

ЛИТЕРАТУРА

1. Slomczynski W., Kwapien J., Zyczkowski K. Entropy computing via integration over fractal measures // Chaos. – 2000. – V. 10, № 1. – P. 180–188.
2. Чигарев А. В. Стохастическая и регулярная динамика неоднородных сред. – Мн.: УП «Технопринт», 2000. – 426 с.
3. Barnsley M. F., Demko S. G., Elton J. H., Geronimo J. S. Invariant measures for Markov processes arising from iterated function systems with place-dependent probabilities. – Ann. Ins. Henri Poincaré, Sect. A. – 1988. – V. 24. – P. 367–394; 1989. – V. 25. – P. 589.
4. Нестандартные методы в стохастическом анализе и математической физике / С. Альбевирео, Й. Фенстад, Р. Хезг-Крон, Т. Линдстрём. – М.: Мир, 1990. – 616 с.
5. Кусраев А. Г., Кутателадзе С. С. Нестандартные методы анализа. – Новосибир.: Наука, 1990. – 344 с.
6. Beck C., Schlogl F. Thermodynamics of Chaotic Systems Cambridge. – Cambridge University Press. – 1993.
7. Климонтович Ю. Л. Статистическая теория открытых систем. – И. М.: ТОО «Янус», 1995. – 624 с.
8. Shnirman M. G., Tyurina Y. A. Generalised hierarchical model of defect development and self-organised criticality // Phys. Rev. E, 1998. – V. 57, № 4. – P. 3804–3813.
9. Aed Construction and Technology in Design / S. Novikava, K. Miatliuk, S. Gancharova, V. Kaliada // Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications LSS'95. – London, UK, 1995. – P. 379–381.
10. Mesarovic M. D., Masko D., Takahara Y. Theory of Hierarchical Multilevel Systems. – New York; London: Academic Press, 1970.
11. Ревуженко А. Ф. Механика упруго-пластических сред и нестандартный анализ. – Новосиб.: Из-во Новосибир. ун-та, 2000. – 428 с.
12. Wei H. Yang. On generalized Hölder inequality // Nonlinear Analysis, Theory & Applications. – 1991. – V. 16, № 5. – P. 489–491.

УДК 666.97.031

АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

*Докт. техн. наук, проф. СЫЧИК В. А.,
кандидаты техн. наук ГОРОЖДАНОВ А. Д., УЛАСЮК Н. Н., студ. ВЛАДИМИРОВА С. С.*

Белорусский национальный технический университет

Технологический процесс изготовления изделия состоит из ряда операций, каждая из которых имеет свою физико-химическую природу (напыление, травление, диффузия и т. д.) и характеризуется отличными от других параметрами. Вследствие этого для описания каждой технологической операции необходима разработка отдельной математической модели. При этом модель всего технологического процесса (ТП) будет состоять из композиции моделей отдельных технологических операций.

Математическая модель ТП в целом будет представлять собой структуру, образованную моделями отдельных функциональных модулей и моделью связи между ними. В качестве связей между моделями функциональных модулей выступают соотношения, которые обеспечивают сопряжение их входов и выходов по энергетическим и математическим потокам, а также пространственному расположению модулей.

Методы анализа и синтеза функциональных моделей. Важным критерием, который определяет возможность использования того или иного метода решения задачи анализа и моделирования ТП, является наличие прототипа ТП, т. е. возможность использовать результаты, полученные на базовой технологической установке, при разработке моделей.

Первым методом разработки новых и усовершенствования существующих ТП является метод проб и ошибок. Технология применения такого подхода базируется на знаниях, опыте, интуиции разработчика и требует значительных финансовых и временных затрат, а в силу определяющего влияния субъективного фактора не гарантирует получение оптимального или просто приемлемого варианта проектного решения.

Методы теории подобия и аналогового моделирования широко применяются при анализе тепловых процессов, например при исследо-

вании процессов получения монокристалла. В основе данного подхода лежит использование подобия явлений различной физической природы, допускающих одинаковое математическое описание.

Достоинства этих методов:

- возможность проведения исследования на более эффективном по заданным критериям процессе;
- возможность редукции размерности пространства переменных состояния процесса;
- наглядность представления результатов в некоторых случаях при использовании ЭВМ;
- возможность применения критериев подобия при работе с тестовыми структурами.

В качестве недостатков данных методов следует отметить некоторую ограниченность области применения (сильное влияние сложности системы, пределы правомерности использования выбранных процессов-аналогов, наличие нелинейных эффектов, таких как фазовые переходы).

К *расчетно-эмпирическим* относятся методы, позволяющие исследовать и оптимизировать технологический процесс на основе анализа его статистических характеристик. В основе данного метода лежит положение, основывающееся на центральной предельной теории вероятностей: если производственные погрешности являются случайной величиной, которую можно представить как сумму большого числа не зависящих друг от друга слагаемых, каждое из которых вносит в сумму лишь незначительный вклад, то эта сумма распределена приблизительно по нормальному закону. Этим требованиям технологические процессы микроэлектроники обычно удовлетворяют.

Характерными особенностями данного метода являются:

- ориентация на конкретные статистические характеристики;
- использование априорных предположений о характере распределения производственных погрешностей;
- зависимость данного метода от представительности имеющейся статистической выборки.

К достоинствам данного метода относятся:

- простота процедур использования;
- четная определенность необходимых действий;

- выявление усредненных характеристик процессов;
- относительная возможность экстраполяции поведения ТП.

К недостаткам следует отнести зависимость полученных результатов от априорных предположений о законах распределения и дисциплины формирования выборки от субъективных суждений о близости условий реального эксперимента к условиям, для которых разрабатывались процедуры статистической оценки показателей качества.

Методы асимптотического оценивания целесообразно использовать на ранних этапах выполнения процедур анализа. Наиболее широко они применяются для оценок параметров процессов в их характерных точках либо при использовании упрощающих предположений.

Эти методы целесообразно применять для проверки адекватности математических моделей по следующим критериям:

- непротиворечивость (дает ли модель результаты, которые не противоречат логике при изменении важнейших параметров, особенно в тех случаях, когда их значения близки к экстремальным);
- чувствительность (соответствуют ли относительные изменения выходных переменных модели небольшим изменениям ее параметров);
- реалистичность (соответствует ли модель частным случаям, для которых имеются экспериментальные данные [1]).

Графический и другие немашинные методы применяются в тех случаях, когда возможно получение явного выражения для некоторой величины посредством аналитических преобразований исходной математической модели ТП. Область применимости графического метода достаточно ограничена из-за сложности физических процессов, происходящих в зоне технологического воздействия ТП микроэлектроники.

Использование этого метода оказывается полезным при выполнении оценочных расчетов.

Характерными чертами графического метода являются:

- необходимость предварительной работы по построению графиков, таблиц, получению аналитического решения;
- возможность использования данного метода лишь для простых физических процессов.

Достоинства метода: простота и удобство в практической работе, наглядность проводимого анализа, легкость проверки правильности результата и возможность оперативного получения оценочных результатов.

Недостатки метода: ограниченность в использовании, связанная с размерностью пространства переменных задач; сложность математической модели; невысокая точность получаемых оценок вследствие необходимости использования упрощающих предположений.

К методам вычислительного эксперимента можно отнести широкий спектр методов, основанных на выполнении процедур анализа и синтеза ТП микроэлектроники посредством использования математической модели ТП для замены натурных экспериментов исследованиями с помощью математического моделирования.

Общая структура вычислительного эксперимента представлена на рис. 1.

Из рис. 1 следует, что вычислительный эксперимент связан с очень широким кругом само-

стоятельных областей деятельности. Так как они взаимосвязаны в рамках вычислительного процесса, то предполагают параллельное развитие, поскольку отсутствие работ должного уровня даже в одной из областей приводит, в лучшем случае, к снижению эффективности этого метода, а в худшем – к отказу от достижения конечного результата.

Необходимость использования вычислительного эксперимента вызвана тем, что решение задач, связанных с моделированием и проектированием ТП микроэлектроники, невозможно выполнить другими методами.

Вычислительный эксперимент имеет ряд присущих ему достоинств:

- его проведение возможно в достаточно широком диапазоне значений параметров процесса и установки без ее модификации. Благодаря этому возможно проведение большой серии экспериментов за достаточно короткое время;

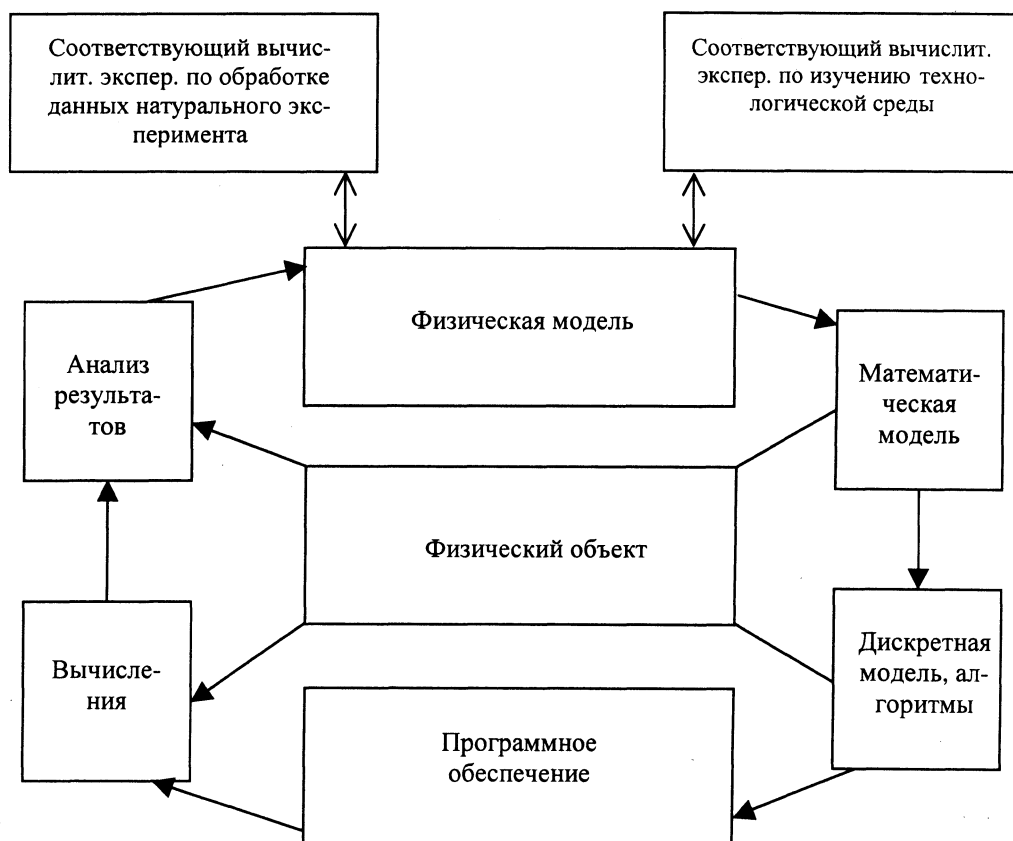


Рис. 1

- появляется возможность управлять анализом, что особенно важно при малых размерах области протекания процесса и его малой длительности, характерных для технологии микроэлектроники;

- изучаемые физические процессы часто имеют исключительно сложный характер из-за комплексного воздействия многих физических явлений. Вычислительный эксперимент позволяет рассматривать влияние каждого такого явления в отдельности;

- в случае зависимости физического процесса от большого числа параметров возможно рассмотрение влияния изменения раздельно для каждого из них;

- возможно проведение большого числа различных экспериментов без разработки новых установок на основе имеющегося банка моделей физических процессов;

- позволяет определить причины несоответствия результатов натурального эксперимента теоретическим прогнозам.

Развитие метода *имитационного моделирования* [2] тесно связано с совершенствованием средств вычислительной техники, так как в его основу положена идея выявления закономерности на основе оценки большого числа вариантов некоторого явления, которое имеет вероятностный характер.

Характерными особенностями данного подхода являются:

- зависимость полученных результатов от выбора в математической модели закона распределения случайных величин;

- зависимость результатов от качества генераторов случайных чисел, т. е. степени близости используемых распределений к теоретическому закону распределения;

- результат получается как ключ «проигрывания» большого числа ситуаций;

- метод применяется при исследовании систем, имеющих вероятностный характер поведения.

Достоинством метода является его исключительная мощность при правильном выборе объекта моделирования, верной организации и наличии адекватной математической модели.

Его недостатки: необходимы значительные временные и вычислительные ресурсы, возможно получение недостаточных результатов вследствие того, что используемая последовательность случайных чисел отклоняется от теоретического закона распределения либо сам закон выбран неверно.

Статистическая математическая модель получается в результате обработки связей вход-выход с представлением моделируемого объекта в виде «черного ящика». Как правило, она имеет полиномиальный вид.

Характерные черты данного подхода:

- обязательное наличие базовой технологической установки;

- коэффициенты полиномиальных моделей не несут физической информации;

- критерии оптимальности планов определяются на основе субъективного представления о том, что такое хороший эксперимент.

К достоинствам можно отнести унифицированность методики применения метода и возможность построения математических моделей ТП при отсутствии детального понимания происходящих в нем физико-химических процессов.

Его недостатки:

- полученное решение может быть хорошим для данной конкретной установки вследствие присущих ей конструктивных особенностей, которые не учитываются в математической модели;

- вид математической модели ограничивается полиномом;

- этот метод весьма чувствителен к размерности пространства технологических параметров. Возрастание их числа ведет к степенному росту числа опытов, необходимых для построения модели;

- ограниченная возможность экстраполяции полученных результатов.

Данный подход полезен для предварительной оценки значимости входных технологических параметров с точки зрения влияния их изменения на показатели качества процесса.

Детерминированные математические модели имеют вид систем дифференциальных или интегральных уравнений. Для задач микроэлектроники это в основном системы дифференциальных уравнений в частных производных.

Характерные особенности модели:

- построение математической модели основывается на анализе физических процессов в зоне технологического воздействия;
- математическая модель представлена [3] в виде системы дифференциальных уравнений и в виде результатов работы программы;
- на адекватность математической модели существенно влияют численные методы, которые используются при переходе от математической модели 1-го рода к математической модели 2-го рода;
- параметры и коэффициенты математической модели несут конкретную физическую информацию;
- идентификация параметров математической модели осуществляется на основе решения обратных задач.

ВЫВОДЫ

1. Метод вычислительного эксперимента в силу своей специфики не заменяет другие методы, используемые при анализе и синтезе ТП микроэлектроники, а соединяет в себе достоинства этих подходов, несколько видоизменяя их и приводя способ использования в соответствие со спецификой.

2. Наиболее существенными при оценке эффективности технологических процессов в микроэлектронике являются имитационная и детерминированная математическая модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pelka J., Müller N. Simulation of Dry Etch Processes by COMPOSITE // IEEE Trans. – 1988. – Vol. CAD-7, № 2. – P. 154–159.
2. Salshurg K. A., Nansen N. N. Fedss-Finite-Element Diffusion-Simulation System // IEEE Trans. – 1983. – Vol. ED-30, № 9. – P. 1004–1011.
3. Nobler G., Selberherr S. Two-Dimensional Modeling of Ion Implantation Induced Point Defects // IEEE Trans. – 1988. – Vol. CAD-7, № 2. – P. 174–180.

УДК 616.7.72

КОМПЛЕКСНЫЙ ТРЕНАЖЕР КАК СРЕДСТВО РЕАБИЛИТАЦИИ НЕВРОЛОГИЧЕСКИХ БОЛЬНЫХ И ИНВАЛИДОВ

*Докт. техн. наук, проф. КИСЕЛЕВ М. Г., канд. техн. наук, доц. ЕСЬМАН Г. А.,
инженеры ГАБЕЦ В. Л., ЗАХАРЕНКО В. П., студ. МАТЬЯНОВ Д. П.,
докт. мед. наук, проф. СМЫЧЁК В. Б.*

*Белорусский национальный технический университет,
ГУ «НИИ медико-социальной экспертизы и реабилитации»*

В последние годы в Республике Беларусь принят ряд постановлений и законов, направленных на улучшение положения инвалидов. До настоящего времени социальная политика в отношении инвалидов, построенная на компенсационной основе, не учитывала их способности к труду, потребности в нем и общении

с окружающими. Такой подход не ориентировал ни общество, ни самих инвалидов на развитие и использование потенциала личности, не обеспечивал условия для их интеграции в общество.

В результате сегодня имеется система пенсионного обеспечения, но недостаточно развита