

## اندازه‌گیری پویش آزاد میانگین الکترون در لایه‌های نازک Ni و چند لایه‌ایهای نازک Ni/Cu از طریق مطالعه بستگی مقاومت الکتریکی به ضخامت لایه‌ها

غلامرضا نبیونی

گروه فیزیک دانشگاه اراک

پست الکترونیکی: g-nabiyouni@araku.ac.ir

(دریافت مقاله: ۸۴/۱۲/۷ ؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۶/۸/۱)

### چکیده

در این کار ضمن ارائه یک مدل ریاضی برای محاسبه مقاومت ویژه لایه‌های نازک، تغییرات مقاومت الکتریکی ویژه بر حسب ضخامت برای تک لایه‌ایهای نازک Ni و چند لایه‌ایهای نازک Ni/Cu مورد مطالعه قرار گرفت. لایه‌ها به روش الکتروانباشت<sup>۱</sup> از یک محلول الکترولیت شامل یونهای Ni و Cu رشد یافتند. ضخامت لایه‌ها از ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ نانومتر تغییر داده شد. نقش پراش پرتو ایکس (XRD) تعدادی از لایه‌های نازک Ni/Cu بیانگر ساختار چندلایه‌ای و پیروی آنها از ساختار ترجیحی زیر لایه خود است. از مطالعات اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی ویژه، پویش آزاد میانگین برای لایه‌های نازک Ni و Ni/Cu محاسبه گردید.

واژه‌های کلیدی: پویش آزاد میانگین، چند لایه‌ایهای نازک، مقاومت ویژه

### ۱. مقدمه

معادله بولتزمن یک رهیافت نیمه کلاسیکی برای محاسبه رسانایی الکتریکی مواد است، که در آن میدان الکتریکی  $\mathcal{E}$  آنقدر کوچک فرض می‌شود که پاسخ آن به چگالی جریان  $j$  خطی باشد ( $j = \sigma \mathcal{E}$  که رسانایی الکتریکی است) [۱ و ۲]. اگر طول موج الکترون در مقایسه با پویش آزاد میانگین کوچک باشد، اندازه حرکت، یک کمیت خوش تعریف است و الکترون در فاصله بین دو برخورد متوالی همچون یک موج تخت ظاهر می‌شود. در چنین حالتی شرط  $k_F \lambda \gg 1$  برقرار است و الکترون به صورت یک ذره نیمه کلاسیکی در نظر گرفته می‌شود [۳].  $k_F$  بردار موج فرمی و  $\lambda$  پویش آزاد میانگین الکترون است.

در حالت تعادل توزیع الکترونها با تابع توزیع فرمی-دیراک

که به صورت زیر است، توصیف می‌شود:

$$f_0(k) = \frac{1}{\exp[(E(k) - E_F)/k_B T] + 1} \quad (1)$$

در حضور یک میدان الکتریکی، توزیع الکترونها به اندازه  $g(k)$  از حالت تعادل منحرف می‌شود به طوری که  $f(k) = f_0(k) + g(k)$  در شرایط حالت پایا، جریان و رسانایی را می‌توان با میانگین‌گیری از سرعت الکترون و با استفاده از تابع توزیع به دست آورد.

$$j_x = \sigma \mathcal{E} = \frac{e \int v_x f(v) dv}{\int f(v) dv} = \frac{e \int v_x g(v) dv}{\int f(v) dv}, \quad (2)$$

که  $v = \hbar \frac{k}{m}$  است. انتگرال شامل  $f_0$  مساوی صفر می‌شود زیرا این تابع توزیع، حالت تعادل را توصیف می‌کند که هیچ‌گونه شارش خالص الکترونی وجود ندارد.

۱. Electrodeposition

با جایگذاری این رابطه در معادله (۲) خواهیم داشت:

$$\sigma = -\frac{e^2}{4\pi^2} \int v \tau \frac{df_0}{dE} dk. \quad (8)$$

این انتگرال روی بردار  $k$  گرفته می‌شود. مقادیر ثابت، نشان دهندهٔ هنجار بودن انتگرال  $f$  در مخرج معادلهٔ مربوط به  $j_x$  می‌باشد. در مدل الکترون آزاد این انتگرال را می‌توان به انتگرالی که روی بزرگی  $k$  (و همین‌طور  $k^2$  که با انرژی متناسب است) گرفته می‌شود تبدیل کرد. این کار با معرفی ضریب  $df_0/dE$  صورت می‌گیرد. در صفر مطلق،  $f_0$  یک تابع پله‌ای است که پایین‌تر از  $E_F$  مساوی یک، و بالاتر از آن مساوی صفر است. این تابع همان تابع دلتای دیراک است؛ بنابراین از انتگرال‌گیری روی انرژی سطح فرمی به دست می‌آید و آنچه باقی می‌ماند یک انتگرال ساده روی کرهٔ فرمی است.

$$\sigma = \frac{e^2}{12\pi^3 \hbar} \oint v(k) \tau(k) ds, \quad (9)$$

که در اینجا به صراحت بستگی سرعت و زمان واهلش به  $k$  نشان داده شده است. انتگرال روی سطح فرمی گرفته می‌شود به طوری که:

$$\oint ds = 4\pi k_f \quad (10)$$

با ساده سازی بیشتر به رابطهٔ زیر می‌رسیم:

$$\sigma = \frac{e^2}{12\pi^3 \hbar} \langle \lambda \rangle S_F, \quad (11)$$

این رابطه برای بررسی مواردی مفید است که سطح فرمی یک کرهٔ ساده نیست (برای مثال می‌توان از Cu نام برد).  $\langle \lambda \rangle$  مقدار متوسط پویش آزاد میانگین روی کرهٔ فرمی و  $S_F$  مساحت سطح فرمی است. می‌توان نشان داد که این رابطه شبیه فرمول درود در رسانایی است.

## ۲. محاسبهٔ مقاومت الکتریکی ویژهٔ لایه‌های نازک

در این روش چهار سوزن مانند شکل ۱ با آرایش خطی روی نمونه قرار می‌گیرند. یک جریان الکتریکی ثابت بین دو سوزن ۱ و ۴ (نقاط بیرونی) جریان می‌یابد و اختلاف پتانسیل بین نقاط ۲ و ۳ (نقاط داخلی) اندازه‌گیری می‌شود [۵]. چشمهٔ جریان به عنوان یک چشمهٔ نامتناهی منجر به

در اثر اعمال میدان الکتریکی، تابع فرمی و کرهٔ فرمی نسبت به میدان جابه‌جا می‌شوند. حال مسئلهٔ محاسبهٔ رسانایی الکتریکی به محاسبهٔ تابع توزیع  $f$  تحویل می‌گردد. زیرا در واقع  $f_0$  معلوم است و  $g$  باید محاسبه گردد. این کار را می‌توان با استفاده از معادلهٔ بولتزمن انجام داد.

ساده‌ترین حالت معادلهٔ بولتزمن بیان شرایط حالت پایاست

که تابع توزیع بر حسب زمان تغییر نمی‌کند [۴].

$$\frac{df}{dt} = \frac{df}{dt} \Big|_{field} + \frac{df}{dt} \Big|_{scattering} = 0, \quad (3)$$

اولین جمله بیان می‌کند که وقتی الکترون توسط یک میدان الکتریکی شتاب می‌گیرد، تابع  $f$  از وضعیت تعادل خارج می‌شود. دومین جمله، واهلش تابع  $f$  و بازگشت آن به حالت تعادل در اثر فرآیند پراکندگی را توصیف می‌کند.

حال نشان می‌دهیم چگونه می‌توان از این بیان ساده برای محاسبهٔ رسانایی الکتریکی در سیستم‌های ساده‌ای که از مدل الکترون آزاد پیروی می‌کنند و همین‌طور در لایه‌های نازک استفاده کرد.

ابتدا از حالت سادهٔ الکترون آزاد استفاده می‌کنیم:

$$\frac{df}{dt} \Big|_{field} = \frac{df}{dk_x} \frac{dk_x}{dt} = \frac{df_0}{dk_x} \frac{eE}{\hbar}, \quad (4)$$

از  $dk/dt$  از آهنگ تغییر اندازه حرکت یا نیروی شتاب دهندهٔ الکترونها که مربوط به میدان الکتریکی  $E$  است ناشی می‌شود. برای این که فقط صورت خطی  $E$  را حفظ کنیم، فقط مشتق  $f_0$  را نگه داشته‌ایم. حال با استفاده از رابطهٔ الکترون آزاد یعنی  $E = \hbar^2 k^2 / 2m$  مشتق نسبت به  $k$  را به مشتق نسبت به  $E$  تبدیل می‌کنیم.

$$\frac{df}{dt} \Big|_{field} = -\frac{df_0}{dE} v_x eE. \quad (5)$$

جملهٔ مربوط به پراکندگی معمولاً با در نظر گرفتن تقریب زمان واهلش به دست می‌آید. در این تقریب فرض می‌شود  $g$  به طور نمایی با زمان واهلش  $\tau$  به صفر می‌رسد.

$$\frac{df}{dt} \Big|_{scattering} = \frac{dg}{dt} \Big|_{scattering} = \frac{g}{\tau}, \quad (6)$$

به طوری که:

$$g = -\frac{df_0}{dt} v_x eE \tau. \quad (7)$$

جدول ۱. ضریب تصحیح مقاومت برای لایه‌های نازک با ابعاد مختلف.

$\frac{d}{s}$	$\frac{a}{d} = 1$	$\frac{a}{d} = 2$	$\frac{a}{d} = 3$	$\frac{a}{d} \geq 4$
۱	-	-	۰/۹۹۸۸	۰/۹۹۴۰
۱/۵	-	-	۱/۴۸۹۳	۱/۴۸۹۳
۳	۲/۷۰۰۰	۲/۷۰۰۳	۲/۷۰۰۵	۲/۷۰۰۵
$\infty$	۴/۵۲۲۴	۴/۵۳۲۴	۴/۵۳۲۴	۴/۵۳۲۴

جدول ۱ آمده است.

در استنتاج روابط فوق فرض کردیم سیستم همسانگرد است و بنابراین تابع توزیع بستگی خاصی ندارد. ولی اگر نمونه یک لایه نازک یا یک چند لایه‌ای نازک باشد، سیستم لااقل در یک بعد ناهمسانگرد است. برای یک لایه نازک،  $f$  در سطح فرمی صفر می‌شود. به کمک مدل ساندیهیمر [۶] می‌توان معادله بولتزمن را مجدداً استنتاج و مقدار  $g$  را تعیین کرد که در این حالت معادله، بستگی خاص به  $g$  دارد.

فرض می‌کنیم میدان الکتریکی در امتداد محور  $x$  ها، و محور  $z$  ها عمود بر صفحه لایه نازک باشد. معادله بولتزمن به شکلی که در معادله (۷) آمده است، به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{g}{\tau} = -\frac{df_0}{dE} v_x e \mathcal{E} + \frac{\hbar k_z}{m} \frac{\partial g}{\partial z}, \quad (16)$$

که حل آن به شکل زیر است:

$$g(k, z) = v_x e \mathcal{E} \frac{df_0}{dE} \left[ 1 + \exp\left(-\frac{mz}{\hbar \tau k_z}\right) \right], \quad (17)$$

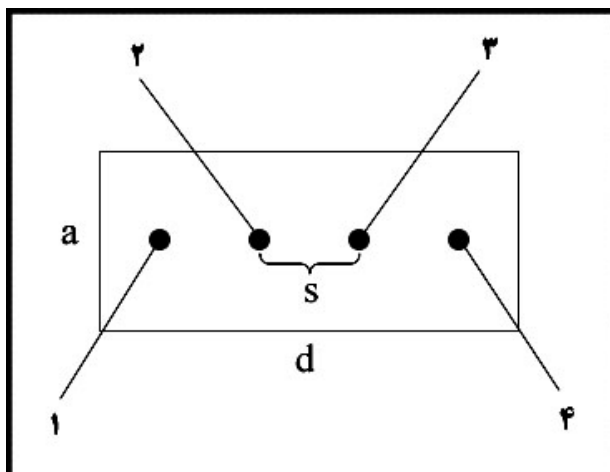
و برای محاسبه رسانایی، معادله (۹) به صورت زیر در می‌آید:

$$\sigma = \frac{e^2}{4\pi^3 \hbar} \int v(k) \tau(k) \frac{df_0}{dE} \left[ 1 + \exp\left(-\frac{mz}{\hbar \tau k_z}\right) \right] dz dk. \quad (18)$$

جزئیات محاسبه انتگرال فوق در مرجع [۶] آمده است. برای یک لایه نازک که در شرایط مرزی  $z = t$  و  $z = 0$  مقدار تابع  $g(z)$  مساوی صفر می‌شود و معادله فوق به صورت ساده زیر در می‌آید:

$$\frac{\rho}{\rho_B} = \left[ 1 + \frac{3\lambda}{4t} \right], \quad (19)$$

$t$  ضخامت لایه نازک است که از پویش آزاد میانگین بزرگتر



شکل ۱. آرایه چهار سوزنی برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی لایه‌های نازک.

یک پتانسیل لگاریتمی می‌شود.

$$\varphi - \varphi_0 = -\frac{IR_s}{2\pi} \ln r, \quad (12)$$

که  $\varphi$  پتانسیل،  $\varphi_0$  پتانسیل مرجع،  $R_s$  مقاومت سطحی (مقاومت در امتداد صفحه) و  $r$  فاصله از چشمه جریان است. پتانسیل برای یک دو قطبی جریان (یک چشمه + و یک چشمه -) در یک صفحه نامتناهی چنین است:

$$\varphi - \varphi_0 = -\frac{I\rho_s}{2\pi} \ln \frac{r_1}{r_2}, \quad (13)$$

$r_1$  و  $r_2$  به ترتیب فاصله از چشمه + و - هستند. در مورد یک آرایه چهار سوزنی با فواصل مساوی که روی یک صفحه نامتناهی قرار دارد، اختلاف پتانسیل بین سوزنهای داخلی و خارجی مساوی خواهد شد با:

$$V = \Delta\varphi = -\frac{IR_s}{\pi} \ln 2, \quad (14)$$

$$R_s = \frac{4}{532} \frac{V}{I}. \quad (15)$$

از آنجا که نمونه مورد مطالعه ما ابعاد متناهی دارد باید یک ضریب تصحیح  $C$  که به مقادیر  $a$  و  $d$  و  $s$  بستگی دارد را به صورت زیر در محاسبه مقاومت سطحی وارد کرد:  $a$  و  $d$  طول و عرض لایه نازک و  $s$  فاصله بین سوزنها است.

$$R_s = \frac{V}{I} C\left(\frac{a}{d}, \frac{d}{s}\right)$$

مقادیر ضریب تصحیح برای تعدادی ابعاد هندسی مختلف در

باشد برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی می‌توان از روش ون در پائو [۹] استفاده کرد. در این روش چهار سوزن به چهار نقطه از لبه‌های نمونه اتصال می‌یابد. از دو نقطه مجاور آن جریان ثابتی عبور می‌کند و اختلاف پتانسیل دو نقطه دیگر اندازه‌گیری می‌شود. مقاومت الکتریکی ون در پائو به صورت نسبت اختلاف پتانسیل به شدت جریان تعریف می‌شود. در هر دو صورت مقاومت نقاط تماس از عواملی است که ممکن است باعث ایجاد نوفه جریان شود. اگر مقاومت الکتریکی نقاط تماس یک مرتبه بزرگی بیشتر از مقاومت الکتریکی نمونه باشد، بعید است بتوان به نتایج اندازه‌گیری اعتماد کرد. برای این که این عامل به حداقل کاهش یابد بهتر است سوزن‌ها از جنس طلا ساخته شوند و فنر ظرفی سوزن‌ها را با فشار مناسبی به سطح نمونه متصل نمایند. در این اندازه‌گیری از چنین سوزن‌هایی استفاده شده است.

#### ۴. روش کار تجربی

به منظور اندازه‌گیری پویش آزاد میانگین تک لایه‌ایهای نازک Ni و چند لایه‌ایهای نازک Ni/Cu، ابتدا دو سری لایه نازک مشابه، یکی تک لایه‌ایهای نازک Ni و سری دیگر، چند لایه‌ایهای نازک Ni/Cu، با ضخامتهای متغیر به روش الکتروانباشت رشد داده شدند.

روش الکتروانباشت مبتنی بر قانون فارادی است: جرم فلزی که در اثر عبور جریان الکتریکی از یک محلول الکترولیت روی کاتد رسوب می‌کند با بار الکتریکی که بین کاتد و آنود جریان می‌یابد متناسب است. شکل ۲ طرح واره یک سل الکتروانباشت را نشان می‌دهد. الکترولیت شامل یونهای  $Ni^{+2}$  به غلظت ۱۰۰ گرم بر لیتر به صورت محلول سولفات نیکل،  $Cu^{+2}$  به غلظت ۳ گرم بر لیتر به صورت محلول سولفات مس و بوریک اسید به غلظت ۳۰ گرم بر لیتر است، که به عنوان افزودنی به محلول اضافه می‌شود.

سه الکتروود به ترتیب زیر در محلول الکترولیت قرار می‌گیرد:

است.  $\rho$  مقاومت الکتریکی ویژه لایه نازک و  $\rho_B$  مقاومت الکتریکی ویژه ماده کپه‌ای است. بدین ترتیب ملاحظه می‌شود در لایه‌های نازک که ضخامت آنها قابل مقایسه با (البته بزرگتر از) پویش آزاد میانگین باشد مقاومت الکتریکی ویژه به پویش آزاد میانگین بستگی دارد.

با توجه به رابطه (۱۹) که به صورت زیر باز نویسی می‌شود:

$$\rho = \rho_B + \frac{3}{8} \rho_B \lambda \left( \frac{1}{t} \right), \quad (20)$$

نمودار تغییرات  $\rho$  بر حسب  $\frac{1}{t}$  خط راستی است که عرض از مبدا آن مساوی مقاومت الکتریکی ویژه ماده کپه‌ای و شیب خط مساوی  $\frac{3}{8} \rho_B \lambda$  است.

منظور کردن اختلاف بین رسانایی الکترونیهای با اسپین بالا و پایین و در نظر گرفتن سهم جداگانه‌ای برای الکترونیهای با اسپین بالا و پایین در رسانایی الکتریکی به رهیافت دیگری منجر می‌گردد [۷ و ۸].

#### ۳. اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی ویژه

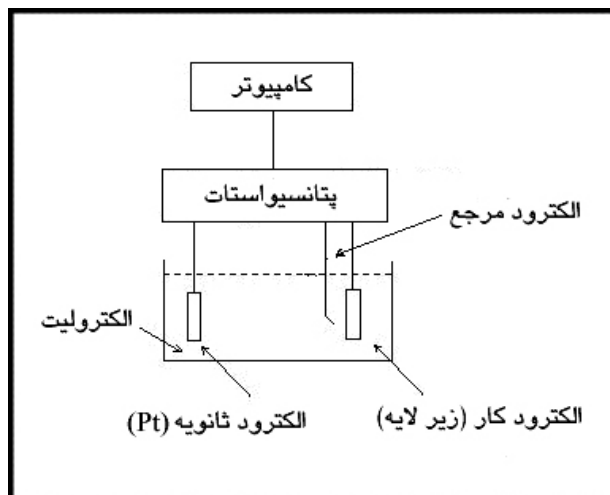
معمولاً برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی لایه‌های نازک از روش چهارسوزنی استفاده می‌شود. در این روش تأثیر مقاومت نقاط تماس و سیمهای رابط به حداقل می‌رسد. در روش چهار سوزنی معمولاً یک جریان الکتریکی ثابت بین دو نقطه برقرار می‌گردد و اختلاف پتانسیل بین دو نقطه دیگر اندازه‌گیری می‌شود. برای یک لایه نازک مقاومت الکتریکی  $R_s$  به صورت  $R_s = CV/I$  تعریف می‌شود که با توجه به شکل ۱ جریان  $I$  بین دو سوزن ۱ و ۴ (نقاط خارجی و در تماس با لایه) اعمال می‌گردد و اختلاف پتانسیل بین دو سوزن ۲ و ۳ (نقاط داخلی) اندازه‌گیری می‌گردد.  $C$  ضریب تصحیح است که با توجه به طول و عرض لایه نازک و فاصله بین سوزنهای تماس از جدول ۱ به دست می‌آید. مقاومت الکتریکی ویژه از رابطه  $\rho = R_s t$  محاسبه می‌گردد ( $t$  ضخامت لایه است).

اگر نمونه (لایه نازک) شکل مشخص هندسی نداشته

ابتدا کامپیوتر فرمان اعمال ولتاژ  $1/75$ - ولت را که متناظر با رسوب نیکل است به پتانسیواستات می‌دهد و جریان الکتریکی را اندازه‌گیری می‌کند و از آن بر حسب زمان انتگرال می‌گیرد تا بار الکتریکی به دست آید. هنگامی که بار الکتریکی به مقداری که طبق قانون فارادی متناظر با ضخامت یک لایه‌ی نیکل (مثلاً  $5 \text{ nm}$ ) است رسید، کامپیوتر فرمان تغییر ولتاژ به  $0/2$ - ولت را که متناظر با رسوب مس است به پتانسیواستات می‌دهد. این عمل می‌تواند به دفعات تکرار شود تا ضخامت لایه‌ی انباشته به حد نهایی مورد نظر برسد. بدین ترتیب می‌توان چند لایه‌ایهای نازک که متناوباً از لایه‌های Ni و Cu (با هر فلز دیگر که یونهای آن در محلول وجود داشته باشد) تشکیل یافته است، رشد داد. تعداد لایه‌ها را می‌توان از چند تا چند هزار لایه افزایش داد. برای اطلاعات بیشتر راجع به الکتروانباشت فیلمهای چند لایه به مقاله‌ی مروری که توسط والتر شوارزکر نوشته شده است [۱۰] مراجعه نمایید.

در هنگام لایه نشانی Ni مقداری نیز گاز هیدروژن در اطراف الکتروود کار تولید می‌شود و این بدین معنی است که تمام بار مبادله شده صرف رسوب نیکل نمی‌شود. بنابراین ضخامت واقعی لایه‌ی انباشته نیکل از مقدار اسمی آن که بر مبنای قانون فارادی محاسبه می‌شود کمتر می‌باشد. بازده جریان که به صورت نسبت ضخامت واقعی به ضخامت اسمی لایه‌ی رسوب داده شده تعریف می‌شود، در کارهای قبلی نویسنده مقاله که در شرایط مشابه الکتروشیمیایی انجام شده است [۱۱] در طی لایه نشانی نیکل  $60\%$  محاسبه گردیده است. نتیجه‌ی محاسبه توسط اندازه‌گیری ضخامت واقعی لایه‌های نازک به کمک تکنیک XRD که در بخش بعد توضیح داده می‌شود تأیید گردیده است. از آنجا که غلظت مس در محلول الکتروولیت بسیار کم است و آهنگ لایه نشانی بسیار کند است، مقدار گاز هیدروژن تولید شده در اطراف کاتد قابل چشم پوشی است و بازده جریان در هنگام لایه نشانی مس نزدیک به  $100\%$  و ضخامتهای واقعی و اسمی لایه‌های مس برابر می‌باشند.

ضخامت اسمی لایه‌های نیکل و مس که در این پروژه تهیه شدند به ترتیب ۵ و ۱ نانومتر و ضخامت واقعی لایه‌ها به



شکل ۲. طرح واره دستگاه لایه نشانی به روش الکتروانباشت.

الکتروود کار (WE)<sup>۱</sup> که یک صفحه مربعی از جنس مس بس بلور با ساختار ترجیحی (۱۰۰)<sup>۲</sup> است که به عنوان زیر لایه استفاده می‌شود و لایه نازک روی آن نشانداده می‌شود (کاتد). به جز سطح دایره‌ای شکلی به شعاع  $1 \text{ cm}$  در یک طرف زیر لایه مس بقیه قسمت‌های آن با نوار چسب پوشانده می‌شود.

الکتروود ثانویه (SE)<sup>۳</sup> که یک توری پلاتین است (آند).

الکتروود مرجع (RE)<sup>۴</sup> از نوع الکتروود کالومل است.

پتانسیواستات<sup>۵</sup> یک چشمه ولتاژ - جریان با سه ترمینال خروجی است که به ترتیب به الکتروود کار، الکتروود ثانویه و الکتروود مرجع متصل می‌شود. پتانسیواستاتی که در این کار مورد استفاده قرار گرفت ساخت شرکت بهپژوه اصفهان (مدل ۲۰۶۳) است که توسط کامپیوتر کنترل می‌گردد.

با اعمال یک ولتاژ مناسب به WE (نسبت به RE)، می‌توان فلز مورد نظر را روی WE رسوب داد. این ولتاژ به عوامل متعددی از جمله غلظت محلول، مساحت لایه نشانی، دما و ... بستگی دارد ولی در هر صورت باید از پتانسیل الکتروشیمیایی فلز مورد نظر منفی‌تر باشد.

در این کار برای الکتروانباشت چند لایه‌ایهای نازک Ni/Cu،

۱. Working Electrode

۲. (100)-texture polycrystalline

۳. Secondary Electrode

۴. Reference Electrode

۵. Potentiostat

لایه خود پیروی می‌کنند و لاقط در یک امتداد که همان امتداد رشد بلور و عمود بر صفحه لایه نازک است، لایه‌ها به صورت برآستی رشد می‌کنند قابل ملاحظه است. نشان داده شده است که به روش الکتروانباشت حتی می‌توان لایه‌های نازک تک بلور رشد داد [۱۰]. مطالعه میکروسکوپ الکترونی (TEM) از کارهای قبلی مؤلف و همکاران، نشان می‌دهد که لایه‌های Ni و Cu کاملاً پیوسته‌اند ولی فصل مشترک لایه‌ها کاملاً صاف نیست و گاهی موجی شکل است [۱۳]. شکل (۳-ب) نقش پراش پرتوهای ایکس از یک چند لایه‌ایهای نازک Ni/Cu را نشان می‌دهد. علاوه بر قله‌هایی که در شکل (۳-الف) ظاهر شده است و بیانگر ساختار ترجیحی این چند لایه‌ایهای نازک است، دو قله ماهواره‌ای در اطراف قله (۲۰۰) مشاهده می‌گردد. این قله‌ها بیانگر ساختار چندلایه‌ای فیلمهای Ni/Cu است. با اندازه‌گیری وضعیت زاویه‌ای قله‌های ماهواره‌ای می‌توان  $t$  ضخامت واقعی هریک از دولایه‌ایهای Ni/Cu را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد [۱۲].

$$t = \lambda / (\sin \theta_{i+1} - \sin \theta_{i-1}), \quad (21)$$

که در این رابطه  $\theta_{i+1}$  و  $\theta_{i-1}$  به ترتیب وضعیت قله‌های ماهواره‌ای قبل و بعد از قله اصلی (۲۰۰) و  $\lambda$  طول موج پرتوهای ایکس می‌باشد. نتایج با آنچه که از حاصل ضرب ضخامت اسمی در بازده جریان به دست می‌آید سازگاری خوبی دارد.

## ۶. اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و پویش آزاد میانگین

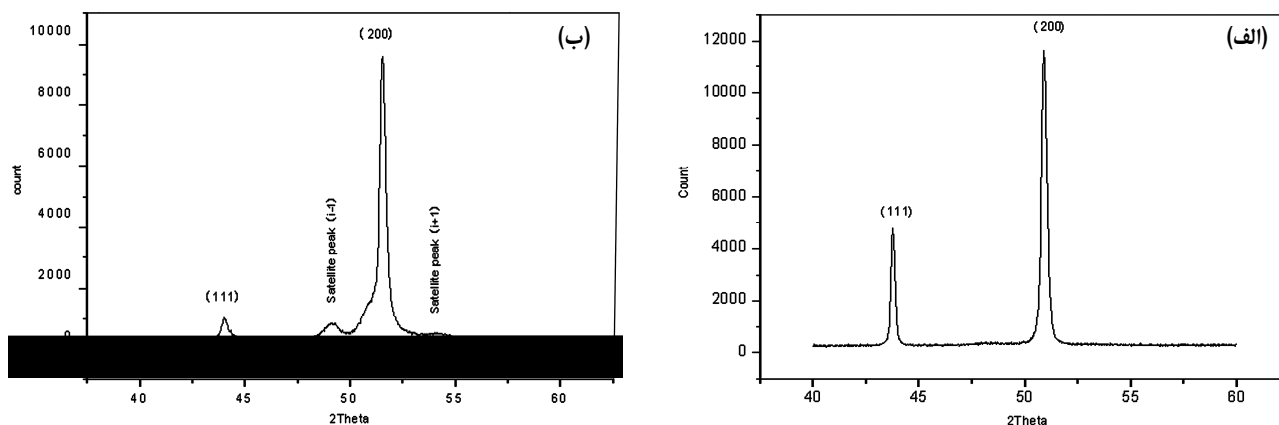
قطعه‌ای مستطیلی از لایه نازک به ابعاد  $16 \times 4 \text{ mm}$  در حالی که روی صفحه شیشه‌ای قرار دارد بریده و از بقیه لایه جدا می‌شود. آرایه چهار سوزنی طلا که هر کدام از سوزنها به فاصله  $4 \text{ mm}$  از دیگری قرار دارد، مطابق شکل ۱ به لایه نازک اتصال می‌یابد. بدین ترتیب مقادیر  $a$  و  $d$  و  $s$  (شکل ۱) به ترتیب ۱۶ و ۴ و ۴ میلی‌متر است. جریان ثابت  $5-1 \text{ mA}$  (بسته به ضخامت لایه نازک) بین دو نقطه A و B برقرار می‌شود و اختلاف پتانسیل بین دو نقطه C و D توسط یک میکروولت متر حساس اندازه‌گیری و مقاومت صفحه از رابطه

ترتیب ۳ و ۱ نانومتر می‌باشد. ضخامت کل لایه از حاصل ضرب تعداد لایه‌ها در ضخامت هر دو لایه‌ای Ni/Cu به دست می‌آید. برای تهیه تک لایه‌ایهای نازک Ni، پالسه‌های ولتاژ ۱۷۵-۱ ولت متناظر با لایه نشانی  $4 \text{ nm}$  نیکل و سپس یک ولتاژ صفر برای مدت ۳۰ ثانیه اعمال می‌گردد. این کار به دفعات تکرار می‌شود تا لایه نازکی از نیکل به ضخامت نهایی مورد نظر تهیه گردد.

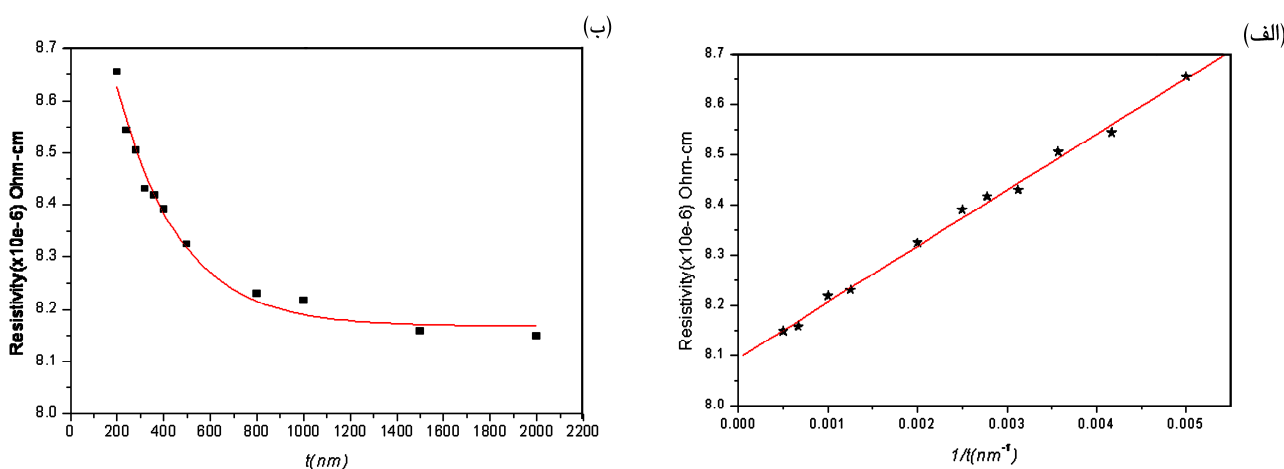
پس از لایه نشانی، زیرلایه مس در محلول اسید کرومیک غلیظ و با اعمال یک ولتاژ مثبت به آن حل می‌شود و لایه نازک Ni یا Ni/Cu بر روی یک قطعه کوچک شیشه باقی می‌ماند. این عمل به منظور جلوگیری از اتصال کوتاه در هنگام اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی لایه‌های نازک صورت می‌گیرد. همین طور اثر قله‌های مربوط به زیرلایه در نقش پراش پرتوهای ایکس لایه نازک حذف می‌گردد. روش الکتروشیمیایی جدا کردن فیلمها از زیر لایه خود به تفصیل در مرجع [۱۲] آمده است.

## ۵. مطالعه ساختار لایه‌های نازک به کمک پراش پرتوهای ایکس و اندازه‌گیری ضخامت واقعی لایه‌های نازک

همان طور که قبلاً گفته شد، تک لایه‌ایهای نازک Ni و چند لایه‌ایهای نازک Ni/Cu بر روی زیرلایه بس بلور Cu با ساختار ترجیحی (۱۰۰) رشد داده شده‌اند. به منظور مطالعه ساختار لایه‌های نازک و این که آیا لایه‌های رشد داده شده از ساختار زیر لایه خود پیروی می‌کنند یا خیر، تعدادی از تک لایه‌ایهای نازک Ni و چند لایه‌ایهای Ni/Cu به کمک تکنیک پراش پرتوهای ایکس مورد مطالعه قرار گرفتند. با توجه به این که قبل از انجام XRD لایه‌ایهای نازک از زیرلایه خود جدا شده‌اند، کلیه قله‌های مشاهده شده در نقش XRD صرفاً ناشی از ساختار بلوری لایه‌های نازک است. شکل (۳-الف) نقش پراش پرتوهای ایکس از یک تک لایه‌ای نازک Ni را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود در حالی که قله (۱۱۱) کوتاه است، ارتفاع قله (۲۰۰) کاملاً بلند و بیانگر ساختار ترجیحی (۱۰۰) لایه‌های نازک Ni است. این نتیجه که در شرایط مناسب رشد، فیلمهایی که به روش الکتروانباشت رشد می‌یابند از ساختار ترجیحی زیر



شکل ۳. نقش پراش پرتوهای ایکس از یک الف) تک لایه‌ای نازک Ni ب) چند لایه‌ای نازک Ni/Cu.



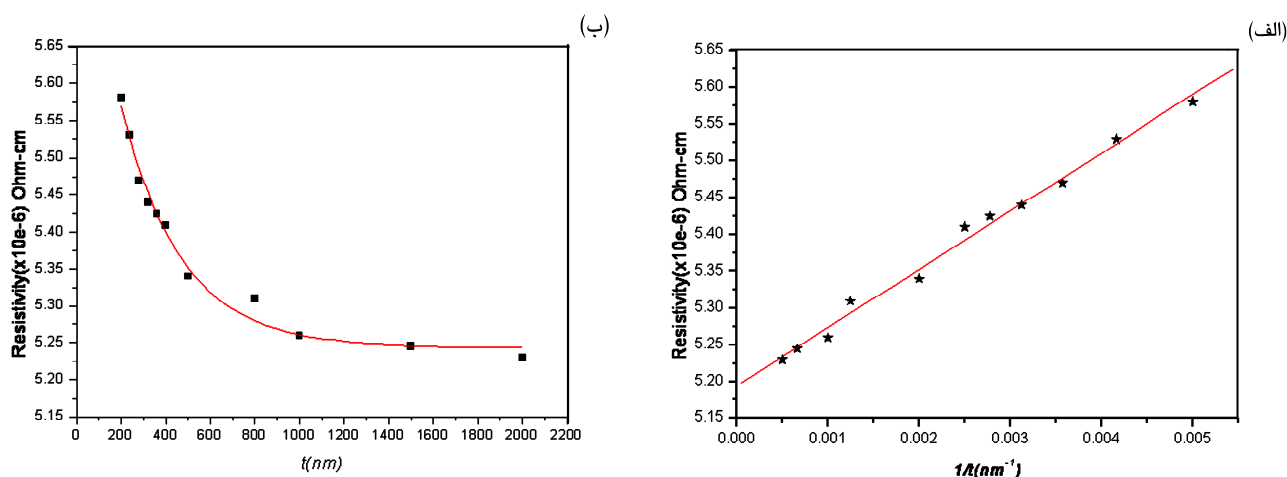
شکل ۴. نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی ویژه چند لایه‌ایهای نازک Ni/Cu به صورت تابعی از الف) عکس ضخامت ب) ضخامت لایه نازک.

است). سری B از تک لایه‌ایهای نازک Ni تشکیل شده است که ضخامت آنها با ضخامت چند لایه‌ایهای نازک سری اول برابر است. نمودار تغییرات مقاومت ویژه بر حسب عکس ضخامت لایه‌های نازک سری A (چند لایه‌ایهای نازک Ni/Cu) در شکل ۴ و نمودار تغییرات مقاومت ویژه بر حسب عکس ضخامت برای لایه‌های نازک سری B (تک لایه‌ایهای نازک Ni) در شکل ۵ رسم شده است. همان‌طور که از شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، نقاط تجربی در امتداد یک خط مستقیم توزیع شده‌اند. با توجه به رابطه (۲۰) شیب این خط متناسب با پویش آزاد میانگین الکترونها در لایه‌های نازک است.

همین‌طور محل تقاطع این خط با محور قائم که از برون یابی منحنی به دست می‌آید، مقاومت الکتریکی ویژه

$R_s = CV/I$  محاسبه می‌شود. در شرایط این اندازه‌گیری مقدار ضریب تصحیح C با توجه به جدول ۱ مساوی (۰/۹۹۹۴) به دست می‌آید که در حد خطای اندازه‌گیری، مساوی واحد در نظر گرفته می‌شود.

مقاومت الکتریکی ویژه از حاصل ضرب  $R_s$  در ضخامت لایه نازک ( $\rho = R_s t$ ) به دست می‌آید. به منظور اندازه‌گیری مقاومت ویژه لایه‌های نازک و مطالعه بستگی آن با ضخامت لایه‌ها، دو سری لایه نازک با ضخامتهای واقعی یکسان رشد داده شده‌اند. سری A شامل چند لایه‌ایهای نازک  $N[Ni(3nm)/Cu(nm)]$  است که N تعداد دو لایه‌ایهای Ni/Cu است. ضخامت کل لایه‌های نازک  $4N(nm)$  می‌باشد (ضخامت اسمی لایه نیکل و مس به ترتیب  $5nm$  و  $1nm$ )



شکل ۵. نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی ویژه تک لایه‌ایهای نازک Ni به صورت تابعی از الف) عکس ضخامت ب) ضخامت لایه نازک.

جدول ۲. پوشش آزاد میانگین و مقاومت الکتریکی ویژه کپه‌ای.

نوع لایه نازک	پوشش آزاد میانگین $\lambda$ (nm)	مقاومت الکتریکی ویژه ماده کپه‌ای $\rho_B$ ( $\Omega$ cm)
تک لایه‌ای Ni	۳۶	$8/1 \times 10^{-6}$
چند لایه‌ای Ni/Cu	۴۰	$5/2 \times 10^{-6}$

می‌شود که مغناطش لایه‌های متوالی مغناطیسی با هم جفت شده باشند؛ این شرایط وقتی رخ می‌دهد که ضخامت لایه‌های مغناطیسی و غیر مغناطیسی به اندازه کافی از پوشش آزاد میانگین الکترون در این گونه مواد کوچکتر باشد.

در این پروژه نتایج اندازه‌گیریهای پوشش آزاد میانگین الکترون در تک لایه‌ایهای نازک Ni و چند لایه‌ایهای نازک Ni/Cu به ترتیب مقادیر ۳۶ و ۴۰ نانومتر را به دست می‌دهد که با مقادیری که برای چند لایه‌ایهای نازک Co/Cu به دست آمده است، قابل مقایسه است و سازگاری نسبتاً خوبی دارد [۱۷].

## ۷. خلاصه و نتیجه‌گیری

تک لایه‌ایهای نازک Ni و چند لایه‌ایهای نازک Ni/Cu به روش الکتروانباشت از یک محلول الکتروولیت شامل یونهای نیکل و مس رشد داده شده‌اند.

نقش پراش پرتوهای ایکس از لایه‌های نازک نشان می‌دهد که لایه‌ها از ساختار ترجیحی زیرلایه خود پیروی می‌کنند و قله‌های ماهواره‌ای که بیانگر ساختار تناوبی چندلایه‌ای است در

ماده کپه‌ای را نشان می‌دهد. نتایج اندازه‌گیری پوشش آزاد میانگین و مقاومت الکتریکی ویژه کپه‌ای در جدول ۲ خلاصه شده است.

پوشش آزاد میانگین الکترون نقش مهمی در خواص تراسبری جامدات فلزی اعم از مواد کپه‌ای یا لایه‌های نازک ایفا می‌کند.

در فیلم‌های چندلایه که متناوباً از لایه‌های مغناطیسی و غیر مغناطیسی تشکیل شده‌اند مانند Ni/Cu و Fe/Cr و Co/Cu، مقاومت الکتریکی تابع حساسی از میدان مغناطیسی است. این اثر که به مغناطو مقاومت<sup>۱</sup> موسوم است، در صورتی قابل ملاحظه و بزرگ است که ضخامت لایه غیر مغناطیسی که لایه‌های مغناطیسی را از هم جدا می‌کند از پوشش آزاد میانگین الکترون در این مواد کوچکتر باشد [۱۴]. مغناطو مقاومت بزرگ<sup>۲</sup> از اختلاف بین میزان پراکندگی الکترونها با اسپین بالا و اسپین پایین ناشی می‌شود [۱۵ و ۱۶]. مغناطو مقاومت بزرگ در صورتی در لایه‌های نازک چندلایه مغناطیسی مشاهده

۱. Magnetoresistance

۲. Giant Magnetoresistance



### قدردانی

از آقای پروفیسور والتر شوارتزاکر (Prof. W Schwarzacher) به خاطر این که اجازه داد تعدادی از اندازه‌گیریهای مقاومت الکتریکی در آزمایشگاهش در گروه فیزیک دانشگاه بریستول انجام شود و از آقای پروفیسور برایان هیکی (Prof. B J Hickey) از گروه فیزیک دانشگاه لیدز به خاطر مباحثات سازنده‌اش تشکر می‌شود.

نقش XRD لایه‌های Ni/Cu کاملاً مشهود است. اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی لایه‌های نازک به وسیله آرایه چهار سوزنی که به صورت خطی بر یک قطعه مستطیل شکل لایه نازک اتصال می‌یابند صورت گرفت. نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی ویژه لایه‌های نازک بر حسب عکس ضخامت آنها در امتداد یک خط راست قرار می‌گیرد. مقاومت الکتریکی ویژه ماده کپه‌ای و پویش آزاد میانگین برای تک لایه‌ایهای نازک Ni و چند لایه‌ایهای نازک Ni/Cu اندازه‌گیری شد.

### مراجع

1. J S Dugdale, *The Electronic Properties of Metals and Alloys*, Taylor and Francis (1977).
2. J S Dugdale, *The Electronic Properties of Disordered Metals*, Cambridge (1995).
3. B J Hickey, G J Morgan and M A Howson, *Basic Electron Transport*.
4. R D Barnard, *Thermoelectricity in Metals and Alloys*, Taylor and Francis (1977).
5. I Bakony, L Péter, V Weihnacht, J Tóth, L F Kiss and C M Schneider; *J. optoelectron, Adv. Mater*, 7, 2 (2005).
6. E H Sondheimer, *Adv. Phys.* 1, 1 (1952).
7. R G Chambers, W A Harrison and M B Webb, *The Fermi Surface*, Wiley, New York, (1960).
8. T Valet and A Fert, *Phys. Rev. B* 48 (1993) 7099.
9. L J Van der Pauw, *Philips Reports*, 113 (1958) 1.
10. W Schwarzacher and D S Lashmore *IEEE Trans. Magn.* 32 (1996) 3133-3153.
11. G Nabyouni and W Schwarzacher *J. Magn. Magn. Mater.* 198-199 (1999) 116-118.
12. G Nabyouni, *PhD Thesis, University of Bristol*, (1997).
13. A Cziraki, J G Zheng, A Michel, Z Czigancy, G Nabyouni, W Scharzacher, E Toth-Kadar and I Bakonyi, *Zeitschrift fur Metallkund.* 278 (1994) 90-4.
14. M N Baibich, J M Broto, A Fert, F Van Dau, F Petroff, D Etienne, G Creuzet, A Friedrich and J Chazelas, *Phys. Rev. Lett.* 61 (1988) 2472.
15. P M Levy, *J. Magn. Magn. Mater.* 485 (1995) 140-144.
16. A Barthlemy, A Fert, R Morel and L Sterten, *Physics World*, 34 (1994).
17. R E Camley and J Barnass; *Phys. Rev. Lett.* 53 (1989) 664.