

Лазерная фотоакустическая диагностика скрытых дефектов в изделиях электроники

Сергей ВОЛКЕНШТЕЙН
wolkenstein@kbtcm.by
Владимир ЛАНИН,
профессор
vlanin@bsuir.unibel.by
Александр ХМЫЛЬ,
профессор
alesvsh@bsuir.unibel.by

Проблема обеспечения качества и надежности при сборке и монтаже изделий электроники нацеливает на использование эффективных методов диагностики скрытых дефектов. Методы должны обеспечивать высокую информативность контроля, достоверность, возможность автоматизации анализа результатов.

Методы неразрушающего контроля дефектов

Надежность является одним из основных показателей, характеризующих качество изделий электроники. Наличие технологических дефектов в исходных материалах, полупроводниках и элементах, возникновение дефектов при сборке и монтаже конструктивных элементов из материалов с различными физическими, химическими и механическими характеристиками (кремний, алюминий, золото, медь и др.) приводит к снижению надежности изделий и ухудшению их технических характеристик [1].

Расширение функциональных возможностей, повышение технических и эксплуатационных характеристик разрабатываемых изделий требует ужесточения требований к качеству исходных материалов и технологических процессов их изготовления, что стимулирует совершенствование традиционных и разработку новых методов неразрушающего контроля.

В современной электронной промышленности в связи с наблюдаемым усложнением изделий и технологических процессов возрастает значение методов неразрушающего контроля микроструктуры материалов и устройств на различных стадиях их обработки и изготовления. 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 малоприменимы для изучения внутренних областей непрозрачных материалов. Для анализа внутренней структуры изделий электронной техники применяются рентгенотелевизионные микроскопы. Однако при их использовании возникают сложности, связанные с расшифровкой получаемых изображений, а также с изу-

чением слабоконтрастных объектов [2]. Всем перечисленным методам контроля присущ один общий недостаток — невозможность определения тепловых свойств микроструктур, изучение которых представляет большой интерес, поскольку оно дает новую информацию о составе и строении контролируемых структур и соединений [2].

Ведущее место среди различных методов неразрушающего контроля занимают акустические методы. Это обусловлено многообразием задач, которые могут быть решены с их помощью. Акустические методы позволяют обнаруживать дефекты малых размеров (единицы микрон) в металлических и неметаллических материалах, определять размеры изделий, ориентацию и координаты дефектов, выявлять дефекты типа нарушения сплошности, расслоений, трещин, инородных включений и т. д., а также определять физико-механические характеристики материалов (модуль упругости, коэффициент внутреннего трения, твердость, зернистость и др.). Эти методы обеспечивают высокую разрешающую способность, точность, надежность, производительность и полную безопасность процесса контроля. Более 50% всех приборов неразрушающего контроля, выпускаемых в настоящее время в мире, являются акустическими (ультразвуковые дефектоскопы, толщинометры, приборы для измерения физико-механических характеристик).

Для бесконтактного возбуждения и приема акустических колебаний в исследуемых объектах часто используют различные термо- и оптико-акустические эффекты. Если быстро нагреть какой-либо участок твердого тела, то другие его участки нагреваются спустя некоторое время. Локальный нагрев изделия вызовет появление термомеханических напряжений и акустических волн, так как тепловое возмущение распространяется значительно медленнее упругого. В качестве источников нагрева могут быть использованы

любые модулированные по интенсивности источники электромагнитного излучения: лазерные [4], электронные [5, 6], ионные [7, 8]. Выбор источника нагрева и частоты модуляции определяется свойствами объекта, необходимой мощностью, чувствительностью и разрешающей способностью аппаратуры, размерами пятна, в которое необходимо сфокусировать излучение [9–11].

При воздействии электромагнитного излучения на объект происходят следующие физические процессы: нагрев поверхности объекта, диффузионный нагрев окружающей газовой среды, термоупругие деформации и тепловые волны в объекте. Каждый из перечисленных процессов вызывает изменение одного или нескольких параметров объекта или окружающей среды, которые могут служить источником информации об их тепловых свойствах. Так, диффузионный нагрев окружающей объект газовой среды приводит к изменению давления и показателя преломления газовой среды над областью нагрева. Регистрацию изменения давления осуществляют с помощью микрофонов различного типа, помещаемых в газовую герметизированную ячейку вместе с контролируемым объектом [12]. Регистрацию изменения показателя преломления газовой среды над областью нагрева осуществляется по отклонению проходящего над объектом луча вспомогательного лазера с помощью интерферометра или координатного детектора (метод «мираж-эффекта») [13, 14].

Термоупругие деформации объекта приводят к возникновению акустических колебаний, регистрация которых осуществляется с помощью пьезоэлектрических датчиков [15], регистрация деформации области нагрева — с помощью интерферометров и координатных приемников, однако в отличие от «мираж-эффекта» вспомогательный лазерный луч отражается от поверхности в области нагрева [16].

Лазерная фотоакустическая микроскопия

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. 1). 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. 1а). В результате решения уравнения термодиффузии, отвечающего данной ситуации, определяются температурные волны, затухающие в ϵ раз на длине распространения тепла $\mu_{s,g}$ в твердом теле и окружающей среде (рис. 1б):

$$\mu_{s,g} = \left(\frac{2k_{s,g}}{\rho_{s,g} c_{s,g} \omega} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где $k_{s,g}$ — теплопроводность, $\rho_{s,g}$ — плотность, $c_{s,g}$ — теплоемкость твердого тела и газа соответственно, ω — 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 фотоакустического эффекта в твердом теле. 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 [17, 18]:

- вариации поглощенной мощности излучения вследствие изменения от точки к точке оптических свойств объекта;
- взаимодействия температурных волн с тепловыми неоднородностями объекта;
- взаимодействия акустических волн с упругими неоднородностями объекта.

Первый процесс несет информацию только об абсорбционно-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 микронеоднородностями объекта и определяющих формирова-

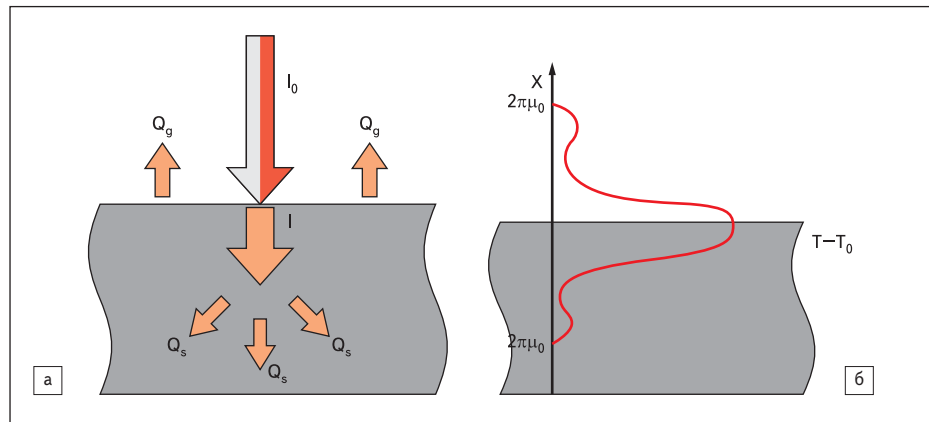


Рис. 1. Механизм формирования фотоакустического сигнала

ние 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 β_s , коэффициентом теплового расширения.

Несмотря на сильное затухание (например, для меди $2 \text{ мм} \geq \mu_s \geq 2 \text{ мкм}$ при изменении частоты модуляции в диапазоне $10 \text{ Гц} - 10 \text{ МГц}$ (рис. 2) [18]), 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 МГц), более длинных по сравнению с толщиной объекта, генерируемых наряду с температурными, акустические волны не взаимодействуют с объектом и служат лишь носителями информации, полученной за счет распространения температурных волн. Микроскоп, изображение в котором формируется главным образом вследствие взаимодействия температурных волн с тепловыми неоднородностями объекта, наряду с фотоакустическим получил название термоволнового микроскопа (ТВМ). Разрешающая способность ТВМ зависит от размера зондирующего луча и величины μ_s и определяется большим из этих двух параметров, а глубина визуализации оценивается значением μ_s .

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

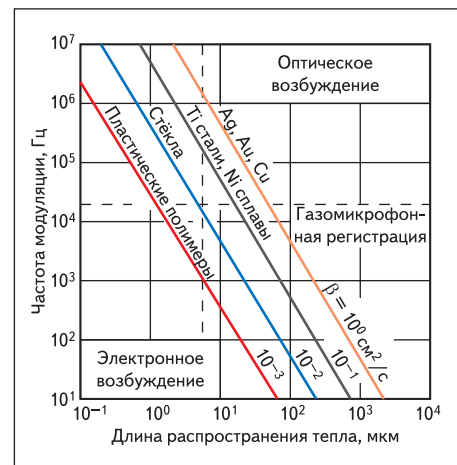


Рис. 2. Зависимость величины μ_s от частоты модуляции зондирующего излучения для материалов с различной температуропроводностью β_s

лазерная акустическая микроскопия (СЛАМ) и фотоакустическая 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 первичная информация получается в результате генерации, взаимодействия и приема чисто акустических колебаний, а в лазерной фотоакустической 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 результиру-

ющей топограмме достаточно сложные изображения, для расшифровки которых требуется опыт и специальные методические разработки.

Лазерная фотоакустическая микроскопия имеет следующие преимущества перед акустической и сканирующей лазерной акустической микроскопией [19]:

- бесконтактное возбуждение акустических колебаний в твердом теле сфокусированным лучом лазера открывает широкие возможности сканирования объектов сложной конфигурации и относительно больших площадей;
- во многих случаях зависимость фотоакустического сигнала от величины оптического поглощения сканируемой поверхности позволяет получать одновременно и топограммы распределения оптического поглощения, а при использовании лазера с перестройкой по длине волны — видеоспектральные топограммы поглощения;
- конструкции АМ и СЛАМ и методики их применения требуют иммерсионного контакта акустической части с объектом, что в случае применения АМ значительно ограничивает площадь сканирования (не более 2×2 см), а для СЛАМ требуется полное погружение объекта в ванну с жидкостью. Эти требования исключаются при исследовании с использованием ФАМ.

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.

Первый отечественный фотоакустический микроскоп с разрешающей способностью 0,5 мкм ФМ-ЗМ был создан Н. В. Рабодзеем в 1986 г. и экспонировался на международной выставке «Метрология-86». Практика эксплуатации фотоакустических микроскопов показала, что благодаря их высокой чувствительности можно обнаруживать не выявляемые ранее неоднородности адгезии металлизированных покрытий, прочности паяных, сварных диффузионных микросоединений, что открывает путь к решению двух важных задач. Это:

- установление связей обнаруживаемых неоднородностей и дефектов с технологией и надежностью с целью отработки технологии и конструкции соединений;
- выработка критериев и норм брака при оперативной корректировке технологии.

По диапазону возможных применений в электронике фотоакустическая микроскопия является универсальным методом, обеспечивающим решение множества задач контроля, ранее требовавших использования многих и к тому же разрушающих методов. Бесконтактность и локальность оптического возбуждения акустических колебаний позволяют производить быстрое зондирование ответственных зон и участков изделия, а так-

же топографировать распределение характеристик.

Благодаря запоминанию различных промежуточных состояний контролируемого образца, последовательно подвергаемого различным воздействиям, открываются возможности исследования динамики разрушения соединений и определения запасов их прочности.

Факторами экономической эффективности лазерного фотоакустического метода являются:

- возможность повышения качества деталей и изделий по ранее неконтролируемым характеристикам;
- однозначность получаемой информации, полностью отражающей физическую сущность контролируемой характеристики или свойства;
- универсальность применения для решения многих задач, исключая разработку других, узкоспециальных, средств контроля;
- возможность контроля на ранних стадиях производства в процессе оптимизации технологий, когда стоимость бракуемых изделий невелика;
- однократность (во многих случаях) применения метода для стабилизации или корректировки технологии до уровня, исключающего необходимость введения контроля.

Серьезной проблемой фотоакустических систем является отсутствие метрологической базы, затрудняющее расшифровку получаемых фотоакустических изображений и интерпретацию результатов контроля. Однако отмеченные недостатки фотоакустических систем не умаляют достоинств и высокой технико-экономической эффективности фотоакустического метода, что подтверждается опытом эксплуатации отечественных диагностических комплексов.

Диагностика скрытых дефектов в изделиях электроники

В концерне «Планар» создан и эксплуатируется комплекс лазерного фотоакустического диагностирования и неразрушающего контроля качества сварных, паяных и адгезионных соединений в изделиях электроники [20]. В основу данного метода положен фотоакустический эффект, который возникает при точечном сканирующем воздействии модулированного лазерного излучения на исследуемый объект.

Основными техническими характеристиками комплекса лазерного фотоакустического диагностирования являются:

- 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 — от 0,5 до 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 двухмерной 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. 3) [21].

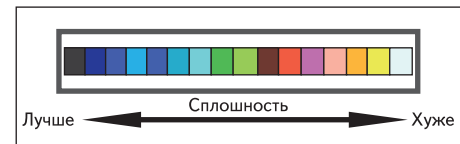


Рис. 3. Цветная 16-градационная шкала

Комплекс лазерного фотоакустического диагностирования (рис. 4) позволяет производить диагностику и неразрушающий операционный контроль качества:

- присоединения кристаллов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем к основанию корпусов и кристаллодержателей с применением эвтектики, припойных и клеевых композиций;
- микросварных соединений золотой, алюминиевой, медной и др. проволокой методами термовздуковой, 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.



Рис. 4. Лазерный фотоакустический комплекс

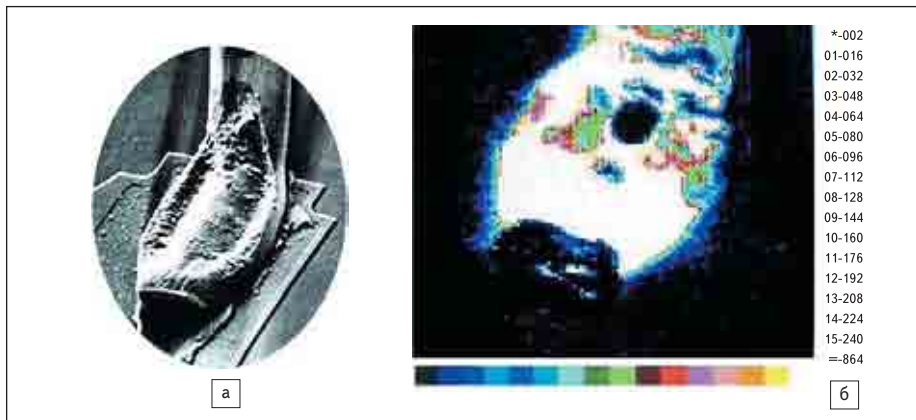


Рис. 5. а) Оптическое изображение; б) фотоакустическая топограмма микросоединения

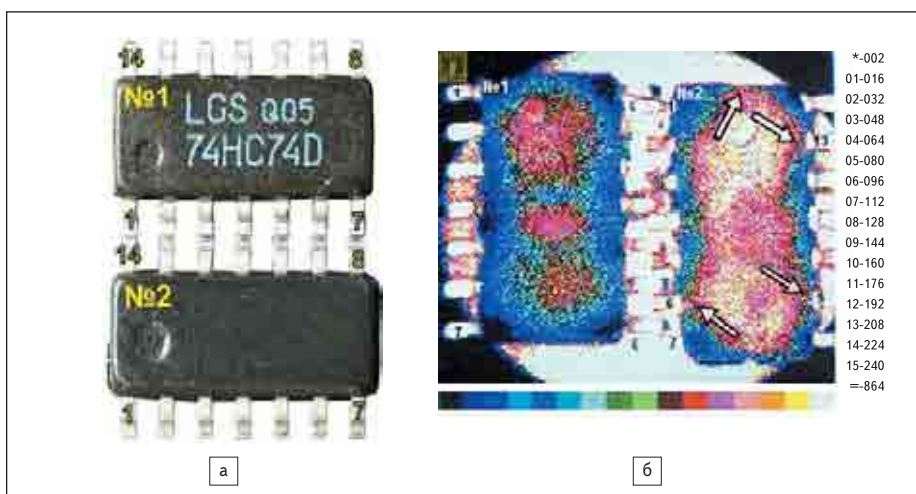


Рис. 6. а) ИМС в пластмассовом корпусе; б) их фотоакустические топограммы

Увеличенное оптическое изображение микросоединения, выполненного методом ультразвуковой микросварки внахлест алюминиевой проволокой диаметром 250 мкм к алюминиевой металлизации контактной площадки ИМС, приведено на рис. 5а, а фо-

тоакустическая топограмма, полученная при зондировании лучом УФ-лазера диаметром 15 мкм со скоростью 0,048 мм/с, — на рис. 5б.

Зоны отсутствия сцепления соединяемых материалов (участки светлых тонов) свидетельствуют о некачественном микросоедине-

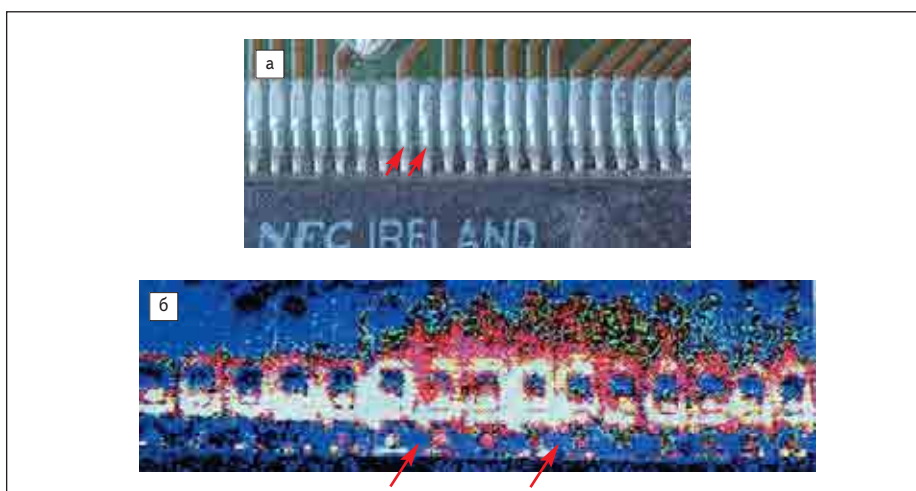


Рис. 7. а) Поверхностный монтаж ИМС на плату; б) лазерная фотоакустическая топограмма участка смонтированной интегральной микросхемы (стрелками на рисунке показана неудовлетворительная пайка внешних выводов ИМС, что может быть обусловлено плохой паяемостью выводов либо низкой активностью флюса)

нии, причиной которого может являться недостаточная мощность ультразвука.

На рис. 6а приведено оптическое изображение двух однотипных интегральных микросхем в пластмассовом корпусе, а на рис. 6б — лазерная фотоакустическая топограмма качественной (№ 1) и некачественной (№ 2) герметизации ИМС пресс-компаундами. Стрелками показаны участки явного течеобразования в местах отсутствия адгезии пресс-компаунда к внешним выводам рамки № 6, 9, 13 для ИМС № 2. Светло-красные области на топограмме свидетельствуют о наличии неоднородности в виде воздушных зазоров внутри пластмассовых корпусов.

Недостаточная адгезия пресс-материала к выводной рамке, возможно, связана с загрязнением траверс при нанесении компаунда предварительной защиты на кристалл, либо неправильно выбранным режимом герметизации: недогрев таблеток пресс-материала, низкое давление прессования и, как следствие, время впрыска пресс-материала более 11 с.

На рис. 7а приведен общий вид интегральной микросхемы для поверхностного монтажа, смонтированной на печатную плату, а лазерная акустическая топограмма мест соединений — на рис. 7б.

Выводы

Для повышения эксплуатационной надежности конструктивно сложных изделий электроники с многооперационной технологией их производства необходим систематический контроль стабильности технологических параметров процесса, а также эффективные методы и средства физико-химического анализа причин отказов, обусловленных скрытыми дефектами. При освоении новых изделий в производстве, формировании внутренних межсоединений, внедрении новых марок пресс-материалов при корпусировании изделий, для выявления скрытых дефектов эффективным и достоверным является метод лазерного фотоакустического диагностирования, хорошо зарекомендовавший себя на практике. ■

Литература

1. Литвинский И. Е., Прохоренко В. А., Смирнов А. Н. Обеспечение безотказности микроэлектронной аппаратуры на этапе производства. Минск: Беларусь, 1989.
2. Бережной В. П., Дубицкий Л. Г. Выявление причин отказов РЭА. М.: Радио и связь, 1983.
3. Медведев А. М. Надежность и контроль качества печатного монтажа. М.: Радио и связь, 1986.
4. Berhelot J. H., Bush-Vishneat I. Laser-induced Thermoacoustic Radiation // J. Acoustic Soc. Amer. 1985. V. 78. N 6.
5. Brandis E., Rosencwaig A. Thermal Wave Microscopy with Electron Beams // Appl. Phys. Lett. 1980. V. 37. N 1.

6. Rosencwaig A. Depth Profiling in Integrated Circuits with Thermal Wave Electron Microscopy // *Electron. Letters*. 1980. V. 16. N 24.
7. Deachi J., Majina J. Optoacoustic Phenomenon in Solids // *Proc. FASE-84/ 1984*.
8. Micoshiba T. Nondestructive Observation of Microdefects in GaAs // *IEEE Ultrasonic Symp. Proc.* 1985. V. I.
9. Balk L. J. Scanning acoustic microscopy // *Surface and Subsurface Anal.*, 1986, v. 9.
10. Luukkala M. Photoacoustic Microscopy at low modulation frequencies // *Scanned Image Microscopy*, E. A. Ash Ed., London, Academic, 1980.
11. Pousi I. Photoacoustic and photothermal imaging at low modulation frequency // *IEEE Trans. Son. Ultrason.*, 1982, v. SU-28, N 2.
12. Willans C. High-resolution thermal probe // *IEEE Trans. Son. Ultrason.*, 1982, v. SU-28, N 2.
13. Thomas R L., Pouch J. L., Wong J. N. Subsurface flaw detection in metals by photo acoustic Microscopy // *J. Appl. Phys.*, 1980, v. 51.
14. Voccaro A. C., Fournier D., Bozod J. Thermo-optic Spectroscopy by mirage-effect // *Appl. Phys. Lett.*, 1980, v. 36, N 1.
15. Farrow M. M., Burnharm P., K., Olster S. Piezoelectric detection of photo acoustic-signals // *Appl. Opt.*, 1978, v. 17.
16. Rosencwaig A., Opsal J., Willenborg D. L. Thermal-wave detection and thin film measurement with laser-beam deflection // *Appl. Opt.*, 1983, v. 22.
17. Amer S., Ash E. A., Newman V. Photo-displacement imaging // *Electron. Letter*. 1980, v. 17. № 10.
18. Морозов А. И., Раевский В. Ю. Фотоакустическая микроскопия // *Зарубежная электронная техника*, 1982, № 2.
19. Применение фотоакустической микроскопии в диагностировании ИЭТ при разработках и в производстве / Н. В. Рабодзей, В. А. Борисов, Н. М. Галина, А. К. Русакова // *Электронная промышленность*, 1990, вып. 7.
20. Авербах В. И., Волкенштейн С. С., Школьник С. Б. Метод лазерной фотоакустической диагностики качества монтажа кристаллов, сварных и паяных микросоединений в изделиях микроэлектроники и электронной техники // *J. China Integrated Circuit*. V. 64. 2004.
21. Авербах В. И., Волкенштейн С. С., Школьник С. Б. Лазерная фотоакустическая диагностика // *Наука и инновации*. 2006. № 3 (37).