

К. ф.-м. н. В. М. ПОПОВ, А. С. КЛИМЕНКО,
А. П. ПОКАНЕВИЧ, В. Л. САМОТОВКА

УДК 621.382

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов
E-mail: microic@voliacable.com, popovmc@i.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
09.08.2011 г.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОЧЕК ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛА ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ

Метод основан на использовании визуального отображения в поляризационном микроскопе локально нагретых областей в пленке холестерического жидкого кристалла на поверхности кристалла интегральной схемы.

Распределение температуры на поверхности кристалла интегральной схемы (ИС) является следствием совокупного локального тепловыделения элементов схемы и определяется их мощностью, топологическими размерами и координатами расположения на поверхности. Среди локальных тепловыделяющих источников на поверхности кристалла ИС могут быть и такие, которые образуются при локальном возрастании тока потребления в области дефектов. Каждый локальный источник создает на поверхности кристалла свое температурное поле, и температура в любой точке поверхности является результатом наложения этих полей друг на друга. Это приводит к образованию рельефного температурного поля поверхности кристалла ИС, отражающего особенности действия и расположения источников тепловыделения.

Уровень температуры поверхности кристалла зависит от способности конструкции сборки (корпуса) ИС отводить от него тепло и определяется конфигурацией и размерами элементов конструкции и теплофизическими свойствами их материалов, а также поверхности корпуса, через которую происходит конвективный и радиационный теплообмен со средой. Заметное влияние на температурный рельеф поверхности кристалла ИС могут оказывать только значительные нарушения технологии сборки ИС, которые приводят к образованию несплошного, неоднородного или клиновидного слоя соединения кристалла с основанием сборки.

Определение максимальной температуры поверхности кристалла интегральной схемы является важной задачей, поскольку существует предельно допустимая температура, определяющая допустимость как потребляемой схемой мощности, так и ее применения в температурных условиях внешней среды.

Обоснование метода исследования

Для определения максимальной температуры поверхности кристалла ИС применяют только те методы, которые позволяют находить распределение температуры на ней. Наиболее часто для этих целей используются методы, основанные на зависимости инфракрасного излучения нагретой поверхности от ее температуры и на визуальной регистрации распределения температуры в термочувствительной пленке, покрывающей поверхность. Эти методы постоянно развиваются и совершенствуются, используя современные достижения оптической, видео-, компьютерной техники и программных средств.

Главным преимуществом методов, основанных на регистрации инфракрасного излучения нагретой поверхности и преобразовании этого излучения в видимое изображение [1], является отсутствие контакта с контролируемой поверхностью. Преимущество методов, основанных на использовании термочувствительных покрытий на исследуемой поверхности, состоит в экономичности и простоте их реализации [2—4]. Количественные значения основных параметров (температурное и геометрическое разрешение), получаемых с помощью методов приведенных направлений, сравнимы между собой.

Применительно к изделиям электронной техники методы на основе инфракрасной радиометрии и термочувствительных покрытий исследуемой поверхности разрабатывались и использовались в основном с целью обнаружения локальных областей с повышенной температурой («горячих точек»), в том числе образованных локальными тепловыделяющими дефектами.

В [5—7] проведен анализ используемых методов определения горячих точек в изделиях электронной техники. Показано, что из методов, основанных на использовании термочувствительных покрытий поверхности кристалла ИС, наиболее эффективно применяются те, в которых поверхность покрывается пленкой жидкого кристалла, получаемой из раствора.

В настоящей работе предлагается метод определения максимальных значений температуры и теплового сопротивления на поверхности кристалла ИС полученному с помощью поляризационного микроскопа визуальному отображению локально нагретых

областей поверхности в осажденной на нее пленке холестерического жидкого кристалла (ХЖК).

В основе работы лежат следующие положения.

- Используются такие типы ХЖК, которые могут существовать в смектическом состоянии в некотором температурном диапазоне.

- В пленке ХЖК на поверхности кристалла ИС, включенной в электрический режим потребления мощности, образуются локальные области в холестерическом или изотропном состоянии, которые можно наблюдать с помощью поляризационного микроскопа.

- Локальные светорассеивающие непрозрачные области пленки в холестерическом состоянии образуются на прозрачном фоне пленки ХЖК в смектическом состоянии, а локальные полупрозрачные области пленки в изотропном состоянии образуются на фоне пленки ХЖК в светорассеивающем холестерическом состоянии.

- Визуально наблюдаемые локальные области в пленке ХЖК отображают локально нагретые области поверхности кристалла ИС, температура которых превышает температуру соответствующего фазового перехода.

- Граница каждой из визуально наблюдаемых локальных областей является изотермой на поверхности кристалла ИС с температурой, равной температуре соответствующего фазового перехода для используемого типа ХЖК.

- Тепловое сопротивление между точкой поверхности кристалла и средой определяется по температуре изотермы, проходящей через эту точку.

- Максимальное тепловое сопротивление между поверхностью кристалла ИС и средой определяется по минимальной мощности, потребляемой кристаллом ИС, при которой на поверхности кристалла еще наблюдается локальная область минимальных размеров.

- Обратимость визуальных отображений фазовых состояний в пленке ХЖК позволяет наблюдать локальные области фазовых состояний при разных значениях мощности, потребляемой кристаллом ИС.

Из сказанного следует суть предлагаемого метода.

Каждый тип ХЖК имеет фиксированное значение температуры фазовых переходов T_{ϕ} из смектического состояния в холестерическое ($T_{\phi}=T_{сх}$) и из холестерического состояния в изотропное ($T_{\phi}=T_{хи}$). Если в пленке ХЖК на поверхности кристалла ИС возникают визуально наблюдаемые локальные области ХЖК в каком-либо фазовом состоянии, то температура поверхности кристалла в точках, лежащих на границе локальной области, равна температуре соответствующего фазового перехода, т. е. границы этих областей являются изотермами. Так как локальная область возникает при определенной мощности $P_{к}$, потребляемой кристаллом ИС, тепловое сопротивление этих точек будет определяться как

$$R=(T_{\phi}-T_{с})/P_{к},$$

где $T_{с}$ — фиксированная температура среды.

Изменяя $P_{к}$, можно увеличивать и уменьшать размеры локальных областей. Это значит, что расположе-

ние изотерм на поверхности кристалла ИС с температурой фазового перехода зависит от потребляемой кристаллом мощности и температуры среды. Следовательно, каждому i -му значению мощности $P_{кi}$ соответствует определенное расположение изотерм, и в каждой точке такой изотермы тепловое сопротивление одинаково и вычисляется по формуле

$$R_i=(T_{\phi}-T_{с})/P_{кi}.$$

Таким образом, зная тепловое сопротивление R_i точки поверхности, можно определить ее температуру T_i при любой мощности $P_{к}$, потребляемой кристаллом ИС: $T_i=P_{к}R_i+T_{с}$.

Максимальное тепловое сопротивление R_{max} точек поверхности кристалла ИС определяется по той минимальной мощности $P_{кmin}$, при которой в пленке ХЖК еще наблюдается единственная, минимальных размеров локальная область в соответствующем фазовом состоянии, т. е. $R_{max}=(T_{\phi}-T_{с})/P_{кmin}$. Максимальная температура на поверхности кристалла определяется как $T_{max}=P_{к}R_{max}+T_{с}$.

Объекты исследования и реализация эксперимента

Объектами исследования служили четыре экспериментальных образца интегральной схемы УБ5701 ГП01, собранные в металлокерамических корпусах с двадцатью четырьмя выводами.

Все полученные в пленках ХЖК отображения распределения температуры поверхностей кристаллов образцов ИС фиксировали поляризационным микроскопом с длиннофокусными объективами MicroZoom (фирма Vausch&Lomb, США) с установленной видеокамерой Sony DXC-101P, соединенной с компьютером.

Операции нагрева подложек с нанесенными пленками ХЖК при их градуировке, а также при сушке образцов ИС после их отмывки, осуществляли на терморегулируемом столе Tempchuk System, Model TC100 (фирма Wentworth Labs, США) с точностью поддержания заданной температуры $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. В качестве источника питания образцов ИС и для определения вольт-амперных характеристик потребителей мощности на кристалле ИС использовали характериограф Tectronix 577D1 (фирма Tectronix, США).

Для подачи питания на ИС образец вставляли в контактное устройство, распаянное на монтажную плату. На контактные площадки монтажной платы, связанные с выводами корпуса ИС, предварительно напаивали нагрузочные элементы в соответствии с заданной электрической схемой.

В работе использовали шесть типов ХЖК с различными температурными интервалами существования смектической, холестерической и изотропной фаз, которые определяли в процессе их градуировки (процедура ее проведения описана ниже). В качестве растворителей ХЖК применяли толуол, петролейный эфир и трихлорэтилен.

Раствор ХЖК наносили на поверхность кристалла ИС, а после испарения растворителя на ней образовывалась пленка ХЖК. Для экспериментов выби-

рали такие ХЖК, которые при температуре среды до 40°C находятся в твердом состоянии.

Все исследования основывались на использовании результатов температурной градуировки пленок ХЖК, полученных из растворов на полированных поверхностях подложек из кремниевых пластин. Перед нанесением растворов ХЖК подложки прополаскивали в одном из растворителей в течение 2—3 мин и просушивали на терморегулируемом столе при температуре 75—80°C примерно 10 мин. Растворы с ХЖК наносили на поверхность подложки. В процессе градуировки пленок определяли наличие фазовых состояний ХЖК, температурные диапазоны их существования, температуру фазовых переходов, качество визуального отображения фазовых состояний с помощью поляризационного микроскопа.

По результатам градуировки производили выбор ХЖК и их растворов в разных растворителях для использования при исследовании образцов ИС. Определяющим условием выбора являлось наличие температурного диапазона существования пленки ХЖК в прозрачном смектическом состоянии, которое предшествует появлению светорассеивающего холестерического состояния.

Процесс градуировки пленки ХЖК на подложке включал в себя следующие операции. На стол поляризационного микроскопа устанавливали терморегулируемый стол, на который под объективом поляризационного микроскопа помещали подложку с пленкой ХЖК. Скрещивали поляризаторы микроскопа и включали нагрев стола. В процессе нагрева фиксировали те значения температуры, при которых наблюдался переход пленки ХЖК в прозрачное смектическое состояние, затем в светорассеивающее холестерическое ($T_{сх}$) и далее — в прозрачное изотропное состояние ($T_{хи}$). После нагрева до температуры изо-

тропного состояния ХЖК питание стола отключали и фиксировали температуру фазовых переходов ХЖК в процессе охлаждения стола. В результате нескольких циклов нагревания и охлаждения стола устанавливали средние значения температуры фазовых переходов в исследуемом типе ХЖК.

После проведения температурной градуировки пленок различных типов ХЖК, полученных из различных растворов на полированных поверхностях кремниевых подложек, были сделаны следующие выводы: наиболее четкие визуальные отображения фазовых состояний дают пленки, осажденные из растворов ХЖК в петролейном эфире на подложки, которые прополаскивали в толуоле; значения температуры фазовых переходов в пленках ХЖК не зависят от типа растворителя.

Значения температуры фазовых переходов в исследуемых пленках шести типов ХЖК, полученных на поверхности подложек из растворов в петролейном эфире, лежат в диапазоне 40—63°C для $T_{сх}$ и 59,5—88°C для $T_{хи}$.

Эксперимент и его результаты

Определение тепловых параметров образцов ИС согласно предложенному методу выполнялось в следующей последовательности.

Каждый образец ИС со вскрытым корпусом (снятой крышкой) прополаскивали в толуоле и просушивали на терморегулируемом столе. После просушивания на поверхность кристалла образца пипеткой наносили каплю раствора ХЖК в петролейном эфире. После испарения петролейного эфира (примерно через 5 мин) корпус ИС вставляли в контактное устройство, соединенное через монтажную плату с источником питания и измерительными приборам в соответствии с электрической схемой подключения ИС.

Монтажная плата размещалась на столе поляризационного микроскопа с установленной видеокамерой для наблюдения поверхности кристалла ИС при скрещенных лучах поляризаторов. Напряжение питания ИС медленно повышали и устанавливали такое, при котором было четко видно топологический рисунок на всей поверхности кристалла. Это означало образование на поверхности кристалла пленки ХЖК в прозрачном смектическом состоянии — исходном для получения визуальной информации о температурном поле на поверхности кристалла (по температуре фазового перехода ХЖК из смектического состояния в холестерическое и по расположению соответствующих изотерм).

Дальнейшее повышение напряжения питания ИС приводило к появлению в пленке локальных светорассеивающих (непрозрачных) областей (рис. 1, а, б), в которых ХЖК находится в холестерическом состоянии. Они образуются на тех участках поверхности кристалла ИС,

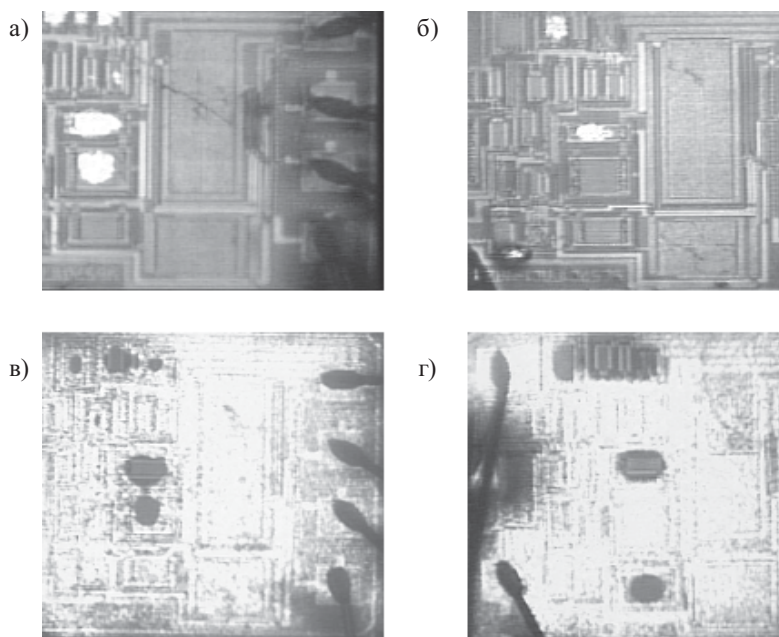


Рис. 1. Визуальные отображения локально нагретых областей поверхности кристалла образцов ИС в пленках различных типов ХЖК в холестерическом (а, б) и изотропном (в, г) фазовых состояниях

температура которых не ниже температуры фазового перехода ХЖК из смектического состояния в холестерическое $T_{сх}$. Внутри такой области температура выше $T_{сх}$, а на границе равна ей. Каждому значению мощности, потребляемой кристаллом ИС, при котором пленка переходила в прозрачное состояние, соответствовало установившееся через 10—12 мин после включения питания количество и расположение локальных областей и их размеры.

При повышении напряжения питания ИС размеры локальных областей в пленке ХЖК в холестерическом состоянии увеличивались, и при некотором значении напряжения пленка на всей поверхности кристалла переходила в холестерическое состояние. Оно служило исходным для второго этапа получения визуальной информации о температурном поле на поверхности кристалла ИС. Дальнейшее увеличение напряжения приводило к появлению локальных полупрозрачных областей ХЖК в изотропном состоянии на фоне пленки в светорассеивающем холестерическом состоянии (рис. 1, в, з). Установившаяся визуальная картина температурного поля поверхности кристалла ИС наступала также через 10—12 мин после включения ИС в режим потребления постоянной мощности.

Отметим, что время установления стационарной визуальной картины определяется теплоинерционными свойствами используемого металлокерамического корпуса. Поэтому для других типов корпусов оно может отличаться от приведенного.

Все точки поверхности кристалла, совпадающие с границами локальных областей на визуальной картине, нагреты до температуры фазового перехода ХЖК из одного фазового состояния (с внешней стороны границы области) в другое (внутри этой области).

При некоторых значениях мощности, потребляемой кристаллом ИС, в пленке образовывалось несколько локальных областей ХЖК в холестерическом состоянии (рис. 1, а, б) на фоне пленки в прозрачном смектическом состоянии или несколько локальных областей ХЖК в изотропном состоянии (рис. 1, в, з) на фоне пленки в светорассеивающем холестерическом состоянии.

По известным значениям температуры фазовых переходов, соответствующих границам локальных областей (изотермам), и мощности, потребляемой кристаллом P_k , были определены тепловые сопротивления R точек поверхности кристалла ИС, лежащих на границах локальных областей, относительно среды.

Постепенным уменьшением потребляемой мощности добивались того, что в пленке ХЖК оставалась всего одна локальная область минимальных размеров. Для расчета максимального теплового сопротивления R_{max} по приведенной выше формуле фиксировалась минимальная мощность P_{min} , при которой эта область еще наблюдалась.

Исследования экспериментальных образцов ИС показали, что локально нагретые области по-разному располагаются на поверхности кристаллов различных образцов ИС и проявляются в пленках ХЖК при разных потребляемых мощностях (рис. 1). При этом локальная область, которая при уменьшении мощности исчезала последней, во всех исследованных образцах располагалась в одном и том же месте (рис. 2, а, б, в). Только в одном из образцов одновременно с этой областью исчезала еще одна (рис. 2, з).

Расчет R_{max} на поверхности кристалла при использовании пленок всех типов показал наличие некоторого незначительного разброса значений для одного и того же образца (например, 71,2—73,4 К/Вт). Это связано с точностью определения потребляемой мощности и температуры фазовых переходов. Здесь также играет роль выдержка времени установления стационарного теплового состояния.

При фиксированных размерах и координатах источников тепла увеличение мощности, потребляемой кристаллом ИС, приводит к тому, что локальные области однородных фазовых состояний в пленке ХЖК над нагретыми участками поверхности кристалла увеличиваются и их границы удаляются от источников тепла. На расстояниях от центра источника тепла, превышающих наибольший размер источника, согласно принципу местного влияния [8], поверхность уже не испытывает возмущающего влияния источника тепла, и ее температура становится практически равной средней температуре поверхности кристалла ИС $T_{сп}$. Тепловое сопротивление точек поверхности с такой температурой является средним тепловым сопротивлением $R_{сп}$ между этой поверхностью и средой: $R_{сп} = (T_{сп} - T_c) / P_k$.

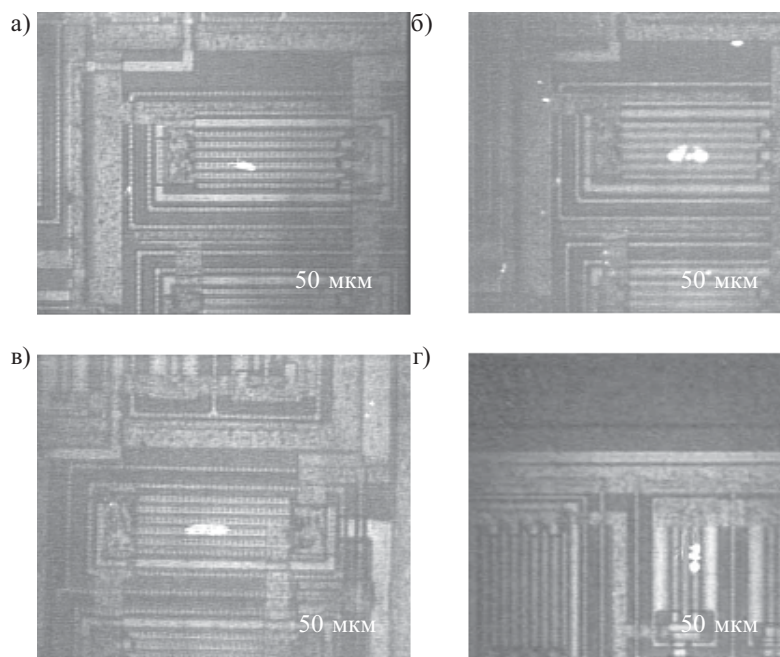


Рис. 2. Минимальные локальные области в холестерическом фазовом состоянии в пленках различных типов ХЖК на поверхностях кристаллов образцов ИС

Тепловое сопротивление $R_{\text{сп}}$ практически определяется по мощности P_{max} , потребляемой кристаллом ИС, при которой изотерма фазового перехода располагается вблизи периметра кристалла ИС, т. е. $R_{\text{сп}} = (T_{\text{ф}} - T_{\text{с}}) / P_{\text{max}}$. Оно представляет собой сумму составляющих его тепловых сопротивлений:

$$R_{\text{сп}} = R_{\text{вп}} + R_{\text{р}} + R_{\text{сс}} + R_{\text{к}},$$

где $R_{\text{вп}}$ — сопротивление теплообмену внешней поверхности корпуса со средой;

$R_{\text{р}}$ — сопротивление растеканию тепла по корпусу;

$R_{\text{сс}}$ — сопротивление соединительного слоя кристалла с корпусом;

$R_{\text{к}}$ — сопротивление кристалла ИС.

Величины $R_{\text{вп}}$, $R_{\text{р}}$ и $R_{\text{к}}$ неизменны для выбранных корпуса и кристалла ИС. Следовательно, разброс значений сопротивления $R_{\text{сп}}$ в основном определяется разбросом значений $R_{\text{сс}}$, которое в свою очередь зависит от коэффициента теплопроводности материала слоя, его толщины и сплошности.

Для исследованных экспериментальных образцов тепловые сопротивления $R_{\text{сп}}$ составили 60,3; 68,4; 71,2 и 107,2 К/Вт. Эти результаты свидетельствуют о различии тепловых сопротивлений соединительного слоя кристалла с корпусом в образцах.

Структуру максимального теплового сопротивления между участком поверхности кристалла ИС с температурой T_{max} и средой можно представить в виде:

$$R_{\text{max}} = R_{\text{р}} + R_{\text{сп}},$$

где $R_{\text{р}}$ — тепловое сопротивление растеканию тепла по кристаллу (определяющее температурный рельеф на поверхности кристалла), $R_{\text{р}} = (T_{\text{max}} - T_{\text{сп}}) / P_{\text{к}}$.

Рассчитанные для образцов значения $R_{\text{р}} = R_{\text{max}} - R_{\text{сп}}$ равные 12,1; 14,4; 14,1 и 16 К/Вт, свидетельствуют о том, что в исследованных образцах локальные источники тепла не создают перегревов, существенно отличающихся от среднеповерхностной температуры кристалла.

Выводы

Таким образом, предложенный метод определения температуры и теплового сопротивления точек поверхности кристалла ИС, основанный на визуальном отображении локально нагретых областей в пленке ХЖК с известной температурой фазовых переходов, позволяет в рабочих условиях выявлять точки с максимальным тепловым сопротивлением на поверхности кристаллов ИС.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Rokotoniaina J. P., Breitenstein O., Langenkamp M. Localization of weak heat sources in electronic devices using highly sensitive Lock-in IR thermography // Material Science and Engineering. — 2002. — Vol. B91—92. — P. 481—484.
2. Pat. 5767489 USA. Enhanced resolution liquid crystal micro-thermography method and apparatus/ Mark S. Ferrier. — June, 1998.
3. Lin H., Khan M., Giau T. Dynamic of liquid crystal hot spot examination of functional failures on production testers // Proc. of the 20th International Symposium for Testing and Failure Analysis. — Los Angeles, USA. — 1994. — P. 81.
4. Haugen O., Johansen T. H., Chen H. et al. High resolution thermal imaging of hot spots in superconducting films // Proceed. of Applied Superconductivity Conference. — USA, Seattle. — 2006. — P. 27.
5. Popov V. M., Klimenko A. S., Pokanevich A. P. et al. Liquid – Crystal Thermography of Hot Spots on Electronic Components // Russian Microelectronics. — 2007. — Vol. 36, N 6. — P. 392—401.
6. Пат. № 77499 України. Спосіб виявлення локальних джерел тепловиділення в зразках кристалів інтегральних схем та напівпровідникових приладів / В. М. Попов, А. С. Клименко, О. П. Поканевич, М. В. Мошель. — 15. 12. 2006. [Pat. № 77499 Ukraini. / V. M. Popov, A. S. Klimenko, O. P. Pokanevich, M. V. Moshel'. 15. 12. 2006]
7. Попов В. М., Клименко А. С., Поканевич А. П. Усовершенствованный метод выявления «горячих точек» в изделиях микроэлектроники // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — № 3. — С. 55—58. [Popov V. M., Klimenko A. S., Pokanevich A. P. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2008. N 3. P. 55]
8. Дульнев Г. Н., Семьяшкин Э. М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. — Л.: Энергия, 1968. [Dul'nev G. N., Semyashkin E. M. Teploobmen v radioelektronnykh apparatakh. L. Energiya, 1968]



Денисенко В. В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и нанoeлектронике. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 408 с.

В книге систематически изложены принципы построения компактных моделей МОП-транзисторов для схемотехнического моделирования электронных цепей, в том числе СБИС. Рассмотрены проблемы моделирования, физические процессы в микро- и нанометровых МОП-транзисторах, методы формирования уравнений компактных моделей, особенности моделей BSIM, EKV, PSP, HiSIM и др., табличные модели, полунатурные модели.

Для разработчиков интегральных схем и электронной аппаратуры, разработчиков САПР СБИС, научных работников и аспирантов. Может быть полезна студентам физических специальностей университетов.

