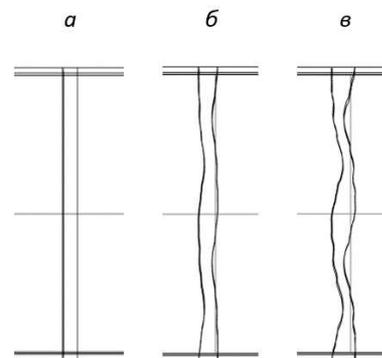


Рис. 3. Плавниковая наноструктура в виде сверху при отношении амплитуды неровности к ширине, равном $a - 0$; $b - 0.25$; $v - 0.5$

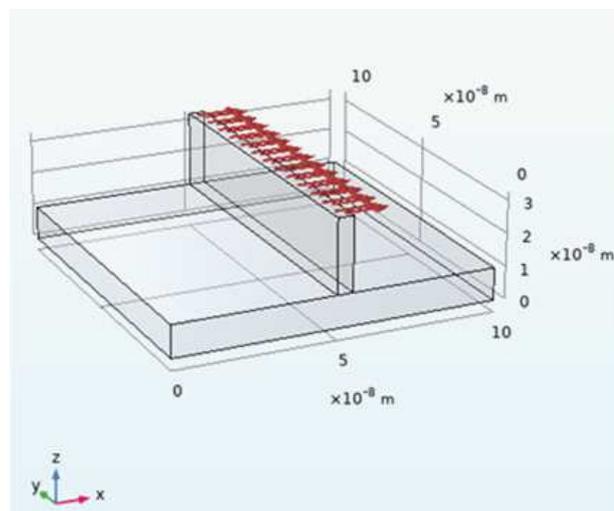


Рис. 4. Направление приложения механической силы к структуре

ности края структуры (рис. 5).

$$\sigma = C\varepsilon,$$

где σ — тензор напряжений, C — тензор жесткости, ε — тензор деформаций.

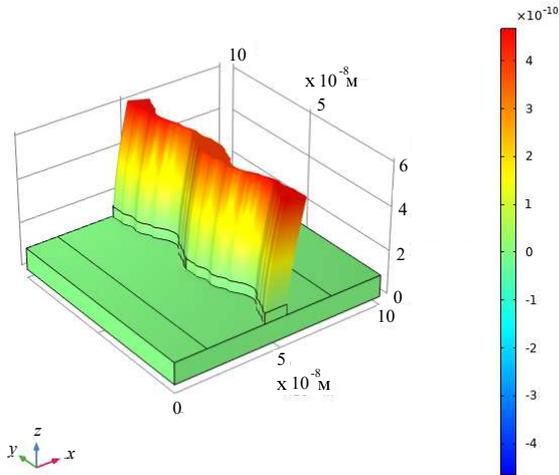


Рис. 5. Отклонение наноструктуры с относительной амплитудой неровности, равной 0.5, под действием внешней механической силы

2. АНАЛИЗ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ

Следующим этапом работы является проведение анализа собственных частот структуры (рис. 6). В основном, эти частоты определяются свойствами и структурой материала:

$$f_b \propto \frac{1}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}},$$

где L — высота плавника, E — модуль Юнга, ρ — плотность материала, A — площадь основания плавника.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Обнаружено, что чем выше амплитуда шероховатости, тем менее жесткой становится структура (рис. 7). Это подтверждается тем, что неравномерность ширины означает наличие областей, в которых поперечное сечение меньше, то есть меньше самих кристаллических связей, обеспечивающих противодействие внешним напряжениям. Кроме того, хуже перераспределяется напряжение между соседними частями плавникового элемента, т.е. такие зоны являются определяющими в части надёжности приборов на основе рассматриваемых структур.

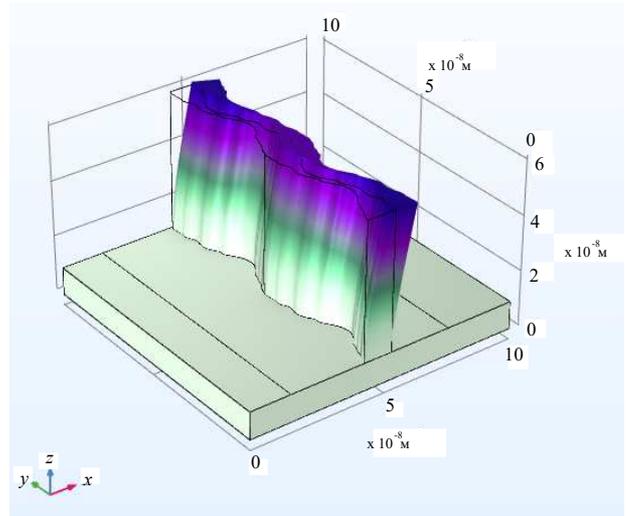


Рис. 6. Вид сверху при относительной амплитуде неровности, равной 0.25

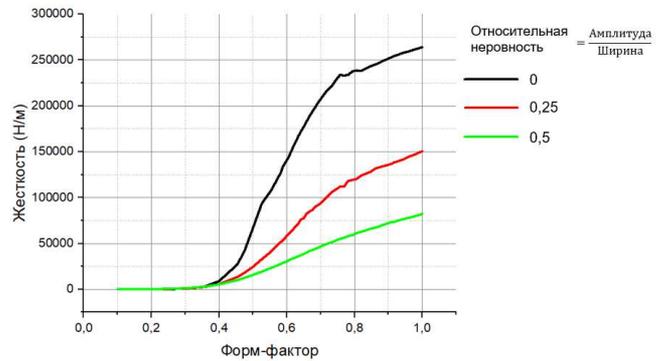


Рис. 7. Связь жесткости плавника с его форм-фактором (отношением ширины к высоте) при различной амплитуде шероховатости

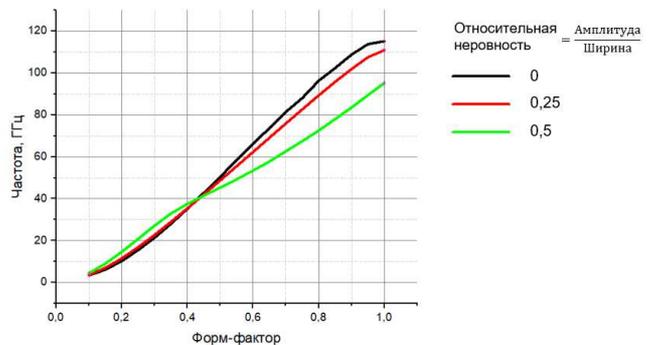


Рис. 8. Связь собственной частоты плавника с его форм-фактором (отношением ширины к высоте) при различной амплитуде шероховатости

Получены значения для собственных частот структуры и построена их связь с параметрами шероховатости и форм-фактора (рис. 8). Качественно данная кар-

тина согласуется с полученными на предыдущем шаге зависимостями. Помимо того, что собственные частоты линейно взаимосвязаны с форм-фактором, можно заметить, что для данного диапазона значений форм-фактора чем выше амплитуда шероховатости, тем ниже собственная частота.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из графиков можно сделать следующие несколько выводов. Наличие случайной шероховатости уменьшает жесткость «плавника» до 4-х раз. Выявлен отрицательный сдвиг собственных частот при увеличении относительной шероховатости поверхности структуры.

Обнаруженные в результате моделирования особенности взаимосвязи жесткости кремниевого фина можно связать с проявлением пластичных свойств наноразмерных структур [13, 14]. Предполагается, что в ходе процессов формирования данный размерный эффект может вносить значительный вклад в проявление наноразмерной шероховатости. Но в математической модели среды моделирования вещества не найдено подтверждений того, что наноразмерные эффекты каким-либо образом учитываются. Поэтому обнаруженное расхождение, а также необходимость подтверждения результатов численного моделирования величин собственных частот можно считать мотивацией для проведения дальнейших экспериментальных исследований механических свойств сформированных структур.

-
- [1] Красников Г. Я. // *Наноиндустрия*. 2020. **13**, № S5-1(102). С. 13.
- [2] Sudarsanan A., Venkateswarlu S., Nayak K. // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2019. **66**, N 11. P. 4646.
- [3] Nagy D. et al. // *IEEE Journal of the Electron Devices Society*. 2018. **6**. P. 332.
- [4] Brunner T. A. et al. // *Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VIII. – International Society for Optics and Photonics*, 2017. **10143**. P. 101430E.
- [5] Park J, Lee S-G, Vesters Y, Severi J, Kim M, De Simone D, Oh H-K, Hur S-M. // *Polymers*. 2019. **11**(12):1923.
- [6] Han, D., Park, C., Oh, S., Jung, H., Hahn, J. W. // *Nanophotonics*. 2019. **8**(5). P. 879.
- [7] Шаратов А.А., Шамин Е.С., Скуратов И.Д., Горнев Е. С. // *Наноиндустрия*. 2020. **13**, № S5-3(102). С. 872.
- [8] Papavieros G., Constantoudis V., Vouroutzis N., Gogolides E. // *Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology*. 2021. **20**(3). P. 034001.
- [9] Kizu R., Misumi I., Hira A. Gonda S. // *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS*. 2020. **19**(1). P. 014003.
- [10] Hu V.P.-H., Chiu P.-C., Lu Y.-C. // *IEEE Journal of the Electron Devices Society*. 2019. **7**. P. 295.
- [11] Lim J., Lee J., Shin C. // *IEEE Access*. 2021. **9**. P. 86581.
- [12] Yu S., Shin C. // *Semiconductor Science and Technology*. 2021. **36**(2). P. 025020.
- [13] Бокарев В.П., Красников Г.Я. // *Наноиндустрия*. 2022. **15**, № S8-1 (113). С. 164.
- [14] Герасименко Н., Волоховский А., Запорожан О. Учет особенностей изменения свойств материала в технологии кремниевых наноструктур. М.: Нанотехнологии, 2017.

Stiffness properties modeling for uneven nanostructures in Si electronics

S. O. Demidov^{1,2,a}, A. A. Sharapov^{1,2}

¹Scientific Research Institute of Molecular Electronics. Moscow 124460, Russia

²Moscow institute of physics and technology. Moscow region, Dolgoprudny, Russia

E-mail: ^ademidov.so@phystech.edu

Moving the dimensions of nanostructures in integrated circuits below 100 nm, the issue of studying roughness becomes more critical due to the increase of geometric irregularities impact on the electrophysical parameters. The present work is devoted to the computer simulation study of nanostructures in terms of mechanical properties. The results are the graphical dependences of fin structure stiffness at different values of the form factor and sidewall roughness, as well as the calculation of the eigenfrequencies of the structure.

PACS: 61.72.-y.

Keywords: roughness, fin nanostructure, roughness, form factor, elastic properties, natural frequencies.

Received 19 May 2022.

Сведения об авторах

1. Демидов Станислав Олегович — техник АО «НИИМЭ», студент МФТИ (НИУ); email: demidov.so@phystech.edu.
2. Шаратов Андрей Анатольевич — науч. сотрудник АО «НИИМЭ», аспирант МФТИ (НИУ); email: andrey.sharapov@phystech.edu.