مقاله نامه ششمین کنفرانس ملّی خلأ ایران
دانشگاه شهید چمران اهواز
۱۶ و ۱۷ بهمن ماه ۱۳۹۲

تعیین پتانسیل آلیاژی در چاه کوانتومی AlGaAs با رهیافت ترابرد گاز الکترونی دو بعدی

صادق زاده ، محمد علی ؛ تجاره ، پریسا
گروه حالت جامد ، دانشکده فیزیک ، دانشگاه یزد ، یزد

چکیده

در این مقاله بی نظمی آلیاژی در پراکندگی گاز الکترونی دو بعدی (2DEG) در چاه کوانتومی $Al_xGa_{1-x}As$ رشد یافته در خلاء ارزیابی شده است. نتایج حاکی از آن است که مقدار اندکی ($x<0.01$) آلیاژ Al در چاه کوانتومی Ga-As می تواند عامل محدودیت تحرک الکترون ها باشد. نهایتاً، با برازش نتایج تجربی، مقدار 0.52eV برای پتانسیل آلیاژی بدست آمد.

Determination of the alloy potential in AlGaAs quantum well via two dimensional electron gas transports

Sadeghzadeh, Mohammad Ali; Tejareh, Parisa
Solid State Group, Physics Department, Yazd University, Yazd

Abstract

The alloy disorder in the scattering of the two dimensional electron gas (2DEG) in $Al_xGa_{1-x}As$ quantum well grown in the vacuum has been evaluated. Results imply that a small amount of Al alloy ($x<0.01$) in GaAs well can limit the electron mobility. Finally a value of 0.52eV for alloy potential has been determined via simulation of the experimental results.

PACS No. 85.45.Bz

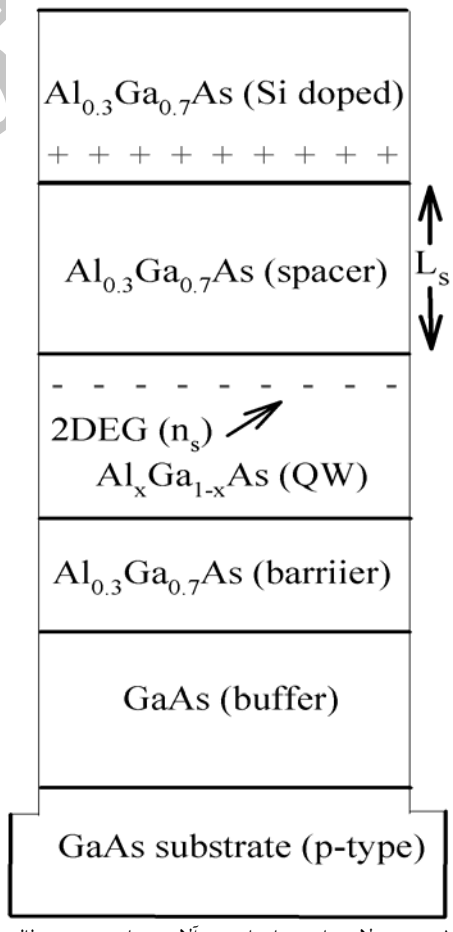
مقدمه

با پیشرفتهای چند دهه اخیر تکنولوژی خلاء امکان ایجاد محیط هایی با فشار کمتر از 10^{-11} Torr فراهم شده است. در چنین شرایطی رشد لایه های نانومتری تمیز نیم رسانا با چگالی ناخالصی زمینه کمتر از 10^{14} atom/cm^3 میسر شده است و متعاقب آن ساختارهای چند لایه ای نامتجانس نیم رسانا به کمک روش های پیشرفته ای مانند رونشانی پرتو مولکولی (MBE) رشد یافته اند [۱]. ساختار AlGaAs/GaAs/AlGaAs به دلیل اینکه در نوار رسانش آن در لایه GaAs یک چاه کوانتمی وجود دارد از جنبه فیزیک و تکنولوژی ابزارهای نیم رسانا بسیار مهم می باشد. چنانچه بخشی از یک لایه سدی AlGaAs با ناخالصی دهنده Si آلاییده شود، الکترونهای حاصل از ناخالصیهای یونیده به ترازهای کم انرژی درون چاه کوانتمی GaAs انتقال یافته و در آنجاه یک گاز الکترونی شبه دوبعدی (2DEG) تشکیل می شود. از آنجا که این گاز در فاصله ای از ناخالصی های یونیده قرار دارد لذا برهم کنش کولنی ضعیف بوده و گاز الکترونی از تحرک پذیری بالایی برخوردار خواهد بود. به علاوه با سرد کردن نمونه (تا دمای هلیوم مایع) و کاهش پراکندگی فونونی، تحرک پذیری گاز الکترونی به مراتب افزایش می یابد و به مقدار بیشینه خود می رسد [۲]. مع الوصف، فرآیند های پراکندگی دیگری از جمله پراکندگی آلیاژی باعث محدودیت تحرک پذیری گاز الکترونی می شود [۳]، حال با ارزیابی آنها به تعیین پتانسیل آلیاژی می پردازیم.

Archive of SID
www.SID.ir

ساختار

ساختار n- $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ /$Al_xGa_{1-x}As$/$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ تحت مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است [٤]. فرایند رشد لایه ها با رونشانی میانگیر GaAs(buffer) بر روی زیرآیند GaAs نوع n شروع می شود وسپس لایه سدی $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ و به دنبال آن چاه کوانتومی $Al_xGa_{1-x}As$ به ضخامت تقریبی ۱ میکرومتر و سپس لایه سدی جداگر $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$(spacer) به ضخامت L_s و در خاتمه لایه آلاییده $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ (نوع n) رشد داده شده است. این ساختار به "دور آلاییده عادی" معروف است و گاز الکترونی دوبعدی با دانسیته سطحی n_s در نزدیکی میان گاه بالایی چاه کوانتومی تشکیل می شود. در این ساختار چاه کوانتومی $Al_xGa_{1-x}As$ خالص نبوده بلکه آلیاژی است ولی میزان آلیاژ (x) در لایه چاه کوانتومی بسیار کم می باشد (x<0.01).



شکل ۱ : ترتیب لایه ها در ساختار دور آلاییده عادی تحت مطالعه.

جنبه های نظری

تجربه و نظریه نشان می دهند که تحرک پذیری دمای پایین گاز الکترونی دوبعدی 2DEG در این ساختار محدود به پراکندگی الکترونها از: ۱- ناخالصی های یونیده دور در لایه آلاییده با چگالی N_D ، ۲- ناخالصی های زمینه با چگالی N_{BI} و ۳- بی نظمی های شبکه آلیاژی ناشی از توزیع کاتوره ای اتم های Al در زمینه چاه کوانتومی می باشند و تحرک پذیری کل گاز الکترونی μ_{Tot} ، طبق قاعده ماتیسن به تحرک پذیری محدود به ناخالصی های دور μ_{RI} و تحرک پذیری محدود به ناخالصی زمینه μ_{BI} و بی نظمی های آلیاژی μ_{AD} مربوط می شود [۳] :

$$\frac{1}{\mu_{Tot}} = \frac{1}{\mu_{RI}} + \frac{1}{\mu_{BI}} + \frac{1}{\mu_{AD}} \qquad (۱)$$

مولفه های تحرک پذیری کولنی (ناخالصی های دور و یا زمینه) از رابطه زیر بدست می آیند:

$$\frac{1}{\mu_C} = \frac{m^{*2}}{e\,\pi\,\hbar^3} \int_0^{\pi} d\theta \left|V_C(q)\right|^2 (1-\cos\theta) \qquad (۲)$$

که در آن $V_C(q)$ پتانسیل کولنی پراکننده مربوطه و q بصورت:

$$q = 2k_F \sin\theta \qquad (۳)$$

($k_F = \sqrt{2\pi n_s}$) k_F به بردار موج الکترون در سطح فرمی و زاویه پراکندگی θ الکترون از حالت اولیه k به حالت نهایی k' مربوط می شود ($|k|=|k'|$).

پتانسیل پراکننده آلیاژی اصطلاحاً به افت وخیز پتانسیل بلوری ناشی از توزیع کاتوره ای اتم های عنصر آلیاژ Al در جایگاه های شبکه بلوری اطلاق می شود و مولفه تحرک پذیری محدود به پراکندگی آلیاژی به صورت زیر می باشد:

$$\frac{1}{\mu_{AD}} = \frac{m^{*2}}{e\,\pi\,\hbar^3}\,\Omega\,(\delta V)^2\; x\,(1-x)\,\frac{3\,b}{16} \qquad (٤)$$

که در آن $\hbar$ ثابت کاهش یافته پلانک، e و m^* به ترتیب بار و جرم موثر الکترون ، Ω متوسط حجم سلول واحد در لایه آلیاژی ، b پارامتر وردشی متناسب با عکس پهنای تابع موج الکترون و

Archive of SID
www.SID.ir

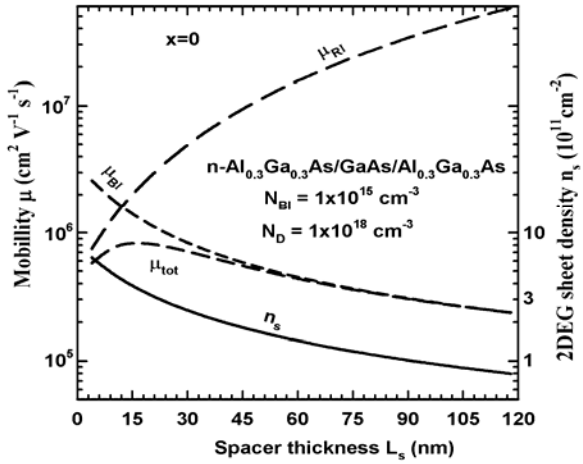
δV پتانسیل آلیاژی ناشی از اتم های Al در چاه کوانتمی می باشد[۳].

محاسبات

تجربه نشان می دهد که دانسیته گاز الکترونی دو بعدی n_s با افزایش ضخامت لایه جداگر L_s کاهش می یابد. در بررسی نظری این حقیقت معادلات شرودینگر و پواسون با استفاده از کد محاسباتی و روندی مشابه مرجع [۳] برای ساختار مورد نظر (عادی) به روش خود سازگار و برای مقدار چگالی ناخالصی دهنده دور $N_D = 1\times10^{18}cm^{-3}$ حل شد و نتایج در شکل ۲ (منحنی‌ممتد) نشان داده شده است. پارامترهای مورد استفاده در جدول ۱ لیست شده اند. همچنین منحنی تغییرات نظری تحرک پذیری کل و مولفه های آن (منحنی های خط چین) بر حسب L_s برای چگالی ناخالصی باردار زمینه $N_{BI} = 1\times10^{15}$ و چاه کوانتمی خالص (x=0) متناظر با $\mu_{AD} = \infty$ رسم شده است.

جدول۱ : پارامتر های مورد استفاده در محاسبات [٦] .

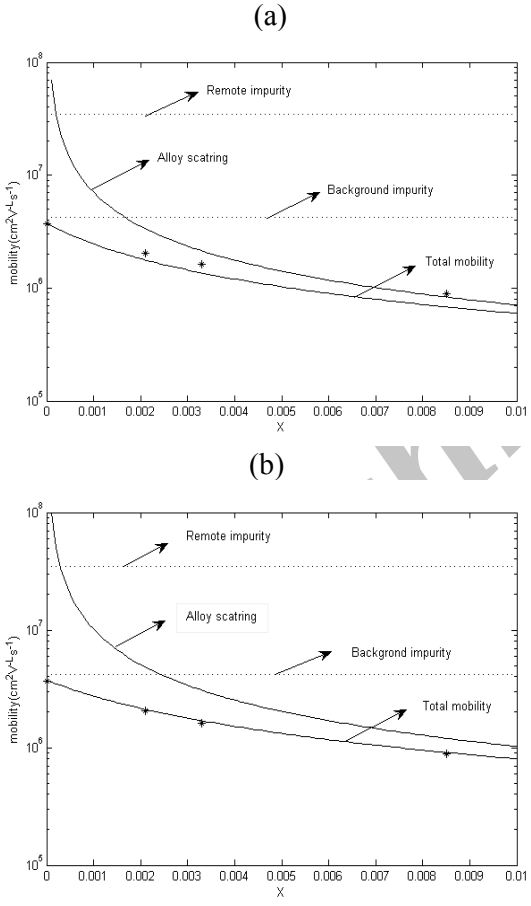
جرم سکون الکترون	$m_0 = 9.11\times10^{-31}$ kg
جرم مؤثر الکترون	$m^* = 0.067m_0$
ناپیوستگی نوار رسانش	$\Delta E_c = 330meV$
انرژی یونش ناخالصی	$E_b = 135meV$
ثابت دی الکتریک GaAs	$\kappa = 12.5$



شکل۲ : تغییرات نظری چگالی در واحد سطح گاز الکترونی n_s (منحنی ممتد و محور راست) و تحرک پذیری μ (منحنی های خط چین و محور چپ) و بر حسب ضخامت لایه جداگر L_s برای ساختار دور آلاییده با $N_{BI} = 1\times10^{15}cm^{-3}$ و $N_D = 1\times10^{18}cm^{-3}$.

مشهود است که با افزایش ضخامت لایه جداگر، چگالی گاز الکترونی کاهش و به تبع، میزان استتار ناخالصی‌های زمینه نیز تضعیف و تحرک پذیری کاهش می یابد.

به منظور ارزیابی پراکندگی گاز الکترونی دوبعدی 2DEG از بی نظمی آلیاژی ، تحرک پذیری کل و مولفه های آن محاسبه شدند. در شکل ۳ تغییرات نظری (منحنی ها) تحرک پذیری کل و مؤلفه های آن بر حسب میزان آلیاژ x در چاه کوانتومی $Al_xGa_{1-x}As$ برای ناخالصی زمینه با چگالی $N_{BI} = 1.6\times10^{16}cm^{-3}$ و ناخالصی دور $N_D = 5\times10^{19}cm^{-3}$ در ساختاری با ضخامت لایه جداگر $L_s = 105nm$ و دو مقدار $\delta V=0.6eV$ (شکل a ۳) و $\delta V=0.52eV$ (شکل b ۳) نشان داده شده است.



شکل۳ : تغییرات نظری (منحنی ها) تحرک پذیری کل و مولفه های آن و بر حسب میزان آلیاژ x در چاه کوانتمی برای $N_{BI} = 1.6\times10^{14}cm^{-3}$ و $N_D = 5\times10^{19}cm^{-3}$و $L_s = 105nm$ و دو مقدار $\delta V=0.6eV$ (شکل a) و $\delta V=0.5eV$ (شکل b). نتایج تجربی گزارش شده در مرجع [۹] با نمادهای* مشخص شده اند.

www.SID.ir

بحث و برداشت

از بررسی نتایج شکل ۲ در می یابیم که تحرک پذیری کل (μ_{tot}) در چگالی‌های کم 2DEG (متناظر با L_S بزرگ) محدود به مولفه ناخالصی زمینه (μ_{BI}) ولی در چگالی های زیاد، به مولفه ناخالصی دور (μ_{RI}) محدود است.

از شکل ۳ (ساختاری با Ls=cte) مشخص است که تحرک پذیری محدود به ناخالصی های دور و زمینه، مقادیر ثابت و مستقل از میزان آلیاژ x در چاه کوانتومی می باشند، در حالی که پراکندگی آلیاژی با افزایش x سریعاً کاهش می یابد. مضافاً اینکه پراکندگی گاز الکترونی از ناخالصی های دور تقریبا ۱۰ برابر کمتر از ناخالصی های زمینه می باشد. نکته دیگر اینکه تحرک پذیری کل گاز الکترونی در شرایطی که چاه کوانتومی خالص باشد (x=0) ، به تحرک پذیری ناخالصی زمینه محدود است و با افزایش میزان آلیاژ در چاه، عامل محدودیت ، تقریبا مؤلفه آلیاژی است ($x > 0.002$) . به عبارتی وجود مقدار کمی از اتم های Al در کانال Ga-As (بواسطه عدم خلاء بالا) می تواند عامل پراکندگی الکترون ها باشد. نتایج تجربی گزارش شده در مرجع [٤] (نمادهای*) نیز برای مقایسه با تحرک پذیری کل نظری نشان داده شده اند. همچنین از شکل ۳ b مشاهده می شود که برازش نتایج تجربی با احتساب مقدار $\delta V=0.52eV$ برای پتانسیل آلیاژی حاصل شد که با مقدار 0.7eV گزارش شده در توافق است[۳].

تا کنون تحقیقات زیادی در بررسی عوامل پراکندگی گاز الکترونی در دمای پایین در چاه کوانتومی Ga-As انجام شده است [۵] و اکثراً ناخالصی های زمینه مهم ترین عامل گزارش شده است اما لی و همکاران [٤] نشان دادند که پراکندگی آلیاژی زمینه (که در این پژوهش ارزیابی شد) نیز می تواند عامل اصلی باشد و لذا رشد لایه های با کیفیت Ga-As نیازمند محیط خلاء بسیار بالا است.

در این مقاله پراکندگی گاز الکترونی در چاه کوانتومی آلیاژی AlGaAs ارزیابی شد. تجربه و نظریه نشان داد که میزان کمی از آلیاژ Al در چاه کوانتمی می تواند عامل محدودیت تحرک الکترونها باشد و در خاتمه از برازش نتایج تجربی مقدار 0.52eV برای پتانسیل آلیاژی بدست آمد.

مرجع‌ها

[1] M. A. Sadeghzadeh, C. P. Parry, P. J. Phillips, E. H. C. Parker and T..E. Whall, " Issues on the molecular-beam epitaxial growth of p-SiGe inverted-modulation-doped structures", *Appl. Phys. Lett.* **74** (1999) 579-581.

[2]D. Laroche, S. Das Sarma, G. Gervais. M. P. Lilly, and J. L. Reno, "Scattering mechanism in modulation-doped shallow two-simensional electron gased", *Appl. Phys. Lett*. **96** (2010) 3402765.

[3]M A Sadeghzadeh, and S M Azizi, "Interficial Al segregation limiting electron mobility at the inverted interface of AlGaAs/GaAs quantum well", *Semicond. Sci. Technol*. **27** (2012) 105009,

[4] W Li, G A Csáthy, D C Tsui, L N Pfeiffer and K W West," Direct observation of alloy scattering of two-dimensional electrons in $Al_xGa_{1-x}As$ " *Appl. Phys. Lett.* **83** (2003) 2832.

[5]S. J. MacLeod, K. Chan, T. P. Martin, A. R. Hamilton, A. See, and A. P. Micolich; "The role of background impurities in the single particle relaxation lifetime of a two-dimensional electron gas"; Phys. Rev. B **80** (2009) 035310.

Archive of SID
www.SID.ir