

# Алмазкарбидкремниевый композит в качестве эффективного поглотителя микроволн

С.К. Гордеев<sup>1</sup>, С.Б. Корчагина<sup>1</sup>, В.Е. Запевалов<sup>2</sup>, В.В. Паршин<sup>2</sup>, Е.А. Серов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Центральный научно-исследовательский институт материалов»

<sup>2</sup> Институт прикладной физики РАН

**Аннотация:** Представлены результаты экспериментальных исследований в миллиметровом диапазоне поглощающих свойств нового перспективного материала - алмазкарбидкремниевого композита АКК «Скелетон». Микроволновые свойства образцов измерялась в миллиметровом диапазоне с использованием уникального измерительного комплекса ИПФ РАН. Также рассмотрены возможности применения АКК «Скелетон» при разработке микроволновых приборов и устройств в интересах современной промышленности.

**Ключевые слова:** Алмазкарбидкремниевый композит, АКК «Скелетон», СВЧ-электроника, микроволны, гиротрон, композитные материалы

## 1. Введение

Развитие современной электроники базируется на широком использовании самых разнообразных материалов, свойства которых в значительной степени определяют предельные возможности электронных приборов и радиотехнических устройств [1-6]. Уникальные материалы с желаемыми тепловыми, механическими, электрическими и магнитными свойствами играют решающую роль в повышении средней мощности, полосы пропускания и эффективности усилителей и генераторов микроволновых и миллиметровых волн. В работе [1] рассмотрены возможности применения различных инженерных материалов в современных вакуумных электронных устройствах. В частности, материалы для ослабления СВЧ-излучения с высокой теплопроводностью на основе легирования синтетических алмазов необходимы для разработки мощных приборов и устройств микроволнового и терагерцового диапазонов [1, 4, 5]. В данной работе рассматривается перспективный алмазкарбидкремниевый композитный материал (АКК «Скелетон»), с различным составом компонентов [7-10], получаемый с использованием специальной технологии [8].

АКК «Скелетон» является композитным материалом, в котором зерна алмаза связаны матрицей, состоящей из карбида кремния и кремния. Содержание фаз может быть изменено в процессе изготовления. Чаще всего содержание алмаза лежит в диапазоне 40 – 70% об., содержание кремния – 4 – 15% об., а содержание карбида кремния – 25 - 50% об. Конкретные значения контролируются изготовителями. Повышение содержания алмаза ожидаемо увеличивает значения характеристик, связанных с его присутствием – жесткость, твердость, теплопроводность и др. Высокая твердость материала (более 55 ГПа) (алмаз – 100 ГПа, карбид кремния – 23 ГПа) сильно затрудняет его механическую обработку. Но технология изготовления построена так, что могут быть изготовлены изделия сложных форм и нужных размеров без обработки конечных деталей. Допуски по размерам составляет, как правило, 0,1 мм и лучше. АКК «Скелетон» является полупроводником р-типа. Уровень удельного электрического сопротивления – от 0,1 – до 1 Ом\*м. Температурная зависимость проводимости – «полупроводниковая». В принципе АКК «Скелетон» можно использовать как нагревательный элемент прямого пропускания тока.

Теплофизические свойства АКК, зависят от его состава. Удельная

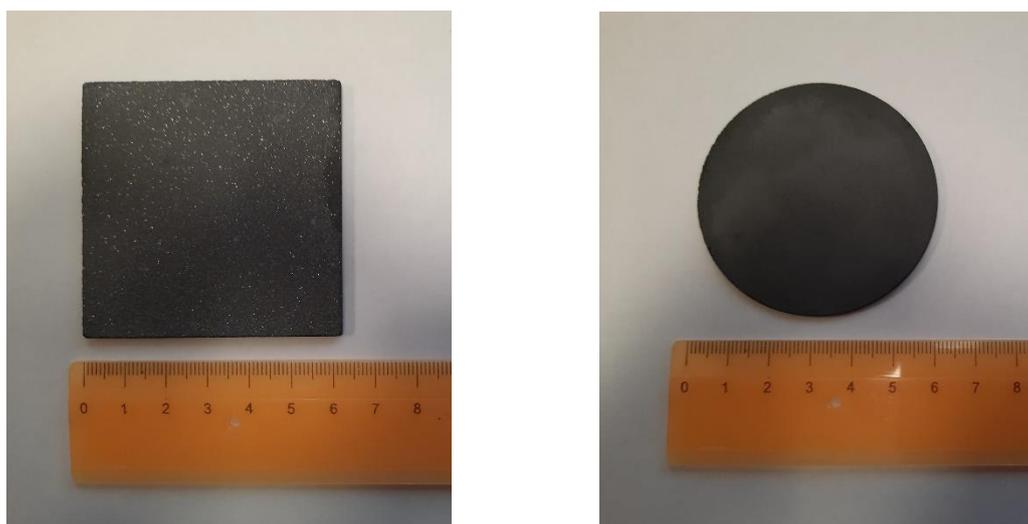
теплоемкость при комнатной температуре лежит в диапазоне 550 – 600 Дж/(кг\*К), при 120 оС – 800-850 Дж/(кг\*К), а при минус 80оС – около 250 Дж/(кг\*К). При температуре 77 К наблюдалось существенное уменьшение теплоемкости, но измерить ее пока не удалось. Коэффициент температуропроводности при комнатной температуре от 1,5 до 3,2 см<sup>2</sup>/с. При понижении температуры до минус 30оС температуропроводность увеличивается на 25-30%. При «азотных» температурах, порядка 77 К, температуропроводность должна быть очень высокой. Коэффициент теплопроводности при комнатной температуре – от 250 до 650 Вт/(м\*К), т.е. ниже, чем у алмаза, но на уровне меди. Температурный коэффициент линейного расширения в диапазоне 20-200°С – 1,9-2,0 10<sup>-6</sup> 1/К

## 2. Подготовка образцов, микроволновый измерительный комплекс и экспериментальные результаты

Для проведения микроволновых измерений использовались два образца различного состава, параметры которых приведены ниже в таблице 1, а фотографии на рисунке 1.

**Таблица 1.** Основные свойства измеряемых образцов АКК «Скелетон»

Образец	Квадратный	Круглый
Содержание алмаза, % об.	70	40
Содержание карбида кремния, % об.	25	48
Содержание кремния, % об.	5	12
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,40	3,25
Модуль упругости, ГПа	800	600
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К)	650	280
ТКЛР, 10 <sup>-6</sup> 1/К	2,0	2,2



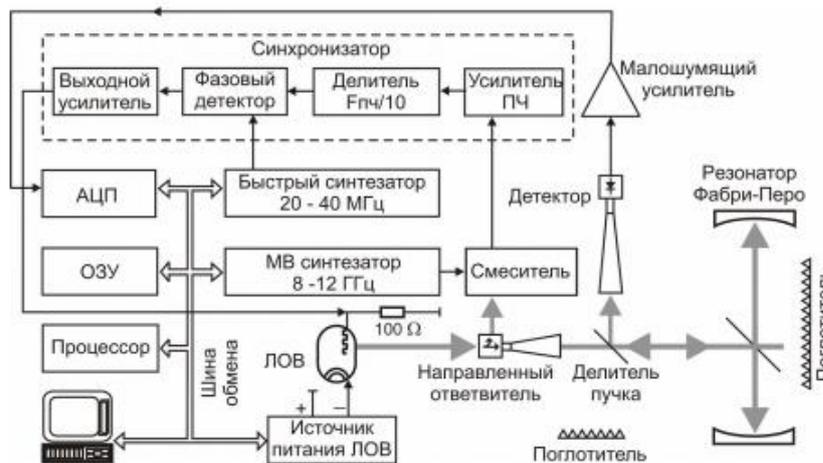
**Рисунок 1.** Фотографии исследуемых образцов

Микроволновые свойства образцов измерялась в миллиметровом диапазоне, соответствующем частотному интервалу 100-210 ГГц, с использованием уникального измерительного комплекса ИПФ РАН – резонаторного спектрометра [11, 12]. В основе метода лежит использование квазиоптического резонатора типа Фабри – Перо, в котором исследуемый образец используется в качестве зеркала. Источником

микроволнового излучения является лампа обратной волны (ЛОВ). Основные параметры спектрометра приведены в Таблице 2, а его блок-схема на рисунке 2.

**Таблица 2.** Резонаторный спектрометр. Параметры и относительная точность измерения

Диапазон частот	50 ГГц ÷ 520 ГГц
Температурный диапазон для диэлектриков и металлов	4 К ÷ 950 К
Температурный диапазон при исследовании газов	- 40 °С + 60 °С
Чувствительность по поглощению в газе	~ 0.001 дБ/км
Диапазон измеряемых величин показателя преломления	1 – 10
Относительная точность измерения показателя преломления	до 10 <sup>-4</sup>
Измеряемая величина толщин	0.002 – 30 мм
Относительная точность измерения толщины слоя диэлектрика	до 10 <sup>-4</sup>
Минимальный диаметр образца на 140 ГГц	~ 12 мм
Диапазон измеряемых величин (tgδ)	10 <sup>-1</sup> ÷ 10 <sup>-7</sup>
Относительная точность измерения tgδ	до 1%
Диапазон измеряемых величин потерь на отражение	10 <sup>-1</sup> ÷ 10 <sup>-5</sup>
Относительная точность измерения потерь на отражение, при уровне потерь ~ 10 <sup>-3</sup>	до ~1%



**Рисунок 2.** Блок схема установки для исследования микроволновых свойств материалов.

### 3. Результаты измерений

Результаты микроволновых измерений приведены на Рис. 3. Как и следовало ожидать, поглощение микроволнового излучения в АКК «Скелетон» зависит от соотношения компонентов, и растёт с частотой. Зависимость от частоты практически линейная, что кардинально отличается от характерной зависимости для металлов и сплавов, для которых потери также растут с частотой, но зависимость от частоты пропорциональна корню квадратному ( $f^{0.5}$ ). Потери на отражение более чем на порядок выше, чем у нержавеющей стали 12ХН10Т [12], часто используемой в качестве поглотителя для изготовления calorиметрических нагрузок высокой мощности и поглощения рассеянной мощности в линиях передачи (потери на отражение наиболее употребляемых конструкционных металлов приведены в [12]). Для сравнения на

рисунке 4 приведены в логарифмическом масштабе результаты измерения потерь при отражении от АКК "Скелетон" в сравнении с потерями при отражении от БК меди и нержавеющей стали 12Х18Н10Т. В то же время теплопроводность АКК «Скелетон» также значительно выше, чем у нержавеющей стали, поэтому АКК «Скелетон» может быть использован в качестве поглотителя микроволнового излучения большой мощности без повреждения конструкции поглотителя. Отметим, что хотя теплопроводность уменьшается со снижением концентрации алмаза, но, согласно Таблице 1, остается на довольно высоком уровне.

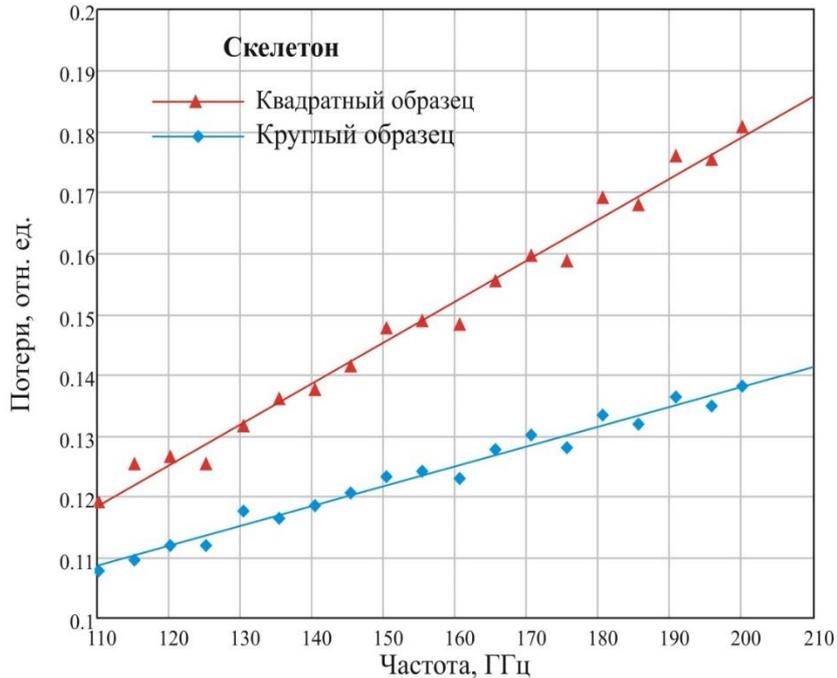


Рисунок 3. Результаты измерения потерь при отражении от АКК "Скелетон".

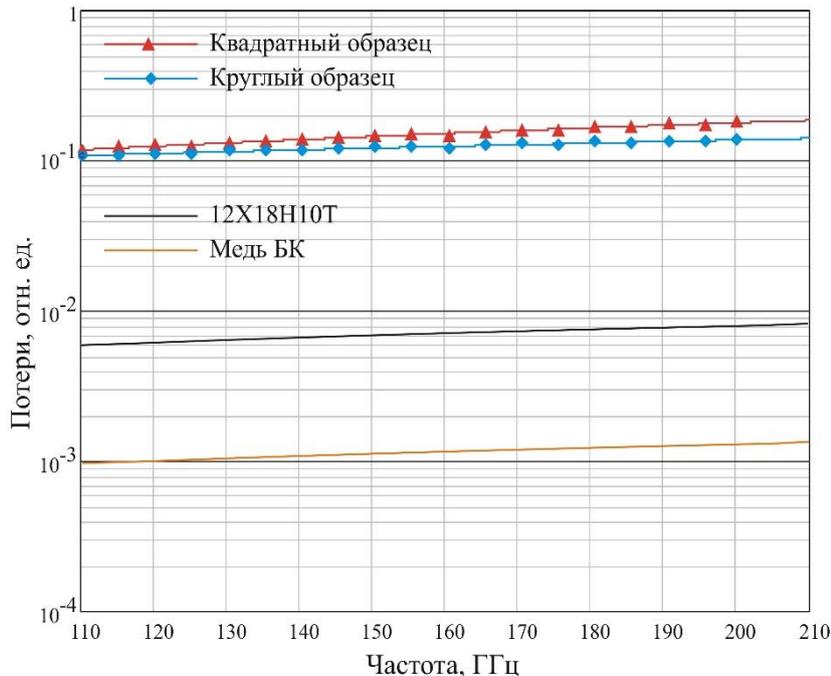


Рисунок 4. Результаты измерения потерь при отражении от АКК "Скелетон" в сравнении с потерями при отражении от БК меди и нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

#### 4. Заключение

В настоящее время наиболее привлекательными свойствами АКК «Скелетон» представляются высокая теплопроводность и жаростойкость, в сочетании с низкой электропроводностью и, соответственно, с высоким уровнем микроволновых потерь. Это позволяет использовать его для поглощения и подавления различного рода "паразитного" микроволнового излучения, как рассеянного, так и появляющегося вследствие паразитной генерации в электронных приборах высокой мощности (гиротронах, клистродах, приборах релятивистской электроники и др.) и линиях передачи [13-16]. Кроме того, высокая формоустойчивость и крайне малый ТКЛР (на уровне специальных сплавов, кремния и алмаза) позволяют изготавливать из него, с соответствующими покрытиями, элементы резонаторов и линий передачи микроволнового и терагерцового диапазона, в том числе на высоком уровне мощности.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПФ РАН (номер темы 0035-2019-0001 и 0030-2021-008) и Инвестиционного проекта АО «ЦНИИМ» № 08-049 «Скелетон».

#### Список литературы

1. Calame, J.P.; Abe, D.K. Applications of advanced materials technologies to vacuum electronic devices. Proc. IEEE 1999, 87, 840–864.
2. Carter, R.G. Microwave and RF vacuum electronic power sources. Cambridge University Press, 2018.
3. James Benford, John A. Swegle, Edl Schamiloglu. High Power Microwaves. 2016 by Taylor & Francis Group, LLC, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business.
4. Minghui Ding, Yanqing Liu, Xinru Lu and Weizhong Tang. Effect of laser ablation on microwave attenuation of diamond films. Materials 2019, 12, 3700; doi: 10.2290/ma12223700
5. Minghui Ding, Yanqing Liu, Xinru Lu, Yifeng Li, and Weizhong Tang. Boron doped diamond films: A microwave attenuation material with high thermal conductivity. Appl. Phys. Lett. 114, 162901 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5083079>
6. G. S. Nusinovich, Introduction to the Physics of Gyrotrons (The Johns Hopkins University Press, Baltimore and London, 2004), p. 74.
7. Гордеев С.К. Композиты алмаз-карбид кремния – новые сверхтвердые конструкционные материалы для машиностроения. Вопросы материаловедения, 2001, №3, с. 31-40
8. Гордеев С.К., Жуков С.Г., Данчукова Л.В. Экстрем Т., Способ изготовления композиционного материала алмаз-карбид кремния - кремний и композиционный материал, полученный этим способом. Евразийский патент № 003437
9. Гордеев С.К., Корчагина С.Б., Латышев Д.Ю., Лепеш Г.В. Применение высокомодульных керамических композиционных материалов для перспективных оптоэлектронных устройств. Технично-технологические проблемы сервиса, 2012, т.1, № 19, с. 36-41.
10. С.К.Гордеев, Ю.А. Ежов, Т.Д.Каримбаев, С.Б. Корчагина, М.А. Мезенцев. Дисперсно-упрочненные композиции алмаз – карбид кремния – новые материалы для машиностроения. Композиты и наноструктуры, 2015, т.7. № 2, с 2 -12
11. В. В. Паршин, Е. А. Серов, Г.М. Бубнов и др. Криовакуумный резонаторный комплекс. Известия вузов. Радиофизика 2013, Том LVI, № 8–9 с.614-621.
12. В. В. Паршин, М. Ю. Третьяков, М. А. Кошелев, Е. А. Серов. Аппаратурный комплекс и результаты прецизионных исследований распространения миллиметровых и субмиллиметровых волн в конденсированных средах и атмосфере. Известия вузов. Радиофизика 2009, Том LII, №8, с. 583-594
13. H.Shoyama, K.Sakamoto, K.Hayashi, et al. High-Efficiency oscillation of 170 GHz high-power gyrotron at TE31.8 mode using depressed collector. Jpn. J. Appl. Phys. V.40 (2001) Pt.2, No.8B, L.906-908.
14. Бушминский И. П. Изготовление элементов конструкций СВЧ. М.: Высшая школа, 1974.
15. Григорьев А. Д. Электродинамика и микроволновая техника. СПб. Лань, 2007.
16. Генерация и усиление сигналов терагерцового диапазона: колл. монография / под ред. А.Е. Храмова, А.Г. Баланова, В.Д. Еремки, В.Е. Запелова, А.А. Короновского.. — Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т., 2016. — 460 с. ISBN ISBN 978-5-7433-3013