

جریان گرمایونی در نانوساختارهای اکسید موضعی تیتانیم

امیر خانی

amirkhani20002000@yahoo.com

دانشگاه صنعتی شیراز

امین تلگینی

mn_talgini@yahoo.com

دانشگاه صنعتی شیراز

چکیده

جریان گرمایونی در نانوساختارهای اکسید موضعی تیتانیم بررسی شده است. این نانوساختارها توسط میکروسکوپ نیروی اتمی ایجاد میشوند و پیوند تونلی یکی از مهمترین انواع ترانزیستورهای تک الکترونی با دمای عملکرد بالا، را تشکیل میدهند. تحلیل جریان گرمایونی در این پیوندهای تونلی نه تنها برای تعیین عملکرد چنین ترانزیستورهای تک الکترونی از اهمیت ویژهای برخوردار است، بلکه میتوان با اندازه گرفتن آن برخی مشخصات فیزیکی سد را بدست آورد. در اینجا ارتفاع سد با استفاده از نتایج یک آزمایش بررسی و محاسبه و امکان تعیین ثابت گذردهی بحث شده است.

واژگان کلیدی

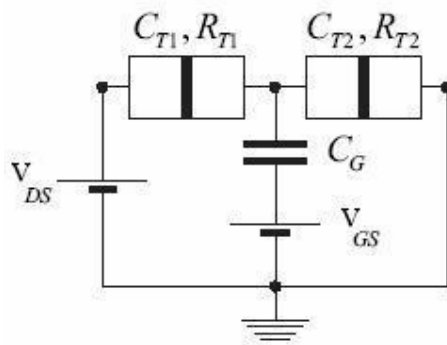
Thermionic Current, Tunnel Junction, Single Electron Transistor, Atomic Force Microscope

۱- مقدمه

میکروالکترونیک در جهت تکامل بسوی ایجاد ابعاد ریزتر، سرعت بالاتر، مصرف کمتر و قیمت نازلتر میباشد. گرچه این تکامل تاکنون در چهار چوب فناوری CMOS ادامه داشته، اما کاهش ابعاد ترانزیستورهای نیمه هادی اثرمیدانی از ۳۰ نانومتر به پایین به دلیل قوانین فیزیکی حاکم بر گذار pn ناممکن مینماید (۱). به این دلیل فناوریهای نوین برای جانشینی CMOS مورد بررسی قرار گرفته است.

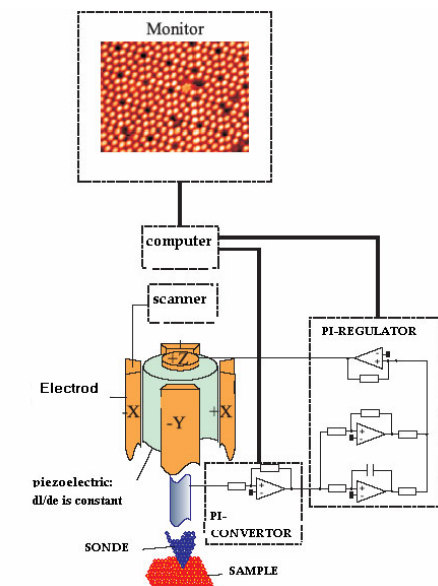
یکی از این فناوریها ساخت ترانزیستورهای تک الکترونی (Single Electron Transistor, SET) (2) میباشد. یک ترانزیستور تک الکترونی از دو پیوند تونلی (Tunnel Junction) (3)(4)(5) و یک خازن تشکیل شده است. دو پیوند تونلی بطور سری به هم وصل شده اند. نقطه تماس این دو پیوند تونلی با یکدیگر به یک خازن وصل است. این نقطه را جزیره مینامند. یک پیوند تونلی معمولاً از ساختارهای هادی یا نیمه هادی که بوسیله یک قشر نازک نارسانا از یکدیگر جدا شده اند تشکیل شده است. شکل ۱ یک ترانزیستور تک الکترونی را نشان میدهد. دو پیوند تونلی به VDS و خازن به VGS وصل است. با تغییر VGS میتوان ترانزیستور را باز و بسته کرد. هر بار که ترانزیستور باز و بسته میشود تعداد الکترونهای

جزیره دقیقا یک عدد افزایش یا کاهش مییابد پیوندهای تونلی یک SET باید دارای ابعاد بسیار کوچک باشند تا انرژی جهشی حرارتی (Thermal Fluctuation) الکترون کمتر از انرژی ذخیره ای (Charging Energy) پیوند تونل باشد. هر چه ساختار پیوند تونلی کوچکتر باشد انرژی ذخیره ای آن بالاتر است. لذا یک SET نه تنها در ابعاد ۳۰ نانومتر به پایین کارایی دارد بلکه برای بالا بردن دمای کار آن باید ابعاد ساختارهای SET را از این حدود نیز پایین تر آورد. این پایین آوردن ابعاد یکی از معضلات است که به فناوری نانو بسیار پیشرفته نیاز دارد.



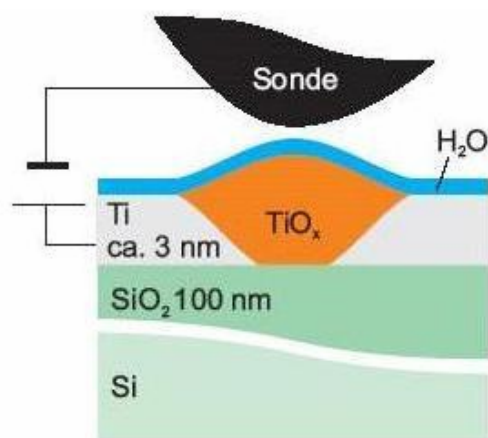
شکل (۱) - ترانزیستور تک الکترونی

یکی از ابزارهای قوی مورد استفاده در نانو سازندگی، میکروسکوپ (Atomic Force Microscope, AFM) است. میکروسکپ نیروی اتمی یکی از انواع میکروسکپیهای روبشگر شناسا (Scanning Probe Microscope, SPM) (6)(7) میباشد. شکل ۲ اصول کار یک AFM را نشان میدهد (۶)(۷). قسمت اصلی یک AFM الکترودهای پیزو است. پیزو ماده ای است که با گذاشتن ولتاژ روی آن میتوان ابعادش را با دقت آنگستروم \AA و متناسب با ولتاژ تغییر داد. یک آنگستروم برابر یک دهم نانومتر و حدود یک چهارم فاصله دو اتم سیلیسیم میباشد. نوک بسیار ریز یک شناسا که شعاعی حدود nm ۱۰ دارد در سه جفت الکتروود پیزو (X, Y, Z) تعبیه شده است. این نوک توسط تغییر ولتاژ بر روی الکتروود پیزو Z به سطح نمونه مورد بررسی نزدیک میشود. در فاصله های بسیار کم نوک شناسا بوسیله نیروهای واندروالسی به سوی سطح نمونه جذب میشود. مقدار این نیرو توسط یک شعاع لیزر که بر روی شناسا متمرکز شده و بر یک دیود نوری انعکاس مییابد، بطور الکتریکی اندازه گیری میشود و فاصله بین سطح و نوک شناسا، هنگامی که نوک شناسا نقاط سطح را با تغییر ولتاژ روی الکترودهای X, Y روبش (Scann) میکند، توسط یک تنظیم گر ثابت نگه داشته میشود. ولتاژ روی الکتروود Z در هر نقطه بیانگر پستی و بلندی (Topography) سطح است. این مقادیر ولتاژ توسط رایانه به رنگهای تیره و روشن تبدیل میشود که معمولا رنگهای تیره فرورفتگیها و رنگهای روشن برجستگیهای سطح را نشان میدهد. با این میکروسکوپ میتوان با دقت آنگستروم و مادون نانومتر سطح را بررسی کرد. گذر دهی نسبی سد باید با ایجاد فناوری لازم ابعاد TiO_x را در درون Ti مشخص کرد.



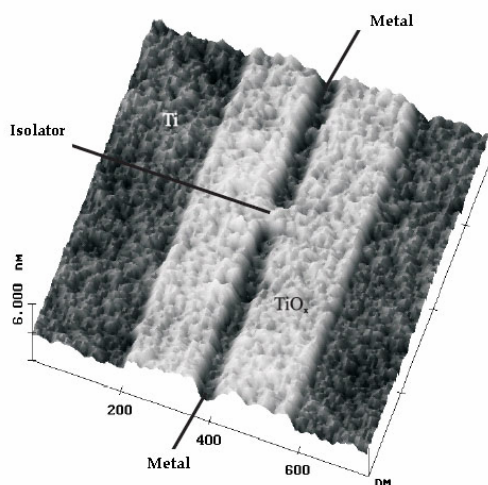
شکل (2) - میکروسکوپ نیروی اتمی

جریان گرمایونی که در ترانزیستورهای تک الکترونی یک جریان ناخواسته است علاوه بر بررسی سطح میتوان با روشهای متفاوت از یک AFM برای ایجاد نانو ساختارها استفاده کرد. یکی از این روشها ایجاد اکسید موضعی است که در شکل ۳ نشان داده شده است. در این روش پس از ایجاد قشری از اکسید به ضخامت ۱۰۰ nm بر روی سیلیسیم و نشانیدن ۳ nm تیتانیم بر روی اکسید، بین نوک شناسا و تیتانیم یک ولتاژ منفی گذاشته میشود. این ولتاژ باعث الکترولیز لایه ای از آب میشود که بطور طبیعی و با ضخامتی اندک بر روی تمام سطوح پیرامون وجود دارد. یونهای اکسیژن در درون تیتانیم Ti نفوذ کرده آن را بطور موضعی با ابعادی حدود فقط چند نانومتر اکسید TiO_x میکنند. X شاخص این نکته است که تیتانیم و اکسیژن با نسبتهای گوناگون ترکیب میشوند و این نسبت در مورد اکسید موضعی هنوز شناخته نشده است. ابعاد TiO_x در بستر Ti بستگی به شکل نوک شناسا دارد که فقط قسمت خارجی آن که از سطح خارج شده با روشهای موجود فناوری قابل اندازه گیری میباشد.



شکل (3) - اکسید موضعی تیتا نیوم

اکسید تیتانیوم حجم بیشتری نسبت به تیتانیوم دارد و به این دلیل اکسید موضعی تیتانیوم بصورت برجستگی جلوه میکند. از این نانو ساختار اکسید موضعی میتوان برای ایجاد پیوندهای تونلی متشکل از فلز-اکسید-فلز استفاده کرد. شکل ۴ یک چنین پیوند تونلی را نشان میدهد.



شکل (۴) - پیوند تونلی

ساختارهای پیوند تونلی متشکل از اکسید موضعی تیتانیوم که توسط میکروسکپ نیروی اتمی ایجاد میشوند، برای ساخت و بررسی عملکرد ترانزیستورهای تک الکترونی دمای بالا از اهمیت ویژه ای برخوردارند. جریان گرمایونی و جریان تونلی دو جریان عمده در این ساختارهای تونلی هستند که نسبت آنها در دماهای متفاوت یکی از عوامل تعیین کننده دمای کار میباشد. با استفاده از جریان گرمایونی همچنین میتوان برخی از خصوصیات فیزیکی سد پیوند تونلی را بدست آورد.

۲- تئوری

تونل، مکانیزم اصلی عبور جریان در پیوندهای تونلی ترانزیستورهای تک الکترونی میباشد. اما در دامنه ولتاژهای پایین که کران بالای آن توسط ارتفاع سد و عرض آن تعیین میشود، مقدار جریان گرمایونی بر جریان تونلی افزونی دارد. معادله زیر رابطه بین شدت جریان گرمایونی و ارتفاع موثر سد $\bar{\phi}$ را بیان میکند:

$$J = A^* T^2 \exp\left(-\frac{\bar{\phi}}{kT}\right) \quad (۱)$$

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (۲)$$

که

ثابت موثر ریچاردسون و

$$\bar{\phi} = \phi_0 - \Delta\phi$$

ارتفاع موثر سد میباشد. مقدار $\Delta\phi$ بیانگر تاثیر میدان الکتریکی و نیروی تصویر بار بر تغییر شکل سد است:

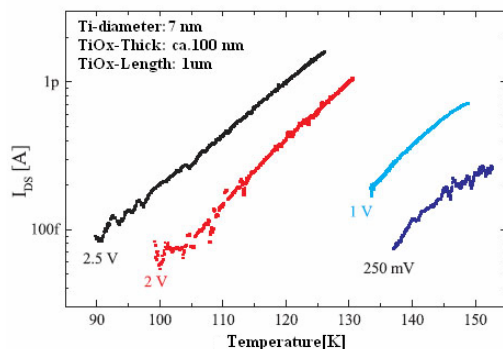
$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{q^3 E}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0}} \quad (۳)$$

که $E = V/d$ و d عرض سد است. هرچه ارتفاع سد کمتر و عرض آن بیشتر باشد، دامنه ولتاژی که به ازای آن، مقدار جریان گرمایونی بر جریان تونلی افزونی دارد گسترده تر است.

از جریان گرمایونی که در ترانزیستورهای تک الکترونی یک جریان ناخواسته است میتوان برای یافتن مشخصات فیزیکی سد مثل ارتفاع Φ_0 و ثابت گذردهی نسبی آن ϵ_r استفاده کرد. دانستن این کمیتها برای محاسبه مشخصات یک ترانزیستور تک الکترونی از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

۳- آزمایش

با گذاشتن ولتاژ ثابت روی دو سر یک ساختار تیتانیوم Ti اکسید تیتانیوم TiO_x تیتانیوم Ti، با تغییر دما در دامنه ۹۰ تا ۱۵۰ کلوین جریانی را که از اکسید تیتانیوم TiO_x میگذرد اندازه گیری شده و این آزمایش برای ولتاژهای ۲، ۵، ۱۰، ۲۰ V، ۲۵۰ mV و ۱ V تکرار شده است. شکل ۵ نتایج این آزمایش را که بر روی یک اکسید تیتانیوم به ضخامت ۷ nm،



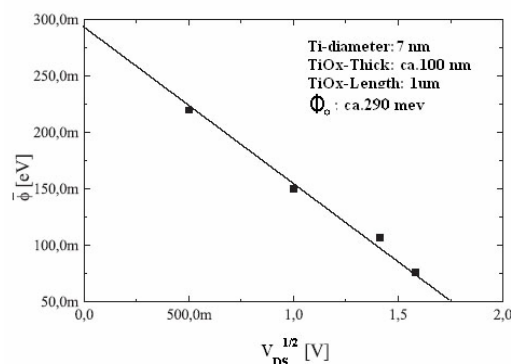
عرض ۱۰۰ nm و طول ۱ μm انجام شده نشان میدهد.

-()

۴- تحلیل

جریان گرمایونی که در ترانزیستورهای تک الکترونی یک جریان ناخواسته است، میتواند برای یافتن مشخصات فیزیکی سد پیوندهای تونلی این ترانزیستورها مثل ارتفاع Φ_0 و همچنین بادر دست داشتن ابعاد این پیوندها برای بدست آوردن ثابت گذردهی نسبی سد ϵ_r مورد استفاده قرار گیرد. در مورد خاص پیوند تونلی Ti-TiO_x-Ti بدلیل فوق فقط میتوان ارتفاع سد را بدست آورد. برای بدست آوردن ثابت گذردهی نسبی سد ϵ_r باید با ایجاد فناوری لازم ابعاد TiO_x را در درون Ti مشخص کرد.

با توجه به شکل ۵، که منحنی مشخصه جریان بر حسب دمای ساختار بالا را برای ولتاژهای گوناگون نشان میدهد، مشاهده میشود که جریان بوضوح با افزایش دما زیاد میشود. ارتفاع موثر Ti-TiO_x ، $\bar{\phi}$ طبق رابطه ۳ و ۴ تابعی از ولتاژ می باشد. با استفاده از رابطه ۱ می توان ارتفاع موثر Ti-TiO_x را به ازای ولتاژهای مختلف بدست آورد: برای هر ولتاژ، نقاط مختلفی روی منحنی در نظر گرفته شده و مقادیر جریان و دمای این دو نقطه در رابطه ۱ گذاشته میشود. سپس با گرفتن لگاریتم طبیعی از نسبت دو جریان مقدار $\bar{\phi}$ برای این ولتاژ از یک معادله با یک مجهول براحتی بدست میاید. شکل ۶ نقاط مشخصه ارتفاع موثر بر حسب ریشه دوم ولتاژ را نشان میدهد. با استفاده از رابطه ۳ و ۴ مقدار یا ارتفاع سد Ti-TiO_x را میتوان با گذراندن یک خط از این نقاط، در نقطه برخورد آن خط و محور عمودی حدود ۲۹۰ meV تخمین زد. این مقدار با مقادیر مراجع دیگر (۸)(۹) بخوبی مطابقت میکند. از رابطه ۴ همچنین میتوان برای بدست آوردن ثابت گذردهی نسبی TiO_x ، ϵ_r استفاده کرد. ولی از آنجا که ابعاد TiO_x در بستر Ti، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده، مشخص نیست، ابتدا باید با دادن برشی عمود بر سطح و در جهت گذار Ti-TiO_x-Ti ابعاد TiO_x را در درون Ti مشخص کرد. برای این منظور هنوز راه حل فناوری مشخصی یافت نشده است.



-()

۵- نتیجه گیری

از جریان گرمایونی که در ترانزیستورهای تک الکترونی یک جریان ناخواسته است میتوان برای یافتن مشخصات فیزیکی سد پیوندهای تونلی این ترانزیستورها مثل ارتفاع Φ_0 و بادر دست داشتن ابعاد این پیوندها برای بدست آوردن ثابت گذردهی نسبی سد ϵ_r استفاده کرد در مورد خاص پیوند تونلی $\text{Ti-TiO}_x\text{-Ti}$ بدلیل فوق فقط میتوان ارتفاع سد را بدست آورد. برای بدست آوردن ثابت گذردهی نسبی سد باید با ایجاد فناوری لازم ابعاد TiO_x را در درون Ti مشخص کرد.

سپاسگزاری

در پایان لازم می دانیم از تلاشهای استاد گرامی، دکتر امیر حسین حمیدی که ما را در تهیه این مقاله یاری رساندند تشکر نماییم.

مراجع

- [1] Y.Taur,D.A.Buchanan,W.chen,D.J.Frank,k.Elismail,s.-H.Lo,G.A.A.Sai-Halash,S.G.Wiswanathan,H.-J.C.Wann,s.j.Wind ,and h.-s.wong.proc.IEEE 85,486,(1997)
- [2] S.Altmeyer,A.Hamidi,B.Spangenberg,and H.kurz,,,Single Electron Tunneling in metallic Nanostructuies at Kelvin Temperatures,Quantum Devices and Circuits,ed.K.Ismail ,S.Bandyopadhyay,and J.p.Leburton,Imperial College Press,p.160,(1996).
- [3] D.V.Arvin,and K.K.Likharev,J.Low Temp.Phys.,62,345(1986).
- [4] K.K.Likharev,IEEE Trans.Magn.23,1142(1987).
- [5] D.V.Arvin,and K.K.Likharev,Single-electrics:Corelated transfer of single electrons and Cooper pairs in small tunnel junction in Mesoscopic Phenomena in solids,B.Altshuler,P.Lee,and R.Webb,Eds.Amsterdam,The Netherlands:Elsiver,1991,PP.173_271.
- [6] G.Binning,H.Rohrer,Ch.Gerber,and E.Weibel,Phys.Rev.Lett.49,57(1982).
- [7] G.Binning and H.Rohere,Surface Sci.126,236(1983).
- [8] k.Matsumoto,s.Takahashi,M.Ishi,M.Hoshi ,A.Kurkawa,S.Ichimura,A.Ando,Jpn.J.Appl.Phys.34,1387(1995).
- [9]B.Irmer,M.Kehrle,and J.P.Kotthaus,Appl.Phys.lett. 71,1733(1997).