

Characterisation of p-Si/SiGe/Si inverted remote doped structures using X-ray and electrical techniques

M. A. Sadeghzadeh

Department of physics, University Of Yazd, Yazd, IRAN

(Received: 30/8/2006, received in revised form: 6/3/2007)

Abstract: In this work, the epitaxially grown, lattice-matched p-Si/Si_{1-x}Ge_x/Si inverted remote doped structures have been characterized using X-ray and electrical techniques. The Si cup layer thickness (l_c) and Ge content (x) have been determined from computer simulation of intensity and angular separation of (004) peaks observed in the X-ray diffraction pattern due to misorientation of corresponding Bragg planes of Si and SiGe layers. On the other hand, a quasi two dimensional hole gas (2DHG) is formed in the compressively strained alloy of these structures and its areal density (n_s) has been measured by Hall experiment and can be controlled by applying a voltage (V_g) to the artificial gate. In the electrical technique, x and l_c characteristics have been obtained using theoretical calculations of the linear dependence of n_s versus V_g . Finally, the uncertainty and partial inconsistent of the results have been explained in terms of the affecting effects.

Keywords: *Si/SiGe structure, Si/SiGe characterisation, X-ray and Hall technique.*



مشخصه‌یابی ساختارهای دورآلاییده وارون p-Si/SiGe/Si با روشهای پرتو X و الکتريکی

محمد علی صادق زاده

یزد - دانشگاه یزد - دانشکده فیزیک

(دریافت مقاله ۱۳۸۵/۶/۸، دریافت نسخه نهایی ۱۳۸۵/۱۲/۱۵)

چکیده: در این کار، ساختارهای رونشاندۀ تکریخت دور آلاییده وارون p-Si/Si_{1-x}Ge_x/Si با پراش پرتو X و روش الکتريکی مشخصه‌یابی شده‌اند. در نتیجۀ سمتگیری متفاوت صفحات براگ همخوان با لایۀ کرنش یافتۀ تراکمی SiGe نسبت به لایۀ Si، می‌توان نسبت Ge (x)، و ضخامت لایۀ پوششی (l_c) را با شبیه‌سازی کامپیوتری شدت و جدائی زاویه‌ای قله‌های (004) مشاهده شده در طرح پراش این ساختارها تعیین کرد. از طرفی در لایۀ SiGe، یک گاز حفره‌ای دو بعدی با چگالی سطحی n_s تشکیل و به روش هال اندازه‌گیری شد و با اعمال ولتاژ متناسب به دریچۀ مصنوعی (V_g) قابل کنترل است. در مشخصه‌یابی به روش الکتريکی، دو مشخصه x و l_c با برازش نظری تغییرات خطی n_s بر حسب V_g به دست آمده‌اند. در خاتمه عوامل مؤثری که موجب عدم قطعیت نتایج هر روش و اختلاف جزئی آنها می‌شود نیز توضیح داده شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: ساختار Si/SiGe، مشخصه‌یابی Si/SiGe، پرتو X و روش هال.

مقدمه

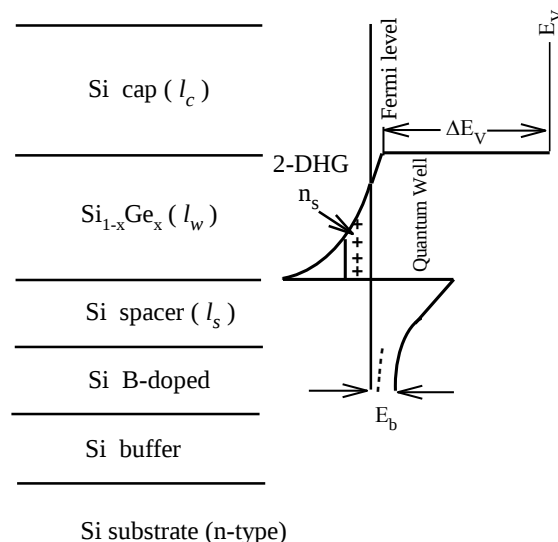
ساختارهای نامتجانس دور آلائیده $n/p\text{-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}/\text{Ga}_{1-x}\text{p-Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ به واسطه کاربردشان در ساخت ترانزیستورهای اثر میدانی (FET^۱) در فیزیک و الکترونیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند [۱]. ویژگی عمومی چنین ساختارهایی در اینست که حامل‌های آزاد در لایه‌ای (چاه کوانتومی QW^۲) دور از آلاینده‌ها (۲۰-۵ nm) قرار دارند، و در نتیجه بر هم‌کنش کولنی آنها کاهش یافته و حامل‌های آزاد (گاز الکترونی و یا حفره‌ای) از تحرک‌پذیری بالایی به ویژه در دماهای پائین برخوردار خواهند بود. در سمت چپ شکل ۱، نمونه‌ای از ترتیب لایه نشانی و در سمت راست آن نوار ظرفیت یک ساختار دور آلائیده $p\text{-Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ نشان داده شده‌اند. هر چند که میانگین ثابت شبکه $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ کپه‌ای از ثابت شبکه Si بزرگتر است، ولی اگر ضخامت لایه آلیاژی از مقدار بحرانی (که به نسبت Ge، x) و دمای رشد بستگی دارد و برای $x=0.2$ و دمای رشد 600°C این ضخامت در حدود ۵۰ nm است) کمتر باشد، رشد لایه SiGe روی لایه Si به صورت تکریخت (همشبهه LM^۳) خواهد بود [۲] و لایه آلیاژی تحت کرنش تراکمی قرار داشته و در نتیجه؛ اولاً میانگین ثابت شبکه آلیاژ در راستای رشد بیش از لایه Si شده، و ثانیاً در نوار ظرفیت (E_v) ساختار، یک چاه کوانتومی در محل لایه آلیاژی شکل می‌گیرد [۳] و با انتقال حفره‌های حاصل از ناخالصی-های نوع p در لایه آلائیده Si(B-doped) به ترازهای کم انرژی درون چاه کوانتومی SiGe، مانند نمودار سمت راست شکل ۱، نزدیک به فصل مشترک پایین Si/SiGe یک گاز حفره‌ای دو بعدی (2DHG) تشکیل می‌شود. این ساختارها وارون خوانده می‌شوند و روی بستر Si(substrate) (۰۰۱) نوع n به روش MBE^۴ رو نشانی شده‌اند [۴]. لایه نشانی که در دانشگاه واریک صورت گرفت، به این ترتیب بود که نخست لایه زیرین (buffer) به ضخامت ۲۰۰ nm و سپس لایه آلائیده به برون با غلظت 10^{18} cm^{-3} (2 ± 0.5) و ضخامت ۳۰ nm، به دنبال آن لایه جدا کننده (spacer) به ضخامت ۵-۲۰ nm، $I_s=$ ، سپس لایه آلیاژی $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ با $0.15 < x < 0.25$ و ضخامت تقریبی ۱۷-۲۰ nm که به مراتب کمتر از ضخامت بحرانی (۵۰ nm) است، و بالاخره لایه پوششی Si(cap) به ضخامت ۴۰۰-۱۵۰ nm رشد داده شدند. از آنجا که روشهای رشد رونشانی بسیار حساس بوده و ساختار رشد

1- Field Effect Transistor

2- Quantum Well

3- Lattice Matched

4- Molecular Beam Epitaxy

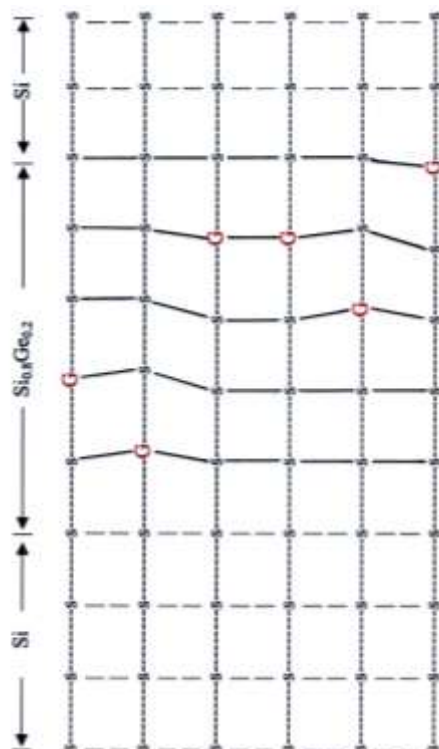


شکل ۱ ترتیب لایه‌ها (چپ)، و نوار ظرفیت در ساختار دور آلائیده وارون p-Si/SiGe/Si (راست).

یافته اغلب با نسخه طراحی شده متفاوت است، لذا اولین هدف پس از رشد، مشخصه‌یابی ساختار است و در این مقاله به ارائه نتایج روش پرتو X و روش الکتریکی در تعیین دو مشخصه بنیادی نسبت Ge در آلیاژ x و ضخامت لایه پوششی l_c در ساختارهای دور آلائیده وارون p-Si/Si_{1-x}Ge_x/Si می‌پردازیم.

مشخصه‌یابی به روش پرتو X

از آنجاکه ضخامت لایه آلیاژی (۲۰ nm) در ساختارهای نامتجانس Si/SiGe/Si مورد مطالعه به مراتب کمتر از ضخامت بحرانی است، لذا رشد تکریم LM صورت می‌گیرد و ثابت شبکه آلیاژ در صفحه رشد با ثابت شبکه Si یکسان بوده و کرنش تراکمی حاصل موجب می‌شود تا میانگین ثابت شبکه آلیاژ در راستای رشد بیش از Si باشد. شکل ۲ طرحواره‌ای دو بعدی از ساختار Si/SiGe/Si را نشان می‌دهد که درصد Ge لایه آلیاژی آن برابر با ۲۰ است. تفاوت در سمتگیری صفحات براگ وابسته به لایه Si پوششی نسبت به لایه کرنش یافته SiGe، موجب می‌شود که در طرح پراش این ساختار در کنار هر قله مربوط به لایه Si، قله ثانویه وابسته به لایه آلیاژی Si_{1-x}Ge_x ظاهر شود. نسبت Ge در آلیاژ x را می‌توان مستقیماً با استفاده از فاصله



شکل ۲ طرحواره‌ی دو بعدی از ساختار نامتجانس $\text{Si}/\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}/\text{Si}$ که در آن S نماد اتم Si و G نماد اتم Ge است.

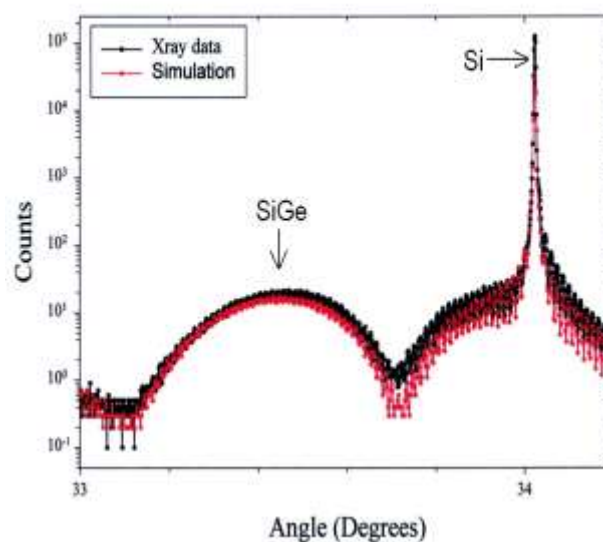
جدائی زاویه‌ای مثلاً قله‌های (004) دو لایه به دست آورد [۵ و ۶]. از طرفی شدت پرتو پراش یافته از ساختار که به ضخامت لایه‌ها بستگی دارد را می‌توان با کاربرد رابطه زیر برای لایه‌های پی در پی و سرجمع کردن آنها به دست آورد [۶]:

$$R_n = \frac{R_{n-1} \sqrt{B^2 - EA} + i(BR_{n-1} + E) \operatorname{tg}(D \sqrt{B^2 - EA}(\Delta z_n))}{\sqrt{B^2 - EA} + i(AR_{n-1} + B) \operatorname{tg}(D \sqrt{B^2 - EA}(\Delta z_n))} \quad (1)$$

که در آن R_n نسبت دامنه پرتو X پراش یافته به دامنه پرتو تابشی در سطح بالائی لایه n ام، و R_{n-1} نسبت دامنه‌ها در زیر آن لایه، Δz_n ضخامت آن، و پارامترهای A و B و D و E به ویژگیهای اپتیکی لایه و پرتو بستگی دارند. در این روش R_0 نسبت دامنه‌ها در سطح زیرآیند (یا

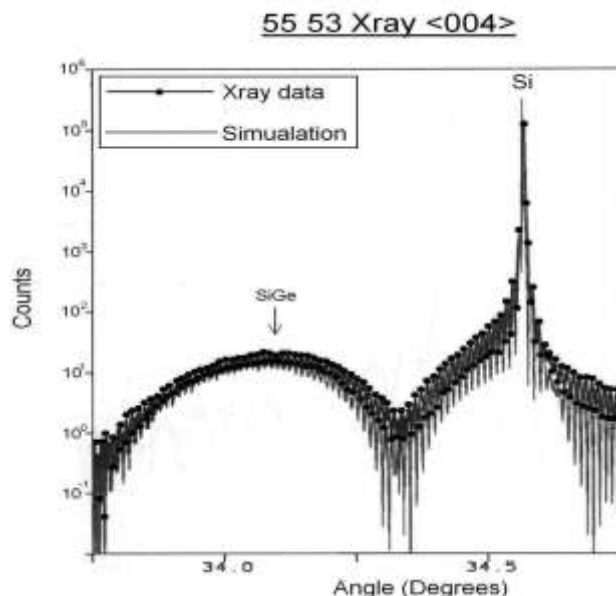
بستر) Si است که بلوری نامحدود و کامل فرض می‌شود. طرح‌های پراش ساختارهای مورد مطالعه با دستگاه پراش سنج PHRD^۵ مجهز به چشمه^۶ CuK α_1 با طول موج ۱٫۵۴۰۵۹۷ آنکستروم، به رویش $\Omega/2\theta$ تهیه و با نمونه شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار RADS^۷ محصول کمپانی BSI^۷ برازش شده‌اند. با این نرم افزار مشخصه‌های x و l_c و l_w (ضخامت لایه آلیاژی) را به روش سعی و خطا چنان تغییر می‌دهیم که الگوی شبیه‌سازی شده و طرح پراش حاصل از PHRD بهترین برازش را داشته باشند. در شکل‌های ۳ و ۴ دو نمونه مربوط به قله (004) را که مناسب‌ترین و کاربردی‌ترین قله برای چنین ساختارهایی است [۵ و ۷] نشان می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود قله (004) در حوالی ۳۴° قرار دارد و تفاوت جزئی ناشی از آثار کج‌شدگی است [۵]. از مقایسه فاصله جدائی قله‌های Si و SiGe شکل ۳ نسبت به شکل ۴ در می‌یابیم که نسبت Ge در ساختار ۵۶/۱۶ بیشتر از ۵۵/۵۳ است و پهن‌شدگی بیشتر قله SiGe در ساختار ۵۶/۱۶ نیز به همین دلیل است.

56_16 Xray <004>



شکل ۳ نتایج تجربی پراش پرتو X (خطوط و دوائر پر رنگ) و محاسبات مدل شبیه سازی (خطوط و دوائر کم رنگ) از قله های (004) ساختار ۵۶/۱۶.

-
- 5- Philips High Resolution Diffractometer
 6- Rocking Curve Analysis by Dynamical Simulation
 7- Bede Scientific Instruments Lt.d

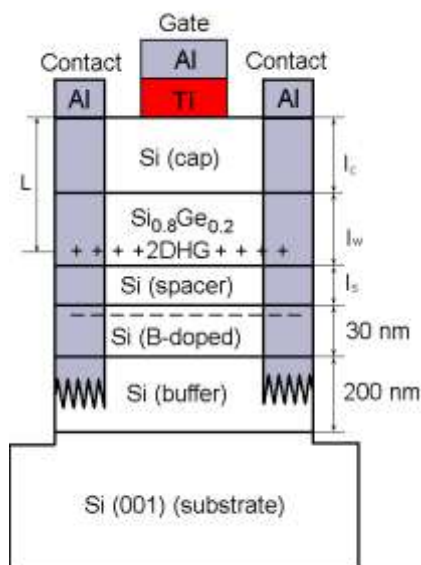


شکل ۴ نتایج تجربی پراش پرتو X (خطوط و دوائر پر رنگ) و محاسبات مدل شبیه سازی (خطوط کم رنگ) از قله های (004) ساختار ۵۵/۵۳.

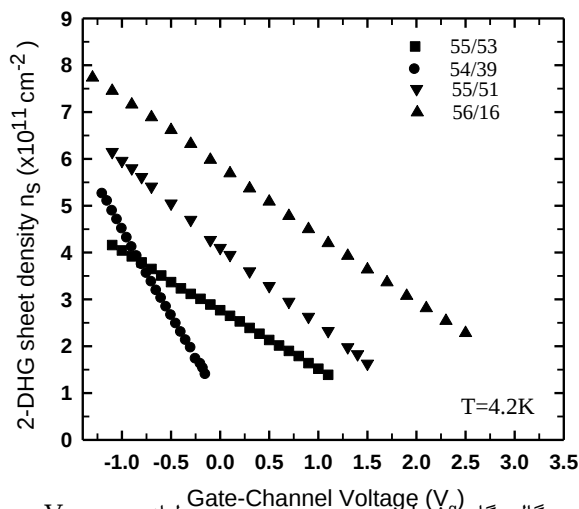
مشخصه یابی به روش الکتريکی

شکل ۵ ساختار دريچه داری را نشان می‌دهد که اتصالاتی (Contact) آلومینیومی و دريچه‌ای (Gate) پس از رشد روی ساختار یاد شده ایجاد شده‌اند [۸]. با پاشیدن آلومینیوم بر سطح سیلیکان، پوششی به صورت قرص‌هایی به قطر 1mm و ضخامت 1μm و پخت در محیط ازت در دمای ۵۵۰ °C به مدت یک ساعت، اتصالاتها شکل می‌گیرند. در فرایند پخت، اتمهای آلومینیوم به عمق ساختار نفوذ کرده و اتصال الکتریکی از سطح با گاز حفره‌ای برقرار می‌شود. پس از شکل‌گیری اتصالاتها، فرایند دريچه‌سازی با قرار دادن نقاب ویژه بر سطح ساختار شروع می‌شود. سپس با پاشیدن Ti و سپس Al و پخت در دمای ۱۵۰ °C به مدت ۱۰ دقیقه، پیوند Ti/Si به وجود می‌آید. در آخرین مرحله با نقاب‌کشی، عملیات خورش شیمیایی در محلول اسید HF انجام می‌شود و ابزارهای واندر پاو و هال بار به دست می‌آیند. چگالی سطحی n_s گاز حفره‌ای دو بعدی 2DHG متناسب با نسبت Ge در لایه آلیاژی x و به ضخامت لایه جداکننده l_s و ضخامت لایه پوششی l_c و حتی به غلظت ناخالصی برون B در لایه آلائیده بستگی دارد. چگالی سطحی گاز حفره‌ای دو بعدی را می‌توان به روش هال اندازه‌گیری و با تغییر ولتاژ اعمالی به دريچه (V_g) کنترل کرد [۸]. تغییرات n_s ناشی از تغییرات V_g در ساختارهای مورد

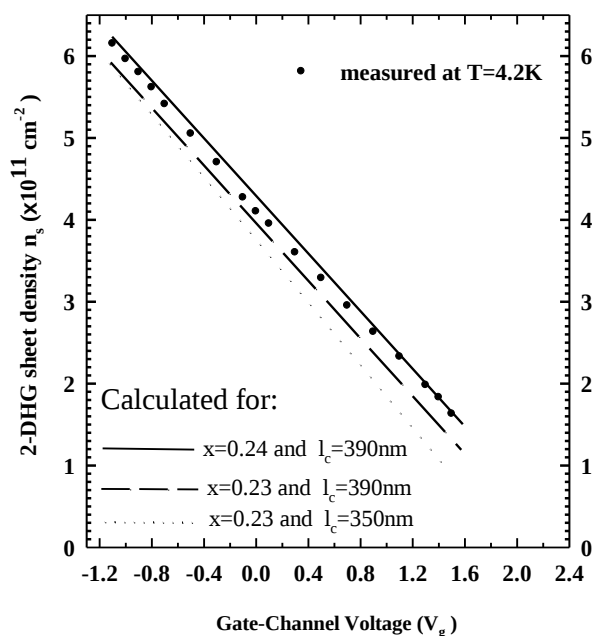
مطالعه که در دمای $T = 4/2^\circ \text{K}$ به روش هال (روش الکتریکی) به دست آمده‌اند (نمادها) در شکل ۶ نموده شده‌اند. نتایج تجربی و محاسبات نظری نشان می‌دهند در همه ساختارهای دریچه‌دار حفره‌ای (و یا الکترونی)، آهنگ تغییرات خطی n_s بر حسب V_g با $1/L$ متناسب است [۸ و ۱۰] که در آن L فاصله دریچه تا گاز حفره‌ای (و یا الکترونی) به ضخامت لایه پوششی l_c بستگی دارد. به عبارتی ساختارهایی که شیب تغییرات n_s بر حسب V_g آنها کمتر است، دارای لایه پوششی ضخیم‌تری هستند. بیشترین مقدار ممکن n_s متناسب با نسبت Ge در لایه آلیاژی (x) بوده ولی با افزایش ضخامت لایه جداکننده (به عبارت دقیق‌تر با مقدار مؤثر آن l_{eff}) کاهش می‌یابد. لازم به یادآوری است که در ساختارهای وارون، l_{eff} همواره کمتر از مقدار طراحی شده (l_s) است و این به دلیل پدیده واماندگی آلاینده‌ها در رشد رانشانی MBE و وجود آنها در لایه جداکننده است [۴]. محاسبات نظری بر اساس حل خودسازگار معادلات شرودینگر و پواسون برای ساختارهای مورد مطالعه انجام شده است [۸]. در این روش با تغییر ΔE_V (که مستقیماً به نسبت Ge در لایه آلیاژی x بستگی دارد) و L که تقریباً برابر با $l_c + 10 \text{ nm}$ (میانگین فاصله گاز حفره‌ای تا میان گاه بالائی Si/SiGe/Si ، تقریباً برابر 10 nm [۸]) است و l_{eff} را می‌توان با بهترین برازش محاسبات نظری و نتایج تجربی، به دست آورد. شکل ۷ نمونه‌ای از محاسبات نظری (خط پر) را نشان می‌دهد که با انتخاب $x = 0.24$ و $l_c = 390 \text{ nm}$ و $l_{\text{eff}} = 11 \text{ nm}$ با نتایج تجربی ساختار $55/51$ برازش مطلوبی به دست آمده است.



شکل ۵ شمای یک ساختار دور آلاییده وارون دریچه‌دار $p\text{-Si/SiGe/Si}$.



شکل ۶ نتایج تجربی چگالی گاز حفره‌ای دو بعدی n_s بر حسب ولتاژ دریاچه V_g در ساختارهای مورد مطالعه.



شکل ۷ تغییرات نتایج تجربی (دایره‌ها) و نتایج نظری (خطوط) چگالی گاز حفره‌ای دو بعدی n_s بر حسب ولتاژ دریاچه V_g در ساختار ۵۵/۵۱. خطوط مختلف نتایج محاسبات برای $l_{\text{eff}} = 11 \text{ nm}$ و مقادیر مختلف x و l_c مندرج در متن شکل را نشان می‌دهند.

بحث و برداشت

در این پژوهش، ۴ ساختار $p\text{-Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ با دو روش الکتریکی و پرتو X مشخصه‌یابی، و نتایج حاصل در جدول ۱ درج شده‌اند که نشان می‌دهد که نتایج حاصل از دو روش، سازگاری خوبی دارند. اختلاف جزئی و عدم قطعیت نتایج به عوامل زیادی مربوط می‌شود. ناصافی [۱۱] و ناپله‌ای بودن [۱۲] پیوندگاه Si/SiGe پدیده‌های شناخته شده‌ای در رشد این ساختارها و عامل ناپایده‌الی بودن صفحات براگ هستند. همچنین از آنجا که جای‌گیری اتمهای Ge در لایه آلیاژی کتره‌ای است و چنانکه شکل ۲ نشان می‌دهد، یاخته‌های مجاور فراوانی می‌توان یافت که فاقد Ge بوده و این موجب افت و خیز کرنش در یاخته‌های لایه آلیاژی [۱۳] و پهن شدن قله SiGe در طرح پراش می‌شود، و این عوامل در خطای روش پرتو X مؤثرند. در مقابل وجود بارهای الکتریکی در پیوندگاه Si/SiGe [۱۴] و عدم قطعیت در غلظت ناخالصی و انرژی برانگیختگی (E_b) ناخالصی‌های برون، عمده خطاهای دخیل در روش الکتریکی به شمار می‌روند. نباید فراموش کرد که این دو روش برتریها و کاستیهای ویژه‌ای دارند. در روش الکتریکی می‌توان ضخامت مؤثر لایه جداکننده l_{seff} را به دست آورد در حالی که این کار برای تعیین ضخامت لایه آلیاژی عملی نیست. از آنجا که فرایندهای درجه‌سازی و به انجام آزمایش‌ها در دمای پایین دشوار و وقت گیرند، لذا این روش فقط در مطالعات خاص به کار گرفته شود [۸ و ۱۵]. در مقابل از روش پرتو X به خاطر سرعت و سادگی کار به طور گسترده‌ای در مشخصه‌یابی ساختارهای نامتجانس استفاده می‌شود و دیگر اینکه در روش پرتو X می‌توان ضخامت لایه آلیاژی را با دقت خوبی به دست آورد هر چند که در تعیین ضخامت مؤثر لایه جداکننده، این روش ناتوان است.

خلاصه اینکه در این مقاله ساختارهای دور آلاییده وارون $p\text{-Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ با روش‌های پرتو X و الکتریکی مشخصه‌یابی شده‌اند. در روش اول ضخامت لایه پوششی (l_c) و نسبت Ge (x) و ضخامت لایه آلیاژی (l_w) با شبیه‌سازی کامپیوتری نتایج تجربی طرح پراش قله‌های (۰۰۴)، به دست آمده‌اند. در روش الکتریکی با برازش نظری تغییرات چگالی گاز حفره‌ای دو بعدی n_s اندازه‌گیری شده به روش‌ها، بر حسب ولتاژ درجه V_g ، مشخصه‌های x و l_c و l_{seff} به دست آمده‌اند. علیرغم دخالت عوامل ویژه‌ای که موجب پیدایش خطا در نتایج هر روش می‌شود، ولی همخوانی مطلوبی بین نتایج حاصل از دو روش در تعیین مشخصه‌های x و l_c وجود دارد.

جدول ۱ مقایسه مشخصه‌های x و l_c به دست آمده از دو روش الکتریکی و پرتو X .

ساختار	روش الکتریکی				روش پرتو X		
	x	ΔE_v (meV)	l_c (nm)	l_{seff} (nm)	x	l_c (nm)	l_w (nm)
۵۴/۳۹	۰/۱۹	۱۸۰	۱۸۰	۱۱	۰/۲۰	۱۵۰	۲۰
۵۵/۵۱	۰/۲۴	۲۱۰	۳۹۰	۱۱	۰/۲۳	۳۸۰	۱۷
۵۶/۱۶	۰/۲۲	۱۸۰	۴۵۰	۵	۰/۲۰	۴۲۰	۱۷/۵
۵۵/۵۳	۰/۱۹	۱۵۵	۵۲۰	۱۱	۰/۱۷	۴۸۰	۱۸/۵

تشکر و قدردانی

این ساختارها در گروه نیمرسانای بخش فیزیک دانشگاه واریک انگلستان طراحی، رشد و آزمایش شده‌اند و مؤلف از پرفسور پارکر و دکتر فیلیپس به خاطر رشد ساختارها و راهنمایی‌های مفید تشکر و قدردانی می‌نماید.

مراجع

- [1] Whall T. E., "Fully pseudomorphic Si/SiGe/Si heterostructures for p-channel field effect devices", Thin Solid Films, 294 (1997) 160-165.
- [2] Houghton D. C., "Strain relaxation kinetics in $Si_{1-x}Ge_x$ /Si heterostructures", J. Appl. Phys., 70 (1991) 2136-2151.
- [3] People R., "Physics and applications of Ge_xSi_{1-x} /Si strained layer heterostructures", IEEE Journal of Quantum Electronics, 22 (1986) 1696-1709.
- [4] Sadeghzadeh M. A., Parrey C. P., Phillips P. J., Parker E. H. C., Whall T.E., "Issues on the molecular-beam epitaxial growth of p-SiGe inverted-modulation-doped structures", Appl. Phys. Lett., 74 (1999) 579-581.
- [5] Fatemi M., Stahlbush R. E., "X-ray rocking curve measurement of composition and strain in Si-Ge buffer layers on Si substrates", Appl. Phys. Lett., 58 (1991) 825-827.
- [6] Takagi S., "A dynamical theory of diffraction for a distorted crystal", J. Phys. Soc. Jap. 26 (1969) 1239-1253.
- [7] Franco N., Barradas N. P., Walledra A. M., Morris R. J. H., Mironov O. A., Parker E. H. C., "XRD analysis of strained Ge-SiGe heterostructures on relaxed SiGe graded buffers grown by hybriide epitaxy on Si(100) substrates", Mater. Sci. eng., B, Solid-state mater. adv. technol., 124-125 (2005) 123-126.

- [8] Sadeghzadeh M. A., “*Top-gating of p-Si/SiGe/Si inverted modulation-doped structures*”, Appl. Phys. Lett., 76 (2000) 350-352.
- [9] Emeleus C. J., Sadeghzadeh M. A., Phillips P. J., Parker E. H. C., Whall T. E., Pepper M., Evans A. G. R., “*Back gating of a two-dimensional hole gas in a SiGe quantum well*”, Appl. Phys. Lett., 70 (1997) 1870-1872.
- [10] Ritchie D. A., Frost J. E. F., Peacock D. C., Linfield E. H., Hamilton A., Joens G. A. C., “*The growth and characterisation of back-gated high mobility two-dimensional electron gas structures*”, J. of Crystal Growth, 111 (1991) 300-304.
- [11] Feenstra R. M., Luts M. A., Stern F., Ismail K., Mooney P. M., LeGoues F. K., Stanis C., Chu J. O., Meyerson B. S., “*Roughness analysis of Si/SiGe heterostructure*”, J. Vac. Sci. Technol. B, 13 (1995) 1608-1612.
- [12] Godbey D. J., Ancona M. G., “*Ge segregation during the growth of a SiGe buried layer by Molecular Beam Epitaxy*”, J. Vac. Sci. Technol. B, 11 (1993) 1120-1123.
- [13] Feenstra R. M., Luts M. A., “*Scattering from strain variations in high-mobility Si/SiGe heterostructures*”, J. Appl. Phys., 78 (1995) 6091-6097.
- [14] Emeleus C. J., Whall T. E., Smith D. W., Kubiak R. A., Parker E. H. C., Kearney M. J., “*Scattering mechanisms affecting hole transport in remote-doped Si/SiGe heterostructures*”, J. Appl. Phys., 73 (1993) 3852-3856.
- [15] Ansaripour G., Braithwaite G., Myronov M., Parker E. H. C., “*Energy loss rates of two dimensional hole gases in inverted Si/SiGe/Si heterostructure*”, Appl. Phys. Lett., 76 (2000) 1140-1142.