

Д. т. н. В. А. ВОРОНИН, к. т. н. С. К. ГУБА,
д. ф.-м. н. И. В. КУРИЛО

Украина, г. Львов, НУ «Львовская политехника»
E-mail: gubask@polynet.lviv.ua, kuryloiv@yahoo.com

Дата поступления в редакцию
19.05 2009 г. — 02.02 2010 г.

Оппонент к. т. н. В. И. БОСЫЙ
(НПП «Сатурн», г. Киев)

ПОЛУЧЕНИЕ АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫХ СТРУКТУР СИЛОВЫХ БИПОЛЯРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ МЕТОДОМ ГАЗОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

Исследована технология получения изотермическим низкотемпературным методом хлоридной эпитаксии совершенных структур GaAs, легированного Sn и Bi. На основе таких структур созданы силовые биполярные и полевые транзисторы с улучшенными характеристиками.

Прогресс в развитии силовых и СВЧ полупроводниковых приборов, в том числе силовых биполярных транзисторов (СБТ), полевых транзисторов с барьером Шоттки (ПТШ) и цифровых больших интегральных схем (БИС) на базе этих приборов, связан с использованием арсенида галлия [1]. Для практической реализации преимуществ этого материала необходимо решить комплекс задач по оптимизации конструктивных особенностей приборов с учетом технологических средств их изготовления, которые существенно отличаются от средств для приборов на базе кремния.

Наиболее универсальным и технологичным методом получения GaAs-структур является метод газофазной эпитаксии (ГФЭ) из металлоорганических соединений элементов третьей группы с гидридами мышьяка и фосфора. При этом методе получение однородных по толщине слоев и возможность контролировать состав не вызывает затруднений в отличие от метода ГФЭ в хлоридных или хлоридно-гидридных системах. Однако последний метод обеспечивает высокую степень чистоты слоев от углерода, которая соответствует высоким требованиям к концентрации остаточных неконтролируемых примесей, и поэтому является одним из перспективных для создания структур СБТ и ПТШ на основе арсенида галлия. Метод ГФЭ в хлоридной или в хлоридно-гидридной системах [2] обеспечивает возможность выращивания слоев на основе арсенида галлия микрометрической и субмикрометрической толщины, а также создание всей структуры СБТ типа $n^+-n-n^0-p-n^+$ и ПТШ типа $i-n^0-n-n^+$ в едином технологическом процессе.

БИС на основе полевых транзисторов Шоттки (изготовленных на базе структуры $i-n^0-n-n^+$) и СБТ (типа $n^+-n-n^0-p-n^+$) имеют нестабильные электрофизические параметры и низкую их воспроизводимость по поверхности пластины.

Эта нестабильность электрофизических параметров возникает за счет взаимной диффузии легирующих компонентов из n^0 -буферного слоя в активный n -слой, в результате которой вблизи границы раздела между n^0 - и n -слоем формируются дополнительные электронные уровни, распространяющиеся в активную область. Диффузия приводит к возникновению кратко- и долговременного дрейфа. Причиной низкой воспроизводимости параметров по площади выращенного активного эпитаксиального слоя является неравномерное распределение на самой подложке плотности дислокаций легирующих и неконтролируемых примесей.

В настоящей работе исследовалась возможность получения совершенных структур СБТ и ПТШ на базе арсенида галлия для БИС с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Силовой биполярный транзистор

Обычно такие приборы используются со слаболегированным коллектором, а метод газофазной эпитаксии обеспечивает возможность выращивания слоев n -типа с концентрацией электронов 10^{14} — 10^{15} см $^{-3}$, а также создания всей структуры типа $n^+-n-n^0-p-n^+$ в едином технологическом процессе (рис. 1).

В транзисторе с высокоомным коллектором желательно обеспечить увеличение концентрации при-

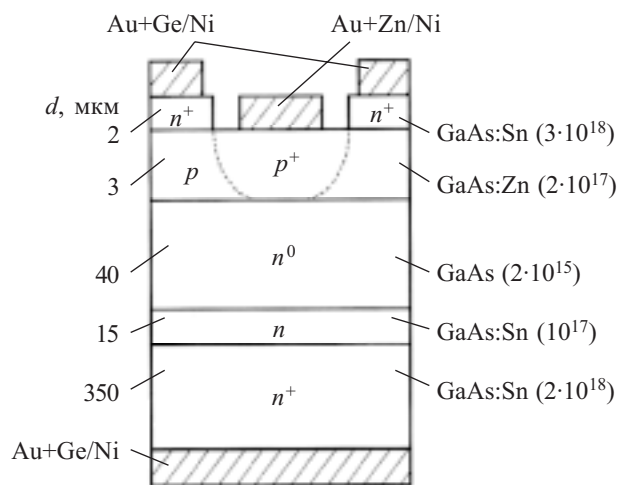


Рис. 1. Схема структуры транзистора с селективно выращенным эмиттером (в скобках указана концентрация носителей N в слое в см $^{-3}$)

меси p -типа в базе до максимально возможного уровня. Это обусловлено, во-первых, необходимостью компенсировать эффект вытеснения эмиттерного тока при высокой его плотности, уменьшить размеры области объемного заряда, а во-вторых, необходимо уменьшить сопротивление пассивной части базы. Такие меры предотвратили бы прокол базы и дали бы возможность реализовать преимущества уменьшения размеров p -области для повышения быстродействия приборов и коэффициента передачи эмиттерного тока. Однако концентрация дырок в базе для транзисторов с гомо- p - n -переходами принципиально ограничена уровнем порядка $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что определяется границей легирования эмиттера ($N_e = 5 \cdot 10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$).

Выращивание n^+ -пленок большой площади методом паровозной эпитаксии (ПФЭ) в хлоридных проточных системах, которые отвечают одновременно условиям предельного гомогенного легирования и однородного распределения примеси на поверхности подложки, требует решения многопараметрической задачи оптимизации процесса. Это связано, главным образом, с тем, что для достижения каждого из этих условий нужно применить конкурирующие технологические операции. Поэтому решалась комплексная задача создания высоковольтных биполярных транзисторов большой площади с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Было исследовано распределение концентрации носителей $N_e(x)$ вдоль подложки в зависимости от общей площади S подложек GaAs при легировании оловом до уровня $N_e = (3-4) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Структуру типа GaAs:Sn–GaAs:Zn получали методом ПФЭ в хлоридной системе GaAs–AsCl₃–H₂ в горизонтальном прямоточном многоканальном реакторе [3]. Использовались подложки типа АГЧПК-4-62, ориентированные в направлении [110] с отклонением на 3° от плоскости (100). Известно, что максимальная однородность слоев по толщине и уровню легирования в хлоридном методе ПФЭ достигается при реализации таких режимов роста, когда скорость кристаллизации основного соединения и скорость вхождения примеси ограничиваются кинетикой соответствующих процессов на поверхности подложки GaAs. Такие режимы при атмосферном давлении характеризуются высоким парциальным давлением основных и легирующих компонентов и относительно низкой температурой подложки (690–710°C) [4]. Известно, что эффективные константы распределения легирующих примесей в GaAs обычно являются функциями концентрации основных компонентов в газовой фазе (GaCl, As₄, HCl) и уменьшаются с ростом этих концентраций при снижении температуры выращивания [5].

Компенсировать эту зависимость увеличением парциального давления молекул примесей в большинстве случаев невозможно, поскольку, во-первых, процесс вхождения примесей Sn и Zn в кристаллическую решетку либо протекает с некоторыми диффузионными ограничениями массопереноса [5], либо ограничен низкой растворимостью в твердой фазе. Из этого следуют или пространственная неоднородность N_e , или недостаточный уровень легирования

эмиттера. Во-вторых, высокая концентрация примесей в атмосфере реактора отрицательно влияет на фоновые концентрации носителей заряда в слаболегированном коллекторе и может привести к локальному формированию пересыщенного твердого раствора в n^+ -слое и к его распаду с образованием новой фазы в матрице GaAs.

В качестве легирующей примеси n -типа в эмиттерах транзисторов на основе GaAs используют Sn. Этот элемент позволяет получать концентрацию свободных электронов на уровне $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в n^+ -слоях достаточно совершенной структуры GaAs, выращенной методом ПФЭ в хлоридной системе. Такое легирование способствует увеличению скорости роста структуры. Высокую концентрацию электронов можно получить при температуре подложки выше 720°C, когда процесс эпитаксии в значительной степени лимитируется диффузией компонентов в паровой фазе. Таким образом, технологический режим ограничен рядом внешних параметров. Чтобы получить однородную по координате x скорость роста структуры $V(x)$, для выбранных значений концентрации основных компонентов в системе, температуры роста, геометрии реактора и площади используемых подложек S необходимо задать изменение температуры вдоль подложки $T(x)$. Ось x берет свое начало у торца первой подложки (начало зоны роста) и направлена вдоль прямоточного горизонтального реактора по ходу газового потока.

На рис. 2 показан характер распределения электронов вдоль подложки в слоях арсенида галлия, легированного оловом, при различной эффективной (покрытой выращенным слоем) площади подложки.

Абсолютную величину парциального давления трихлорида мышьяка, который подается в область источника олова (10^{-1} мм рт. ст.), выбирали такой, чтобы концентрация электронов в n^+ -слое (см. рис. 1) в начале зоны роста составляла $(3-4) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (рис. 2). Высокие значения относительной неоднородности легирования $\Delta N_e / N_e$ вызываются следующими причинами.

Рост структуры GaAs происходит в диффузионно-кинетической области режима, в то же время про-

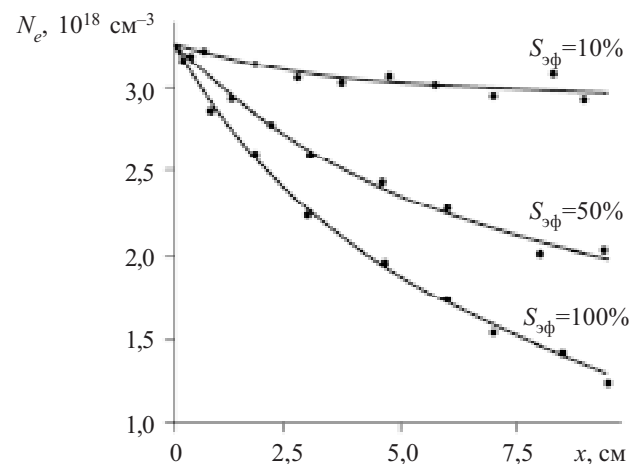


Рис. 2. Зависимость распределения концентрации электронов в пленке GaAs вдоль подложки при различной эффективной площади подложки

цесс легирования является практически равновесным (т. е. проходит намного быстрее) [5]. Уменьшение активности легирующей примеси (олова) приводит к более однородному легированию.

С увеличением координаты x рост парциального давления хлористого водорода в ниспадающем температурном поле приводит к дополнительному уменьшению активности олова α_{Sn} в GaAs. Поэтому повышение однородности скорости роста пленки за счет увеличения отрицательного градиента температуры $\Delta T(x)$ над зоной роста приводит, при прочих равных технологических условиях, к более резкой координатной зависимости концентрации электронов в пленке. В то же время, уменьшение отрицательного градиента температуры $\Delta T(x)$ приводит к некоторому уменьшению наклона кривой $N_e(x)$, но при этом величина изменения скорости роста слоя арсенида галлия, легированного оловом, вдоль подложки возрастает.

Таким образом существует оптимальное значение градиента температуры при фиксированной эффективной площади подложек. Уменьшение эффективной площади подложек вызывает сдвиг оптимального значения и приводит к улучшению распределения электронов (изменению наклона кривой $N_e(x)$ на рис. 2) и однородности скорости роста слоя вдоль подложки.

Известно, что при одинаковом уровне легирования удельное сопротивление пассивных областей базы в структурах GaAs в несколько раз выше, чем в кремниевых аналоговых приборах. Кроме того, в технологической операции создания приконтактного слоя обычно используют базовые слои с концентрацией акцепторов около 10^{19} см^{-3} . Для снижения сопротивления неактивной части базы до единиц Ом в зону, которая находится под контактом базы транзистора (область p^+ на рис. 1), проводили диффузию Zn на глубину 2—3 мкм до уровня $N_p = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ с поверхностной концентрацией около 10^{20} см^{-3} .

В начале повторной эпитаксии возможно образование границы с повышенной плотностью дефектов и, соответственно, скоростью рекомбинации инжектированных неравновесных электронов. Чтобы избежать этого, в процессе селективного наращивания после обычного газового травления p -базы на общую глубину 0,5 мкм предварительно осаждали слой p -типа с параметрами, эквивалентными параметрам базы, а затем формировали эмиттер толщиной около 2 мкм. Такая последовательность операций обеспечивает пространственное разделение границы между металлом и p - n -переходом «эмиттер—база».

Для создания силового варианта транзистора необходимо дополнительно провести операции формирования силовых контактов и напаивания структуры на термокомпенсатор для защиты p - n -переходов и расположения ее в корпусе.

Полевой транзистор

Как уже было отмечено, БИС на основе полевых транзисторов Шоттки, изготовленных на базе структуры i - n^0 - n - n^+ (рис. 3), имеют нестабильные электрофизические параметры, низкую их воспроизводимость по поверхности пластины.

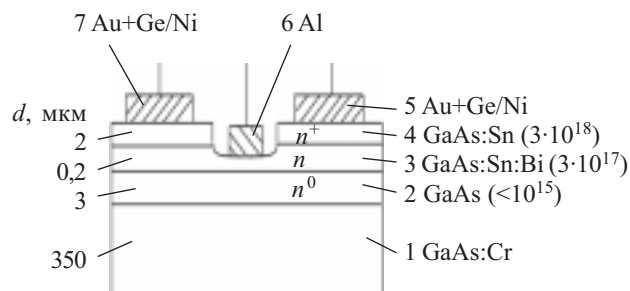


Рис. 3. Схема полевого транзистора с барьером Шоттки (в скобках указана концентрация электронов в слое в см^{-3}): 1 — подложка типа АГЧПХ; 2 — буферный n^0 -слой; 3 — активный n -слой; 4 — приконтактный n^+ -слой; 5 — сток; 6 — затвор; 7 — источник

Авторами [6] были проанализированы возможные механизмы снижения плотности дислокаций в активном n -слое. Показано, что для создания 3—4-слойных структур необходимо учитывать тип и концентрацию легирующей примеси в подложке и слое, количество слоев и последовательность их расположения в структуре. Кроме того, известно, что широко применяемые подложки типа АГЧПХ отличаются высокой неоднородностью от центра к периферии коррелирующих между собой плотности дислокаций и неконтролируемых примесей. Во время наращивания активных слоев полевых транзисторов Шоттки на поверхности подложки происходит неравномерное прорастание дислокаций и диффузия неконтролируемых примесей из площади подложки в активную область ПТШ. Это приводит к пространственному изменению характеристик ПТШ, полученных на этой подложке. Для снижения отрицательного влияния подложки используют буферные слои, тип и параметры которых определяют величину подвижности электронов и уровень их компенсации в активном слое, а в конечном случае — крутизну вольт-амперной характеристики, шумовые и частотные характеристики ПТШ и их стабильность [2].

Основной задачей при эпитаксиальном выращивании является снижение температуры и обеспечение изотермического режима роста соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ [7, 8]. Это связано с тем, что снижение температуры эпитаксии приводит к уменьшению микронеоднородности наращиваемого слоя вследствие уменьшения диффузии примесей и концентрации собственных точечных дефектов, для которых дислокации являются эффективным геттером.

Для создания n^0 -буферного слоя был использован разработанный низкотемпературный метод роста [9], позволяющий в одном технологическом цикле прямооточного горизонтального реактора наращивать слой n^0 -типа из чистого GaAs толщиной 2—3 мкм. Наибольшая неоднородность скорости роста n^0 -слоя наблюдается на первых 1,5—2 см зоны осаждения GaAs в подсистеме $\text{GaAs}-\text{AsCl}_3-\text{H}_2$ (рис. 4). В этой области происходит встраивание в n^0 -слой неконтролируемых примесей, которые попадают в газовую фазу из твердого источника GaAs. При этом основной неконтролируемой примесью, которая попадает в

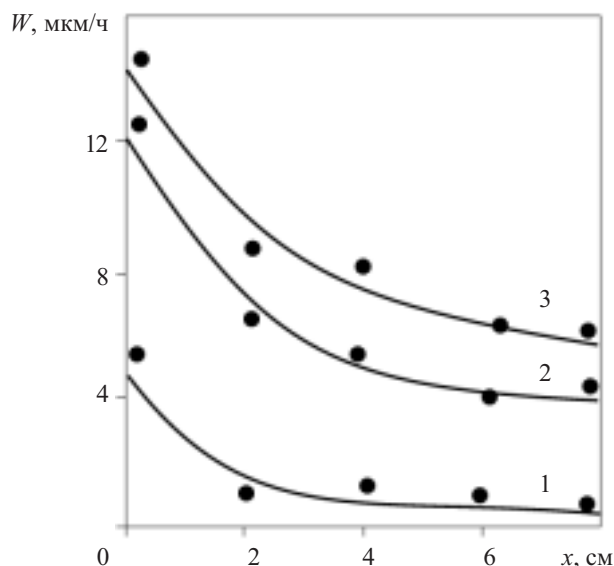


Рис. 4. Изменение скорости роста W слоя GaAs вдоль подложки при разном составе газовой фазы в реакторе, а именно при различной суммарной концентрации хлоридов α_{Cl} (в %):
1 — 0,1; 2 — 0,55; 3 — 0,9

активный n -слой (GaAs:Sn) из паровой фазы, является кремний.

В [10] показано, что в объемных кристаллах GaAs и GaP обнаружено снижение концентрации неконтролируемой примеси кремния вследствие изоэлектронного легирования. Причем, степень уменьшения концентрации Si в GaAs зависит от того, какой из изovalентных примесей будет легирован GaAs. Концентрация Si последовательно убывает при легировании примесями Sb–In–Bi. В связи с этим в [11] авторы исследовали формирование газовой фазы в системе GaAs–Bi–AsCl₃–HCl–H₂–He с целью получения источника роста Bi в GaAs в виде BiCl₃ при низких температурах роста (670–720°C). Было показано, что в подсистеме Bi–AsCl₃–He при взаимодействии Bi с AsCl₃ в атмосфере He насыщение BiCl₃ достигается при температуре 600–620°C, а в подсистеме Bi–HCl–H₂ насыщение BiCl₃ достигается при температуре 800–830°C. Это позволяет утверждать, что подсистемы Bi–AsCl₃–He и GaAs–AsCl₃–H₂ системы GaAs–Bi–AsCl₃–HCl–H₂–He могут быть использованы каждая отдельно в одном из каналов многоканального реактора, описанного в [12], для формирования паровой фазы при низкотемпературном изотермическом росте GaAs, легированного Bi.

Для получения активного n -слоя структуры ПТШ оптимизировали температурный режим роста и состав газовой фазы в системе GaAs–Bi–AsCl₃–HCl–H₂–He. Минимальный разброс (порядка 2%) по толщине тонких слоев, легированных оловом и висмутом, наблюдается в узком интервале концентрации $5 \cdot 10^{-4}$ – 10^{-3} мольных долей AsCl₃ при фиксированной температуре роста 700°C. Максимальную однородность получаемых пленок GaAs:Sn:Bi можно объяснить тем, что при указанном режиме роста скорость встраивания атомных компонентов в структуру наращиваемо-

го слоя становится соизмеримой со скоростью их массопереноса. Для выравнивания степени легирования активного слоя оловом был использован дополнительный, по сравнению с [12], канал введения HCl–H₂ в зону роста при небольшом отрицательном градиенте температуры подложки $\Delta T/x = -2^\circ\text{C}/\text{см}$. Кроме того, через еще один канал в зону роста подавался BiCl₃–He, который дополнительно легировал GaAs изovalентной примесью Bi. Поскольку коэффициенты распределения олова и висмута между газовой фазой и арсенидом галлия пропорциональны концентрации HCl, вследствие трехкратного уменьшения скорости роста в точке $x=0$ (передний торец подложки) и одновременного увеличения HCl в паровой фазе уменьшается скорость обеднения SnCl₂ и BiCl₃ приблизительно в четыре раза при постоянной температуре роста. Это позволило получить воспроизводимые и однородные по толщине и степени легирования активные n -слои с подвижностью носителей $4300 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при температуре 22°C и концентрацией носителей заряда $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Параметры подконтактного слоя не обязательно должны удовлетворять высокой однородности легирования в плоскости структуры, поскольку при уменьшении контактного сопротивления до $(1-5) \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ последующее снижение сопротивления стока и истока перестает быть определяющим на фоне сопротивления пассивной области канала ПТШ. Для получения необходимого контактного сопротивления между n^+ -приконтактным слоем и омическим контактом на базе Au+Ge/Ni достаточно достичь концентрации олова в арсениде галлия порядка 10^{18} см^{-2} . Для осаждения подконтактного слоя с такой концентрацией электронов концентрация AsCl₃, подведенного к источнику олова, была увеличена до $2,3 \cdot 10^{-2}$ мольной доли, что позволило обеспечить необходимые параметры. Полученные эпитаксиальные структуры на подложках диаметром 40 мм были использованы для создания маломощных ПТШ с длиной затвора 1,5 мкм и расстоянием «сток–исток» 5 мкм на полезной площади $30 \times 40 \text{ мм}$. Напряжение на затворе транзистора, при

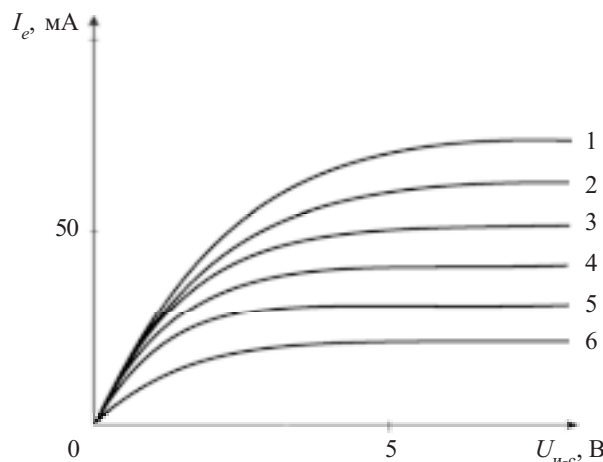


Рис. 5. Выходные ВАХ полевого транзистора с барьером Шоттки на базе GaAs в схеме с общим истоком при разном значении $U_{и-с}$ (в В):
1 — 0; 2 — -1; 3 — -2; 4 — -3; 5 — -4; 6 — -5 [13]

котором происходило полное перекрытие канала, определяется напряжением «затвор—исток» $U_{з-и} = 4$ В. Крутизну характеристик ПТШ измеряли при напряжении «сток—исток» $U_{с-и} = 2$ В. На рис. 5 показаны ВАХ для совокупности таких транзисторов.

Значение крутизны ВАХ ПТШ, полученных в одном технологическом цикле в системе GaAs—Bi—AsCl₃—HCl—H₂—He, находилось в интервале 20—21 мА/В, а разброс их величины не превышал 3—5%.

Разброс параметров приборов в пределах одной подложки не коррелирует с координатой подложки в реакторе в процессе роста, а определяется дислокационной неоднородностью структуры и ее электрофизическими характеристиками, а также различными эффектами топологии.

Заключение

Таким образом, показана принципиальная возможность создания планарных слоев структур биполярных транзисторов типа n^+-n^0-p и планарных слоев структур типа $i-n^0-n^+$ полевых транзисторов с барьером Шоттки на базе GaAs в хлоридных или хлоридно-гидридных системах.

Для получения таких структур были решены комплексные технологические задачи, определены режимы роста слоев GaAs. Достигнутая неоднородность по толщине не превышает 3%, а по уровню легирования — 5%. Это позволило получить улучшенные эксплуатационные характеристики СБТ и ПТШ на базе GaAs.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Уисмен У., Френсли У., Уестфел Дж. и др. Арсенид галлия в микроэлектронике.— М.: Мир, 1988.
2. Ди Лоренцо Д. В., Канделоула Д. Д. Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления.— М.: Радио и связь, 1988.

3. Guba S. K. Producing of power GaAs bipolar transistor in the GaAs—AsCl₃—H₂ system // Functional materials.— 1999.— Vol. 6, N 4.— P. 702—705.

4. Guba S. K. Preparation of uniform - structured field effect transistors with Shottky barrier by low-temperature chloride epitaxy method // Functional materials.— 1998.— Vol. 5, N 1.— P. 127—129.

5. Дьяконов Л. И., Ивлев В. Н., Липатова Н. И. и др. Особенности газового легирования оловом эпитаксиальных слоев арсенида галлия в системе Ga—AsCl₃—H₂ // Изв. АН СССР. Неорганические материалы.— 1986.— Т. 22, № 3.— С. 360—362.

6. Guba S. K., Kurilo I. V. Some features of defect formation in transition regions of multilayer GaAs homoepitaxial structures // Functional materials.— 2000.— Vol. 7, N 4 (2).— P. 815—818.

7. Гудз Э. С., Лукашин Г. А., Марончук И. Е. и др. Выращивание эпитаксиальных слоев в системе Ga—AsCl₃—H₂ при пониженной температуре // Изв. АН СССР. Неорганические материалы.— 1977.— Т. 13, № 19.— С. 1706—1710.

8. Губа С. К. Низкотемпературный изотермический метод хлоридной эпитаксии In_{1-x}Ga_xAs // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 1998.— № 2.— С. 40—42.

9. Пат. 18621 України. Спосіб одержання структур GaAs для інтегральних схем на основі польових транзисторів Шоттки / В. О. Воронін, С. К. Губа, Л. С. Плахотна.— 25.12 1997.

10. Ганина Н. В., Уфимцев В. Б., Фистуль К. И. Очистка арсенида галлия изовалентным легированием // Письма в ЖТФ.— 1982.— Т. 8.— С. 620—623.

11. Guba S. K., Kurilo I. V. Gas-phase formation at the low-temperature isothermal growing of Bi - doped GaAs layers // Functional Materials.— 2001.— Vol. 8, N 2.— P. 234—239.

12. Seki H., Koukitu A. New vapor growth method for III-V compound semiconductors using a single flat temperature zone // J. Semicond. Technol.— 1986.— Vol. 19, N 81.— P. 225—229.

13. Voronin V. O., Guba S. K., Kurylo I. V. Production of GaAs transistors with the Schottky barrier in Bi—GaAs—AsCl₃—HCl—SnCl₂—H₂—He system by epitaxial deposition // Journ. Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics.— 2006.— Vol. 9, N 4.— P. 48—53.

НОВЫЕ КНИГИ

Пономарев В. Ф. Дискретная математика для инженеров.— М.: Горячая линия — Телеком, 2009.— 320 с.

Дискретная математика нашла широкое применение в исследованиях больших систем и проектировании дискретных устройств автоматики, в защите и передаче информации, в управлении организационно-экономическими системами, в математической лингвистике и языках программирования. В книге изложены основы теории множеств и отношений, общей и булевой алгебры, комбинаторики и математической логики, теории графов, алгоритмов и автоматов. Основные разделы изложены для «четких» и «нечетких» множеств и отношений. В каждом разделе приводятся многочисленные примеры.

Книга сопровождается вычислительными алгоритмами по всем разделам и будет полезна инженерам различных специальностей при проектировании и управлении технологическими процессами и их информационном обеспечении. Особый интерес она представляет для студентов университетов при изучении таких разделов дискретной математики, как «теория графов», «математическая логика», «теория алгоритмов» и «теория автоматов».



Д. т. н. Э. С. МАЛКИН, д. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО,
М. И. ДЬЯЧКОВ, Т. Ю. НИКОЛАЕНКО

Украина, г. Киев, КНУ строительства и архитектуры,
Министерство промышленной политики Украины,
КНУ им. Тараса Шевченко
E-mail: nikola@industry.gov.ua

Дата поступления в редакцию
14.01.2010 г.

Оппонент д. т. н. В. Т. ДЕЙНЕГА
(НИИ «Шторм», г. Одесса)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЩЕЛЕВОГО ТЕПЛООБМЕННИКА С РАЗВИТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ТЕПЛООБМЕНА

Предложена конструкция водяного многоканального щелевого теплообменника, позволяющего отводить мощность до 750 Вт при температуре имитатора теплового потока 60°C, а также пути повышения технологичности изготовления теплообменника.

За последние десятилетия элементная база электронной аппаратуры существенным образом обновилась — вместо маломощных интегральных микросхем появились мощные полупроводниковые элементы, такие как одно- и многоядерные микропроцессоры, многокристальные модули, лазерные диоды, линейки и матрицы на их основе и т. п. Мощности микропроцессоров с повышением тактовой частоты постоянно возрастает [1] и уже достигла 130 Вт [2, 3]. Мировая тенденция к постоянному увеличению количества транзисторов на кристалле (1720 млн., 2006 г., микропроцессор Intel Itanium IA-64 Montecito [3, с. 58]) и стремление к уменьшению размеров электронных компонентов обуславливают дальнейший рост их удельного тепловыделения до 100 Вт/см² [4, с. 331—334], а в будущем ожидается его увеличение до 200 Вт/см² [5], что вызывает острую необходимость повышения эффективности охлаждения микропроцессоров. Создание микропроцессора «Pentium-5» оказалось труднейшей задачей именно из-за сложности решения проблемы его охлаждения [6].

С целью повышения эффективности охлаждения микропроцессоров в последнее время разработаны водяные системы охлаждения на основе теплообменников со щелевыми каналами [7—10]. В [10] показано, что благодаря высокому коэффициенту теплоотдачи в щелевых каналах использование алюминиевого двухканального щелевого теплообменника с высотой каждого канала 0,3 мм вместо штатного медного водяного теплообменника в составе замкнутой водяной системы охлаждения Titan модели TWC-A05 позволяет при одинаковой температуре имитатора теплового потока (плюс 60°C) отвести на 60 Вт больше — 172 против 112 Вт. Использование же разработанного щелевого теплообменника вместо теплообменника Titan в разомкнутой системе водяного охлаждения с температурой воды на входе 14°C позволяет при температуре имитатора плюс 60°C повысить отводимую мощность с 234 до 307 Вт.

Вместе с тем, дальнейшее повышение отводимого теплового потока с помощью такого теплообменника сдерживается ограниченностью поверхности теплообмена в щелевых каналах, параллельных основанию теплообменника, что не позволяет использовать его для охлаждения более мощной элементной базы перспективной электронной аппаратуры, в т. ч. и более мощных микропроцессоров.

Целью настоящей работы является разработка и экспериментальное исследование тепловых и гидравлических характеристик более эффективной конструкции щелевого теплообменника.

Разработанный теплообменник имеет развитую поверхность теплообмена и представляет собой медный теплообменный блок размерами 45×31×18 мм с щелевыми каналами шириной 0,2 мм и высотой 8 мм, плотно вставленный в окно основания полого медного корпуса теплообменника размерами 55×55×20 мм и запаянный в нем по периметру заподлицо с нижней поверхностью основания. Теплообменный блок размещается так, чтобы щелевые каналы были перпендикулярны основанию теплообменника. Нижняя поверхность собранного таким образом теплообменника дополнительно обрабатывалась механически и отполировывалась для создания гладкой контактной поверхности.

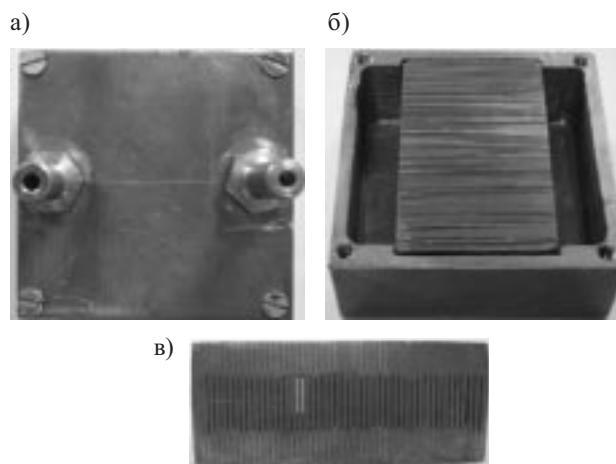


Рис. 1. Внешний вид многоканального щелевого теплообменника (а), вид сверху со снятой крышкой (б) и вид на теплообменный блок со стороны открытых торцов щелевых каналов (в)

Теплообменный блок со щелевыми каналами образован путем набора пакета из 42-х медных пластин размером 18×31 мм, толщиной 1 мм, разделенных между собой сверху и снизу медными прокладками размером 5×31 мм, толщиной 0,2 мм. Пакет пластин с прокладками был плотно стянут и скреплен шестью медными стержнями с расклепанными концами, предварительно вставленными в просверленные в пакете сквозные отверстия.

Схема исследуемого теплообменника приведена в [11], а его внешний вид в собранном и разобранном виде — на **рис. 1**. Между входными и выходными торцами щелевых каналов и соответствующими стенками корпуса теплообменника образованы входной и выходной коллекторы, сообщающиеся соответственно с входным и выходным патрубками.

Экспериментальная установка и методика проведения исследований

Экспериментальные исследования разработанного щелевого теплообменника проводились по разомкнутой схеме водяного охлаждения, описанной в [10]. Рабочим участком экспериментальной установки служил исследуемый многоканальный водяной теплообменник, закрепленный через слой тонкой алюминиевой фольги на имитаторе теплового потока с помощью четырех металлических шпилек М6 с гайками. В качестве имитатора теплового потока использовали электрический нагреватель, представляющий собой медный стержень диаметром 65 мм длиной 180 мм с отполированной контактной торцевой поверхностью и с намотанной на его боковую поверхность через слой электроизоляции нихромовой спиралью из проволоки диаметром 1,0 мм с электрическим сопротивлением 14,8 Ом. Нагреватель обеспечивал подвод к основанию теплообменника электрической мощности до 3270 Вт. Подключение нагревателя к питающей сети 220 В осуществлялось последовательно через регулятор напряжения типа РНО-2,5, что обеспечивало возможность регулирования мощности нагревателя в широких пределах. Значения питающего напряжения и тока определялись по показаниям вольтметра типа АСТВ класса точности 0,5 и амперметра типа Е59 класса точности 0,5.

Температура поверхности имитатора теплового потока в зоне контакта и температуры нижнего основания щелевого теплообменника измерялась с помощью хромель-копелевых термоэлектрических преобразователей (термопар) с диаметром проводов 0,2 мм, зачеканенных в пазах на соответствующих контактирующих поверхностях. На имитаторе теплового потока было установлено 5 термопар, на водяном теплообменнике — 8 (6 — на нижнем основании и 2 — на верхнем). Термо-эдс термопар измерялась с помощью цифрового милливольтметра типа Ф283.

Температура охлаждающей воды на входе в теплообменник и выходе из него измерялась с помощью ртутных термометров с ценой деления 0,1°C, помещенных в специально предусмотренные вставки в водяной магистрали. Объемный расход воды определялся с помощью мерного сосуда и секундомера.

Для измерения потерь гидравлического давления при прохождении водяного потока через теплообмен-

ник на входе водяной магистрали в теплообменник и выходе устанавливались вертикальные пьезометрические трубки с нанесенными миллиметровыми делениями.

Методика исследования тепловых и гидравлических характеристик предусматривала получение экспериментальных зависимостей среднего значения температуры имитатора теплового потока и среднего значения температуры нижнего основания теплообменника от величины отводимого теплового потока, которая определялась калориметрическим методом по перепаду температуры воды на выходе и входе теплообменника и ее массовому расходу через теплообменник. По разности температур нагревателя и теплообменника определялся перепад температуры в зоне контакта.

Результаты исследований и их анализ

Основная тепловая характеристика разработанного теплообменника, приведенная на **рис. 2**, получена при расходе охлаждающей воды через теплообменник 11,8 мл/с и температуре воды на входе 19°C. Из рисунка видно, что при температуре основания охлаждаемого микропроцессора, например, 65°C, с помощью такого теплообменника от микропроцессора можно отвести мощность до 900 Вт. Отсюда также можно определить, что при рекомендуемой для более надежной работы микропроцессора температуре 60°C его мощность рассеяния не должна превышать 750 Вт.

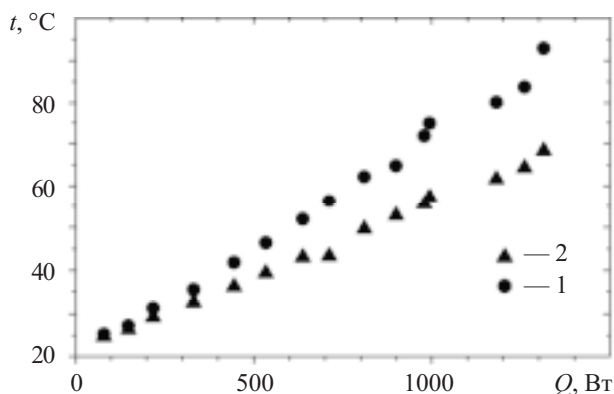


Рис. 2. Зависимость температуры t имитатора теплового потока в зоне контакта (1) и температуры основания многоканального щелевого теплообменника (2) от отводимого теплового потока Q

Использование данного теплообменника для охлаждения электронных компонентов на основе арсенида галлия, карбида кремния, алмаза и т. п., работоспособных при более высоких температурах, позволяет обеспечить более высокие значения отводимой мощности, вплоть до 1300 Вт. При этом температура основания охлаждаемого электронного компонента при расходе охлаждающей воды 11,8 мл/с не превышает 90°C.

Рис. 2 показывает также, насколько важной при отводе высоких мощностей является величина контактного термического сопротивления между охлаждаемым электронным компонентом и теплообменником.

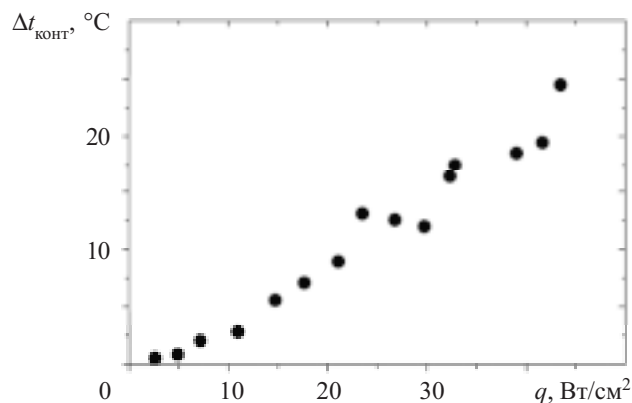


Рис. 3. Зависимость перепада температуры $\Delta t_{\text{конт}}$ между имитатором теплового потока и теплообменником в зоне контакта от плотности отводимого теплового потока q

Так, например, при отводимой мощности 1300 Вт перепад температуры в зоне контакта имитатора теплового потока с теплообменником достигает 25°C . Если бы удалось обеспечить близкий к идеальному тепловой контакт между ними (например, с помощью пайки серебросодержащим припоем), то за счет этого можно было бы снизить температуру имитатора в зоне контакта примерно на 20°C , что является достаточно существенным для современной элементной базы.

Рис. 3 наглядно показывает влияние уровня отводимого теплового потока, отнесенного к площади контактной поверхности теплообменника, составляющей $30,25 \text{ см}^2$, на перепад температуры в зоне контакта — можно сказать, эта зависимость близка к линейной. Попытки уменьшить контактное термическое сопротивление путем замены алюминиевой фольги пастой КПТ-8 ощутимого положительного эффекта не дали.

Дальнейшего увеличения отводимого теплового потока можно достичь, увеличив расход охлаждающей воды через теплообменник. Как видно из **рис. 4**, увеличение расхода воды с 11,8 до 16,3 мл/с позволяет повысить отводимую мощность с 1580 до 1988 Вт. Однако с увеличением отводимой мощности возрастают и средние значения температуры имитатора теплового потока, и температуры основания теплообменника — с $92,4$ до $121,4^\circ\text{C}$ и с $76,4$ до $91,6^\circ\text{C}$, соот-

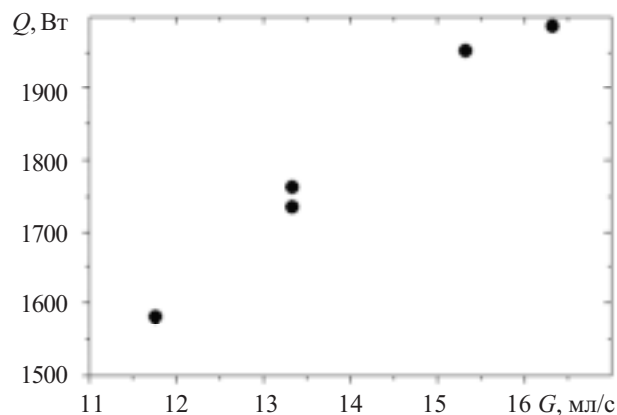


Рис. 4. Зависимость отводимого теплового потока Q от расхода охлаждающей воды G

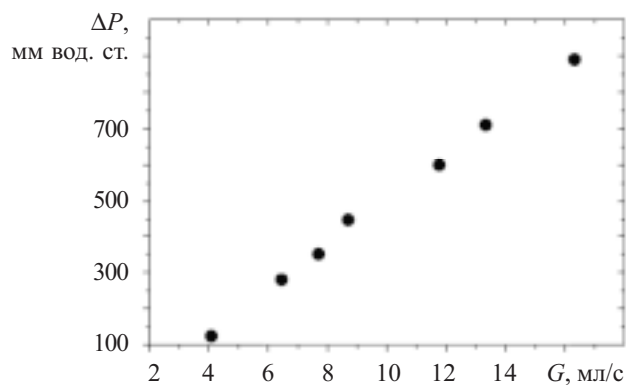


Рис. 5. Зависимость гидравлических потерь ΔP в теплообменнике от расхода охлаждающей воды G

ветственно. Кроме того, с увеличением расхода воды растут и гидравлические потери в теплообменнике (**рис. 5**), что необходимо учитывать при выборе насоса водяной системы охлаждения.

Проведенные исследования показали, что по сравнению с разработанным ранее двухканальным щелевым теплообменником [10] предлагаемый многоканальный щелевой теплообменник позволяет более чем в два раза (с 307 до 750 Вт) увеличить отводимую мощность в разомкнутой системе охлаждения при температуре имитатора теплового потока 60°C . Также на 200 мм вод. ст. (с 800 до 600 мм) снижаются гидравлические потери при одновременном увеличении почти вдвое (с 6,25 до 11,8 мл/с) расхода охлаждающей воды.

Вместе с тем, более глубокие сравнительные исследования указанных теплообменников свидетельствуют о несовершенстве разработанной конструкции многоканального теплообменника. Действительно, поверхность теплообмена разработанного многоканального щелевого теплообменника составляет 208 см^2 (41 канал сечением $0,2 \times 8 \text{ мм}$ и длиной 31 мм), в то время как у двухканального щелевого теплообменника — всего 13 см^2 (2 канала сечением $0,3 \times 20 \text{ мм}$ и длиной 13,6 мм). Полученное экспериментально увеличение отводимой мощности в многоканальном теплообменнике (в 2,4 раза) не адекватно увеличению теплоотдающей поверхности щелевых каналов (в 16 раз). Кроме того, габаритные размеры (без учета высоты патрубков) многоканального теплообменника ($55 \times 55 \times 20 \text{ мм}$) превышают габаритные размеры ($40 \times 40 \times 15,6 \text{ мм}$) двухканального.

В то же время, анализ конструкции исследуемого многоканального щелевого теплообменника показал, что потенциальные возможности данного технического решения в части отвода тепла не могли быть полностью реализованы в рассмотренной конструкции теплообменника по следующим причинам.

1) Высокие (18 мм) тонкие (1 мм) ребра-пластины, из которых набран пакет теплообменного (ТО) блока, имеют низкую эффективность.

2) Теплоноситель в каналах не имеет непосредственного контакта с теплоподводящей поверхностью, поскольку в ТО-блоке имеются сплошные части толщиной 5 мм для отверстий под стягивающие бол-

ты. При высокой плотности подводимого теплового потока (до 66 Вт/см²) это приводит к дополнительно термическому сопротивлению и, соответственно, перепаду температуры между нагреваемым основанием теплообменника и охлаждающей водой.

3) Одна из двух сплошных частей ТО-блока толщиной 5 мм практически не участвует в подводе теплоты к теплообменной поверхности стенок каналов, поскольку не имеет теплового контакта с тепловыделяющим элементом.

Кроме того, исследованная конструкция многоканального теплообменника является нетехнологичной, а его производство дорогостоящим.

Усовершенствованное конструктивно-технологическое решение теплообменника

С целью более полной реализации потенциальных возможностей многоканального щелевого теплообменника разработана более компактная и более технологичная в производстве конструкция, в определенной мере лишенная некоторых из указанных выше недостатков [13]. Она предусматривает изготовление теплообменника из двух оребренных с одной стороны заготовок, выполненных из теплопроводного материала (алюминия или меди) и соединенных между собой по периметру с обеспечением надежного теплового контакта (сваркой, пайкой и т. п.). Зазоры между теплообменными поверхностями смежных ребер заготовок выполняют роль щелевых каналов в таком теплообменнике (рис. 6). Ребра могут иметь прямоугольное, треугольное или трапециевидальное сечение.

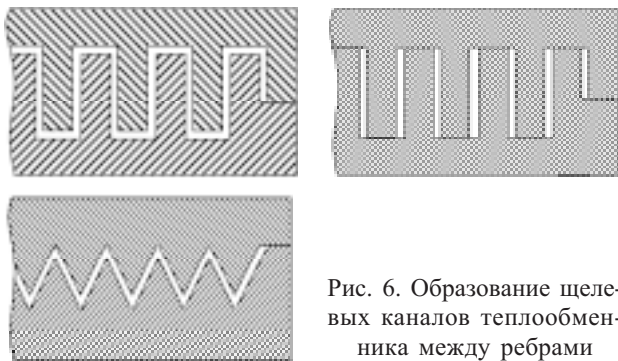


Рис. 6. Образование щелевых каналов теплообменника между ребрами

Такая конструкция позволяет изготавливать теплообменник из оребренных заготовок, легко получаемых методом экструзии. При этом качество теплообменной поверхности ребер может быть достаточно высоким, что положительно скажется на гидравлических характеристиках теплообменника.

Для обеспечения более надежного теплового контакта и лучшего подвода теплоты от нижнего основания к верхнему они могут быть соединены между собой с помощью миниатюрных тепловых труб, что несущественно увеличит габариты теплообменника, но повысит его теплоотводящую способность. Для подачи и отвода воды в теплообменнике предусмотрены соответствующие патрубки и коллекторы.

В дальнейшем планируется изготовление и исследование предложенного теплообменника.

Выводы

Таким образом, исследования показали, что разработанная конструкция водяного многоканального щелевого теплообменника позволяет по сравнению с известным двухканальным теплообменником увеличить более чем в два раза (с 307 до 750 Вт) отводимую мощность в разомкнутой системе охлаждения при температуре имитатора теплового потока 60°C. При этом данная конструкция теплообменника может быть усовершенствована и в части повышения эффективности отвода тепла, и в части повышения технологичности изготовления.

Разработанные теплообменники могут найти широкое применение не только для охлаждения микропроцессоров, но и для других теплонагруженных компонентов и узлов электронной аппаратуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Mahajan R., Chia-pin Chiu, Chryster G. Cooling a Microprocessor Chip // Proceedings of the IEEE.— 2006.— Vol. 94, N. 8.— P. 1476—1486.
2. Валентинова М. 64-бит процессоры дают плотно упакованные решения // Электроника: Наука. Технология. Бизнес.— 2004.— № 3.— С. 30—37.
3. Максимов Н. В., Партыка Т. Л., Попов И. И. Технические средства информатизации.— М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2008.
4. Фостер Л. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности.— М.: Техносфера, 2008.
5. Мельниченко А. Жидкостное охлаждение электронных компонентов // Электронные компоненты и системы.— 2005.— № 1.— С. 39—42.
6. Булат Л. П. Новое поколение твердотельных охладителей // Холодильная техника.— 2004.— № 8.— С. 2—7.
7. Патент України на корисну модель № 22628. Рідина система охолодження потужного електронного компонента / Е. С. Малкін, А. В. Тимошенко, Т. Ю. Ніколаєнко, Ю. Є. Ніколаєнко.— 2007.— Бюл. № 5.
8. Николаєнко Ю. Е., Малкин Э. С., Фуртат И. Э., Николаєнко Т. Ю. Экспериментальное исследование одноканального щелевого теплообменника жидкостной системы охлаждения для микропроцессора // Технологические системы.— 2007.— № 4.— С. 54—62.
9. Малкин Э. С., Тимошенко А. В., Николаєнко Ю. Е., Николаєнко Т. Ю. Повышение эффективности охлаждения процессоров // Труды 8-й МНПК «Современные информационные и электронные технологии».— Украина, Одесса.— 2007.— С. 265.
10. Малкин Э. С., Николаєнко Ю. Е., Фуртат И. Э. и др. Сравнительные исследования двухканального щелевого теплообменника и существующего на рынке аналога // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2008.— № 3.— С. 50—54.
11. Малкин Э. С., Николаєнко Ю. Е., Фуртат И. Э. и др. Аналитическое обоснование размеров высокоэффективных теплообменников с гребенчатыми щелевыми каналами // Труды 10-й МНПК «Современные информационные и электронные технологии». Том II.— Украина, Одесса.— 2009.— С. 81.
12. Патент України на корисну модель № 48048. Рідина система охолодження потужного електронного компонента / Е. С. Малкін, Ю. Є. Ніколаєнко, І. Е. Фуртат, М. І. Дячков.— 2009.— Бюл. № 12.
13. Заявка u2010 00477 від 19.01 2010 на видачу патенту України на корисну модель. Щілинний теплообмінник з розвинутою поверхнею теплообміну / Ю. Є. Ніколаєнко, Т. Ю. Ніколаєнко, Е. С. Малкін, В. Ф. Новіков.

К. т. н. Б. А. ДЕМЬЯНЧУК

Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова
E-mail: badem@rambler.ru

Дата поступления в редакцию
23.10 2009 г. — 23.05 2010 г.

Оппонент к. т. н. Э. Н. ГЛУШЕЧЕНКО
(НПП «Сатурн», г. Киев)

МИКРОВОЛНОВАЯ ОБРАБОТКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В НЕРЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМАХ

Обсуждаются принципы построения нерезонансных систем микроволновой обработки диэлектрической среды и результаты их экспериментальной реализации, при которой достигаются свойства систем, отличные от традиционных.

Преимуществами микроволновой обработки диэлектрических сред (связанной, прежде всего, с потерями электромагнитной энергии на преодоление взаимного притяжения их поляризованных молекул) перед другими способами обработки (например, нагревом) являются прямое объемное, экологически чистое воздействие, высокая интенсивность, гибкая управляемость процесса, независимость от дефицитных источников энергии [1]. Именно поэтому микроволновая обработка диэлектрических материалов в камерах различного назначения получила широкое распространение несмотря на некоторые недостатки, а именно [2, 3]:

— «стоячие» волны в объеме резонансной камеры вызывают локальные перегревы диэлектрических материалов в пучностях и недогревы в узлах стоячей волны;

— поверхностные токи в стенках резонансной камеры наводят в шлюзах камеры внешние излучения, что создает помехи для электронного оборудования;

— из-за взаимной расстройки резонансных частот камеры и генератора при малой загрузке камеры потери энергии в системе увеличиваются на десятки процентов;

— работа генератора на несогласованную нагрузку вызывает его перегрев из-за стоячих волн в питающем волноводе.

Актуальность совершенствования систем микроволновой обработки определяется, таким образом, нереализованностью потенциальных возможностей существующего способа воздействия электромагнитного поля на диэлектрическую среду в резонансной системе, востребованного в настоящее время.

Целью статьи является обсуждение физических основ процесса микроволновой обработки, которое направлено на совершенствование способа обработки диэлектрических материалов и на создание более совершенных микроволновых систем — нерезонансных, которые могут обеспечить более высокое качество обработки материалов, энергетическую эффек-

тивность, экологическую безопасность процесса микроволновой обработки.

В ходе настоящих исследований были сформулированы физико-технические принципы создания нерезонансных систем микроволновой обработки диэлектрических материалов. Их применение в совокупности позволяет обеспечивать равномерное электромагнитное поле в обрабатываемой среде, безопасный уровень излучений из камеры, независимость КПД системы от уровня загрузки камеры. Принципы, основанные в [4—6], впервые сформулированы в следующем виде.

◦ Резонансные свойства камеры микроволновой обработки целесообразно нейтрализовывать с помощью покрытия, наносимого на стенки камеры, преобразующего балластную энергию поля в тепловую.

◦ Электромагнитную энергию, вводимую в камеру, необходимо концентрировать в объеме обрабатываемого образца диэлектрического материала с помощью излучателя, имеющего такую диаграмму направленности, у которой размеры поперечного сечения в картинной плоскости соответствуют среднестатистическим размерам сечения обрабатываемых образцов.

◦ Продольный размер обрабатываемого образца диэлектрического материала должен быть согласован с глубиной проникновения поля в материал этого образца.

◦ Размеры камеры микроволновой обработки целесообразно согласовывать с соответствующими усредненными размерами обрабатываемых образцов.

◦ Электромагнитная балластная энергия, падающая на покрытие, преобразующее ее в тепловую, должна отводиться с помощью теплообменника и использоваться для интенсификации процесса обработки.

◦ Раскрыв излучателя должен быть удален от обрабатываемого образца на расстояние, большее чем расстояние до ближней границы дальней зоны излучения электромагнитных колебаний.

Для реализации преимуществ нерезонансной системы микроволновой обработки необходимо применение в ее конструкции трех дополнительных элементов: концентратора (излучателя) электромагнитной энергии, покрытия-преобразователя балластной энергии поля в тепловую и теплообменника.

Реализация покрытия-преобразователя балластной энергии поля в тепловую требует применения термостойких и влагостойких радиопоглощающих покрытий с малым коэффициентом отражения и коэффициентом прохождения типовых сред на уровне $-(5-10)$ дБ/мм [7].

Термостойкой основой для таких покрытий являются полимеры органической или неорганической природы (например, эпоксикремнийорганические смолы и каолиниты). В качестве наполнителя композитных материалов целесообразно применять ферриты на основе электропроводящих оксидов переходных металлов со структурой шпинели обращенного типа [8]. Именно эти наполнители позволяют обеспечить не только требуемый уровень электропроводности композитного преобразователя энергии, но и необходимую его суммарную намагниченность вследствие неполной компенсации антиферромагнитного упорядочения спиновых систем их элементарной молекулярной ячейки.

Прогнозирование ожидаемого значения коэффициента преобразования электромагнитной энергии в тепловую для покрытия с градиентом электромагнитных потерь поля существенно упрощает трудоемкую и малопроизводительную процедуру построения преобразователей с требуемыми свойствами [9]. Такая аналитическая оценка проводится по результатам предварительно измеренных значений коэффициентов отражения и прохождения каждого из слоев этого многослойного покрытия.

Модель нерезонансной системы для микроволновой обработки диэлектрических сред приведена на **рис. 1**. Новые узлы конструкции, вводимые в известную систему, здесь заштрихованы, а параметры в блоке логических переходов обозначают следующие: r_0 и s_0 — соответственно продольный размер и площадь поперечного сечения образца; r — глубина проникновения электромагнитного поля в образец; s — площадь поперечного сечения (у поверхности обрабатываемого образца) диаграммы направленности концентратора-излучателя электромагнитной энергии, вводимой в рабочую камеру.

На **рис. 2** представлен общий вид нерезонансной системы производственного назначения с осесимметричным воздействием электромагнитного поля для обработки (например, сушки) формованной продукции.

Общий вид нерезонансной камеры (печи) бытового назначения для нагрева различной продукции с односторонним воздействием поля приведен на **рис. 3**,

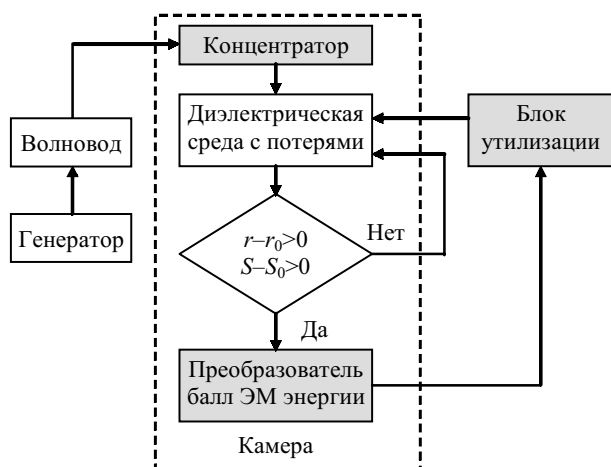


Рис. 1. Модель нерезонансной системы микроволновой обработки материалов

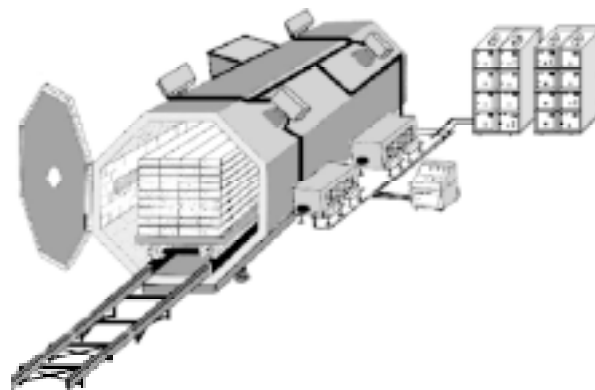


Рис. 2. Камера производственного назначения нерезонансного типа

а зависимости КПД таких камер от уровня их относительной загрузки, построенные по экспериментальным данным, полученным до и после модернизации микроволновых печей известных зарубежных (Японии, Италии, Кореи) и отечественных производителей, представлены на **рис. 4**. Здесь m — загружаемая масса, m_0 — номинальная масса загрузки (принята равной 2 кг).

Сравнительные характеристики уровня плотности потока мощности мешающих излучений из микроволновых камер резонансного типа и из модернизированных рабочих камер нерезонансного типа, измеренные экспериментально с помощью прибора типа TZA-354 (Венгрия) с чувствительностью 0,05 мкВт/см², представлены на **рис. 5** и **6**.

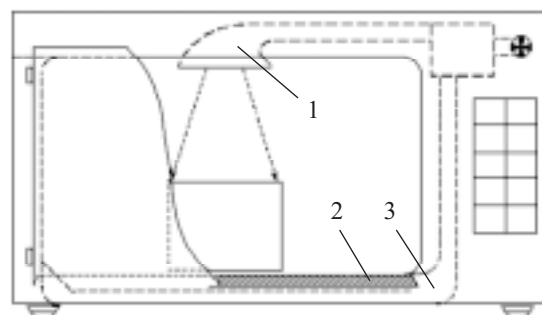


Рис. 3. Бытовая микроволновая печь нерезонансного типа с новыми элементами системы: 1 — концентратор (излучатель); 2 — преобразователь балластной энергии; 3 — элемент теплообменника

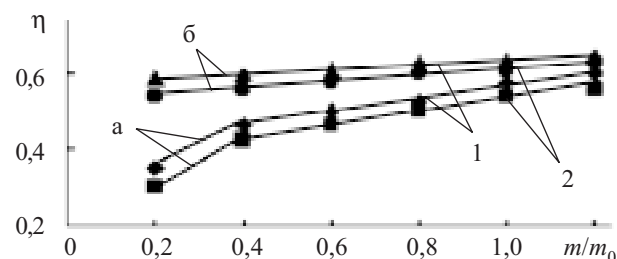


Рис. 4. Зависимость КПД микроволновых камер различного типа от уровня их загрузки до (а) и после (б) модернизации:

1 — камеры типа SMC E70-TFA и Delongi; 2 — камеры типа KOR-6105 и «Дніпрянка-1»

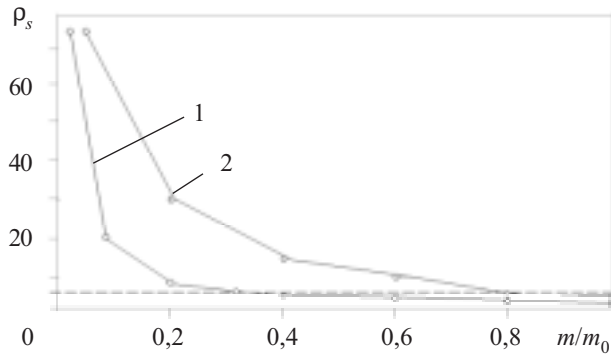


Рис. 5. Зависимость уровня плотности потока мощности излучения из резонансных камер от уровня их относительной загрузки:

1 — камеры SMC E 70-TFA и Delongi; 2 — камеры KOR-6105 и «Дніпрянка-1»

Нерезонансная система микроволновой обработки позволяет, кроме повышения КПД и уменьшения плотности мощности излучений из камеры, реализовать некоторые новые функции, например избирательное воздействие на отдельные компоненты диэлектрической среды. Уровень избирательности обработки двухкомпонентной смеси нетрудно оценить, используя известные уравнения для удельной плотности мощности поля, диссипируемого в обрабатываемой среде и в другом компоненте, например в материале клеток микроорганизмов этой среды. Компоненты отличаются величиной удельной электропроводности σ , диэлектрической проницаемости ϵ , удельной теплоемкости c и массовой плотности ρ .

Коэффициент избирательности обработки компонентов в этой системе K_T представляет собой отношение ожидаемого уровня повышения температуры $\Delta\theta_k$ клеток микроорганизмов к уровню дополнительного повышения температуры $\Delta\theta_c$ продукта при условии отсутствия теплообмена между компонентами, составляющими обрабатываемую продукцию, т. е. при значительной инерционности теплообмена, когда время, необходимое для эффективного теплообмена, значительно больше времени импульсного воздействия электромагнитного поля. В таких условиях это отношение имеет вид [10]

$$K_T = \frac{\Delta\theta_k}{\Delta\theta_c} = \frac{\sigma_k / (c_k \rho_k \epsilon_k^2)}{\sigma_c / (c_c \rho_c \epsilon_c^2)}.$$

В более общем случае, т. е. при произвольной интенсивности воздействия, равной отношению мощности импульса поля к его длительности, коэффициент избирательности является функцией этой интенсивности и определяется с помощью статистической модели, предложенной в [10].

Таким образом, установлено, что реализация процесса микроволновой обработки диэлектрических сред в нерезонансной системе, осуществленная в опытных образцах, построенных согласно предложенным принципам, в отличие от известных, обеспечивает равномерное поле нагрева, практически нулевой уровень мешающих излучений из камеры (по-

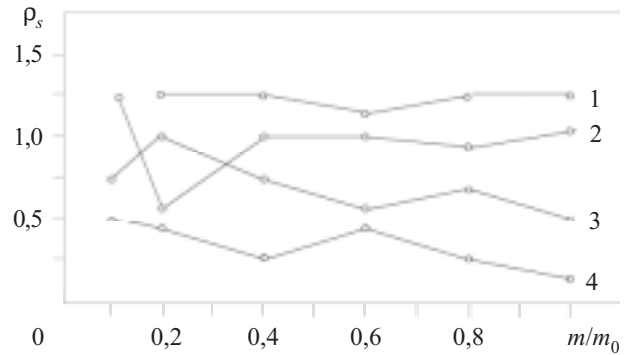


Рис. 6. Зависимость уровня плотности потока мощности излучения из нерезонансных камер от уровня их относительной загрузки:

1 — «Дніпрянка-1»; 2 — KOR-6105; 3 — SMC E 70-TFA; 4 — Delongi

мех), энергетическую эффективность, слабо зависящую от уровня загрузки камеры, работу генератора в режиме бегущей волны.

Воздействие поля, имеющего практически одинаковую интенсивность в произвольных точках объема образца обрабатываемой диэлектрической среды, обеспечивает избирательный уровень нагрева компонентов среды, что способствует реализации перспективных технологических режимов щадящего температурного воздействия поля на отдельные компоненты, например на полезные биологически активные термолabileльные составляющие продукции.

Реализация короткоимпульсного электромагнитного поля в предлагаемой системе с концентрацией излучения и с преобразованием (т. е. поглощением) балластной электромагнитной энергии обеспечивает ослабление уровня мешающего излучения из камеры практически до нуля независимо от длительности импульсов энергии поля, подаваемого в эту рабочую камеру.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Copson D. A. Microwave heating. — Avi, Westport, CT, 1975.
2. Jassie L. B., Kingston H. M. Microwave dissolution in closed vessels under elevated temperature and pressure. — Pittsburgh, 1985, Paper № 108A.
3. Княжевская Г. С., Фирсова М. Г., Килькеев Р. Ш. Высококачественный нагрев диэлектрических материалов. — Л.: Машиностроение, 1989.
4. Демьянчук Б. А. Принципы и применения микроволнового нагрева. — Одесса: Черноморье. — 2004.
5. Демьянчук Б. А. Модель и новые свойства нерезонансных камер микроволнового нагрева диэлектрических материалов // Прикладная радиоэлектроника. — 2008. — Т. 7, № 4. — С. 373—378.
6. Патент України на винахід 85756. Мікрохвильова піч // Б. О. Дем'янчук. — 25.02 2009.
7. Демьянчук Б. А. Материалы-преобразователи электромагнитной энергии в тепловую: требования, технология // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2006. — № 5. — С. 31—35.
8. Демьянчук Б. А., Полищук В. Е. Синтез ферромагнитных оксидов-наполнителей радиоматериалов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2007. — № 5. — С. 61—64.
9. Дем'янчук Б. О. Метод оцінки рівня відбиття електромагнітних хвиль від багатоповового покриття на металевій підложці // Вісник НУ «Львівська політехніка». — Електроніка. — 2007. — № 592. — С. 164—168.
10. Демьянчук Б. А. Статистическая модель избирательного воздействия электромагнитного поля на составляющие диэлектрической среды // Техника и приборы СВЧ. — 2009. — № 1. — С. 44—48.