

Сравнение тепловых характеристик MOSFET и FinFET

К.О. Петросянц^{1,2}, Д.С. Силкин¹, Д.А. Попов¹

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
г. Москва, kpetrosyants@hse.ru

²Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук,
г. Москва

Аннотация — В статье представлена тепловая TCAD модель FinFET модуля, состоящего из восьми параллельно включенных fin'ов. Приведены результаты моделирования саморазогрева модуля, а также зависимость перегрева от расстояния между fin'ами в модуле. Проведено сравнение значений перегрева для одиночного fin'а и МОПТ с аналогичными параметрами структуры.

Ключевые слова — FinFET, МОПТ, саморазогрев, TCAD-моделирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

Повышение плотности упаковки является одним из главных приоритетов современной микропроцессорной техники. Вместе с тем уменьшение размеров транзисторов приводит к ухудшению их теплопроводности [1]-[2], что может негативно сказаться на сроке службы устройств, предназначенных для работы в условиях высоких температур.

Ситуация осложняется тем, что прямое измерение температуры структуры современных транзисторов не представляется возможным. Исследования в этой области проводятся преимущественно средствами математического моделирования.

Многие авторы [3]-[5] исследуют тепловые характеристики отдельных fin'ов. Вместе с тем опубликованы данные о том, что близкое расположение fin'ов в FinFET модулях даёт дополнительный разогрев [6], зависящий от расстояния между fin'ами в модуле [1].

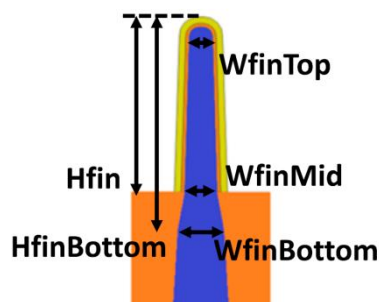
Для изучения этого явления необходимо применять полноразмерные, в масштабе один-к-одному, моделей FinFET модулей с учётом зависимости теплопроводности отдельных областей от концентрации легирующих примесей [7] и толщины [2].

С учётом вышеизложенного, представляет интерес выяснить, насколько отличается уровень саморазогрева в FinFET от традиционных МОПТ и КНИ МОПТ, а также оценить влияние на саморазогрев числа fin'ов в модуле и расстояния между ними.

II. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

За основу в данной работе взята модель FinFET, изготовленного по технологии 7 нм и описанного в [8]. На основе данных о структуре прибора была разработана 3D модель в среде Synopsys TCAD.

Параметры структуры представлены на рис. 1.



Param.	Value
Gate Pitch	56 nm
FinPitch	30 nm
Channel Length	16.5 nm
WfinTop	5.6 nm
WfinMid	7.1 nm
WfinBottom	10.1 nm
Hfin	35.6 nm
HfinBottom	40 nm
EOT	0.7 nm
Orientation	<110>/(001)
VGG	0.75 V

Рис. 1. Структура FinFET [8]

В модель включены следующие физические эффекты:

1. Деграция подвижности у поверхности с двумерным распределением дефектов на границе раздела. Модель Enormal (IALMob Coulomb2D).
2. Деграции подвижности из-за рассеяния носителей на других носителях заряда. Модель CarrierCarrierScattering(BrooksHerring).
3. Зависимость подвижности от уровня легирования и баллистический пролёт носителей заряда. Модель DopingDependence (PhuMob BalMob).

4. Квантовые эффекты. Модель Density Gradient Quantization.

Верификация модели по данным измерений, приведённым в [8] показала высокую точность полученной модели, что отражено на рис. 2.

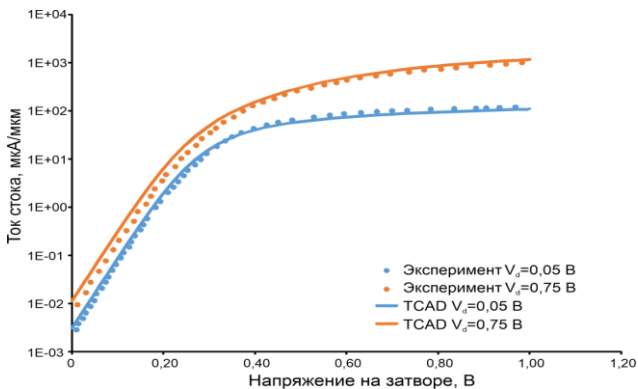


Рис. 2. Статические ВАХ 7 нм FinFET

Для имитации внешней среды при моделировании саморазогрева использовалось тепловое сопротивление, измеренное для 10 нм FinFET, приведённое в [9]. Ввиду малого расхождения в параметрах структур, используемых в [8] и [9], при моделировании в данной работе были использованы значения теплопроводности для разных областей, приведённые в [9]. Теплопроводность:

- областей сток/исток – 0,62 Вт/К·см;
- области канала – 0,25 Вт/К·см;
- области подложки – 1,48 Вт/К·см.

Тепловое сопротивление $8,4 \cdot 10^5$ К/Вт.

Для сравнения была разработана 3D модель МОПТ с аналогичной шириной канала и уровнями легирования областей сток/исток и канала. Модель представлена в двух вариантах – на кремниевой подложке (bulk) и кремний-на-изоляторе (SOI). Режим работы подобран таким образом, чтобы электрическая мощность проходящего через канал тока была одинакова. В связи с тем, что МОПТ с той же длиной канала, что и FinFET не производится, длина канала МОПТ увеличена до 65 нм. Модели МОПТ на объемном кремнии и на КНИ подложке показаны на рис. 3 и рис. 4.

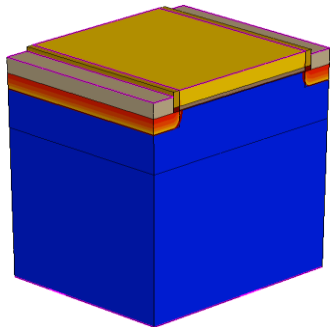


Рис. 3. Модель МОПТ на объемном кремнии

Поскольку в МОПТ структурах канал растянут по плоскости и всей площадью соприкасается с подложкой, для канала здесь использовано тоже значение теплопроводности, что и для подложки.

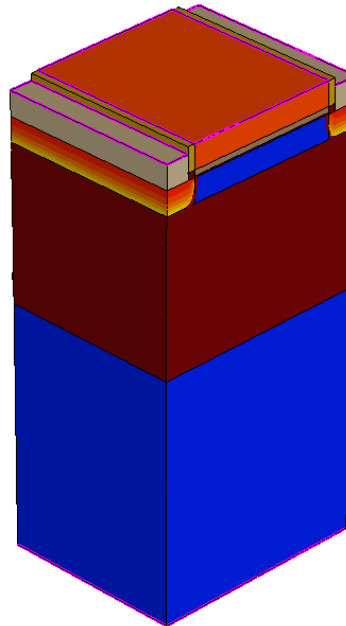


Рис. 4. Модель КНИ МОПТ

Для КНИ МОПТ теплопроводность области канала принята равной таковой в FinFETe, поскольку данная область значительно сужена диэлектрической подложкой. Для уменьшения числа факторов, способных повлиять на результаты сравнения, внешнее тепловое сопротивление для всех структур сохранено постоянным.

FinFET-модуль из 8-ми fin'ов был создан на основе модели FinFET на объемной кремнии. Модуль изображён на рис. 5. Модель имеет более 210 тысяч элементов сетки, расчёт длится в среднем 3 часа на 3-х ядрах процессора AMD Ryzen 7.

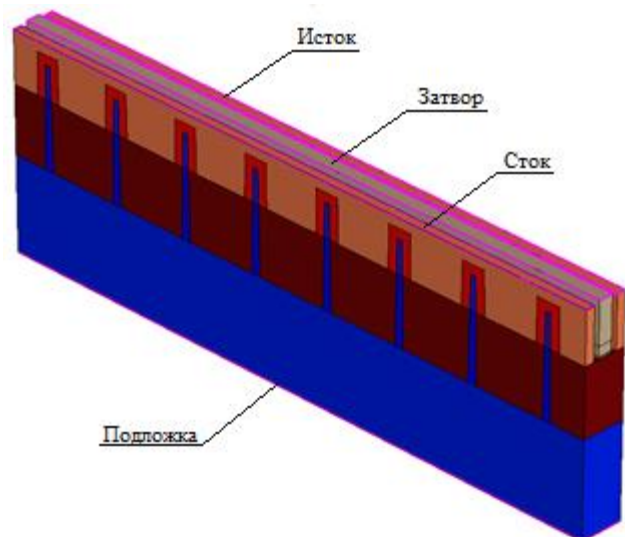


Рис. 5. Модель FinFET-модуля

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Диапазон рабочего напряжения современных процессоров достигает 1,54 В [10] при рабочей частоте свыше 3 ГГц. С точки зрения моделирования расчёт переходных процессов требует значительных затрат времени из-за значительного уменьшения шага моделирования на фронтах импульсов напряжения, поэтому в данной работе использовалось постоянное напряжение питания 1 В.

Расчёт саморазогрева проводился для нескольких значений мощности, определяемой током в канале. Ток регулировался напряжением на затворе. Стоит отметить, что для получения того же тока в КНИ МОПТ и FinFET потребовалось значительно меньшее (0,65 В против 1 В) напряжение на затворе по сравнению с МОПТ на объемной кремнии. Это согласуется с другими опубликованными материалами по сравнению электрических характеристик разных типов приборов [11].

В результате были получены графики зависимости температуры саморазогрева от мощности для разных типов транзисторов. Графики представлены на рис. 6.

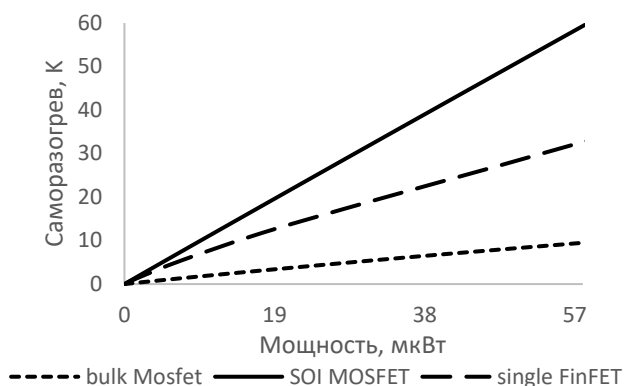


Рис. 6. Сравнение саморазогрева разных типов транзисторов

Наибольшее значение температуры наблюдается в структуре КНИ МОПТ. Плотность тока в канале FinFET выше, поскольку пересечение электрических полей от разных граней fin'a даёт более высокую напряжённость поля. Однако слой кремния под каналом FinFET'a обеспечивает более качественный теплоотвод по сравнению с КНИ МОПТ, что обуславливает меньший уровень саморазогрева. На фоне других типов транзисторов МОПТ на объемном кремнии демонстрирует минимальные показатели саморазогрева притом же внешнем тепловом сопротивлении и мощности. Это обусловлено главным образом тем, что по всей площади канал, служащий источником тепла, контактирует с кремнием подложки, который обеспечивает высокую теплопроводность и, как следствие, хороший теплоотвод.

Однако, как уже говорилось выше, саморазогрев FinFET нельзя рассматривать на примере лишь одиночного fin'a. Результаты моделирования FinFET-

модуля с разными расстояниями между fin'ами представлены на рис. 7. Ток и напряжение каждого fin'a соответствуют крайней правой точке рис. 6.

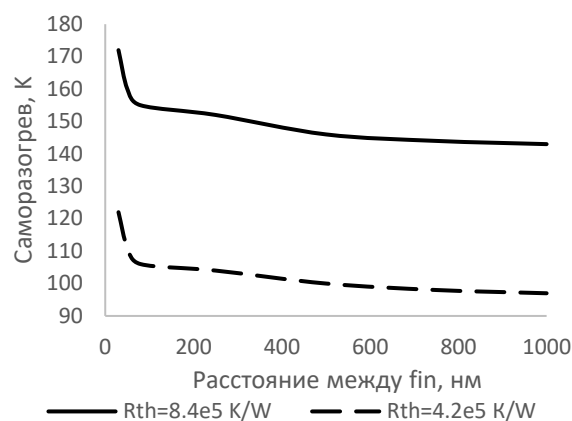


Рис. 7. Зависимость саморазогрева в FinFET-модуле от расстояния между fin'ами

При той же мощности перегрев увеличивается в разы по сравнению с одиночным FinFET. Полученные результаты сопоставимы с ранее опубликованными в [9], с учётом разницы в структуре и электрическом режиме, в котором проводилось моделирование. В работе [6] указывается на то, что при увеличении числа fin'ов в параллельном соединении температура может вырасти в полтора-два раза, что меньше, чем было получено в рамках данной работы, однако следует учитывать, что в [6] рассматривается функционирование FinFET на переменном токе высокой частоты, а подробные параметры структуры исследуемых образцов не приводятся. Как можно видеть из рис. 7, даже сравнительно небольшие различия в значении теплового сопротивления способны сильно повлиять на результаты расчётов.

Результаты моделирования подтверждают выводы других авторов о крайне негативном влиянии близкого расположения fin'ов на их тепловые характеристики. Сближение fin'ов на расстояние ближе 80 нм приводит к резкому увеличению температуры структуры. Вместе с тем видно, что увеличение расстояния между fin'ами не даёт существенного охлаждения, что заставляет усомниться в эффективности такого подхода.

Для выяснения причин такого поведения рассмотрим распределение тепла по структуре FinFET-модулей с разным расстоянием между fin'ами, представленное на рис. 8. Для лучшего отображения рис. 8а сжат вдвое по оси X. Обе части рисунка имеют одинаковую цветовую градуировку температуры от 450 Кельвина (красный цвет) до 375 Кельвина (зелёный цвет). Снимки сделаны при максимальной мощности тока.

Здесь fin выступает как источник тепла, от которого тепло распространяется по металлу затвора. Частично оно уходит выше к внешней металлизации, которая рассеивает его более эффективно. Но тепло из нижней части fin'a в большей степени движется в боковом

направлении, не только по металлу затвора, но и по разделительному диэлектрику (STI), который обладает меньшей теплопроводностью и, нагреваясь, лучше сохраняет тепло, не позволяя металлу затвора рассеять его. Малая теплопроводность STI одновременно ограничивает его возможности по поддержанию температуры небольшой областью вокруг fin'a. На рис. 8а эта область составляет примерно 40 нм. Если эти области соседних fin'ов пересекаются, то рассеяние тепла от STI дополнительно уменьшается, в результате чего ухудшается отвод тепла от fin'ов и начинается резкий рост температуры структуры. В подтверждение этого работает тот факт, что именно в точке FinPitch = 80 нм происходит излом графика на рис. 7.

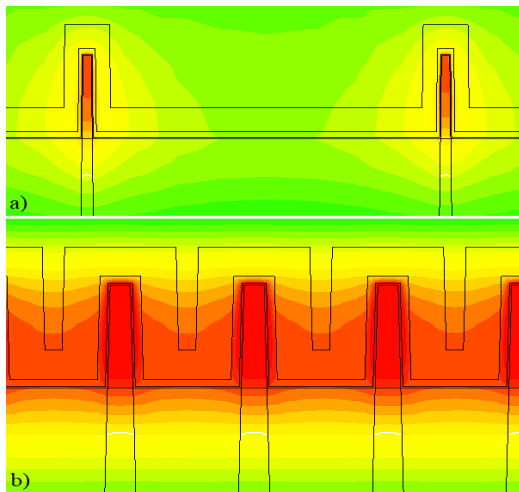


Рис. 8. Распределение температуры в FinFET-модуле: а) FinPitch = 250 nm б) FinPitch = 30 nm

Возможность отвода тепла от fin'a ограничена внешним тепловым сопротивлением. Его величина определяется строением многоуровневой металлизации микросхемы (BEOL), типом корпуса, внешним радиатором и т.д. На рис. 7 приведены значения перегрева для случая, когда внешнее тепловое сопротивление уменьшено в два раза. При этом температура упала на 50 градусов при сохранении общего вида зависимости.

Это говорит о том, что учёт тепловых процессов при проектировании BEOL и оценка тепловых свойств корпусов, соединений и применяемых средств отвода тепла, является критически важным с точки зрения уменьшения саморазогрева микросхемы и, тем самым, повышения её надёжности и уменьшения вероятности отказа в ходе эксплуатации.

Применение для таких целей средств математического моделирования и САПР является обязательным элементом проектирования изделий современной наноэлектроники, активно применяется ведущими производителями микросхем на основе нанометровых FinFET [6].

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проведено сравнительное TCAD-моделирование тепловых характеристик разных типов

транзисторов: МОПТ на объемном кремнии, КНИ МОПТ, одиночного FinFET и FinFET-модуля, состоящего из 8-ми близкорасположенных fin'ов. Рассмотрена зависимость саморазогрева FinFET-модуля от расстояния между fin'ами и дана оценка влиянию внешнего теплового сопротивления, обусловленного корпусом и металлизацией микросхемы на перегрев структуры FinFET. Полученные результаты коррелируют с приведёнными в научной литературе.

По результатам проведённого исследования можно сделать следующие выводы:

1. Сравнение показало, что среди рассматриваемых типов транзисторных структур наименьший уровень саморазогрева показывает структура МОПТ на объемном кремнии. Все структуры обладали одинаковой длиной и шириной канала, концентрацией носителей в канале и областях сток/исток, толщиной и составом диэлектриков в МОП-структуре. При сравнении одиночных транзисторов наибольший перегрев наблюдался в КНИ МОПТ, однако в случае, когда FinFET'ы задействованы в составе модуля с одновременной работой 8-ми fin'ов, перегрев каждого из них значительно выше.
2. Температура fin'ов в FinFET-модуле слабо зависит от дистанции между ними, но при сближении ближе 80 нм зависимость становится в разы сильнее. Это обусловлено распространением тепла в STI-области FinFET'a. Увеличение дистанции между fin'ами свыше этой величины не приносит существенного улучшения тепловых характеристик.
3. Наиболее эффективным средством контроля саморазогрева в FinFET остаётся уменьшение внешнего теплового сопротивления между структурой транзистора и окружающей средой. Крупнейшие производители интегральных схем активно развивают средства математического моделирования и САПР для расчёта таких сопротивлений и проектирования более эффективных средств отвода тепла.

ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке совместного гранта РФФИ и Фонда научных исследований Китая (грант № 20-57-53004).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Jang D. et al. Self-heating on bulk FinFET from 14 nm down to 7 nm node // 2015 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). Washington: IEEE, 2015. P. 11.6.1-11.6.4.
- [2] Liu W., Etesam-Yazdani K., Hussin R., Ashoghi M. Modeling and Data for Thermal Conductivity of Ultrathin Single-Crystal SOI Layers at High Temperature // IEEE Trans-actions On Electron Devices. Vol. 53. No. 8. 2006. P. 1868-1876.
- [3] Wang L., Brown A.R., Nedjalkov M., Alexander C., Cheng B., Millar C., Asenov A. Including the Fin Shape Dependence of the Thermal Conductivity // 2014

- International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). Yokohama:IEEE, 2014. P. 269-272.
- [4] Li Z. et al. Understanding ESD Induced Thermal Mechanism in FinFETs Through Predictive TCAD Simulation // 2020 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS). Dallas: IEEE, 2020. P. 1-4.
- [5] Guerrieri S. D., Bonami F., Ghione G. TCAD analysis of FinFET temperature-dependent variability for analog applications // 2019 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). Udine: 2019. P. 1-4.
- [6] Liu S.L. et al. Self-Heating Temperature Behavior Analysis for DC - GHz Design Optimization in Advanced FinFETs // 2019 Symposium on VLSI Technology. Kyoto:IEEE 2019. P. T200-T201.
- [7] Paskov P. P., Slomski M., Leach J. H., Muth J. F., Paskova T. Effect of Si doping on the thermal conductivity of bulk GaN at elevated temperatures – theory and experiment // AIP Advances 7, 095302 (2017), P. 1-15.
- [8] Huo Q., Wu Z., Zhang F., Li L. A Modeling Approach for 7nm Technology Node Area-Consuming Circuit Optimization and Beyond // 2019 16th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD). Lausanne: IEEE, 2019. P. 93-96.
- [9] Jain I., Gupta A., Hook T.B., Dixit A. Modeling of Effective Thermal Resistance in Sub-14-nm Stacked Nanowire and FinFETs // IEEE Transactions on Electron Devices. Vol. 65, No. 10. 2018. P. 4238-4244.
- [10] 10th Generation Intel Core Processors Datasheet, Volume 1 of 2. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/docs/processors/core/10th-gen-core-families-datasheet-vol-1.html> (дата обращения: 20.07.2021).
- [11] Zhao Y., Qu Y. Impact of Self-Heating Effect on Transistor Characterization and Reliability Issues in Sub-10 nm Technology Nodes // IEEE Journal of the Electron Devices Society. Vol. 7. 2019. P. 829-836.

Comparison of MOSFET and FinFET Thermal Characteristics

K.O. Petrosyants^{1,2}, D.S. Silkin¹, D.A. Popov¹

¹National Research University Higher School of Economics,
Moscow, kpetrosyants@hse.ru

²Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences,
Moscow

Abstract — Thermal TCAD model of FinFET module consisting of eight parallel-connected fins is presented in the article. The results of modeling module self-heating and the dependence of overheating on the distance between the fins in the module are presented. A comparison of the overheating values for a single fin and MOSFET with similar structure parameters was carried out.

Keywords — FinFET, MOSFET, Self-Heating, TCAD-simulation.

REFERENCES

- [1] Jang D. et al. Self-heating on bulk FinFET from 14 nm down to 7 nm node // 2015 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). Washington: IEEE, 2015. P. 11.6.1-11.6.4.
- [2] Liu W., Etessam-Yazdani K., Hussin R., Asheghi M. Modeling and Data for Thermal Conductivity of Ultrathin Single-Crystal SOI Layers at High Temperature // IEEE Transactions On Electron Devices. Vol. 53. No. 8. 2006. P. 1868-1876.
- [3] Wang L., Brown A.R., Nedjalkov M., Alexander C., Cheng B., Millar C., Asenov A. Including the Fin Shape Dependence of the Thermal Conductivity // 2014 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). Yokohama:IEEE, 2014. P. 269-272.
- [4] Li Z. et al. Understanding ESD Induced Thermal Mechanism in FinFETs Through Predictive TCAD Simulation // 2020 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS). Dallas: IEEE, 2020. P. 1-4.
- [5] Guerrieri S. D., Bonami F., Ghione G. TCAD analysis of FinFET temperature-dependent variability for analog applications // 2019 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). Udine: 2019. P. 1-4.
- [6] Liu S.L. et al. Self-Heating Temperature Behavior Analysis for DC - GHz Design Optimization in Advanced FinFETs // 2019 Symposium on VLSI Technology. Kyoto:IEEE 2019. P. T200-T201.
- [7] Paskov P. P., Slomski M., Leach J. H., Muth J. F., Paskova T. Effect of Si doping on the thermal conductivity of bulk GaN at elevated temperatures – theory and experiment // AIP Advances 7, 095302 (2017), P. 1-15.
- [8] 27. Huo Q., Wu Z., Zhang F., Li L. A Modeling Approach for 7nm Technology Node Area-Consuming Circuit Optimization and Beyond // 2019 16th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD). Lausanne: IEEE, 2019. P. 93-96.
- [9] Jain I., Gupta A., Hook T.B., Dixit A. Modeling of Effective Thermal Resistance in Sub-14-nm Stacked Nanowire and FinFETs // IEEE Transactions on Electron Devices. Vol. 65, No. 10. 2018. P. 4238-4244.
- [10] 10th Generation Intel Core Processors Datasheet, Volume 1 of 2. Url: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/docs/processors/core/10th-gen-core-families-datasheet-vol-1.html> (access date: 20.07.2021).
- [11] Zhao Y., Qu Y. Impact of Self-Heating Effect on Transistor Characterization and Reliability Issues in Sub-10 nm Technology Nodes // IEEE Journal of the Electron Devices Society. Vol. 7. 2019. P. 829-836.