

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

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов НАНУ  
E-mail: porovmc@i.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
23.01 2008 г.

Оппонент д. т. н. В. М. СОРОКИН  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ «ГОРЯЧИХ ТОЧЕК» В ИЗДЕЛИЯХ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

*Разработан новый метод отображения «горячих точек» в изделиях микроэлектроники, основанный на визуализации локальной холестерической фазы в смектической фазе холестерического жидкого кристалла. Приведена технология реализации метода и примеры его использования.*

Информация о местах локальных утечек тока в кристаллах интегральных схем (ИС) и полупроводниковых приборах (ПП) существенно упрощает анализ причин отказов изделий. Знание координат локальных утечек тока позволяет эффективно использовать высокоточные аналитические методы для исследования физико-химической природы, структуры и пространственных размеров локальных дефектных областей (мест локальных утечек тока). Последующее детальное изучение дефектного места позволяет определить конструкторско-технологические, производственные или эксплуатационные причины возникновения дефекта.

Дефекты в виде локальных утечек тока наиболее распространены и являются причиной появления локальных источников тепловыделения в изделиях электронной техники. Эти источники, являясь аномальными, приводят к повышению температуры в зонах их действия и в современной научной литературе получили название «горячие точки». Наиболее эффективными методами выявления горячих точек являются тепловые методы, особенно те, в которых используются визуальные наблюдения.

В настоящее время известно много методов термографии горячих точек в изделиях электронной техники. Все они основаны на использовании либо инфракрасной (ИК) микроскопии с преобразованием ИК-излучения с исследуемой поверхности в видимое изображение на экране телемонитора, либо визуального отображения распределения температуры поверхности в покрывающей ее термочувствительной пленке. Применение современных методов ИК-термографии горячих точек в изделиях электронной техники основано на использовании дорогостоящих ИК-видеокамер высокого разрешения, компьютерной техники и программных средств [1].

Термография горячих точек на поверхностях кристаллов изделий микроэлектроники с применением

термочувствительных пленок развита и совершенствуется в основном за счет использования термооптических свойств жидких кристаллов (ЖК).

Ранее других типов жидких кристаллов для целей термографии горячих точек в изделиях микроэлектроники применялись холестерические жидкие кристаллы (ХЖК) [2, 3]. Использовалась зависимость отражения внешнего освещения пленки ХЖК в жидкокристаллической фазе (мезофазе) от температуры. Каждой температуре пленки в этой фазе соответствует определенная длина волны отраженного света в видимой области. Горячая точка в отраженном свете выглядит разноцветной. Одноцветные кольца отражают расположение изотерм в области горячей точки. Для наблюдения такого изображения горячей точки исследуемую поверхность образца необходимо предварительно зачернить, а само наблюдение проводить в микроскопе с боковым освещением. Увеличение таких микроскопов значительно уступает микроскопам с освещением поверхности через объектив, а зачернение исследуемой поверхности под пленкой ХЖК в жидкокристаллической фазе не позволяет наблюдать топологическую картину поверхности.

В дальнейшем развитие методов ЖК-термографии горячих точек в кристаллах изделий микроэлектроники основывалось на визуализации локальной изотропной фазы в области горячей точки и применении поляризационных микроскопов с освещением исследуемой поверхности через объектив. При этом использовались как ХЖК [4], так и нематические ЖК (НЖК) [5—7]. Общим недостатком существующих методов является то, что локальная изотропная фаза в области горячей точки определяется на фоне непрозрачной или недостаточно прозрачной жидкокристаллической фазы. Это не позволяет наблюдать горячую точку на фоне четкого изображения топологической картины поверхности кристалла изделия микроэлектроники, что, в свою очередь, приводит к неопределенной координатной привязке горячей точки к топологическому элементу или их группе.

Целью настоящей работы является разработка усовершенствованного метода ЖК-термографии горячих точек на поверхностях кристаллов в изделиях микроэлектроники, который обеспечивает четкое изображение горячей точки на прозрачном фоне ЖК-пленки, сквозь которую в поляризационном микроскопе с освещением через объектив наблюдается топологическая картина поверхности кристалла.

Известно [8, 9], что некоторые типы ХЖК и смесей ХЖК по мере возрастания температуры имеют следующие фазовые состояния: твердое, смектическое, холестерическое, изотропное. При этом смектическое и холестерическое состояния представляют собой ЖК- мезофазу. Каждое состояние существует в определенном температурном диапазоне. Например, смесь эфиров холестерина пропионата и нонаноата в зависимости от весового процента холестеринпропионата имеет различные температурные диапазоны существования фаз. Так, если в смеси содержится 20% холестеринпропионата, то наблюдаются следующие температурные диапазоны существования фаз: твердая фаза — при температуре меньше 41°C, смектическая — в диапазоне 41—58°C, холестерическая — в диапазоне 58—91°C, изотропная — при температуре больше 91°C. При содержании холестеринпропионата более 32% смесь не имеет смектической фазы. Если такую пленку, нанесенную на поверхность образца, нагреть до температуры существования смектической фазы и в этом состоянии ее однородно гомеотропно ориентировать по поверхности образца, то она будет прозрачной. Над локальной областью поверхности образца, нагретой до температуры большей, чем верхняя температура диапазона существования смектической фазы, но меньшей температуры фазового перехода в изотропное состояние, будет существовать локальная область пленки ХЖК в холестерическом состоянии. Если предположить, что пленка в этом состоянии пропускает свет хуже, чем в смектическом состоянии, то локальная область плен-

ки в холестерическом состоянии будет визуализироваться. При скрещенных поляризаторах в поляризационном микроскопе холестерическая фаза всегда наблюдается как светлозернистая. Следовательно, локальная холестерическая фаза в горячей точке будет выглядеть локальной светлой областью на фоне прозрачной смектической фазы, т. е. на фоне четкого изображения топологической картины поверхности кристалла образца.

На рис. 1 приведены изображения фазовых состояний пленки ХЖК на поверхности кристалла интегральной схемы. Используемый здесь ХЖК имеет следующие температурные диапазоны существования фазовых состояний: при температуре менее 25°C — твердое, от 25 до 51°C — смектическое, от 51 до 81°C — холестерическое, при температуре выше 81°C — изотропное. Величина шага спирали ХЖК составляет около 3000 Å, что сравнимо с длиной волны видимого света и значительно больше размеров молекул. Расстояние между квазинематическими слоями 5—6 Å. В температурном интервале существования смектической фазы ХЖК образуется смектическая фаза модификации А (в соответствии с прицепом Зикмунда–Демуса). В этой фазе длинные оси молекул перпендикулярны слою, а плоскость слоя параллельна поверхности исследуемого образца. Из рис. 1 видно, что изотропная и смектическая фазы одинаково хорошо прозрачны, холестерическая — светлозерниста и непрозрачна, твердая — непрозрачна и имеет конфокальную структуру.

Изображения на рис. 1 получены после предварительного (до нанесения пленки ЖК) осаждения на по-

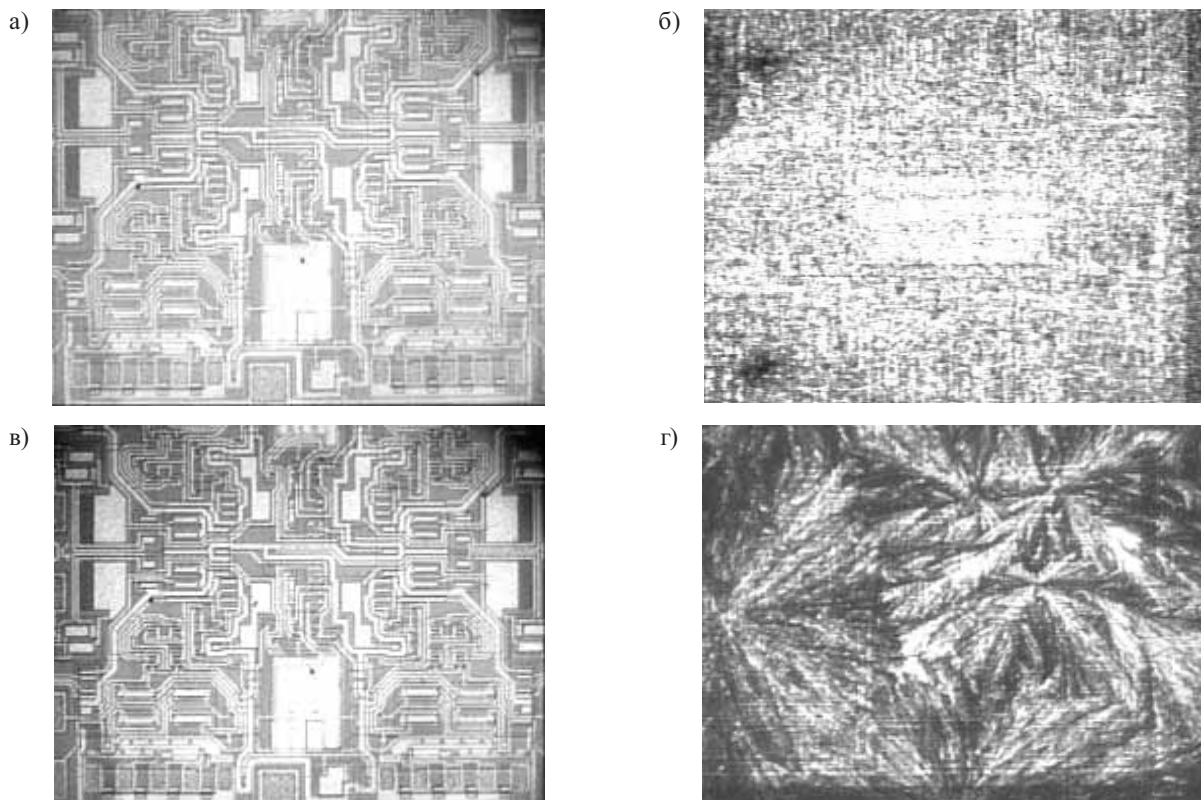


Рис. 1. Изображения пленки ХЖК на поверхности кристалла интегральной схемы в различных фазовых состояниях: а — изотропное; б — холестерическое; в — смектическое; г — твердое

верхность кристалла ИС прозрачной мультимолекулярной пленки поверхностно-активного вещества (лецитина), с помощью которой достигается однородная гомеотропная ориентация ХЖК в смектической фазе, что обеспечивает ее прозрачность.

Приведенные выше результаты определили направление исследований для разработки нового метода выявления горячих точек в изделиях микроэлектроники. На основе многочисленных экспериментов отработаны необходимые технологические процедуры и последовательность их выполнения для практической реализации этого метода, базирующегося на получении изображений локальной холестерической области в смектической фазе ХЖК.

Наиболее приемлемые результаты получены при выполнении описанных ниже операций с соблюдением их последовательности и режимов.

Для достижения однородно гомеотропно ориентированного ХЖК в смектической фазе на поверхности кристалла образца необходимо тщательно очистить поверхность. На чистую и просушенную поверхность кристалла осадить из 1%-ного спиртового раствора пленку лецитина. После естественного испарения спирта образец прополоскать в спирте до исчезновения заметных визуальных признаков присутствия лецитина на поверхности кристалла образца, при этом очень четко наблюдаются все топологические элементы поверхности. Образец высушивают при температуре 65—70°C в течение около 30 минут. Эта процедура позволяет закрепить на поверхности кристалла образца мультимолекулярную пленку лецитина. Затем на поверхность кристалла образца следует осадить пленку ХЖК (имеющего смектическую фазу)

из 10%-го раствора в петролейном эфире. После испарения эфира (2—3 мин) образец с пленкой ХЖК следует нагреть до температуры на 1—2°C больше температуры фазового перехода ХЖК в изотропное состояние. После этого образец необходимо выдерживать (5—6 мин) до полного исчезновения локальных включений (кластеров) холестерической фазы и образования равномерно прозрачной пленки ХЖК в изотропной фазе по всей поверхности кристалла образца. Охладить образец до температуры на 1—2°C меньше температуры перехода из смектической фазы в холестерическую. При этой температуре ХЖК на поверхности образца пребывает в смектической фазе. Так как поверхность образца была активирована прозрачной мультимолекулярной пленкой лецитина, то молекулы ХЖК в смектической фазе однородно ориентированы к поверхности. Это значит, что пленка ХЖК в смектической фазе является прозрачной, не отличающейся от прозрачности изотропной фазы ХЖК (рис. 1, а, в).

Исследования показали, что охлаждение образца от температуры изотропного состояния ХЖК на его поверхности до температуры смектической фазы ХЖК предпочтительнее нагрева, т. к. такое направление перехода в смектическую фазу обеспечивает полное отсутствие в ней локальных холестерических включений, и она в этом случае является достаточно однородно прозрачной на поверхности образца.

Локальная область повышенной температуры на исследуемой поверхности кристалла может иметь различную форму — близкую к точке, линии и др. Такую же форму имеет светлозернистое отображение горячей точки локальной холестерической фазой

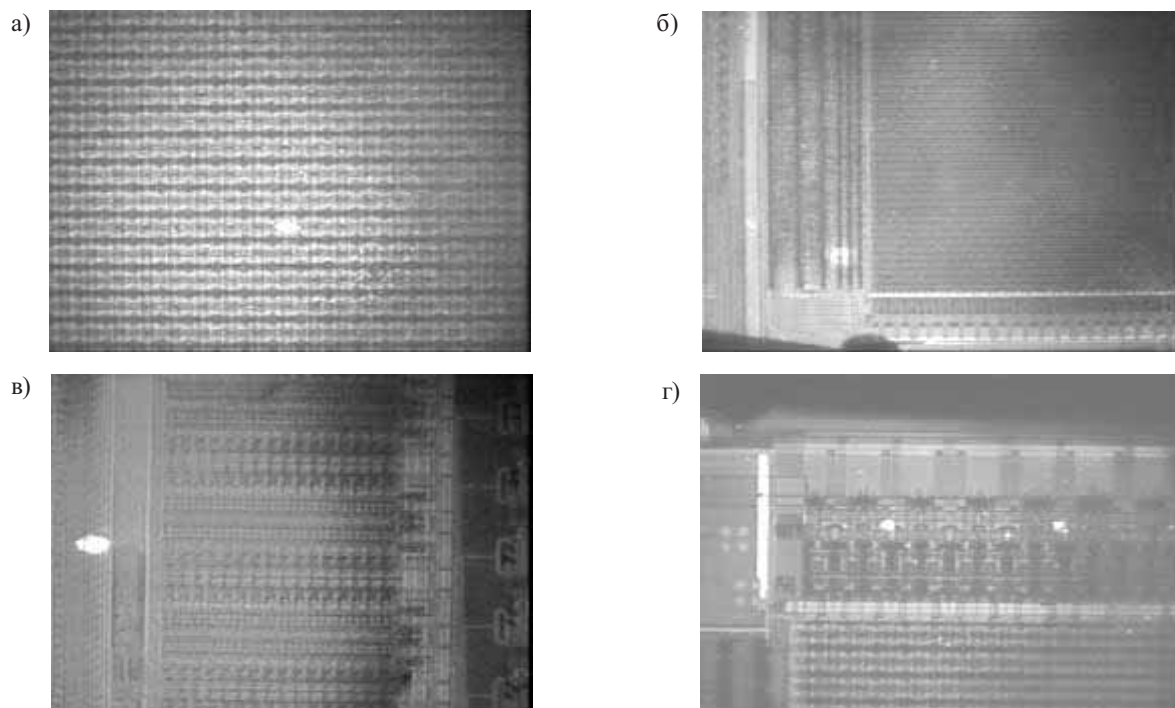


Рис. 2. Горячие точки, выявленные на различных функциональных участках кристаллов СБИС (увеличение  $\times 40$  (а, г),  $\times 25$  (б, в)):

а) матрица; б) периферийный участок схемы; в) формирователи импульсных напряжений; г) дешифраторы столбцов

в прозрачной смектической фазе, т. е. на фоне четкого изображения топологической картины поверхности исследуемого кристалла в поляризационном микроскопе при скрещенных поляризаторах (рис. 2).

Как и известные современные методы ЖК-термографии горячих точек в изделиях микроэлектроники, разработанный метод базируется на визуальном отличии фазовых состояний ЖК. В известных методах используется визуальное отличие изотропного состояния от жидкокристаллического (нематического в НЖК и холестерического в ХЖК), в разработанном методе используется визуальное отличие смектического состояния от холестерического в ХЖК. Температурные интервалы переходов из одного состояния в другое в разработанном методе и известных современных методах — одного порядка и составляют десятки и сотые доли градуса в зависимости от типа используемого ЖК и его чистоты. Температурная чувствительность известных и разработанного методов при близких температурных интервалах переходов фазовых состояний определяется возможностью поддержания более низкотемпературного состояния вблизи температурного интервала фазового перехода — чем ближе температура этого состояния к указанному интервалу, тем выше температурная чувствительность. Разработанный метод по температурной чувствительности не уступает известным современным методам ЖК-термографии горячих точек. Для выявления горячих точек, вызванных локальными утечками тока, температуру смектического состояния достаточно поддерживать на 1—2°С меньше температурного интервала фазового перехода «смектическая фаза — холестерическая фаза».

На разработанный метод получен патент Украины [10]. Для его практической реализации в Центре “Мик-

роаналитика” НИИ микроприборов разработана методика, с помощью которой проведено выявление горячих точек в многочисленных образцах кристаллов различных типов полупроводниковых приборов, включая современные СБИС.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Rocotoniaina I. P., Breitenstein O., Langenkamp M. Localization of weak heat sources in electronic devices using highsensitive Lock – in IR thermography // Material Science and Engineering. — 2002.— В91—92.— P. 481—484.
2. Garbarino P. L., Sandison R. D. Nondestructive location of oxide breakdowns on MOS FET structures // J. Electrochem. Soc.— 1973.— Vol. 120.— № 6.— P. 834—835.
3. Добролеж С. А., Караулов А. А., Клименко А. С., Коваль Ю. Д. Применение жидкокристаллических термоиндикаторов для выявления локальных дефектов в кристаллах ИС // Электронная промышленность.— 1982.— Вып. 10—11.— С. 97—100.
4. Hiatt J. A method of detecting hot spots on semiconductors using liquid crystals // Proceedings of the 19-th annual International Reliability Physics Symposium.— Orlando, Florida.— 1981.— P. 130—133.
5. Burgess D., Tan R. Improved sensitivity for hot spot detection using liquid crystal // Proceedings of the 22 Annual Reliability Physics Symposium.— Las Vegas, Nevada.— 1984.— P. 119—121.
6. Pat. 4682857 USA. Liquid crystal hot spot detection with infinitesimal temperature control / Tan, Peng.— 07.1987.
7. Pat. 5767489 USA. Enhanced resolution liquid crystal microthermography method and apparatus / Mark S. Ferrier.— 06.1998.
8. Жаркова Г. М., Хачатурян В. М. Холестерические жидкие кристаллы // Сборник статей Института теоретической и прикладной механики, г. Новосибирск.— 1976.— С.4—13.
9. Америк Ю. Б., Кренцель Б. А. Химия жидких кристаллов и мезоморфных полимерных систем.— М.: Наука, 1981.
10. 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.

#### НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



**Берлин Е. В., Двинин С. А., Сейдман Л. А. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок.— М.: Техносфера, 2007.— 176 с.**

В книге обобщено современное состояние одной из отраслей производства изделий электронной техники — вакуумной технологии нанесения и травления тонких пленок. Книга содержит подробное описание магнетронных напылительных установок, плазмохимических установок для травления тонких пленок и технологических особенностей их использования. Описаны математические модели, способы управления и примеры использования реактивного магнетронного напыления, принципы построения и применения среднечастотных источников питания для реактивного магнетронного напыления. Приведены теоретические основы и физические принципы конструирования нового типа источника высокочастотного разряда низкого давления для ионного или плазмохимического травления тонких пленок и/или их стимулированного плазмой осаждения.

Книга рассчитана на специалистов научно-исследовательских лабораторий, конструкторских бюро и производственных подразделений предприятий, занимающихся разработкой и изготовлением различных изделий электронной техники и оборудования для их производства.