

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



Introducing of radomes materials and investigation of physical, mechanical and electrical-magnetically properties

Presenter: Hamid Reza Akramifard¹

Hamid Reza Akramifard¹, Saeed Bayatali²

1- School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran

2- Bagherololum Researches Organization

Correspond author's email: (akrami.1367@ut.ac.ir)

Abstract

In this investigation, different globally radomes (protective of receiving missile waves system) have been introduced. According to performance of radome that is receiving waves and facing to high temperature condition, corrosion, fracture and ... in fly path of missile, selection of main material of radome must be guarantee suitable mechanical, electrical and thermal conditions. Due to selection of unsuitable radome materials, a negligible error in performance of receiving system can make error in wave analysis and estimating of target distance and caused deviation from mentioned targets. Therefore due to selection of suitable materials for obtaining desirable physical, mechanical and electrical-magnetically properties simultaneously in different atmosphere conditions, producer of these productions have led to ceramic and composite (polymer-fibers) materials. In this study, different globally radomes and their properties such as density (ρ), thermal coefficient of expansion (α), thermal conductivity (κ), Poisson ratio (ν), Strength (σ), Relative permeability (ϵ) and loss tangent ($\tan \theta$) will be compared separately.

Keywords: Radome, Mechanical properties, Ceramic materials, Composite, Strength, Loss tangent

¹ Master student – Metal forming

² Expert of Structural organization

معرفی مواد ریدوم‌ها و بررسی خواص فیزیکی، مکانیکی و الکتریکی - مغناطیسی

ارائه دهنده مقاله: حمیدرضا اکرمی فرد^۱

حمیدرضا اکرمی فرد^۱، سعید بیاتعلی^۲

۱- دانشکده مهندسی مواد - دانشگاه تهران

۲- سازمان تحقیقات باقرالعلوم

ایمیل مسؤل مقاله: akrami.1367@ut.ac.ir

چکیده

در این تحقیق به معرفی و بررسی خواص انواع ریدوم‌های (محافظ سیستم دریافت‌کننده امواج موشک) مطرح شده در سطح جهان پرداخته شده است. با توجه به اینکه ریدوم (Radome) در موشک وظیفه دریافت امواج را بر عهده دارد، و در مسیر پرواز موشک در برابر شرایط دمایی بالا، خوردگی، شکست و ... قرار دارد، لذا ماده اصلی جهت انتخاب ریدوم باید شرایط مناسب مکانیکی، الکتریکی و حرارتی را تامین نماید. کوچکترین اختلال در عملکرد سیستم دریافت‌کننده بواسطه انتخاب نامناسب مواد ریدوم می‌تواند در آنالیز امواج و تخمین فاصله هدف، خطا ایجاد نماید و باعث انحراف موشک از اهداف مورد نظر شود. بنابراین انتخاب موادی مناسب به منظور تامین هم زمان خواص فیزیکی، مکانیکی و الکتریکی-مغناطیسی مناسب در شرایط مختلف جوی، سازندگان این محصولات را به سمت مواد سرامیکی و کامپوزیتی (پلیمر-الیاف) سوق داده است. در این تحقیق انواع ریدوم‌های شرکت‌های معتبر جهانی معرفی شده و خواص آنها از جمله دانسیته (ρ)، ضریب انبساط حرارتی (α)، هدایت حرارتی (K)، ضریب پواسون (ν)، استحکام (σ)، ثابت دی الکتریک (ϵ) و افت تانژانت ($\tan \theta$) به تفکیک مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرند.

واژه های کلیدی: ریدوم، خواص مکانیکی، مواد سرامیکی، کامپوزیت، استحکام، افت تانژانت

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد - گرایش شکل دادن فلزات

^۲ کارشناس بخش سازه

مقدمه

یکی از مهمترین قسمت‌های موشک که در پیمایش صحیح مسیر حرکت آن نقش دارد، قسمت سرجنگی آن است که ریدوم نام دارد. ریدوم (Radome) از دو واژه رادار (Radar) و گنبد (Dome) گرفته شده است. ریدوم وظیفه دارد تا از سیستم آنتن موشک محافظت به عمل آورد. آنتن امواج را ارسال و دریافت می‌کند به این صورت که با ارسال موج و دریافت آن، فاصله تا هدف را تخمین می‌زند. لذا ریدوم که به عنوان یک بخش پوششی و محافظ برای آنتن تلقی می‌شود بایستی علاوه بر این که آنتن را در برابر خطرات محیطی حفظ کند، در هدایت این امواج (چه در موقع خروج و چه موقع ورود) کمترین خطا و انحراف را ایجاد کند (کوژاکوف، ۲۰۱۰). در تحلیل عملکرد ریدوم‌ها از جنبه الکتریکی، ارزیابی خواص الکتریکی (در طول موج‌های گوناگون) کلیه موادی که ممکن است به عنوان ماده سازنده دیواره ریدوم گزینش شوند، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. دو خاصیت اولیه و مهمی که این مواد انتخابی دارند عبارتند از ثابت دی الکتریک و افت تانژانت در فرکانس‌های مختلف کاری (کاری، ۱۹۷۴). لذا سیستم‌های موشک جنگی امروزه (و حتی آینده) نیازها را در داشتن سیستم ریدوم بالا برده است. چنین سیستم‌هایی معمولاً دماهای انتقال بالاتر از ۱۳۷۰ درجه سانتیگراد را به همراه بارگذاری مکانیکی و حرارتی در هوا تجربه می‌کنند. در نتیجه ماده سازنده ریدوم بایستی دارای خواص زیر باشد:

- ✓ پایدار باشند و تغییرات ثابت دی الکتریک آنها با تغییرات دما پایین باشد (هرچه پایین‌تر بهتر).
- ✓ با رفتن به دماهای بالا افت تانژانت در آنها کم باشد. افت تانژانت معرفی کننده میزان انحراف موج دریافتی از هدف پس از عبور از ضخامت ریدوم و رسیدن به آنتن و یا عکس آن یعنی میزان انحراف موج دریافتی از آنتن پس از عبور از ضخامت ریدوم و رسیدن به هدف می‌باشد.
- ✓ در دماهای محیط و دماهای بالا دارای استحکام مناسب باشند.
- ✓ مدول الاستیک در آنها بایستی بالا باشد تا دیواره نازک ریدوم را در برابر بشک‌های شدن محافظت کند.
- ✓ مقاوم در برابر شوک‌های حرارتی باشد.
- ✓ با شرایط مختلف آب و هوایی سازگار باشد (مقاوم در برابر سایش ناشی از باران و ضربات ذرات هوایی) (کوژاکوف، ۲۰۱۰؛ هریس، ۱۹۷۸؛ هریس، ۱۹۸۶).

پیشینه پژوهش

تکنولوژی تولید و تهیه ریدوم‌ها با توجه به شرایط خاصی که دارند در تعداد معدودی از کشورها وجود دارد. محدود بودن فناوری تولید این محصول با توجه به شرایط حساس نظامی قابل توجه است. کمپانی‌هایی که در سطح اول جهانی به تهیه و توسعه ریدوم مشغول هستند، از مواد سرامیکی و کامپوزیت‌های پلیمری برای تولید این محصول استفاده می‌کنند. هر کدام از این مواد سازنده مزیت‌ها و معایب خاص خود را دارد. مهمترین کمپانی‌های تولید کننده ریدوم‌ها عبارتند از:

الف) کمپانی کرادین (Ceradyne): این کمپانی تولیدکننده ریدوم های Ceralloy® و Ceralloy® 147-01EXP Silicon Nitride و 147-31N Silicon Nitride می باشد.

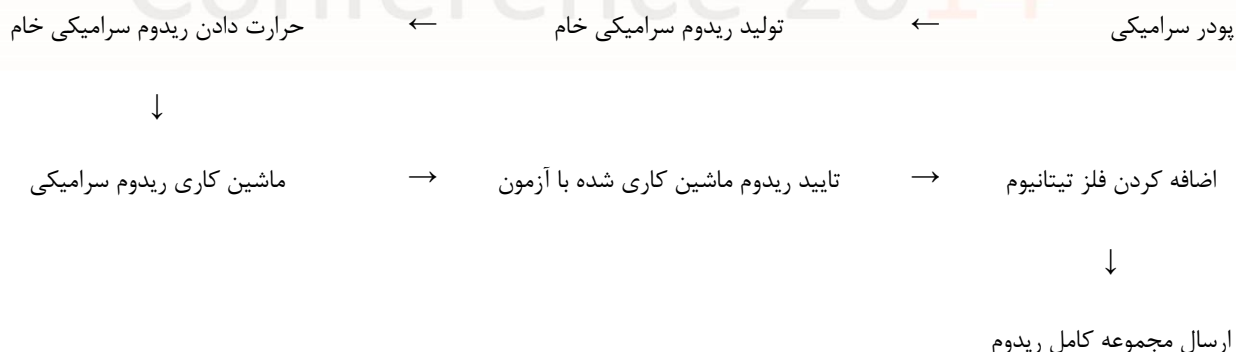
ب) کمپانی لاکهید مارتین (Lockheed Martin): این کمپانی تولید کننده ریدوم IRBAS می باشد.

ج) کمپانی کرادین ترمو متریالز (Ceradyne Thermo Materials): این کمپانی تولیدکننده ریدوم های Fused Silica می باشد.

د) کمپانی کورنینگ (Corning): این کمپانی تولیدکننده ریدوم های معروف Pyoceram 9606 می باشد (مگلز و میکیجلیج، ۲۰۱۰).

روش پژوهش

امروزه بسیاری از سیستم های موشکی پیشرفته با همکاری دوجانبه دو شرکت کرادین و کرادین ترمومتریالز ساخته می شود. فلوچارت مراحل تولید ریدوم هایی که در شرکت کرادین ساخته می شود در شکل ۱ دیده می شود. ریدوم های اولیه از متالورژی پودر و تکنیک های پیشرفته تولید سرامیکی حاصل می شوند. سپس این ریدوم های اولیه در دمای مناسب به مدت مناسب پخته می شوند تا خواص مطلوب و مورد نظر آنها فراهم آید. در مرحله بعد این ریدوم ها با الماس تراشکاری می شوند تا ابعاد نهایی آنها حاصل شود تا به تاسیسات فراوری ریدوم ارسال شوند. این تاسیسات با داشتن آخرین CNC_ID و سنباده های OD برای حصول ریدوم نهایی در نظر گرفته شده اند (شکل ۲). قطعات تحت بازرسی ابعادی با ماشین های اندازه گیری مختصات به طور اتوماتیک (CMMS) قرار می گیرند تا اطمینان کامل از ابعاد نهایی ریدوم ها حاصل شود (شکل ۳). در مرحله بعد ریدوم ها تحت تکنیک محوریابی کالیبره می شوند تا رفتار الکتریکی ریدوم ها خواص ویژه و مناسب خود را بدست بیاورد (شکل ۴). در آخرین مرحله محصول نهایی به فلز تیتانیوم وصل می شود (همانند دامن) تا امکان اتصال آن به موشک توسط مشتری فراهم باشد (مگلز و میکیجلیج، ۲۰۱۰).



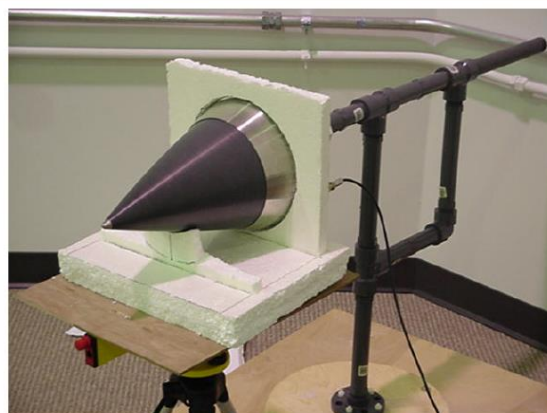
شکل ۱: فلوچارت مراحل تولید ریدوم کرادین



شکل ۳: بازرسی ریدوم های سرامیکی



شکل ۲: ماشین CNC ریدوم



شکل ۴: ریدوم Ceralloy 147-31N Silicon Nitride که در حال آزمون الکتریکی است.

تجزیه و تحلیل داده ها

استحکام مکانیکی اکثر مواد آلی که به عنوان دیواره ریدوم در نظر گرفته می‌شوند، در دمای 250°C افت می‌کند و حتی در بهترین شرایط می‌توانند در دمای 500°C تنها در مدت زمان بسیار کوتاهی دوام بیاورد (کوی، ۱۹۷۲). بنابراین، در کاربردهای دما بالا مانند موشک‌های مافوق صوت اغلب از ریدوم های سرامیکی بهره می‌برند. جدول ۴-۴ خواص دی الکتریک ریدوم‌های سرامیکی را نشان می‌دهد (منگلز و میکیجلج، ۲۰۱۰؛ باست، ۱۹۷۳).

جدول ۱: خواص دی الکتریک ریدوم های سرامیکی

ماده	ثابت دی الکتریک	افت تانژانت
آلومینا (Alumina)	۹/۶-۹/۴	۰/۰۰۰۲-۰/۰۰۰۱
نیتريد بور (Boron Nitride)	۴/۶-۴/۲	۰/۰۰۰۳-۰/۰۰۰۱
بریلیا (Berillia)	۴/۲	۰/۰۰۰۵
شیشه بورورسیلیکات (Borosilicate glass)	۴/۵	۰/۰۰۰۸
پایروکرام (pyroceram)	۵/۵۴-۵/۶۵	۰/۰۰۰۲
رایکرام (Rayceram)	۴/۸۵-۴/۷۰	۰/۰۰۰۲
شیشه گداخته تحت ریخته گری لغزشی (Slip Cast fused Silica-SCFS)	۳/۳۰-۳/۴۲	۰/۰۰۰۴
کوارتز بافته شده (Wonen-3d-quartz)	۳/۱۰-۳/۰۵	۰/۰۰۰۵-۰/۰۰۰۱
سیلیکون نیتريد (Silicon Nitride-HPSN)	۸/۰-۷/۸	۰/۰۰۰۴-۰/۰۰۰۲
سیلیکون نیتريد (Silicon Nitride-RSSN)	۵/۶	۰/۰۰۰۱-۰/۰۰۰۵
نیترواکسی سرام (Nitro-oxyceram)	۵/۲	۰/۰۰۰۲
کلسین تقویت شده (Reinforced Celsian)	۶/۷۴	۰/۰۰۰۹

اکثر این مواد خواص الکتریکی مناسبی را برای کاربردهای ریدوم (مانند موشک‌ها) در سرعت‌های بسیار بالا از خود نشان می‌دهند. برای مثال آلومینا (اکسید آلومینیوم) و پایروکرام و رایکرام (هردو از نوع کوردريت هستند) به طور گسترده برای وسایل هوایی که در سرعت های ۴ ماخ و یا پایین تر حرکت می‌کنند، به کار می‌روند. آنها بسیار سخت هستند و در برابر باران مقاومت به سایش بسیار مناسبی از خود نشان می‌دهند اما تراشکاری آنها به منظور رسیدن به ابعاد مورد نظر بسیار سخت است. پایروکرام دارای ثابت دی الکتریک بالاتری نسبت به رایکرام و آلومینا است که از تفرانس‌های مکانیکی کمتری در عملکرد برخوردار می‌باشد (کوژاکوف، ۲۰۱۰).

بسیاری از مواد سرامیکی دارای ضریب انبساط حرارتی بالایی هستند و مستعد به شوک حرارتی که این اتفاق بواسطه گرادیان دمایی که در حین پرواز ایجاد می‌شود، حاصل می‌شود. این شوک‌ها سبب می‌شوند که قسمت گنبدی شکل ریدوم دچار شکست شود؛ بخصوص

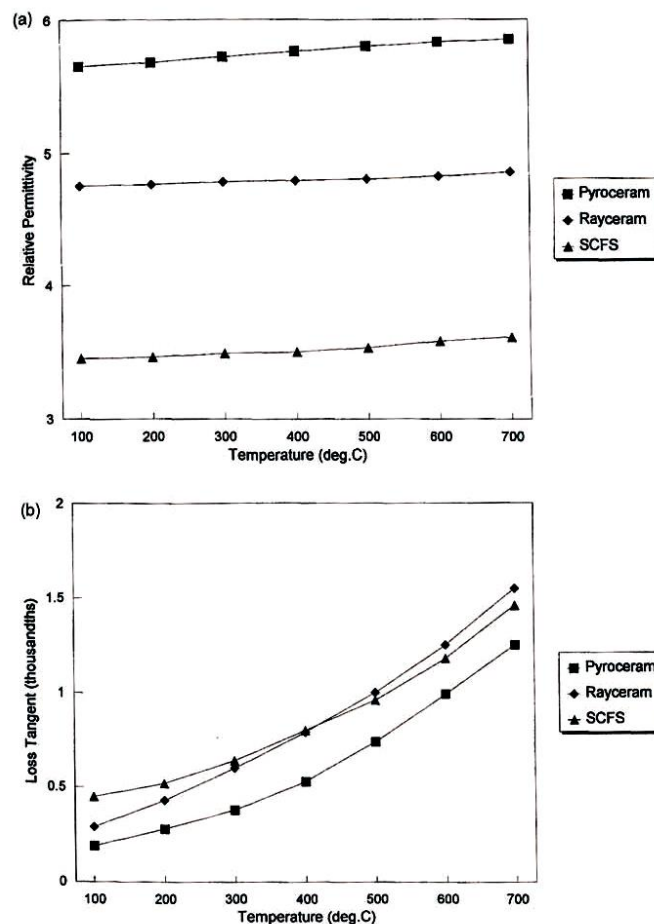
در حالتی که ریدوم تحت بارگذاری مکانیکی باشد. برای مثال برای ریدومی که از جنس آلومینا می‌باشد، این امکان وجود دارد که 400 °C تفاوت دمایی موجب شوک حرارتی و به دنبال آن شکست شود. از این رو طراح ریدوم بایستی بسیار مراقب باشد (والتون، ۱۹۷۰)

شیشه‌های گداخته از جنس سیلیس که به صورت لغزشی ریخته‌گری شده‌اند^۵ (SCFS)، یک شکل از اکسید سیلیسیوم، برای کاربردهای دما بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دسته از سرامیک‌ها خواص الکتریکی مناسب، هزینه کم و ضریب انبساط حرارتی پایین‌تری را نسبت به آلومینا و یا مواد کوردیت دارند که توان مقابله با شوک حرارتی را در آنها افزایش داده است. از این دسته از مواد در وسایل با نقطه بازگشت در سرعت‌های بالاتر از ۸ ماخ استفاده می‌شود (کوژاکوف، ۲۰۱۰).

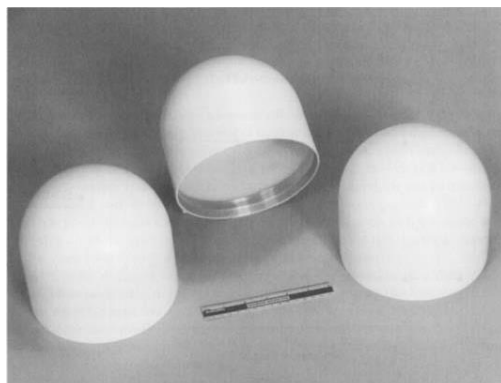
یک رزین دما بالا برای استفاده در کامپوزیت‌های ۳ بعدی پایه کوارتز و در ترکیبات قالب‌گیری شده که در آنها الیاف بسیار ریز وجود دارد، توسعه پیدا کرده است. این کوارتز ۳ بعدی مقاومت به شوک حرارتی بالایی از خود نشان می‌دهد و برای موشک‌های مافوق صوت و یا در چارچوب‌های آنتن‌های با نقطه بازگشت قابل کاربرد می‌باشد. ساختاری که از این‌گونه مواد ساخته می‌شود تا دمای 1900 °C مورد ارزیابی و تست قرار می‌گیرند به طوری که در انتقال دارای خطای بسیار کم و قابل چشم‌پوشی هستند (کوژاکوف، ۲۰۱۰).

طراح ریدوم باید نهایت دقت خود را به کار بگیرد چراکه با افزایش دما، ثابت دی الکتریک و افت تانژانت دچار تغییر می‌شوند این در حالی است که بایستی افت تانژانت در مقادیر کم ثابت بماند تا نیروی انتقال دهنده ریدوم در مقادیر بالا حفظ شود. شکل ۵ اطلاعات مورد نظر را برای SCFS، پایروگرام و رایگرام نشان می‌دهد. همانند ثابت دی الکتریک، افت تانژانت هم با افزایش دما زیاد می‌شود. تغییرات این دو ویژگی از ریدوم با دما می‌تواند نتایج زیان‌آوری را برای عملکرد آنتن در پی داشته باشد. مثلاً حرارت می‌تواند افت انتقال را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. شکل ۶ تصویری از دیواره یک ریدوم سرامیکی را نشان می‌دهد (والتون، ۱۹۷۲).

⁵ Slip cast fused silica



شکل ۵: تغییرات خواص الکتریکی SCFS، رایکرام و پایروکرام با دما (a) ضریب نفوذپذیری نسبی (b) افت تانژانت



شکل ۶: ریدوم های سرامیکی با دیواره نازک

محققین در مرکز فناوری انیستیتو گرجستان سیلیکون نیتريد را مورد ارزیابی قرار داده‌اند و به این نکته پی بردند که این ماده دارای خواص الکتریکی مناسب، استحکام مکانیکی بالا، مقاوم در برابر شوک حرارتی و مقاوم در برابر سایش و فرسایش ناشی از باران است. این افراد این امر را از دو طریق مورد ارزیابی قرار دادند:

الف) سیلیکون نیتريد سینتر شده که تحت واکنش حاصل شده است (RSSN). از واکنش سیلیکون با نیتروژن که با روش اسپری حرارتی پودر سیلیکون به شکل موردنظر قالب گیری می‌شود.

ب) سیلیکون نیتريد تهیه شده توسط پرس گرم (HPSN). واکنش سیلیکون با نیتروژن شکل می‌گیرد تا پودری حاصل شود که قابلیت پرس شدن را داشته باشد. HPSN در مقایسه با RSSN متراکم‌تر است.

اگر چه در سال ۱۹۸۰ سیلیکون نیتريدها به طور قابل ملاحظه‌ای توسعه پیدا کردند ولی باید به این نکته توجه داشت که تا آن زمان ریدوم‌های بسیار کمی به بازار معرفی شده بودند به طوری که بعضی از مشکلات تولید هنوز برطرف نشده بود.

چندین کامپوزیت سرامیکی پیشرفته برای کاربرد مورد تحقیق و ارزیابی قرار گرفتند به طوری که نیروی انتقال پذیری میکرو موج در دمای بالا به همراه استحکام بالا و تطبیق پذیری با شرایط دمایی گوناگون در آنها ترکیب شده بود. این کامپوزیت‌ها عبارتند از:

الف) Nitro-oxyceramic: از خانواده کامپوزیت‌هایی است که از ترکیب سیلیکون نیتريد، نیتريد بور و سیلیکا تهیه شده‌اند. این دسته از کامپوزیت‌ها توسط پرس گرم و یا پرس ایزواستاتیک تهیه و تولید می‌شوند.

ب) Celsian: باریوم آلومینو سیلیکات با خلوص بالاست. اینگونه مواد استحکام مکانیکی بسیار خوبی از خود نشان می‌دهند که در واقع استحکام آنها ۶ برابر استحکام سیلیکا (اکسید سیلیسیوم) است و مقاومت در برابر سایش و فرسایش بسیار بالایی از خود نشان می‌دهد (رایت، میرز، ریچی، ۱۹۹۲).

کمپانی کرادین مهارت و تجربه کافی را در انتخاب مواد سرامیکی برای کاربردهای ریدوم در موشک دارد. این شرکت از سال ۱۹۹۰ مشغول به تولید ریدوم‌ها شده است و خانواده‌ای از مواد را توسعه داده است که نیازهای امروزه و آینده را برای سیستم های موشک جنگی پاسخ می‌دهد.

سیلیس گداخته (Fused Silica)

سیلیس گداخته همان ماده SiO_2 است که ضریب انبساط حرارتی و هدایتی بسیار پایینی دارد. ثابت دی الکتریک آن پایین است (۳/۳) و این ثابت با تغییر در دما بسیار کم تغییر می‌کند که این باعث می‌شود تا این ماده گزینه مناسبی برای پنجره رادار باشد. این ماده مقاومت به شوک حرارتی بسیار مناسب دارد اما محدود به استفاده در دماهای پایین تر از ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد است. استحکام

نسبتا پایین این ماده به همراه محدودیت های دمایی ذکر شده، باعث شده تا این ماده در کاربردهایی با بارگذاری های حرارتی و مکانیکی پایین قابل استفاده باشد. از این ماده اخیرا در سیستم های موشک Patriot، Aegis و Arrow استفاده می شود (منگلز و میکیجلیج، ۲۰۱۰).



شکل ۷: سیلیس گداخته (سفید) و IRBAS (خاکستری) - ریدوم هایی که در شرکت مواد گرمایی کرادین ساخته شده اند.

IRBAS

ماده اصلی سازنده IRBAS از پایه نیتريد سيلیكون (Si_3N_4) است که تحت لیسانس شرکت سیستم های موشک Lockheed Martin تولید می شود. این ماده دارای خواص مکانیکی بسیار خوب در دماهای بالاست که این ویژگی سبب می شود تا از این ماده در کاربردهایی با بارگذاری های حرارتی و مکانیکی بالا بهره برد. ثابت دی الکتریک نسبتا پایداری دارد اما افت تانژانت آن در دماهای بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد روبه فزونی می رود. از این ماده اخیرا در سیستم موشک PAC-3 استفاده می شود (منگلز و میکیجلیج، ۲۰۱۰).

Ceralloy® 147-31N Silicon Nitride

این ماده (Si_3N_4) دارای خلوص بالاتری نسبت به IRBAS است همچنین محکم تر بوده و خواص الکتریکی پایداری از خود نشان می دهد مانند یک تابع دما. این ماده با این خصوصیات توسعه یافته است تا در کاربردهایی با بارگذاری های حرارتی و مکانیکی بالا قابل استفاده باشد (منگلز و میکیجلیج، ۲۰۱۰).

Silicon Nitride Ceralloy® 147-01 Reaction Bonded

این ماده هم از جنس Si_3N_4 می باشد منتها تحت واکنش حاصل شده است. خواص مکانیکی و الکتریکی آن مابین سیلیس گداخته، IRBAS و mirror Pyroceram قرار می گیرد. این ماده خواص الکتریکی منحصر به فردی دارد و می تواند مناسب در آخرین حد کاربرد باشد و خواص دی الکتریک آن تا ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد پایدار هستند. ثابت دی الکتریک پایین آن بزرگترین مزیت این ریدوم در مرحله طراحی و ساخت است. روش های فرایند برای این ماده منحصر به فرد هستند و این فرصت را فراهم می آورد تا در مرحله تولید

به عنوان جز سازنده ریدوم نسبت به سایر سیلیکون نیتریدها دارای هزینه کمتری باشد. این ماده هنوز تحت آزمایش و بررسی است و توسط تعدادی برنامه‌های پیشرفته تحت ارزیابی قرار می‌گیرد. خواص این مواد در مقایسه با Pyrocera 9606 در جدول ۱ آورده شده است. خواص وابسته به دما، استحکام، ثابت دی الکتریک و افت تانژانت به ترتیب در جدول های ۲، ۳، ۴ و ۵ مورد مقایسه قرار گرفته اند (منگلز و میکیجلج، ۲۰۱۰؛ باست، ۱۹۷۳).

جدول ۲: مقایسه خواص مواد سازنده ریدومها

ویژگی	Pyrocera 9606	Fused Silica	IRBAS	Ceralloy® 147-31N Silicon Nitride	Ceralloy® 147-01EXP Silicon Nitride
تولید کننده	Corning Inc.	Ceradyne Thermo Materials	Lockheed Martin	Ceradyne, Inc.	Ceradyne, Inc.
ترکیب سازنده	سرامیک شیشه ای Glass Ceramic	سیلیس گداخته Fused Silica	پایه نیتريد سیلیکون Silicon Nitride Based	پایه نیتريد سیلیکون Silicon Nitride Based	پایه نیتريد-واکنش Reaction Bonded Silicon Nitride
دانسیته (g/cm^3)	۲/۶	۲	۳/۱۸	۳/۲۱	۲/۵-۱/۸
مدول الاستیک (GPa)	۱۲۱	۳۷	۲۸۰	۳۱۰	۲۰۰-۵۰
ضریب پواسون	۰/۲۴	۰/۱۵	۰/۲۵	-	۰/۲۴
استحکام (MPa)	۲۴۰	۴۳	۵۵۰	۸۰۰	۱۸۰
انبساط حرارتی ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	۴/۷	۰/۷	۳/۲	-	۳/۱
هدایت حرارتی (W/m K)	۳/۳	۰/۸	۲۰	۲۵	۶
ثابت دی الکتریک	۵/۵	۳/۳	۷/۶	۸	۶-۴
افت تانژانت	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵-۰/۰۰۲

جدول ۳: تغییرات استحکام با دما برای مواد مختلف سازنده ریدوم

استحکام (MPa)					دما (°C)
Ceralloy® 147-01EXP Silicon Nitride	Silicon Ceralloy® 147-31N Nitride	IRBAS	9606 Pyoceram		
۲۱۰	۸۰۰	۵۶۰	۲۷۵	۲۵	
-	۸۰۰	۵۳۷	۲۴۸	۲۶۰	
-	۷۹۰	۵۰۲	۱۲۵	۷۰۴	
-	۷۸۰	-	۸۹	۸۱۵	
۲۰۰	۷۴۰	-	-	۱۰۰۰	
-	۵۴۴	-	-	۱۲۰۰	
۲۳۰	۳۶۵	-	-	۱۴۰۰	

جدول ۴: تغییرات ثابت دی الکتریک با دما برای مواد مختلف سازنده ریدوم

ثابت دی الکتریک (e')				دما (°C)
RBSN Ceralloy® 147-010F Silicon Nitride (Density-2.15 g/cm3)	SRBSN Ceralloy® 147- 31N Silicon Nitride	IRBAS	Pyoceram 9606	
۵	۸	۷/۶	۵/۸	۲۵
۵/۱	۸/۱	۷/۷	۵/۸	۳۱۵
۵/۲	۸/۲	۷/۸	۵/۸	۵۳۷
۵/۲	۸/۳	۷/۹	۵/۹	۶۴۸
۵/۳	۸/۴	۸	۶	۸۱۵
۵/۳	۸/۶	-	-	۱۲۰۰
۵/۴	-	-	-	۱۴۰۰

جدول ۵: تغییرات افت تانژانت با دما برای مواد سازنده ریدوم

افت تانژانت				دما (°C)
RBSN Ceralloy® 147-010F Silicon Nitride (Density-2.15 g/cm3)	SRBSN Ceralloy® 147-31N Silicon Nitride	IRBAS	Pyoceram 9606	
۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۰۵	۲۵
۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۰۵	۳۱۵
۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۱۰	۵۳۷
۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۲۰	۶۴۸
۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۵۰	۰/۰۱۰۰	۸۱۵
۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۷۰	-	-	۱۲۰۰
۰/۰۱۰۰	-	-	-	۱۴۰۰

نتیجه گیری

در این تحقیق به معرفی و بررسی خواص انواع ریدوم های مطرح شده در سطح جهان پرداخته شده است. اهم نتایج این تحقیق عبارتند از:

- ۱- سرامیک ها ماده اصلی سازنده ریدوم ها به خصوص در شرایط دمایی بالا هستند.
- ۲- هر نوع سرامیک ویژگی خاصی را دارد و تمامی ویژگی های مطلوب در یک سرامیک جمع نمی شود لذا بسته به موقعیت مکانی و شرایط دمایی و فشاری سرامیک مورد نظر برای ساخت ریدوم انتخاب می شود.
- ۳- با افزایش دما افت تانژانت زیاد می شود. از این بین ریدوم های RBSN Ceralloy® 147-010F Silicon Nitride کمترین تغییرات افت تانژانت را با تغییر دما از خود نشان می دهند.
- ۴- با افزایش دما ثابت دی الکتریک زیاد می شود. از این بین ریدوم های Pyoceram 9606 کمترین تغییرات ثابت دی الکتریک را با تغییر دما از خود نشان می دهند.

۵- از لحاظ استحکام ریدوم های Silicon Nitride Ceralloy® 147-31N بهترین شرایط را دارار هستند.

منابع

Bassett H. L. (1973). "Analysis & Evaluation of Radome Materials & Configurations for Advanced RF Seekers. U.S. Arlzy Missile Command. Redstone Arsenal. Alabama.

Cary R. H. (1974). "Avionic radome materials". Advisory Group for Aerospace Research and Development. Paris, France.

Coy, T. N. (1972). "Hot Pressed Silicon Nitride". Proceedings of the 11th Symposium on Electromagnetics Windows. Georgia Institute of Technology. Atlanta. GA.

Harris J. N. (1978). "Proceedings of the 14th Symposium on Electromagnetic Windows". Georgia Institute of Technology. Atlanta. GA.

Harris J. N. (1986). "Proceedings of the 18th Symposium on Electromagnetic Windows". Georgia Institute of Technology. Atlanta. GA.

Kozakoff D. J. (2010). "Analysis of Radome-Enclosed Antennas". Boston|London. Artech House. Second Edition.

Mangels j. & Mikijelj B. (2010). "Ceramic Radomes for Tactical Missile Systems". Ceradyne Thermo Materials & Ceradyne, Inc.

Walton J. D. (1972). "Reaction Sintered Silicon Nitride". Proceedings of the 11th Symposium on Electromagnetics Windows. Georgia Institute of Technology. Atlanta. GA.

Wright J. M., Meyers J. F, & Ritchie E. E. (1992). "Advanced Ceramic Composites for Hypersonic Radome Applications". Proceedings of the 20th Symposium on Electromagnetic Windows. Georgia Institute of Technology. Atlanta. GA.

Walton J. D. (1970). "Radome Engineering Handbook". New York: Marcel Dekker.