

КЛАССИФИКАЦИЯ И ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ВОЗДУШНОМ ОХЛАЖДЕНИИ ВЫСОКОМОЩНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

Жижицкий И.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Дик С.К. – к. ф. -м. н., доцент, заведующий кафедрой ИКТ

Аннотация. В работе представлен анализ современных методов воздушного охлаждения электронных компонентов. Рассмотрены классификация систем, сравнение типов вентиляторов, а также перспективные технологии (микроканалы, наножидкости, фазопереходные материалы). Показана область применения методов – от силовых модулей до лазерных диодов. Предложены критерии выбора оптимальной системы охлаждения в зависимости от условий эксплуатации.

Ключевые слова: тепловыделение, воздушное охлаждение, вентилятор, высокомоощные компоненты, лазерные диоды, электрокалорический эффект, наножидкости, терморегулирование

Введение. Стремительное развитие силовой электроники, миниатюризация устройств и повышение их производительности приводят к неуклонному росту плотности теплового потока. Перегрев является одной из основных причин отказов полупроводниковых приборов, таких как IGBT-транзисторы и SiC-МОП-структуры, что делает эффективный теплоотвод критически важной задачей [1]. Традиционные системы охлаждения подходят к пределу своих возможностей, что стимулирует поиск как оптимизированных классических решений, так и принципиально новых подходов.

В данной работе классифицируются методы воздушного охлаждения и рассматриваются инновационные решения, способные обеспечить надежную работу высокомоощных электронных компонентов, включая лазерные диоды, где тепловые нагрузки также крайне высоки.

Основная часть. Охлаждение электронных компонентов может быть пассивным и активным. Пассивное охлаждение осуществляется за счет естественной конвекции и излучения с помощью радиаторов и тепловых трубок. Активное охлаждение подразумевает использование вентиляторов, помп или иных устройств для принудительного отвода тепла [8]. В контексте воздушного охлаждения ключевую роль играют вентиляторы. Их можно классифицировать по нескольким признакам.

По направлению движения воздуха выделяют осевые, радиальные (центробежные) и диагональные вентиляторы [2]:

1 Осевые вентиляторы создают поток воздуха вдоль оси вращения. Они характеризуются высокой производительностью (объемный расход, CFM) при низком статическом давлении и широко применяются для продувки корпусов компьютеров и блоков питания.

2 Радиальные вентиляторы засасывают воздух вдоль оси и выбрасывают его перпендикулярно, создавая высокое статическое давление. Это позволяет им эффективно продувать воздух через плотные радиаторы и узкие каналы в серверном и промышленном оборудовании [3].

3 Диагональные вентиляторы занимают промежуточное положение, обеспечивая баланс между расходом и давлением.

Критически важными параметрами при выборе вентилятора являются: производительность (CFM или м³/ч), статическое давление (мм вод. ст. или Па), скорость вращения (RPM), уровень шума (дБА), тип подшипника (скольжения, качения, гидродинамический), напряжение питания и ресурс работы (MTTF) [4, 5].

Современные тенденции в области вентиляторостроения направлены на повышение энергоэффективности и управляемости. Так, широкое распространение получают

вентиляторы с электронной коммутацией (ЕС-вентиляторы). Благодаря встроенной электронике и использованию бесщеточного двигателя постоянного тока, ЕС-вентиляторы могут быть на 40–60% эффективнее традиционных вентиляторов переменного тока, обеспечивая при этом плавную регулировку скорости в зависимости от температуры [3].

Расчет необходимого воздушного потока – ключевой этап проектирования системы охлаждения. Для электрического шкафа или корпуса с известной тепловой нагрузкой Q (Вт) и допустимым повышением температуры ΔT (С) требуемый расход воздуха приближенно рассчитывается по формуле [4]:

$$CFM = \frac{3.16 \times Q}{\Delta T}$$

Однако эта формула не учитывает статическое сопротивление тракта. В системах с плотной компоновкой необходимо выбирать вентилятор по его рабочей характеристике (кривой зависимости давления от расхода), которая должна пересекаться с кривой сопротивления системы в рабочей точке [4].

Несмотря на постоянное совершенствование традиционных вентиляторов, для компонентов с экстремально высокой мощностью (более 500–1000 Вт/см²) требуются инновационные подходы. Одним из таких направлений является твердотельное охлаждение на основе электрокалорического эффекта (ЭКЭ) [5].

В отличие от эффекта Пельтье, ЭКЭ основан на обратимом изменении температуры материала под действием внешнего электрического поля. При приложении поля диполи в материале упорядочиваются, что приводит к его нагреву. При снятии поля диполи хаотизируются, поглощая энергию и охлаждая окружающую среду. Современные исследования демонстрируют гигантский ЭКЭ в тонких пленках (например, цирконата-титаната свинца или полимеров), позволяющий достигать перепада температур до 12–13 К и выше при комнатной температуре [5, 6]. Интеграция таких пленок непосредственно в кристалл микросхемы открывает путь к бесшумному, компактному и экологичному охлаждению, однако требует решения проблем, связанных с электрокалорической усталостью материалов и высокими рабочими напряжениями.

Другой класс инновационных решений связан с интенсификацией теплообмена в традиционных системах. К ним относятся:

1 Микроканальное охлаждение (microchannel cooling), при котором теплоноситель (жидкость или воздух) прокачивается через каналы гидравлическим диаметром менее 1 мм, что обеспечивает чрезвычайно высокие коэффициенты теплоотдачи [1, 7].

2 Иммерсионное охлаждение (immersion cooling), при котором электронные компоненты погружаются непосредственно в диэлектрическую жидкость. Это полностью исключает тепловое сопротивление интерфейса и позволяет достигать тепловых потоков более 1000 Вт/см² [7].

3 Применение наножидкостей (nanofluids) – жидкостей (вода, масло) с добавлением наночастиц материалов с высокой теплопроводностью (Al₂O₃, CuO, графен). Это может повысить теплопроводность и, как следствие, эффективность теплоотвода на 10–40% по сравнению с базовой жидкостью [1, 8].

4 Использование фазопереходных материалов (ФПМ) для сглаживания тепловых пиков. ФПМ, например парафины или соли, поглощают большое количество тепла при плавлении, поддерживая стабильную температуру компонента в течение определенного времени [1, 8].

Важно отметить, что проблемы эффективного теплоотвода, подробно рассмотренные выше применительно к силовым полупроводниковым модулям, являются не менее критичными для оптоэлектронных компонентов, и в первую очередь – для мощных лазерных диодов. Специфика работы лазерных диодов заключается в том, что даже при высокой квантовой эффективности значительная доля электрической энергии не преобразуется в когерентное излучение, а переходит в тепло. Возникающий перегрев оказывает прямое и крайне негативное влияние на рабочие характеристики лазерного диода. Во-первых, температура активной области определяет ширину запрещенной зоны полупроводника, что напрямую влияет на длину волны генерируемого излучения. Нестабильность температуры

приводит к дрейфу длины волны. Во-вторых, повышение температуры резко увеличивает скорость деградиационных процессов в кристалле: диффузию дефектов, интерметаллические реакции в контактах и деградацию зеркал резонатора. Это существенно сокращает срок службы прибора, который может исчисляться всего сотнями или тысячами часов при нарушении теплового режима вместо десятков тысяч часов при оптимальном охлаждении. В-третьих, перегрев снижает дифференциальную квантовую эффективность и выходную оптическую мощность, вызывая эффект «thermal rollover» – падение мощности при увеличении тока накачки.

В связи с этим, рассмотренные ранее инновационные методы теплообмена находят все более широкое и эффективное применение именно в области термостабилизации мощных лазерных диодов. Например, микроканальное охлаждение, при котором теплоноситель (жидкость или газ) прокачивается через каналы диаметром менее миллиметра, непосредственно интегрированные в медный теплоотвод или подложку лазерного чипа, позволяет отводить рекордные тепловые потоки при минимальном тепловом сопротивлении. Иммерсионное охлаждение, предполагающее прямое погружение лазерного кристалла в диэлектрическую жидкость, не только обеспечивает идеальный тепловой контакт, но и может упростить конструкцию оптической системы, исключая необходимость в массивных теплоотводах. Применение наножидкостей (например, воды с добавлением наночастиц алмаза, графена или оксида алюминия) в сочетании с микроканальными структурами позволяет дополнительно повысить критический тепловой поток и коэффициент теплоотдачи на 10–40% по сравнению с традиционными хладагентами за счет улучшения теплопроводности.

Таким образом, разработка эффективных систем охлаждения является ключевым фактором, сдерживающим или, наоборот, открывающим новые горизонты в повышении мощности и надежности как полупроводниковой силовой электроники, так и современной оптоэлектроники.

Выбор конкретного решения определяется совокупностью факторов. В таблице 1 представлено сравнение различных методов.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика методов охлаждения

Метод охлаждения	Типичная рассеиваемая плотность теплового потока	Преимущества	Недостатки
Естественное воздушное	$< 0,5 \text{ Вт/см}^2$ [8]	низкая стоимость, надежность	низкая эффективность, громоздкость
Принудительное воздушное	до 50 Вт/см^2 [7]	простота, низкая стоимость	шум, недостаточно для сверхвысоких нагрузок
Жидкостное (непрямое)	до 500 Вт/см^2 [7, 8]	высокая эффективность	сложность, риск протечек
Иммерсионное / Микроканальное	$> 1000 \text{ Вт/см}^2$ [1, 7]	экстремально высокая эффективность	высокая стоимость, сложность эксплуатации

Закключение. Выполнен анализ современного состояния и перспектив развития систем воздушного охлаждения высокоомощных электронных компонентов. Установлено, что традиционные методы, основанные на применении осевых и радиальных вентиляторов, остаются доминирующими для широкого круга задач благодаря своей экономичности, однако их эффективность ограничена диапазоном тепловых нагрузок. Рост удельной мощности современных полупроводниковых и оптоэлектронных приборов требует либо глубокой оптимизации вентиляторных систем (внедрение энергоэффективных ЕС-вентиляторов с электронной коммутацией, точный аэродинамический расчет воздушных трактов), либо перехода к гибридным и инновационным решениям. Показано, что наиболее перспективными направлениями являются интеграция твердотельных охлаждающих элементов на основе электрокалорического эффекта непосредственно в структуру кристалла, а также использование микроканальных структур и наножидкостей для кардинальной интенсификации теплообмена. Данные методы одинаково важны как для силовых полупроводниковых модулей (IGBT-транзисторов и SiC-МОП-структур), где плотность теплового потока неуклонно растет, так и для мощных лазерных диодов, в которых перегрев

напрямую влияет на стабильность длины волны и скорость деградации кристалла. Особую актуальность инновационные подходы приобретают в задачах термостатирования прецизионных оптоэлектронных компонентов, где требования к температурной стабильности максимально высоки. Выбор оптимального решения должен базироваться на тщательном анализе плотности теплового потока, массогабаритных ограничений, условий эксплуатации и экономической целесообразности с учетом всего комплекса требований к современной высокомоощной электронике, что в конечном итоге определяет надежность и долговечность работы устройств.

Список литературы

1. Enhancing Thermal Efficiency in Power Electronics: A Review of Advanced Materials and Cooling Methods / T. Orville [et al.] // UBC Faculty Research and Publications. – 2025. – 15 p.
2. Виды вентиляторов: классификация, устройство, принцип работы популярных конструкций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zelmershop.ru/vidy-ventilatorov-klassifikacia-ustrojstvo-princip-raboty-populjarnyh-konstrukcij/>. – Дата доступа: 06.03.2026.
3. Как выбрать вентилятор с охлаждением для вашего оборудования в 2026 году [Электронный ресурс] / Linkwell Electronics. – Режим доступа: <https://linkwellelectrics.com/ru/cooled-fan/>. – Дата доступа: 06.03.2026.
4. Рекомендации по выбору вентиляторов для охлаждения электронного оборудования / А. Соболев // Компоненты и технологии. – 2007. – № 8. – С. 178–182.
5. Холод без шума: электричество вместо фреона [Электронный ресурс] // iXBT Live. – Режим доступа: <https://www.ixbt.com/live/science/holod-bez-shuma-elektrichestvo-vmesto-freona.html>. – Дата доступа: 06.03.2026.
6. Progress in electrocaloric cooling: materials, devices, and cycle optimization / J. Shi [et al.] // ScienceDirect. – 2025. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S129007292500523X> (date of access: 06.03.2026).
7. Cooling Solutions for High-Voltage Power Modules [Electronic resource] / Xeon Fan. – Mode of access: <https://xeonfan.com/news/cooling-solutions-for-highvoltage-power-modules.html>. – Date of access: 06.03.2026.
8. Проблема выбора способа охлаждения для силовых полупроводниковых приборов / А.В. Лысенко, В.В. Парфенов // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 2. – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1624>. – Дата доступа: 06.03.2026.

UDC 536.24:621.38

CLASSIFICATION AND INNOVATIVE SOLUTIONS IN AIR COOLING OF HIGH-POWER ELECTRONIC COMPONENTS

Zhivitskiy I.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Dzik S.K. – Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of ECG

Annotation. The paper presents an analysis of modern air-cooling methods for electronic components. It examines the classification of systems, a comparison of fan types, and promising technologies (microchannels, nanofluids, phase-change materials). The field of application—from power modules to laser diodes—is shown. Criteria for selecting the optimal cooling system depending on operating conditions are proposed.

Keywords: heat generation, air cooling, fan, high-power components, laser diodes, electrocaloric effect, nanofluids, thermal management