

Исследование и моделирование термopочности пластиковых бесконтактных идентификационных карт

А.Ф.Вишницкий

ФГУП «НТЦ Атлас» (г. Москва)

А.М.Грушевский, Н.М.Ларионов, А.И.Поголов

**Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)**

А.Ю.Резник

ОАО «Завод «Компонент» (г. Москва)

Представлены принципы и методы моделирования термopочности идентификационных карт. Разработаны конечно-элементные модели, представлены результаты моделирования, исследовано влияние конструктивно-технологических факторов на напряженно-деформированное состояние. Установлены наиболее значимые факторы термopочности идентификационных карт.

В настоящее время широко используются бесконтактные радиочастотные идентификационные пластиковые карты (ИК). Они применяются как пропуска в системах контроля доступа, как социальные и транспортные карты. В новых заграничных паспортах ИК используется как электронный бесконтактный вкладыш, состоящий из радиочастотного узла (антенна на подложке, соединенная с микросхемой), помещенного в пластиковый материал – поликарбонат. Надежность электронного вкладыша определяется жесткостью и прочностью его компонент и всей конструкции в целом.

Опыт работы по изготовлению радиочастотных пластиковых карт показал, что устойчивость карты к внешним механическим и температурным воздействиям в значительной степени зависит не только от прочности сварного контакта антенны и микросхемы, но также от ряда ее конструктивных особенностей: наличия компенсационной петли на концах проволочной антенны, глубины «залегания» в толще пластикового материала карты электронных компонент (микросхемы и антенны), места расположения сварных соединений (выше или ниже плоскости выводов микросхемы).

Выбор размеров элементов конструкции идентификационной карты должен основываться на теоретических разработках и расчетах величины механических напряжений, возникающих в конструкции карты в процессе эксплуатации.

В работе представлены теоретические модели конструкции ИК и расчет термомеханических напряжений, возникающих в ИК при ее нагреве, выполненный методом конечных элементов (МКЭ).

Расчетная схема узла ИК представлена на рис.1. Выбрана модель бескорпусного кремниевого кристалла (более уязвимо к механическим воздействиям по сравнению с кристаллом, который защищен корпусом) и рассчитаны для нее прочностные параметры. Карта представляет собой соединение кремниевой микросхемы, имеющей два вывода, с медными выводами витков антенны, которые закреплены и герметизированы внутри карты при помощи термопластичных полимерных материалов – термопластов.

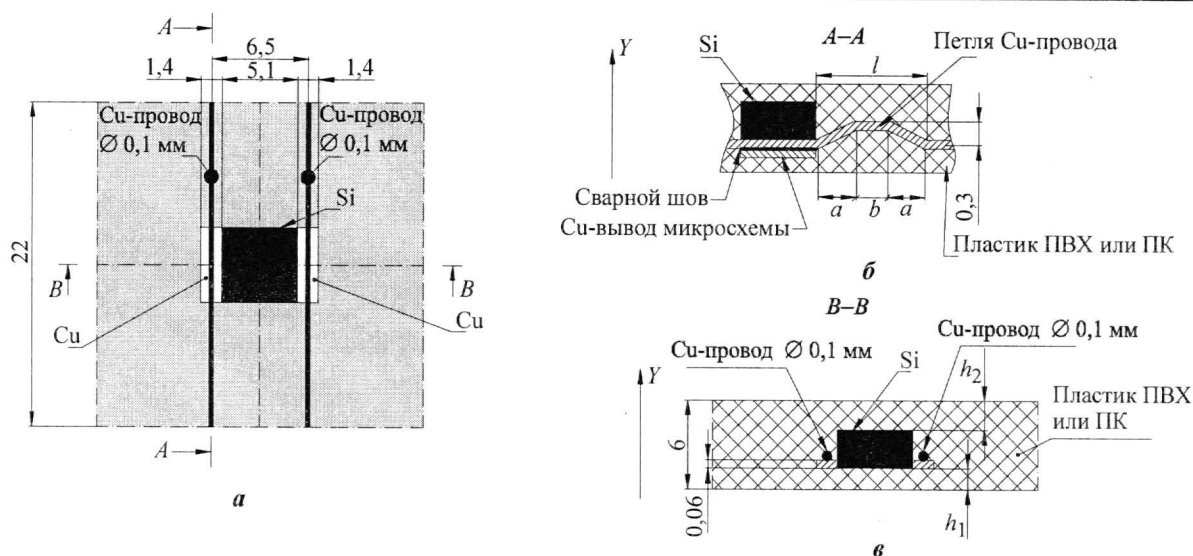


Рис.1. Расчетная схема узла ИК: а – вид сверху; б – сечение А-А; в – сечение В-В

В качестве герметика использовали поливинилхлорид (ПВХ) и поликарбонат (ПК). Размеры кристалла кремния 5,1×5,1×0,33 мм, диаметр медного провода 0,1 мм, толщина медных выводов 0,06 мм, размеры расчетного узла сборки ИК 22×22×0,84 мм.

Электронный вкладыш к паспорту – это изделие, которое постоянно и в течение длительного времени подвергается температурному воздействию в диапазоне температур от +20 до +50 °С. При этом существенно важной характеристикой является термопрочность изделия, т.е. способность материалов и элементов конструкции противостоять разрушению и образованию необратимых пластических деформаций при термическом воздействии.

Исследовано влияние на термопрочность идентификационных карт в указанном температурном диапазоне (от +20 до +50 °С) следующих конструктивно-технологических факторов: марки используемого термопласта (ПВХ или ПК); различного расположения подложки с микросхемой и антенной (транспондера) между слоями пластиковой карты (на рис.1 толщины слоев термопласта вокруг плоскости транспондера обозначены снизу h_1 и сверху h_2); наличия компенсирующей петли разной длины из медного провода антенны; расположения места приварки медного провода сверху или снизу плоскости медной пластины (вывода микросхемы).

Моделировалась область конструкции, окруженная пластиковым материалом. Исследуемый узел разбивался на элементарные трехмерные зоны (рис.2), что позволило построить и рассчитать теоретическую модель прочности узла антенна – микросхема в зависимости от физико-механических свойств материалов и его конструкции. Моделирование и термопрочностной анализ ИК проводили с помощью программного комплекса на основе метода конечных элементов [1, 2].

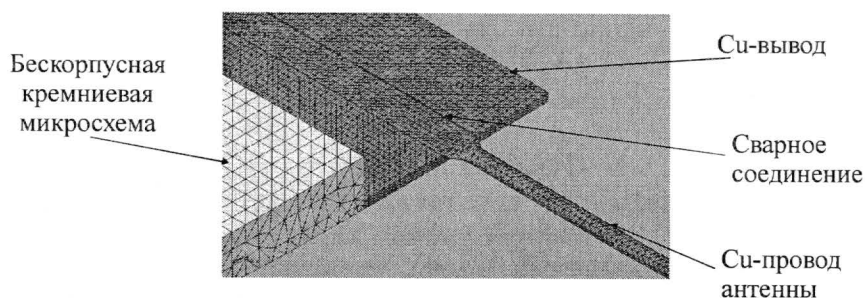


Рис.2. Конечно-элементная модель узла ИК

Физико-механические свойства материалов ИК представлены в табл.1, где α – температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР); E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; ρ – плотность материала; $[\sigma]$ – допускаемые для материала напряжения.

Таблица 1

Физико-механические свойства материалов ИК

| Материал | $\alpha \cdot 10^6, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ | $E, \text{ МПа}$ | μ | $\rho, \text{ мг/мм}^3$ | $[\sigma], \text{ МПа}$ |
|----------|---|------------------|-------|-------------------------|-------------------------|
| Кремний | 3,0 | $1,3 \cdot 10^5$ | 0,3 | 2,3 | 200 |
| Медь | 17 | 10^5 | 0,33 | 8,9 | 220 |
| ПВХ | 80 | 2800 | 0,35 | 1,3 | 120 |
| ПК | 60 | 2600 | 0,38 | 1,2 | 90 |

При разработке конечно-элементных моделей использовали следующие подходы и допущения: деформации в материалах линейно-упругие, граничные условия не изменяются в процессе нагружения; используется неравномерная сетка конечных элементов (КЭ) для областей, в которых возможны высокие градиенты напряжений; на основе компонентов напряженно-деформированного состояния (НДС) материалов идентификационной карты и с использованием гипотезы энергии изменения формы определяются эквивалентные напряжения σ , в каждом КЭ [3]; используются обоснованные и общепризнанные критерии прочностной надежности материалов и соединений; учитываются все значимые конструктивно-технологические особенности исследуемого объекта; выявляются факторы, оказывающие наибольшее влияние на прочность и жесткость элементов ИК, устанавливаются закономерности влияния, осуществляется оптимизация конструкции по критерию прочности [4].

Анализ прочностной надежности узла идентификационной карты, состоящего из разнородных материалов, при температурных воздействиях проводили в два этапа. На первом этапе определяли эквивалентные напряжения в конечных элементах модели. На втором этапе из множества полученных значений σ определяли величину максимальных напряжений σ_{\max} в материалах изделия и сопоставляли их с допускаемыми напряжениями.

Максимальное напряжение, возникающее в том или ином материале конструкции, определялось при анализе всех значений σ в элементах объемной сетки (в данном случае выделенный объем представляет собой параллелепипед с размерами $22 \times 22 \times 0,8$ мм) исследуемой конструкции. В табл.2 представлены максимальные значения напряжений для каждой модели.

Для проведения количественной оценки значений σ для различных моделей конструкции использовали расчетные данные, полученные в плоскостях А–А и В–В идентификационной карты (см. рис.1).

Разработано восемь конечно-элементных моделей. В базовой модели 1 использован термопластик марки ПВХ толщиной $h_1 = h_2 = 0,25$ мм; медный провод расположен сверху медной пластины. В последующих моделях по сравнению с базовой моделью 1 изменен только один варьируемый фактор: в модели 2 использован термопласт марки ПК; в модели 3 толщины слоев $h_1 = 0,05$ мм, $h_2 = 0,45$ мм; в модели 4 $h_1 = 0,1$ мм, $h_2 = 0,4$ мм; в модели 5 медный провод расположен снизу медной пластины; в модели 6 медный провод имеет размеры петли $l = 3$ мм, $a = 1$ мм, $b = 1$ мм; в модели 7 – $l = 5$ мм, $a = 1$ мм, $b = 3$ мм; в модели 8 – $l = 7$ мм, $a = 1$ мм, $b = 5$ мм.

Для каждой модели проведен расчет напряжений, возникающих в элементах исследуемого сборочного узла ИК. Результаты расчета наглядно представлены на рис.3–5 в зависимости от величины напряжений. Видно, что максимальные напряжения возникают в местах изменения сплошности или формы материалов. Результаты, полученные

при расчете напряжений σ в сечениях $A-A$ и $B-B$ (см. рис.1), сведены в табл.2. Значения коэффициента концентрации напряжений в медной проволоке обозначены k_M . Расчетные значения эквивалентных напряжений в материалах узла идентификационных карт при нагреве на 30°C также представлены в табл.2, где σ_K – напряжения в кремниевой бескорпусной микросхеме, σ_T – напряжения в термопласте, σ_M – напряжения в медной проволоке.

Таблица 2

Напряжения в материалах идентификационных карт, в МПа

| Модель | σ_K | σ_K^{\max} | σ_T | σ_T^{\max} | σ_M | σ_M^{\max} | k_M |
|--------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|-------|
| 1 | 31 | 100 | 13 | 92 | 214 | 563 | 2,63 |
| 2 | 22 | 90 | 9 | 67 | 147 | 326 | 2,22 |
| 3 | 65 | 155 | 27 | 121 | 207 | 573 | 2,77 |
| 4 | 59 | 145 | 19 | 96 | 210 | 588 | 2,8 |
| 5 | 31 | 135 | 14 | 98 | 213 | 726 | 3,41 |
| 6 | 31 | 116 | 14 | 67 | 192 | 595 | 3,1 |
| 7 | 31 | 116 | 14 | 64 | 195 | 685 | 3,51 |
| 8 | 31 | 116 | 14 | 92 | 196 | 594 | 3,03 |

В местах изменения формы или сплошности материала происходит местное повышение величины напряжений. Это явление называют концентрацией напряжений и оценивают при помощи коэффициента концентрации напряжений $k = \sigma_{\max}/\sigma$, где σ_{\max} – максимальные, а σ – номинальные напряжения.

На рис.3 показано изменение формы медной проволоки и величины напряжений σ при нагреве сборочного узла ИК на 30°C .

Для базовой модели (см. рис.4) наглядно изображена деформация элементов конструкции узла, состоящего из кремниевой микросхемы, контактной площадки и медного провода при их нагреве на 30°C . Изгиб конструкции и величина напряжений увеличиваются

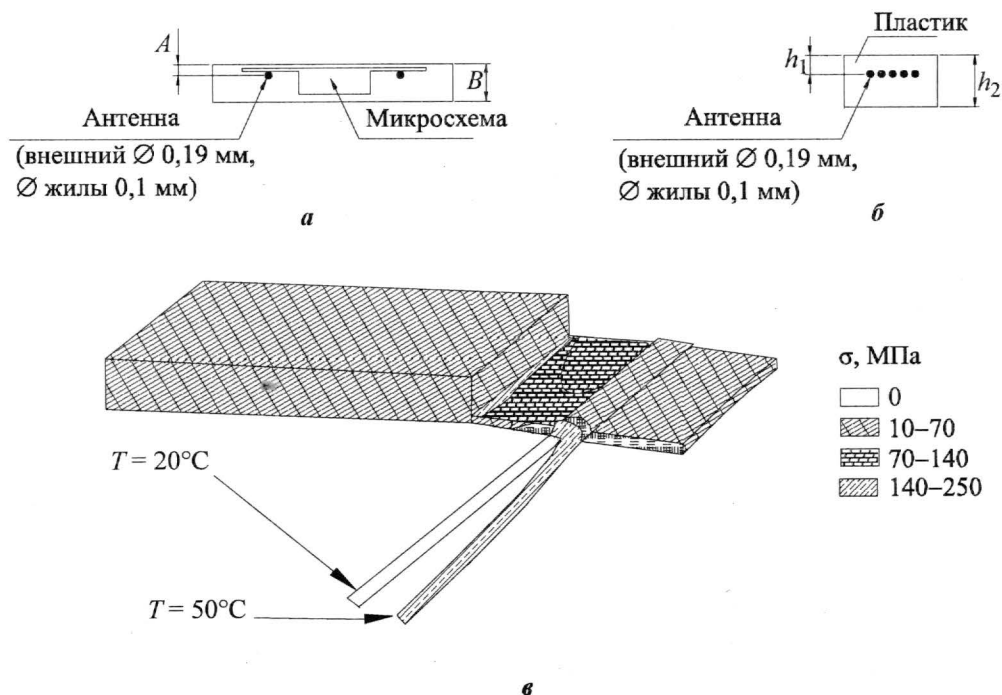


Рис.3. Конечно-элементная модель 1 (базовая): а – сварка проволоки антенны с микросхемой по верху контактного вывода; б – материал ПВХ; $h_1 = h_2 = 0,25$ мм; в – распределение термомеханических напряжений в сборочном узле ИК

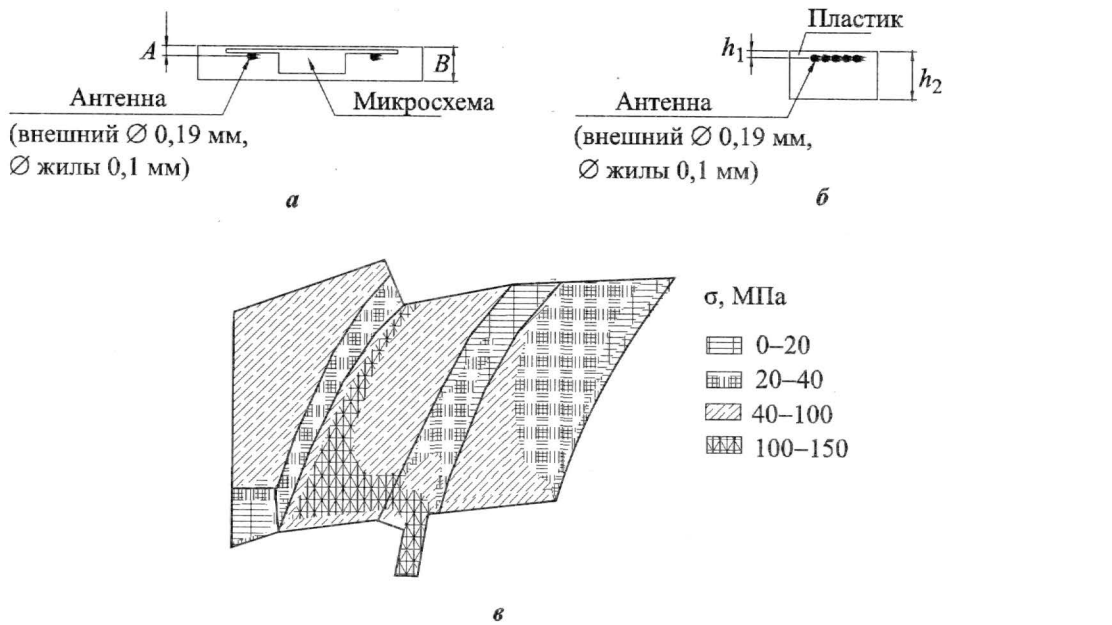


Рис. 4. Конечно-элементная модель 4: а – сварка проволоки антенны с микросхемой по верху контактного вывода; б – материал ПВХ; $h_1 = 0,1$ мм $h_2 = 0,4$ мм; в – распределение термомеханических напряжений в сборочном узле ИК

при несимметричном расположении слоев термопласта сверху и снизу кристалла кремниевой микросхемы (плоскостей расположения антенны с «посаженным» на нее кристаллом). Из табл.2 видно, что в модели 3 напряжения в кремнии повысились в 1,55, а в термопасте – в 1,32 раза по сравнению с базовой моделью 1.

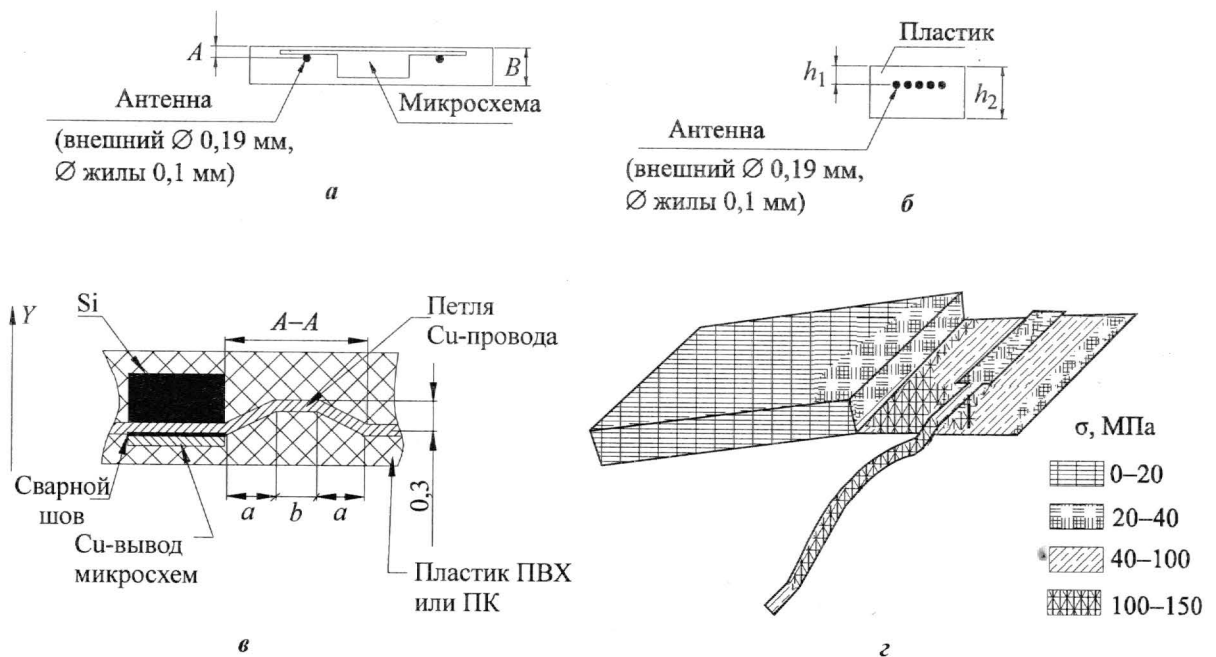


Рис. 5. Конечно-элементная модель 6: а – сварка проволоки антенны с микросхемой по верху контактного вывода; б – материал ПВХ; $h_1 = h_2 = 0,25$ мм; в – компенсационная петля $l = 3$ мм, $a = 1$ мм, $b = 1$ мм; г – распределение термомеханических напряжений в сборочном узле ИК

При исследованиях влияния компенсационной петли на распределение напряжений в конструкции установлено, что в петле возникают напряжения значительно большей величины, чем напряжения в сварном шве (см. рис.5). Этим достигается «разгрузка» сварного соединения. Из анализа напряжения σ_m для различных моделей в сечении А–А (см. рис.1) и из табл.2 следует, что самый низкий коэффициент концентрации напряжений в медной проволоке $k_m = 2,22$ в модели 2 при использовании термопласта ПК. Самый высокий $k_m = 3,51$ в модели 7, в месте, где медная проволока меняет форму перед соединением с пластиной и где сформирована компенсационная петля длиной 5 мм.

Физическая совместимость термопласта ПК (модель 2) с кремнием и медью выше, чем у термопласта ПВХ. Формирование узла в материале ПК приводит к самым низким значениям σ и σ_{max} для всех типов применяемых здесь материалов. Использование термопласта ПК позволяет снизить напряжения в кремнии в 1,1 раза, в термопласте в 1,37 раза, в медной проволоке в 1,46 раза при прочих равных параметрах узла (см. модель 1 и 2 в табл.2).

Расположение медного провода снизу медной пластины обусловило повышение максимальных напряжений в кремнии в 1,35 раза, в медной проволоке концентрация напряжений возросла с 2,63 до 3,41 (сравниваются данные моделей 1 и 5).

Использование петли в медной проволоке как компенсатора напряжений в термопласте наиболее эффективно при ее длине не более 5 мм. При $l = 5$ мм напряжения в пластике уменьшаются с 92 МПа (67 МПа в ПК) до 64 МПа (в 1,44 раза). Использование петли с длиной более 7 мм положительного эффекта не дает (сравниваются данные моделей 1 и 7).

Проведенные исследования позволили разработать трехмерные КЭМ для различных вариантов конструкций, установить закономерности влияния конструктивно-технологических факторов на прочность материалов и соединений ИК, а также сделать следующие выводы.

Материалы конструкции ИК должны быть совместимы по модулю упругости, ТКЛР, коэффициенту Пуассона. Использование термопласта ПК вместо ПВХ позволяет снизить напряжения в кремнии в 1,1 раза, в термопласте в 1,37 раза, в медной проволоке в 1,46 раза.

Соединение разнородных материалов кремния и меди, а также меди и термопластов, существенно различающихся величинами температурного коэффициента линейного расширения и модуля упругости, при тепловых воздействиях приводит к возникновению высоких термомеханических напряжений в месте контакта. Для снижения напряжений и деформаций изгиба в материалах идентификационной карты целесообразно использовать симметричное расположение кристалла микросхемы и антенны между слоями термопласта.

Расположение сварного шва, медной проволоки и медной пластины (вывода микросхемы) ниже плоскости антенны и кремниевого кристалла приводит к повышению деформаций и напряжений изгиба всей конструкции. Максимальные напряжения в кристалле возрастают в 1,35 раза. Использование компенсационной петли из медной проволоки как компенсатора напряжений в сварном соединении эффективно при длине петли $l = 3-5$ мм.

Литература

1. *Норенков И.П., Кузьмик П.К.* Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. – 320 с.
2. *Аляшковский А.А.* Solid Works / COSMOS Works. Инженерный анализ методом конечных элементов. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
3. *Феодосьев В.И.* Сопротивление материалов: Учеб. для вузов. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. – 592 с.
4. *Кузнецов О.А., Погалов А.И., Сергеев В.С.* Прочность элементов микроэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1990. – 144 с.

Статья поступила 11 июня 2008 г.

Вишницкий Александр Федорович – начальник производства электронных идентификационных документов нового поколения ФГУП «НТЦ Атлас» (г. Москва). *Область научных интересов:* изделия и технологии радиочастотной идентификации, технологии изготовления идентификационных документов нового поколения, теоретические обоснования некоторых аспектов этой технологии.

Грушевский Александр Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры микрорелектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* сборочно-монтажные процессы в микрорелектронике, проектирование и технологии высокоинтегрированных РЭС, автоматизация и разработка узлов и блоков вычислительных средств.

Ларионов Николай Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной экологии МИЭТ. *Область научных интересов:* анализ напряженно-деформированных состояний на границах подложка–толстая плёнка в узлах изделий РЭС и МЭА.

Поголов Анатолий Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической механики МИЭТ. *Область научных интересов:* механика материалов и конструкций РЭС, моделирование, прочность и динамический анализ микроприборов.

Резник Анатолий Юрьевич – начальник отдела радиочастотной идентификации ОАО «Завод «Компонент» (г. Москва), главный конструктор направления RFID «НИИ Компонент». *Область научных интересов:* конструирование RFID-считывателей, радиочастотных меток и карт.



Издательско-полиграфический комплекс
Московского государственного института электронной техники
информирует



Вышло в свет учебное пособие

И.В. Матюшкин

Маршруты проектирования интегральных микросхем: системный уровень /

Под ред. А.И. Сухопарова



ISBN 978-5-7256-0508-2
Формат 60 x 84 1/16,
объем 176 с.: ил.

Представлена формальная точка зрения на маршруты проектирования интегральных микросхем, рассмотрены некоторые прикладные аспекты метаматематики и математической логики, необходимые при проектировании на системном уровне. На примере микрооптоэлектромеханических систем с пьезоэлементами представлены современные концептуальные методы проектирования.

Для студентов старших курсов технических вузов, обучающихся по специальностям, связанным с проектированием, разработкой САПР и других интеллектуальных систем.

Выполнено в рамках инновационной образовательной программы МИЭТ «Современное профессиональное образование для российской инновационной системы в области электроники».