

## ВПЛИВ АТОМАРНОГО ВОДНЮ НА СТРУКТУРИ МЕТАЛ – НАПІВПРОВІДНИК. ВОЛЬТ-АМПЕРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Представлено результати експериментального дослідження дії атомарного водню на гетероструктури на основі Si та Ge. Показано, що обробка супроводжується змінами ВАХ. Домінуючими процесами є хемосорбція водню на поверхні, модифікація гетеромежі та дифузія атомів плівки у приповерхневі шари напівпровідника.

**Ключові слова:** тонкі плівки, напівпровідник, кремній, атомарний водень, рекомбінація, адгезія, дифузія.

### ВСТУП

Створення необхідного вигляду вольтамперної характеристики (ВАХ) в структурах метал – напівпровідник є актуальною і практичною задачею. Але для суттєвої зміни вигляду ВАХ в таких структурах, як правило, необхідні або високі температури (більше 700 К), або дія високоенергетичних частинок, зокрема потоку електронів, іонів, лазерної обробки тощо. Тому створення необхідної ВАХ при температурах близьких до кімнатної є актуальною задачею, оскільки при цьому не змінюються основні електрофізичні параметри об'ємних частин структур. Для такої низькотемпературної обробки була використана дія атомарного водню при температурах кристалу до 320 К. Крім того, вольт-амперні характеристики структур метал – напівпровідник можуть дати цінну інформацію про гетеромежу, а також про домішковий і зарядовий стан приповерхневих шарів кристалів [1–3].

В роботі досліджено зміни ВАХ структур Ni-Si, Ni-Ge при низькотемпературній обробці їх атомарним воднем.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Для дослідження було обрано дві системи на основі Si та Ge. Атомарний водень утворювався шляхом дисоціації молекулярного водню в плазмі височастотного розряду. Молекулярний водень виділявся з водного розчину КОН (20 %) електролізом. Далі водень пропускався через форбалон для уловлювання крапель КОН, осушений стовпчик, заповнений силікагелем, і надходив до робочої камери. Концентрація атомів водню вимірювалася калориметрич-

ним способом і складала близько  $10^{19} \text{ м}^{-3}$  при тиску в робочій камері 20 Па.

Контакти з лицьової сторони кристалів отримувалися термічним випаровуванням у вакуумі через маску. Контакт до тильної сторони кристалу утворювався за допомогою пасту Ga, яка механічним втиранням наносилася на всю поверхню. Велика площа цього контакту забезпечила омичний характер контакту, що було перевірено експериментально.

ВАХ знімалися за допомогою автоматизованого вимірювача характеристик напівпровідникових приладів Л2-56. Вироблені зразки розміщувалися на спеціально виготовленому столику із системою рухомих притискних контактів. Система притискання складалася з двох пружних елементів з різною пружністю, що забезпечило плавне та надійне притискання контакту до металеві плівки і виключило можливість пошкодження плівки.

Величина роботи виходу електрона (РВЕ) визначалася на основі вимірювань контактної різниці потенціалів (КРП)  $\Delta WF$  методом динамічного конденсатора [4]. Еталоном був зонд із золота ( $WF_{\text{Au}} = 4,3 \text{ eV}$ ) [5]. Для виключення похибки, пов'язаної з атмосферними коливаннями, потенціал еталоного електрода перед вимірами перевірявся за еталоном зразком – Au 975 проби. Розбіжність контактної різниці потенціалів уздовж поверхні для всіх дослідних зразків не перевищувала  $\pm 0,01 \text{ eV}$ .

### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Дослідження потенціалу поверхні зразків показали, що обробка *n*-Si(100) та *p*-Si(111) атомарним воднем приводить до зміни поверхневого потенціалу

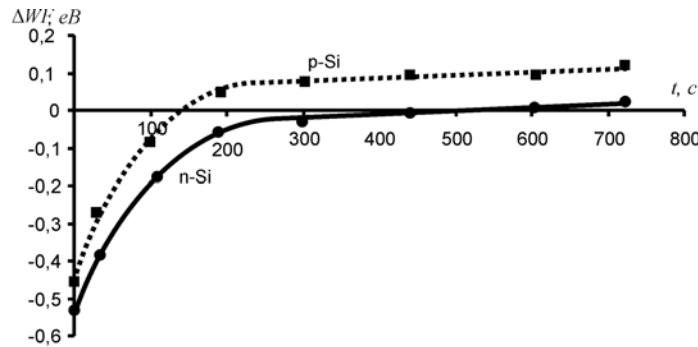


Рис. 1. Зміна потенціалу поверхні від часу обробки атомарним воднем свіжопротравлених зразків

(рис. 1). Виміри демонструють, що потенціали поверхонь реального *n*- та *p*-Si майже не відрізняються один від одного – різниця потенціалів складала  $\sim 0,050 \times 0,070$  eB. Це підтверджує наявність явища «пінінгу» рівня Фермі на поверхні напівпровідника [6].

Потенціал починав змінюватися вже після 30 секунд взаємодії кристала з атомарним воднем, а після 3–5 хвилин взаємодії потенціал поверхні досягав насичення. Експериментально зафіксовано, що більшого впливу зазнає *p*-Si (111) порівняно з *n*-Si(100). Після обробки різниця потенціалів між *p*-Si (111) та *n*-Si (100) складала 0,1 eB. Така відмінність у взаємодії атомарного водню з кристалами може бути пов'язана як з різною кристалографічною орієнтацією, так і з процесом комплексоутворення водню з атомами домішки бору та фосфору [7].

В результаті досліджень впливу атомарного водню на опір підкладинок встановлено, що для всіх зразків Si (0,3 та 1 Ом·см) з початком дії атомарного водню спостерігався стрибок величини опору, що, згідно з [8], пов'язано із процесами генерації вільних носіїв заряду під дією рекомбінації атомарного в молекулярний водень та процесом адсорбції. Опір зразків змінювався під час обробки до 20 % від початкового стану, при цьому відносна зміна опору є більшою на зразках з більшим питомим опором. Після припинення дії атомарного водню опір структур з часом повертався до початкових значень. Виходячи з цього факту, за умов обробки комплексоутворення, яке вплинуло на опір зразків, не відбувається, а зміна опору Si під час обробки H обумовлена процесами адсорбції та генерації нерівноважних носіїв заряду.

Дослідження впливу атомарного водню на поверхню *n*-Si (100) та *n*-Si(111) з однаковим питомим опором показали, що зміна потенціалу для *n*-Si(111) на  $\sim 0,07$  eB більша, ніж для *n*-Si(100). Згідно з [9],

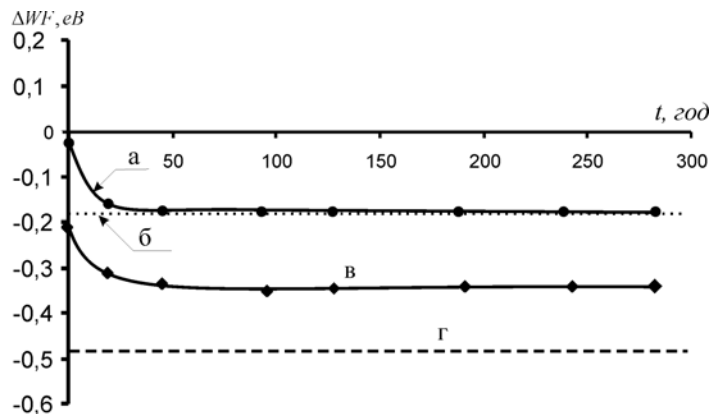
щільність розірваних зв'язків на поверхні Si (111) більша, ніж на Si (100), тому більші за значенням зміни потенціалу Si (111) пов'язуються з її більшою активністю до взаємодії з воднем. Таким чином, взаємодія H з поверхнею напівпровідника за даних умов обробки не залежить від типу провідності, а визначається станом поверхні – кількістю розірваних зв'язків, адсорбованими частинками і т. ін.

Протягом деякого часу після обробки на усіх дослідних зразках спостерігається зменшення потенціалу поверхні, тобто відбувається його релаксація в бік початкового значення (рис. 2).

Після припинення дії водню потенціал поверхні повертається майже до початкового стану за 36–48 годин, якщо на зразках був зістарений шар природного окислу (витримка після травлення за кімнатних умов протягом декількох місяців). На зразках із тонким окислом, що утворився безпосередньо після обробки кристалів в HF при контакті з повітрям, потенціал поверхні значно відрізняється від початкового навіть після 240 годин витримки за кімнатних умов (різниця потенціалів обробленого та контрольного зразків складає  $\sim 0,18$  eB).

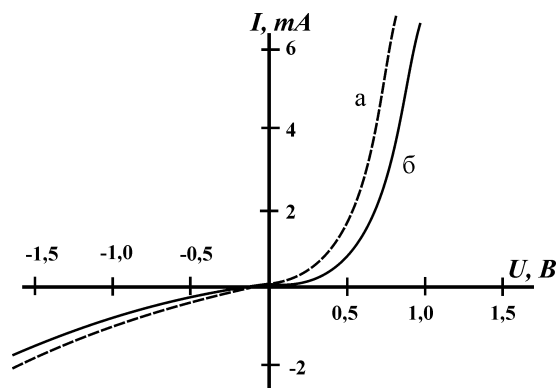
Таким чином, зміна потенціалу на зразках із зістареним шаром окислу проходить переважно за рахунок фізичної адсорбції. Взаємодія H із зразками, на поверхні яких шар SiO<sub>2</sub> має мінімальну товщину, супроводжується ще і хімічною адсорбцією. Потенціал поверхні таких зразків за кімнатних умов змінюється незначно і залишається на рівні, що суттєво відрізняється від початкового стану до обробки.

Визначення впливу атомарного водню на електричні параметри системи «метал – напівпровідник» проводилися на двох системах: метал – немодифікований Si та метал – оброблений атомарним воднем Si. Вимірювання показали відмінності ВАХ струк-



**Рис. 2.** Релаксація потенціалу поверхні зразків після обробки на протязі 300 с в Н:

*a* – зразок Si з товстим шаром природного окислу; *б* – початковий стан зразка Si з товстим шаром природного окислу; *в* – зразок Si з тонким шаром окислу; *г* – початковий стан зразка, свіжопротравленого Si



**Рис. 3.** Вольт-амперні характеристики структур Ni-n-Si (100) 0,3 Ом·см:

*a* – структури, виготовлені з контрольного Si; *б* – структури, виготовлені з обробленого в Н Si

тур, що були виготовлені з обробленого (3 хв) і необробленого атомарним воднем Si (рис. 3).

Обробка поверхні напівпровідника атомарним воднем приводить до збільшення «п’ятки» прямої гілки ВАХ. Відмінність характеристик зберігається навіть після 6 місяців витримки за кімнатних умов, що говорить про наявність незворотних змін параметрів поверхні Si.

З урахуванням явищ дифузії та дрейфу носіїв заряду через збіднений шар напівпровідника біля контакту залежність щільності струму від напруги на контакті [9]:

$$J_x = J_s [\exp(qV_a/k_bT) - 1], \quad (1)$$

де  $J = (q^2 D_n N_c / k_b T) [2q(\Phi_i - V_a) N_d / \epsilon_s]^{1/2} \exp(-q\Phi_B / k_b T)$ ,  $D_n$  – коефіцієнт дифузії електронів;  $N_c$  – ефективна

густина станів в зоні провідності;  $\epsilon_s$  – діелектрична стала напівпровідника;  $V_a$  – прикладена напруга;  $N_d$  – концентрація донорної домішки;  $\Phi_i$  та  $\Phi_B$  – вигин зон та поверхневий бар’єр.

В реальній структурі прикладена напруга падає не лише на переході метал – напівпровідник, але і на опорі бази та контактів. З урахуванням опору бази  $R_b$  та площі переходу  $S$  рівняння (1) набуває вигляду

$$I = S J_s [\exp(q(V_a - IR_b) / k_b T) - 1].$$

Для врахування відмінностей реальної структури від ідеальної необхідно врахувати не тільки відмінність величини бар’єру  $q\Phi_B$ , яка виникає при наявності на поверхні напівпровідника поверхневих станів, але й опір базової області та опір контактів. При достатньо великих струмах через перехід залежність

струму від напруги змінюється з експоненціальної в лінійну. Це дозволяє за частиною прямої гілки ВАХ визначити еквівалентний опір структури, який включає в себе опір бази та активний опір контактів.

Для розрахунку еквівалентного опору  $R_b$ , величини бар'єру  $q\Phi_B$  за експериментальними ВАХ була складена програма (розрахунок проводився ітераційним методом за критерієм найменших квадратів). Виявилось, що різниця між величинами  $q\Phi_B$  зразків, оброблених в Н та ні, складає 0,130 та 0,176 eV відповідно для  $n$ -Si(100) та  $n$ -Si(111).

Отже, розрахунки параметрів контакту метал – напівпровідник корелюють з результатами, одержаними методом динамічного конденсатора і підтвер-

джують можливість довготривалої модифікації потенціалу поверхні напівпровідника під дією Н та залежність від кристалографічної орієнтації кристалів.

Дослідження ВАХ структур Ni-Si, оброблених та необроблених в Н, показали зміну вигляду ВАХ (рис. 4).

На початковому етапі обробки структури пряма гілка ВАХ майже не змінюється, а зміни зазнає зворотна гілка. Це пов'язано із наявністю процесу розпилення і очистки бокової поверхні контакту. Подальша обробка посилює тенденцію зміни ВАХ. Таке явище пов'язується з процесом дифузії атомарного водню до межі поділу метал – напівпровідник і зміною потенціалу поверхні.

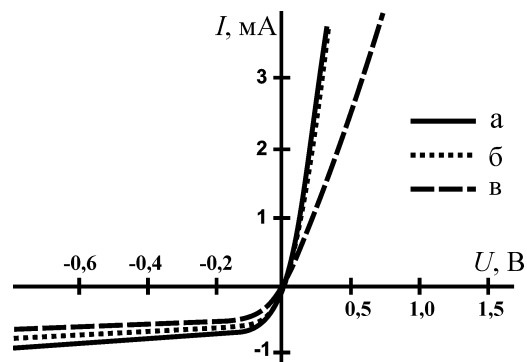


Рис. 4. Зміна ВАХ структури при обробці в Н при  $C_H=10^{19} \text{ м}^{-3}$ :

*a* – початковий стан; *б* – 5 хв обробки; *в* – 15 хв обробки

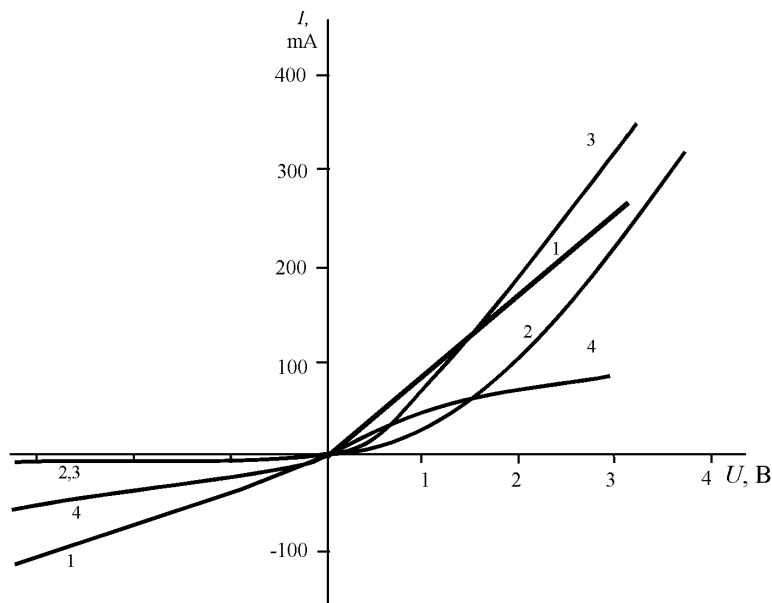


Рис. 5. ВАХ кристалів германію після обробки тонкоплівкових структур (Ni-Ge) атомарним воднем:

*a* – 0 хв; *б* – 15 хв., *в* – 30 хв; *г* – 60 хв

Оскільки кремній має щільну плівку природного окислу, який заважає дифузії атомів з плівки в кристал, то при взаємодії Н із системами на основі Si процес введення атомів з плівки в кристал є несуттєвим. Однак при розгляді тонкоплівкових систем на основі Ge такий процес може суттєво впливати на електрофізичні властивості структур.

Для дослідження процесу низькотемпературного легування кристала атомами плівки використовувалася система Ni-Ge [10]. Це пов'язано з тим, що Ge має шар окислу, який легко знімається атомарним воднем, тобто є так званим «відкритим» для дії атомарного водню.

Як відомо, нікель в германії є акцептором. Тому легування приповерхневих шарів *n*-германію ( $p_s = 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ,  $n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) нікелем з концентрацією  $p > n$  може приводити до утворення *p-n*-переходу. Для виявлення таких *p-n*-переходів і їх дослідження в кристалах германію з плівками нікелю, оброблених в атомарному водні, вимірювали ВАХ (рис. 5).

Вимір еталонних зразків германію (необроблені в Н кристали, на які плівки Ni напилувалися, а потім зтравлювалися) показав, що ВАХ в цьому випадку майже лінійна (рис. 5, а).

Перед виміром оброблених в Н зразків залишки плівки нікелю зтравлювалися. Виявлено, що при обробці структури в Н протягом 15 хв. ВАХ має явно нелінійний вигляд і відповідає діодним структурам з *p-n*-переходом (рис. 5, б–г). Найбільш різка діодна залежність спостерігалася при часі обробки 30 хв. (рис. 5, в). Подальша обробка в Н приводила до «помягшення» ВАХ (крива 4, рис. 5), що обумовлено розпиленням шарів германію, легування нікелем, зниженням загальної концентрації нікелю, у тому числі і концентрації електрично активних атомів нікелю в приповерхневих шарах.

Сканування уздовж шліфа, виконаного шліф-кулею (діаметр 150 мм), показало, що глибина залягання *p-n*-переходу структури (рис. 5, в) не перевищує 0,5 мкм.

Таким чином, виявлено, що під впливом атомарного водню в системі Ni-Ge утворюється *p-n*-перехід, який має невелику глибину залягання внаслідок малого коефіцієнту дифузії нікелю в германії.

## ВИСНОВКИ

Виявлено зміни параметрів кремнієвих підкладок, які потрібно враховувати при розробці технологій, пов'язаних з воднем. Навіть нетривалий контакт (3 хв) Si з Н приводить до зміни потенціалу по-

верхні (до 0,3 еВ), яка відповідає збільшенню роботи виходу. Знайдено, що взаємодія атомарного водню з поверхнею визначається товщиною, якістю окислу і орієнтацією поверхні [поверхня Si(111) зазнає більшого впливу, ніж (100)]. Зміни поверхневого потенціалу на свіжопротравлених поверхнях носять тривалий характер.

Знайдено, що під дією атомарного водню змінюється «п'ятка» прямої гілки ВАХ (у середньому на 0,2 В).

Виявлено, що процесом, який впливає на вигляд ВАХ при обробці структур метал – германій на відміну від структур на основі кремнію, є процес введення атомів металу з плівки в приповерхневі шари кристала. Така відмінність у взаємодії пов'язана з відсутністю щільного шару природного окислу на поверхні германію.

На основі виявлених процесів показана можливість керування видом ВАХ плівкових структур на основі як Si, так і Ge. Це може бути корисним при створенні низькотемпературної технології водневої обробки плівкових структур.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Батавин В. В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур / В. В. Батавин, Ю. А. Концевой, Ю. В. Федорович // М. : Радио и связь, 1985. – 264 с.
2. Воробьев Ю. В. Методы исследования полупроводников / Ю. В. Воробьев, В. Н. Добровольский, В. Н. Стриха // Киев : Вища школа, 1988. – 232 с.
3. Воронков И. Е. Исследование неоднородности лавинного пробоя *p-n* переходов с помощью производных их вольтамперных характеристик / И. Е. Воронков, А. Д. Ходкевич, С. П. Ходкевич // Электронная техника. – Сер. 1. – 1977. – № 8. – С. 33–44.
4. Вудраф Д. Современные методы исследования поверхности / Д. Вудраф, Т. Делчар // М. : Мир, 1989. – 564 с.
5. Таблицы физических величин / под ред. И. К. Киколина. – М. : Атомиздат, 1976. – 1006 с.
6. Проблемы физики поверхности полупроводников / под общ. ред. О. В. Снитко // К. : Наук. думка, 1981. – 332 с.
7. Sachse J.-U. Palladium-Hydrogen Related Complexes in Silicon / J.-U. Sachse, J. Weber, H. Lemke // Mater. Sci. Forum. – 1997. – Vol. 258–263. – P. 307–311.
8. Горбань А. Н. Вентильный эффект в полупроводнике с *p-n*-переходом при рекомбинации атомов водорода на его поверхности / А. Н. Горбань, Н. М. Савченко, Ю. А. Швец // Физика и техника полупроводников. – 1976. – Т. 10. – В. 12. – С. 2381–2384.
9. Малер Р. Элементы интегральных схем / Р. Малер, Т. Кейминс. – М. : Мир, 1989. – 630 с.
10. Матюшин В. М. Ускорение диффузионных процессов в твердых телах-катализаторах при протекании на их поверхности экзотермической реакции / В. М. Матюшин // Украинский химический журнал. – 1999. – Т. 65. – В. 4. – С. 361–365.

Надійшла 22.01.2010  
Після доробки 19.02.2010

Матюшин В. М., Жавжаров Е. Л.

#### ВОЗДЕЙСТВИЕ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА НА СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛ – ПОЛУПРОВОДНИК. ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Представлены результаты экспериментального исследования действия атомарного водорода на гетероструктуры на основе Si и Ge. Показано, что обработка сопровождается изменениями вида ВАХ. Доминирующими процессами являются хемосорбция водорода на поверхности, модификация гетерограницы и диффузия атомов пленки в приповерхностные слои полупроводника.

**Ключевые слова:** тонкие пленки, полупроводник, кремний, атомарный водород, рекомбинация, адгезия, диффузия.

Matyushin V. M., Zhavzharov E. L.

#### THE INFLUENCE OF ATOMIC HYDROGEN ON METAL-SEMICONDUCTOR STRUCTURES. VOLTAGE-CURRENT CHARACTERISTICS

The authors present the results of experimental investigation of atomic hydrogen effect on heterostructures based on Si and Ge. It is shown that treatment is accompanied by changes of V-C characteristics. Dominant processes are hydrogen chemisorption on the surface, modification of heteroboundary and diffusion of film atoms in the semiconductor near-surface layers.

**Key words:** thin films, semiconductor, silicon, atomic hydrogen, recombination, adhesion, diffusion.

УДК 621.396.6.017:004.942

Шило Г. Н.<sup>1</sup>, Огренич Е. В.<sup>2</sup>, Филобок А. В.<sup>3</sup>, Гапоненко Н. П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент Запорожского национального технического университета

<sup>2</sup>Аспирант Запорожского национального технического университета

<sup>3</sup>Студент Запорожского национального технического университета

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕБРИСТЫХ ТЕПЛОТВОДОВ МИНИМАЛЬНОЙ МАССЫ

Сформированы модели элементов конструкций теплоотводов в виде тепловых линий с нагрузкой на конце. Рассмотрены режимы работы тепловых линий. Для теплоотводов минимальной массы получены соотношения, связывающие размеры элементов конструкций с параметрами границ области работоспособности. Анализируется зависимость массы теплоотводов от количества ребер.

**Ключевые слова:** теплоотвод, тепловая линия, минимальная масса, алгоритм оптимизации, область работоспособности, технологическое ограничение.

### ВВЕДЕНИЕ

Тепловой режим теплонагруженных элементов в радиоэлектронной аппаратуре в большинстве случаев обеспечивается применением теплоотводящих устройств или вынужденным охлаждением. Оба эти пути требуют затрат материалов и влияют на массогабаритные показатели радиоаппаратуры. Одним из наиболее распространенных теплоотводящих устройств является радиатор. Существует большое количество конструкций радиаторов [1, 2], что не позволяет в общем виде решить задачу оптимизации их массогабаритных показателей. Исследованы только простые элементы конструкций [3], для которых показана возможность уменьшения массы в несколько раз.

Оптимизация теплоотводящих элементов при использовании комплексных массогабаритных показателей рассмотрена в [4], где показано, что процедура оптимизации в большинстве случаев приводила к увеличению площади, которую занимают теплоотво-

дящие элементы на печатных платах. Уменьшение этой площади осуществляется переходом к пространственным формам теплоотводящих элементов с развитыми поверхностями. Для увеличения площади теплоотвода чаще всего используются ребристые и штыревые элементы. Поскольку параметры этих элементов влияют на процессы отвода тепла конвекцией и излучением, целесообразно провести исследование влияния параметров элементов конструкций теплоотводов на их массогабаритные показатели.

Целью работы является разработка алгоритма проектирования ребристых теплоотводов минимальной массы. Для решения поставленной задачи необходимо:

- сформировать модели процессов теплопередачи в элементах конструкций теплоотводов с ребристыми поверхностями;
- разработать алгоритм оптимизации массы ребристых теплоотводов;

© Шило Г. Н., Огренич Е. В., Филобок А. В., Гапоненко Н. П., 2010