دانشگاه پیام‌نور

دانشکده فیزیک

پایان نامه

برای دریافت مدرک کارشناسی ارشد

رشته فیزیک حالت جامد

گروه فیزیک

عنوان پایان نامه:

اثر زبری سطوح در هدایت الکتریکی لایه‌های نازک فلزی

مونا سادات جان نثار

استاد راهنما: دکتر غلامرضا جعفری

استاد مشاور: دکتر علی اصغر شکری

آذر 1390

دانشگاه پیام نور

دانشکده فیزیک

پیام نور مرکز تهران

پایان نامه

برای دریافت مدرک کارشناسی ارشد

رشته فیزیک

گروه فیزیک

عنوان پایان نامه:

اثر زبری سطوح در هدایت الکتریکی لایه‌های نازک فلزی

مونا سادات جان نثار

استاد راهنما: دکتر غلامرضا جعفری

استاد مشاور: دکتر علی اصغر شکری

آذر 1390

اینجانب **مونا سادات جان‌نثار** دانشجوی ورودی سال **1388** مقطع کارشناسی ارشد **فیزیک حالت جامد** گواهی می‌نمایم چنانچه در پایان نامه خود از فکر، ایده و نوشته دیگری بهره گرفته ام با نقل قول مستقیم یا غیر مستقیم منبع و مأخذ آن را نیز در جای مناسب ذکر کرده ام. بدیهی است مسئولیت تمامی مطالبی که نقل قول دیگران نباشد بر عهده‌ی خویش می‌دانم و جوابگوی آن خواهم بود.

مونا سادات جان‌نثار

اینجانب **مونا سادات جان‌نثار** دانشجوی ورودی سال **1388** مقطع کارشناسی ارشد **فیزیک حالت جامد** گواهی می‌نمایم چنانچه براساس مطالب پایان نامه خود اقدام به انتشار مقاله، کتاب و ... نمایم ضمن مطلع نمودن استاد راهنما، با ایشان نسبت به نشر مقاله، کتاب و... و به صورت مشترک و با ذکر نام استاد راهنما مبادرت نمایم.

مونا سادات جان‌نثار

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه پیام نور می‌باشد.

آذر 1390

با سپاس از جناب دکتر غلامرضا جعفری، این رساله را تقدیم می‌کنم به

پدر و مادر عزیزم.

چکیده:

ناهمواری سطوح، وقتی که ضخامت لایه کوچک‌تر از طول پویش آزاد میانگین شود، روی رسانندگی لایه‌های نازک اثر می‌گذارد. در این حالت الکترون‌ها از ناهمواری سطح اطلاع پیدا کرده، پراکنده شده و مقاومت اضافه‌ای ایجاد می‌کنند. مطالعه رسانش در این حالت، در محدوده‌ی مکانیک کوانتومی بوده و در چهار چوب تقریب بورن با توانی از ضخامت متناسب است.

در این پایان نامه، با در نظر گرفتن سطوح ناهموار به عنوان یک فرکتال خود- متناسب، رابطه‌ی رسانندگی الکتریکی لایه‌ی نازک فلزی با دو مرز ناهموار بر حسب ضخامت آن نشان داده می‌شود. با استفاده‌ی معکوس از این تئوری، و اندازه‌گیری رسانندگی الکتریکی از روش‌های تجربی، می‌توان روشی ساده برای تخمین ضخامت لایه‌های نازک فلزی ارائه داد. و در نهایت، با عبور جریان متناوب از لایه نازک، به ظهور اثرات خازنی سطح ناهموار اشاره می‌شود.

واژگان کلیدی: رسانندگی الکتریکی، لایه‌های نازک، زبری سطح، دانسیته طیفی.

فهرست

عنوان صفحه

فصل اول: مقدمه

1-1- سطوح ناهموار 2

2-1- رسانندگی الکتریکی سطوح ناهموار.....9

3-1- ظرفیت خازن.....11

فصل دوم: ویژگی‌های آماری سطوح ناهموار

1-2- تابع توزیع ارتفاع سطح و تابع مشخصه.....14

2-2- تابع همبستگی، تابع همبستگی متقابل.....17

3-2- تابع ساختار، طیف توانی.....24

فصل سوم: سطوح ناهموار فرکتالی

1-3- فرکتال خود- متشابه.....30

2-3- بعد فرکتال.....31

3-3- فرکتال خود – متناسب.....33

3-4- تابع ساختار و طیف توانی فرکتال خود- متناسب.....35

فصل چهارم: تئوری رسانندگی تقریب بورن

4-1- هامیلتونی لایه‌ی نازک با یک سطح ناهموار و رابطه رسانش تقریب بورن.....39

4-2- تئوری رسانندگی لایه‌ی نازک نیم‌رسانا با یک سطح ناهموار.....44

4-3- تئوری رسانندگی لایه‌ی نازک فلز با دو سطح ناهموار.....45

4-4- تئوری رسانندگی لایه‌ی نازک نیم‌رسانا با دو سطح ناهموار.....47

فصل پنجم: اثر پارامترهای ناهمواری سطح در رسانندگی لایه‌های نازک

5-1- بررسی رابطه‌ی پارامترهای مورفولوژی سطح با رسانندگی لایه‌ی نازک نیم‌رسانا.....50

5-2- بررسی رابطه‌ی پارامترهای مورفولوژی سطح با رسانندگی لایه‌ی نازک فلز.....55

5-3- بررسی رابطه‌ی ضخامت با رسانندگی الکتریکی برای لایه‌ی نازک نیم‌رسانا و فلز با یک مرز ناهموار.....60

فصل ششم: تعیین ضخامت لایه نازک فلز با اندازه‌گیری رسانش تقریب بورن

6-1- اندازه‌گیری ضخامت لایه‌ی نازک با دو مرز ناهموار.....66

6-2- تعیین پارامترهای ناهمواری یک لایه‌ی نازک فلز با دو مرز ناهموار.....68

6-3- تأثیر همبستگی‌متقابل در رسانش.....74

فصل هفتم: ظرفیت خازن با یک سطح ناهموار

7-1- شیب محلی و مساحت سطح.....79

7-2- پتانسیل و میدان الکتریکی بین صفحات یک خازن با یک مرز ناهموار.....83

7-3- اثر ناهمواری سطح روی ظرفیت خازن با یک سطح ناهموار.....91

فصل هشتم: جمع‌بندی، نتایج و پیشنهادات

8-1- جمع‌بندی 95

8-2- پیشنهادات 96

مراجع.....98

فهرست شکل‌ها و جداول:

شکل1-1)- تصویر AFM زیر لایه سیلیکون در دو مقیاس متفاوت.....5

شکل1-2)- اثر بزرگ‌نمایی ابزار اندازه‌گیری.....7

شکل2-1)- تصویر AFM از فلز مس روی زیر لایه‌ی سیلیکون وهیستوگرام ارتفاع.....15

شکل2-2)- سه سطح ناهموار مختلف با ωهای متفاوت.....16

شکل2-3)- سه سطح با تابع توزیع و زبری یکسان ولی با طول همبستگی افقی ξ متفاوت.....18

شکل2-4)- نمودار تابع همبستگی سطح های نشان داده شده در شکل(2-3).....21

جدول2-1)- تابع همبستگی‌های مختلف برای سطوح ناهموار همگن.....22

شکل2-5)- دو سطح متفاوت با زبری ω وطول همبستگی ξ یکسان.....23

شکل2-6)- تابع ساختار سطوح نشان داده شده در شکل (2-3).....25

شکل2-7)- مساحت زیر منحنی طیف توانی برابر با ω^2 است.....27

جدول2- 2)- طیف توانی مختلف برای سطوح ناهموار همگن.....28

شکل2-8)- طیف توانی برای دو سطح نشان داده شده در شکل(2-5).....28

شکل3-1)- ساختار مجموعه کانتور.....31

شکل3-2)- شیء خود متناسب.....34

شکل3-3)- سه سطح ناهموار با ωو ξ یکسان اما با α های متفاوت.....35

شکل3-4)- نمودار لگاریتمی تابع ساختار وطیف توانی برای یک سطح خود-متناسب.....37

شکل5-1)- رسانندگی الکتریکی σ برحسب طول همبستگی ξ برای لایه ای با $d = 5\ \ nm$، nm^{-2} $nd = 4\times10^{-2}$، $a_0 = 0.3\ \ nm$، $\omega = 0.3\ \ nm$.....53

شکل5-2)- رسانندگی الکتریکی σبرحسب نمای هارتز α برای لایه ای با $d = 5\ \ nm$، nm^{-2} $nd = 4\times10^{-2}$، $a_0 = 0.3\ \ nm$، $\omega = 0.3\ \ nm$.....54

شکل5-3)- رسانندگی الکتریکی σبرحسب طول همبستگی ξ برای لایه ای با $d = 2\ \ nm$، nm^{-2} $d = 6\times10^{1}$، $a_0 = 0.3\ \ nm$، $\omega = 0.3\ \ nm$.....56

شکل5-4)- رسانندگی الکتریکی σبرحسب نمای هارتز α برای لایه ای با $d = 2\ \ nm$، nm^{-2} $d = 6\times10^{1}$، $a_0 = 0.3\ \ nm$، $\omega = 0.3\ \ nm$.....57

شکل5-5)- رسانندگی الکتریکی σ برحسب ضخامت لایه d با نمای هارتز $\alpha = 0.5$ و طول همبستگی $\xi = 20\ \ nm$، $nd = 4\times10^{-2}\ \ nm^{-2}$، $a_0 = 0.3\ \ nm$، $\omega = 0.3\ \ nm$.....60

شکل5-6)- رسانندگی الکتریکی σ برحسب ضخامت لایه d برای نماهای هارتز مختلف و طول همبستگی $\xi = 20\ \ nm$، $nd = 4\times10^{-2}\ \ nm^{-2}$، $a_0 = 0.3\ \ nm$، $\omega = 0.3\ \ nm$.....61

شکل5-7)- رسانندگی الکتریکی σ برحسب ضخامت لایه d برای نماهای هارتز مختلف و طول همبستگی $\xi = 1.5\ nm$، $nd = 4\times10^{-2}\ nm^{-2}$، $a_0 = 0.3\ nm$، $\omega = 0.3\ nm$.....62

شکل5-8)- رسانندگی الکتریکی σ برحسب ضخامت لایه d برای طول‌های همبستگی مختلف و نماهای هارتز $\alpha = 0.5$، $nd = 4\times10^{-2}\ nm^{-2}$، $a_0 = 0.3\ nm$، $\omega = 0.3\ nm$.....63

شکل5-9)-رسانندگی الکتریکی σبرحسب ضخامت لایه d با نمای هارتز $\alpha = 0.3$ و طول همبستگی $\xi = 5\ nm$، $nd = 4\times10^{-2}\ nm^{-2}$، $a_0 = 0.3\ nm$، $\omega = 0.3\ nm$.....63

شکل6-1)- تصاویر AFM لایه نازک فلز مس قبل و بعد از لایه نشانی.....69

شکل6-2)- ارتفاع ناهمواری سطح قبل وبعد از لایه نشانی.....69

شکل6-3)- نمودار لگاریتمی تابع ساختار مرز مشترک لایه‌ی مس و زیر لایه.....70

شکل6-4)- نمودار لگاریتمی تابع ساختار مرز مشترک لایه‌ی مس و هوا.....71

شکل6-5)- نمودار رسانندگی الکتریکی لایه‌ی نازک مس σ بر حسب ضخامت d با nm $n = 30\ nm^{-3}$ $a_0 = 0.3$.....73

شکل6-6)- نمودار رسانندگی بر حسب ضخامت در حضور و غیاب اثر همبستگی متقابل بین دو سطح فلز.....74

شکل6-7)- نمودار تفاضل نسبی رسانندگی در حضور و غیاب همبستگی متقابل.....76

شکل7-1)- نمودار شیب محلی rms به صورت تابعی از نمای هارتز α برای دو طول همبستگی متفاوت ξ.($a = 0.3nm$ ، $w = 2nm$، $80nm$و $\xi = 20nm$).....82

شکل7-2)- نمایی از صفحات خازن با یک سطح ناهموار. dضخامت متوسط دی‌الکتریک، εثابت دی‌الکتریک و $h(x,y)$ نوسانات ارتفاع سطح است.....84

شکل7-3)- نمودار نیمه لگاریتمی از نسبت میدان الکتریکی $\langle E\rangle / E_0$ به صورت تابعی از طول همبستگی $L(=\xi/d)$، برای $\Delta(=\omega/d)=0.01$ و $\alpha = 0.3,0.5,0.7,0.9$.....89

شکل7-4)- نمودار نسبت میدان الکتریکی $\langle E\rangle / E_0$ به صورت تابعی از طول همبستگی برای $\Delta = 0.01$ و $\Delta = 0.02$ با $\alpha = 0.4$.....90

شکل7-5)- نمودار نسبت ظرفیت خازن $\langle C\rangle / C_0$ به صورت تابعی از طول همبستگی $L(=\xi/d)$، برای $\Delta(=\omega/d)=0.01$و $\alpha = 0.6,0.6,0.8$.....92

فصل اول :

مقدمه

1-1) سطوح ناهموار

بیشتر زندگی ما روی سطوح چیزهای مختلفی اتفاق می‌افتد. نشستن روی صندلی، راه رفتن روی زمین، به این معنی است که ما همیشه با سطوح در تماس هستیم. حتی در سلول‌های زیستی، سطح غشا نه تنها به عنوان یک سد خوب عمل می‌کند، بلکه بیشتر فرآیندهای مهم روی این سطح اتفاق می‌افتد. بنابراین به دلیل اهمیت آن‌ها، شکل و خواص سطوحی که با آن روبه رو هستیم، برایمان مهم می‌شود (باراباسی[1]، 1995).

بیشتر سطوحی که در طبیعت با آن روبه‌رو هستیم ناهموار (زبر) هستند. در زندگی روزمره‌مان، می-توانیم انواع سطوح ناهموار را پیدا کنیم. سطوحی مثل پوست بدن سطح میز، آینه و دیوار، که با لمس کردن به وسیله دست، احساس می‌کنیم مسطح هستند یا با انعکاس نور به نظر درخشان می‌آیند. در طبیعت، همچنین انواع مختلفی از سطوح ناهموار وجود دارد مثل کوه‌ها، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و دره‌ها. بنابراین سطوح ناهموار به یکی از بخش‌های مهم مورد توجه تبدیل شده است. در تحقیقات علمی جدید و به همان اندازه در علوم مهندسی، ناهمواری سطوح توجّهات بیشتری را در پهنه‌ی وسیعی از رشته‌های مرتبط مانند، ژئوفیزیک[2]، اکوستیک[2] و تریبولوژی[3] به خود جلب کرده است (ونگ[5]، 2001).

[1] Barabasi
[2] Geophysics
[3] Acoustics
[4] Tribology
[5] Wang

ناهمواری فصل مشترک[1] یکی از مشخصه‌های کلیدی در تکنولوژی ساخت لایه‌های نازک است. ناهمواری فصل مشترک به طور مستقیم، بر روی بسیاری از خواص فیزیکی و شیمیایی لایه‌های نازک تأثیر می‌گذارد. برای مثال، رسانندگی الکتریکی لایه‌های نازک فلزی به ناهمواری سطح بستگی دارد (پلاسانتزاس[2]، 1997، *Phy. Rev. B*). همچنین ناهمواری سطح بر زاویه تماس یک قطره‌ی مایع کوچک روی سطح ناهموار تأثیر می‌گذارد (یانگ[3]، 2006). افزایش ناهمواری، میزان چسبندگی بین دو فصل مشترک را افزایش می‌دهد (پلاسانتزاس، 2003). همچنین ناهمواری می‌تواند بر ضریب اصطکاک سطح مؤثر باشد (پلاسانتزاس، 2004).

با توجه به کاربرد سطح، ممکن است بخواهیم از خواص ناهمواری سطح استفاده، یا آن را حذف کنیم. در بسیاری از کاربردهای لایه‌های نازک، به طور خاص در بکارگیری بسیاری از ابزارهای میکروالکترونیک و اپتوالکترونیک علاقه‌مند به کاهش ناهمواری‌های سطح هستیم. برای مثال، ناهمواری یک زیر لایه‌ی سیلیکون می‌تواند روی ثابت اهمی بین فلز و نیم‌رسانا تأثیر بگذارد (کلاسن[4]، 1997). اگرچه، در بعضی از کاربردها، برای مثال در کاتالیزورها و افزایش چسبندگی بین مواد، ناهمواری فصل مشترک می‌تواند خیلی مفید باشد.

در تکنولوژی رشد لایه‌های نازک، روش‌های مختلفی وجود دارد که می‌تواند سطح‌های ناهمواری با خواص و ویژگی‌های متفاوت تولید کند. بنابراین با توجه به گستردگی این سطوح، برای مطالعه‌ی آن‌ها با دو سوال مهم روبرو هستیم.

[1] Interface
[2] Palasantzas
[3] Yang
[4] Clausen

1) چگونه یک سطح ناهموار، به طور دقیق توصیف می‌شود.

2) چگونه ناهمواری سطح را می‌توان اندازه‌گیری کرد.

یک سطح ناهموار را می‌توان به وسیله‌ی ارتفاع نوسانات سطح تعریف کرد که واریانس این نوسانات نسبت به متوسط ارتفاع (جایی که سطح مرجع صاف نامیده می‌شود) غیر صفر است. طبق این تعریف، مشاهده می‌شود بیشتر سطوح واقعی فیزیکی، نمی‌توانند کاملاً مسطح و هموار باشند. چرا که حداقل نوساناتی از مقیاس اتمی دارند. ولی ما همیشه سطح را در حد مقیاس کوچکی از مرتبه‌ی اتم در نظر نمی‌گیریم. بنابراین یک سطح بر طبق قیدهایی که به آن تحمیل می‌شود، می‌تواند در شرایطی ناهموار و زبر یا همان سطح در شرایط دیگر، هموار و مسطح باشد (ونگ، 2001).

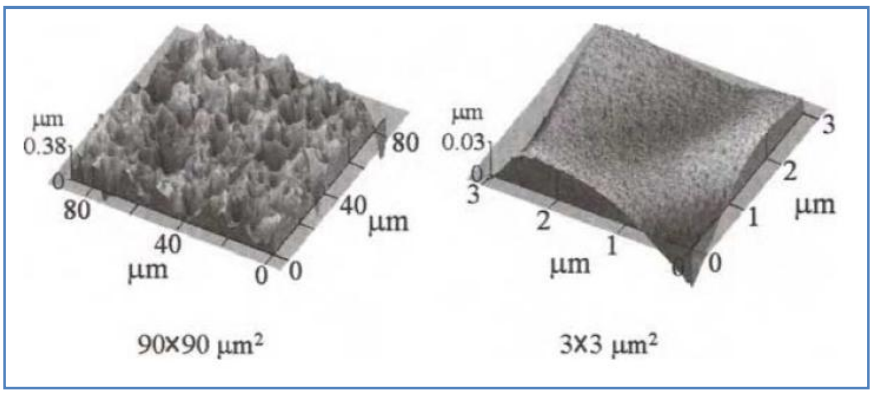
برای مطالعه و اندازه‌گیری ناهمواری سطح دو قید مهم وجود دارد:

یکی، اندازه (مساحت) سطح مورد مطالعه است. درجه‌ی ناهمواری سطح بستگی زیادی به اندازه‌ی مقیاس سطح نمونه دارد. برای مثال وقتی در هواپیما، از آسمان به زمین نگاه می‌کنید، سطح زمین خیلی ناهموار (زبر) به نظر می‌رسد. ولی هنگامی که روی سطح زمین هستید و به دره‌ها و کوه‌ها نگاه می‌کنید، ناهمواری آن‌ها در مقایسه با آنچه در آسمان دیده‌اید، کمتر است. به این دلیل که میزان همواری یا ناهمواری سطح به مقیاسی که در آن سطح را مشاهده می‌کنیم بستگی دارد. سطحی که در مقیاس ماکرو ناهموار به نظر می‌رسد، در مقیاس میکرو ممکن است کاملاً صاف و یکنواخت باشد. بنابراین در حالت کلی می‌توان گفت، خواص مورفولوژی[1] سطح وابسته به طول مقیاس مشاهده آن

[1] Morphology

است(ونگ، 2001).

بعنوان مثال، شکل (1-1) زیر لایه‌ی سیلیکون را در دو طول مقیاس متفاوت نشان می‌دهد. این تصاویر که به وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی[2] گرفته شده است، یک نمونه از سطح را با اسکن‌های متفاوت نشان می‌دهد. وقتی به نمونه در مقیاس μm 90×90 نگاه می‌کنیم، اُفت خیزهای شدید ارتفاع سطح کاملاً مشهود است. سطح کاملاً ناهموار به نظر می‌رسد. در حالی اگر در مقیاس کوچکتری به همان سطح نگاه کنیم، μm 3×3، خیلی صاف و هموار خواهد بود. بنابراین در توصیف یک سطح ناهموار، برای اینکه اطلاعات به درستی منتقل شود، ناحیه‌ای که سطح در آن مورد مطالعه قرار می‌گیرد، باید مشخص شود (ونگ، 2001) .



شکل1-1. تصویر AFM زیر لایه سیلیکون در دو مقیاس متفاوت (ونگ[5]، 2001).

قید دیگر، قدرت تفکیک[1] وسیله یا ابزاری است که برای اندازه‌گیری به کاربرده می‌شود. برای یک سطح، ابزارهای مختلف اندازه‌گیری با قدرت تفکیک‌های مختلف، اطلاعات متفاوتی را از ناهمواری

[1] Resolution

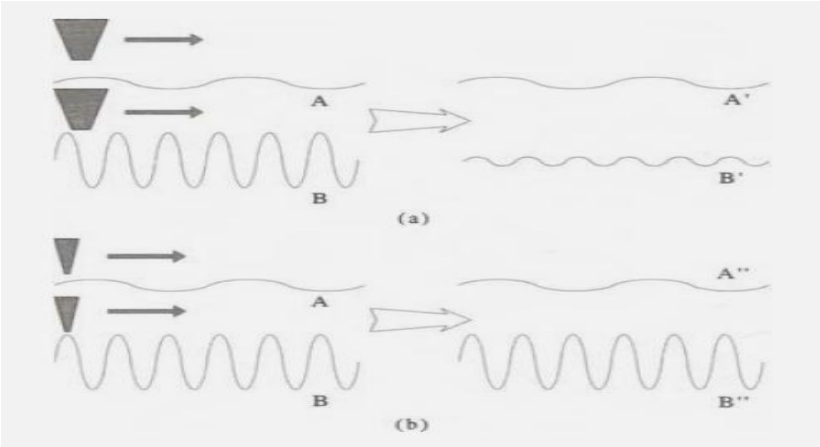
سطح بدست می‌دهند. این شرایط در شکل (1-2) به خوبی نشان داده شده است. در این شکل از دو سوزن متفاوت، برای خواندن دو سطح مختلف استفاده شده است. سطح A طول موج بزرگی در مقایسه با شعاع هر دو سوزن دارد. بنابراین تصویر گرفته شده از هر دو سوزن یکسان است. در حالی که طول موج سطح B از شعاع سوزن کند، کوچکتر بوده و از شعاع سوزن تیز، بزرگتر است. در نتیجه این دو سوزن، سطح B را به دو صورت کاملاً متفاوت می‌بینند. بنابراین ابزارهای مختلف با قدرت تفکیک‌های متفاوت، اطلاعات متفاوتی را از ناهمواری یک سطح به دست می‌دهند (ونگ، 2001).

هر وسیله اندازه‌گیری دارای دو حد تفکیک است. یکی تفکیک عمودی، که کوچک‌ترین تغییرات ارتفاع سطح را تعیین می‌کند و دیگری تفکیک افقی که کوچک‌ترین ناحیه از یک سطح را که دستگاه می‌تواند به آن برسد را مشخص می‌کند. بنابراین مهم است که قدرت تفکیک عمودی و افقی دستگاه اندازه‌گیری مورد نظر کاملاً مشخص باشد. در اندازه‌گیری یک سطح ناهموار، کوچکترین اندازه‌ای که دستگاه گزارش می‌دهد برابر قدرت تفکیک عمودی و بزرگترین مقدار آن برابر با اندازه‌ی نمونه است (ونگ، 2001).

همچنین روش‌های متفاوتی برای دسته‌بندی سطوح ناهموار وجود دارد. می‌توان سطوح ناهموار را با در نظر گرفتن خواص آماری‌شان دسته‌بندی کرد. در این حالت سطوح ناهموار به دو دسته‌ی، تصادفی[1] و معین[2]، تقسیم می‌شوند.

[1] Random
[2] Deterministic

در سطوح ناهموار معین، نوسانات ارتفاع سطح، به وسیله‌ی تابع مشخصی از مکان سطح تعریف می-شود. بنابراین با داشتن ارتفاع سطح، خواص کلی سطح معلوم است. از نقطه نظر آماری، ارتفاعات سطح بین هر دو نقطه دلخواه از سطح ناهموار معین همبسته هستند. اما در یک سطح ناهموار تصادفی، تابع نوسانات ارتفاع سطح مشخص نیست و بهترین راه برای توصیف ارتفاع سطح، استفاده از یک میدان تصادفی[1] است (ونگ، 2001).



شکل 1-2. اثر بزرگ‌نمایی ابزار اندازه‌گیری (ونگ، 2001).

ویژگی پیوستگی سطح، یکی دیگر از راه‌های طبقه‌بندی سطوح است. سطح‌ها می‌توانند پیوسته یا گسسته باشند. وقتی روی یک ناحیه از سطح که به مراتب از مقیاس اتمی بزرگتر است، متمرکز می-شویم، در این ناحیه می‌توان سطح را پیوسته تلقی کرد. در غیر این صورت سطح گسسته است.

[1] Random field