

ЖФЭ в системе GaAs–InGaAs–AlGaAs с использованием комплексного легирования редкоземельными и изовалентными примесями [11—14] были изготовлены высококачественные фотопреобразователи солнечной энергии, на основе которых создан модуль солнечных элементов с КПД, достигающим 28,5 % при АМ 1,5.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Meyer M., Metzger R. A. Flying high: the commercial satellite industry converts to compound semiconductor solar cells // *Compounds semiconductors*.— 1997.— Special issue.— P. 40—42.
2. Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Румянцев В. Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // *ФТП*.— 2004.— Т. 38, вып. 8.— С. 937—947.
3. Круковский С. И., Николаенко Ю. Е. Солнечные элементы на основе тандемных гетероструктур GaAs–InGaAs–AlGaAs // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2003.— № 6.— С. 39—40.
4. Николаенко Ю. Е., Круковский С. И., Завербный И. Р. и др. Получение тандемных гетероструктур GaAs–InGaAs–AlGaAs для фотопреобразователей солнечной энергии // *Там же*.— 2002.— № 3.— С. 27—29.
5. Гореленок А. Т., Каманин А. В., Шмидт Н. М. Редкоземельные элементы в технологии соединений $A^{III}B^V$ и приборов на их основе // *ФТП*.— 2003.— Т. 37, вып. 8.— С. 922—940.
6. Беспалов В. А., Елкин А. Г., Журкин Б. Г. и др. Механизм влияния редкоземельных элементов на свойства слоев GaAs, выращенных жидкофазной эпитаксией // *Краткие сообщения по физике*.— 1987.— № 9.— С. 32—34.

7. Семенова Г. Н., Крыштаб Т. Г., Кладько В. П. и др. Свойства эпитаксиальных слоев GaAs, AlGaAs, полученных жидкофазной эпитаксией с использованием добавок редкоземельных элементов // *Изв. АН СССР. Неорганич. материалы*.— 1996.— Т. 32, № 8.— С. 916—919.

8. Yu J. Z., Iwai S., Aoyagi Y. et al. Growth and doping characteristics of $Al_xGa_{1-x}As$ grown by LPE at 780°C // *Scientific papers of the Institute of Physical and Chemical research*.— 1984.— Vol. 78, N 2.— P. 13—18.

9. Milanova M., Khvostikov V. Growth and doping of GaAs and AlGaAs layers by low-temperature liquid-phase epitaxy // *Journal of Crystal Growth*.— 2000.— Vol. 219.— P. 193—198.

10. Акчурин Р. Х., Донская И. О., Дулин С. И., Уфимцев В. Б. Расчет изменения концентрации собственных дефектов в арсенидах галлия и индия при изовалентном легировании висмутом // *Кристаллография*.— 1988.— Т. 33, вып. 2.— С. 464—470.

11. Krukovsky S., Bolshakova I., Korbutiak D. et al. Radiation resistance of GaAs, AlGaAs heterostructures doped with isovalent and rare-earth elements // *Radiation Physics and Chemistry*.— 2001.— Vol. 61.— P. 553—555.

12. Заячук Д. М., Круковский С. И. Вплив домішок рідкісноземельних елементів Gd і Yb на електрофізичні властивості епітаксійних шарів GaAs // *Вісн. НУ “Львівська політехніка”*.— 2001.— № 430.— С. 73—75.

13. Заячук Д. М., Кемпник В. І., Круковский С. І. та ін. Домішки РЗЕ у напівпровідниках A^4B^6 і A^3B^5 : поведінка та вплив на фізичні властивості // *Вісн. НУ “Львівська політехніка”*.— 2002.— № 459.— С. 110—123.

14. Пат. 50883 України. Спосіб отримання напівізолюючого арсеніду галію / М. М. Ваків, С. І. Круковский, Ю. Є. Ніколаенко.— 2002.— Бюл. № 11.

*Д. т. н. Е. Н. ПИСЬМЕННИЙ, к. т. н. В. Д. БУРЛЕЙ,
к. т. н. В. А. РОГАЧЕВ, к. т. н. А. М. ТЕРЕХ*

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»
E-mail: kravetz_kpi@ukr.net

Дата поступления в редакцию
29.07 2004 г.

Оппонент *к. т. н. В. И. ЕФРЕМОВ*
(НИИ "Шторм", г. Одесса)

ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОРЕБРЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ НИЗКОСКОРОСТНОМ ОБДУВЕ

При охлаждении с воздушным обдувом использование поверхности с сетчато-проволочным оребрением предпочтительнее, чем с пластинчатым, с точки зрения уменьшения массы.

Проблема охлаждения современных персональных компьютеров (ПК) приобретает особую актуальность из-за роста количества транзисторов в процессоре (до нескольких десятков миллионов на площади 2—2,5 см²), а также с ростом тактовой частоты самого процессора, приближающейся к уровню 3,5 ГГц. В рамках существующих технологических состояния и тенденции развития элементной базы ПК приводят к увеличению рассеиваемой мощности таких устройств до 65—75 Вт, что значительно повышает их перегрев. В качестве охлаждающего устройства процессора широко применяется стандартное сочетание оребренной поверхности с малогабаритным низконапорным осевым вентилятором, называемое кулером.

С целью определения эффективности таких систем воздушного охлаждения для теплонагруженных элементов ПК проведены исследования различных развитых оребренных поверхностей. Исследовались медные оребренные поверхности с плоским основанием при различных направлениях обдува ребер с помощью осевого вентилятора.

Основные конструктивные характеристики теплоотводящих поверхностей приведены в **таблице**. Исследованы поверхности с пластинчатым (№ 1) и сетчато-проволочным (№№ 2—5) оребрением. Для обдува использован вентилятор BS601012H фирмы Vi-Sonic Technology, являющийся составной частью кулера типа DP5-611A компании Cooler Master. Его габаритные размеры 60×60×10 мм, частота вращения крыльчатки 4500 мин⁻¹, максимальный расход воздуха 0,0113 м³/с, напор до 3 мм вод. столба [1, 2]. На **рис. 1 и 2** показаны схемы с верхним и боковым обдувом поверхностей.

Конструктивные характеристики теплопроводящих поверхностей

Параметр	Номер поверхности				
	1	2	3	4	5
Размеры основания, мм	71×71	72×72	71×71	72×72	72×72
Диаметр проволоки, мм	—	1,00	0,75	0,65	0,55
Толщина ребра, мм	1,5	—	—	—	—
Высота ребра, мм	34,5	32,0	35,0	36,0	34,5
Размер ячейки сетки (S ₁ ×S ₁), мм	—	5×5	5×5	3×3	3×3
Шаг оребрения (S ₂), мм	7	4	4	4	4
Число ребер	11	17	17	17	17
Полная площадь поверхности, мм ²	60332	55619	45890	59917	53435
Коэффициент оребрения	10,60	9,66	8,27	10,4	9,28
Масса, кг	0,515	0,344	0,308	0,306	0,30

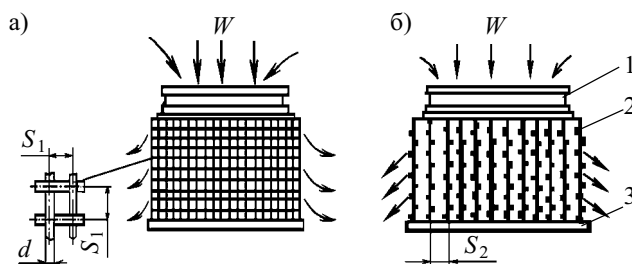


Рис. 1. Схема охлаждения с верхним обдувом поверхности: а — фронтальный вид; б — вид сбоку; 1 — вентилятор; 2 — оребрение; 3 — основание

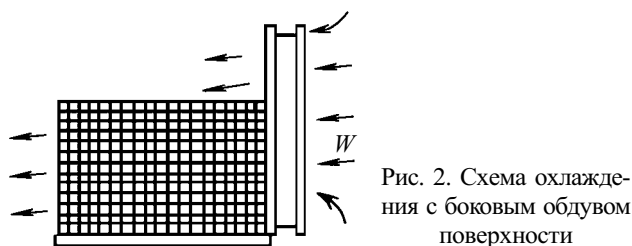


Рис. 2. Схема охлаждения с боковым обдувом поверхности

Эксперименты выполнены в диапазонах рассеиваемой мощности $Q=15...65$ Вт и температуры окружающей среды $t_c=20...25^\circ\text{C}$. Подвод тепла к оребренной поверхности осуществлялся с помощью тканого резистивного нагревателя, совпадающего с размерами основания и плотно прижатого к его плоскости. Толщина основания поверхностей составляла 6 мм.

Измерение температурного поля основания осуществлялось медь-константановыми термопарами с диаметром проводов 0,08 мм, равномерно распределенными и зачеканенными в глухие отверстия на поверхности основания. Показания термопар регистрировались цифровым многоканальным измерительным преобразователем типа Ш 711/1 с выводом на цифropечатающее устройство.

Питание электронагревателя осуществлялось переменным током через стабилизатор напряжения, а его мощность контролировалась ваттметром типа Д 529 класса точности 0,5.

Температура окружающей среды измерялась лабораторным ртутным термометром с ценой деления $0,1^\circ\text{C}$.

Средняя температура поверхности основания t_{oc} рассчитывалась путем усреднения значений температуры t_i на участках площадью F_i по всей поверхности основания с помощью соотношения [3]

$$t_{oc} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i F_i}{\sum_{i=1}^n F_i}$$

Средний перегрев (температурный напор) основания вычислялся по выражению

$$\Delta t = t_{oc} - t_c$$

Величина рассеиваемой мощности определялась как разность между мощностью, подаваемой на электронагреватель, и тепловыми потерями через стенку теплоизолирующей подставки, на которой крепилась испытываемая поверхность. На основании экспериментов установлено, что эти потери в диапазоне изменения режимных параметров составляют 3—7% от подводимой мощности. Тепловой поток, отведенный поверхностью излучением, не превышает 2% суммарных тепловых потерь (рассчитывался по методике [4]). Потери тепла через термоэлектродные провода оценивались как пренебрежимо малые и не учитывались.

Максимальная относительная среднеквадратичная погрешность определения температурного напора Δt для малых уровней рассеиваемой мощности не превышала $\pm 5\%$.

Сравнение эффективности теплоотдачи поверхностей при различных направлениях потока охлаждающего воздуха выполнено на основе анализа зависимостей $\Delta t=f(Q)$, представленных на рис. 3 и 4. Из рисунков видно, что геометрические размеры и тип оребрения ощутимо влияют на интенсивность теплоотвода при значении рассеиваемой мощности более 30 Вт. Независимо от направления обдува самой эффективной из рассмотренных была поверхность № 1 с пластинчатым оребрением. По сравнению с ней несколько ниже (до 10%) эффективность у сетчатой поверхности № 2 [5].

На рис. 5 приведены тепловые характеристики для пластинчатой № 1 и сетчатой № 2 поверхностей в зависимости от направления обдува. Как видно из рисунка, наиболее эффективной является подача воздуха при верхнем расположении вентилятора (рис. 1), т. е. когда вначале поток движется параллельно ребрам, а затем, сталкиваясь с плоскостью основания, резко изменяет свое направление, радиально распространяясь по нему в противоположные стороны от его центра. При боковом размещении вентилятора (рис. 2) картина течения иная и с точки зрения теплообменного процесса менее эффективна, т. к. натекание потока происходит вдоль поверхностей оребрения и основания в условиях постепенного нарастания пограничных слоев. Большая эффективность пластинчатой поверхности по сравнению с сетчатыми обусловлена, в основном, ее небольшим аэродинамическим сопротивлением из-за достаточно большого размера межреберного зазора.

Анализ данных показал, что в исследованном диапазоне рассеиваемой мощности эффективность теплоотдачи пластинчато-ребристой поверхности на 10—

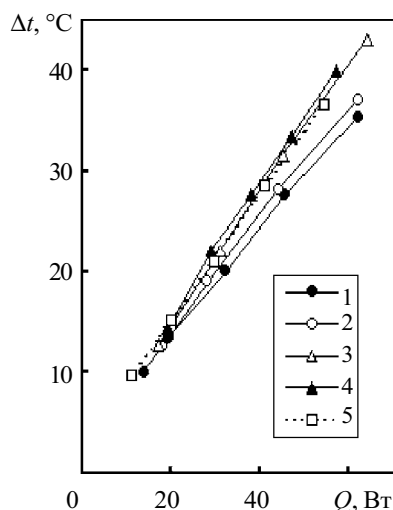


Рис. 3. Тепловые характеристики поверхностей при обдуве сверху (1–5 — номера поверхностей в соответствии с таблицей)

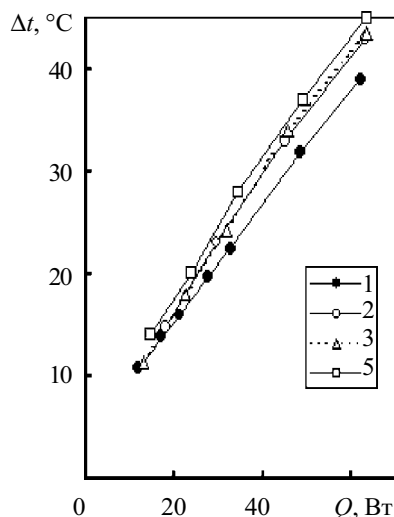


Рис. 4. Тепловые характеристики поверхностей при обдуве сбоку

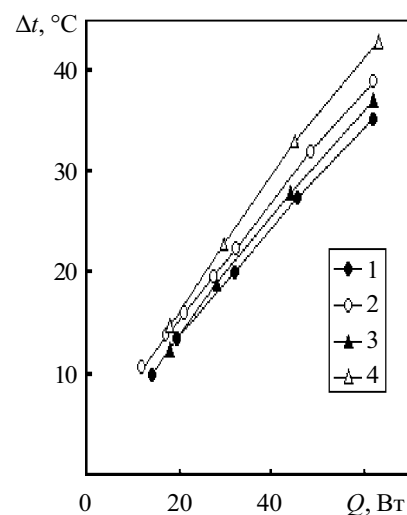


Рис. 5. Тепловые характеристики поверхностей при обдуве сверху (1, 3) и сбоку (2, 4): 1, 3 — поверхность № 1; 2, 4 — № 2

20% выше, чем сетчато-проволочной, имеющей, однако, в 1,5—1,7 раза меньшую массу. Такое преимущество по массе может стать определяющим фактором при выборе типа теплоотводящей поверхности, когда выдвигается требование уменьшения механического давления на кристалл процессора. Например, одна из ведущих фирм по производству процессоров для компьютеров AMD довольно жестко ограничивает массу (до 300 г), размеры (до 80×60×60 мм) и усилие прижима крепежа (до 5,3 кгс) кулеров для Socket A процессоров.

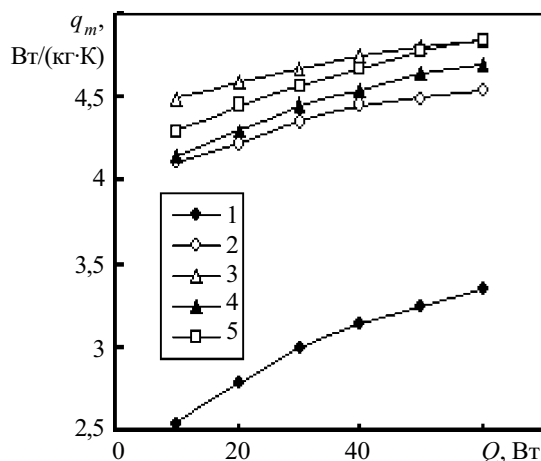


Рис. 6. Зависимость удельного массового показателя от рассеиваемой мощности при верхнем обдуве поверхностей

Учитывая важность сказанного, для оценки эффективности теплообменной поверхности введем тепловой параметр, связанный с ее массой: $q_m = Q / (m\Delta t)$. На рис. 6 представлены экспериментальные данные в виде зависимостей $q_m = f(Q)$. Из анализа графиков

следует, что во всем диапазоне рассеиваемой мощности удельные массовые показатели q_m сетчато-проволочных поверхностей при верхнем обдуве в 1,4—1,5 раза выше, чем у пластинчато-ребристой. Лучшие показатели имеют поверхности № 3 и № 5 за счет меньшей массы, несмотря на то, что при одинаковом среднем перегреве их теплоотводящие характеристики хуже, чем у поверхностей № 1 и № 2.

Таким образом, экспериментальные исследования теплообмена плоских поверхностей с сетчато-проволочным и пластинчатым оребрением при низконапорном обдуве показали, что более эффективным является обдув поверхности в направлении, перпендикулярном к плоскости ее основания.

Применение сетчато-проволочных поверхностей может стать более предпочтительным вариантом по сравнению с такой же по габаритам пластинчато-ребристой поверхностью в условиях ограничения по массе.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Макаров С. Процессорные кулеры: летнее изобилие // Компьютерное обозрение.— 2001.— № 29.— С. 16—31.
2. Потапов М. Процессорные кулеры: не дай компьютеру “замерзнуть” // Домашний ПК.— 2002.— № 7.— С. 25—31.
3. Письменный Е. Н., Рогачев В. А., Терех А. М. и др. Теплообмен плоских поверхностей с сетчато-проволочным оребрением при вынужденной конвекции // Пром. теплотехника.— 2002.— Т. 24, № 4.— С. 71—78.
4. Письменный Е. Н., Рогачев В. А., Босая Н. В. Исследование тепловой эффективности поверхностей с сетчато-проволочным оребрением при свободной конвекции // Тр. 2-й Российской нац. конф. по теплообмену.— Москва.— 1998.— Т. 6.— С. 181—183.
5. Пат. 48649 А Украины. Поверхня для охолодження напівпровідникових приладів / Є. М. Письменний, В. А. Рогачов, В. Д. Бурлей та ін.— 2002.— Бюл. № 8.