



دانشگاه یزد
دانشکده فیزیک
گروه حالت جامد

پایان نامه
کارشناسی ارشد فیزیک

ساخت نانو سیم های فلزی با استفاده از نانو حفره های آلومینیوم و بررسی خواص آنها

استاد راهنما: دکتر حسین مختاری
استاد راهنمای دوم: دکتر علیرضا کشاورز
پژوهش و نگارش: مریم بهزادی

اسفند ماه ۱۳۹۲

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگان
به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است
به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید
و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند
این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می کنم

از استادان گرامیم جناب آقایان دکتر حسین مختاری و دکتر علیرضا کشاورز بسیار سپاسگزارم چرا که بدون راهنماییهای ایشان تامین این پایان نامه بسیار مشکل می نمود. به ویژه از سرکار خانم دکتر زهره پرنگ به دلیل یاریها و راهنماییهای بی چشمداشتشان که بسیاری از سختیها را برایم آسانتر نمودند، و در پایان از کلیه کارمندان دانشگاه یزد و دانشگاه صنعتی شیراز جهت همکاری بیدریغ ایشان جهت پیشبرد این پایان نامه سپاسگزارم.

چکیده

امروزه نانو سیم های فلزی به دلیل خواص ویژه ای که دارند نویدبخش کارایی زیادی در قطعات الکترونیکی اند. توسعه الکترونیک و قدرت یافتن در این زمینه وابسته به پیشرفت مداوم در کوچک کردن اجزاء الکترونیکی است. در این تحقیق به تولید نانو سیم های فلزی کبالت، نیکل و نیکل-کبالت و بررسی خواص مغناطیسی آن ها و مقایسه ی آن ها با یکدیگر و با کبالت و نیکل خالص پرداخته ایم. در ابتدا نانو حفره های متخلل آلومینا را بر روی بستری از آلومینیوم توسط اسید اگزالیک و اسید کرومیک و در ولتاژ و دمای ثابت به روش آندی کردن ایجاد کردیم. تصاویر SEM این حفره ها حاکی از آن است که آندی کردن در اسید اگزالیک حفره های منظم تری را ایجاد خواهد کرد. این حفره ها به عنوان قالب جهت سنتز نانو سیم ها مورد استفاده قرار گرفت. پس از آماده سازی قالب ها، به روش الکترو انباشت شیمیایی در ولتاژ AC و فرکانس ۵۰ هرتز نانو سیم های کبالت، نیکل و نیکل - کبالت در قالب ها انباشته گردید و سپس از طریق پراش پرتو X از انباشت آن ها اطمینان حاصل شد. جهت آزاد سازی نانوسیم ها باید قالب ها را از بین برد و به همین دلیل از محلول NaOH استفاده کرده و آن ها را آزاد کردیم و توسط دستگاه مغناطومتر خاصیت مغناطیسی آن ها در دمای اتاق مورد بررسی قرار گرفت و سپس نیروی وادارندگی نانو سیم های تولید شده را مورد بررسی قرار دادیم.

فهرست مطالب

| | |
|---|----|
| فصل اول: مقدمه | ۱ |
| ۱-۱- مقدمه ای بر فناوری نانو | ۳ |
| ۲-۱- مقدمه ای بر روش های سنتز نانو ساختار ها | ۳ |
| ۱-۲-۱- لیتوگرافی | ۳ |
| ۲-۲-۱- آلیاژ سازی مکانیکی | ۴ |
| ۳-۲-۱- آندی کردن | ۴ |
| ۴-۲-۱- انباشت الکتروشیمیایی | ۴ |
| ۵-۲-۱- سل ژل | ۵ |
| ۶-۲-۱- رسوب دهی از فاز مایع | ۶ |
| ۷-۲-۱- تغییر شکل پلاستیک شدید | ۶ |
| ۸-۲-۱- روش های حرارتی | ۶ |
| ۹-۲-۱- لایه نشانی | ۷ |
| فصل دوم: معرفی فرآیند آندی کردن و نحوه ی شکل گیری حفره ها | ۹ |
| ۱-۲- تاریخچه | ۱۱ |
| ۲-۲- معرفی آلومینیوم | ۱۲ |
| ۳-۲- معرفی آندی کردن | ۱۳ |
| ۴-۲- کاربرد های آندی کردن | ۱۶ |
| ۱-۴-۲- افزایش مقاومت در مقابل خوردگی | ۱۷ |
| ۲-۴-۲- افزایش قدرت چسبندگی رنگها | ۱۷ |
| ۳-۴-۲- مراحل آبکاری | ۱۷ |
| ۴-۴-۲- ایجاد نمای ظاهری مناسب جهت دکوراسیون و تزئینات | ۱۷ |

- ۱۷-۲-۴-۵- عایق کاری
- ۱۸-۲-۴-۶- کاربرد در صنایع فتوگراف و لیتوگراف
- ۱۸-۲-۴-۷- افزایش قابلیت تابش و انتشار حرارت
- ۱۸-۲-۴-۸- افزایش مقاومت سایشی
- ۱۸-۲-۴-۹- ردیابی و کنترل درزهای سطحی
- ۱۹-۲-۵- انواع لایه های سدی
- ۱۹-۲-۵-۱- لایه ی اکسید سدی
- ۲۰-۲-۵-۲- لایه ی اکسید متخلخل
- ۲۰-۲-۶- روش های تولید لایه ی اکسید متخلخل
- ۲۰-۲-۶-۱- آندی کردن به وسیله ی پیش الگوی راهنما (شابلون)
- ۲۲-۲-۶-۲- آندی کردن خود نظم یافته
- ۲۳-۲-۷- ساختار کلی آلومینای آندی متخلخل
- ۲۵-۲-۸- مکانیزم رشد لایه ی اکسید متخلخل در حضور میدان
- ۲۷-۲-۹- نفوذ آنیون ها
- ۲۹-۲-۱۰- رشد حالت پایای لایه ی اکسید متخلخل در فرآیند آندی کردن خود نظم یافته
- ۳۳-۲-۱۱- ساختار دیواره ی سلول
- ۳۵-۲-۱۲- پارامترهای هندسی مشخصه ی نانوحفره های آلومینای آندی
- ۳۶-۲-۱۲-۱- قطر حفره ها
- ۳۷-۲-۱۲-۲- فاصله ی بین حفره ها
- ۳۸-۲-۱۲-۳- ضخامت دیواره
- ۳۸-۲-۱۲-۴- ضخامت لایه ی سدی
- ۴۰-۲-۱۲-۵- تخلخل
- ۴۱-۲-۱۲-۶- چگالی حفره ها

| | |
|----|--|
| ۴۲ |۷-۱۲-۲- ضخامت لایه اکسیدی |
| ۴۳ |۷-۱۲-۲- انبساط حجم |
| ۴۴ |۱۳-۲- عوامل مؤثر بر پارامترهای هندسی ساختار آلومینای متخلخل |
| ۴۵ |۱-۱۳-۱- پتانسیل اعمالی |
| ۴۶ |۲-۱۳-۲- نوع الکترولیت |
| ۴۶ |۳-۱۳-۲- هم زدن الکترولیت |
| ۴۶ |۴-۱۳-۲- دمای آندی کردن |
| ۴۸ |۵-۱۳-۲- زمان آندی کردن |
| ۴۸ |۱۴-۲- مراحل آندی کردن |
| ۴۸ |۱-۱۴-۲- عملیات قبل از آندی کردن |
| ۵۰ |۲-۱۴-۲- عملیات پس از آندی کردن |
| ۵۱ |۱۵-۲- فرآیند آندی کردن خود نظم یافته |
| ۵۲ |۱-۱۵-۲- آندی کردن تحت چگالی جریان ثابت |
| ۵۲ |۲-۱۵-۲- آندی کردن تحت پتانسیل ثابت |
| ۵۸ |۱۶-۲- کاربرد های نانو حفره های آلومینا |
| ۶۷ |فصل سوم: معرفی الکتروانباشت شیمیایی |
| ۶۹ |۱-۳- انباشت الکتروشیمیایی |
| ۶۹ |۲-۳- اصول کلی انباشت الکتروشیمیایی |
| ۷۰ |۳-۳- پرکردن قالب آلومینای آندیک متخلخل |
| ۷۲ |۱-۳-۳- الکتروانباشت با ولتاژ مستقیم |
| ۷۵ |۴-۳- انباشت بدون باز کردن حفره ها |
| ۷۷ |۱-۴-۳- الکتروانباشت با ولتاژ تناوبی |
| ۷۸ |۲-۴-۳- الکتروانباشت با ولتاژ پالسی |

- ۳-۵- الکتروانباشت آرایه های نانوسیم چندلایه ۷۹
- ۳-۶- الکتروانباشت نانوسیم های نیمه هادی ۸۰
- فصل چهارم: مدل سازی ریاضی فرآیند آندی کردن ۸۳
- ۴-۱- مقدمه ای بر مدل سازی فرآیند رشد نانو حفره های آلومینا ۸۴
- ۴-۲- مدل سازی بر اساس معادله ی لاپلاس ۸۵
- ۴-۳- مدل سازی بر اساس معادله ی پواسون ۹۰
- ۴-۴- مدل سازی بر اساس جریان گرانو اکسیدی ۹۰
- ۵-۱- مقدمه ۹۹
- ۵-۲- منشا مغناطیس مواد ۹۹
- ۵-۳- فازهای مغناطیسی ۱۰۰
- ۵-۳-۱- مواد پارا مغناطیس ۱۰۰
- ۵-۳-۲- مواد فرو مغناطیس ۱۰۱
- ۵-۳-۳- مواد آنتی فرو مغناطیس ۱۰۱
- ۵-۳-۴- مواد فری مغناطیس ۱۰۱
- ۵-۳-۵- مواد دیا مغناطیس ۱۰۱
- ۵-۴- حلقه پسماند ۱۰۲
- ۵-۴-۱- مواد مغناطیسی نرم ۱۰۳
- ۵-۴-۲- مواد مغناطیسی سخت ۱۰۴
- فصل ششم: روش ها و یافته های بدست آمده ۱۰۵
- ۶-۱- ایجاد نانو حفره ۱۰۷
- ۶-۱-۱- مراحل پیش از انجام آندی کردن ۱۰۷
- ۶-۱-۲- حفره های ایجاد شده در اسید اگزالیک ۱۰۸
- ۶-۱-۳- حفره های ایجاد شده در اسید کرومیک ۱۱۴

| | |
|-----|---|
| ۱۱۹ | ۳-۶- الکترو انباشت شیمیایی حفره ها..... |
| ۱۲۰ | ۱-۳-۶- الکترو انباشت شیمیایی درون نانو حفره های ایجاد شده در اسید اگزالیک |
| ۱۲۴ | ۲-۳-۶- الکترو انباشت شیمیایی درون نانو حفره های ایجاد شده در اسید کرومیک |
| ۱۲۶ | ۴-۶- آزاد سازی نانو سیم ها..... |
| ۱۲۷ | ۱-۴-۶- نانو سیم آزاد شده از حفره های ناشی از اسید اگزالیک ۱۲ ساعته |
| ۱۲۹ | ۲-۴-۶- نانو سیم آزاد شده از حفره های ناشی از اسید کرومیک ۱۲ ساعته |
| ۱۲۹ | ۵-۶- خواص مغناطیسی نانو سیم ها |
| ۱۳۳ | فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات |
| ۱۳۳ | ۱-۷- نتیجه گیری |
| ۱۳۷ | ۲-۷- پیشنهادات |
| ۱۳۸ | مراجع..... |

فصل اول:

مقدمه

۱-۱- مقدمه ای بر فناوری نانو

در سال‌های اخیر، بیشتر تلاش محققان برای یافتن و گسترش روش‌های مؤثر و نسبتاً ساده، برای تولید نانوساختارها بوده است. در این راستا، روش‌های تولید نانوساختارهای خود نظم یافته با آرایه‌ی متناوب، به طور ویژه‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. فرآیند آندی کردن^۱، که منجر به تشکیل لایه‌ی اکسید فلزی متخلخل شامل آرایه‌ی منظمی از نانوحفره‌ها می‌شود، یکی از این روش‌هاست. با توجه به کاربردهای فراوان آلومینیوم، پژوهش‌های مربوط به فرآیند آندی کردن بیشتر بر روی این فلز متمرکز بوده است. اکسید آلومینیوم آندی یک ماده‌ی نمونه‌ای کلیدی برای ساخت نانوساختارهایی مانند نانوسیم، نانولوله و ... می‌باشد. فرآیند آندی کردن آلومینیوم که منجر به تشکیل نمونه‌های آلومینای متخلخل می‌شود، نسبتاً آسان بوده و در نهایت آرایه‌ای از نانوحفره‌های موازی با چگالی بالا را نتیجه می‌دهد.

۱-۲- مقدمه ای بر روش‌های سنتز نانو ساختارها

روش‌های متعددی برای تهیه‌ی نانو ساختارها گزارش شده است که در ادامه به بررسی چند روش متداول آن می‌پردازیم.

۱-۲-۱- لیتوگرافی

امروزه با رشد اکثر صنایع از جمله صنعت میکروالکترونیک^۲، ابعاد اجزا در این سیستم‌ها و به خصوص در مدارهای میکروالکترونیک به طور مداوم در حال کوچک شدن است. این پدیده می‌تواند مزایایی از جمله کاهش مصرف مواد اولیه و انرژی، کاهش قیمت تمام شده قطعات و کوچک تر کردن قطعات را شامل شود. همچنین گرایش به کاهش ابعاد، منافع دیگری از جمله افزایش سرعت و بازده قطعات الکترونیکی را نیز به دنبال دارد [۱]. از زمان ساخت مدار مجتمع، تعداد ترانزیستورهای موجود در واحد سطح تراشه‌های نیمه هادی هر ۱۸ ماه دو برابر می‌شود.

¹ Anodize

² Microelectronic

این پیشگویی توسط مور^۱ در دهه ۸۰ میلادی بیان گردید که طی دو دهه اخیر رخ داده است. از این رو صنعت، نیازمند استفاده از روش هایی جهت ساخت قطعات در ابعاد نانو می باشد [۱]. امروزه تلاش های گسترده ای برای پیشرفت روش های ساخت نانو ساختارها^۲ صورت می گیرد. یکی از استراتژی های بالا به پایین در ساخت ابزار نانو، که از روش لیتوگرافی^۳ متداول ایجاد شده است به عنوان نانولیتوگرافی شناخته می شود [۶-۱].

۱-۲-۲- آلیاژ سازی مکانیکی

امروزه آلیاژسازی مکانیکی به روشی متداول جهت ساخت گستره وسیعی از نانوذرات تبدیل شده است. از جمله مزایای این روش می توان به سهولت فرآیند تولید، همراه با تعداد مراحل عملیاتی کم، عدم استفاده از مواد پایدار کننده و حلال های گران قیمت، امکان تولید مقدار زیاد محصول و رعایت مسائل زیست محیطی اشاره نمود. این ویژگی ها باعث شده تا آلیاژسازی به عنوان روشی ممتاز مورد توجه قرار گیرد [۷].

۱-۲-۳- آندی کردن

آندی کردن یک فرآیند الکتروشیمیایی است که بر روی برخی از فلزات قابل اجراست. این فرآیند، بسته به ماهیت الکتروولیت مورد استفاده، منجر به تشکیل دو نوع لایه ی اکسیدی سدی و متخلخل روی سطح فلزات می شود. در حالت کلی، آندی کردن به دو روش انجام می شود: آندی کردن با پیش الگوی راهنما و آندی کردن خود نظم یافته [۷].

۱-۲-۴- انباشت الکتروشیمیایی

در انباشت الکتروشیمیایی از محلول های یونی استفاده می گردد. در این روش که

¹ Moor

² Nanofabrication

³ Lithography

الکتروانباشت نامیده می شود، از طریق یک جریان الکتریکی، لایه ای اصولاً فلزی بر روی سطح نشانده می شود. انباشت یک لایه ی فلزی روی یک جسم، با برقراری بار منفی روی جسمی که لایه نشانی می شود (کاتد) و فرو بردن در محلولی که شامل یک نمک فلز مورد نظر جهت انباشت است، انجام می گیرد. وقتی یون های فلزی با بار مثبت درون محلول به جسم با بار منفی می رسند، جسم الکترون هایی را جهت کاهش بار مثبت یون ها، جهت تشکیل حالت فلزی فراهم می کند [۷].

۱-۲-۵- سل ژل

فرآیند سل-ژل^۱ یک روش شیمیایی تر^۲ برای سنتز انواع نانوساختار ها به ویژه نانوذرات اکسید فلزی می باشد. در این روش پیش ماده مولکولی (معمولاً آلکوکسید فلزی) در آب یا الکل حل شده و با حرارت و همزدن در اثر هیدرولیز/الکلیز به ژل تبدیل می شود. حال باید ژل را خشک کرد که برای محلول الکلی می تواند با سوختن الکل انجام پذیرد. پس از خشک کردن ژل آنرا پودر می کنند و پودر حاصله را جهت کلسینه شدن^۳ حرارت می دهند.

روش سل-ژل روش ارزانی است و به دلیل دمای پایین واکنش می توان کنترل مناسبی بر ترکیب شیمیایی محصولات داشت. سل-ژل می تواند در فرآیند ساخت سرامیک ها به عنوان ماده قالب گیری در قالب استفاده شود یا به عنوان حد واسط فیلم های خیلی نازک از اکسیدهای فلزی برای فرآیندهای مختلف استفاده شود. مواد حاصل از روش تهیه سل-ژل می تواند در کاربردهای متفاوت نوری، الکترونیک، انرژی، سطح، سنسورهای زیستی، دارویی و تکنولوژی جداسازی (مثل کروماتوگرافی به کار برده شود [۷]).

¹ Sol-gel

² Wet Chemical Method

³ Calcination

۱-۲-۶- رسوب دهی از فاز مایع

رسوب دهی فاز مایع به هر فرآیندی که طی آن مواد در حالت مایع یا محلول از طریق تراکم یا واکنش به حالت جامد تبدیل می شوند، اطلاق می گردد. از این فرآیند برای تشکیل پوشش و رسیدن به خواص مختلف رسانایی، گرمایی، نوری، مقاومت در برابر خوردگی و همچنین خواص مکانیکی به کار می رود [۷].

۱-۲-۷- تغییر شکل پلاستیک شدید

روش های تغییر شکل پلاستیک شدید، از جمله روش های تولید مواد نانوساختار است که در دو دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این فرآیندها که با توجه به شکل محصول آن دسته بندی می شوند، در اثر اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید به فلز، باعث تغییرات ریزساختاری در آن شده و ساختار ماده را تا حد نانومتری تغییر می دهند. هنگامی که یک فلز در دماهای نه چندان بالا، تحت تغییر شکل پلاستیک قرار می گیرد، ساختار درونی فلز شروع به مقاومت در برابر تغییر شکل بیشتر می کند؛ در نتیجه برای ادامه تغییر شکل، باید مقدار تنش بیشتری اعمال نمود. به این حالت ایجاد شده در فلز، کار سختی و یا کرنش سختی^۱ گفته می شود. در واقع، کار سختی باعث افزایش استحکام و سختی فلز در اثر تغییر شکل می شود [۸].

۱-۲-۸- روش های حرارتی

تف جوشی یا سینتر یکی از روش های شکل دهی مواد فلزی و سرامیکی است. در این روش ابتدا ماده اولیه، که به صورت پودر است، را پرس کرده و در کوره می گذارند. در دماهای بالای کوره، نفوذ اتمی تشدید شده و اتمهای ذرات مجاور در یکدیگر نفوذ کرده و ذرات را به هم می چسبانند. در نتیجه قطعه حجیم با استحکام مناسب از ذرات پودر بدست می آید. جهت ایجاد پیوند بین ذرات پودری و تهیه یک نمونه یکپارچه و رساندن دانسیته آنها به بالاترین میزان خود و

¹ Work hardening or Strain hardening

بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی، انجام عملیات تف جوشی در دما و زمان بهینه از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردارست. نیروی محرکه برای تفجوشی و نفوذ جهت پرکردن خلل و فرج موجود در ساختار، کاهش انرژی سطحی است. ایجاد پیوند بین ذرات پودری، تغییر ابعاد قطعه در اثر انقباض های ناشی از کاهش اندازه و تعداد حفرات، آزاد شدن تنشهای داخلی، تغییر فاز (مانند تفجوشی حالت مایع) و همچنین انجام واکنشهای شیمیایی وقایعی است که در حین تفجوشی رخ خواهد داد [۷].

۱-۲-۹- لایه نشانی

پوشش دهی یکی از مهمترین بخش های مهندسی سطح است که امروزه با پیشرفت صنعت لایه های نازک و پوشش دهی، این فناوری وارد بخش های گوناگون صنعت شده است که می توان به کاربرد آن در ادوات اپتیکی، میکروالکترونیک، معماری و ساختمان اشاره کرد [۷].

در این پروژه ابتدا حفره ها را به روش آندی کردن ایجاد کرده و سپس جهت پر کردن آن ها و ایجاد نانو سیم ها، از فرآیند الکتروانباشت شیمیایی استفاده کردیم.

فصل دوم:

معرفی فرآیند آندی کردن و نحوه ی
شکل گیری حفره ها

۱-۲ - تاریخچه

فناوری نانو به همراه مهندسی سطح، در راستای تولید نانو ساختارهای متنوع و مواد جدید، اخیراً مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. خصوصاً، تولید ارزان ساختارهای متناوب با تناوب کمتر از ۱۰۰ نانومتر، بخش وسیعی از پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده است. برای تولید نانوساختارها روش‌های مختلفی، مانند لیتوگرافی، آسیاب مکانیکی، پلیمریزاسیون و ... وجود دارد. یکی از رایج‌ترین روش‌ها جهت تولید نانوساختارها، روش لیتوگرافی می‌باشد. علیرغم هزینه‌های بسیار بالای این روش، به دلیل دقت بسیار بالا و تنوع در تولید انواع نانوساختارها و هم‌چنین تنوع در انتخاب زیر لایه، در تولیدات انبوه از آن استفاده می‌شود. اما به توجه به هزینه‌های بالای استفاده از روش لیتوگرافی، محققان در صدد یافتن روشی با همین دقت اما ارزان‌تر برآمدند. در این راستا، روش الکتروشیمیایی یکی از گزینه‌هایی است که هم ارزان‌تر بوده و هم از دقت بالایی برخوردار می‌باشد. در سال‌های اخیر، محققان الکتروشیمی به سمت علم مواد متمایل شده‌اند و در نتیجه موفق به گسترش روش‌های الکتروشیمیایی در راستای تولید مواد الکترونیکی مانند نیمه‌هادی‌ها [۹ و ۱۰]، اکسیدهای فلزی [۱۱]، نیترات‌های فلزی [۱۲] و ... گردیدند. برای آماده‌سازی مواد به روش‌های الکتروشیمیایی، دو رویکرد اصلی کاتدی^۱ و آندی^۲ وجود دارد؛ در رویکرد کاتدی، ماده‌ی مورد نظر به عنوان کاتد قرار می‌گیرد، مانند فرآیند حفاظت کاتدی که برای جلوگیری از خوردگی در سازه‌های فلزی استفاده می‌شود. در رویکرد آندی، نمونه‌ی مورد نظر نقش آند را بازی می‌کند. با استفاده از هرکدام از این دو روش، امکان تولید مواد نانوساختار وجود دارد. یکی از روش‌های الکتروشیمیایی آندی، فرآیند آندی کردن^۳ می‌باشد. آندی کردن یک فرآیند الکتروشیمیایی آندی است که به منظور افزایش ضخامت لایه‌ی اکسیدی که به صورت طبیعی روی سطح فلزات تشکیل می‌شود، به کار می‌رود.

¹Cathodic approach

²Anodic approach

³ Anodization process

آندی کردن برای اولین بار، در سال ۱۹۲۳، در مقیاس صنعتی و برای جلوگیری از خوردگی هواپیماهای دریایی، با استفاده از اسید کرومیک، مورد استفاده قرار گرفت. این فرآیند به سرعت گسترش یافت و برای اولین بار در سال ۱۹۲۷، توسط گوور^۱ و اوبرین^۲، در الکترولیت اسید سولفوریک انجام شد [۱۳]. در سال ۱۹۳۶ آندی کردن در سولفوریک اسید و در جریان متناوب صورت گرفت. در بین سال های ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰ فرآیند فیلم اکسیدی آلومینا توسط یک گروه در منچستر مورد بحث قرار گرفت. در سال ۱۹۹۵ ماسودا و فاکودا نانو حفره های خود نظم یافته در آلومینای آندی را ایجاد کردند. آندی کردن با اسید اگزالیک برای اولین بار در ژاپن و پس از آن، به صورت گسترده، در آلمان، خصوصاً در کاربردهای معماری، مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- معرفی آلومینیوم

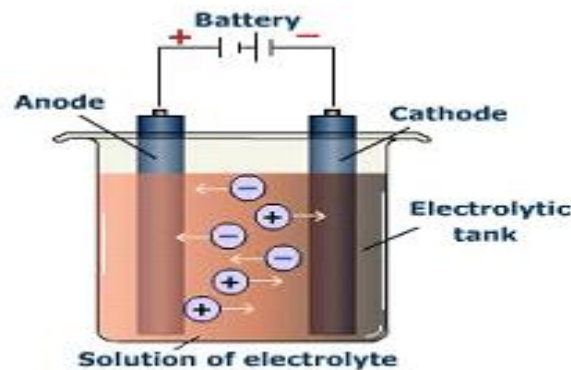
آلومینیوم فلزی است سبک با رنگ سفید متمایل به آبی که بعد از سیلیسیوم فراوان ترین درصد از عناصر پوسته زمین را تشکیل می دهند این فلز را در صنعت با استفاده از روش الکترولیتی از بوکسیت یا آلومین هیدراته ($Al_2O_3 \cdot 2H_2O$) بدست می آورند. قابلیت چشم گیر آلومینیوم در هدایت جریان الکتریکی، درخشندگی، تورق پذیری و نیز استحکام قابل توجه برخی از آلیاژهای آن در مقایسه با فولاد، آن در ردیف پر مصرف ترین فلزات در زمینه های صنعتی، تزئینی و ساختمانی قرار داده است. میل ترکیبی شدید آلومینیوم و آلیاژهای آن با اکسیژن باعث می گردد که در شرایط طبیعی لایه بسیار نازکی از اکسید (Al_2O_3) بر سطح قطعات آلومینیومی تشکیل شود و به مثابه سپری محکم و فساد ناپذیر مابقی فلز را در مقابل عوامل خورنده جوی محافظت نماید. در مصارف صنعتی و تزئینی نیز با استفاده از روشهای شیمیایی و الکترولیتی لایه اکسیدی فوق را با کیفیت های متفاوت بر سطح فلز ایجاد می نمایند که اصطلاحاً به روش اجرائی آن آندایزینگ اطلاق می گردد. این عمل باعث افزایش کیفیت آلومینیوم، گسترش دامنه مصرف و مقاومت بیشتر آن در برابر خوردگی می شود [۱۴].

¹ Gower

² O'Brien

۳-۲- معرفی آندی کردن

فرآیند آندی کردن در یک سلول الکتروشیمیایی انجام می‌شود، در شکل (۱-۲)، تصویر نمادین یک سلول الکتروشیمیایی نمایش داده شده است. سلول الکتروشیمیایی متشکل از سه بخش اصلی کاتد، آند و محلول الکترولیت می‌باشد.



شکل (۱-۲): تصویر نمادین یک سلول الکتروشیمیایی

در آندی کردن، فلز مورد نظر، با درصد خلوص بسیار بالا، به عنوان آند و فلز دیگری، از جمله آلومینیوم، تیتانیوم، پلاتین، پلادیم، نیکل، تنگستن و ... در جایگاه کاتد می‌نشیند و ماهیت الکترولیت نیز، بسته به نوع لایه‌ی اکسیدی و خصوصیات آن (مانند قطر حفره‌ها، فاصله‌ی بین حفره‌ها و ...)، تغییر می‌کند. لایه‌ی اکسید فلز آندی کردن شده، به وسیله‌ی عبور جریان مستقیم از محلول الکترولیت، رشد می‌کند. قطعه‌ی فلز مورد آزمایش، به عنوان آند عمل می‌کند. جریان هیدروژن را در کاتد (الکتروود منفی) و اکسیژن را در سطح آند (الکتروود مثبت) آزاد نموده و منجر به رشد لایه‌ی اکسیدی می‌گردد (شکل ۱-۲). جریان متناوب و جریان پالسی را نیز می‌توان به کار برد، اما به ندرت از آن‌ها استفاده می‌شود. با توجه به جنس فلز و الکترولیت مورد استفاده و هم‌چنین هندسه‌ی ساختار، آندی کردن در ولتاژهای متفاوتی در محدوده‌ی ۱۵ تا ۱۹۵ ولت انجام می‌گیرد [۷ و ۱۵-۲۱]. این فرآیند بر روی فلزاتی مانند تیتانیوم، روی، تنگستن و خصوصاً آلومینیوم انجام می‌گیرد. اما برای آهن و استیل کربن مفید نیست؛ زیرا این فلزات در حین آندی کردن، ورقه