

УДК 535:621.37

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ПОДГОНКИ ПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ**

© 2012 Ю. Н. Антонов

Ульяновский государственный технический университет

В статье рассмотрено применение нового метода лазерной подгонки с прогнозированием траектории изменения сопротивления пленочных резисторов. Разработана схема моделирования и определены модели, позволяющие выполнять оценку возможности достижения номинального значения сопротивления при настройке управляющей программы подгонки. Метод может быть использован в системах проектирования гибридных интегральных схем и в автоматизированных установках лазерной подгонки пленочных резисторов.

*Лазерная подгонка, пленочный резистор, прогнозная оценка.*

**Введение**

Интегральные схемы (ИС), изготовленные по гибридной технологии, широко применяются во многих областях электронной техники, где предъявляются высокие требования к рабочим характеристикам электронных устройств: аэрокосмическая техника, военная аппаратура, СВЧ схемы, автомобилестроение, телекоммуникации и т.д. Пленочные резисторы являются основными компонентами гибридных ИС, а от точности их сопротивления зависит точность выходных параметров электронной техники.

Нестабильность технологического процесса не позволяет производить пленочные резисторы с высокой точностью сопротивления. Поэтому лазерная подгонка, повышающая точность сопротивления, является одним из методов увеличения выхода годных пленочных резисторов и/или плат гибридных ИС в производственных условиях (рис. 1).

Достоинством лазерной подгонки является то, что она обеспечивает обработку резисторов из любых материалов, развязку цепей измерения и коррекции, высокую производительность оборудования [1], компенсацию как систематической, так и случайной погрешности.



Рис. 1. Автоматизированная установка лазерной подгонки МЛ-5

Однако применение лазерной подгонки не всегда обеспечивает достижение номинального значения сопротивления пленочных резисторов из-за субъективности выбора форм лазерных резов и координат точек начала обработки при настройке управляющей программы.

В связи с этим разработка метода лазерной подгонки с прогнозированием траектории приближения сопротивления к номинальному значению является актуальной и востребованной для развития микроэлектронных технологий в России.

**Анализ карты процесса подгонки**

Анализ возможности прогнозирования траектории изменения сопротивления при настройке управляющей программы проведем, используя карту реального процесса лазерной подгонки, применяемого на установке МЛ5 (рис. 2).

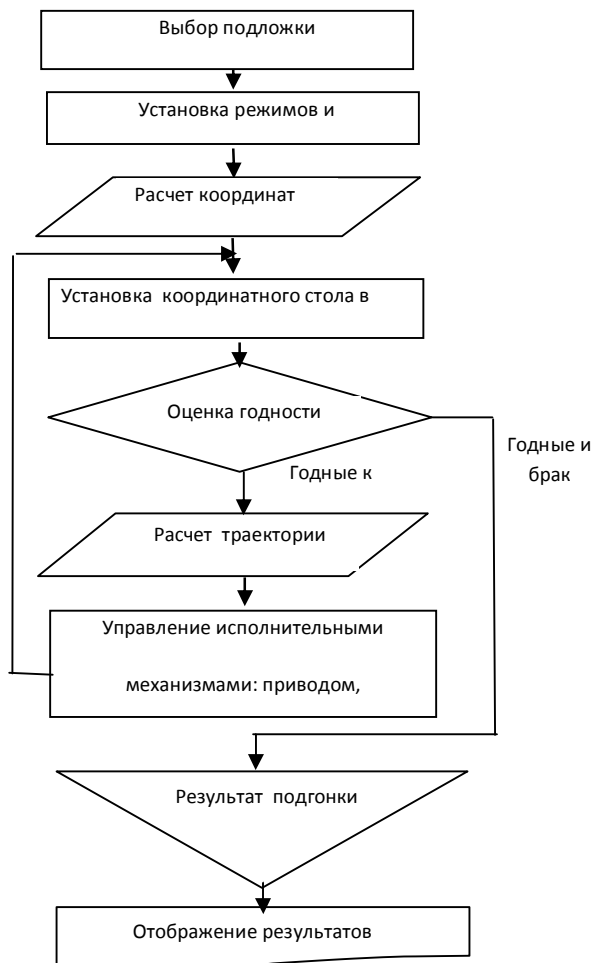


Рис. 2. Карта лазерной подгонки

1. Выбор подложки из базы данных. Осуществляется выбор из базы данных конкретного варианта топологии подложки с платами гибридных ИС и пленочными резисторами.

2. Установка режимов и параметров подгонки. Устанавливаются режимы работы управляющей программы: отладочный, рабочий. Указываются параметры обработки: элементы топологии, форма лазерного реза и др.

3. Расчет координат узловых точек. На данном этапе осуществляется расчет координат узловых точек в соответствии с однородной матрицей  $H_{ij}(t)$ :

$$\begin{matrix}
 H_{1,1}(t_1), & H_{1,2}(t_2), & \dots, & H_{1,j}(t_j) \\
 H_{2,1}(t_{j+1}), & H_{2,2}(t_{j+2}), & \dots, & H_{2,j}(t_{2-j}) \\
 \dots & \dots & \dots & \dots \\
 H_{i,1}(t_{(i-1)j+1}), & H_{i,2}(t_{(i-1)j+2}), & \dots, & H_{i,j}(t_{i-j})
 \end{matrix}$$

4. Установка стола в исходное положение. Координатный стол ставится в исходное положение перед началом обработки подложки. Операция выполняется вручную для совмещения начала координат системы наблюдения и подложки. Выбор координат исходной точки осуществляется на основе опыта персонала или имеющегося прецедента.

5. Оценка годности пленочных резисторов и плат гибридных ИС. Операция выполняется в следующем порядке:

- до и после подгонки измеряются отклонения сопротивления резисторов каждой платы от номинальных значений;
- с помощью правил логического вывода производится разбиение совокупности пленочных резисторов и плат гибридных ИС на непересекающиеся подмножества: годные, годные с подгонкой, бракованные.

6. Расчет траектории подгонки. На данном этапе производится расчет глубины врезки лазерного луча в тело пленочного резистора на основе измеренного отклонения сопротивления.

7. Управление исполнительными механизмами установки лазерной подгонки. При обработке подложек осуществляется программное управление приводами координатного стола или зеркалами, измерителем, лазером, коммутатором зондов. Координатный стол выполняет операции: подъем, спуск, позиционирование в нужную точку. Управление координатным столом разбивается на два этапа:

- расчет и построение траектории движения в декартовой или присоединенной системах координат;
- управление движением вдоль выбранной траектории.

Построение траектории движения состоит в формировании последовательности промежуточных точек в пространстве присоединенных координат, обеспечивающих движение координатного стола в декартовом пространстве вдоль траектории.

8. Хранение и отображение результатов. Результаты лазерной подгонки записываются в файлы на диске и отображаются на экране (рис. 3).

| Статистика Stat51.dat |          |          |          |          |          |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| #                     | Rном     | Rпре     | SigmaП,% | Rрез     | SigmaP,% |
| 1                     | 8,2340 К | 5,8251 К | 0,28     | 8,2396 К | 0,01     |
| 2                     | 8,2340 К | 5,6655 К | 0,20     | 8,2371 К | 0,00     |
| 3                     | 8,2340 К | 5,5132 К | 0,23     | 8,2765 К | 0,24     |
| 4                     | 8,2340 К | 5,4097 К | 0,15     | 8,2365 К | 0,00     |
| 5                     | 8,2340 К | 5,3340 К | 0,21     | 8,2373 К | 0,00     |
| 6                     | 8,2340 К | 5,2453 К | 0,13     | 8,2724 К | 0,22     |
| 7                     | 8,2340 К | 5,2069 К | 0,16     | 8,2370 К | 0,00     |

Рис. 3. Результат лазерной подгонки

*Rном* – номинальное сопротивление

*Rпре* - сопротивление до подгонки

*Rрез* – сопротивление после подгонки

*SigmaП%* - отклонение сопротивления до подгонки

*SigmaP%* - отклонение сопротивления после подгонки

Анализ карты автоматизированной лазерной подгонки показывает, что настройка управляющей программы на 1,2,4 этапах процесса осуществляется на основе личного опыта персонала. Главной проблемой настройки управляющей программы подгонки является субъективный выбор формы лазерного реза и исходных координат точки начала обработки. Такой способ подготовки управляющих программ нельзя квалифицировать как оптимальный, поскольку он обладает рядом недостатков:

- применение форм лазерной обработки не обосновывается;
- координаты начала обработки указываются интуитивно;
- многокритериальность подгонки учитывается недостаточно.

Указанные недостатки ограничивают возможности настройки управляющей программы подгонки на обработку пленочных резисторов и плат гибридных ИС. Для уменьшения их влияния на качество лазерной подгонки предлагается использовать математическое моделирование.

### Моделирование лазерной подгонки

Разработка моделей, позволяющих проводить анализ подгонки и настройку управляющей программы, предусматривает интеграцию моделей разных уровней (рис.

4), к которым относятся модели операций нанесения пленок, описания функционирования компонентов, изменения конфигурации пленочного резистора (модели подгонки), оценки качества и проверки адекватности.

Такая детализация позволяет комплексировать модель лазерной подгонки пленочных резисторов на основе принципов:

а) многомодельности - компоненты исследуются с применением моделей конфигураций пленочных резисторов, лазерных резов и др.;

б) системности – представление модели предполагает разработку и применение инструментальных средств моделирования;

в) функциональности – изготовление пленочных резисторов описывается адекватными математическими моделями;

г) многостороннего и многофакторного оценивания результатов моделирования на основе параметров-ограничений (время выполнения, точность, занимаемая площадь, устойчивость к перегрузкам, чувствительность подгоночной характеристики) с ранжированием вариантов проекта подгонки в зависимости от альтернатив;

д) метамоделирования, позволяющего обобщать данные об объектах моделирования.

Модели нанесения пленок включают модели физико-химических процессов, протекающих в аппаратно-процессных единицах при нанесении пленок. Примерами могут служить уравнения теплопроводности, диффузии, электродинамики, газовой динамики.

К операциям получения тонкопленочных гибридных ИС относятся: термическое испарение из жидкой фазы, термическое «взрывное» испарение, ионное распыление, магнетронное распыление. Например, операция термовакуумного напыления тонкопленочных резисторов описывается уравнениями математической физики испарения, массопереноса и конденсации паров вещества [2]. Для описания операции магнетронного распыления применяется модель Берга [3].

*Компонентные модели.* Данный класс моделей реализуется выделением конечного числа схемных компонентов платы гибридной ИС и описанием их функционирования с помощью компонентных уравнений [4].

Порядок системы уравнений зависит от числа выделенных компонентов платы гибридной ИС.

*Аналитические и имитационные модели.* При применении аналитических моделей моделирование подгонки выполняется с использованием численных методов. Применение ЭВМ в этом случае моделирования ограничивается только автоматизацией вычислений. При имитационном моделировании процесс лазерной подгонки воспроизводится по времени. Время рассчитывается на основе величины и скорости перемещения координатного стола или лазерного луча.

*Модели лазерных резков.* Моделирование пассивной подгонки реализуется применением аналитических и численных моделей расчета сопротивления каждого отдельного пленочного резистора при имитации изменения его конфигурации лазерным лучом. Многообразие имитируемых лазерных резков и значений геометрических координат начала обработки позволяет генерировать множество проектов пассивной подгонки (альтернатив) и выбирать из них наиболее предпочтительный вариант. Моделирование функциональной подгонки гибридных ИС реализуется решением системы компонентных уравнений при имитации изменения сопротивления пленочных резисторов.

Объединение компонентных уравнений платы гибридной ИС в систему осуществляется на основе дифференциальных уравнений Лапласа или алгебраических уравнений для законов Кирхгофа.

Решение системы компонентных уравнений гибридной ИС для каждого момента времени и известных начальных условиях позволит оценить значения сопротивления резисторов и всей гибридной ИС при пассивной или функциональной подгонке.

Связь моделей расчета сопротивления при подгонке с объектами топологии всех уровней и методами оптимизации осуществляется на основе

метода чувствительности траектории изменения сопротивления, являющегося интегрирующим элементом алгоритма моделирования лазерной подгонки [5].

*Модель качества.* Модель качества предусматривает оценку качества пленочных резисторов, плат гибридных ИС и технологии при моделировании с использованием фазовых переменных одного типа. Для оценки качества разработаны логико-математические модели.

Стратегия выбора наилучшего способа подгонки реализуется с помощью сценарного подхода и моделей сортировки сгенерированных вариантов по таким показателям как точность, время выполнения и др.

### **Заключение**

Представленные модели и алгоритмы легли в основу созданного нового метода лазерной подгонки с прогнозированием траектории приближения сопротивления пленочных резисторов к номинальному значению при настройке управляющей программы.

### **Библиографический список**

1. Машина лазерная МЛ-1 для подгонки резисторов и SMD – компонентов. НПЦ Лазеры и аппаратура ТМ. URL: [www.laserapr.ru](http://www.laserapr.ru).
2. Анищенко, Л. М. Автоматизированное проектирование и моделирование технологических процессов микроэлектроники [Текст] / Л. М. Анищенко, С. Ю. Лавренюк, В. В. Петрухин. □ М.: Радио и связь, 1995. □ 176 с.
3. Берлин, Е.В. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок [Текст] / Е. В. Берлин, С.А. Двинин, Л.А. Сейдман Л.А. – М.: Техносфера, 2007. - 176с.
4. Антонов, Ю. Н. Моделирование процесса лазерной подгонки резисторов гибридных интегральных схем [Текст] / Ю. Н. Антонов // Компьютерное моделирование 2004: труды 5-й Международной научно-технической конференции (Санкт-Петербург 29 июня □ 3 июля). □ СПб.: Изд-во «Нестор», 2004. □ Ч. 2. □ С. 106□109.
5. Antonov, Y. Features of application of the laser method for normalization of accuracy of resistors in hybrid integrated circuits [Text] / Y.

Antonov // Advances in Abrasive Technology Switzerland: Trans Tech Publications, 2005. □ p. VIII. ISAAT2005: international symposium (St. 643□646. PetersBurg 21 □ 24 June 2005). □ Zuerich.

## **MODELING OF LASER TRIMMING OF FILM RESISTORS**

© 2012 Ju. N. Antonov

Ulyanovsk State Technical University

In the article the modeling application for forecasting of a trajectory of change of resistance of film resistors at trimming is considered. The scheme of modeling is developed and the models are defined, that allow to carry out a forecasting estimation of possibility to achieve the nominal value of resistance at the setting of the managing program. The method can be used in the systems of the automated design of hybrid integrated circuits and in the automated installations of laser trimming of film resistors.

*Laser trimming, film resistor, forecasting estimation.*

### **Информация об авторе**

**Антонов Юрий Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, Ульяновский государственный технический университет. E-mail: [antonov@ulstu.ru](mailto:antonov@ulstu.ru), [antonov48@mail.ru](mailto:antonov48@mail.ru). Область научных интересов: микроэлектроника, программирование.

**Antonov Jury Nikolaevich**, Candidate Technical Science, senior lecturer, Ulyanovsk State Technical University. E-mail: [antonov@ulstu.ru](mailto:antonov@ulstu.ru), [antonov48@mail.ru](mailto:antonov48@mail.ru). Area of research: computer science, microelectronics, programming, of laser Trimming.