

# В поисках идеального решения:

## жидкостное охлаждение в современных компактных корпусах высокой мощности

д-р Юрген Шульц-Хардер  
Сергей Валев

valev@ivtec.ru

### Введение

Закон Мура предсказал резкое увеличение плотности размещения электронных компонентов в корпусах изделий, произошедшее за последние десятилетия. Одновременно с увеличением коэффициента использования объема изделия увеличивается и плотность тепловых потоков.

В современных силовых модулях для промышленных применений уровень рассеиваемой мощности на один квадратный сантиметр площади корпуса достиг нескольких сотен ватт. Тепловые потери современных микропроцессоров в компьютерах (главный процессор, видеопроцессор) имеют такой же порядок. Мощные лазерные диоды и сверхъяркие светодиоды генерируют больше тепловой энергии на единицу площади, чем самые мощные силовые модули. Возможности обычного воздушного охлаждения практически исчерпаны, но проблемы рассеивания тепла могут быть во многом решены с помощью жидкостного охлаждения. Ситуация в современной электронике напоминает ситуацию в автомобильном двигателестроении: по мере роста мощности двигателей все меньше оставалось автомобилей с воздушным охлаждением, и сегодня такой способ отвода тепла воспринимается как экзотика.

### Отвод тепла в корпусах электронных приборов

Пути отвода тепла зависят от технологии сборки и конструкции корпуса модуля. Основными типами сборки являются так называемый «chip on board» (COB) — контактными площадками вверх и «flip-chip» (FC) — контактными площадками вниз. Как показано на рис. 1, теплоотвод в COB идет с нижней поверхности кристалла через слой припоя и далее через материал основания-подложки. В корпусе FC теплоотвод осуществляется с верхней поверхности кристалла через промежуточный слой теплопроводного материала (thermal interface material — TIM) и крышку во внешнюю среду. Основание корпуса COB и крышка корпуса FC при повышении теплоотдачи модуля должны присоединяться к радиатору, распределяющему тепло во внешнюю среду. Технология COB используется в промышленной силовой электронике: полевые МОП-транзисторы, диоды, IGBT-транзисторы, мощные светодиоды и лазерные диоды. Технология FC — основа корпусов СБИС микропроцессоров, графических процессоров и микросхем памяти, применяемых в стационарных и переносных компьютерах.

### Физические основы систем охлаждения электронных приборов

Физическими условиями, определяющими применение той или иной системы охлаждения прибора, являются максимально допустимая рабочая температура прибора и максимальное количество теплоты, генерируемое с единицы площади прибора. На рис. 2а упрощенно показана зависимость между плотностью потока тепла и рабочей температурой различных типов приборов. Самые высокие характеристики — у лазерных диодов, которые имеют тепловыделение до 400 Вт/см<sup>2</sup>. Такие диоды необходимо охлаждать до сравнительно невысоких температур — 50–60 °С. Главные процессоры компьютеров по характеристикам тепловыделения также приближаются к силовым приборам, но с более низкой рабочей температурой. Данные по светодиодам на рис. 2 являются характеристиками дискретных устройств. В будущем кристаллы из SiC должны иметь гораздо более высокие рабочие температуры, а следовательно, и допустимые тепловые потери.

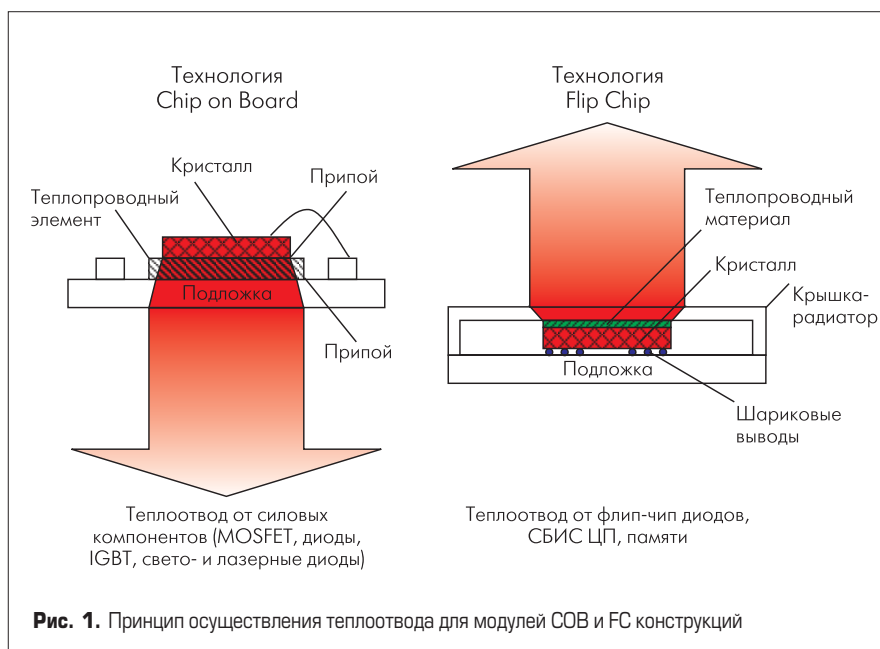


Рис. 1. Принцип осуществления теплоотвода для модулей COB и FC конструкций

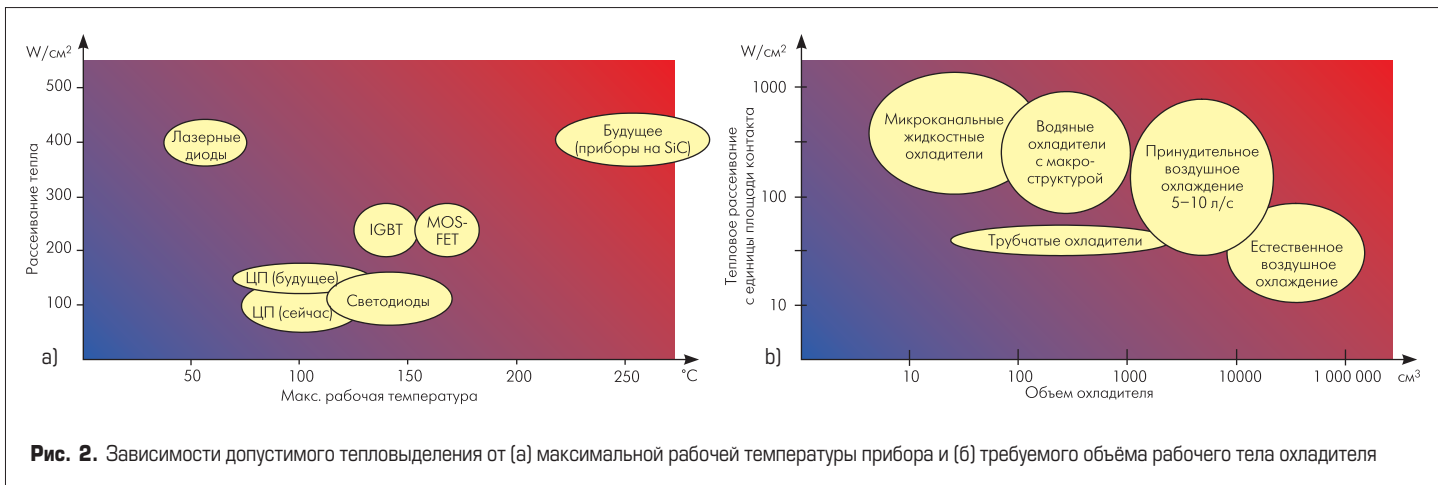


Рис. 2. Зависимости допустимого тепловыделения от (а) максимальной рабочей температуры прибора и (б) требуемого объема рабочего тела охладителя

Таблица 1

	Преимущества	Недостатки	Применение в электронике
Воздушное охлаждение	Нет проблем утечки Низкая стоимость	Требуется место, требуется пространство для распределения тепла, высокое тепловое сопротивление, ограниченное значение окруж. температуры, шума	Широкая область применения Самый используемый тип охлаждения
Жидкостное охлаждение	Малый занимаемый объем, произвольная форма теплоотводящих труб, низкое тепловое сопротивление, меньший уровень шумов	Требуется компрессор, возможность утечки, высокая стоимость, ограниченное значение окруж. температуры,	Лазерные диоды, силовая электроника
Трубчатый теплообменник	Малый занимаемый объем, низкое тепловое сопротивление, низкий уровень шумов	Ограниченная теплопроводность теплоносителя, высокая стоимость, жестко заданная форма труб, ограниченное значение окруж. температуры,	Портативные компьютеры, силовая электроника, космос
Компрессорное охлаждение	Малый занимаемый объем, низкое тепловое сопротивление, нет зависимости от окруж. температуры	Жестко заданная форма труб, высокая стоимость, высокий уровень шумов, низкая точка росы	Экспериментальные системы непосредственного охлаждения, системы непрямого кондиционирования
Термоэлектрическое охлаждение	Малый занимаемый объем, низкое тепловое сопротивление, нет зависимости от окруж. температуры.	Ограниченная теплопроводность теплоносителя, низкая эффективность	Оптоэлектроника
Термоакустическое охлаждение	Только одна подвижная деталь, низкое тепловое сопротивление, нет зависимости от окруж. температуры	Нет разработанной технологии	Экспериментальные образцы для космоса

Физические условия, определяющие применение системы охлаждения, зависят от максимального рассеивания тепла на единицу площади контакта, температуры окружающей среды и максимально допустимого объема изделия.

На рис. 2б приведена упрощенная схема, показывающая эффективность разных типов систем охлаждения по значению максимального рассеивания тепла на единицу площади и по объему, занимаемому этой системой при данной производительности. С точки зрения максимального теплоотвода при минимальном объеме системы самым эффективным решением является микроканальный охладитель.

Естественная конвекция требует объема, более чем в 100 раз превышающего объем жидкостного теплообменника, при этом значение рассеивания тепла на единицу площади в случае естественной конвекции наихудшее.

Другие типы систем охлаждения по своим характеристикам занимают промежуточное положение. Эффективность пассивных систем охлаждения сильно зависит от внешних

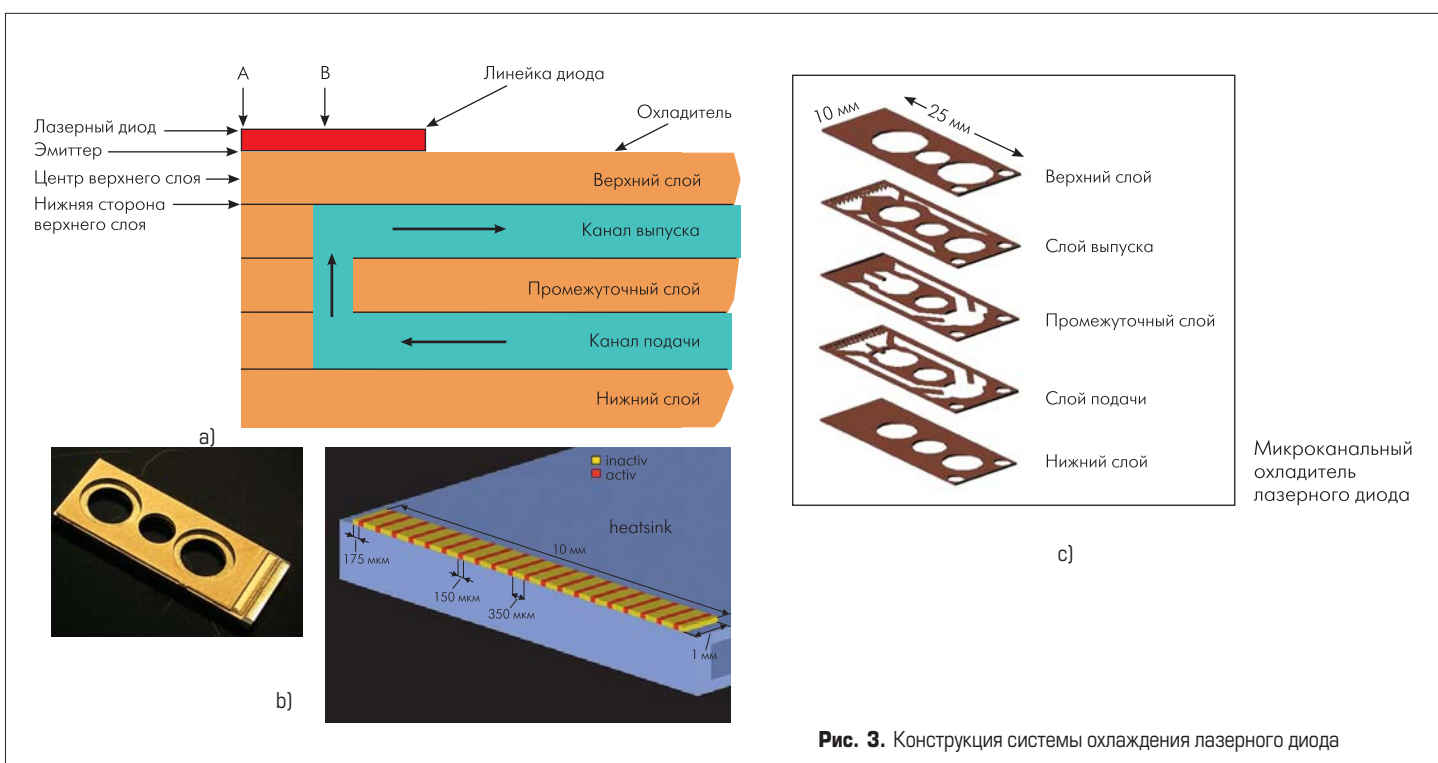
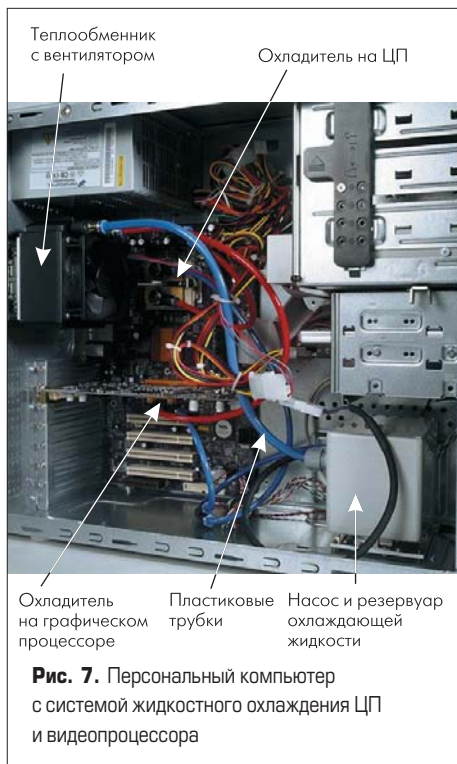
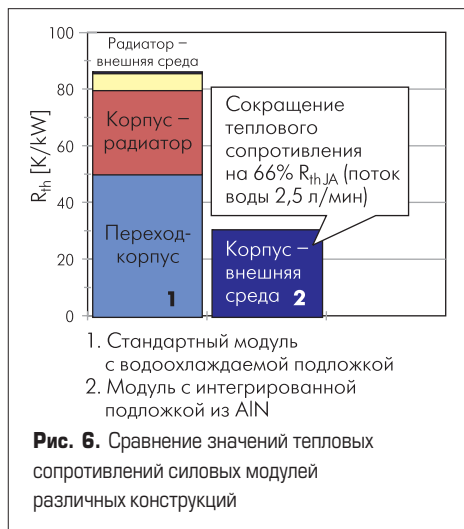
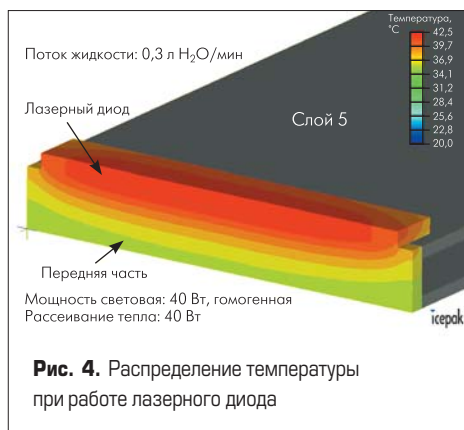


Рис. 3. Конструкция системы охлаждения лазерного диода



условий, активные способы отвода тепла не имеют таких ограничений. Существуют еще две технологии для промышленных применений — это системы охлаждения с термоэлектрическими элементами (элементы Пельтье) и компрессорные системы охлаждения. Недавно появились сообщения об экспериментальных системах термоакустического охлаждения в космических аппаратах [1]. В таблице 1 приводится краткий анализ преимуществ, недостатков и областей применения каждого из типов систем отвода тепла.

### Лучшее из решений на сегодня — жидкостное охлаждение

Из рис. 2а видно, что жидкостное охлаждение позволяет рассеивать максимальное количество теплоты прямо с поверхности нагретого компонента. Ниже приводятся три показательных примера применения систем жидкостного охлаждения.

#### Пример 1. Системы охлаждения лазерных диодов

На рис. 3а показана конструкция мощной линейки лазерных диодов с водяным охлаждением. Диоды смонтированы на охладителе посредством сверхтонкого слоя припоя. Жидкость подается в нижний штуцер в конце радиатора, затем поднимается и выводится через верхний штуцер. На рис. 3б показано реальное изделие, на рис. 3с — внутренняя структура системы охлаждения. Слои микроканального охладителя представляют собой тонкие медные листы, протравленные химическим методом. Слои меди соединены

между собой с применением технологии прямой эвтектической связи Direct Bonding Copper (DBC). Распределение температуры при тепловыделении 40 Вт и расходе воды 0,3 л/мин показано на рис. 4. В этом случае из-за ограниченного объема системы жидкостное охлаждение признано единственным приемлемым вариантом.

#### Пример 2. Системы охлаждения силовых модулей

На рис. 5а и 5б показаны силовые модули, у которых изолирующая подложка из нитрида алюминия является неотъемлемой частью системы микроканального охлаждения. Внутренняя структура представляет собой шестиугольные соты, протравленные в нескольких слоях меди, соединенных друг с другом по технологии DBC [2, 3]. Тепловое сопротивление такого модуля составляет всего лишь 36% от сравнимого по мощности стандартного модуля, установленного на подложку с водяным охлаждением (рис. 6). По сравнению со стандартным модулем, имеющим воздушное охлаждение, тепловое сопротивление в данном случае уменьшено на 90%. Модуль, показанный на иллюстрации, работает с током 450 А и охлаждается жидкостью, которая может иметь температуру на входе вплоть до 80 °C. К тому же сокра-

щение расстояния от кристалла до теплоотводящей жидкости системы существенно уменьшает габариты модуля.

#### Пример 3. Системы охлаждения процессоров компьютеров

Компоненты современных компьютеров, такие как центральный процессор, северный мост и графический процессор, достигли значений плотности рассеиваемой мощности 100 Вт/см<sup>2</sup>. Тепловыделение микропроцессоров будущего может достигнуть значения 200 Вт/см<sup>2</sup> [4]. Традиционные системы, в которых используется вентилятор и металлический радиатор, устанавливаемый на процессор, достигли своего предела, обусловленного массой, занимаемым объемом, критическим уровнем температуры внутри корпуса компьютера и, главное, уровнем шума. Серверы, содержащие десятки процессоров, выделяют несколько киловатт тепла, рассеиваемого в помещении, которое, в свою очередь, охлаждается мощной системой кондиционирования. Подобный метод организации работы сервера также подходит к своему пределу. Системы жидкостного охлаждения позволяют переносить тепло в любое место, где можно установить теплообменник. На рис. 7 показан стационарный компьютер, оснащенный системой жидкостного охлаждения центрального и графического процессора. Такая система рассеивает около 150 Вт тепловой мощности этих двух СБИС. На рис. 8 показан охладитель системы в комплекте с фитингами и соединительными трубками. Толщина охладителя — 3 мм, масса — 51 г. Внутренняя



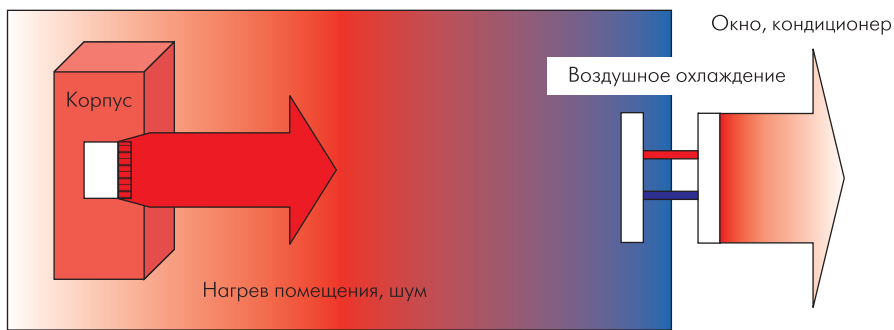


Рис. 9а. Обычная ситуация: Теплообменник на компоненте

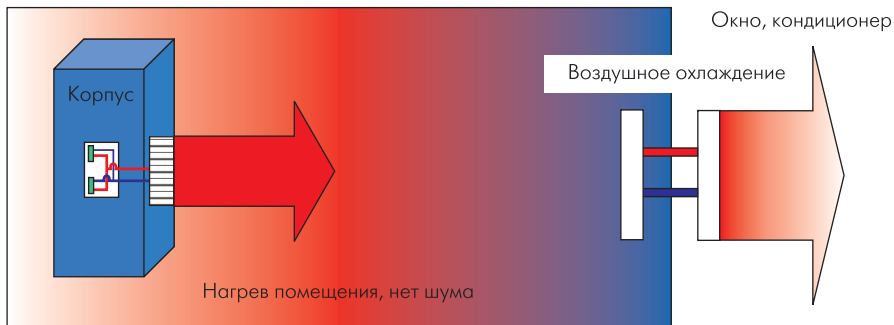


Рис. 9б. Лучшее решение на сегодня: Жидкостное охлаждение компонента и теплообменник вне корпуса прибора

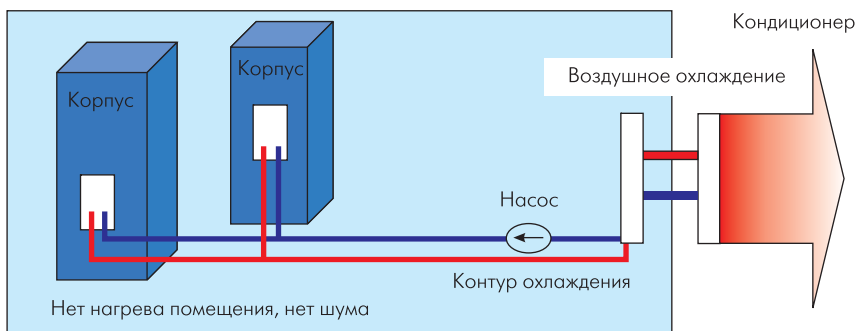


Рис. 9с. Будущее: комбинированная система с компрессорным охлаждением

структура, полученная наложением и спеканием слоев протравленной меди, аналогична образцу на рис. 2. Тепловое сопротивление металлической структуры меньше, чем у охладителя на рис. 2, поскольку в ней отсутствует слой изолирующей керамики.

Преимуществами представленной системы жидкостного охлаждения являются:

- низкий уровень шума (< 25 дБ), и, соответственно, возможность применения системы в графических станциях и компьютерных аудиокomплексах высшего класса;
- низкая нагрузка на печатную плату (масса охладителя на 70–90% меньше, чем традиционного вентилятора с радиатором);
- рассеивание тепловой мощности до 150 Вт;
- возможность работы одной системы с несколькими СБИС, при этом увеличивается только количество самих охладителей.

### Комбинация различных систем охлаждения — решение, удовлетворяющее самым жестким требованиям

Характеристики пассивного охладителя зависят от разницы температур радиатора и внешней среды. На рис. 9а показано распределение тепла обычных систем охлажде-

ния, в которых радиатор прикреплен к верхней стороне компонента. Внутренний объем корпуса нагревается, горячий воздух из корпуса направляется во внешнюю среду и нагревает окружающий воздух. Атмосфера используется как неограниченный теплообменник — когда воздух в помещении нагревается выше комфортного предела, в ход идут системы вентиляции, кондиционеры.

Второй тип системы охлаждения, как было рассмотрено выше, может состоять из жидкостного охладителя, фитингов, трубок и теплообменника, расположенного вне корпуса, предназначенного для охлаждения жидкости после переноса тепла от прибора (рис. 9б). В этом случае температура во внутреннем объеме корпуса остается низкой, нагревается только окружающий воздух.

При конструировании систем охлаждения мощных серверов, генерирующих несколько киловатт тепла, имеет смысл рассматривать комбинированные системы, в которых жидкостные охладители связаны с термоэлектрическими или компрессорными теплообменниками. В этом случае тепло от жидкости в контуре охлаждения прибора отводится термоэлектрическим элементом или ком-

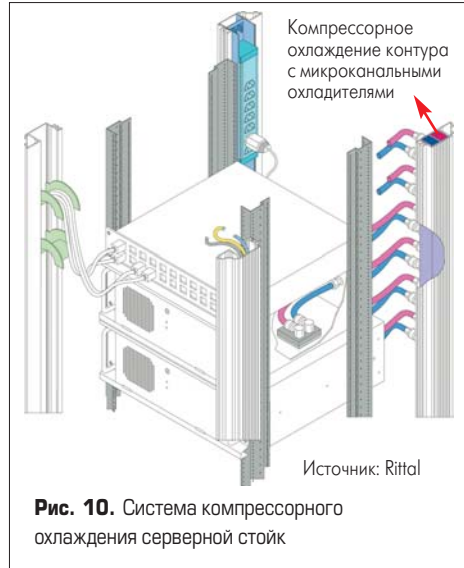


Рис. 10. Система компрессорного охлаждения серверной стойки

прессором (рис. 9с). Комбинированные системы уже сейчас используются для охлаждения мощных лазерных диодов [5].

Такое универсальное решение находит все большее применение в стойках серверов. Небольшие легкие жидкостные охладители монтируются на микропроцессорах сервера [6]. На рис. 10 показана серийно выпускаемая фирмой Rittal стойка, оборудованная системой жидкостного охлаждения. В ней вода на микроканальные охладители подается через систему компрессорного охлаждения.

### Заключение

За последние десятилетия тепловая мощность полупроводниковых приборов возросла в сотни раз. Законы теплотехники говорят о том, что пассивное воздушное охлаждение достигло своего физического предела. Для развития техники необходимы иные принципы построения систем охлаждения. В поиске выхода все больше конструкторов приборов обращаются к жидкостному охлаждению — решению, успешно применяемому во многих областях электроники уже сегодня.

### Литература

1. Steven L. Garrett. Thermoacoustic refrigerator for space applications // Journal of thermophysics and heat transfer. 1993. Vol. 7. N 4.
2. Dr. Thomas Licht, Dr. Jürgen Schulz-Harder. Micro channel water cooled power modules. PCIM Power Conversion Intelligent Motion Power Quality. Nürnberg. June 2000.
3. Dr. Schulz-Harder, Dipl.-Ing. Suavi Örey. Thermal management of dense power electronics for drives // Power Electronics Europe. 2002. Issue 3.
4. Ratnesh K. Sharma. Inkjet assisted spray cooling of electronics. IMAPS Advanced technology workshop (ATW) on thermal management for high-performance computing and wireless applications. October 2003.
5. Thilo Horvatitsch. Winzlinge mit hohem Potenzial // Laser. 2001. Issue 4.
6. CWI. Wasserkühlung für Server // c't. 2002. Issue 10.