

# Неразрушающие методы контроля качества монтажа полупроводниковых кристаллов в корпуса ИМС

Раскрываются новые возможности как традиционного метода неразрушающего контроля — лазерной микроинтерферометрии, так и уникального — лазерной фототермоакустической микроскопии. Последний метод основан на физико-технических многоступенчатых принципах возбуждения, регистрации и обработки слабых сигналов с последующим извлечением из них полезной информации о внутренних физических особенностях неразъемных контактов в конструкциях изделий электронной техники, микро- и нанoeлектроники [1].

Сергей Волкенштейн,  
Александр Хмыль,  
д. т. н., профессор

## Введение

Современные изделия электронной техники (ЭТ), микро- и нанoeлектроники (МЭ, НЭ) представляют собой конструкции, состоящие из материалов с различными физическими, химическими и механическими характеристиками (кремний, алюминий, золото, никром, медь и др.). Наличие технологических дефектов в исходных материалах, полуфабрикатах и изделиях, а также возникновение дефектов при соединении этих разнородных материалов на этапах сборочных операций (монтаж кристаллов и межсоединений, корпусирование) приводят к снижению эксплуатационной надежности изделий и ухудшению их технических характеристик.

Ужесточение требований к качеству исходных материалов и технологических процессов изготовления разрабатываемых изделий ЭТ, МЭ и НЭ с целью расши-

рения их функциональных возможностей, повышения технических и эксплуатационных характеристик стимулирует совершенствование традиционных и разработку новых методов неразрушающего контроля (НК).

## Анализ традиционных методов диагностики

Традиционные методы исследования, такие как оптическая и электронная микроскопия, имеют ряд ограничений в области визуализации микрообъектов. Например, оптический и растровый электронный микроскопы обладают высокой разрешающей способностью, но они малоприспособлены для изучения внутренних областей непрозрачных материалов. Однако механические остаточные внутренние напряжения (ОВН) в монтажных конструкциях изделий ЭТ, МЭ и НЭ можно оценить (качественно и интегрально-количественно) по форме искажения профиля их планарной поверхности с помощью метода интерферометрии [2].

При наличии в монтажной конструкции равномерно распределенного механического ОВН сжатия искривление планарной поверхности полупроводникового (п/п) кристалла приобретает форму правильной сферической выпуклости (рис. 1а). Равномерно распределенное напряжение растяжения искривляет поверхность п/п кристаллов в обратную сторону. В данном случае образуется правильная сферическая вогнутость планарной поверхности (рис. 1б). Стрела прогиба прямо пропорциональна величине внутреннего напряжения:

$$\rho = m(\lambda/2), \quad (1)$$

где  $m$  — число интерференционных колец;  $\lambda$  — длина волны излучения. В обоих этих случаях при равенстве модулей напряжения интерференционные картины идентичны, и кольца имеют вид правильных концентрических окружностей. Радиус кривизны определяется:

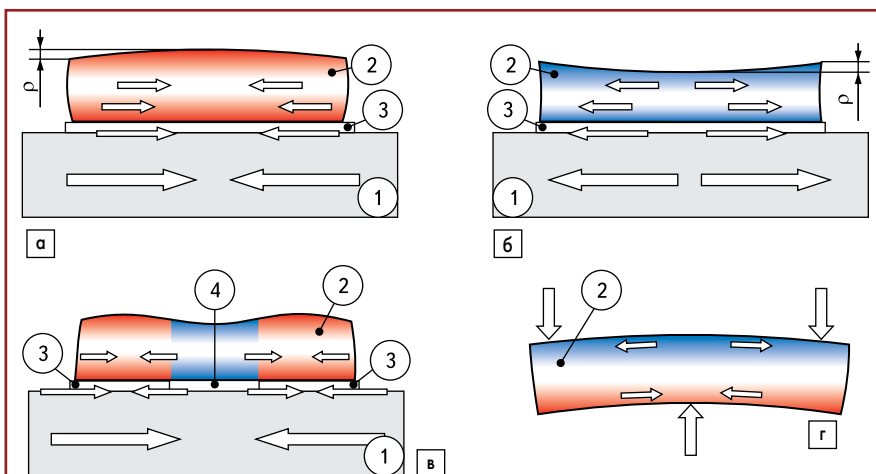


Рис. 1. Схематичное представление объемной деформации п/п кристалла (2) в монтажной конструкции (1 — подложка; 3 — адгезионный слой) при наличии ОВН: а) равномерного сжатия; б) равномерного растяжения; в) сжатия в условиях неравномерно распределенной адгезии, наличия пустот (4); г) деформации изгиба

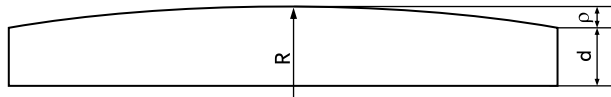


Рис. 2. Схематическое представление деформированного п/п кристалла

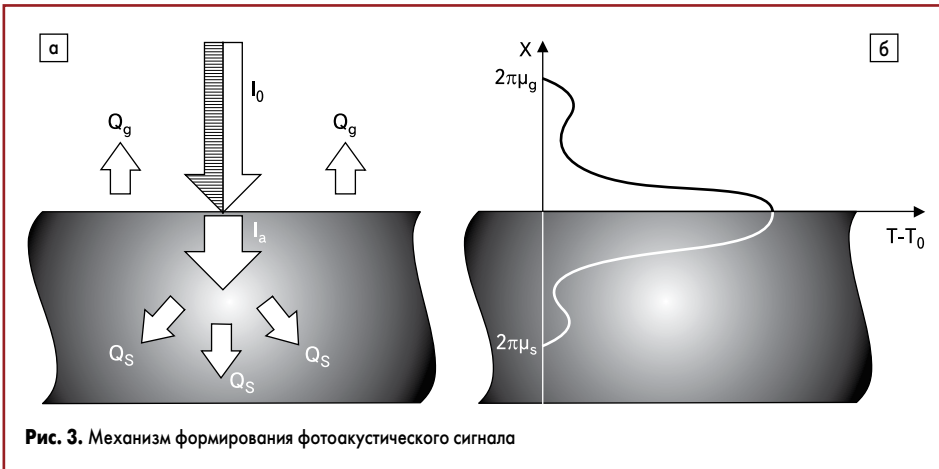


Рис. 3. Механизм формирования фотоакустического сигнала

$$R = \pm(D^2/4m\lambda), \quad (2)$$

где  $D$  — диаметр большего интерференционного кольца (рис. 2). Характер искривления поверхности  $\pm$  (выпуклость/вогнутость) определяется эмпирическим путем по сбеганию/разбеганию интерференционных колец при незначительном увеличении пути пробега падающего светового пучка.

Интегральная составляющая механических ОВН определяется по формуле:

$$\sigma = (Ed)/[2(1-\mu)R], \quad (3)$$

где  $\sigma$  — интегрированная величина механического напряжения;  $E$  — модуль упругости;  $d$  — толщина п/п кристалла;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

В случае деформации изгиба (рис. 1г), в отличие от вышеприведенных случаев, участки с выпуклым искривлением характеризуются приповерхностным напряжением растяжения, а с вогнутым искривлением — напряжением сжатия.

Для анализа внутренней структуры изделий электронной техники применяются рентгено-телевизионные микроскопы. Однако при их использовании возникают сложности, связанные с расшифровкой получаемых изображений, а также с изучением слабоконтрастных объектов.

Таким образом, всем перечисленным системам микроскопов присущ один общий недостаток — невозможность определения тепловых свойств микроструктур. Изучение тепловых свойств представляет большой интерес, поскольку оно дает новую информацию о составе и строении объектов. Потребность исследования тепловых свойств вещества в микромасштабах привела к созданию принципиально нового типа микроскопа — фотоакустического, позволяющего существенно расширить и дополнить традиционные методы диагностики и контроля.

### Реализация лазерной фототермоакустической микроскопии

Принцип действия фотоакустического микроскопа основан на явлении генерации и распространения в объекте тепловых волн, возбуждаемых зондирующим лазерным излучением или электронным пучком, модулированными по интенсивности  $I_0$  (рис. 3). Поглощенное излучение  $I_a$  приводит к нагреву освещенной области и генерации периодических тепловых потоков  $Q_s$  и  $Q_g$ , распространяющихся соответственно в объекте и от его границы в окружающую газовую среду (рис. 3а). Решением уравнения термодиффузии [3], отвечающим данной ситуации, являются температурные волны, затухающие в  $e$  раз на длине распространения тепла  $\mu_{s,g}$  в твердом теле и окружающей среде (рис. 3б и 5):

$$\mu_{s,g} = \sqrt{\frac{2k_{s,g}}{\rho_{s,g}c_{s,g}\omega}}, \quad (4)$$

где  $k_{s,g}$  — теплопроводность;  $\rho_{s,g}$  — плотность;  $c_{s,g}$  — теплоемкость твердого тела и газа соответственно;  $\omega$  — угловая частота модуляции излучения.

Вследствие периодического нагрева и тепловой деформации локальной области объекта в нем также возбуждаются и распространяются акустические волны той же частоты, что и температурные волны. Это явление получило название фототермоакустического эффекта в твердом теле (рис. 4). Акустические колебания объекта регистрируются датчиком. Фотоакустический сигнал, снимаемый с датчика, для каждой выделенной области объекта зависит от ее локальных физических свойств.

При сканировании лазерным лучом в двух взаимно ортогональных направлениях формируется фотоакустическое изображение объекта, которое является следствием трех различных процессов [4, 5]:

- вариации поглощенной мощности излучения вследствие изменения от точки к точке оптических свойств объекта;

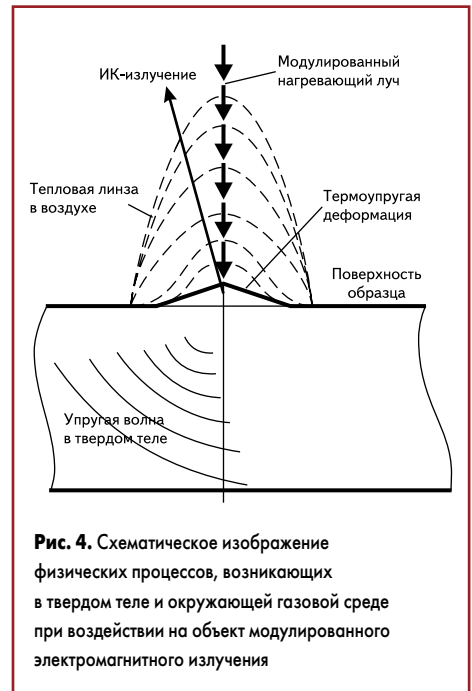


Рис. 4. Схематическое изображение физических процессов, возникающих в твердом теле и окружающей газовой среде при воздействии на объект модулированного электромагнитного излучения

- взаимодействия температурных волн с тепловыми неоднородностями объекта;
- взаимодействия акустических волн с упругими неоднородностями объекта.

Первый процесс несет информацию только об абсорбционных и отражательных свойствах образца. При доминировании этого процесса фотоакустическое изображение по существу идентично оптическому изображению. Разрешающая способность определяется диаметром зондирующего луча, а глубина визуализации подповерхностной структуры — глубиной проникновения фотонов.

Второй процесс не встречается ни в оптической, ни в акустической микроскопии и характеризуется переходом к новому типу волн, взаимодействующих с микро неоднородностями объекта и определяющих формирование изображения. Такой переход дает качественно новую информацию и позволяет существенно расширить наши познания о физических свойствах материалов. Определяется этот процесс термическими свойствами объекта:

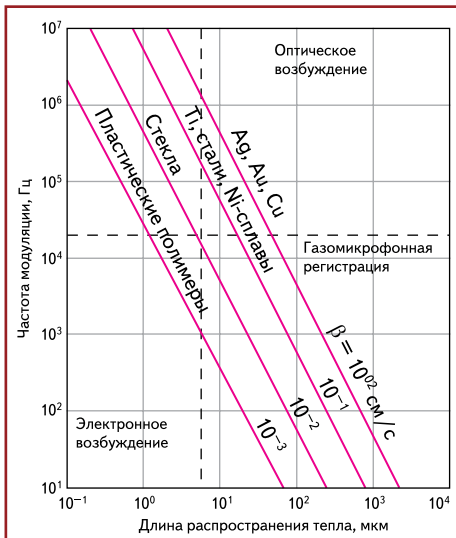
- теплопроводностью;
- температуропроводностью:

$$\beta_s = k_s/(\rho_s c_s); \quad (5)$$

- коэффициентом теплового расширения  $\alpha_{ts}$ .

Несмотря на сильное затухание, например для меди  $2 \text{ мм} \geq \mu_s \geq 2 \text{ мкм}$ , при изменении частоты модуляции в диапазоне  $10 \text{ Гц} \dots 10 \text{ МГц}$  (рис. 5) [6] температурные волны обладают характеристиками обычных волн, и поэтому их взаимодействие с тепловыми неоднородностями твердого тела, по аналогии с оптическими и акустическими волнами, можно рассматривать как процессы рассеяния и отражения.

Для используемых частот модуляции (до  $10 \text{ МГц}$ ) акустические волны, генерируемые наряду с температурными, являются более длинными по сравнению с толщиной объекта, они не взаимодействуют с объектом и служат лишь носителями информации, по-



**Рис. 5.** Зависимость величины  $\mu_z$  от частоты модуляции зондирующего излучения для материалов с различным  $\beta$ .

лученной за счет распространения температурных волн.

Микроскоп, изображение в котором формируется, главным образом, вследствие взаимодействия температурных волн с тепловыми неоднородностями объекта, наряду с определением «фототермоакустический» получил еще одно название — термоволновой микроскоп (ТВМ). Разрешающая способность ТВМ зависит от размера зондирующего луча, а также величины  $\mu_z$  и определяется большим из этих двух параметров, а глубина визуализации оценивается значением  $\mu_z$ .

Третий процесс несет информацию о механических параметрах объекта. Его необходимо учитывать, если длина акустической волны того же порядка, что и размеры неоднородностей в объекте (обычно это происходит на частотах модуляции, превышающих 100 МГц). При определяющем вкладе данного процесса фотоакустическое изображение идентично акустическому, а разрешающая способность имеет порядок длины звуковой волны.

Акустические методы диагностики — акустическая микроскопия (АМ), сканирующая лазерная акустическая микроскопия (СЛАМ) и фототермоакустическая микроскопия (ФАМ) — наиболее перспективны при контроле контактных микросоединений в изделиях микроэлектроники и электронной техники, как на этапе разработки, так и в их производстве.

В акустической микроскопии и сканирующей лазерной микроскопии первичную информацию можно получить в результате генерации, взаимодействия и приема чисто акустических колебаний, а в лазерной фототермоакустической микроскопии она возникает при оптическом взаимодействии импульсного лазерного излучения с поверхностью твердого тела. Амплитуда генерируемых акустических колебаний в ФАМ определяется, во-первых, коэффициентом оптического поглощения лазерного излучения в каждой точке поверхности сканируемого объекта и, во-вторых, мощным фоновым сигналом, который возникает вследствие удаления с поверхности

объекта различных окислов и загрязнений при первичном сканировании лазерным лучом. Однако оптические, акустические и фоновые составляющие принимаемого фотоакустического сигнала создают на результирующей топограмме достаточно сложные изображения, для расшифровки которых требуется опыт и специальные методические разработки.

Цель всех методов регистрации — получение достоверной информации о теплофизических неоднородностях объектов путем обработки параметров электрических сигналов (амплитуды, фазы, времени задержки, спектра сигналов и координат положения вспомогательного лазерного луча) и далее — получение изображения, доступного интерпретации [7–10].

Лазерная фототермоакустическая микроскопия имеет следующие преимущества перед акустической и сканирующей лазерной акустической микроскопией [11]:

- Сканирование объектов сложной конфигурации и относительно больших площадей вследствие бесконтактного возбуждения акустических колебаний в твердом теле сфокусированным лучом лазера.
- Так как фотоакустический сигнал зависит от величины оптического поглощения сканируемой поверхности — одновременное получение топограмм распределения оптического поглощения и видеоспектральных топограмм поглощения при использовании лазера с перестройкой по длине волны.
- Упрощение конструкции и методики исследования, так как не требуется применение иммерсионного контакта акустической части с объектом, как в конструкциях АМ и СЛАМ, что в случае применения АМ значительно ограничивает площадь сканирования (не более 2×2 см), а для СЛАМ требует полного погружения объекта в ванну с жидкостью.

Хотя все три метода контроля контактных микросоединений (ФАМ, АМ и СЛАМ) могут дать в известных пределах идентичные результаты, однако лазерный фотоакустический метод предпочтителен благодаря перечисленным преимуществам.

Для контроля качества и диагностирования скрытых дефектов неразъемных соединений в изделиях ЭТ, МЭ и НЭ в УП «КБТЭМ-СО» разработаны и активно используются лазерный микроинтерферометр (рис. 6а) и комплекс лазерного фототермоакустического диагностирования (рис. 6б) [12].

Основные технические характеристики комплекса лазерного фотоакустического диагностирования:

- увеличение геометрическое, крат — от 1:1 до 2500:1 на экране монитора 19×;
- число градаций отображаемого параметра — 16;
- максимальное поле сканирования — 100×100 мм;
- размеры образца — до 10 мм (микросканирование) и до 65 мм (макросканирование);
- пространственная разрешающая способность — 0,5–100 мкм;
- чувствительность к нарушению сплошности структуры — до 10 нм;
- число строк сканирования — 256.

Обработка параметров электрического сигнала обеспечивает возможность получения достоверной информации о неоднородностях внутренней структуры исследуемого объекта. Для интерпретации результатов контроля данная информация визуализируется в виде цветной 16-градационной двумерной фотоакустической топограммы, на которой уровень максимальной сплошности (диффузия, адгезия, смачиваемость) материалов представлен черным цветом, а по мере увеличения несплошности (расслоения, полости, инородные включения) цветовая гамма меняется вплоть до белого цвета, проходя все цветовые оттенки, показанные на шкале (рис. 7).

Комплекс лазерного фотоакустического диагностирования позволяет производить диагностику и неразрушающий пооперационный контроль качества:

- присоединения кристаллов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем к основанию корпусов и кристаллодержателей с применением эвтектики, припойных и клеевых композиций;



**Рис. 6.** Внешний вид:

а) лазерного микроинтерферометра; б) комплекса лазерного фототермоакустического диагностирования



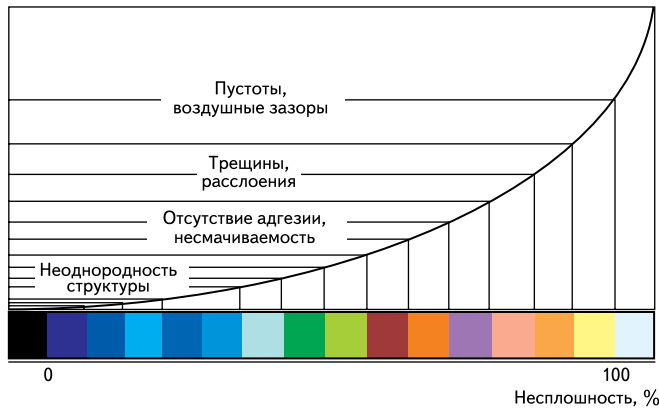


Рис. 7. Цветная 16-градационная шкала

- микросварных соединений золотой, алюминиевой, медной проволокой и проволокой из других материалов методами термовзвучковой, термокомпрессионной, ультразвуковой микросварки;
- сварных и паяных швов корпусов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем;
- герметизации интегральных микросхем различными пресс-компаундами;
- монтажа электронных компонентов на различные подложки (SMD, COB);
- адгезии металлизированных покрытий к различным подложкам.

**Экспериментальная часть**

При анализе причин параметрического отката исследуемой интегральной микросхемы (ИМС) была получена лазерная интерферограмма (рис. 8) диагностируемого полупроводникового кристалла (9×8,5 мм).

При качественном соединении кристалла с подложкой лазерная интерферограмма имеет вид симметричных концентрично расположенных колец. Всякий дефект в зоне спая/склейки кристалла с подложкой приводит к образованию асимметричных интерференционных полос с увеличением плотности их распределения в зоне с повышенной деформацией и наоборот.

Расшифровка лазерной интерферограммы позволила реализовать матрицу деформации



Рис. 8. Лазерная интерферограмма исследуемого п/п кристалла

с последующим построением 3D-модели профиля деформированной планарной поверхности п/п кристалла (рис. 9).

Расчет максимального интегрированного остаточного механического напряжения структуры кристалла, вычисленного по концентрации интерференционных колец (рис. 8), не выявил критических напряжений разрушения, которые для кремния равны  $\sigma_{\text{max}} \text{растяжения} \approx 90 \text{ МПа}$ ;  $\sigma_{\text{max}} \text{сжатия} \approx 190 \text{ МПа}$ , однако на участках с отрицательной кривизной (рис. 9, показано белыми стрелками) имеют место напряжения растяжения, способствующие возникновению концентраторов напряжения, вызываемых реальными дефектами кристалла, которые приводят к возникновению трещин и выколов во время монтажа проволочных межсоединений и корпусирования, что в дальнейшем резко снизит эксплуатационную надежность ИМС.

На рис. 10 приведена грубая схема траекторий напряжений в равномерно растянутом стержне, содержащем трещину. На схеме видно, что атомы, изменяя свое положение под действием растягивающего напряжения, как бы тянут друг друга в стороны. Расчет

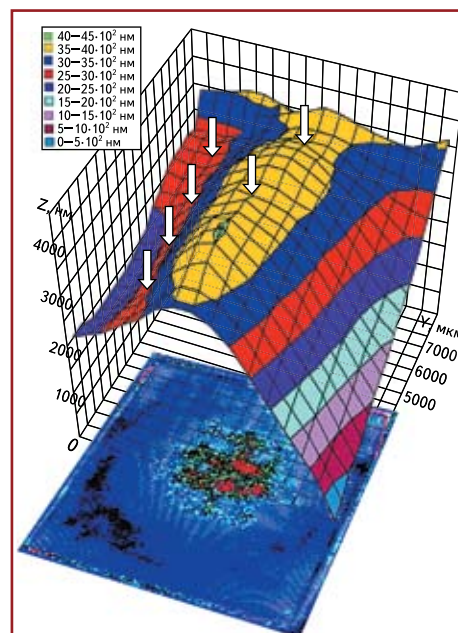


Рис. 9. 3D-модель профиля поверхности исследуемого п/п кристалла (сверху) и лазерная фотоакустическая топограмма исследуемого кристалла (внизу)

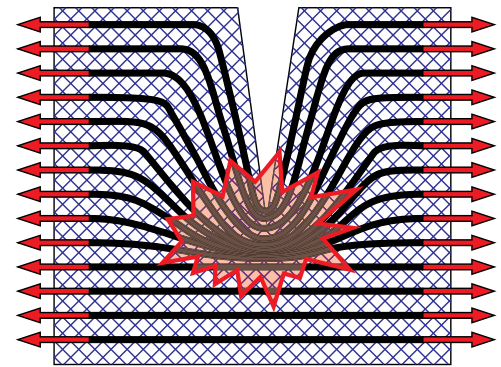


Рис. 10. Распределение растягивающих напряжений в стержне с трещиной

коэффициентов концентрации напряжений, перпендикулярных плоскости трещины (параллельно приложенной растягивающей силе) длиной 2 мкм с радиусом кончика, равным 1 Å, показал, что максимальная величина концентрации напряжения может достигать величины 200 (рис. 11). Силы, которые стремятся разорвать материал, раскрывая трещину, очень велики, особенно в области, вплотную примыкающей к кончику трещины, и даже при небольших растягивающих усилиях могут приводить к разрушающим последствиям [13].

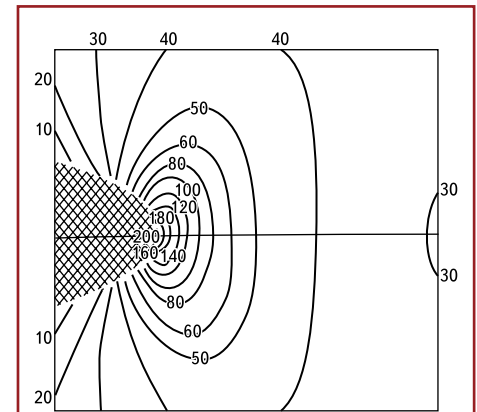


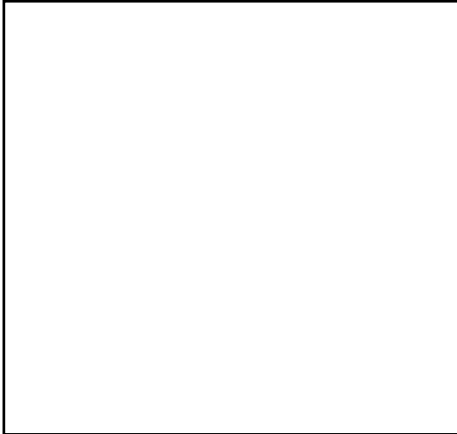
Рис. 11. Расчетные значения коэффициента концентрации напряжений растяжения вблизи кончика трещины

Лазерное фотоакустическое сканирующее зондирование выявило неоднородности в адгезионном слое монтажной конструкции, которые были зарегистрированы на топограмме в центральной области кристалла и по его краям (рис. 9), что хорошо согласуется с результатами лазерной интерферометрии. Несплошность адгезионного слоя, согласно анализу лазерной фотоакустической топограммы, выступает как на уровне неравномерного взаимодействия адгезива с монтажными поверхностями, что связано с наличием поверхностных локальных загрязнений монтажных поверхностей и градиентом их поверхностной активности, так и на уровне отсутствия адгезии в центральной части п/п кристалла и по его периметру, что может быть вызвано неравномерным распределением адгезива в монтажной

конструкции из-за неправильного его нанесения (неточная дозировка, недостаточное количество точек нанесения). Нельзя также исключать из списка влияющих факторов физико-химические свойства адгезива, геометрические особенности подложки (отклонение от плоскостности) и специфику технологического процесса.

### Заключение

Средствами лазерной фотоакустической микроскопии и лазерной интерферометрии в адгезивном слое монтажной конструкции



параметрически отказавшей ИМС обнаружены несплошности, которые стали причиной возникновения в п/п кристалле областей с механическими остаточными внутренними напряжениями растяжения (рис. 9, показано стрелками).

Исследования и расчеты показывают, что при наличии в материале внутренних напряжений растяжения возле дефектов возникают концентраторы напряжений. Значение коэффициента концентрации достигает величины 200 (рис. 11). Это говорит о том, что при появлении даже минимальных внутренних механических напряжений растяжения ( $\geq 0,45$  МПа) в области дефектов возникают сверхкритические растягивающие напряжения разрушения ( $\geq 90$  МПа), ухудшающие эксплуатационную надежность изделий и зачастую несовместимые с их функционированием.

### Литература

1. Волкенштейн С. С., Хмыль А. А. О развитии неразрушающих методов контроля качества монтажа полупроводниковых кристаллов // Доклады БГУИР. 2010. № 7 (53).
2. Ланин В. Л., Волкенштейн С. С., Хмыль А. А. Методы контроля и диагностики скрытых дефектов в изделиях электроники // Компоненты и технологии. 2010. № 2.
3. Морозов А. И., Раевский В. Ю. Фотоакустическая микроскопия // Зарубежная электронная техника. 1982. № 2.
4. Международный патент No WO 80/01 005.
5. Rosencwaig A. Thermal wave microscopy with photoacoustics // Journal of Applied Physics. 1980. Т. 51. No 4.
6. 1980 Ultrasonics Symp. Proc. (IEEE cat. N 0090-5607/80/0000-0636).
7. Quimby R. S. Photoacoustic Microscopy with a new modulation technique // Applied Physics Letters. 1981. V. 39. No 11.
8. Wong J. H., Thomas R. L. Subsurface structures in solid scanning photoacoustic // Applied Physics Letters. 1979. V. 35.
9. Busse G. Imaging with photoacoustic effect // Optics and Laser Technology. 1980. V. 12.
10. Masatoshi K. Photoacoustic signal induced by pulsed ruby laser in CdS // Japanese Journal of Applied Physics. 1982. V. 21. Suppl. No 3.
11. Berhelot J. H., Bush-Vishneat I. Laser-induced thermoacoustic radiation // Journal Acoustical Society of America. 1985. V. 78. No 6.
12. Волкенштейн С. С., Ланин В. Л., Хмыль А. А. Лазерная фотоакустическая диагностика скрытых дефектов в изделиях электроники // Компоненты и технологии. 2007. № 11.
13. Смирнов В. И. Интенсификация производства в радиоэлектронной промышленности. ЛДНТП, 1976.