

Применение статистических методов контроля технологических процессов для повышения надежности проектирования сверхвысокочастотных монолитных микросхем

М. А. Калякин, Д. М. Красовицкий, С. И. Стрельников, А. Г. Филаретов

В статье описаны основные принципы построения системы контроля и статистического описания матрицы параметров технологических процессов изготовления библиотек стандартных элементов на основе полупроводниковых гетероструктур, используемых для проектирования и производства компонентов твердотельной сверхвысокочастотной техники. Показано, что определение «среднестатистического» состояния такой матрицы, отвечающего нахождению значений всех параметров в границах, обусловленных естественной изменчивостью технологического процесса, многократно повышает надежность проектирования сверхвысокочастотных монолитных интегральных микросхем (СВЧ МИС) и сходимость экспериментальных параметров с расчетными данными. Описанный алгоритм позволяет создавать комплексы правил и средств проектирования СВЧ МИС, не уступающие лучшим мировым аналогам.

Ключевые слова: СВЧ МИС, правила и средства проектирования, параметрический монитор, библиотека стандартных элементов.

Ссылка: Калякин М. А., Красовицкий Д. М., Стрельников С. И., Филаретов А. Г. // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 110.

Reference: M. A. Kalyakin, D. M. Krasovitsky, S. I. Strelnikov, and A. G. Filaretov, Prikl. Fiz. No. 6, 110 (2018).

Введение

Ведущие мировые научно-производственные центры в своих разработках полупроводниковых микроэлектронных компонентов широко применяют принципы «foundry» [1]. В их основе лежит сочетание использования средств сквозного (т. е. сохраняющего характерные свойства элементарной модели на разных уровнях системной архитектуры) проектирования с высокой стабильностью технологических процессов, позволяющих производить целые классы конструктивно и технологически подобных устройств. Успешная реализация этого сочетания имеет фундаментальную физическую подоплеку.

Инструменты проектирования микроэлектронных устройств какого-либо класса оперируют со стандартными наборами (библиотеками) элементов, изготавливаемых по планарной технологии. Учитывая статистический характер изменения основных свойств полупроводниковых материалов, успех сквозного проектирования напрямую зависит от корректной оценки диапазонов этих изменений и их учета в матрице параметров модели каждого из стандартных элементов, составляющих библиотеку. В свою очередь, необходимым условием воспроизводимости технологических процессов является строгое выполнение совокупности требований к параметрам межоперационного контроля и неразрывное соответствие этих параметров набору функциональных выходных характеристик стандартных элементов.

Таким образом, для построения статистически обоснованного комплекса правил и средств проектирования (в англоязычной литературе – Process Design Kit (PDK)) необходимо связать в реляционной базе данных две статистических совокупности: распределение множества параметров различной размерности, характеризующее естественную изменчивость технологического процесса, и распределение статистических состояний ячеек, содержащих элементы библиотеки.

Калякин Максим Александрович, вед. инженер-конструктор.

Красовицкий Дмитрий Михайлович, вед. инженер, к.х.н.

Стрельников Сергей Игоревич, вед. инженер-программист.

Филаретов Алексей Геллевич, зам. ген. директора по развитию, к.ф.-м.н.
АО «Светлана-Рост».

Россия, 194156, Санкт-Петербург, пр. Энгельса, 27.

E-mail: a.kalyakin@svrost.ru; d.krasovitskij@svrost.ru;
s.strelnikov@svrost.ru; a.filaretov@svrost.ru

Статья поступила в редакцию 16 октября 2018 г.

© Калякин М. А., Красовицкий Д. М., Стрельников С. И., Филаретов А. Г., 2018

Целью данной работы является представление основных принципов построения системы контроля и статистического описания матрицы параметров технологических процессов изготовления библиотек стандартных элементов на основе полупроводниковых гетероструктур, используемых для проектирования и производства компонентов твердотельной сверхвысокочастотной (СВЧ) техники.

Естественная изменчивость технологических процессов

Любой технологический процесс обладает естественной изменчивостью, которая может быть описана в терминах статистических разбросов параметров вокруг среднего значения, а также динамикой изменения средних значений и отклонений во времени (воспроизводимостью) [2]. Решение задачи статистического контроля требует знания установленных границ изменчивости процесса (характеризация технологического процесса).

Результатом любой технологии являются создаваемые физические объекты, параметры кото-

рых можно измерить и, таким образом, дать численную оценку самой технологии. В случае полупроводникового производства в рамках одной технологии может изготавливаться большое количество различных по своим функциям СВЧ монолитных интегральных схем (МИС), спроектированных из стандартного набора (библиотеки) элементов. Поэтому объектом для оценки являются не сами СВЧ МИС, а специально разработанный для процесса параметрический монитор (ПМ), включающий в себя набор тестовых элементов, являющийся отображением создаваемых на разных стадиях технологического процесса физических объектов. Распределение ПМ по площади полупроводниковой пластины позволяет определить изменчивость технологического процесса и по площади пластины, и (в сходственных точках) от пластины к пластине. Специальное программное обеспечение позволяет осуществлять сбор и обработку информации в статистически значимых количествах (см. рис. 1), выстраивать корреляции между параметрами и их группами, осуществлять мониторинг изменения параметров во времени.

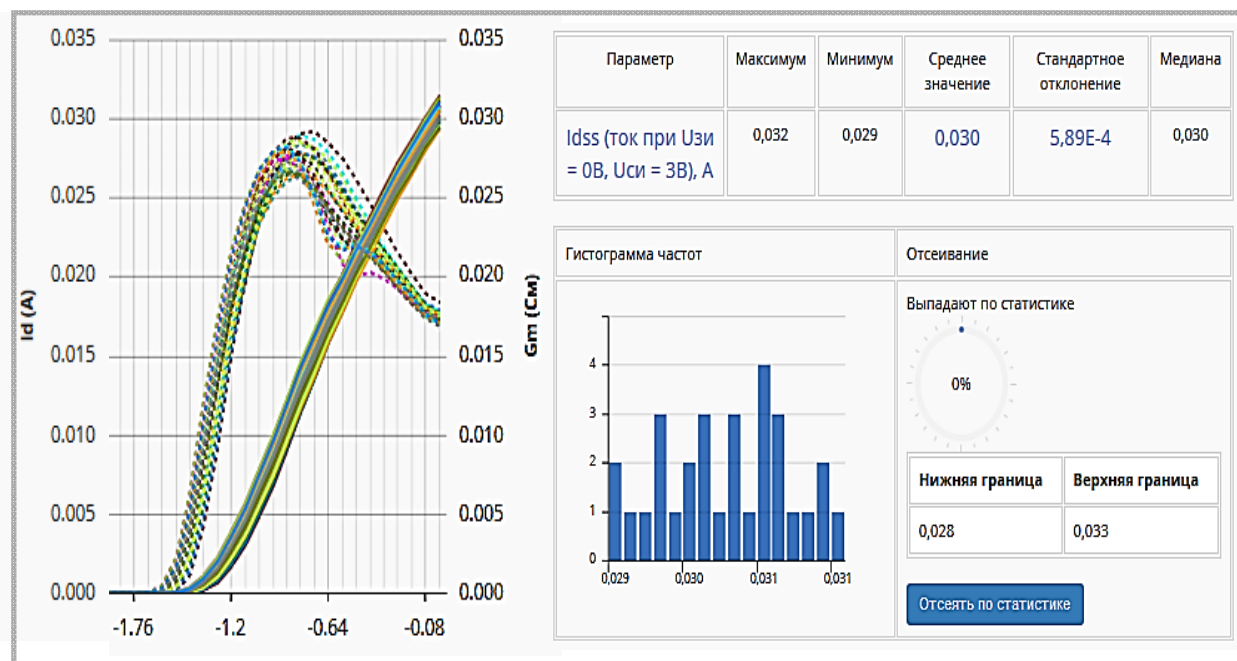


Рис. 1. Отображение в информационной системе семейства вольт-амперных характеристик со статистической обработкой и определением производных параметров

Итак, каждый элемент ПМ, предназначенный для измерений одного или группы электрических параметров, отражает то, насколько точно и воспроизводимо были проведены технологические процессы, в которых были сформированы данные элементы как физические объекты. Таким образом, массив характеристик ПМ можно назвать проекцией технологического процесса. Если рас-

сматривать всю технологию как множество генеральных совокупностей, каждая из которых соответствует конкретному электрическому параметру, то изготовление полупроводниковых пластин в рамках данной технологии можно отождествить с взятием выборок из соответствующих генеральных совокупностей, что проиллюстрировано на рис. 2.

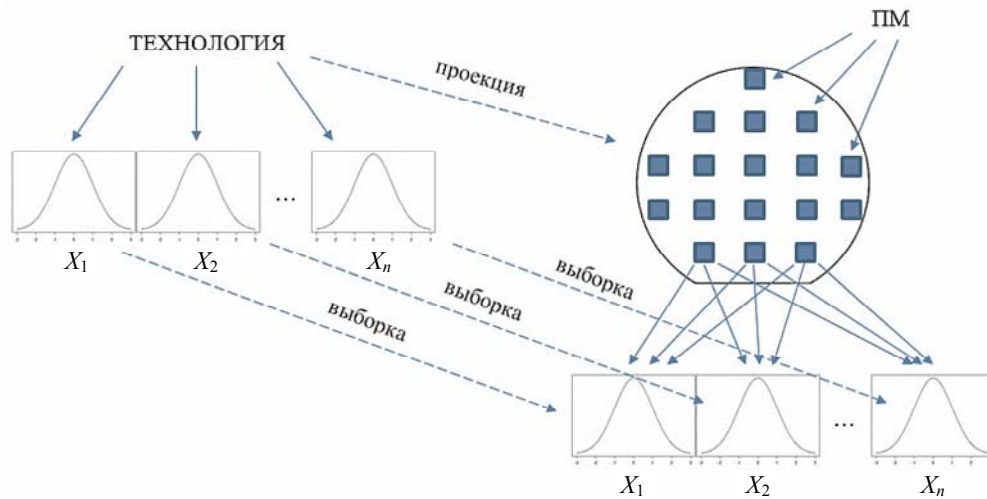


Рис. 2. Представление изготовления пластины как взятия выборки из технологического процесса.

Так как технологический процесс подвержен изменчивости по ряду объективных причин, то результаты изготовления пластин (выборок) каждый раз будут друг от друга в той или иной степени отличаться. Естественная изменчивость технологии хорошо отражена на графиках нормального распределения. Значения измеряемого электрического параметра наблюдаются тем чаще, чем ближе они расположены к его среднему значению. То, насколько далеко наблюдаемые значения могут отклоняться от среднего, оценивается стандартным отклонением. Иными словами, стандартное отклонение показывает, насколько в среднем каждое наблюдаемое значение электрического параметра отклоняется от своего математического ожидания.

Среднее значение и стандартное отклонение определяются соответственно формулами:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

где n , в нашем случае, – количество измеренных элементов одного типа на пластине.

Но при каких значениях среднего и стандартного отклонения электрического параметра можно сделать вывод, что технологический процесс прошел неудовлетворительно?

Процедура характеристики технологического процесса включает в себя не только определение среднего значения и стандартного отклонения, но и границ, в которых данные статистики могут изменяться. Такими границами являются:

верхняя граница регулирования (UCL , upper control limit);

нижняя граница регулирования (LCL , lower control limit);

верхняя граница предупреждения (UWL , upper warning limit);

нижняя граница предупреждения (LWL , lower warning limit).

Для проведения характеристики технологического процесса необходимо изготовление полупроводниковых пластин в статистически значимом количестве (в мировой практике при характеристике процесса используется до нескольких сотен пластин). В процессе изготовления пластин в контрольных точках проводится измерение электрических параметров на сформированных элементах ПМ. Нередко в результатах измерений возникают выбросы, в основном связанные с неработоспособностью измеряемых элементов. Такие выбросы могут сильно исказить результаты расчета среднего значения и стандартного отклонения, поэтому их необходимо отсеивать. Изначально для отсеивания был выбран метод, который предусматривал исключение тех значений, которые выходят за границы интервала $\bar{x} \pm 3S$, где \bar{x} и S – среднее значение и стандартное отклонение, рассчитанные по формулам (1) и (2). Но такой подход показал, что эффективно могут отсеиваться только те выбивающиеся значения, которые достаточно сильно удалены от среднего. Это связано с тем, что сами выбивающиеся значения сильно влияют на определение границ интервала для отсеивания. Поэтому правильнее выбрать метод, основанный на квартилях.

Самым известным квартилем является второй квартиль Q_2 , также называемый медианой, которая делит выборку пополам. Первый квартиль

Q_1 делит выборку так, что 25 % значений выборки меньше Q_1 . Третий квартиль Q_3 делит выборку так, что 25 % значений выборки больше Q_3 . Промежуток между Q_1 и Q_3 , внутри которого содержится 50 % всех наблюдений, называется межквартильным расстоянием IQR :

$$IQR = Q_3 - Q_1. \quad (2)$$

Нижняя и верхняя границы отсеивания определяются следующим образом:

$$LL = Q_1 - 1,5IQR \quad (3)$$

$$UL = Q_3 + 1,5IQR. \quad (4)$$

Коэффициент 1,5 при необходимости позволяет регулировать степень жесткости границ отсеивания [3]. После отсеивания выбывающихся значений, по формулам (1) можно определить средние значения и стандартные отклонения параметров для каждой пластины. Затем можно определить средние значения параметров, которые будут характеризовать технологический процесс:

$$CL_{\bar{x}} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \bar{x}_j, \quad (5)$$

где k – количество пластин; \bar{x}_j – среднее значение параметра на j -й пластине.

$$CL_S = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k S_j, \quad (6)$$

где S_j – стандартное отклонение параметра на j -й пластине.

Теперь можно определить верхние и нижние границы регулирования и предупреждения для средних значений параметров:

$$UCL_{\bar{x}} = CL_{\bar{x}} + 3CL_S \quad (7)$$

$$LCL_{\bar{x}} = CL_{\bar{x}} - 3CL_S \quad (8)$$

$$UWL_{\bar{x}} = CL_{\bar{x}} + 2CL_S \quad (9)$$

$$LWL_{\bar{x}} = CL_{\bar{x}} - 2CL_S. \quad (10)$$

Определение нижних границ регулирования и предупреждения для стандартных отклонений

параметров не имеет физического смысла, так как чем меньше стандартное отклонение, тем лучше. Ограничивать стандартное отклонение можно только сверху:

$$UCL_S = 1,4CL_S \quad (11)$$

$$UWL_S = 1,27CL_S. \quad (12)$$

Стоит еще раз отметить, что при характеристике проводится определение значений по формулам (5)–(12) для каждого параметра для каждой контрольной точки технологического процесса. В итоге появляется массив данных, характеризующих через свойства физических объектов (тестовых элементов) «статистические состояния» технологического процесса.

Среднестатистическое состояние библиотечной ячейки. Верификация PDK

После проведения процедуры характеристики изменения в технологическом процессе не допускаются. Проводится только мониторинг в контрольных точках с использованием контрольных карт Шухарта, отражающих изменения параметра во времени (воспроизводимость). Следующим этапом разработки, ради которого «все и затевалось», является проектирование МИС на основе разработанной библиотеки (рис. 3), причём с использованием комплекса правил и средств проектирования. Процесс, называемый обычно верификацией PDK, проводят в два этапа [4].

Целью первичной верификации является проверка правильности выбора общего направления разработки, достаточности состава библиотек, качественное соответствие моделей результатам измерений физических объектов. Несмотря на это, степень сходимости моделей уже на этом этапе бывает значительной (рис. 3, верхний график), что достигается благодаря реализации принципа учета при моделировании естественной изменчивости технологии. Однако наибольшая достоверность может быть достигнута лишь после определения «среднестатистической ячейки» (в англоязычной литературе – «golden die» (GD)), отвечающей совокупности наиболее ожидаемых значений параметров ВСЕХ физических объектов, создаваемых в технологическом процессе.

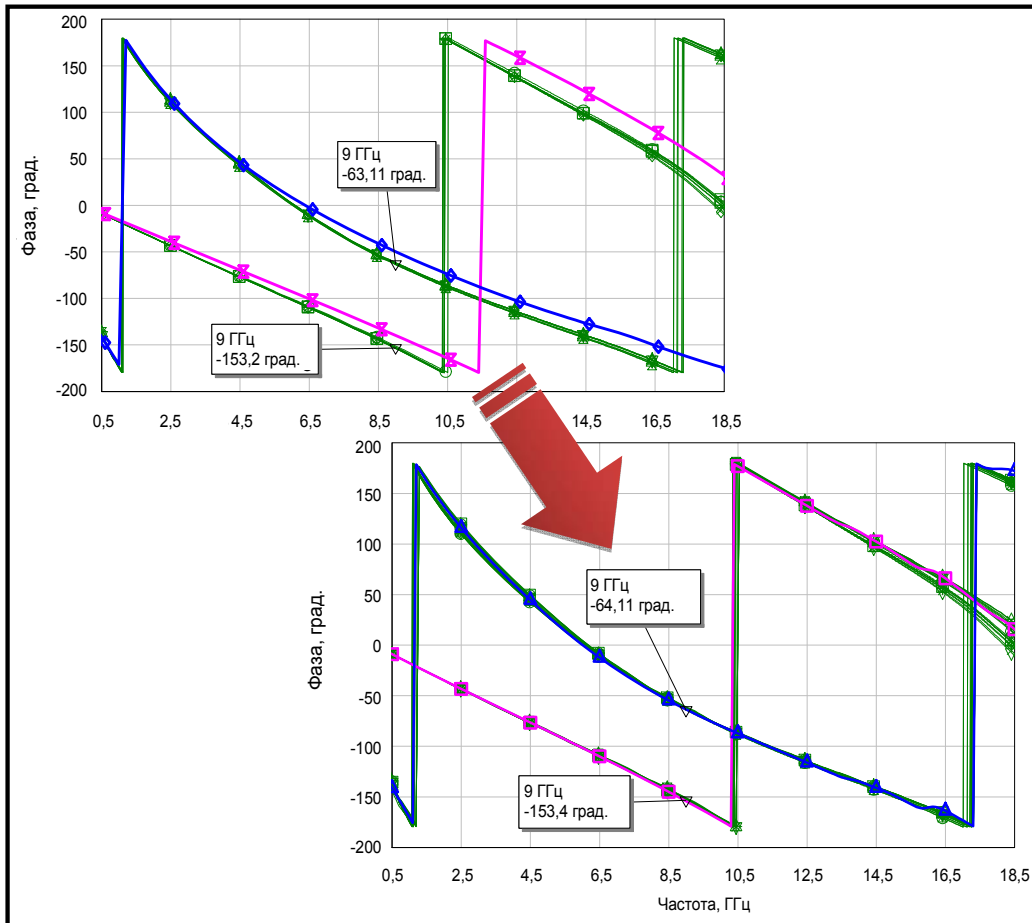


Рис. 3. Улучшение сходимости первичной модели (график сверху) фазовращателя X-диапазона за счет применения матрицы параметров среднестатистических состояний библиотеки стандартных элементов (график внизу). Красным и синим цветом показаны расчетные характеристики фазовращателя в двух основных состояниях, зеленым цветом – экспериментально измеренные характеристики.

В первую очередь, утверждается список всех n параметров m элементов, вычисляемых из измеренных зависимостей и участвующих в расчете «среднего состояния» $\{X\}$. Для них вычисляются среднее значение X_{cp} и отклонения σ по всем элементам всех изготовленных пластин:

$$X_{cp} = \frac{1}{n \times m} \sum_{i=1}^{m \times n} X_i, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m \times n} (X_i - X_{cp})^2}{n \times m - 1}}. \quad (13)$$

Производится фильтрация ошибок по критерию

$$X_{cp} \pm 6 \times \sigma. \quad (14)$$

Стандартизация или Z-преобразование данных для $X_{cp} = 0$ и $\sigma = 1$:

$$Z_i = \frac{X_i - X_{cp}}{\sigma}. \quad (15)$$

Всем ячейкам присваиваются численные значения состояния

$$Z_{ячейки} = \sum_{i=1}^k Z_i \quad (16)$$

и производится поиск ячеек, соответствующих состояниям $GD_{\sigma 0}$, $GD_{\sigma-}$ и $GD_{\sigma+}$:

$$\min(Z_{ячейки}), \quad \min(Z_{ячейки} \mp k). \quad (17)$$

В результате использования найденных состояний $GD_{\sigma 0}$, $GD_{\sigma-}$ и $GD_{\sigma+}$ при проектировании достигается количественное соответствие моделей, уточненных по результатам статистической обработки, результатам измерений физических объектов (рис. 3, график внизу).

Заключение

Статистическое описание технологического процесса создает эффективный механизм его контроля, позволяющий на ранних этапах производства обнаруживать, а в некоторых случаях и предсказывать возможные отклонения в технологии, тем самым повышая ее стабильность. Но более значимым результатом является возможность

нахождения среднестатистического состояния матрицы параметров технологического процесса, непосредственно влияющих на физические свойства элементов, изготавливаемых в нем. Это состояние характеризуется учетом технологических разбросов, позволяющим просчитать характеристики элементов в так называемых «углах» области существования адекватной физической модели. В результате, сходимость модели многократно возрастает, позволяя прогнозировать функциональные характеристики проектируемой СВЧ МИС с точностью, достаточной для практического применения. Не менее важным следствием является существенное повышение выхода годных изделий. При этом необходимо отметить, что указанная точность проектирования распространяется на весь класс конструктивно и технологически подобных СВЧ-устройств, разработка и производство которых является областью назначения технологического процесса и соответствующего ему PDK.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства образования и науки
по Соглашению № 14.582.21.0010 от 14.10.2015
в рамках ФЦП ИР 2014-2020, уникальный
идентификатор проекта RFMEFI58215X0010.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chen C., Kayali S., Rezek E., Trinh T. / GaAs MMIC Reliability Assurance Guideline for Space Applications. JPL Publication 96-25, 1996, USA, p. 123–129.
2. Tsai R., Chen Y. C., Nishimoto M., Yang L. W., Okamura W., Lai R. / 2000 GaAs Mantech Technical Digest, p. 113.
3. Diez D. M., Barr C. D., Çetinkaya-Rundel M. OpenIntro Statistics: Third Edition. – OpenIntro, 2015.
4. Foundry process qualification Guidelines. JEDEC/FSA JP-001. 2002, 2014.

PACS: 85.30.De; 84.40.–x; 84.40.Lj

The statistic control of process technology for reliability improvement of monolithic microwave integral circuits design

M. A. Kalyakin, D.M. Krasovitsky, S. I. Strelnikov, and A. G. Filaretov

Svetlana Rost, JSC
27 Engels av., Saint-Petersburg, 194156, Russia
E-mail: a.kalyakin@svrost.ru; d.krasovitskij@svrost.ru;
s.strelnikov@svrost.ru; a.filaretov@svrost.ru

Received October 16, 2018

The paper reports main principles of process technology monitoring routines developed to describe matrix of parameters during the manufacture of monolithic microwave integral circuits MMIC (MMIC) primitive's libraries based on semiconductor heterostructures. Similar routines have been adopted by world's foundries for MMIC design and manufacturing. It is shown that the «golden die», determined as a physical cell having all the parameters confined in the range predicted by the technology variability, essentially improves the model convergence to experimental data and thus reliability of MMIC design. The algorithm used allows us to create MMIC Process Design Kits competitive to the world industry leaders.

Keywords: MMIC, process design kit, process control monitor, standard cells library.

REFERENCES

1. C. Chen, S. Kayali, E. Rezek, and T. Trinh, in *GaAs MMIC Reliability Assurance Guideline for Space Applications* (JPL Publication 96-25, 1996, USA), p. 123–129.
2. R. Tsai, Y. C. Chen, M. Nishimoto, L. W. Yang, W. Okamura, and R. Lai, in *2000 GaAs Mantech Technical Digest*, p. 113.
3. D. M. Diez, C. D. Barr, and M. Çetinkaya-Rundel, *OpenIntro Statistics: Third Edition*. (OpenIntro, 2015).
4. *Foundry process qualification Guidelines*. (JEDEC/FSA JP-001.2002, 2014).