تعیین چگالي سطحي بارهاي میانگاه اتصال Ti/Si رونشانده بروش پاشش پلاسمایي

صادق زاده ، محمد علي ؛ غریب شاهي ، لیلا ؛ ابوالحسني ، الهام
گروه فیزیك ، دانشگاه یزد ، یزد

چکیده

در این مقاله با پاشش پلاسمایي Ti بر روي سطح تمیزSi ساختار دور آلاییده معکوس p-Si/SiGe/Si اتصال فلز – نیمه رساناي Ti/Si بعنوان دریچه ایجاد گردید. در لایه آلیاژي این ساختار یك گاز حفره اي دو بعدي (2DHG) با چگالي سطحي n_s وجود دارد و با اعمال ولتاژ مناسب به دریچه V_g مي توان چگالي آن را تغییر داد. با برازش نظري نتایج تجربي $n_s - V_g$ به محاسبه چگالي سطحي بارهاي میانگاه Ti/Si پرداختیم. نتایج نشان مي دهد که با افزایش ضخامت لایه Si پوششي از ۱۸۰ به ۴۸۰ نانومتر چگالي سطحي بارهاي میانگاه Ti/Si بترتیب از $4.6\times10^{15}\ cm^{-2}$ به $1.95\times10^{15}\ cm^{-2}$ کاهش مي یابد.

Determination of Ti/Si interface charge density grown by plasma deposition

Şadeghzadeh, Mohamad Ali; Ghrib Shahi, Leyla; Abolhasani, Elham
Physics Department, Yazd University, Yazd

.

Abstract

In this paper a Ti/Si metal-semiconductor junction as the gate, was formed by plasma deposition on the clean Si surface of p-Si/SiGe/Si inverted modulation doped structures. There is a two dimensional hole gas (2DHG) in the alloy layer of this structure and its areal sheet density n_s can be controlled by application a voltage to the gate. The Ti/Si interface charge density has been determined by theoretical simulation of experimental results of $n_s - V_g$. The results indicates that as the Si cap thickness increases from 180 up to 480nm, the Ti/Si interface charge density varies from 4.6 down to $1.95\times10^{15}\ cm^{-2}$ respectively.

PACS No. 81.15 Ef

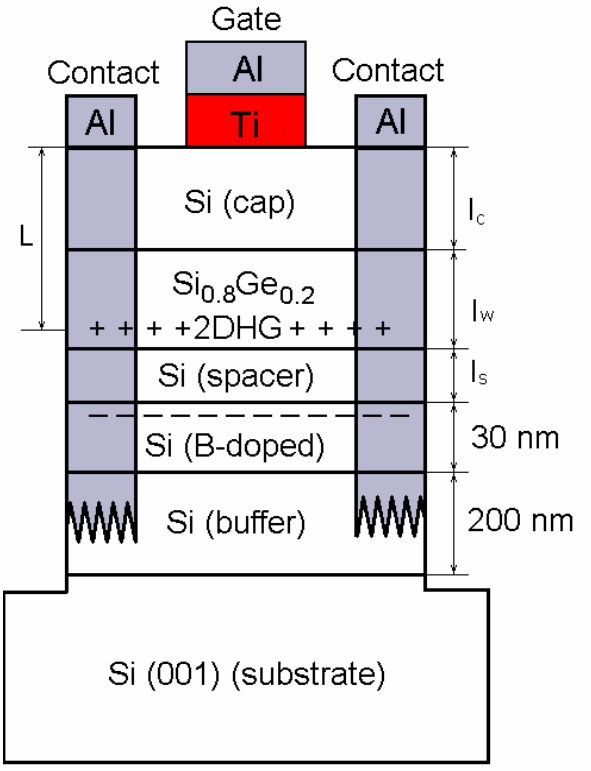
مقدمه

اتصال فلز - نیمه رسانا در ساخت بسیاري از قطعات نیمه رسانا نظیر دیود شاتکي (SD) و ترانسیستور هاي اثر میداني دور آلاییده (MODFET) کاربرد دارد و از آنجایي که تکنولوژي سیلیکان بخش اصلي این صنعت را تشکیل مي دهد لذا یافتن فلز مناسب براي این اتصال و مطالعه فیزیکي میانگاه مذکور از اهمیت خاصي برخوردار است. تجربه نشان مي دهد که فلز تیتانیوم (Ti) بواسطه داشتن تابع کار تقریباً یکسان با سیلیکان و نفوذ ناپذیري آن ، مناسب ترین فلز براي این منظور است. در این مقاله با پاشش پلاسمایي Ti بر روي سطح تمیز ساختار p-Si/SiGe/Si و با برازش نظري نتایج تجربي انتقال بار در ساختار مذکور به تعیین چگالي سطحي بارهاي میانگاه Ti/Si پرداختیم.

روش کار

در این پژوهش از ساختارهاي دور آلاییده معکوس p-Si/$Si_{1-x}Ge_x$/Si که بروش رونشاني پرتو ملکولي MBE رشد یافته اند [۱] استفاده شده است. مطا بق شکل ۱ ابتدا لایه میانگیر (buffer) به ضخامت ۲۰۰ nm و سپس لایه آلا ییده به برون با غلظت اسمي $۲\times۱۰^{۱۸}\ cm^{-۳}$ وضخامت ۳۰ nm بدنبال آن لایه جداگر (spacer) به ضخامت l_s = ۵-۲۰nm و سپس لایه آلیا ژی $Si_{1-x}Ge_x$ با ۰/۱۵< x <۰/۲۵ و ضخامت l_w تقریبی ۱۷-۲۰ nm که بمراتب کمتر از ضخامت بحرانی(۵۰ nm) است و در خاتمه لایه پوششی Si(cap) به ضخامت l_c

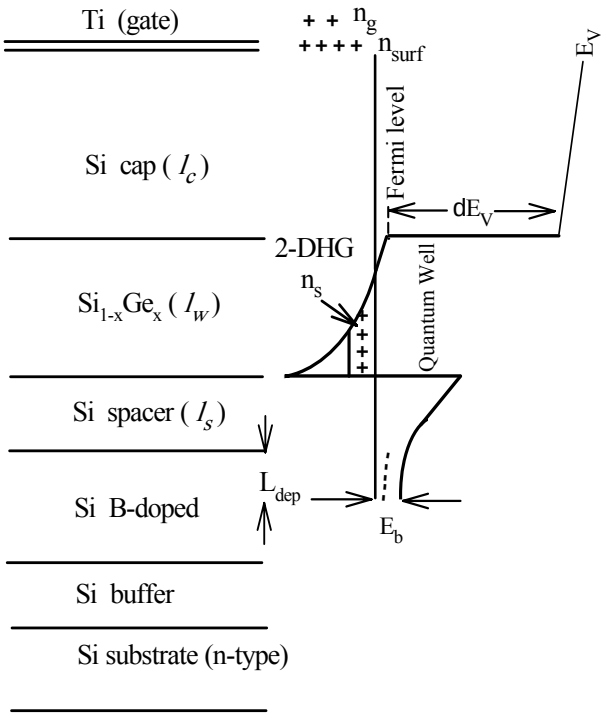
اسمي ۴۰۰nm - ۱۵۰ رشد داده شده اند. در مرحله پس از رشد ، اتصالات (Contact) آلومینیومی و دریچه (Gate) بر روي ساختار مذكور ایجاد شده اند. با پاشش پلاسمايي آلومينيوم (در خلا حدود 10^{-5} *mbar*) بر سطح سيليكان پوششي ، بصورت قرص هايي به قطر 1mm و ضخامت 1µm و پخت در محيط نيتروژن در دماي ۵۵۰ ˚C به مدت يك ساعت ، اتصالات ايجاد مي شوند. در فرايند پخت اتمهاي آلومينيوم به عمق ساختار نفوذ كرده و اتصال الكتريكي از سطح به گاز حفره اي برقرار مي شود. پس از ایجاد اتصالات ، عملیات دریچه سازي با قرار دادن نقاب فلزي ويژه بر سطح ساختار شروع مي شود. سپس با پاشش پلاسمايي Ti و بدنبال آن Al (با آهنگ رونشاني4µm/h) به ضخامتهاي تقريبي 1µm و پخت در دماي ۱۵۰ ˚C به مدت ۱۰ دقيقه ، اتصال Ti/Si ايجاد مي شود. لازم به ذكر است رونشاني لايه آلومينيوم بر روي تيتانيوم فقط بمنظور لحيم كاري سيم طلا انجام شده است.



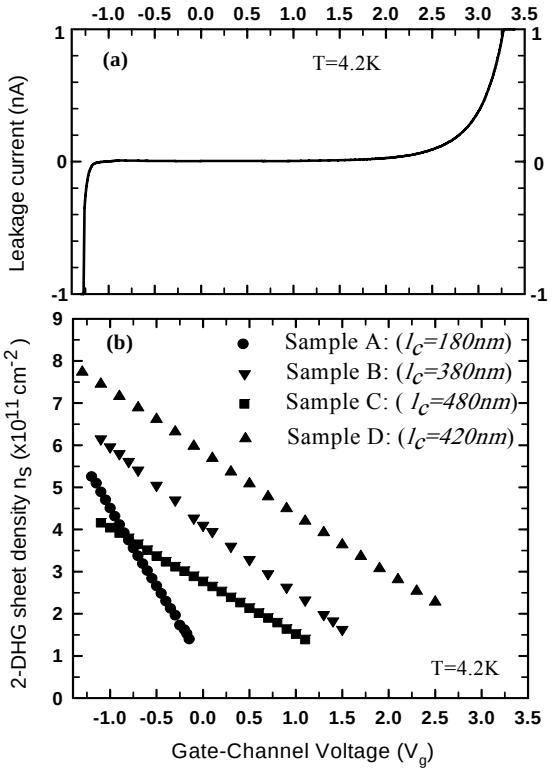
شكل۱ :ترتيب لايه گذاري و اتصالات الكتريكي (contact) و فلز – نيمه رسانا (gate) در ساختارهاي تحت مطالعه..

در آخرين مرحله با نقاب كشي فتوليتوگرافي ، عمليات خورش شيميايي در محلول اسيد HF انجام مي شود و ابزارهاي واندر پاو و هال بار بدست آمد.

تجربه و نظريه نشان مي دهند كه در نوار ظرفيت (E_v) اين ساختار، يك چاه كوانتمی در محل لايه آلياژی وجود دارد و با انتقال حفره های حاصل از ناخالصی های نوع p در لايه آلاييده Si(B-doped) به ترازهای كم انرژی درون چاه كوانتمی SiGe (كانال) ، مانند نمودار سمت راست شكل ۲ ، در نزديكی فصل مشترک پای‌ین Si/SiGe يك گاز حفره‌اي دو بعدي (2DHG) تشكيل می شود. دانسيته سطحي n_s گاز حفره‌اي دو بعدي 2DHG متناسب با نسبت Ge در لايه آلياژي x و به ضخامت لايه جداگر l_s و ضخامت لايه پوششي l_c و حتی به غلظت ناخالصی برون B در لايه آلاييده بستگي دارد. دانسيته سطحي گاز حفره ای دو بعدی را می‌توان بوسيله آزمايش هال اندازه گيری با تغيير ولتاژ اعمالي به دريچه نسبت به گاز حفره اي (V_g) كنترل كرد [۲]. در اين پژوهش اتصال Ti/Si در ۴ ساختار دور آلاييده دريچه دار با پارامترهاي x و l_s و l_c متفاوت مطالعه شده است.



شكل۲ :ترتيب لايه گذاري (سمت چپ) و نوار ظرفيت و بارهاي موجود (سمت راست) در ساختار دور آلاييده دريچه دار تحت مطالعه.



شکل۳ (a) جریان نشتي دریچه – کانال در یکي از نمونه‌ها و (b) تغییرات چگالي گاز حفره‌اي نسبت به ولتاژ دریچه در ۴ ساختار تحت مطالعه.

در شکل ۳ (a) جریان نشتي اتصال Ti/Si و گاز حفره اي (2DHG) اندازه گیري شده در دماي هلیوم مایع را مي بینید که در محدوده $-1.2 < V_g < 2.5$ جریان نشتي ناچیز است. در شکل ۳ (b) تغییرات دانسیته سطحي گازحفره‌اي موجود بر حسب ولتاژ دریچه اندازه گیري شده در آزمایش هال در ساختارهاي تحت مطالعه نشان داده شده است.

محاسبات نظري

قانون پایستگي بار در طول این ساختار ایجاب مي‌کند که:

$$N_A L_{dep} = n_s + n_{int} + n_g \qquad (۱)$$

که در آن N_A و L_{dep} به ترتیب غلظت اتم‌هاي برون وضخامت ناحیه تهي شده در لایه آلایش یافته و n_{int} چگالي سطحي بارهاي موجود در میانگاه Ti/Si و n_g بارهاي القایي در اثر اعمال ولتاژ V_g به دریچه Ti است که با بصورت:

$$n_g = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 V_g}{e L} \qquad (۲)$$

که در آن ε_0 و ε_r به ترتیب گذردهي فضاي آزاد و ثابت دي الکتریک نسبي Si و L فاصله بین دریچه فلزي و گاز حفره‌اي دوبعدي که تقریباً معادل با ضخامت لایه پوششي مي‌باشد و e بار الکترون است. در تعادل الکتروستاتیکي داریم:

$$dE_V = E_b + E_0 + (E_f - E_0) + e\Delta V_{spacer} + e\Delta V_B \qquad (۳)$$

که در آن dE_V ناپیوستگي نوار ظرفیت در مرز Si/SiGe که متناسب با x بوده و E_b انرژي بستگي ناخالصي بوون برابر با 30mev و E_0 انرژي اولین زیر تراز حفره در چاه کوانتومي و $e\Delta V_{spacer}$ و $e\Delta V_B$ به ترتیب اختلاف انرژي پتانسیل الکتروستاتیکي در طول لایه جداگر و ناحیه تهي شده لایه آلاییده است و $(E_f - E_0)$ فاصله تراز فرمي تا اولین زیر تراز سهمي است که با معادله زیر داده مي‌شود :

$$E_f - E_0 = \frac{\pi \hbar^2}{m^*} n_s \qquad (۴)$$

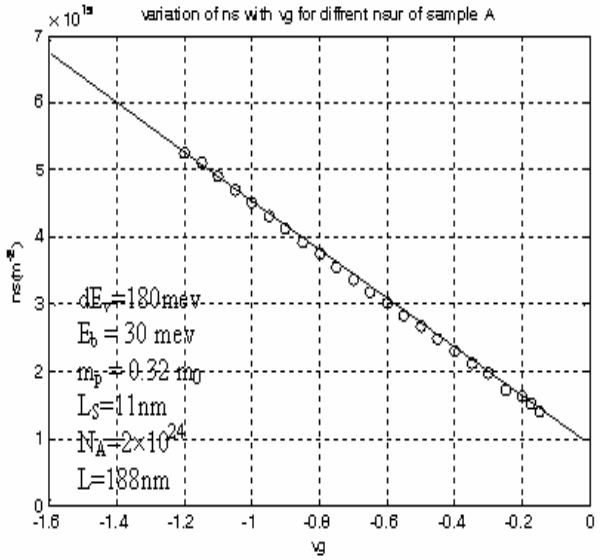
که در آن m^* جرم موثر حفره در چاه کوانتومي SiGe که برابر ۰/۳۲ m_0 مي باشد و $\hbar$ ثابت کاهش یافته پلانک است و E_0 انرژي اولین زیر تراز حفره در چاه کوانتومي از معادله شرودینگر بدست مي‌آید [۲ و۳]:

$$E_0 = \left(\frac{\hbar^2}{2m}\right)^{1/3} \left[\frac{9}{8}\pi e F_{eff}\right]^{2/3} \qquad (۵)$$

که در آن F_{eff} میدان موثر نرمال در چاه بصورت زیر است [۳] :

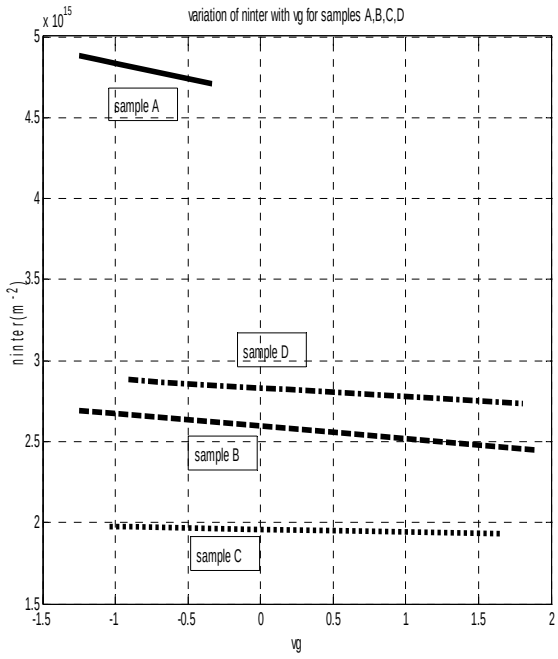
$$F_{eff} = \frac{e}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}\left(n_{int} + n_g + n_s/2\right) \qquad (۶)$$

با حل خود سازگار معادلات شرودینگر و پواسون با مشخص بودن پارامترهاي ساختار (N_A ، l_s ، l_c و dE_V) و ولتاژ دریچه V_g ، ابتدا مقدار بار هاي n_g و n_{int} و سپس با تغییر چگالي گاز حفره اي در یک چرخه محاسباتي مقدار تمام انرژي ها محاسبه ، تا اینکه همگرایي در معادله ۳ بدست آید. در مرحله بعد منحني تغییرات نظري n_s - V_g رسم و با نتایج تجربي مقایسه شده و در صورت عدم انطباق ، پارامتر مناسب را تغییر داده و محاسبات تکرار مي شود. در برازش دقیق نتایج تجربي پي مي بریم که حتي در هر ساختار مقدار n_{int} ثابت نیست بلکه تابعي خطي و نزولي از V_g است.



شکل۴ محاسبات نظري (خط راست) و نتايج تجربي (نماد هاي دايره اي) تغييرات n_s - V_g در ساختار A .

محاسبات نظري تغييرات n_s - V_g و برازش نتايج تجربي براي ساختارهاي تحت مطالعه انجام و يك مورد از آنها در شكل ۴ نشان داده شده است. همچنين تغييرات نظري دانسيته سطحي بارهاي ميانگاه Ti/Si بر حسب V_g براي هر ساختار محاسبه و نتايج در شكل ۵ نشان داده شده است.



شكل۵ محاسبات نظري تغييرات n_{int} - V_g در ساختار هاي تحت مطالعه.

كميت مد نظر $n_{int}(0)$ ، چگالي سطحي بارهاي ميانگاه Ti/Si در حالت عادي (حالت بدون بایاس V_g) بوده است و مقدار متناظر اين كميت براي هر نمونه كه از شكل ۵ بدست آمده است در جدول ۱ ليست شده اند. از مقايسه نتايج در مي يابيم كه با افزايش ضخامت لايه پوششي مقدار $n_{int}(0)$ كاهش مي يابد و از طرفي حاصلضرب $n_{int}(0)$ و l_c براي همه ساختارها تقريباً مقدارثابتي است و اين مؤيد اينست كه فاصله سوراخ تراز فرمي در ميانگاه از لبه نوار ظرفيت مقدار ثابتي است [۵ و۴].

خلاصه اينكه با پاشش پلاسمايي Ti بر روي سطح تميزSi ساختار دور آلاييده معكوس p-Si/SiGe/Si اتصال فلز – نيمه رساناي Ti/Si ايجاد گرديد. با برازش نظري نتايج تجربي n_s - V_g در ساختارهاي دريچه دار p-Si/SiGe/Si-Ti به محاسبه چگالي سطحي بارهاي ميانگاه Ti/Si پرداختيم. نتايج نشان مي دهد كه با افزايش ضخامت لايه Si پوششي از ۱۸۰ به ۴۸۰ نانومتر چگالي سطحي بارهاي ميانگاه Ti/Si بترتيب از 4.6×10^{15} cm^{-2} به 1.95×10^{15} cm^{-2} كاهش مي يابد.

جدول ۱ مقدار نظري l_c و $n_{int}(0)$ در نمونه هاي تحت مطالعه.

نمونه	l_c (nm) (نظري)	چگالي بارهاي ميانگاه Ti/Si در بایاس صفر $n_{int}(0)$
A	۱۸۸	۴/۶۳ × ۱۰^۱۵ (m^{-2})
B	۳۸۶	۲/۵۹ × ۱۰^۱۵ (m^{-2})
C	۴۸۸	۱/۹۵ × ۱۰^۱۵ (m^{-2})
D	۴۶۱	۲/۵۷ × ۱۰^۱۵ (m^{-2})

مرجع‌ها

[۱] Sadeghzadeh, M. A., et al. Appl. Phys. Lett. 74 (1999) 579-81.

[۲] Sadeghzadeh, M.A., Appl. Phys.Lett. 76 (2000) 348-50.

[۳] Emeleus, C. J., et al. J. Appl. Phys. 73 (1993) 3852.

[۴] Getin, H., et al. Physica B: Condenced Matter 346 (2005) 133-41.

[۵] صادق زاده، محمد علي و مهسا فخاريور ؛ "تعيين چگالي بارهاي سطحي Si در ساختارهاي دور آلاييده معكوس p-Si/SiGe/Si " مجلة علوم و محندسي سطح، سال ۱۳۸۵، شمارة ۲ و صفحه ۱ تا ۹ .