

# Влияние качества напайки кристалла

## на нагрев силового полупроводникового прибора

**Проанализированы различные способы контроля температуры нагрева полупроводниковых изделий, в частности кристалла транзисторов Дарлингтона. Показана зависимость температуры нагрева кристаллов от площади непропаев в паяных швах «кристалл–корпус». Дано пошаговое описание методики автоматического подсчета площади непропаев в паяном соединении «кристалл–корпус» по рентгенограммам.**

**Виктор Зенин,  
д. т. н., профессор**

zenvik@bk.ru

**Александр Кочергин  
Александр Рягузов,  
к. т. н.**

### Введение

Практически все технологические процессы производства полупроводниковых изделий (ППИ) в большей или меньшей степени связаны с контролем температуры. В некоторых случаях эта величина не поддается непосредственному измерению, тогда ее преобразуют в другой измеряемый физический параметр (сопротивление, термо-ЭДС, частоту и т. д.). Примерно 40% всех измерений и около 60% контролируемых параметров в изделиях микроэлектроники связаны с температурой, а точность соблюдения температурного режима часто определяет не только качество, но и возможность применения того или иного оборудования и технологии [1].

Одним из методов проверки правильности выбора конструкции или технологического процесса изготовления ППИ является определение теплового сопротивления  $R_T$  «кристалл–корпус».  $R_T$  — это параметр полупроводникового прибора, характеризующий его способность отводить выделяющееся тепло в теплоотвод или во внешнюю среду. Для маломощных приборов (не имеющих специального теплоотвода)  $R_T$  определяется между  $p-n$ -переходом и окружающей средой. Для мощных приборов (имеющих специальный теплоотвод)  $R_T$  определяется участком  $p-n$ -переход–корпус.

Перегрев кристалла приводит к изменению электрических характеристик прибора и снижению его надежности. Расчет значения температуры перегрева проводят на этапе проектирования изделий. Требования к тепловому режиму необходимо учитывать при выборе материалов корпуса или подложки, а также конструкции приборов [2, 3].

В технических условиях на ППИ (диоды, транзисторы и интегральные схемы) указываются предельно допустимая мощность и предельно допустимая температура нагрева при эксплуатации. Превышение

максимальной мощности приводит к превышению максимально допустимой температуры нагрева, что в свою очередь приводит к отказу ППИ из-за пробоя  $p-n$ -перехода(ов). При проведении анализа ППИ, отказавшего при эксплуатации РЭА, констатируется факт пробоя  $p-n$ -перехода, но точную причину этого указать невозможно: пробой перехода может быть вызван внутренними дефектами в структуре кристалла или плохим качеством сборочных операций: пайка кристалла на основание корпуса, присоединение внутренних выводов к контактным площадкам кристалла и травесам корпуса, а также герметизация (вина изготовителя ППИ) или превышение предельно допустимой температуры нагрева ППИ при эксплуатации РЭА [4].

### Контроль предельно допустимой температуры ППИ при эксплуатации

Существуют различные способы контроля предельно допустимой температуры полупроводникового изделия. Известен следующий способ контроля температуры ППИ [5]: замеряется температура корпуса в центре его основания, затем делается соответствующая поправка на перепад температур крышка–основание корпуса и определяется нагрев крышки. Данный способ на практике трудоемок, поскольку требует использования тепловой модели, имеющей некоторые ограничения. Кроме того, расчетная температура крышки корпуса существенно отличается от реальной из-за различных конструкций корпусов и способов их охлаждения (обдув, использование радиатора, водяное охлаждение и др.). Данный способ не позволяет с уверенностью утверждать, что потребитель превысил предельно допустимую температуру.

Разработан метод прогнозирования нагрева кристалла по температуре на крышке корпуса ППИ [6].

**Таблица 1.** Температура нагрева ППИ

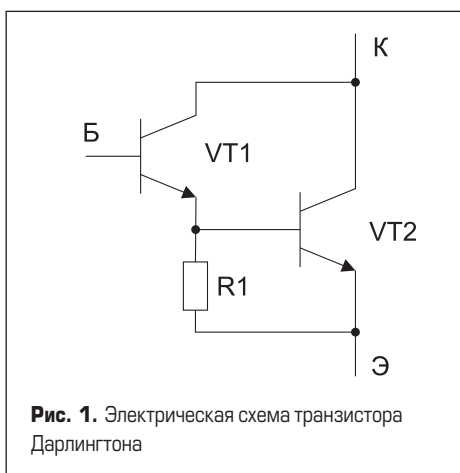
Полупроводниковые изделия		Температуры нагрева приборов $T_{max}$ , °C
Диоды	$U_{обр} \leq 1600$ В	190
	$U_{обр} \leq 2800$ В	175
	$U_{обр} \leq 4000$ В	150
Стабилитроны		140
Тиристоры	лавинные	140
	нелавинные	125
	быстродействующие	110
	симисторы	125
Транзисторы	биполярные кремниевые	200
	биполярные германиевые	85–100
	полевые МДП	150
	полевые с управляющим переходом	125–175

В соответствии с этим способом сначала с помощью термопары измеряется температура кристалла, а после герметизации корпуса металлической крышкой измеряется температура на ней. Прогнозирование температуры нагрева кристалла ППИ в условиях эксплуатации электронной аппаратуры осуществляется по корреляционно-регрессивной зависимости между температурой на кристалле и крышке корпуса, причем данный способ позволяет контролировать температуру на корпусах только с тонкой металлической крышкой. Следует отметить, что методика прогнозирования температуры кристалла по температуре на крышке корпуса ИС в условиях эксплуатации электронной аппаратуры достаточно сложна для практического применения.

На этапе отработки технологии изготовления новых ППИ нами предлагается экспресс-метод контроля предельно допустимой температуры, заключающийся в том, что на крышку корпуса прибора наносят навеску припоя, температура плавления которого выше предельно допустимой температуры изделия [7].

В случае превышения предельно допустимой температуры нагрева ППИ припой на крышке корпуса расплавляется. По внешнему виду навески припоя (площадь и угол смачивания) определяют фактическую температуру нагрева крышки корпуса.

В таблице 1 приведены некоторые типы ППИ и предельно допустимые температуры их нагрева при эксплуатации [3].



**Рис. 1.** Электрическая схема транзистора Дарлингтона

В таблице 2 приведены составы и температуры плавления припоев, которые можно использовать для контроля температуры на крышке ППИ. Из таблицы 2 видно, что в составе припоев отсутствуют свинец и кадмий. Это связано с тем, что с 1 июля 2006 г. введена в действие резолюция Европейского Союза RoHS о запрете использования данных металлов в производстве изделий микроэлектроники [8–10].

Таким образом, подобрав припой или металлы с необходимой температурой плавления, можно с достаточной точностью определить температуру на крышке ППИ.

### Определение температуры нагрева кристалла транзистора Дарлингтона

Для упрощения и повышения точности определения теплового сопротивления транзистора Дарлингтона разработан способ [11], заключающийся в выборе термочувствительного параметра и диапазона времени его измерения. В качестве термочувствительного параметра используется напряжение коллектор-эмиттер транзистора, а время его измерения после отключения греющей мощности определяется временем выключения

**Таблица 2.** Состав припоев и температура плавления

Состав припоев	Температура полного расплавления, °C
66In/34Bi	72
58Bi/25Sn/17In	79
58Bi/17Sn/25In	79
52,2In/46Sn/1,8Zn	108
52In/48Sn	118
58Bi/42Sn	138
57Bi/43Sn	139
97In/3Ag	141
97In/3Zn	143
60Bi/40Sn	150
95In/5Al	151
99In/1Cu	153
60Sn/40Bi	170
70Bi/30Sn	175
70Sn/30Bi	190
91Sn/9Zn	199
89Sn/8Zn/3Bi	199
80Bi/20Sn	200

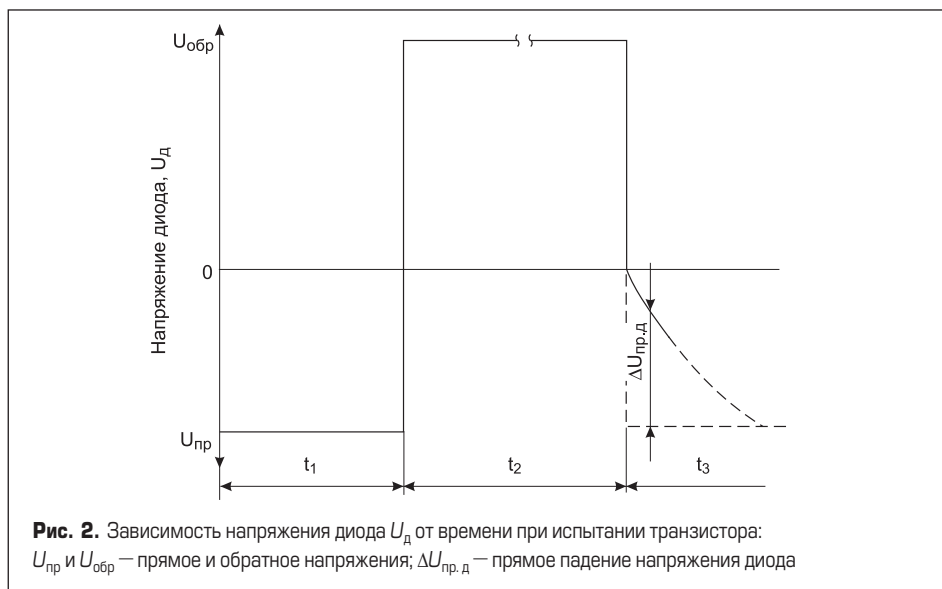
транзистора и тепловой постоянной транзисторной структуры [12, 13].

Транзистор Дарлингтона — это составной транзистор *n-p-n*-типа со встроенным диодом, катод которого соединен с коллектором (рис. 1). Встроенный диод располагается под эмиттерной площадкой. Поэтому для определения температуры нагрева кристалла был использован термочувствительный параметр  $U_{пр.д}$  (прямое напряжение диода).

На рис. 2 представлена зависимость напряжения  $U_d$  от времени при испытании транзистора. Температура окружающей среды во время испытаний составляла 25 °C.

В течение интервала времени  $t_1$  на выводы испытуемого транзистора подается ток постоянной величины  $I_{обр} = 10$  мА. На встроенном диоде происходит падение напряжения  $U_{пр} = 600$  мВ. При измерении теплового сопротивления переход между подложкой и изолирующим слоем в интервале  $t_1$  открыт. Это создает на переходе прямое смещение, что приводит к падению напряжения  $U_1$ .

В течение интервала времени  $t_2$  на транзистор подается напряжение питания  $U_2 = 40$  В. При этом



**Рис. 2.** Зависимость напряжения диода  $U_d$  от времени при испытании транзистора:  $U_{пр}$  и  $U_{обр}$  — прямое и обратное напряжения;  $\Delta U_{пр.д}$  — прямое падение напряжения диода

величина тока коллектора составляет 3 А, следовательно, разогревающая мощность равна 120 Вт. Время  $t_2 = 150$  мс обеспечивает максимальную чувствительность проверки на наличие дефектов (пустот) пайки кристалла к основанию корпуса.

Через 150 мс напряжение  $U_2$  снимается с испытуемого транзистора и в течение интервала времени  $t_3$  (равного 130 мкс) пропускается обратный ток постоянной величины  $I_{обр} = 10$  мА (как и до нагрева). За время  $t_3$  из-за перегрева перехода происходит уменьшение напряжения  $U_3$  между подложкой и изолирующим слоем. Разность напряжений  $\Delta U_d = U_1 - U_3$  прямо пропорциональна увеличению температуры в зоне напайки кристалла на основание корпуса.

Кривая зависимости падения напряжения от температуры определялась экспериментально, путем нагрева приборов в камере при  $I_{ЭБ} = 10$  мА.

После снятия через каждые 10 °С зависимости напряжения  $U_{пр.д}$  от температуры кривизна снижения напряжения  $S$  (мВ/°С) составила  $S = \Delta U_{пр.д} / \Delta T = 1,95$ .

Температура нагрева  $\Delta T$  определяется из выражения  $\Delta T = (1/S) \Delta U_{пр.д}$ .

Реальная температура нагрева кристалла  $T_{кр}$  составит  $T_{кр} = \Delta T + T_{ср}$ .

В таблице 3 приведена температура нагрева кристаллов некоторых типов биполярных транзисторов в корпусе КТ-43В в зависимости от площади пустот в паяных швах «кристалл-корпус». Явной зависимости температуры нагрева кристалла от площади спая нет.

Термочувствительным параметром у биполярных транзисторов, как известно, является переход база-эмиттер. Поэтому значение падения напряжения на переходе между подложкой и изолирующим слоем дает среднее значение температуры перехода, поскольку не все участки транзистора рассеивают одинаковую мощность. Более точное измерение температуры возможно на участке кристалла, где расположен измерительный диод.

Анализ рентгенограмм паяных соединений «кристалл-корпус», полученных в одних и тех же режимах, показал, что пустоты в паяном шве могут быть на различных участках: в центре кристалла, по периметру и т. п. Отсюда следует, что если измерительный диод находится непосредственно над непропаянным участком шва, то величина теплового сопротивления, как правило, выше допустимого значения. И наоборот, встречаются приборы, имеющие площадь непро-

паев 10–30%, но мощность рассеивания лежит в пределах допустимых значений. В этом случае измерительный диод находится над участком паяного шва, не имеющего дефектов [14].

### Определение площади пустот в паяном соединении «кристалл-корпус» по рентгенограммам

Одним из наиболее опасных дефектов являются непропаи. Пустоты в паяном шве приводят как к снижению механической прочности соединения, так и к ухудшению теплопередачи (повышению теплового сопротивления кристалл-корпус) и локальному повышению температуры в местах расположения дефектов. Последнее особенно актуально для силовых полупроводниковых приборов, коммутирующих значительные токовые нагрузки и напряжения и, следовательно, рассеивающих большое количество тепла. В экстремальных условиях эксплуатации при повышенных (или пониженных) температурах наличие непропаев вызывает перегрев кристалла и выход изделия из строя вследствие теплового пробоя.

Для обнаружения непропаев и других дефектов паяных швов применяют рентгенографию, холестерические кристаллы, контроль ИК-лучами, измерение теплового сопротивления между кристаллом и корпусом и другие методы. Полученные данные сравнивают с эталонным образцом.

Критерием качества пайки кристалла к основанию корпуса ППИ может служить площадь непропаев по отношению ко всей площади кристалла. Выявить наличие и величину пустот в паяном шве возможно с помощью широко применяемой рентгеноскопии. Однако в связи с большим разнообразием формы и размеров пустот возникают сложности с точным определением по рентгенограмме их площади.

При контроле с использованием рентгеновской пленки выявляемость дефектов зависит от качества негатива, которое определяется оптической плотностью, контрастностью и резкостью изображения. Его оценивают с помощью эталонов чувствительности, которые бывают

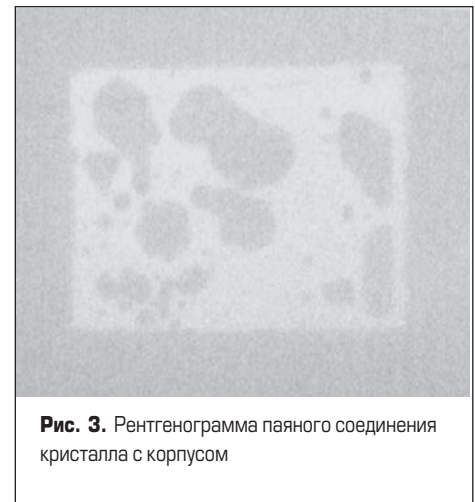


Рис. 3. Рентгенограмма паяного соединения кристалла с корпусом

пластинчатые (с канавками) или проволочные. При просвечивании детали эталоны помещают на контролируемый участок со стороны источника излучения. Чувствительность радиографических методов определяется наименьшим размером выявляемого дефекта в направлении просвечивания и обычно выражается в процентах по отношению к толщине просвечиваемого материала [15]:

$$S = (\Delta h100)/(d + h); S = (\Delta h100)/(d + d_0),$$

где  $\Delta h$  — глубина наименьшей видимой канавки пластинчатого эталона;  $d_0$  — диаметр наименьшей видимой проволоки проволочного эталона;  $h$  — толщина пластинчатого эталона.

Существующие методы подсчета площади непропаев весьма трудоемки.

Нами разработана методика автоматического подсчета площади непропаев, позволяющая уменьшить трудоемкость и повысить достоверность контроля. Данный способ изложен на примере контроля качества паяных соединений, однако предложенную методику можно успешно использовать также для определения площади дефектов в материалах и сварных соединениях.

Последовательность операций обработки рентгенограмм следующая:

1. Сканируем рентгенограмму.

Таблица 3. Температура нагрева кристалла в зависимости от площади спая с корпусом

Исследуемые приборы	Площадь спая кристалла с корпусом, %	Температура нагрева кристалла, °С
1	100	100
2	90	100
3	100	124
4	95	124
5	89	140
6	91	140
7	100	150
8	86	150
9	91	163
10	90	163
11	91	190
12	85	200
13	85	200
14	85	200

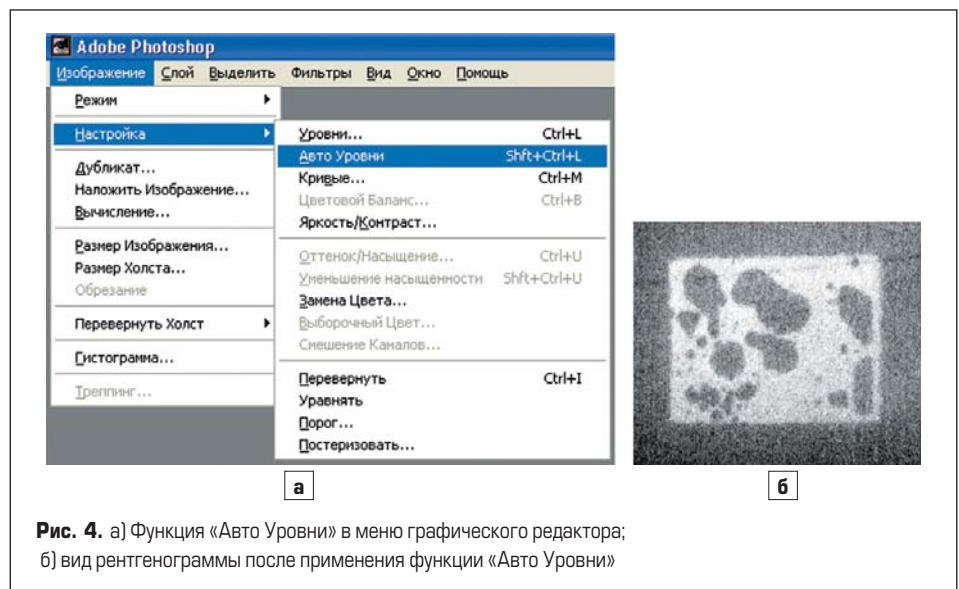


Рис. 4. а) Функция «Авто Уровни» в меню графического редактора; б) вид рентгенограммы после применения функции «Авто Уровни»

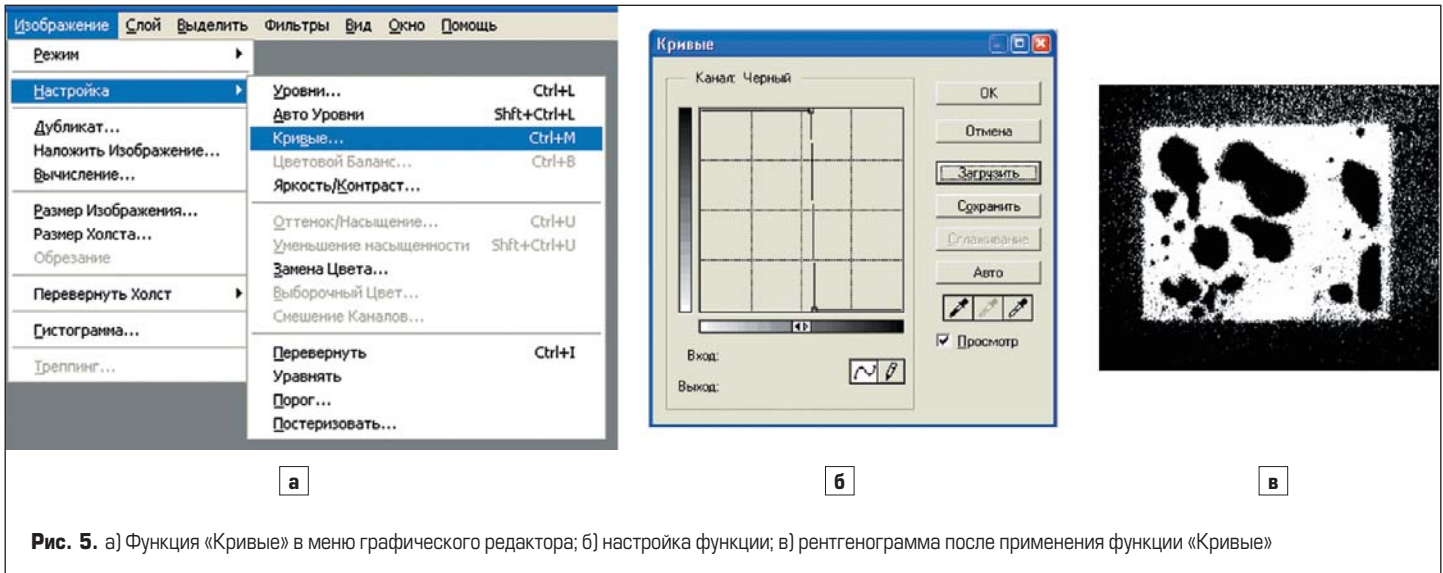


Рис. 5. а) Функция «Кривые» в меню графического редактора; б) настройка функции; в) рентгенограмма после применения функции «Кривые»

- Открываем полученное изображение в графическом редакторе Adobe Photoshop (рис. 3).
- Применяем стандартную функцию «Авто Уровни» (рис. 4).
- Применяем стандартную функцию «Кривые» (рис. 5).
- Обрезаем область вокруг кристалла (рис. 6) и смотрим на гистограмме процент черного цвета нулевого уровня (рис. 7).



Рис. 6. Область кристалла

Таким образом, площадь непропаев составила 33,56% от общей площади кристалла. Как видно, описанный автоматизированный способ подсчета площади непропаев достаточно прост, достоверен и эффективен. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 08-08-99033.

Литература

- Моряков О. С., Вихров С. А. Методы и средства измерения температуры в полупроводниковом производстве. Обзор. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. № 4. М.: ЦНИИ «Электроника». 1987.
- Тилл У., Лаксон Дж. Интегральные схемы: материалы, приборы, изготовление / Пер. с англ. М.: Мир. 1985.
- Тугов Н. М., Глебов Б. А., Чарыков Н. А. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов / Под ред. В. А. Лабунцева. М.: Энергоатомиздат. 1990.
- Горлов М. И., Данилин Н. С. Физические основы надежности интегральных схем. М.: МАКС Пресс. 2008.

- Закс Д. И., Наговицына Л. Ф. Контроль теплового режима ИС по температуре корпуса // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника. 1987. № 2.
- Мадера А. Г., Резников Г. В. Прогнозирование температуры кристалла по температуре на крышке корпуса ИС // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника. 1987. № 1.
- Горлов М. И., Зенин В. В., Хишко О. В. Оценка температуры нагрева полупроводникового изделия // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2007. Том 3. №4.
- Зенин В. В., Беляев В. Н., Сегал Ю. Е., Колбенков А. А. Бессвинцовые припои в технологии производства изделий микроэлектроники // Микроэлектроника. 2003. Том 32. № 4.
- Медведев А. М. Бессвинцовые технологии монтажной пайки. Что нас ожидает? // Электронные компоненты. 2004. № 11.
- Шапиро Л. Внедрение европейской директивы RoHS // Электронные компоненты. 2006. № 1.
- А.с. № 1681283 (СССР), МКИ<sup>5</sup> G 01 R 31/26. Способ определения теплового сопротивления транзистора Дарлингтона / Г.М. Семенов, А. В. Матанов, Ю. П. Сидоренко // Бюл. 1991. № 36.
- Зигель Б. Измерение теплового сопротивления — ключ к обеспечению нормального охлаждения полупроводниковых компонентов // Электроника. 1978. №1.
- Зигель Б. Электрический метод быстрой проверки качества напайки кристалла // Электроника. 1979. №8.
- Зенин В. В., Сегал Ю. Е., Набока В. П., Колбенков А. А. Нагрев мощного полупроводникового прибора в зависимости от качества пайки кристалла с основанием корпуса // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: материалы докл. междунар. науч.-техн. семинара. М., 2001.
- Неразрушающий контроль металлов и изделий: Справочник / Под ред. Г. С. Самойловича. М.: Машиностроение. 1976.

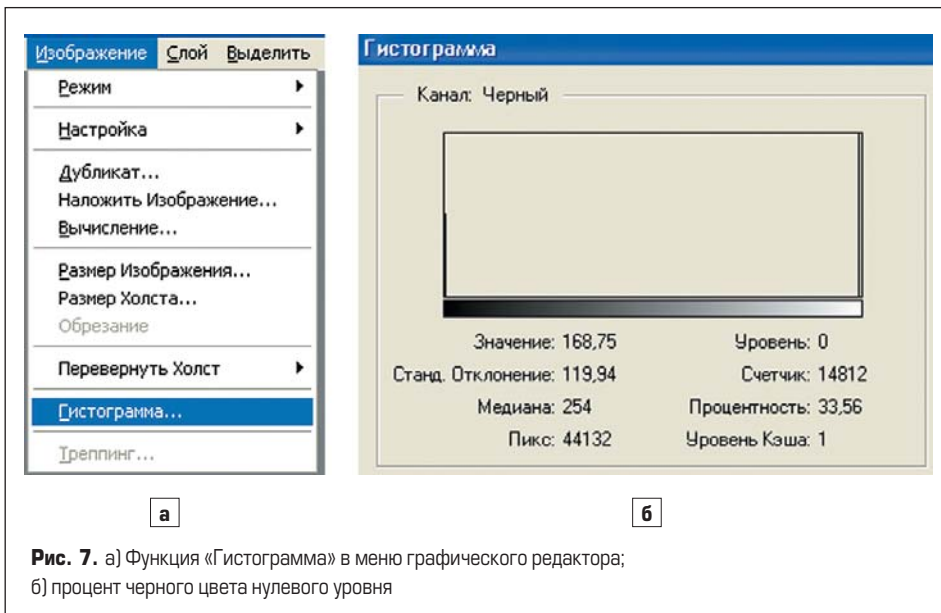


Рис. 7. а) Функция «Гистограмма» в меню графического редактора; б) процент черного цвета нулевого уровня