بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه بیرجند
دانشکده علوم
گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

گرایش حالت‌جامد

عنوان:

بررسی خواص فیزیکی،ساختاری بلوری و خواص مغناطیسی آلیاژ $Ni_{43}Mn_{41}Co_5Sn_{11}$

استاد راهنما:

دکتر هادی عربی

استاد مشاور:

پروفسور فائز پورآرین

نگارش:

زهراپروانه

دی ماه ۱۳۹۰

سپاسگزاری

سپاس خداوندی را که بالاتر از همه اندیشه‌هاست.

حمدو سپاس بیکران خداوندی را که بر هر نعمت، حق سپاسی برای بندگان مقرر فرموده است.

سپاس فراوان نثار خانواده عزیزم که همواره تکیه‌گاه من بودند و دعای خیر آنها راهگشای تمام مشکلاتم بود.

از همسر عزیزم که صبورانه همراه و یاور من بودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از استاد راهنمای محترم، جناب آقای دکتر هادی عربی که همواره از رهنمودهای ارزنده ایشان بهره‌من بوده‌ام، نهایت سپاس‌گزاری را دارم.

از جناب آقای پروفسور پورآرین که از راه دور از راهنمایی‌های ارزنده‌شان بهره‌مند بودم نیز تشکر می‌کنم.

از اساتید گرانقدر، جناب آقای دکتر امیرآبادیزاده و سرکار خانم دکتر صادقی که زحمت بازخوانی و داوری این پایان‌نامه را به عهده گرفتند و جناب آقای دکتر محمدنژاد نماینده تحصیلات تکمیلی، تشکر و قدردانی می‌کنم.

از تمام دوستان و همکلاسی‌های عزیزم به پاس همدلی و همراهیشان کمال تشکر و قدردانی را دارم. به‌خصوص آقایان سرحدی و زارعی و خانم‌ها کاظم‌زاده، سبزی‌نژاد، جمشیدی و گنجعلی تشکر و قدردانی می‌کنم .

تقدیم به

او که جهان در انتظارش است.

پیشکش به پدر عزیزم که

سنگ صبور سختی‌هایم بوده است.

و مادر مهربانم که خالصانه‌ترین

عشق را بدرقه راه زندگی‌ام کرد.

و تقدیم به نیمه وجودم، همسر عزیزم،

که تکیه‌گاه امن زندگی من بوده است.

چکیده

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به‌دلیل خواص گوناگونی نظیر سوپرالاستیسیته مغناطیسی، مگنتو مقاومت بزرگ، اثر مگنتوکالریک معکوس و اثر حافظه‌داری شکلی توجه زیادی را جلب کرده‌اند.

در این پژوهش خواص ساختاری و مغناطیسی آلیاژ حافظه‌دار $Ni_{43}Mn_{41}Co_5Sn_{11}$ مورد بررسی قرار گرفته است. این آلیاژ به عنوان نوعی آلیاژ هسلر شناخته می‌شود که انتقال فاز از آستنیت با ساختار مکعبی L_{2_1} به فاز مارتنزیت با ساختار اورتورومبیک یا تتراگونال در دمای پایین را تحمل می‌کند.

با گرفتن مقاومت از نمونه، طی فرایندهای گرمایشی و سرمایشی دماهای شروع و پایان فازهای مارتنزیت و آستنیت مشخص شد و با استفاده از پراش اشعه ایکس ثابت شبکه آلیاژ۶/۰۱۲۶۷ آنگستروم به‌دست آمده است و با اندازه‌گیری منحنی M بر حسب H در دمای اتاق متوجه رفتار فرومغناطیسی آن در فاز آستنیت شدیم.

این آلیاژ در دمایی پایین‌تر از دمای بحرانی فاز مارتنزیت، دارای رفتار شیشه‌سوپراسپینی است. همچنین مشاهده‌شد که این آلیاژ در دمای انتقال با کاهش ۵۳ درصدی مقاومت، روبرو می‌شود.

فهرست مطالب

فصل اول:آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

۱-۱مقدمه..... أ

۱-۲ آلیاژهای هسلر..... ۲

۱-۲-۱ هسلر کامل..... ۵

۱-۲-۲ نیمه هسلر..... ۵

۱-۳ مواد هوشمند..... ۸

۱-۴ تعریف آلیاژهای حافظه دار شکلی یا SMA..... ۹

۱-۵ سیر تحول آلیاژهای *حافظه*دار..... ۱۰

۱-۵-۱ پلیمرهای حافظه دار شکلی..... ۱۱

۱-۵-۲ فرو مغناطیسی..... ۱۲

۱-۶ فازها..... ۱۲

۱-۶-۱ فاز مارتنزیت..... ۱۳

۱-۶-۲ فاز آستنیت..... ۱۳

۱-۶-۳ R فاز..... ۱۳

۱-۷ خواص SMA..... ۱۸

۱-۷-۱ دو نوع حالت حافظه دار وجود دارد..... ۱۹

۱-۷-۲ انعطاف پذیری..... ۲۰

۱-۷-۳ انحراف تنش وکرنش نسبت به حالت استاندارد..... ۲۱

۱-۷-۴ خوردگی..... ۲۱

۱-۷-۵ رسانندگی..... ۲۱

۱-۸ تقسیم‌بندی مواد حافظه‌دار شکلی..... ۲۲

۱-۹ ساخت آلیاژها..... ۲۳

۱-۱۰ اثرحافظه دار شکلی(SME)..... ۲۳

۱-۱۱ اثرالاستیک کاذب یا شبه الاستیک ۲۶
۱-۱۲ کاربردهای SMA: ۲۹
۱-۱۲-۱ کاربرد پزشکی: ۳۰
۱-۱۲-۲ کاربرد در صنایع هوا و فضا: ۳۲
۱-۱۲-۲ کاربرد در صنایع خودروسازی: ۳۳

فصل دوم:آنالیز مواد

۲-۱ آنالیز مواد ۳۵
۲-۲ آنالیز میکروسکوپی ۳۵
۲-۲-۱ میکروسکوپ الکترونی ۳۵
۲-۲-۱-۱ میکروسکوپ الکترون روبشی(SEM) ۳۶
۲-۲-۲ میکروسکوپ پروب روبشی(SPM) ۳۷
۲-۳ آنالیز ساختاری ۳۸
۲-۳-۱ روشهای مبتنی بر امواج الکترومغناطیسی ۳۸
۲-۳-۱-۱ طیف‌سنج پراش اشعه ایکس(XRD) ۳۹
۲-۳-۱-۲ روشهای مبتنی بر الکترون ۴۵
۲-۴ روشهای تعیین اندازه و سطح ویژه ذرات ۴۵
۲-۴-۱ روشهای مبتنی بر نوترون ۴۵
۲-۴-۲ روشهای مبتنی بر امواج الکترومغناطیسی ۴۵
۲-۴-۲-۱ پخش نور با زاویه کوچک ۴۵
۲-۴-۳ روشهای مبتنی بر جذب سطحی ۴۶
۲-۴-۳-۱ آنالیز BET ۴۶
۲-۴-۴روشهای مبتنی بربارالکتریکی ۴۶
۲-۵ آنالیز حرارتی ۴۷
۲-۵-۱ گرماسنجی روبشی تفاضلی ۴۷
۲-۵-۲ کاربردهای DSC ۴۹

۲-۵-۲-۱ تعیین دمای انتقال شیشه‌های ۴۹
۲-۶ آنالیز عنصری ۵۰
۲-۶-۱ روشهای مبتنی بر یون ۵۰
۲-۶-۱-۱ طیف‌سنجی تخلیه نورانی(GDS) ۵۰
۲-۶-۲ روشهای کلاسیک ۵۱
۲-۶-۲-۱ آنالیز کلاسیک عناصر ۵۱
۲-۶-۳ روشهای مبتنی بر الکترون ۵۱
۲-۶-۳-۱ میکرون آنالیز پروب الکترونی(EPMA) ۵۱
۲-۷ آنالیز مغناطیسی مواد ۵۱
۲-۷-۱ مغناطیس‌سنج با نمونه نوسانی(VSM) ۵۱
۲-۷-۲ پذیرفتاری مغناطیسی AC ۵۸
۲-۸ اندازه‌گیری مقاومت ۵۷
فصل سوم: روش‌های ساخت ومروری بر کارهای انجام‌گرفته
۳-۱ ساخت آلیاژها ۶۰
۳-۱-۱ ذوب القایی تحت خلا ۶۰
۳-۱-۱-۱ شرح فرایند ۶۱
۳-۱-۱-۲ ساختمان کوره VIM ۶۴
۳-۱-۱-۳ فرایندVIDP ۶۸
۳-۱-۱-۴ مزایا و معایب VIM ۶۹
۳-۱-۱-۵ موارد استفاده ۷۰
۳-۱-۲ ذوب مجدد قوس الکتریکی در خلا(VAR) ۷۰
۳-۱-۲-۱ تکنولوژی فرایند و مشخصات فرایند ۷۱
۳-۱-۲-۲ مزایای VAR ۷۰
۳-۱-۲-۳ کاربرد ۷۱
۳-۲ آلیاژهایNi-Mn-based ۷۱

۳-۳ اثر اضافه کردن کبالت ۷۹
۳-۴ دیاگرام فاز آلیاژهای Ni-Co-Mn-Sn ۸۲
۳-۵ شیشه اسپینی ۸۷
فصل چهارم: **مشخصه‌یابی آلیاژ $Ni_{43}Mn_{41}Co_5Sn_{11}$**
۴-۱ آنالیز طیف پراش اشعه x ۹۲
۴-۲ آنالیز مغناطیسی نمونه ۹۰
۴-۳آنالیز عنصری ۹۱
۴-۴ آنالیز پذیرفتاری مغناطیسی AC ۹۵
۴-۵ آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی ۹۶
۴-۶ اندازه‌گیری مقاومت ۱۰۱
۴-۷ آنالیز گرماسنجی روبشی تفاضلی ۱۰۱
۴-۸ نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای کارهای آینده ۱۰۱
منابع و مراجع ۱۰۱

فهرست شکل‌ها

۱- ۱ شمای کلی چگالی حالت‌های الکترونی نیمه‌فلزات در مقایسه با فلزات نرمال و نیمه‌رساناها.. ۴

۱- ۲ ساختار کریستالی آلیاژهای هسلر ۶

۱- ۳ انواع فازهای آلیاژهای حافظه‌دار شکلی..... ۱۵

۱- ۴ ساختار مارتنزیت لغزشی(چپ) و جهتگیری واریانت‌ها..... ۱۵

۱- ۵ اثر حافظه‌داری یک راهه..... ۱۸

۱- ۶ تغییرات میکروساختاری در طی اثر حافظه‌داری دو راهه..... ۱۹

۱- ۷ اثر حافظه‌دار شکلی در طول دو مسیر ۱۹

۱- ۸ منحنی تجربی دما- تنش- کرنش آلیاژ حافظه‌دار NiTi..... ۲۴

۱- ۹ منحنی تجربی برای یک چرخه بارگذاری شده شبه الاستیک همدما..... ۲۴

۱- ۱۰ رفتار سوپرالاستیسیته..... ۲۶

۱- ۱۱ منحنی تنش –کرنش برای NiTi در دماهای مختلف ۲۷

۱- ۱۲ عملکرد یک بست حافظه‌دار قبل(چپ) و بعد از بازیابی شکل اولیه(راست)..... ۲۸

۱- ۱۳ مسدودکننده سوراخ دیواره بطنی..... ۳۰

۱- ۱۴ v شکل هندسی تغییرپذیر بویئنگ ۳۱

۲- ۱ پراش پرتو X توسط یک بلور..... ۳۱

۲- ۲ پهنای پیک در نصف ارتفاع..... ۴۰

۲- ۳ نمایش ایده‌ال سه مرحله قابل مشاهده با کمک DSC..... ۴۱

۲- ۴ تعیین T_g به دو روش (الف) و (ب)..... ۴۸

۲- ۵ شماتیکی از پیکربندی روش چهار نقطه پروب ۵۸

۳- ۱ شماتیک یک کوره VIM..... ۶۱

۳- ۲ تاثیر زمان نگهداری در خلا بر میزان کاهش ناخالصی‌های مضر..... ۶۳

۳- ۳ شماتیک کلی کورهVIDP..... ۶۶

۳- ۴ شماتیک کلی کوره‌هایVAR..... ۶۹

۳- ۵ دیاگرام فاز $Ni_2Mn_{1+x}Sn_{1-x}$ و $Ni_2Mn_{1+x}In_{1-x}$ ۷۲
۳- ۶ ساختار NM(چپ)-ساختار 10M(وسط)-ساختار 14M(راست) ۷۳
۳- ۷ تغییرات ساختار کریستالی Ni-Mn-Sn ۷۴
۳- ۸ انتقال فاز ناشی از اعمال میدان مغناطیسی ۷۴
۳- ۹ منحنی M بر حسب H در ماده متامغناطیس ۷۵
۳- ۱۰ الگوی پراکندگی نوترون در آلیاژهای a) $Ni_{50}Mn_{33}Sn_{17}$ b) $Ni_{45}Co_5Mn_{33}Sn_{17}$ ۷۸
۳- ۱۱ دماهای مشخصه انتقال فاز بر حسب میزان Co در آلیاژهای $Ni_{43}Mn_{46-x}Co_xSn_{11}$ (x=0-5) ۷۹
۳- ۱۲ دیاگرام فاز آلیاژهای $Ni_{50-x}Co_xMn_{39}Sn_{11}$ ($0 \leq x \leq 10$) ۸۰
۳- ۱۳ وابستگی دمایی مغناطش و مقاومت در آلیاژ $Ni_{43}Mn_{41}Co_5Sn_{11}$ ۸۰
۳- ۱۴ منحنی‌های مغناطش برای آلیاژ $Ni_{43}Mn_{41}Co_5Sn_{11}$ از دمای ۲۸۰تا ۲۹۹ کلوین ۷۲
۳- ۱۵ وابستگی دمایی ΔS_M برای آلیاژهای $Ni_{43}Mn_{46-x}Co_xSn_{11}$ (x=0-5) ۷۳
۳- ۱۶ وابستگی دمایی قسمت حقیقی پذیرفتاری آلیاژ $Ni_{43.5}Co_{6.5}Mn_{39}Sn_{11}$ ۸۶
۴- ۱ پراش پرتو ایکس در دمای اتاق ۸۹
۴-۲پراش پرتو ایکس از Ni43Mn41Co5Sn11 در دماهای بالاتر ۹۰
۴- ۳ منحنی پسماند آلیاژ در میدان‌های بزرگ(چپ)- در میدان‌های کوچک(چپ) ۹۰
۴-۴ مسیر EDX گرفته‌شده(چپ)- نوسان عناصر در این مسیر(راست) ۹۱
۴- ۵ منحنی EDX و درصد دقیق اتمی و جرمی آلیاژ $Ni_{43}Mn_{41}Co_5Sn_{11}$ ۹۲
۴- ۶ EDX از صفحات تاریک ۹۳
۴- ۷ EDX از صفحات روشن ۹۳
۴-۸ صفحات تاریک و روشن ۹۳
۴- ۹ قسمت حقیقی پذیرفتاری مغناطیسی بر حسب دما و منحنی مشتق آن ۹۶
۴- ۱۰ تصاویر SEM از نمونه پولیش‌داده‌شده و اچینگ‌شده در بزرگنمایی مختلف ۹۷
۴- ۱۱ نمودار مقاومت آلیاژ بر حسب دما طی فرایندهای سرمایش و گرمایش ۹۸
۴- ۱۲ نمودار DSC تحت فرایند گرمایش ۹۹

فهرست جداول

۱- ۱ عناصر آلیاژهای هسلر- ساختار مغناطیسی و کریستالی آلیاژها..... ۷
۳- ۱۲ تفاوت مغناطش اشباع با اضافه‌کردن Co..... ۷۶
۴-۱ درصد اتمی عناصر در صفحات تاریک و روشن.....۹۴

فصل اول:

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

۱-۱مقدمه

موادی که باعث سازش با محیط خود می‌شوند مواد محرک نامیده می‌شوند، این مواد می‌توانند شکل، سفتی، مکان، فرکانس طبیعی، و سایر مشخصات مکانیکی را در پاسخ به دما و یا میدان‌های الکترومغناطیسی تغییر دهند. امروزه پنج نوع ماده محرک به طور عمده استفاده می‌شوند که آلیاژهای حافظه‌دار شکلی[1] جزئی از این مواد هستند. این مواد از زمره مواد هوشمند محرک می‌باشند. مواد هوشمند نیز آن دسته از موادی هستند که می‌توانند به تغییرات محیط به بهترین شکل ممکن پاسخ داده و رفتار خود را نسبت به تغییرات تنظیم نماید.

یکی از خواص آلیاژهای هسلر هم خاصیت حافظه داری شکلی آن‌هاست و آنها نیز جزئی از آلیاژهای حافظه‌دار هستند.

به دلیل عدم آشنایی صنعت با تکنولوژی آلیاژهای حافظه‌دار استفاده از این محرک هنوز به رشد لازم نرسیده است. اما مراکز علمی جهت فهم مکانیزم و خواص این‌گونه محرک‌ها در حال انجام تحقیقات گسترده‌ای هستند که کشور ژاپن پیشرو در این زمینه می‌باشد و تاکنون بیش از ۱۰۰ مقاله درباره این گونه آلیاژها ارائه کرده است.

در این فصل مروری بر آلیاژهای هسلر وآلیاژهای حافظه‌دار شکلی و خواص آن را داریم و در ادامه برخی از کاربردهای این آلیاژها را ذکر می‌کنیم.

۱-۲ آلیاژهای هسلر[2]

آلیاژهای هسلر ترکیبات فلزی معمولا سه‌تایی هستند که به‌وسیله‌ی، فردریش هسلر[3] در سال۱۸۹۸ کشف شدند.یک شیمی‌دان و مهندس معدن آلمانی در سال۱۹۰۳ کشف کردند که آلیاژCu -Mn-Al

[1] Shape memory alloys

[2] Hesler alloys

فرومغناطیس است اگر چه این آلیاژ شامل المان‌های غیرمغناطیسی است، این آلیاژها دارای مغناطش اشباع و دمای کوری بالا است[۱].

اخیرا آلیاژهای هسلر از لحاظ آزمایشگاهی و تئوری، به‌دلیل خواص منحصربه‌فرد خود از جمله رفتار نیمه‌فلزی و بعضی اثر حافظه‌دار شکلی مغناطیسی و اثر مگنتوکالری توجه زیادی بخود جلب کرده‌اند.

در این آلیاژها نفوذپذیری مغناطیسی یک جسم مغناطیسی می‌تواند افزایش و تلفات هسترسیس کاهش یابد.تعدادزیادی از این آلیاژها در دمای اتاق فرومغناطیس هستند در یک موارد کمی، آنتی-فرومغناطیس هستند.

امروزه دو دسته از مواد هسلر هستند که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

نیمه فلزات[۴]

در اوایل دهه۱۹۸۰ ،.رب د گروب[۵] و همکارانش زمانی‌که ساختار باند موادمغناطیسی بر پایه فازهای کریستالی Cl_b و$L2_1$ را مطالعه می‌کردند، یک طبقه از مواد مغناطیسی با ساختار الکترونی غیرمعمول به نام نیمه‌فلزات را کشف کردند.

مشخصه این مواد وجود همزمان رفتار فلزی برای یک نوع اسپین الکترونی و رفتار عایق برای نوع دیگر است. بنابراین چگالی حالت‌های الکترونی[۶] (DOS) در سطح فرمی کاملا پلاریزه اسپینی است و بخش عمده رسانندگی توسط این حامل‌های بار تک اسپینی فلزی صورت می‌گیرد.

یکی دیگر از مشخصات مواد نیم‌فلزی، یک عدد صحیح به عنوان مقدار ممان مغناطیسی است. در یک ماده فرومغناطیس متعارف به دلیل برهم‌کنش‌های تبادلی، نوارهای انرژی نسبی برای اسپین‌های اکثریت(up) و اقلیت(down) در سطح فرمی E_f جابه‌جا شده‌اند که نشان دهنده تعداد نامساوی از

---

[3] Friedrich Heusler

[4] Half metals

[5] Rob de Groot

[6] Density of state

الکترون‌های با اسپین بالا ($n\uparrow$) و با اسپین پایین ($n\downarrow$) است در نتیجه برای یک ماده فرومغناطیس‌ای به شکل زیر تعریف می‌شود. M مغناطش در واحد فرمول و μ_B مگنتون بوهر نامیده می‌شود.

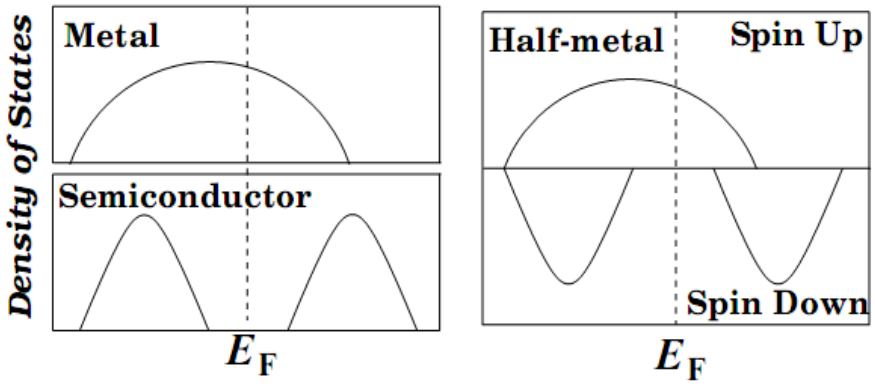
به ازای هر واحد فرمولی (۱-۱) $M=\mu_B(n\uparrow- n\downarrow)$

یعنی در ترکیبات نیم‌فلزی استوکیومتری شده، گاف انرژی بین کانال‌های اسپینی نشان دهنده کوانتش ممان مغناطیسی است.

قدرت خاصیت نیم‌فلزی، به صورت نسبتDOS اقلیت به اکثریت در تراز فرمی یعنی $\frac{N\downarrow(E_f)}{N\uparrow(E_f)}$ تعریف می‌شود که برای یک نیم‌فلز ایده‌آل، برابر صفر است.

پلاریزاسیون اسپینی در E_f در حالت ایده‌آل باید۱۰۰ درصد باشد که به صورت زیر تعریف می-شود.[۲]

$$P=\frac{N_\uparrow(E_F)-N_\downarrow(E_F)}{N_\uparrow(E_F)+N_\downarrow(E_F)} \qquad (۲-۱)$$



شکل ۱-۱: شمای کلی چگالی حالت‌های الکترونی نیمه‌فلزات در مقایسه با فلزات نرمال و نیمه‌رساناها

۱-۲-۱ هسلر کامل[7]

یک دسته از آلیاژهای هسلر، هسلر کامل هستند که دارای فاز کریستالی $L2_1$ هستند و غالبا به‌صورت X_2YZ دیده می‌شوند کهX وYعناصر واسطه وZ عناصر sp هستند و خواص مغناطیسی این آلیاژها از ممان مغناطیسی روی اتم‌های فلز واسطه در مکانX و Y ناشی می‌شود ماکسیمم ممان مغناطیسی این خانواده μ_B ۵/۸ است[۱و۲].

در این آلیاژها، ممان مغناطیسی اسپینی کل با رابطه $M_t=Z_t-24$ هماهنگی دارد که Z_t برابر با مجموع الکترون‌های با اسپین بالا و پایین است.

ساختار$L2_1$ شامل چهار زیرشبکه fcc نفوذکرده با مکان‌های (۰۰۰)، (۱/۲ و ۱/۲ و ۱/۲) برای اتم-هایX، (۱/۴ و ۱/۴ و ۱/۴) برای اتمYو(۳/۴ و ۳/۴ و۳/۴) برای اتم Z است که ساختار این آلیاژها و مکان اتم‌های آن در شکل (۱-۲) نشان داده‌شده‌است. α ثابت شبکه است.

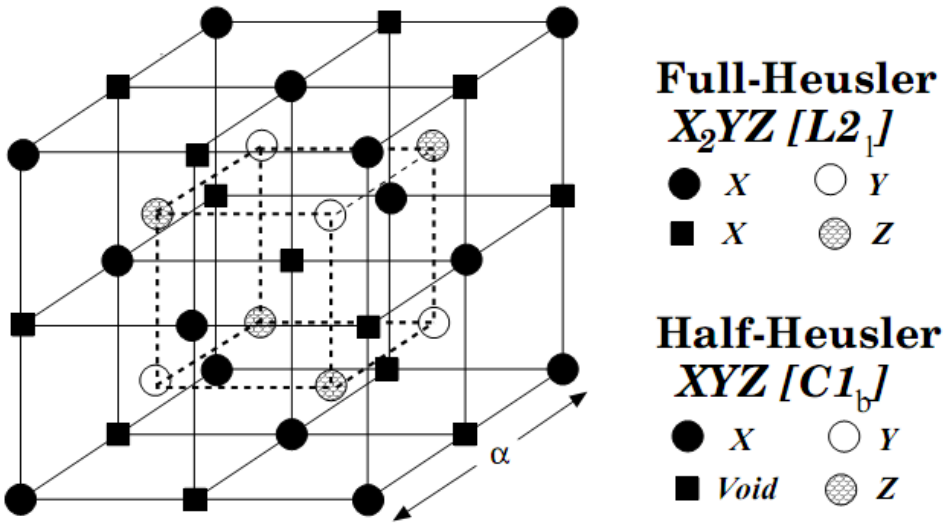
۱-۲-۲ نیمه هسلر

دسته دوم از آلیاژهای هسلر، نیمه هسلرها هستند. این آلیاژها بصورت XYZ هستند و در ساختارCl_b کریستالی می‌شوند. ماکسیمم مقدار ممان مغناطیسی این خانواده μ_B ۵ است و ممان مغناطیسی این آلیاژها، با رابطه $M_t=Z_t-18$ مطابقت دارد. این مواد، فرومگنت‌های قوی و دارای گاف نواری اسپین اقلیتی بزرگ هستند.

اگر در ساختار$L2_1$ یکی از چهار شبکه fcc که مربوط به مکان‌های X را بصورت اشغال نشده رها کنیم همان ساختار Cl_b به‌دست می‌آید.

[7] Full-husler

برخی آلیاژهای هسلر کامل و نیمه‌هسلر سه‌تایی و ساختار مغناطیسی و کریستالی آن‌ها در جدول (۱-۱) بیان شده است، FM , AFM وPM به ترتیب نشان‌دهنده فرومغناطیس و آنتی‌فرومغناطیس و پارامغناطیس است. وقتی در ساختار $L2_1$، نیمی از اتم‌های y و Z مکان‌هایشان را عوض کنند ساختار B_2 به دست می‌آید که این رفتار وابسته به شرایط گرمایی است[۱].



شکل۱-۲: ساختار کریستالی آلیاژهای هسلر[۱]

جدول ۱-۱: عناصر آلیاژهای هسلر- ساختار مغناطیسی و کریستالی آلیاژها[۲]

Y	X	Z	Magnetic order	Crystal structure
V	Mn	Al,Ga	FM	$L2_1$
	Fe	Al,Ga	FM	$L2_1$
	Fe	Si	PM	$L2_1$
	Co	Al,Ga,Sn	FM	$L2_1$
Cr	Co	Al,Ga	FM	$L2_1$
	Fe	Al,Ga	FM	$L2_1$
M	Cu	Al,In,Sn	FM	$L2_1$
n	Cu	Sb	AFM	Cl_b
	Ni	Al	AFM	B_2
	Ni	Sb	FM	Cl_b
	Ni	Al,Ga,In,Sn,S	FM	$L2_1$
	Co	b	FM	$L2_1$
	Co	Al,Si,Ge,Sn	FM	Cl_b
	Fe	Sb	FM	$L2_1$
	Pd	Al,Si	AFM	B_2
	Pd	Al	AFM	$L2_1$
	Pd	In	FM	$L2_1$
	Pd	Sn,Sb	FM	Cl_b
	Pd	Sb	AFM	Cl_b
	Rh	Te	FM	B_2
	Rh	Al,Ga,In	FM	$L2_1$
	Rh	Ge,Sn,Pb	FM	Cl_b
	Ru	Sb	FM	Cl_b
	Au	Ga	AFM	B_2
	Au	Zn,Cu	AFM	$L2_1$
	Au	Al,Ga,In	FM	Cl_b
	Pt	Sb	AFM	$L2_1$
	Pt	Al,Ga	FM	Cl_b
	Ir	Ga	AFM	$L2_1$
	Ir	Al	AFM	Cl_b
		Ga		
Fe	Fe	Al,Si	FM	DO_3
	Co	Al,Si,Ga	FM	$L2_1$
Co	Fe	Ga	FM	$L2_1$
Ni	Fe	Al,Ga	PM	$L2_1$

۱-۳ مواد هوشمند

مواد هوشمند موادی هستند که توسط توابعی خاص به عواملی نظیر دما، میدان مغناطیسی، نور، pH، تنش و کرنش و ... مرطبتند.

– مواد پیزو الکتریک: این مواد با دریافت تنش، ولتاژ تولید می‌کنند و بر عکس. به بیانی دیگر با دریافت ولتاژ مشخصی تنش متناسبی در نمونه ایجاد خواهد شد اکثر این مواد می‌توانند به طور مختلف طراحی شوند، مثلا با تغییر ولتاژ، قطعه خم می‌شود یا منقبض شوند.

– مواد ترموپوزیتو[۸]: این مواد در دماهای مختلف اشکال هندسی مشخصی به خود می‌گیرند فلزات حافظه‌دار یا پلیمرهای حافظه‌دار از این دسته‌اند مثلا آلیاژهای حافظه‌دار شکلی همان فلزاتی هستند که شکل اولیه خود را به خاطر می‌آورند این خصوصیات به دلیل استحاله وابسته به دما از ساختار کریستالوگرافی تقارن کم به تقارن زیاد فاز آستنیت است. سه نوع اصلی آلیاژها عبارتند از: Ni-Ti, Ni-Al-Cu, Al-Zn-Cu.

– مواد حافظه‌دار مغناطیسی: این مواد با تغییرات مشخصی از میدان مغناطیسی شکل خود را تغییر می‌دهند.

– مواد هالوکرومیک: این مواد با تغییر اسیدیته یا pH از خود تغییر رنگ نشان می‌دهند.

– مواد فوتوکرومیک: موادی که با تغییر شدت نور، رنگ خود را تغییر می‌دهد.

– نانولوله‌های کربنی: نانو لوله، یکی از مقاوم‌ترین مواد ساخت بشر است که مقاومت مکانیکی و مدول الاستیسیته بالایی دارد. مقاومت مکانیکی ۶۳ گیگا پاسکال و مدول الاستیسیته یک تراپاسکال در قیاس با فولادهای با مقاومت مکانیکی بالا (1/25 Pa)تامل‌برانگیز است.

– سیال هوشمند: خصوصیات این سیال نظیر لزجت با قرارگیری در میدان الکتریکی یا مغناطیسی تغییر می‌کند.

[8]Thermopasitive