

Научная статья

УДК 621.382

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-4>



Влияние формы корпуса и расстановки гетероструктур на эффективность охлаждения

Иван Николаевич Жаданов, Александр Алексеевич Швачко✉

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

Аннотация. В статье рассматривается влияние формы корпуса и расстановки полупроводниковых гетероструктур на эффективность охлаждения оптоэлектронных устройств. Проанализировано, каким образом геометрия корпуса и компоновка активных элементов определяют пути теплового потока, формирование локальных перегревов и величину температурных перепадов. Проведено сравнение различных конструктивных решений с точки зрения равномерности температурного поля и способности к рассеянию тепла. Показано, что даже при использовании одинаковых материалов рациональная форма корпуса и оптимальное расположение гетероструктур позволяют существенно повысить эффективность теплоотвода и стабильность работы устройств.

Ключевые слова: гетероструктуры, светодиоды, температура, нагрев гетероструктур, корпус, форма корпуса

Для цитирования: Жаданов И. Н., Швачко А. А. Влияние формы корпуса и расстановки гетероструктур на эффективность охлаждения // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 2. С. 42–51. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-4>.

Original article

Effect of heterostructure configuration and shape design on cooling performance

Ivan N. Zhadanov, Alexandr A. Shvachko✉

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

Abstract. The article examines the influence of the semiconductor heterostructures' configuration and shape design on the cooling performance of optoelectronic devices. The authors investigate how the heat sink geometry and the active elements' arrangement define the heat flow paths, local overheating, and the temperature fluctuation magnitude. In terms of temperature field uniformity and heat dissipation capability, the paper compares various structural alternatives. It is confirmed that the optimal shape design and layout of the heterostructure components significantly improve the heat dissipation and the stability of the specified devices despite using the same materials.

Keywords: heterostructures, light-emitting diode (LED) lamps, temperature, heterostructure heating, shape, shape design

For citation: Zhadanov I. N., Shvachko A. A. Effect of heterostructure configuration and shape design on cooling performance. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(2):42–51. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-4>.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием электроники выделяемое тепло концентрируется все сильнее – это давит на возможности отвода энергии.

В оптоэлектронике ситуация усугубляется: там даже небольшие перепады температур способны менять поведение приборов [1, 2]. Полупроводниковые гетероструктуры,

например, начинают работать нестабильно, если нагревается лишь один участок кристалла. Уменьшение размеров чипов только усиливает эффект – старые методы охлаждения уже не справляются [3]. Приходится детально просчитывать, как тепло распространяется внутри корпуса, где находятся горячие зоны и как они взаимодействуют с окружающими слоями. Конструкция упаковки теперь играет ключевую роль, ведь она формирует путь для теплового потока [4]. Без учета этих факторов даже самый продуманный дизайн может потерять в долговечности.

Влияет ли форма оболочки прибора – зависит не только от дизайна, но и от того, как внутри движется тепло. Путь энергии сквозь конструкцию во многом задается контурами самого кожуха: они управляют тем, насколько легко воздух омывает поверхность [5]. От этого напрямую зависит, успеет ли система рассеивать избыточный жар. Внутри же положение слоистых соединений меняет картину нагрева в малых областях чипа. Эти участки начинают мешать друг другу, если расположены тесно или асимметрично [6]. Перегрев возникает там, где горячие точки накладываются случайным образом. Даже отличные материалы для радиатора бессильны, когда компоновка создает «бутылочные горлышки» для теплового потока [7].

Современные вычислительные подходы дают возможность досконально изучать тепловые явления еще до начала создания физического образца – это снижает потребность в лабораторных испытаниях. Расчеты, основанные на аналитике или частично на опытных данных, выполняются в специализированном ПО и помогают определить уровень теплового сопротивления, разницу температур и энергетическое поведение гетероструктур под разными нагрузками. Трехмерная модель передачи тепла учитывает форму корпуса, особенности состава материалов и условия отвода тепла, что делает возможным четкую визуализацию того, как именно распределяется тепло по элементам [8].

Целью данной статьи является исследование влияния формы корпуса и геометрии расстановки гетероструктур на подложке на эффективность системы их охлаждения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Чтобы понять, как тепло распространяется внутри оптоэлектроники, используют не только расчеты, но и физические испытания. Зачастую выбирают моделирование методом конечных элементов: оно помогает глубоко проникнуть в процессы передачи тепла даже при сложной форме устройств, если делить объект на мелкие части и отдельно просчитывать законы теплопроводности. Это открывает путь к учету реальных форм корпуса, характеристик веществ и разных условий на поверхностях, например теплообмена с воздухом или излучения. Картина распределения температур становится почти понятной, можно заранее заметить места, которые могут перегреться, однако на качество расчета влияют начальные данные и точность разбивки сетки.

С помощью контактных датчиков, например термопар или терморезисторов, удастся точно замерять температуру прямо во время работы устройств. Хотя такие способы давно используют для верификации компьютерных моделей, они не лишены недостатков: данные собираются лишь в отдельных точках, а сами датчики могут мешать естественному нагреву, особенно если речь идет о крошечных деталях. Тепловизоры же работают без физического контакта, показывая картинку нагрева всей поверхности сразу, причем почти моментально. Такой подход отлично подходит, чтобы быстро находить горячие участки и понимать, насколько равномерно греется изделие. С другой стороны, точность этих данных сильно зависит от того, насколько хорошо поверхность излучает тепло.

В настоящей работе исследуется влияние формы корпуса и вариантов расстановки гетероструктур на эффективность охлаждения электронного устройства. Были проведены аналитические расчеты температурных

характеристик, а также численное моделирование тепловых процессов методом конечных элементов. Проведено сравнение различных геометрических конфигураций корпуса и схем размещения гетероструктур с точки зрения максимальной рабочей температуры и равномерности температурного поля. Полученные результаты позволяют сформулировать рекомендации по оптимизации конструкции корпуса и размещению гетероструктур с целью повышения эффективности охлаждения и улучшения эксплуатационных характеристик устройств [9].

Изменение температуры гетероструктуры осуществлялось согласно выражению:

$$\Delta T = R_t s j \left(R_0 j^2 + \frac{\eta' h \nu}{e} \right), \quad (1)$$

где ΔT – **нагрев активной области**; R_t – тепловое сопротивление (этот коэффициент показывает, насколько эффективно устройство рассеивает тепло); s – площадь контакта; J – плотность тока накачки; R_0 – удельное сопротивление материала; η' – **эффективность инжекции** (показывает, какая доля носителей тока успешно попадает в активную область); $h\nu$ – энергия фотона; e – элементарный заряд электрона.

В качестве гетероструктуры была выбрана GaInAs – она обладает хорошими оптическими, так и производственными свойствами. Прямая зона проводимости делает перераспределение зарядов более продуктивным процессом, благодаря чему световое излучение формируется эффективнее. Длина волны зависит от содержания индия в составе материала. Изменяя пропорции, можно настраиваться точно на нужный участок спектра [10]. Работает лучше всего там, где начинается инфракрасное излучение. Субстраты из InP подходят для выращивания GaInAs без возникновения внутренних напряжений. Благодаря подгонке параметров по кристаллической решетки количество дефектов заметно снижается. Устройства на базе гетеропереходов удерживают электроны там, где это нужно больше всего. Потери от побочных процессов

становятся меньше – работа прибора получается надежнее. Технологии осаждения тонких пленок легко работают с этим соединением. Все эти особенности вместе приводят к одному: эффективность светодиодов на основе GaInAs оказывается особенно высока [11].

В качестве материала радиатора выбран алюминиевый сплав 6061 – один из наиболее распространенных конструкционных сплавов для теплотехнических задач. Его теплопроводность находится на уровне ~ 170 Вт/(м·К), что достаточно для эффективного отвода тепла от активной области. При этом материал остается легким: плотность около 2700 кг/м³ позволяет не увеличивать массу конструкции. Отдельно стоит отметить теплоемкость – порядка 900 Дж/(кг·К). Благодаря этому радиатор не так резко реагирует на кратковременные тепловые нагрузки, сглаживая температурные колебания. В реальных условиях это снижает риск локального перегрева. С механической точки зрения сплав также удобен: он достаточно прочен, хорошо держит форму и не деформируется при умеренных температурах. Это важно для сохранения стабильного теплового контакта с гетероструктурой. Химические свойства определяются наличием естественной оксидной пленки на поверхности. Она защищает материал от коррозии без дополнительных покрытий. При необходимости поверхность можно анодировать – тогда возрастает излучательная способность, а вместе с ней и вклад лучистого теплообмена.

Алюминиевый сплав 6061 – обладает высокой теплопроводностью. Благодаря этому диоды не перегреваются в работе. Легкий вес сочетается с хорошей теплопередачей, так что радиатор остается компактным. Материал характеризуется высокой механической прочностью и жесткостью, обеспечивая надежное крепление светодиодов. Надежность конструкции зависит от твердости материала. Он часто встречается на заводах, поэтому цена остается приемлемой. Ржавчине почти не подвержен, значит, прослужит долго без потери качества. Тепловые характеристики не ухудшаются даже при нагреве, которого стоит

ожидать от мощных LED-ламп. Благодаря таким характеристикам он отлично работает как основа для охлаждения светодиодов [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве варьируемого параметра был выбран ток I , определяющий электрический и тепловой режим работы светодиода. Значение тока изменялось восемь раз в диапазоне от 0,4 до 0,8 А с шагом 0,05 А, что соответствует реальным условиям эксплуатации прибора. Для каждого значения тока производился расчет температурного приращения при фиксированных значениях остальных параметров модели. Полученные результаты были автоматически обработаны и представлены в графическом виде. Анализ результатов позволяет оценить зависимость температуры светодиода от величины протекающего тока.

Численное моделирование процессов нагрева и охлаждения радиатора было выполнено методом конечных элементов. В модели учитывалась реальная геометрия корпуса радиатора, а также материал радиатора – алюминиевый сплав 6061 с заданными теплофизическими характеристиками. В качестве источника тепла задавалась тепловая мощность, выделяемая светодиодными гетероструктурами, рассчитанная на основе аналитических зависимостей. Теплоотвод в окружающую среду моделировался с учетом естественной конвекции и теплового излучения с поверхности радиатора [13].

На рис. 1 представлена зависимость температуры гетероструктуры от величины протекающего тока, рассчитанная по формуле (1).

Данные рис. 1 позволяют провести сравнительный анализ тепловых режимов при различных значениях тока. Из рисунка видно, что с увеличением тока температура возрастает практически линейно.

Симуляция нагрева проводилась в нестационарном режиме, что позволило проанализировать динамику роста температуры радиатора во времени до установившегося состояния. Для оценки эффективности теплоотвода дополнительно была выполнена симуляция

процесса охлаждения после отключения тепловой нагрузки. В ходе моделирования были получены распределения температурных полей и тепловых потоков для различных форм корпуса и вариантов расстановки гетероструктур [14]. Результаты симуляции позволили выявить зоны максимального перегрева и оценить влияние геометрии радиатора на скорость нагрева и охлаждения. В таблице 1 приведены данные максимальной и минимальной температуры структуры и радиатора для расчета методом конечных элементов для диапазона изменения тока на рабочем элементе. На рис. 2 приведены данные расчета для радиатора типа «звезда».

Диапазон температур для последующего анализа выбран в пределах 315–367 К на основе результатов численного моделирования. Данные значения соответствуют минимальной и максимальной температуре, полученной в области гетероструктуры при заданных граничных условиях и уровне тепловой нагрузки.

Нижняя граница диапазона характеризует зоны с наиболее интенсивным теплоотводом и близка к температуре охлаждающей среды, тогда как верхняя граница отражает области с максимальной концентрацией тепловыделения вблизи активной части структуры.

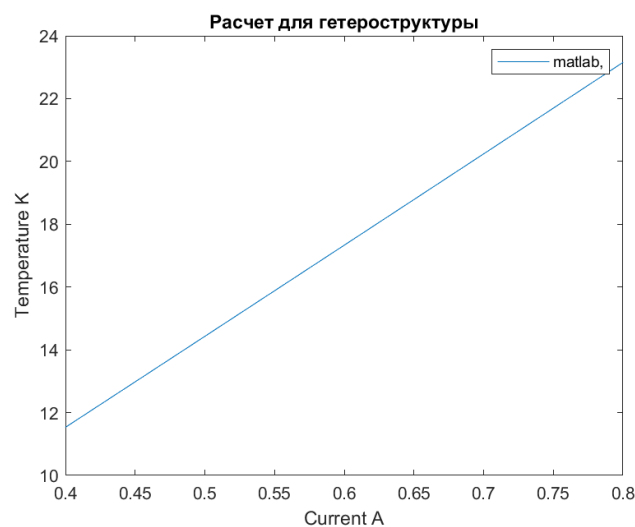


Рис. 1. Зависимость температуры гетероструктуры от величины протекающего тока

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Такой выбор шкалы позволяет корректно отобразить распределение температуры и сохранить различимость локальных температурных особенностей, что обеспечивает последующий анализ температурных полей и сравнение эффективности различных конструкций радиаторов.

На рис. 2 видно хорошее охлаждение кристалла формой радиатора типа «звезда». Температурный перепад остается относительно стабильным. Температурные градиенты остаются холодными, что говорит о равномерном охлаждении гетеро-структуры.

Таблица 1

Результат расчета и симуляции для радиатора типа звезда

Ток, А		0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
Т, К	Max	338,52	344,44	350,41	356,43	362,51	368,65	374,85	381,11	387,42
	Min	322,08	325,69	329,29	332,90	336,50	340,11	343,72	347,32	350,93

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

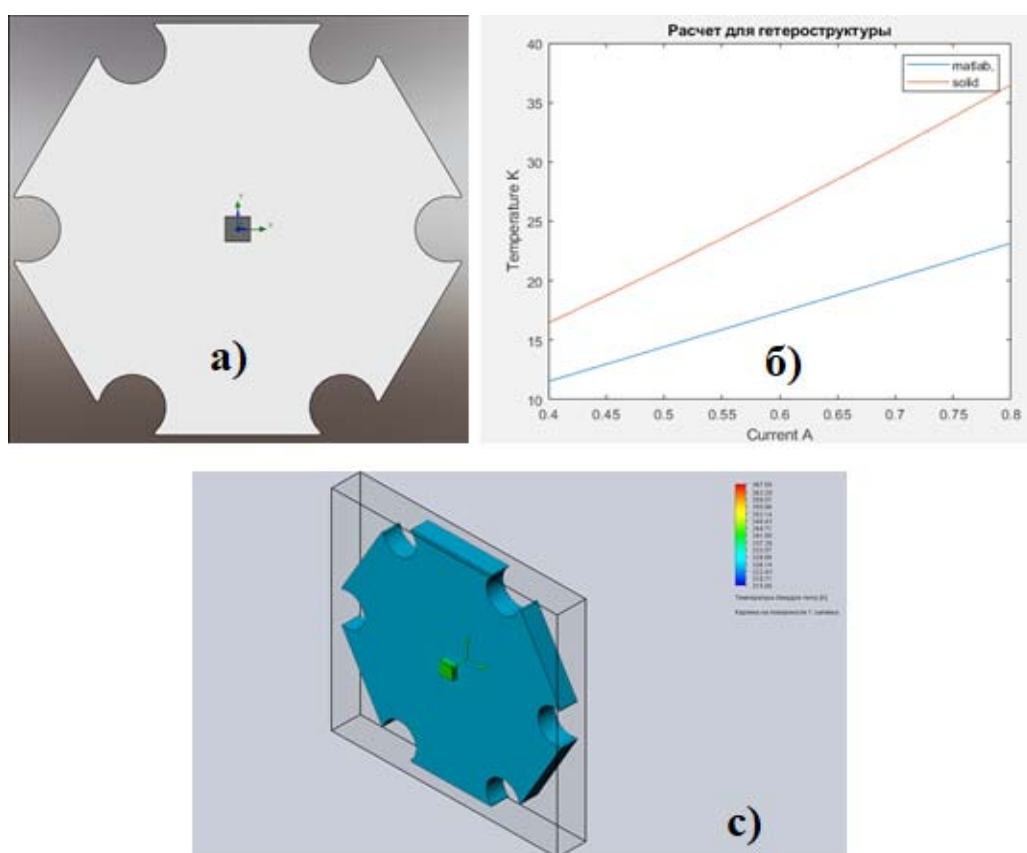


Рис. 2. а – радиатор типа «звезда»; б – результаты расчета изменения температуры и сравнение с результатами аналитического метода; с – картина температуры на поверхности

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

В табл. 2 приведены данные максимальной и минимальной температур структуры и радиатора для расчета методом конечных элементов

в диапазоне изменения тока на рабочем элементе для радиатора типа квадрат. На рис. 3 приведены данные расчета для радиатора типа квадрат.

Таблица 2

Результат расчета и симуляции для радиатора типа квадрат

Ток, А		0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
Т, К	Max	361,33	370,26	379,29	388,40	397,60	406,78	415,94	424,88	433,66
	Min	343,48	349,76	356,05	362,33	368,61	374,89	381,17	387,46	393,74

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

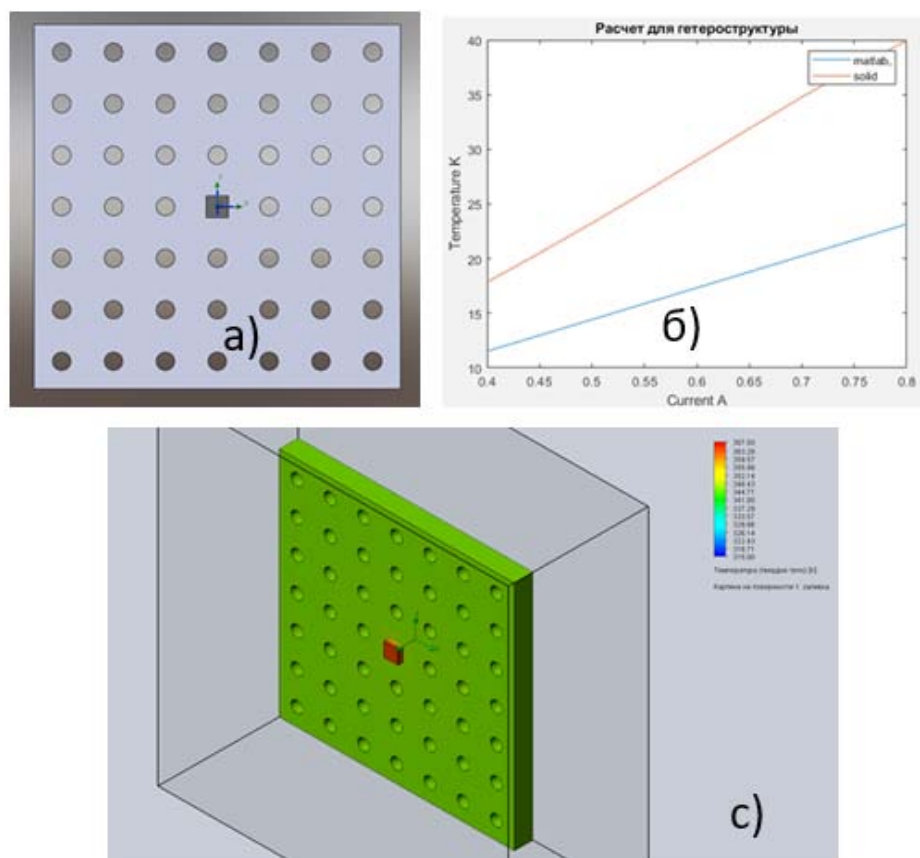


Рис. 3. а – радиатор типа «квадрат»; б – результаты расчета изменения температуры и сравнение с результатами аналитического метода; с – картина температуры на поверхности
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 3 видно низкое охлаждение кристалла формой радиатора типа «квадрат». Температурный перепад остается относительно стабильным. Температурные градиенты более теплые, что говорит о более низком охлаждении.

В табл. 3 приведены данные максимальной и минимальной температуры структуры и радиатора для расчета методом конечных элементов для диапазона изменения тока на рабочем элементе для радиатора типа «круг». На рис. 4 приведены данные расчета для радиатора типа «круг».

Таблица 3

Результат расчета и симуляции для радиатора типа «круг»

Ток, А		0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
Т, К	Max	366,72	376,35	386,06	395,86	405,71	415,49	425,15	434,69	444,17
	Min	348,59	355,51	362,43	369,35	376,27	383,19	390,11	397,03	403,95

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 4 видно плохое охлаждение кристалла формой радиатора типа «круг». Температурный перепад остается относительно стабильным. Температурные градиенты очень теплые, что говорит о более плохом охлаждении.

В табл. 4 приведены данные максимальной и минимальной температуры структуры

и радиатора для расчета методом конечных элементов для диапазона изменения тока на рабочем элементе для радиатора типа «ребристый». На рис. 4 приведены данные расчета для радиатора типа «ребристый».

На рис. 5 видно хорошее охлаждение кристалла формой радиатора типа «ребристый». Температурный перепад остается

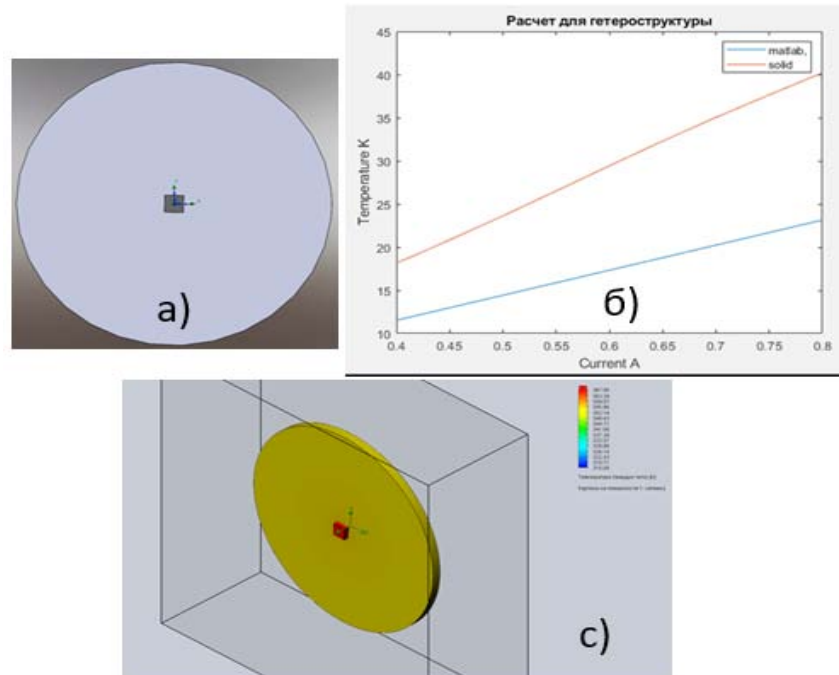


Рис. 4. а – радиатор типа «звезда»; б – результаты расчета изменения температуры и сравнение с результатами аналитического метода; с – картина температуры на поверхности
 Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Таблица 4

Результат расчета и симуляции для радиатора типа «ребристый»

Ток, А		0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
Т, К	Max	342,82	349,31	355,85	362,46	369,14	375,89	382,70	389,57	396,52
	Min	326,31	330,44	334,58	338,71	342,85	346,98	351,12	355,25	359,39

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

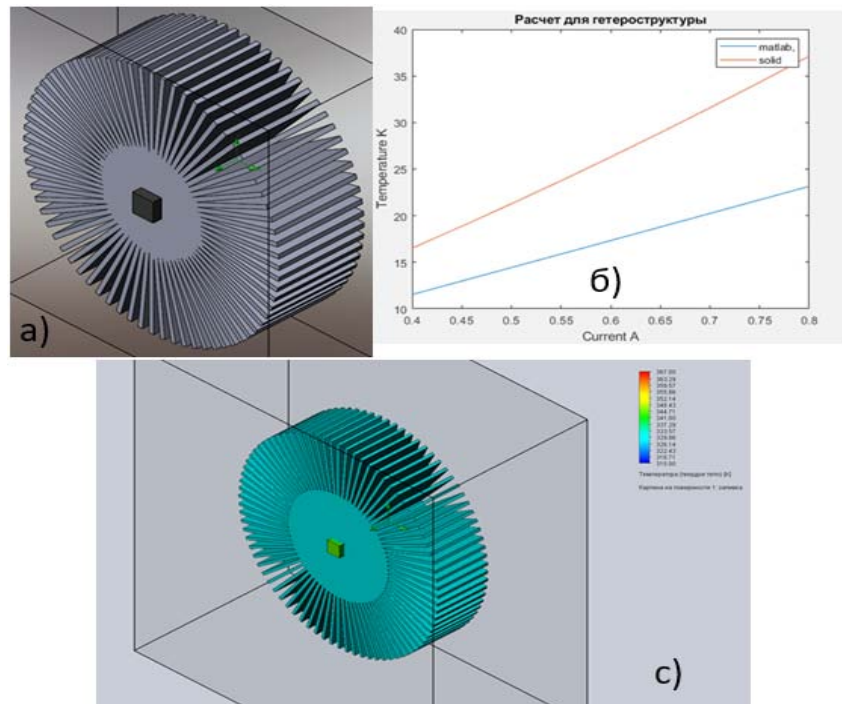


Рис. 5. а – радиатор типа «ребристый»; б – результаты расчета изменения температуры и сравнение с результатами аналитического метода; с – картина температуры на поверхности
 Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

относительно стабильным. Температурные градиенты холодные, что говорит о хорошем охлаждении.

В табл. 5 приведены данные о максимальной и минимальной температуре структуры

и радиатора для расчета методом конечных элементов для диапазона изменения тока на рабочем элементе для радиатора типа «трубчатый». На рис. 6 приведены данные расчета для радиатора типа «трубчатый».

Таблица 5

Результат расчета и симуляции для радиатора типа «трубчатый»

Ток, А		0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
Т, К	Max	339,99	346,11	352,27	358,50	364,79	371,14	377,56	384,04	390,57
	Min	323,45	327,22	331,00	334,78	338,56	342,34	346,11	349,89	353,67

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

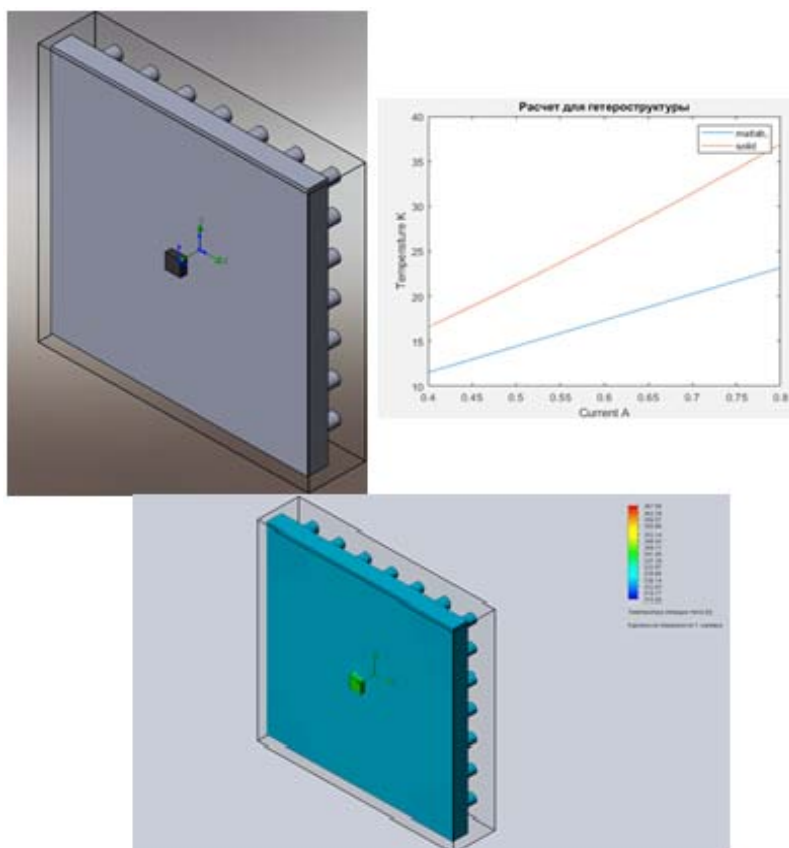


Рис. 6. а – радиатор типа трубчатый; б – результаты расчета изменения температуры и сравнение с результатами аналитического метода; с – картина температуры на поверхности

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 6 видно хорошее охлаждение кристалла формой радиатора типа «трубчатый». Температурный перепад остается относительно стабильным. Температурные градиенты холодные, что говорит о хорошем охлаждении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное в работе исследование было направлено на анализ влияния формы корпуса

на эффективность теплоотвода в светодиодных приборах. Полученные результаты показали, что решающую роль играет не только материал радиатора, но и его геометрия: именно форма корпуса во многом определяет максимальный уровень нагрева кристалла и характер распределения тепла внутри конструкции. Наилучшие тепловые характеристики продемонстрировали радиаторы звездчатой, трубчатой и ребристой формы,

обеспечивающие развитую поверхность теплообмена и более равномерное распространение тепловых потоков.

Радиатор типа «круг» является наименее эффективным с точки зрения охлаждения гетероструктуры. Несмотря на сравнительно большую площадь основания, такая конструкция характеризуется недостаточно развитой поверхностью теплоотдачи и ограниченными условиями естественной конвекции. Отсутствие ребер и направляющих элементов приводит к формированию застойных зон воздуха вблизи поверхности радиатора, что снижает интенсивность теплообмена с окружающей средой.

Установлено, что конструкции с увеличенной площадью поверхности за счет ребер, каналов и выступов значительно эффективнее отводят тепло, что выражается в снижении температурного перепада между активной областью и внешней поверхностью радиатора. Это связано с улучшенными условиями теплопроводности внутри материала, а также с более интенсивным естественным конвективным теплообменом с окружающей средой. В отличие от них, компактные или геометрически упрощенные корпуса склонны к накоплению тепла вблизи зон максимальной тепловой нагрузки, что приводит к формированию локальных перегревов.

В рассматриваемой области нельзя выделить одну универсальную «эталонную» конструкцию, которая бы использовалась как стандарт для всех задач. Однако на практике чаще всего ориентируются на несколько типовых решений: плоские радиаторы, радиаторы с продольными ребрами, а также конструкции с развитой радиальной или звездчатой геометрией. Именно такие варианты обычно принимаются за базу при сравнении,

поскольку они хорошо изучены и широко применяются в светодиодной технике. При сопоставлении с ними видно, что упрощенные формы корпуса уступают не столько из-за материала, сколько из-за характера распределения тепла. В типовых конструкциях тепло быстрее уходит от центра к периферии и эффективнее передается в окружающую среду, тогда как в более гладких формах оно задерживается вблизи источника. Связь между формой корпуса и расположением гетероструктур проявляется достаточно явно. Если активные элементы сгруппированы в одной зоне, даже удачная геометрия радиатора не всегда компенсирует локальный перегрев. И наоборот, при более равномерной расстановке гетероструктур влияние формы корпуса становится менее критичным, поскольку тепловая нагрузка распределяется по всей поверхности. На практике это означает, что рассматривать форму корпуса и компоновку по отдельности не совсем корректно. Они работают совместно: геометрия задает направление отвода тепла, а расположение источников определяет, насколько равномерно это тепло поступает в радиатор.

Различия в температурных перепадах между исследуемыми образцами обусловлены особенностями передачи тепла от рабочей области к радиатору и далее во внешнюю среду. Применение радиаторов оптимальной геометрии позволяет сформировать более равномерное температурное поле, снизить термомеханические напряжения и повысить стабильность работы устройства. Таким образом, сочетание продуманной формы корпуса и рационального размещения гетероструктур обеспечивает эффективное охлаждение и уменьшение нагрева светодиодов в рабочих режимах.

Список источников

1. Дульнев Г. Н., Тихонов С. В. Основы теории тепломассообмена. СПб. : Университет ИТМО, 2010. 93 с.
2. Ципина Н. В. Теплофизические процессы в приборах. Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2022. 135 с.

References

1. Dulnev G. N., Tikhonov S. V. Osnovy teorii teplomassoobmena. St. Petersburg: ITMO University; 2010. 93 p. (In Russ.).
2. Tsipina N. V. Teplofizicheskie protsessy v priborakh. Voronezh: Voronezh State Technical University; 2022. 135 p. (In Russ.).

3. Ramesh T., Praveen A. S., Pillai P. B. et al. Numerical simulation of heat sinks with different configurations for high power LED thermal management // *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*. 2022. Vol. 13.
4. Jiang B. Research and optimization design of thermal management for LED // *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2023. Vol. 68. P. 242–246.
5. Zou Y., Xia Y., Ren H. et al. Heat dissipation design and optimization of high-power LED lamps // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2023. Vol. 37.
6. Li H., Zhu X., Zhang D. et al. Thermal management towards ultra-bright and stable perovskite nanocrystal-based pure red light-emitting diodes // *Nature Communications*. 2024. Vol. 15, no. 1.
7. Ye J., Mo S., Jia L. et al. Experimental performance of a LED thermal management system with suspended microencapsulated phase change material // *Applied Thermal Engineering*. 2022. Vol. 207.
8. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.
9. Kononenko V. K., Kuntsevich B. F. Selection of the lasing frequency and heating the quantum-well heterostructure laser diodes // *Proceedings of the 11th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM)*, September 5–8, 2011, Kharkov, Ukraine. Piscataway, NJ : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011.
10. Piprek J. *Semiconductor Optoelectronic Devices: Introduction to Physics and Simulation*. San Diego, CA : Academic Press, 2003. 279 p.
11. Coldren L. A., Corzine S. W., Mašanović M. L. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits*. 2nd ed. Hoboken, NJ : Wiley, 2012. 752 p.
12. Pop E. Energy dissipation and transport in nanoscale devices // *Nano Research*. 2010. Vol. 3, no. 3. P. 147–169.
13. Гришаев В. Я., Никишин Е. В. *Источники и приемники оптического излучения*. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2024. 68 с.
14. Лебедев А. И. *Физика полупроводниковых приборов*. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. 488 с.
3. Ramesh T., Praveen A. S., Pillai P. B. et al. Numerical simulation of heat sinks with different configurations for high power LED thermal management. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*. 2022;13.
4. Jiang B. Research and optimization design of thermal management for LED. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2023;68:242–246.
5. Zou Y., Xia Y., Ren H. et al. Heat dissipation design and optimization of high-power LED lamps. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2023;37.
6. Li H., Zhu X., Zhang D. et al. Thermal management towards ultra-bright and stable perovskite nanocrystal-based pure red light-emitting diodes. *Nature Communications*. 2024;15(1).
7. Ye J., Mo S., Jia L. et al. Experimental performance of a LED thermal management system with suspended microencapsulated phase change material. *Applied Thermal Engineering*. 2022;207.
8. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2013. 756 p.
9. Kononenko V. K., Kuntsevich B. F. Selection of the lasing frequency and heating the quantum-well heterostructure laser diodes. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM)*, September 5–8, 2011, Kharkov, Ukraine. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2011.
10. Piprek J. *Semiconductor Optoelectronic Devices: Introduction to Physics and Simulation*. San Diego, CA: Academic Press; 2003. 279 p.
11. Coldren L. A., Corzine S. W., Mašanović M. L. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley; 2012. 752 p.
12. Pop E. Energy dissipation and transport in nanoscale devices. *Nano Research*. 2010;3(3):147–169.
13. Grishaev V. Ya., Nikishin E. V. *Istochniki i priemniki opticheskogo izlucheniya*. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta; 2024. 68 p. (In Russ.).
14. Lebedev A. I. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov*. Moscow: FIZMATLIT; 2008. 488 p. (In Russ.).

Информация об авторах

И. Н. Жаданов – аспирант;
<https://orcid.org/0009-0005-8621-1689>,
 zhadanovvv@mail.ru

А. А. Швачко – доцент;
<https://orcid.org/0000-0001-6633-0975>,
 alexandr1899@gmail.com✉

About the authors

I. N. Zhadanov – Postgraduate;
<https://orcid.org/0009-0005-8621-1689>,
 zhadanovvv@mail.ru

A. A. Shvachko – Docent;
<https://orcid.org/0000-0001-6633-0975>,
 alexandr1899@gmail.com✉