

Антон Шаракшанэ | anton@colorindex.ru

Практический тепловой менеджмент

Некоторые результаты практических работ по термометрии и прогнозированию температур в светодиодной светотехнике.

Ошибки теплового менеджмента

Примером ошибки теплового менеджмента является совместное использование мощных светодиодов, текстолитовой печатной платы и соединения платы с радиатором через теплопроводящий скотч (рис. 1). Тепловое сопротивление участка скотча большой площади невелико, но при использовании текстолитовой платы в теплопередаче задействован малый участок платы вокруг диода и, соответственно, малый фрагмент скотча. Если в теплопередаче участвует 1 см^2 скотча (оптимистичная оценка) толщиной $0,25 \text{ мм}$ и теплопроводностью $0,6 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, тепловое сопротивление этого участка составит около 4 К/Вт , что немало, но приемлемо до тех пор, пока это значение сохраняется.

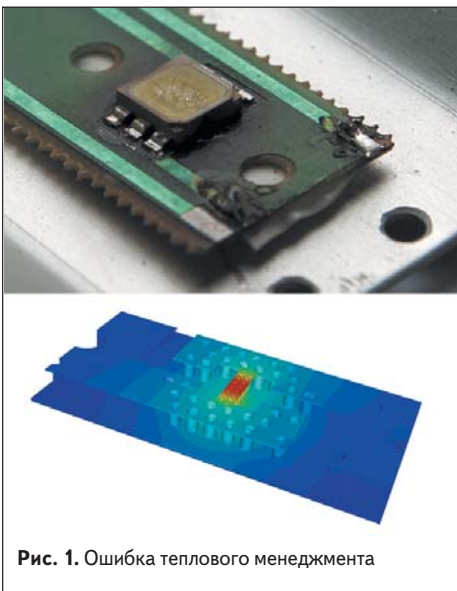


Рис. 1. Ошибка теплового менеджмента

При повышенной температуре скотч постепенно высыхает, адгезия снижается. Печатная плата упруго деформируется, и ее краевой сегмент отделяется от радиатора. Алюминиевая плата отвела бы тепло латерально и передала в радиатор через участок сохранившегося теплового контакта, но текстолитовая плата с медными слоями приемлемой толщины

(до 70 мкм) отводить тепло от диода латерально не способна. В результате светодиод перегрелся, первичная оптика растрескалась, разрушив внутренние проводники диода, светодиод сгорел «в разрыв» и светильник вышел из строя.

Тепловой анализ методом конечных элементов показывает, что теплопроводящие металлизированные отверстия эффективно проводят тепло через плату и обеспечивают приемлемый тепловой режим светодиодам до $0,5 \text{ Вт}$ без радиатора или до 1 Вт с радиатором при наличии гарантированного теплового контакта «плата–радиатор». Но даже большое количество металлизированных отверстий не улучшает способность платы проводить тепло латерально.

Условно надежный контакт печатной платы со светодиодами и радиатора через теплопроводящую пасту, даже если паста со временем не превратится в песок, может быть при использовании подпружиненного соединения. Но при локальном ухудшении теплового контакта платы с радиатором температура диода резко вырастет. Поэтому одновременное использование текстолитовых печатных плат и теплопроводящих паст противопоказано.

Пример ошибки контроля температуры

На выставках приходится наблюдать специалистов, которые подходят к светильнику, прикладывают палец к светодиоду, а через секунду отдергивают со словами «Ой, горячо! Да у вас плохой теплоотвод». Эта «проверка» некорректна, поскольку современные осветительные светодиоды при токе 350 мА имеют $100\text{--}120 \text{ лм}$ светового потока, что при LER (Luminaire Efficacy Rating) типичного белого светодиода 300 лм/Вт соответствует $0,4\text{--}0,5 \text{ Вт}$ мощности светового потока. Палец нельзя даже одну секунду удерживать на диоде, не получив ожога.

Полезней дотронуться до алюминиевой платы рядом с диодом. Если удастся удержать палец на поверхности, значит, здесь температура не более $+60 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура кристалла не выше $+80 \text{ }^\circ\text{C}$ (так как произведение тепловой

мощности диода на тепловое сопротивление корпуса редко превышает $10\text{--}20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Регулярно приходится наблюдать продавцов, предлагающих покупателям коснуться радиатора: «Пощупайте, он не горячий, значит теплоотвод хороший». Это заключение также неверно — температура тепловыделителя (светодиода) на радиаторе зависит не только от температуры поверхности радиатора, но и от теплового сопротивления между светодиодом и поверхностью радиатора. Великолепный радиатор останется холодным, но не спасет светодиод, если не будет обеспечен хороший тепловой контакт печатной платы с радиатором.

Кроме того, ощущение при прикосновении пальцем к горячей поверхности сильно зависит от ее теплопроводности. Так, в бане мы спокойно касаемся рукой деревянной скамьи, но металлический коврик с той же скамьи берем через тряпку. Тепловой же поток в воздух при малых мощностях от теплопроводности поверхности практически не зависит.

Ошибки при измерении термодатчиком мелких тепловыделяющих элементов

Наиболее частая ошибка — недооценка температур мелких тепловыделяющих элементов в схеме. Пирометром определяется средняя температура пятна значительной площади, при этом максимальная температура в этом пятне может быть значительно выше средней (рис. 2).

Термопара также может сослужить плохую службу. Плохой тепловой контакт большого шарика спая с маленьким горячим объектом в сочетании со значительной радиаторной



Рис. 2. Пирометр показывает усредненную температуру большой площади

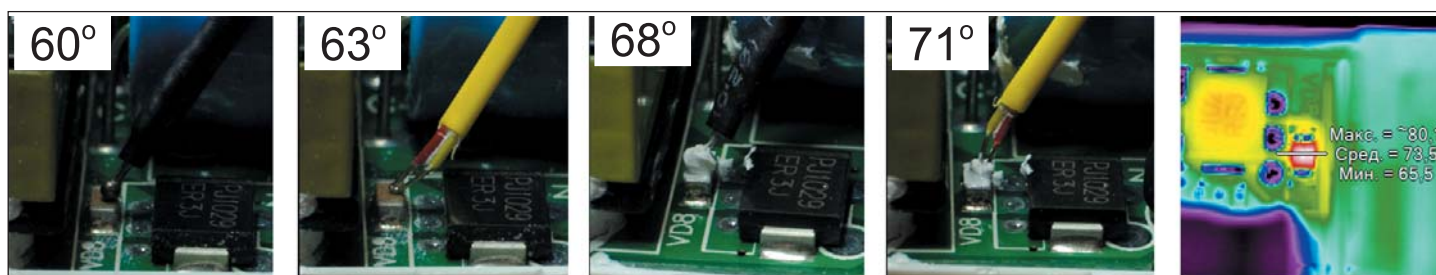


Рис. 3. Измерение температуры малого тепловыделяющего элемента на плате термомпарами разных размеров (сухими и смоченными КПТ-8) и тепловизором (все измерения проводились в один сеанс после термостабилизации)

ролю проволок приведет к существенному занижению определяемой температуры. Тепловизор позволяет оценить температуру маленького тепловыделяющего элемента более точно (рис. 3).

Выбор тепловизора

Температуры маленьких тепловыделяющих элементов удобно определять с помощью тепловизора достаточной разрешающей способности. Его высокая стоимость определила попытку превратить в тепловизор цифровой фотоаппарат Canon 10D путем демонтажа ИК-фильтра, закрывающего матрицу.

Фильтр с матрицы не удалось снять без повреждения, фотоаппарат погиб, но полученный опыт показал, что съемка таким самодельным устройством возможна только в темноте, либо необходимо подбирать фильтр, пропускающий ИК-излучение, но отсекающий видимый свет (например, из кусочка засвеченного слайда). Но даже и при таком условии матрица фотоаппарата чувствительна лишь к ближнему ИК (ориентировочно до 1000 нм), поэтому тепловое излучение фотоаппарат начинает воспринимать при температурах выше +300 °С, при которых максимум спектра теплового излучения находится в области ближнего ИК. При еще больших температурах спектр теплового излучения расширится в область видимого диапазона, и такое тепловое излучение начнет восприниматься человеческим глазом (так называемое «красное каление»).

Но так как максимум теплового излучения при характерных для светодиодной светотехники температурах +80...+100 °С приходится ориентировочно на 8000 нм, фотоаппарат без ИК-матрицы в светотехнике оказывается бесполезен. Было принято решение покупать промышленный тепловизор (рис. 4).

Критерии выбора тепловизора: привлекательная картинка, возможность определения температуры кристалла, высокое разрешение в совокупности с возможностью сфокусироваться на близкой дистанции. Для выбора определенной модели одни и те же тестовые объекты были тепловизированы аппаратами SAT HotFind-E8, SAT HotFind-L, Fluke Ti32, Testo 882 и Testo 881 (рис. 5–10).

Точность определения температуры не определялась, сравнивались комфортность работы,

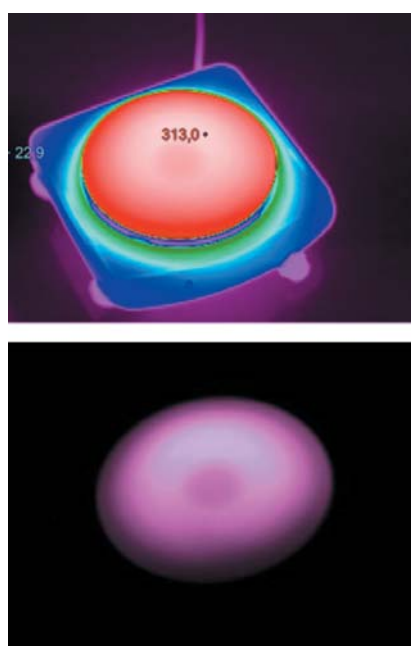


Рис. 4. Термограмма одного объекта, снятая Fluke Ti32 и Canon 10D без ИК-матрицы

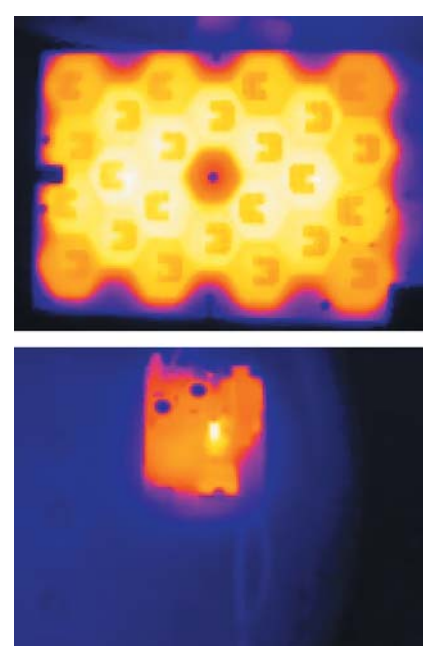


Рис. 6. SAT HotFind-L, 160×120

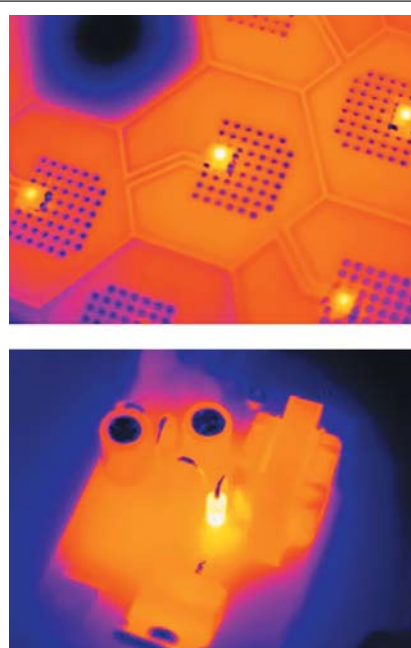


Рис. 5. SAT HotFind-E8, 384×288

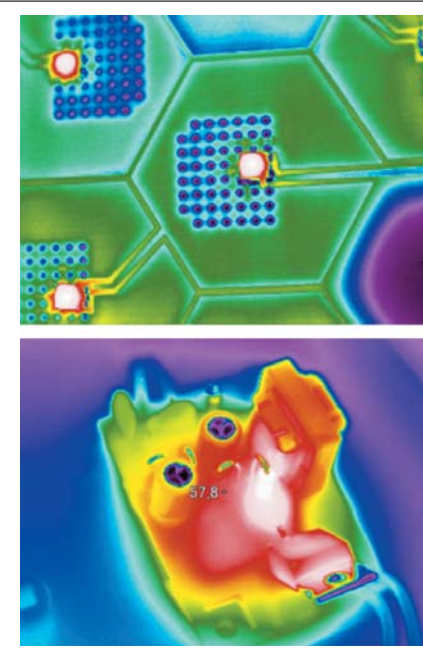


Рис. 7. Fluke Ti32, 320×240

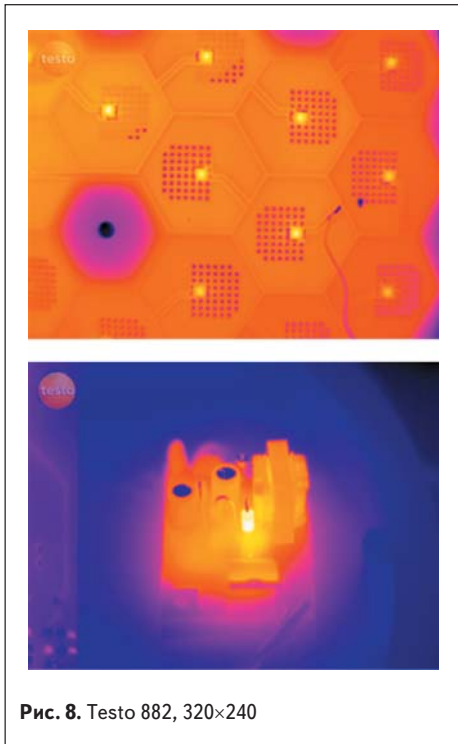


Рис. 8. Testo 882, 320×240

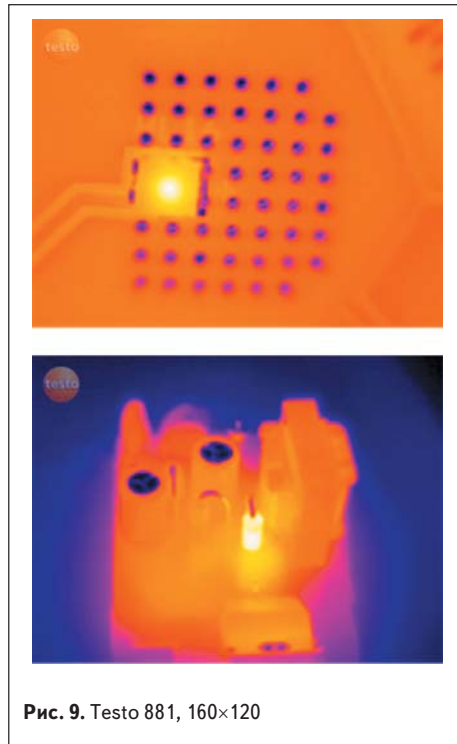


Рис. 9. Testo 881, 160×120

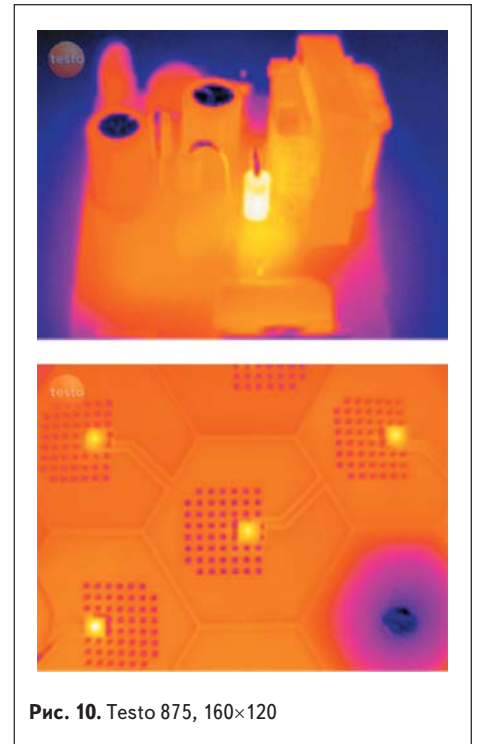


Рис. 10. Testo 875, 160×120

«красота» картинки и возможность наблюдать градиенты температур мелких деталей.

Выводы: разрешающая способность тепловизора при съемке мелких деталей определяется не разрешением матрицы, а возможностью сфокусироваться на близком расстоянии. Например, дистанция фокусировки SAT HotFind-L в несколько раз больше аналогов, и распределение

температур по объекту показывается лишь «в общих чертах». Старшая же модель SAT имеет самое высокое разрешение среди моделей в обзоре, но не самое высокое качество картинки. Тепловизоры Testo почти не уступают по качеству картинки, но успешно конкурируют по цене с аналогичными по разрешению моделями Fluke. Дополнительный длиннофокусный объектив сужает поле зрения, но не увеличивает разрешающую способность, так как увеличивает минимальную дистанцию фокусировки.

Если требуется наиболее симпатичная картинка, не будет ошибкой выбрать самую дорогую модель из представленных — Fluke Ti32. И именно этот выбор был сделан. Единственный существенный недостаток Fluke Ti32, определившийся

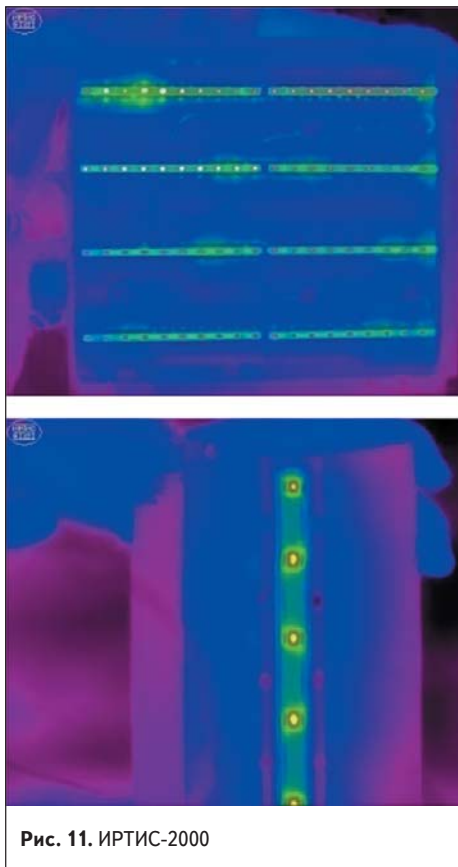


Рис. 11. ИРТИС-2000

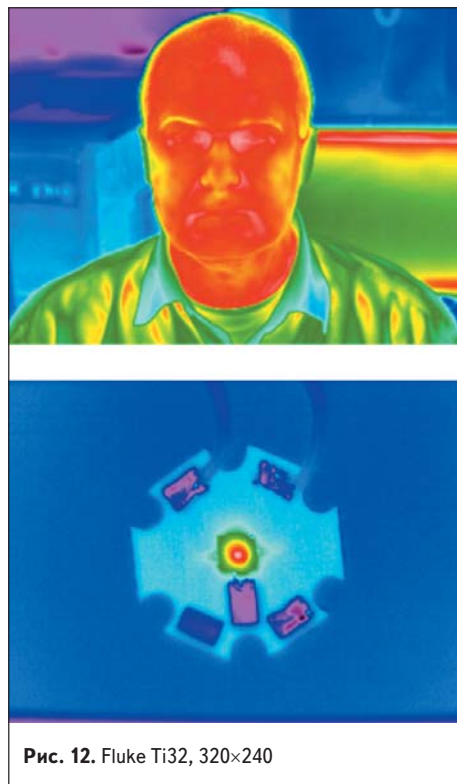


Рис. 12. Fluke Ti32, 320×240

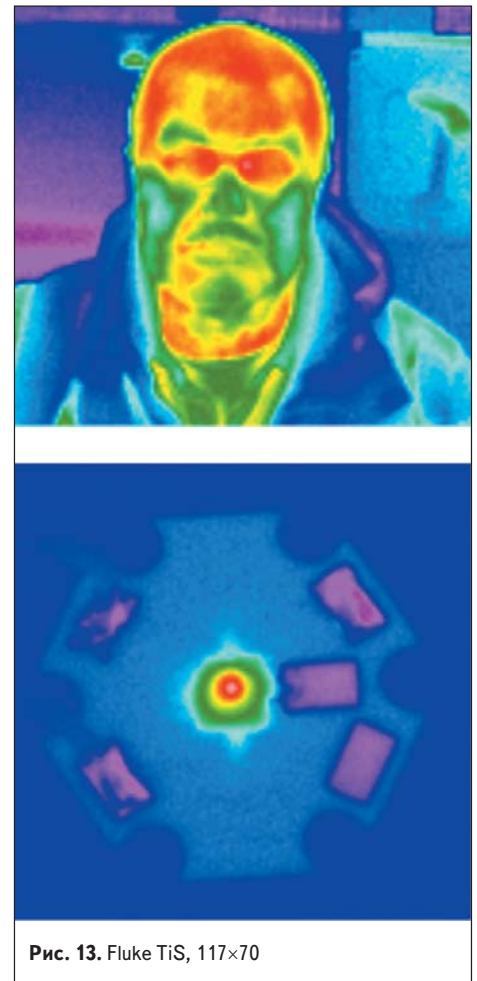


Рис. 13. Fluke TiS, 117×70

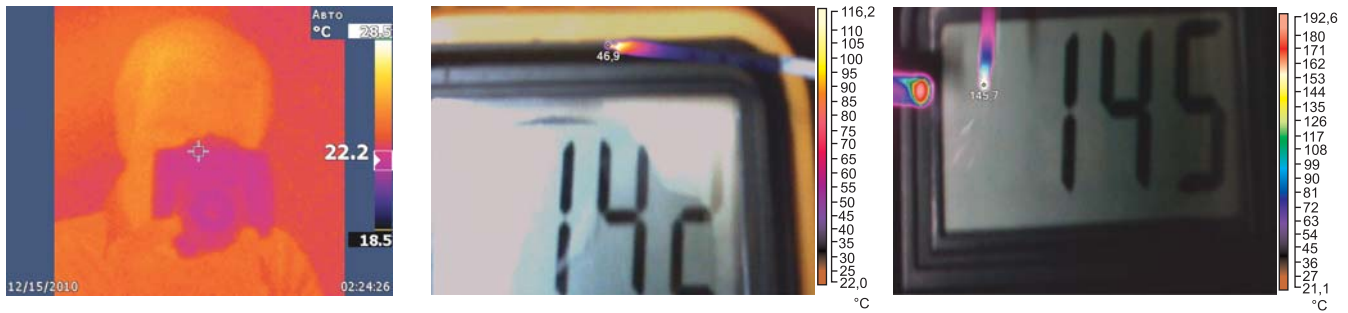


Рис. 14. Зеркальные отражения ИК-излучения в хорошо отражающих поверхностях приводят к ошибкам измерения

в процессе эксплуатации, — самопроизвольная неотключаемая калибровка каждые несколько секунд, мешающая наблюдать быстропротекающие процессы, например напайку светодиода на печатную плату.

В отдельном эксперименте светодиодный светильник тепловизирован отечественным сканирующим тепловизором ИРТИС-2000 (рис. 11). Этот прибор перед работой необходимо заливать жидким азотом, что позволяет определять температуры с высокой точностью.

Отдельно проведено сравнение Fluke Ti32 с бюджетным Fluke TiS (рис. 12, 13). Эти модели различаются по цене примерно в четыре раза.

Вывод из сравнения Ti32 и TiS: качество изображения при съемке общих планов значимо выше на Fluke Ti32, но для определения температур мелких деталей с не меньшим успехом можно использовать недорогой TiS, компенсирующий малое разрешение матрицы возможностью сфокусироваться на близкой дистанции и не раздражающий постоянной перекалибровкой.

Зеркальное отражение ИК-излучения

Наиболее частая ошибка при использовании тепловизора — измерение температур металлических поверхностей без учета коэффициента поглощения ϵ . Для крашенных или неметаллических поверхностей этот коэффициент близок к 0,95, и настройки тепловизора по умолчанию позволяют определить температуру с приемлемой точностью. Если коэффициент ϵ неизвестен, можно термостабилизировать объект при повышенной известной температуре, сфотографировать его тепловизором и, изменяя в настройках просмотрщика величину ϵ , добиться совпадения значений температур. Полученное значение ϵ для данного покрытия может быть использовано при последующих измерениях.

Для блестящих металлических поверхностей ϵ гораздо меньше единицы, и поверхность работает «зеркалом»: вместо собственного теплового излучения отражает тепловое излучение окружающей среды. В некоторых случаях испытатель, направив тепловизор на исследуемую поверхность, может увидеть на ней собственное тепловое отражение. Значения температуры поверхности по данным тепловизора в таком случае, разумеется, являются бессмысленными. Чистый стальной шарик спая термопары, подогреваемый потоком воздуха из паяльной

станции, является зеркалом для ИК-излучения: тепловизор определяет среднюю температуру между истинной температурой шарика и температурой окружающей среды. Температуру шарика спая термопары, покрытого КППТ-8, тепловизор определяет достаточно точно (рис. 14).

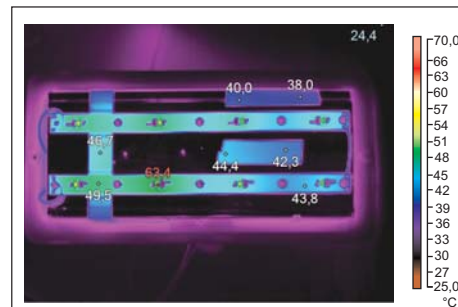


Рис. 15. Использование изолянты для тепловизирования некрашенных металлических поверхностей

Производители тепловизоров продают изолянту с известным коэффициентом ϵ для наклеивания на металлические поверхности с целью точного определения ее температуры. Но ничто не мешает самостоятельно измерить ϵ имеющейся изолянты и использовать в тех же целях (рис. 15). А можно без измерения принять для изолянты $\epsilon = 0,95$ — для большинства практических целей этого достаточно.

Прогнозирование температуры радиатора

Тепловое сопротивление радиатора — это отношение разницы температур самой го-

рячей его точки (обычно под посаженным над радиатором тепловыделяющим элементом) и окружающей среды к рассеиваемой мощности. Оно складывается из теплового сопротивления толщи материала радиатора (в большинстве случаев незначительной) и теплового сопротивления поверхности радиатора:

$$R = (T_0 - T_a) / W.$$

В простейшей модели плоский радиатор без принудительной вентиляции отдаст в воздух с единицы площади поверхности S тем большую тепловую мощность Q , чем выше разница температур поверхности радиатора и окружающей среды ΔT . Эта зависимость выражается следующей формулой:

$$Q = k \times S \times \Delta T,$$

где коэффициент k — коэффициент теплопередачи.

Эта формула полезна тем, что позволяет определять необходимую радиаторную площадь, зная тепловую мощность, которую должен отвести радиатор, и допустимую величину разницы температур поверхности радиатора и окружающей среды.

Для определения коэффициента теплоотдачи поставлена серия экспериментов с измерением температур модельных радиаторов, рассеивающих контролируемую мощность (рис. 16). В алюминиевых брусках различных размеров, некрашенных и покрытых краской разных цветов, было просверлено по два канала. В один канал погружалась термопара, в другой — резистор с известной выделяемой мощностью $W = IU$. Мощность тепловыделения изменялась,

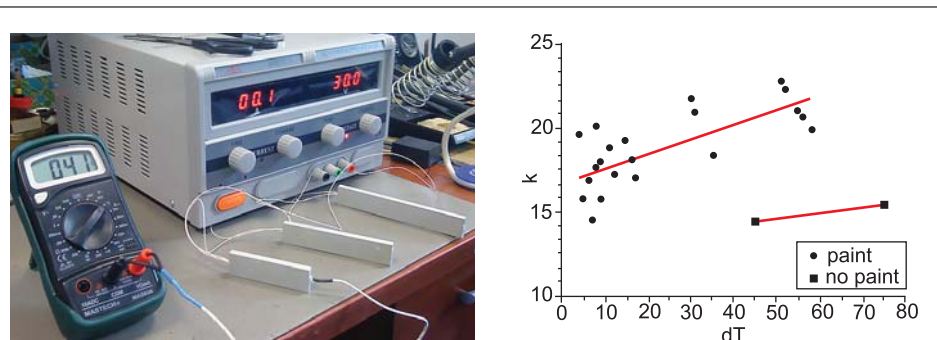


Рис. 16. Определение коэффициента теплоотдачи

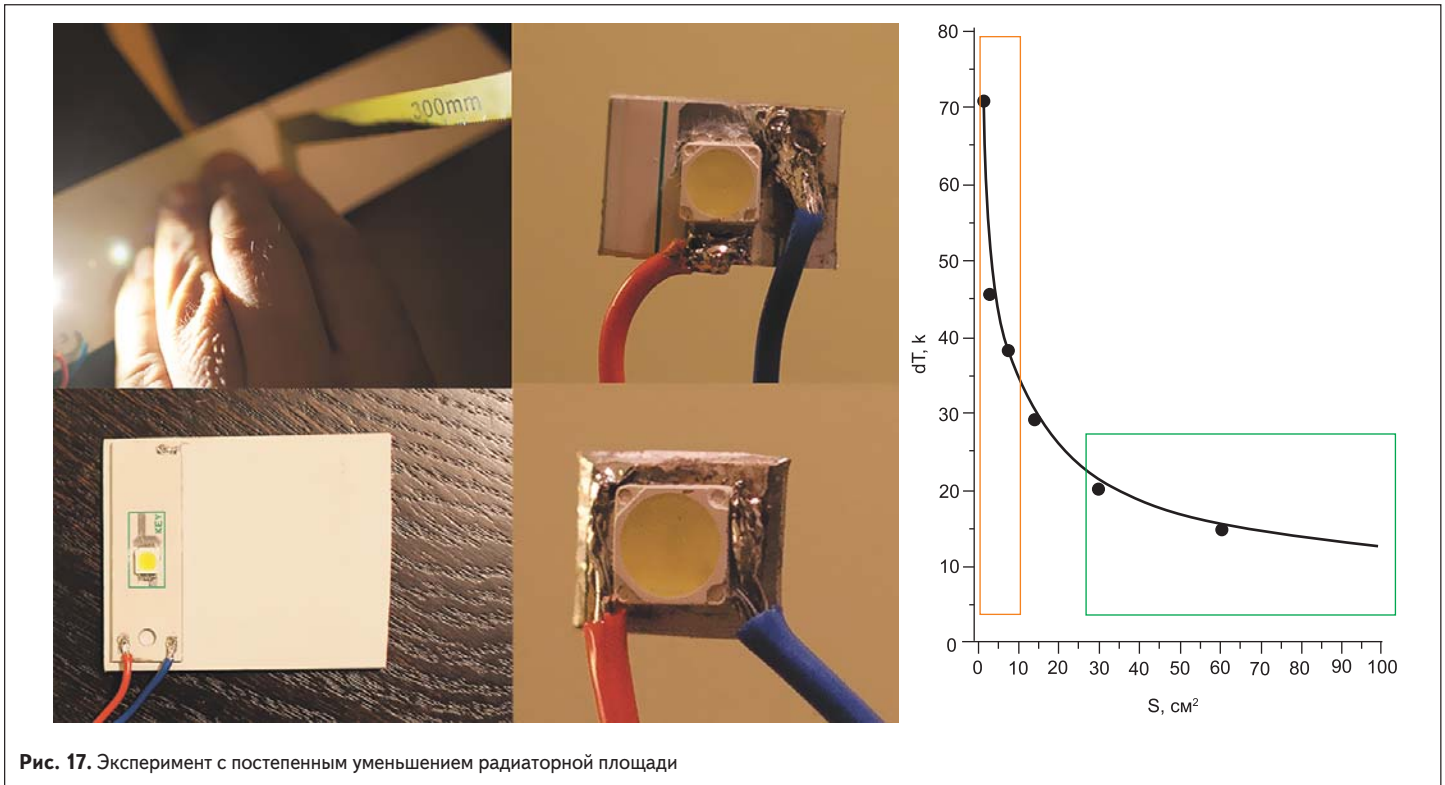


Рис. 17. Эксперимент с постепенным уменьшением радиаторной площади

температуры после установления теплового равновесия фиксировались, строились графики зависимости коэффициента теплоотдачи k [Вт/м²·°С] от разницы температур с окружающей средой ΔT . Определена зависимость $k = 16 + 0,1\Delta T$.

Основные выводы:

- коэффициент теплоотдачи от ориентации радиатора зависит слабо;
- второй член в уравнении теплопередачи ($+0,1\Delta T$) для некрашеного металла можно не учитывать;
- цвет краски на коэффициент теплоотдачи не влияет.

Популярное предположение о значительном тепловом сопротивлении слоя краски и повышении температуры крашеного радиатора смехотворно и опровергается элементарным расчетом по формуле теплового сопротивления:

$$R = h/\gamma S,$$

где: h — толщина слоя краски; S — площадь краски; γ — теплопроводность материала. Произведение этого значения на рассеиваемую мощность является перепадом температуры на краске и во всех практических случаях может быть приравнено к нулю из-за огромной площади краски по сравнению с ее толщиной.

Слабо теплопроводящие краски существуют, и могут, например, защитить палец от ожога при прикосновении к горячему радиатору, но не мешают отводить в воздух тепловые потоки с радиатора хоть сколько-нибудь значительной площади.

Для радиаторов простой формы фактор некоторого увеличения коэффициента теплоотдачи с увеличением температуры радиатора

компенсируется тем, что температура радиатора вдали от светодиода несколько ниже. Поэтому для практических расчетов необходимой радиаторной площади достаточно принимать чуть заниженное значение $k = 15$ Вт/м²·°С.

Это значение коэффициента теплоотдачи подтверждено в эксперименте с уменьшением радиаторной площади под одноваттным светодиодом методом постепенного уменьшения площади радиатора (рис. 17).

Основные выводы:

- одноваттный светодиод нуждается не менее чем в 10 см² радиаторной площади;
- увеличение радиаторной площади с 10 до 30 см² существенно уменьшает температуру кристалла;
- увеличение радиаторной площади с 30 до 100 см² полезно, но не обязательно;
- увеличение радиаторной площади более 100 см² на один рассеиваемый ватт не приводит к снижению температуры кристалла.

Это же значение коэффициента теплоотдачи многократно опробовано в расчетах радиаторов сложных форм и дает хорошее совпадение с экспериментом при условии использования в расчетах не полной, а обтянутой площади радиатора (т. е. площади эластичной пленки, которой можно мысленно обтянуть радиатор). Это не означает, что внутренние поверхности ребер совсем не отдают тепло в воздух, но свидетельствует о том, что в реальной расчетной практике эти тепловые потоки можно не учитывать, а при конструировании радиаторов нет смысла без иных причин усложнять их форму.

Радиаторы сложной формы с высокими ребрами либо используются совместно с принудительной вентиляцией, либо нужны для красоты и предствительности, либо являются типичной ошибкой теплового менеджмента.

Также ошибкой является стремление увеличить вес радиатора. Для светильника, работающего в установившемся режиме, сам по себе вес радиатора значения не имеет, а имеет значение общая обтянутая радиаторная площадь. Толщина стенок радиатора становится значимой только в случае использования материалов с низкой теплопроводностью, таких как теплопроводящие пластики. Даже полмиллиметра толщины алюминиевой пластины оказывается достаточным, чтобы тепловое сопротивление можно было не учитывать и считать только необходимую радиаторную площадь. Низкие значения теплопроводности материала требуют аккуратного ручного, а при сложной форме и компьютерного расчета необходимой толщины стенок и ребер (рис. 18).

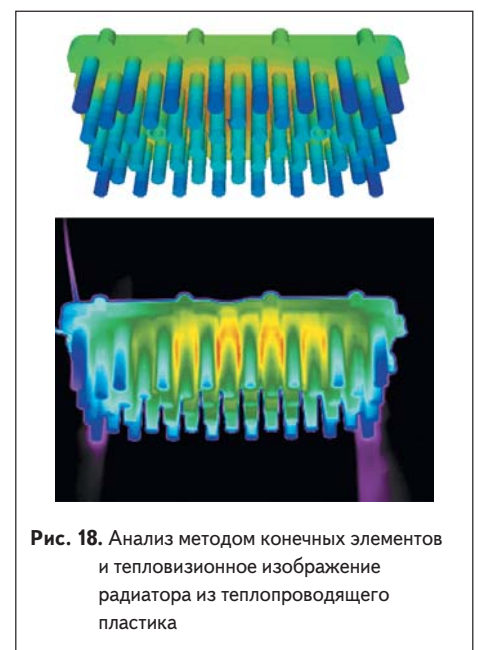


Рис. 18. Анализ методом конечных элементов и тепловизионное изображение радиатора из теплопроводящего пластика

Определение температуры кристалла по прямому напряжению

Известно, что прямое напряжение на диоде при данном токе однозначно зависит от температуры кристалла.

Наблюдение за релаксацией прямого напряжения при сбросе тока с греющего до измеряющего значения и изменение периода греющих импульсов позволяют определить тепловое сопротивление теплового тракта от кристалла до атмосферы и любого его участка. Но из-за возникающих переходных эффектов воспроизвести этот метод кустарным способом с помощью генератора импульсов и осциллографа достаточно сложно.

Получить информацию о температурах в светильнике, пользуясь зависимостью прямого напряжения, можно более простым путем: построить эту зависимость для конкретного диода, используя, например, термошкаф, а затем с ее помощью определить, насколько изменится температура диода после заливки компаундом или герметизации под вторичной оптикой (рис. 19).



Рис. 19. Экспериментальное определение зависимости прямого напряжения от температуры с помощью термошкафа

Расчетное определение температуры кристалла

В технических данных на любой светодиод приводится методика определения температуры кристалла на основе определения температуры точки пайки. При наблюдении в тепловизор становится очевидно, что температуры точки пайки как таковой нет, так как в малой окрестности вокруг светодиода наблюдается значительный градиент температур. И термопара, установленная в рекомендуемом месте, определяет некую усредненную температуру этой области, да еще искажает это значение за счет радиаторного эффекта подводящих к термопарному спаю проводов.

Тепловое сопротивление — это не измеренное значение, а коэффициент в расчетной формуле, позволяющий оценить температуру кристалла, измерив непонятно что термопарой неизвестно какого размера.

Многочисленные измерения температур «точки пайки» одного и того же диода термопарами с шариком спаива размером 1 и 0,5 мм показали,

что различие измеряемых температур в одном эксперименте может достигать 5 °С, но причина разброса значений не в размере термопары, а в особенностях ее установки на точке пайки. Для лучшей повторяемости результатов не-

обходимо смачивать спай в теплопроводящей пасте и удерживать неподвижно более минуты (что опасно для зрения), либо фиксировать спай на точке пайки теплопроводящим клеем (рис. 20–22).

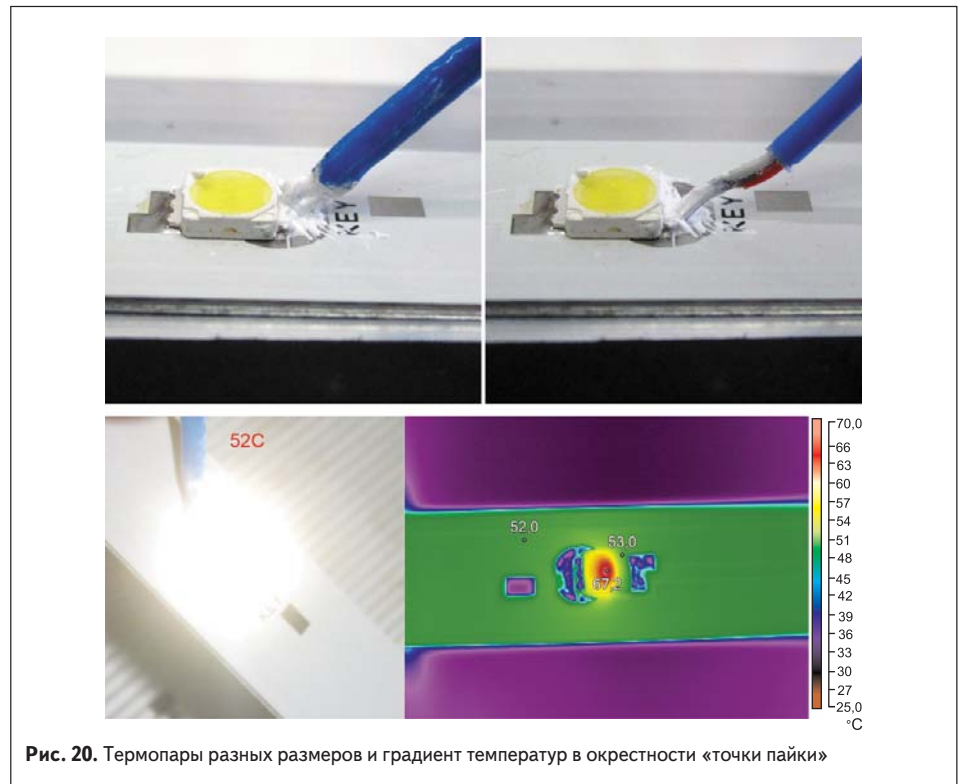


Рис. 20. Термопары разных размеров и градиент температур в окрестности «точки пайки»

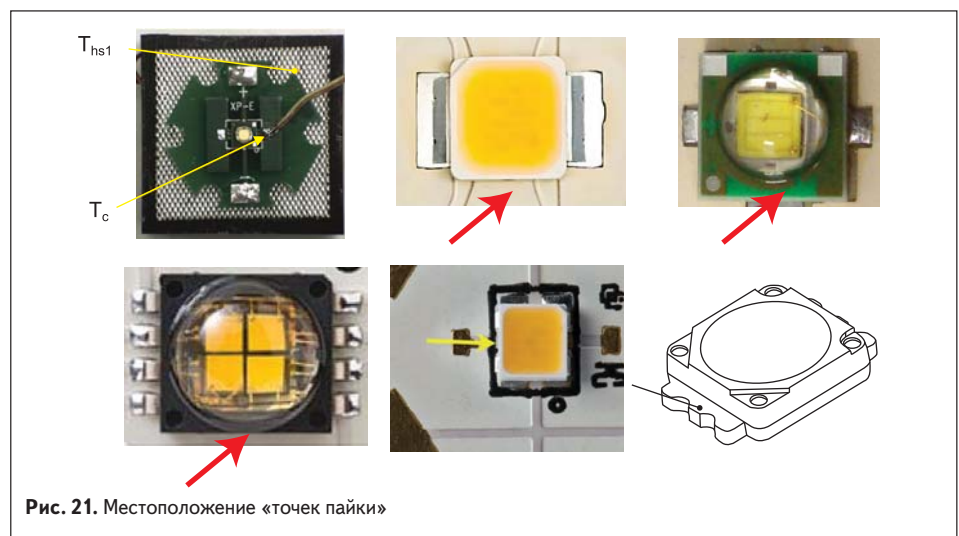


Рис. 21. Местоположение «точек пайки»



Рис. 22. Определение температуры кристалла

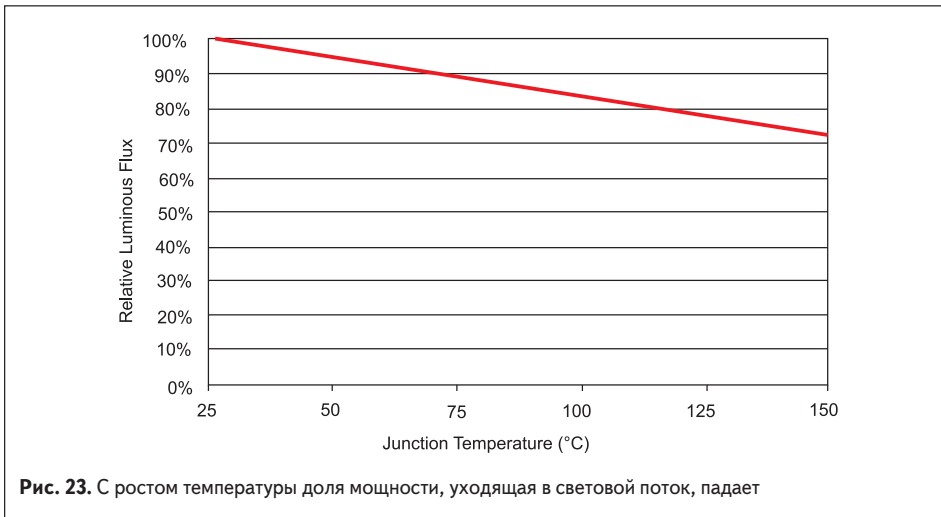


Рис. 23. С ростом температуры доля мощности, уходящая в световой поток, падает

Пример: светодиод LCW_CQDP.CC. Согласно Datasheet, $R_a = 95$, при температуре кристалла $T_j = +25^\circ\text{C}$ и токе $I = 0,35\text{ A}$ световой поток $F = 74\text{ лм}$, тепловое сопротивление корпуса $R = 7^\circ\text{C}/\text{Вт}$, прямое напряжение при токе $I = 0,35\text{ A}$ $U = 3,2\text{ В}$, полная мощность $W = 0,35 \times 3,2 = 1,12\text{ Вт}$.

Попробуем оценить температуру кристалла расчетным методом и сравним с показаниями тепловизора при $\epsilon = 0,95$.

Примем ориентировочную температуру кристалла $T_j = +50^\circ\text{C}$. Тогда световой поток, судя по приведенной в Datasheet температурной зависимости светового потока от температуры кристалла (рис. 23), должен снизиться до 95% от светового потока при $T_j = +25^\circ\text{C}$, т. е. составить $F = 70\text{ лм}$.

Спектральная световая эффективность белого осветительного светодиода около $300\text{ лм}/\text{Вт}$, для светодиодов с большей светотдачей и меньшим индексом цветопередачи несколько больше. Для этого конкретного диода с чрезвычайно высоким $R_a = 95$ спектральная световая эффективность $LER = 272\text{ лм}/\text{Вт}$, то есть если бы КПД этого диода равнялся 100%, его световой поток составил бы $F = 272 \times W$, где W — потребляемая мощность. Это позволяет нам, зная световой поток в люменах, пересчитать его в ватты и вычислить тепловую мощность светодиода $Q = 1,12 - 70/272 = 0,86\text{ Вт}$.

Температура «точки пайки», измеренная термопарой, составила $T_s = +48^\circ\text{C}$. Следовательно, температура кристалла должна составить $T_j = 48 + 0,86 \times 7 = +54^\circ\text{C}$.

По данным же тепловизора при $\epsilon = 0,95$ она составляет $+62^\circ\text{C}$. То есть разница температур, полученных разными методами, составила 8°C . Изменение коэффициента ϵ не приводит к значимому уменьшению расхождения. Похожая по величине разница получается, если измерять температуру кристаллов XP-G, а для таких диодов, как Cree MX-6 или Nichia NS6W183, разница оказывается менее значимой вплоть до случайного совпадения значений.

Итак, и термопарно-расчетный метод, и тепловизирующие позволяют оценить температуру кристалла, если ошибка в 10°C приемлема (что эквивалентно изменению светового потока на 3%).

Способы крепления печатной платы к радиатору

Среди светотехников популярно мнение: давайте форсируем светильник, приделаем к нему радиатор побольше, и все будет хорошо. Это не совсем так. Лучшим решением является достаточность радиаторной площади самой платы для теплоотвода, так как в противном

случае придется решать проблему теплового контакта платы с радиатором.

Поставлена серия экспериментов (рис. 24), в которых определялись температуры печатных плат, посаженных на радиатор разным числом заклепок, а также через теплопроводящую пасту, цианакрилатный клей и силиконовый герметик. Провалы на графиках температур соответствуют областям отверстий и луженых контактных площадок на плате, в которых тепловизор не может корректно определить температуру.

Основные выводы:

- заклепки изгибают плату, уменьшая площадь контакта;
- чем больше заклепок, тем лучше;
- теплопроводящая паста улучшает контакт (однако неподпружиненный контакт через КПТ-8 не является гарантированным постоянным тепловым контактом);
- наиболее надежный тепловой контакт, имеющий одновременно наименьшее тепловое сопротивление, — через герметик.

Параллельное и матричное подключение светодиодов

Острым вопросом при параллельном и матричном подключении светодиодов является баланс токов и опасность недозагрузки одних цепочек и перегрузки других. Так как зависимость тока от напряжения сильна, распределение токов по матрице однозначно соответствует распределению выделяемой мощности по диодам, которое легко наблюдать с помощью тепловизора. Тепловизионный анализ некоторого количества случаев дал понимание о величине проблемы: да, она есть, но не является существенной. Параллельное и матричное соединение светодиодов — рабочий вариант (рис. 25).

Техника безопасности при определении температуры точки пайки термопарой

Габаритная яркость современного осветительного светодиода на три-четыре порядка превышает предельно допустимые $5000\text{ кд}/\text{м}^2$. При этом свет белого светодиода в первом приближении состоит из двух цветов — синего и желтого, из которых синяя составляющая

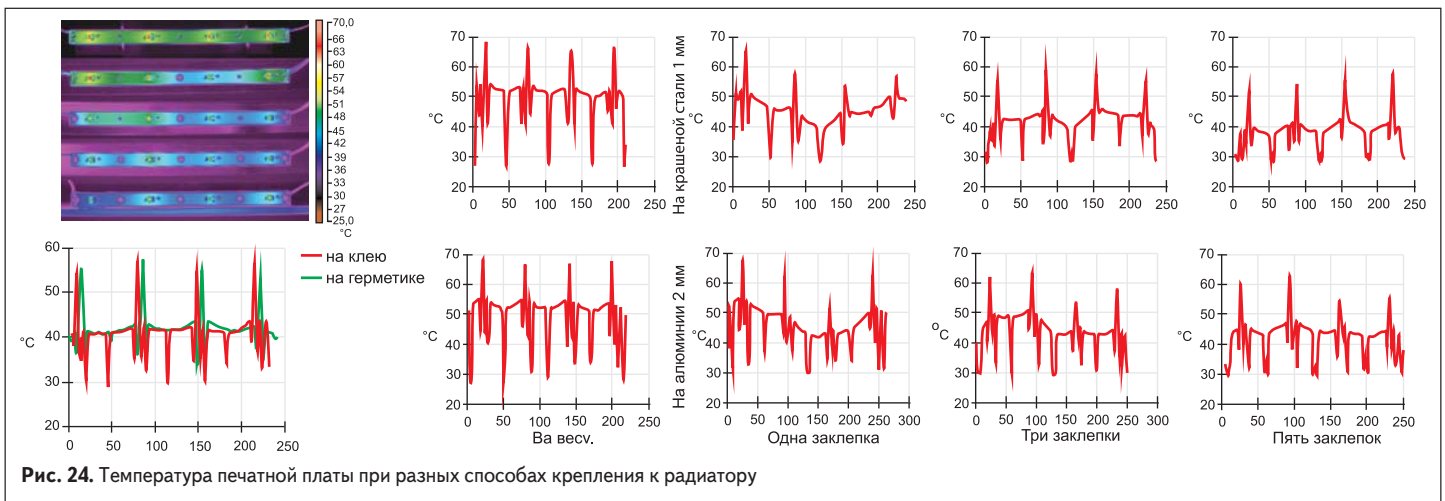


Рис. 24. Температура печатной платы при разных способах крепления к радиатору

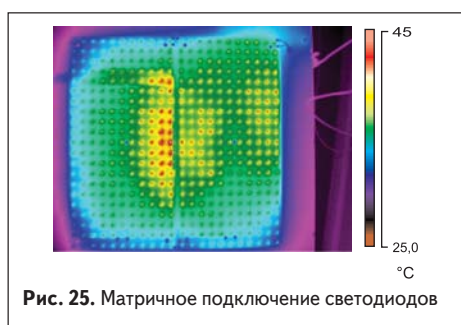


Рис. 25. Матричное подключение светодиодов

представляет особую опасность. Посмотреть на не закрытый рассеивателем светодиод — получить ожог сетчатки.

Практика показывает, что вручную удерживать термопару на точке пайки достаточно для термостабилизации время и не взглянуть на светодиод невозможно. Необходимо либо использовать для

фиксации термопары теплопроводящий клей, либо пользоваться красными очками (рис. 26). Красная составляющая почти отсутствует в спектре белых осветительных светодиодов, чем объясняется традиционно низкое значение девятого частного индекса цветопередачи R9, поэтому очки, поглощающие все спектральные компоненты, кроме красного, позволяют коротко взглянуть на белый светодиод, не повредив зрение.

Использование термометра с разрешением 0,1 °C не увеличивает точность измерения, но позволяет быстрее определить, что температура спая стабилизирована, и сокращает время работы с термопарой. Также значимо уменьшает время термостабилизации использование термопары с шариком малого размера. Но наиболее эффективным средством безопасности при работе с термопарой является теплопроводящий клей для фиксации спая термопары на точке пайки. ●



Рис. 26. Техника безопасности при измерении температуры точки пайки светодиода термопарой: используйте красные очки, термометр с разрешением 0,1 °C и теплопроводящий клей для фиксации шарика спая термопары