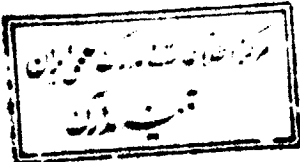


۱۳۷۸ / ۳ / ۲۰



دانشگاه فردوسی مشهد

دانشکده علوم



پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

عنوان:

بررسی اثر شکل‌گیری در قطعات لایه نازک به صورت فلز -
دی الکتریک - فلز

استاد راهنما:

دکتر احمد کمپانی
دانشیار دانشکده علوم

نگارش:

محمدجواد محقق فرد

زمستان ۱۳۷۶

۲۵۳۲۱

تشر

سپاس خداوند بزرگ را که بر بندگان منت نهاد و نعمت آموختن را عطا فرمود .
امیدواریم که در پرتو لطف بی حسابش از عهده شکر او بر آییم .
حال که به یاری حق توفیق یافتم در راه انجام این پایان نامه قدم برداشته و آن را به
پایان برسانم ، بر خود واجب می دانم از استاد گرانقدر ، آقای دکتر احمد کمپانی ، استاد
راهنما ، که در تمام مراحل ، مرا راهنمایی کرده اند ، هرچند که قدردانی از ایشان در این
بیان مختصر میسر نیست ، تشکر نمایم . از آقای دکتر علیرضا زمردیان ، استاد مشاور ، که
از نشاط درون خود به من بخشیدند و همواره مشوق من بودند ، سپاسگزارم . همچنین از
آقای دکتر تجبر به خاطر در اختیار گذاشتن دستگاه پرتو ایکس و آقای دکتر کشمیری به
خاطر استفاده از دستگاه تبخیر و آقایان محقق و پاکزاد ، که در امر استفاده از دستگاه به من
کمک کردند ، از خانم اکبری مسئول دفتر گروه فیزیک نه تنها به واسطه زحمتهایی که از
طرف من متحمل شدند ، بلکه به خاطر زیبایی گفتار و ظرافت رفتارشان تشکر می کنم .
ضمناً مراتب امتنان خود را از مسئولین محترم مؤسسه تحقیقاتی پرتا ووس وابسته به
شرکت لعاب مشهد و آقای معین درباری مسئول میکروسکوپ الکترونی و خانم پسیان
ابراز می دارم . در پایان از همسرم که در کارهای پایان نامه مرا یاری کردند قدردانی
می نمایم .

محقق

بهار ۱۳۷۷

۲۵۳۲۱

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	چکیده
فصل اول - لایه‌های نازک	
۴	۱-۱- مقدمه
۶	۲-۱- فرآیند رشد لایه‌های نازک
۹	۳-۱- بعضی جنبه‌های مربوط به ساختار فیزیکی لایه‌ها
۱۶	۴-۱- روشهای ساخت لایه‌های نازک
۱۷	۵-۱- روشهای فیزیکی ساخت لایه‌های نازک
۱۷	۱-۵-۱- روش تبخیر حرارتی
۲۶	۲-۵-۱- تهیه لایه‌های نازک به روش پراکنش
۲۹	۶-۱- تهیه لایه‌های نازک به روش شیمیایی
۲۹	۷-۱- روشهای اندازه‌گیری ضخامت لایه‌های نازک
۳۰	۱-۷-۱- استفاده از بلور کوارتز
۳۲	۲-۷-۱- روش مکانیکی استایلوس
۳۲	۳-۷-۱- روش گرانی سنجی
۳۲	۴-۷-۱- اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی
۳۳	۵-۷-۱- اندازه‌گیری ظرفیت
۳۴	۶-۷-۱- روشهای اپتیکی
۳۶	۸-۱- تعیین ترکیب شیمیایی و ساختار لایه‌های نازک
۳۹	۱-۸-۱- میکروسکوپ الکترونی تراگسیلی

صفحه	عنوان
------	-------

۴۰	۲-۸-۱ میکروسکوپ الکترونی روبشی
۴۱	۳-۸-۱ تفرق الکترونیهای با انرژی بالا
۴۲	۴-۸-۱ تفرق الکترونیهای با انرژی کم
۴۳	۵-۸-۱ روش استفاده از تفرق پرتو X

فصل دوم - رسانایی الکتریکی در دی الکتریکهای به صورت

لایه نازک قبل از شکل گیری الکتریکی

۴۵	۱-۲ ساختار نواری انرژی در جامدات بی شکل
۴۸	۲-۲ اتصالات فلز - عایق
۵۳	۳-۲ سازو کارهای رسانش الکتریکی (جریان مستقیم) در لایه‌های نازک
۵۵	۱-۳-۲ گسیل شاتکی
۵۶	۲-۳-۲ اثر پول - فرنکل
۵۸	۳-۳-۲ اثر تونل
۵۹	۴-۳-۲ رسانایی توسط ناخالصی
۶۰	۵-۳-۲ رسانش یونی
۶۱	۶-۳-۲ ساز و کار محدودیت جریان توسط بارهای فضایی

فصل سوم - شکل گیری الکتریکی در قطعات MIM و پدیده‌های مربوط به آن

۶۶	۱-۳ فرآیند شکل گیری الکتریکی
۶۸	۲-۳ ویژگیهای قطعات شکل یافته
۶۸	۱-۲-۳ مقاومت منفی
۶۹	۲-۲-۳ گسیل الکترون

۷۰	الکترو لومینسانس	۳-۲-۳
۷۱	اثرهای حافظه	۴-۲-۳
	مدل‌های مربوط به فرآیند شکل‌گیری و سازوکارهای	۳-۳
۷۲	رسانش در قطعه‌های شکل یافته	
۷۲	مدل Hickmott	۱-۳-۳
۷۵	مدل وردربر، سیمونز و الز	۲-۳-۳
۸۲	مدل گرین، بوش و راولینگر	۳-۳-۳
۸۴	مدل باریاک، پینارد و داوین	۴-۳-۳
۸۸	مدل درنالی، مورگان و استونهم	۵-۳-۳
۹۳	مقاومت منفی جریان کنترل شده و کلیدزنی	۴-۳

فصل چهارم - کارهای عملی و نتایج

۹۹	مقدمه	۱-۴
۹۹	ساخت و تهیه نمونه‌ها	۲-۴
۹۹	دستگاه تبخیر	۱-۲-۴
۱۰۶	بستر	۲-۲-۴
۱۰۹	لایه نشانی	۳-۲-۴
۱۱۵	اندازه‌گیری ضخامت لایه‌ها	۴-۲-۴
۱۱۷	اتصالات و مدار مورد استفاده	۳-۴
۱۲۰	بررسی و رسم نمودار جریان - ولتاژ (I-V) در خلاء	۴-۴
۱۲۴	شکل‌گیری الکتریکی، مقاومت منفی و پدیده کلیدزنی	۱-۴-۴
۱۲۹	بررسی و رسم نمودار I-V در هوا	۵-۴

صفحه	عنوان
۱۲۹	۴-۵-۱- شکل‌گیری الکتریکی، مقاومت منفی وکلیدزنی
	۴-۴- بررسی سطح نمونه توسط عکس‌برداری با میکروسکوپ
۱۳۲	الکترونی روبشی S.E.M
۱۳۶	۴-۷- پراش پرتوهای X از سطح لایه نازک دی‌الکتریک
۱۳۶	۴-۸- بحث و نتیجه‌گیری

چکیده

قطعاتی لایه نازک به شکل Cu-SiO-Cu و Ag-SiO-Ag با استفاده از روش تبخیر حرارتی در خلأ (در حدود 10^{-5} تور) بر روی بسترهای شیشه‌ای از نوع کرنینگ ساخته شدند. ضخامت لایه دی الکتریک در این قطعات بین ۱۰۰۰ تا ۴۵۰۰ و الکترودها از ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ آنگستروم متغیر بود. پرتونگاری ایکس از لایه دی الکتریک نشان می‌دهد که ساختار این لایه‌ها به صورت بی‌شکل (amorphous) است.

مشخصه جریان - ولتاژ نمونه‌های با الکترودهای نقره در خلأ و در فشار کمتر از 10^{-5} تور بررسی شد. شکل‌گیری الکتریکی در این قطعات، که فرآیندی وابسته به زمان است، در ولتاژ ۲ تا ۴ ولت صورت می‌پذیرد. پس از این مرحله پدیده مقاومت منفی و کلیدزنی از نوع حافظه در نمونه‌های شکل‌یافته مشاهده گردید. قطعات با الکترودهای مس در هوا مورد مطالعه قرار گرفتند. این نمونه‌ها نیز پس از شکل‌گیری، هر دو پدیده مقاومت منفی و کلیدزنی را نشان می‌دادند.

با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (S.E.M) سطح الکتروود بالایی نمونه‌ها بررسی

شدند. مطالعه نواحی محلی تغییر شکل یافته در قطعاتی که مرحله شکل‌گیری الکتریکی، مقاومت منفی و پدیده کلیدزنی در آنها مشاهده شده بود و نیز مشخصه جریان - ولتاژ نشان می‌دهد که از بین نظریه‌های مختلفی که در توجیه این پدیده‌ها در ساختارهای MIM ارائه شده است، نظریه رشته‌ای که بر پایه ایجاد رشته‌های رسانای فلزی در عرض لایه دی الکتریک (در طول فرآیند شکل‌گیری الکتریکی) استوار است با نتایج ما در توافق بیشتری است.

فصل اول

آیه‌های نازی

لایه‌های نازک

۱-۱) مقدمه

استفاده از ورقه‌های نازک فلزی به منظور حفاظت و تزئین، از قدیم مورد توجه انسان قرار داشته است. تهیه این ورقه‌ها در ابتدا با استفاده از چکش کاری بعضی از فلزات و بعد به روش آبکاری معمول بوده است.

احتمالاً اولین لایه نازک به روش «الکترولیز» در سال ۱۸۳۸ ساخته شد. در سال ۱۸۵۲ بانسن (Bunson) و گروو (Grove) توانستند به ترتیب با استفاده از روش «واکنش شیمیایی»^(۱) و «پراکنش توسط تخلیه الکتریکی»^(۲) لایه‌های نازکی از فلزات را تهیه نمایند. در سال ۱۸۵۸، مایکل فارادی (M. Faraday) با گذراندن جریان الکتریسیته زیاد از یک سیم فلزی و تبخیر آن توانست لایه نازک فلزی به دست آورد (روش تبخیر حرارتی)^(۳)، این عمل در محیط گازی بی‌اثر انجام شد.

لایه‌های نازک اولیه بیشتر برای استفاده از خواص نوری آنها ساخته می‌شدند. امروزه بسیاری از قطعات مدرن و پیچیده نوری و الکترونیکی به صورت لایه نازک ساخته می‌شوند. یک ماده جامد زمانی به شکل لایه نازک (ساختار دوبعدی) درمی‌آید که اتمها، مولکولها و یا یونهای ماده مذکور در طی یک فرآیند فیزیکی یا شیمیایی کاملاً کنترل شده بر روی یک بستر^(۴) نشانده شوند. نظر به اینکه در تهیه لایه نازک از یک ماده می‌توان از فاز بخار اتمها، مولکولها و یا یونهای ماده و یا از فاز مایع آنها استفاده نمود، لذا روش نهشتن^(۵) آنها بر روی بستر می‌تواند به یکی از دو حالت کلی زیر انجام گیرد:

۱) نهشتن در فاز بخار (Vapour phase deposition)

(۱) Chemical Reaction

(۲) Glow Discharge Sputtering

(۳) Thermal Evaporation

(۴) Substrate

(۵) Deposition

۴) نهشتن در فاز مایع (Liquid-phase/Solution deposition)

باید به این نکته توجه داشت که تنها ضخامت کم لایه‌های نازک نیست که به آنها خواص ویژه و متمایز می‌دهد، بلکه ریز ساختار آنها که در طول تهیه لایه شکل می‌گیرد از اهمیت بیشتری برخوردار است.

لایه‌هایی که مستقیماً با پاشیدن مواد و یا نشانیدن خمیری از ماده بر روی بستر، پس از خشک شدن شکل می‌گیرند (صرف نظر از ضخامت آنها) یک لایه نازک به حساب نمی‌آیند، بلکه لایه‌های ضخیم^(۶) نامیده می‌شوند که خواص آنها با خواص لایه نازک همان ماده متفاوت است. خواص لایه نازک از ماده کلاً با خواص همان ماده به شکل توده^(۷) یکسان نیست، زیرا در یک لایه نازک:

الف) ضخامت آن خیلی کم است

ب) نسبت سطح به حجم آن خیلی زیاد است

ج) دارای ساختار فیزیکی ویژه‌ای است که مستقیماً مربوط به فرآیند رشد لایه می‌باشد.

بعضی از پدیده‌ها که مربوط به ضخامت کم لایه‌های نازک می‌شوند عبارتند از: تداخل نوری^(۸)، تونل زنی الکترونی^(۹) در لایه‌های عایق، مقاومت ویژه بالا و پایین بودن ضریب حرارتی مقاومت، ازدیاد میدان مغناطیسی آستانه و دمای بحرانی^(۱۰) اثر جوزفسون^(۱۱) و مغناطش سطحی^(۱۲). بالا بودن نسبت سطح به حجم لایه‌های نازک که مربوط به ضخامت کم آنها است و نیز ریز ساختار آنها پدیده‌های دیگری را از قبیل، جذب سطحی گازها^(۱۳)، پنخس^(۱۴) و فعالیت واسطه‌ای^(۱۵) را ایجاد می‌کند.

(۶) *Thick Films*

(۷) *Bulk*

(۸) *Optical Interference*

(۹) *Electronic Tunneling*

(۱۰) *Critical Temperature*

(۱۱) *Josephson Effect*

(۱۲) *Planar Magnetization*

(۱۳) *Gas Adsorption*

(۱۴) *Diffusion*

(۱۵) *Catalytic Activity*

۲-۱) فرآیند رشد لایه‌های نازک

هر فرآیند مربوط به نهشتن لایه نازک شامل سه مرحله اصلی است :

الف) تبدیل ماده به صورت ذرات اتم، مولکول و یا یون مناسب

ب) انتقال آنها از منبع تولید تا بستر در داخل یک محیط مناسب

ج) چگالش این ذرات بر روی بستر و ایجاد لایه‌ای به صورت جامد

شکل‌گیری یک لایه نازک با فرآیندهای هسته‌سازی و رشد^(۱۶) انجام می‌گیرد. تصویر کلی مرحله به مرحله فرآیند رشد که از مطالعات تجربی و نظری مختلف حاصل شده است می‌تواند به صورت زیر خلاصه شود :

۱) اتمها، مولکولها و یا یونها در برخورد با بستر مؤلفه عمودی سرعت خود را از دست می‌دهند (به شرطی که انرژی آنها در موقع برخورد با بستر زیاد نباشد) و بطور فیزیکی جذب سطح بستر می‌شوند.

۲) گونه‌های جذب شده (اتمها، مولکولها و یا یونها) در ابتدا با بستر در تعادل گرمایی^(۱۷) نبوده، در سطح بستر حرکت و بایکدیگر بر هم کنش می‌کنند و در نتیجه خوشه‌هایی^(۱۸) از آنها در سطح بستر تشکیل می‌شود.

۳) این خوشه‌ها که هسته^(۱۹) نیز نامیده می‌شوند از نظر ترمودینامیکی ناپایدارند و تمایل به حل شدن (شکسته شدن) دارند. زمان این عمل بستگی به پارامترهای نهشتن دارد. اگر این پارامترها به صورتی باشند که یک خوشه قبل از اینکه منفک شود با گونه‌های دیگر جذب شده به بستر برخورد کند، اندازه آن بزرگتر خواهد شد. زمانی که اندازه یک خوشه به یک مقدار آستانه برسد، از نظر ترمودینامیکی پایدار شده و گفته می‌شود که بر سد هسته‌سازی^(۲۰) فائق شده است. این مرحله که شکل‌گیری هسته‌های پایدار با

(۱۶) *Nu. and Gr. processes*(۱۷) *Thermal Equilibrium*(۱۸) *Cluster*(۱۹) *Nuclei*(۲۰) *Nucleation Barrier*

اندازه‌های آستانه می‌باشد مرحله هسته‌سازی نامیده می‌شود.

(۴) تعداد و اندازه هسته‌ها (خوشه‌ها) به تدریج رشد می‌یابند تا آنکه به یک وضعیت اشباع برسند. چگالی هسته‌ها و اندازه متوسط هر کدام به چندین پارامتر بستگی دارد، از قبیل: انرژی ذرات در موقع برخورد با بستر، تعداد ذراتی که در واحد زمان به واحد سطح بستر برخورد می‌کنند و انرژیهای مربوط به جذب سطحی و تفکیک پذیری. پارامترهای دیگری نیز مانند دما، ساختار و طبیعت شیمیایی بستر در این امر مؤثرند. یک هسته می‌تواند هم منطبق بر سطح بستر به وسیله پخش سطحی گونه‌های جذب شده و هم در راستای عمود بر بستر با برخورد مستقیم گونه‌ها رشد نماید. عموماً میزان رشد هسته‌ها در راستای منطبق بر سطح به مراتب از میزان رشد عمودی آنها بیشتر است. هسته‌های رشد یافته را جزیره^(۲۱) گویند.

(۵) مرحله بعدی در شکل‌گیری یک لایه مرحله انعقاد یابه هم آمیختگی^(۲۲) است. در این مرحله جزیره‌های کوچک به یکدیگر متصل شده (در هم آمیخته می‌شوند) که در نتیجه سطح تماس گونه‌ها با بستر کاهش می‌یابد. این تمایل در ایجاد جزیره‌های بزرگتر را مرحله به هم‌پیوستگی^(۲۳) نامند که این عمل با افزایش پویایی سطحی^(۲۴) گونه‌های جذب شده تسریع می‌یابد. بالا بردن دمای بستر باعث افزایش پویایی گونه‌ها می‌شود. (۶) جزیره‌های بزرگتر با هم رشد می‌کنند و حفره‌ها و کانالهایی را بر روی بستر ایجاد می‌نمایند. در این مرحله ساختار لایه عوض شده و از حالت جزیره‌ای ناپیوسته به نوع شبکه‌ای متخلخل در می‌آید. چنانچه در ادامه فرآیند این کانالها و حفره‌ها پر شوند یک لایه کاملاً پیوسته شکل خواهد گرفت.

فرآیند رشد یک لایه می‌تواند به صورت یک فرآیند آماری مداوم متشکل از: هسته‌سازی، پخش سطحی کنترل شده سه بعدی هسته‌ها و تشکیل جزیره‌های بزرگتر، شکل‌گیری ساختار

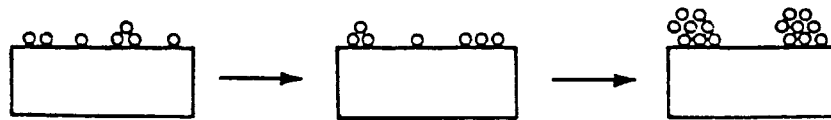
(۲۱) *Island*

(۲۲) *Coalescence*

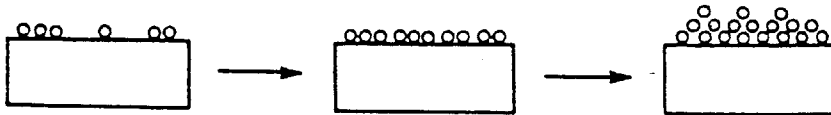
(۲۳) *Agglomeration*

(۲۴) *Surface Mobility*

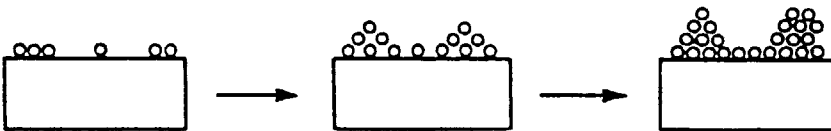
مشبک و بدنبال آن عمل پر شدن حفره‌ها و کانالها خلاصه شود. با توجه به تأثیر پارامترهای ترمودینامیکی نهشتن و سطح بستر، هسته‌سازی اولیه و مراحل رشد می‌تواند به یکی از صورتهای زیر انجام گیرد. (شکل ۱-۱)



الف) *Island*



ب) *Layer*



ج) *Stranski - Krastanov*

شکل (۱-۱)

(Island-type)

الف) نوع جزیره‌ای

(Layer-type)

ب) نوع لایه‌ای

(Stranski-Krastanov-type)

ج) نوع استرانسکی - کراستانف

معمولاً لایه‌های نازک تهیه شده از اغلب مواد، ساختار بلوری مشابه با ساختار بلوری ماده به صورت توده دارد، با وجود این، تجربه‌ها و آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهند که اندازه و سمت‌گیری بلوری در حالت لایه به طور قابل ملاحظه‌ای با حالت توده تفاوت دارد. بسته به شرایط موجود در طول نهشتن و نیز انتخاب بستر، نظم ساختار اتمی لایه‌ها می‌تواند از یک حالت کاملاً بی‌نظم^(۲۵) تا حالت‌های کاملاً منظم^(۲۶) (رشد برآراسته بر روی یک بستر تک بلور) متغیر باشد. ثابت شبکه^(۲۷) در یک لایه ضخیم معمولاً معادل همان مقدار در حالت توده ماده است، ولی در لایه‌های بسیار نازک بعضی از مواد، مشخص شده است که اندازه ثابت شبکه با حالت توده تفاوت دارد. مثلاً در مورد لایه‌های مربوط به نمک‌های قلیایی، دیده شده که ثابت شبکه کاهش پیدا کرده است. در لایه نازک MgO که به روش تبخیر حرارتی در خلاء تهیه شده است افزایش در ثابت شبکه دیده می‌شود.

علاوه بر وجود مرزهای بلوری و ناکاملیهایی از نوع نقطه‌ای و خطی در لایه‌های نازک که قبلاً به آن اشاره شد، در لایه‌هایی که به صورت برآراسته ساخته می‌شوند ناکاملیهایی دیگری از قبیل: خطوط جابجائی^(۲۸)، روی هم‌چینی نادرست^(۲۹) و ... نیز ممکن است وجود داشته باشد.

۳-۱) بعضی جنبه‌های مربوط به ساختار فیزیکی لایه‌ها

عمده خواص فیزیکی لایه‌های نازک که در کاربرد عملی آنها ظاهر می‌شود به طور قابل ملاحظه‌ای به چگونگی ساختار آنها وابسته است. در اینجا بعضی از جنبه‌هایی را که از نظر ساختار لایه‌ها مهم هستند بررسی می‌کنیم:

(۲۵) *Highly Disordered = Amorphous Like*(۲۶) *Well Ordered*(۲۷) *Lattice Constant*(۲۸) *Dislocation Lines*(۲۹) *Stacking Fault*