УДК 621.382

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Новиков Ф.П.[1], Лопатко А.И.[2], Стемпицкий В.Р.[1]

[1]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, vstem@bsuir.by

[2]ГУО «Боровлянская средняя школа №2», Минск, Республика Беларусь

Аннотация: рассмотрены вопросы повышения адекватности компьютерного проектирования изделий микроэлектроники за счет предварительной статистической обработки экспериментальных данных, оптимизации и верификации параметров приборно-технологических моделей. Предложено использовать статистические методы и аппроксимационные зависимости для снижения затрат на натурные эксперименты и повышения достоверности результатов моделирования.
Ключевые слова: компьютерное проектирование, микроэлектроника, статистический анализ, оптимизация, верификация моделей, сквозной цикл проектирования, SPICE-параметры, аппроксимация, Монте-Карло.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние микроэлектроники характеризуется неуклонным повышением сложности и стоимости разработки интегральных микросхем (ИМС), снижением их «времени жизни». Условия острой рыночной конкуренции диктуют необходимость сокращения сроков проектирования и производственного освоения новых изделий. Значительная доля общей стоимости изделий микроэлектроники приходится на затраты, связанные с проектированием, поэтому использование современных методов и программных средств на всех составных этапах проектирования и экспериментальной отработки «технология–прибор–схема–система» (ТПСС) становится как никогда актуальным [1, 2].

II. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эффективность использования компьютерных средств проектирования приборной структуры в значительной степени зависит от полноты учета физических явлений в моделях описания отдельных технологических операций обработки полупроводниковых структур и технологического маршрута в целом. Каждый переход к новым технологическим нормам проектирования приводит к появлению новых физических эффектов в МОП-транзисторах, для учета которых необходимо создавать новые модели. Появление новых моделей порождает новые проблемы верификации, достоверности, точности и стандартизации. Одновременно с проблемой достоверности моделей существует проблема быстродействия средств моделирования, которая приводит к необходимости использовать упрощенные модели транзисторов и приближенные методы моделирования электронных цепей. Это неизбежно приводит к потере достоверности моделирования и возрастанию неопределенности в определении области допустимого применения модели. Используемые в настоящее время модели и методы возникли как компромисс между их точностью, достоверностью и вычислительной эффективностью. Трудоемким процессом становится верификация (обоснование достоверности) таких моделей [1].

Стандартные программные средства проектирования и моделирования в микроэлектронике основаны на многообразных моделях транспорта носителей заряда в приборных структурах. Моделирование и проектирование с использованием «встроенных» в указанные модели коэффициентов в других условиях, с другими технологическими нормами могут привести к неадекватным результатам моделирования и проектирования. Задача адаптации физико-математических моделей, используемых в стандартных средствах проектирования изделий микроэлектроники, для нанометровых проектных норм, как и задача разработки соответствующих методов моделирования, реализованных в программных средствах, является важной и актуальной.

Значения входных и выходных параметров, измеренных по результатам формирования элементов ИМС и используемых для статистического анализа и аппроксимации, зачастую содержат ошибки и погрешности, которые существенно сказываются на адекватности результатов статистических исследований. На практике для предотвращения подобных случаев необходимо проводить дополнительную предварительную – перед аппроксимацией и оптимизацией – обработку результатов [3]. В настоящее время процедура обработки экспериментальных данных достаточно хорошо формализована, и исследователю необходимо только правильно ее использовать. Круг

вопросов, решаемых при обработке результатов эксперимента, не так уж велик: это вопросы подбора эмпирических формул и оценки их параметров, вопросы оценки истинных значений измеряемых величин и точности измерений, вопросы исследования корреляционных зависимостей и некоторые другие. Одной из важнейших задач математической обработки результатов эксперимента является оценка истинного значения измеряемой величины по данным эксперимента с возможно меньшей ошибкой [3].

Для повышения адекватности и снижения затрат на экспериментальную отработку ТПСС целесообразно использовать аппроксимационные методы, обеспечивающие построение зависимостей по данным экспериментальных исследований. Применительно к микроэлектронике это означает: построение аппроксимационных полиномиальных зависимостей для описания результатов экспериментов при минимальном их количестве; использование этих зависимостей для статистического анализа и оптимизации параметров приборно-технологических моделей; адаптацию физико-математических моделей, используемых в стандартных средствах проектирования, для нанометровых проектных норм; разработку соответствующего программного обеспечения, реализующего методы статистической обработки и оптимизации; верификацию параметров моделей, включая экстракцию SPICE-параметров, по экспериментальным данным.

Перспективным направлением практического использования полученных результатов является статистический анализ и оптимизация параметров приборно-технологических моделей в сквозном цикле проектирования полупроводниковых приборов. Это позволит повысить адекватность моделей экспериментальным данным, сократить сроки и затраты на разработку новых изделий, обеспечить высокий уровень выхода годных ИМС и эффективно прогнозировать характеристики схем при выбранных режимах технологии.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные методы статистической обработки и оптимизации параметров моделей являются эффективным средством повышения достоверности компьютерного проектирования в микроэлектронике. Их внедрение в сквозной цикл ТПСС будет способствовать решению актуальных задач современной электроники в условиях ужесточающейся конкуренции и перехода к нанометровым нормам. Дальнейшее развитие работ связано с адаптацией физико-математических моделей для новых технологических норм, совершенствованием методов верификации и расширением программных средств статистического анализа и оптимизации.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Кулешов А. А., Малышев В. С., Нелаев В. В., Стемпицкий В. Р. Статистическое проектирование и оптимизация технологии производства интегральных микросхем // Микроэлектроника. – 2003. – Т. 32, № 31. – С. 47–61.

[2] Cunningham S. P., Spanos C. J. Semiconductor yield improvement: results and best practices // IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing. – 1995. – Vol. 8, No. 2. – P. 103–109.

[3] Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: Физматлит, 2006.

STATISTICAL DESIGN AND OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND DEVICE STRUCTURES IN MICROELECTRONICS

Novikov F.P.[1], Lopatko A.I.[2], Stempitsky V.R.[1]

[1]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus, vstem@bsuir.by

[2]Borovlyany Secondary School No. 2 Minsk, Republic of Belarus

Abstract: This paper examines methods for improving the accuracy of computer-aided design (CAD) for microelectronic products through the preliminary statistical processing of experimental data, as well as the optimization and verification of parameters for device and process models. It is demonstrated that the current landscape of integrated circuit development necessitates the integration and unification of CAD tools across the entire "technology–device–circuit–system" design cycle. Particular attention is given to the calibration of parameters for physical-mathematical models–including SPICE parameters–and the requirement to adapt these models to nanometer-scale design rules. The use of statistical methods and approximation functions is proposed as a means to reduce the costs associated with physical experiments and to enhance the reliability of simulation results.

Keywords: computer-aided design, microelectronics, statistical analysis, optimization, model verification, end-to-end design cycle, SPICE parameters, approximation, Monte Carlo.