

УДК 629.78.:681.3

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНОЙ КЕРАМИКИ ИЗ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ В КОСМИЧЕСКОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ

В.И. Костенко, В.С. Серегин, Л.А. Грошкова, А.И. Василевич

Институт космических исследований РАН, Москва

В настоящее время в связи с необходимостью уменьшения массы и габаритов научных приборов, используемых при проведении экспериментов в космосе, улучшения качества и увеличения объема получаемой с них научной информации остро встает вопрос об использовании при создании приборов новых технологий, материалов и компонентной базы, удовлетворяющих современным требованиям.

Рассмотрим возможные направления использования в космическом приборостроении одного из перспективных материалов — высокотеплопроводной керамики на основе нитрида алюминия.

Преимущество нитрида алюминия перед другими материалами обусловлено уникальным сочетанием его физических и электрических характеристик: высокой теплопроводности, хороших электроизоляционных свойств, умеренного коэффициента теплового расширения при относительно невысокой стоимости. В последнее время ряд зарубежных фирм [1, 2], выпускающих электронные компоненты, переходят на использование нитрида алюминия практически во всех областях, где раньше традиционно применялась окись бериллия. Наиболее интенсивно нитрид алюминия используется для изготовления корпусов и подложек интегральных схем, мощных транзисторов, поглотителей и оконечных нагрузок.

При создании радиоэлектронных приборов, где остро встает вопрос охлаждения приемников излучения до уровня температур порядка 150–160 К, требуется использование новой компонентной базы, обеспечивающей экстремальное значение показателя «мощность — частота» и одновременно оптимизацию их массогабаритных характеристик. Используемые при этом кон-

струкционные материалы должны иметь высокую теплопроводность, хорошие изолирующие свойства и высокую прочность.

Проведенный нами обзор показал, что этого можно достичь при переходе от традиционных конструкционных материалов — плат и подложек на основе Al_2O_3 и BeO — к использованию керамики на основе нитрида алюминия.

В таблице приведены наиболее важные сравнительные электрофизические характеристики предлагаемой для использования в разработках научной аппаратуры керамики из нитрида алюминия (AlN) и керамики из оксида бериллия (BeO) и оксида алюминия (Al_2O_3) по данным отечественных и зарубежных источников [3, 4].

Параметр	AlN	BeO	Al_2O_3
Теплопроводность, Вт/м·К	200–240	220–240	18–24
Прочность на изгиб, МПа	250–300	170–230	300–350
Электрическая прочность, кВ/мм	14–18	10	14–18
Удельное электросопротивление (при 25 °С), Ом·м	$>10^{12}$	$>10^{11}$	$>10^{12}$
Диэлектрическая постоянная (при 1 МГц)	9	8	9–10
Тангенс угла диэлектрических потерь:			
при 1 МГц	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
при 10 МГц	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент температурного линейного расширения (25 °С), $10^{-6}/^{\circ}C$	4,6	7,8	8,0
Плотность, г/см ³	3,26	2,9	3,9

Выпускаемая в настоящее время керамика из нитрида алюминия уступает керамике из оксида бериллия и оксида алюминия по значениям диэлектрических потерь, однако обладает высокими теплофизическими и электротехническими характеристиками, экологически чистая и относительно недорогая (ее удельная стоимость в 5–7 раз ниже удельной стоимости керамики из оксида бериллия).

Керамика из нитрида алюминия является идеальным конструкционным материалом для приборов и устройств на основе кремниевых кристаллов, так как коэффициенты температурного линейного расширения (КТЛР) алюминия и кремния практически совпадают в широком температурном диапазоне.

Наиболее оптимальные условия пайки кремниевого кристалла создаются при его посадке на подложку из нитрида алюминия. Таким образом, использование подложек из нитрида алюминия для монтажа кремниевых кристаллов ведет к существенному снижению напряжений в местах спаев, что значительно повышает качество изделий и увеличивает их надежность.

Опыт работы создателей научной аппаратуры показал, что возникающие при функционировании приборов вибрации влияют на работоспособность приборов и ухудшают их выходные параметры. Использование в качестве конструкционных развязок керамики на основе нитрида алюминия существенно снизит уровни создаваемых вибраций.

Создание современных устройств передачи научных данных, систем радиолокации, радиодальномеров и радиовысотомеров требует разработки компактных узлов, рассеивающих значительные тепловые мощности. В подобных устройствах широко применяются интегральные схемы миллиметрового диапазона (ММИС), которые имеют плотность рассеиваемой мощности порядка 1 Вт/мм^2 . Для отвода такой плотности мощности требуются материалы с высокой теплопроводностью и с КТЛР, близким к КТЛР полупроводниковых материалов подложек интегральных схем (кремния, арсенида галлия, нитрида галлия). Нитрид алюминия в значительной степени удовлетворяет этим требованиям.

В современных приборах широко используется установка активных полупроводниковых структур на пассивные коммутационные микрополосковые платы методом обратного монтажа (flip-chip). При этом тепло, выделяемое активными структурами, отводится через выводы этих структур на материал коммутационной платы. Изготовление микрополосковых плат из нитрида алюминия дает возможность значительно снизить рабочую температуру активных полупроводниковых структур, что существенно повышает надежность работы и увеличивает срок службы устройств.

Другой особенностью современных приборов является широкое использование многоканальных узлов с суммированием мощностей отдельных каналов. Такое техническое решение позволяет собирать передающие устройства значительной выходной мощности из относительно маломощных компонентов. Кроме того, многоканальные системы обладают повышенной

структурной надежностью при выходе из строя отдельных каналов.

Для обеспечения устойчивой работы таких систем выходы отдельных каналов должны объединяться с помощью сумматоров. Согласованные нагрузки таких сумматоров должны обладать значительной допустимой мощностью, чтобы была возможность поглотить полную выходную мощность устройства. Согласованные нагрузки, выполненные на подложках из нитрида алюминия, позволяют рассеивать большую мощность при относительно небольших габаритах.

Еще одной особенностью современной космической техники является широкое применение различного рода передающих антенных устройств, например, антенн с электрическим сканированием, адаптивных активных антенн, антенн с пространственным сложением мощности. Для таких устройств характерна тенденция интегрирования активных полупроводниковых компонентов (выходных усилителей мощности) с излучательными структурами антенн. При этом полотно антенны рассеивает значительные мощности при большой плотности отводимой мощности. Использование подложек из нитрида алюминия для изготовления активных антенных узлов позволяет создавать малогабаритные антенные системы с уникальными параметрами.

Потенциал современных передающих приборов определяется не только большой мощностью передатчиков, но и высокой чувствительностью приемных узлов. В устройствах пассивной локации и дистанционного зондирования чувствительность приемника является основополагающим фактором. Высокую чувствительность приемных узлов можно обеспечить путем охлаждения входных активных полупроводниковых структур до низких температур. При этом существует проблема отвода выделяемого этими структурами тепла. Подложки и теплопроводы из нитрида алюминия способны работать при низких температурах, вплоть до криогенных, обеспечивая эффективное охлаждение приемных систем.

Стабильная и надежная работа приборов возможна только в условиях эффективного отвода тепла от тепловыделяющих элементов, поэтому требуется пассивное или активное термостатирование отдельных узлов или устройств в целом. Эффективность отвода тепла и эффективность работы термостатов во многом определяется качеством теплопроводов и тепловым

сопротивлением теплонагруженных контактных поверхностей. При этом во многих случаях требуется электрическая изоляция теплопровода от тепловыделяющего узла.

Указанные задачи могут быть решены с помощью теплопроводящих смазок, клеев и специальных твердых или эластичных изоляционных теплопроводящих прокладок. В качестве таких прокладок могут быть использованы тонкие пластины из нитрида алюминия. Порошок нитрида алюминия также может быть использован в качестве теплопроводящего компонента для изготовления теплопроводного клея, смазки или композитного материала прокладки или теплопровода. Нитрид алюминия можно также применять в качестве теплопроводящего изолятора при изготовлении нагревательных элементов активных термостатов приборных узлов.

Таким образом, учитывая высокие теплофизические и электрофизические характеристики керамики из нитрида алюминия, возможности сохранения ее работоспособности в широком диапазоне температур, намечены следующие направления ее использования в космическом приборостроении в качестве:

- корпусов и подложек мощных монолитных интегральных схем усилителей мощности;
- коммутационных микрополосковых плат мощных полупроводниковых структур, устанавливаемых методом обратного монтажа;
- подложек мощных согласованных нагрузок и поглотителей мощности;
- теплопроводов устройств охлаждения приемных систем повышенной чувствительности;
- теплопроводящих изоляторов нагревателей активных термостатов приборных узлов;
- изолирующих прокладок в системах отвода тепла конструктивных узлов;
- составляющих теплопроводящих клеев и смазок;
- подложек термоэлектрических преобразователей на основе элементов Пельтье в системе охлаждения до температуры 160 К;
- элементов систем передачи тепла и нагрева (на криогенном уровне около 70 К);
- элементов систем с применением микрохолодильных машин для компенсации механических вибраций;

- элементов перспективных разработок в области схемотехники и микроЭВМ в качестве подложек для ЧИПов для улучшения отвода тепла и доведения плотности упаковки до 500 см^2 кремния в объеме 1 дм^3 .

При разработке приемников излучения остро стоит вопрос обеспечения их охлаждения. Работа этих приемников характеризуется уровнем темновых токов, величина которого существенно снижается при охлаждении.

Использование в качестве подложки керамики на основе нитрида алюминия в системах охлаждения даст возможность снизить уровень рабочих температур до $150\text{--}160 \text{ К}$. Это, в свою очередь, позволит не только снижать уровни темновых токов, но и создавать преобразователи до четырех каскадов, что повысит эффективность и качество работы приемников излучения при выполнении научного эксперимента.

Эти вопросы решались при разработке ряда научных приборов в рамках проектов «Вега», «Фобос», «Марс-96».

Опыт работы с микрохолодильными машинами для приемников излучения показал, что создаваемые при их работе вибрации существенно влияют на работоспособность приемников излучения. Использование гибкой связи для компенсации вибраций между холодным пальцем микрохолодильника и основанием детектора не защищает последние от вибраций на уровнях частот $50\text{--}60 \text{ Гц}$.

Исследования, проведенные в Японии, показали, что исключить вибрации на уровне $50\text{--}60 \text{ Гц}$ можно только с помощью нитридных материалов, в частности керамики на основе нитрида алюминия. Подобные исследования и разработка возможности применения нитрида алюминия в качестве материала для поглощения вибраций на указанных выше уровнях были проведены в ИКИ РАН для научного прибора «Гамма-спектрометр» проекта Вері Colombo по программе исследования Меркурия.

Высокий коэффициент теплопроводности керамики ($180\text{--}200 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) позволяет увеличить площадь ПЗС-кристаллов и стабилизировать температурное поле подложки кристалла, что снижает уровень темновых токов ПЗС и обеспечивает высокое качество изображений.

Использование керамики из нитрида алюминия для производства матриц и линеек в ПЗС-технике расширяет возможность

применения ПЗС в космической технике, что существенно улучшает качество информации при проведении научного эксперимента.

Применение новой технологии на основе капиллярной пайки позволяет не только увеличить плотность упаковки и, соответственно, количество кристаллов кремния в единице объема при создании микроЭВМ нового поколения, но и одновременно обеспечить высокие механические (вибрационные и ударные) характеристики микроЭВМ.

Практическое применение керамики из нитрида алюминия в приборах может быть начато с 2005, 2006 гг. Требуется проведение НИОКР по созданию технологии проектирования и изготовления сложнофункциональных блоков на базе компьютерного моделирования компонентов и физического моделирования существующих и перспективных технологических процессов. Также требуется проведение комплекса работ по совершенствованию технологических процессов и средств автоматизированного проектирования, включая разработку библиотеки функциональных элементов и программного обеспечения. Важным является определение номенклатуры изделий, где применение керамики из нитрида алюминия необходимо в первую очередь, а также развитие методов контроля качества и испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Флоренцев С.Н.* Тенденции развития силовой электроники начала тысячелетия // Электроника. 2003. № 6. С. 3–9.
2. *Лоренц Л.* Состояние и направление дальнейшего развития в сфере разработки, производства и применения полупроводниковых приборов // Электротехника. 2002. № 3. С. 2–16.
3. *Бершадская М.Д., Аветиков В.Г.* и др. Нитрид алюминия — новый высокотеплопроводный диэлектрик // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. 1984. Вып. 6(191). С. 54–57.
4. *Григорьев И.С., Мейлихов Е.З.* Физические величины: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991.