Archive of SID

تأثیر آلاینده‌های Si، Ge و O بر خواص ترابری الکتریکی n –GaN کپه‌ای

محمدهادی رئیسیان و حسین عشقی

دانشکدهٔ فیزیک– دانشگاه صنعتی شاهرود

پست الکترونیکی: h_eshghi@shahroodut.ac.ir

چکیده

به علت اهمیت زیاد GaN به عنوان یک نیمرسانای با گاف نواری پهن در قطعات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی بررسی خواص ترابری الکتریکی آن مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. در حالت کلی وجود ناخالصی‌ها و دررفتگی‌ها در نیمرساناها بر خواص ذاتی آن‌ها تأثیر می‌گذارد. هدف ما در این مقاله بررسی نظری تأثیر حضور ناخالصی‌های متفاوت (Si، Ge و O) به عنوان آلاینده نوع n در خواص الکتریکی سه نمونه از این نیمرسانا است. محاسبات ما مبتنی بر نظریه‌های خنثایی بار و سازوکارهای پراکندگی الکترونی بر مبنای تقریب زمان واهلش است. تحلیل نتایج تجربی حاکی از آن است که Si آلاینده‌ای مناسب با تراز انرژی کم‌عمق (۱۷ meV)، نسبت به لبهٔ نوار رسانش، به‌شمار رفته و وجود آن به تراکم دررفتگی بلوریی نسبتاً پایین در حدود $10^{9}\ cm^{-2}$ منجر می‌گردد. این در حالی است که آلایش ماده با Ge و O سبب ایجاد ترازهای ناخالصی عمیق‌تر به ترتیب ۱۹ و ۲۸ meV شده و همچنین حضور آن‌ها به ایجاد تراکم دررفتگی‌های بلوری و نیز تراکم تهیجاهای نیتروژنی بیش‌تر، به ترتیب با ضریبی در حدود 10^{3} و ۳، در این ماده می‌انجامد.

واژه‌های کلیدی: *نیمرسانا، گالیوم نیترایدآلاییده نوع n، خواص ترابری، سازوکارهای پراکندگی*

مقدمه

در یک دههٔ اخیر پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در مواد با گاف نواری پهن برای به‌کارگیری در قطعات اپتو الکترونیکی شامل دیودهای نورگسیل و دیودهای لیزری در ناحیهٔ مرئی و فرابنفش، و نیز الکترونیک با توان و دمای بالا انجام گرفته است [۱]. حضور ناخالصی‌ها (خواسته یا ناخواسته) در یک نیمرسانا تعیین کنندهٔ رفتار قطعات ساخته شده از آن‌ها هستند. عواملی نظیر تراکم ناخالصی‌های بخشنده و یا پذیرنده، انرژی فعال‌سازی آن‌ها، تراکم حامل‌ها و سازوکارهای مؤثر پراکندگی در تحرک حامل‌ها در دمای مورد نظر از جمله پارامترهای مهم در فرآیند رسانایی یک قطعهٔ نیمرسانا به‌شمار می‌روند. ما در این مقاله به بررسی نظری خواص ترابری الکتریکی سه نمونه GaN با رسانندگی الکتریکی نوع n که به طور خواسته با ناخالصی‌های Si، Ge و O آلایش یافته‌اند می‌پردازیم [۲]. این نمونه‌ها با ضخامتی در حدود ۳ μm و با آلایشی یکنواخت بر روی Sapphire با روش MOCVD رشد داده شده‌اند و داده‌های گزارش

www.SID.ir

Archive of SID

شده حاصل اندازه‌گیری‌های اثر هال در دماهای گوناگون است. انتظار می‌رود به منظور فراهم شدن شرایط لازم برای مشارکت این ناخالصی‌ها به عنوان اتم‌های بخشنده، Si و Ge به جای اتم‌های Ga، و O به جای N در شبکهٔ GaN جایگزین شوند.

نظریهٔ بستگی دمایی تراکم الکترونی

عمل برازش داده‌های مربوط به تغییرات n برحسب T برای نمونه‌های مورد بررسی ما با در نظر گرفتن معادلهٔ خنثایی بار $\left(n + N_a^- = p + N_d^+\right)$ انجام شده است. برای یک لایه GaN از نوع n غیر واگن و در نظر گرفتن آمار ماکسول- بولتزمن، این معادله به‌صورت زیر درمی‌آید [۳]:

$$n = \frac{N_d}{1 + \frac{n g_n}{N_c}\exp\left(\frac{\Delta E_d}{k_B T}\right)} - N_a \qquad (۱)$$

که در آن g_n ضریب واگنی ($=۲$) [۴]، N_d و ΔE_d به ترتیب تراکم و انرژی فعال‌سازی اتم‌های بخشنده، N_a تراکم اتم‌های پذیرنده و N_c $\left[=۲\left(۲\pi m^* k_B T/h^۲\right)^{۳/۲}\right]$ چگالی مؤثر حالت‌ها در لبه نوار رسانش است. بنا بر گزارش‌های منتشر شده [۵ - ۸] در صورت اطلاع از تغییرات دمایی n در یک نمونه می‌توان کمیت‌های وابسته به ویژگی‌های الکترونیکی ماده شامل N_d، ΔE_d و N_a را یافت. بدیهی است مقادیر یافت شده بایستی همزمان به عنوان یکی از عوامل مؤثر در مجموعهٔ فرآیندهای پراکندگی الکترونی که سبب محدودیت تحرک آن‌ها می‌گردند، سازگار باشند.

فرآیندهای پراکندگی الکترونی در GaN

پراکندگی‌های وابسته به فونون‌های قطبی- نوری، پیزوالکتریکی، آکوستیکی و همچنین پراکندگی‌های ناشی از ناخالصی‌های یونیده با تراکم‌های N_d و N_a، تهیجاها و دررفتگی‌های بلوری از مهم‌ترین سازوکارهای پراکندگی الکترون‌ها در GaN هستند که تحرک حامل‌های آزاد را در دماهای مختلف محدود می‌سازند. ما برای محاسبهٔ تحرک کلی الکترون‌ها در این نیمرسانا از قاعدهٔ ماتیسن:

$$\mu_{total} \cong \frac{۱}{\sum ۱/\mu_i} \qquad (۲)$$

استفاده کرده‌ایم به طوری که μ_i نشانگر تحرک الکترونی وابسته به هر یک از پراکندگی‌های یاد شده به طور جداگانه می‌باشد که در ادامه معرفی شده‌اند. بندهای الف– ج سازوکارهای مربوط به پراکندگی‌های ذاتی و بندهای د– و سازوکارهای پراکندگی‌های غیرذاتی هستند. در این فرمول‌بندی‌ها پارامترهای ذکر شده معانی معمول خود را دارند که برخی از آن‌ها به همراه مقادیر وابسته که در محاسبات به کار گرفته شده‌اند در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱ - مقادیر پارامترهای مادی وابسته به GaN

مرجع	مقدار	پارامتر نماد
[۱۷]	۰/۲۲	m_n^*/m_0 جرم مؤثر الکترون
[۱۰]	۱۰/۴	ε_s ثابت دی الکتریک فرکانس پایین
[۴]	۵/۴۳	ε_∞ ثابت دی الکتریک فرکانس بالا
[۱۸]	۹۲	$\hbar\omega_p$ انرژی فونون قطبی- نوری (meV)
[۱۰]	۶/۵۹×۱۰^۳	υ_s سرعت صوت (m/s)
[۱۹]	۶/۱×۱۰^۳	ρ چگالی جرمی (kg/cm^۳)
[۱۰]	۰/۵	h_{pz} ضریب پیزو الکتریک (C/m^۲)
[۲۰]	۱۲	E_{dp} پتانسیل تغییر شکل(eV)
[۲۱]	۵/۱۲۵	a ثابت شبکه (Å)

الف - ارنریچ [۹] تحرک‌پذیری الکترونی محدود به پراکندگی فونون‌های قطبی- نوری را به صورت زیر بیان کرده است:

www.SID.ir

Archive of SID

$$\mu_{POP} = ۰.۱۹۹\left[\frac{T}{۳۰۰}\right]^{۱/۲}\left[\frac{q}{\varepsilon_c^*}\right]^{۲}\left[\frac{m_.}{m_n^*}\right]^{۳/۲} \times\left(۱۰^{۲۲}M\right)\left(۱۰^{۲۳}V_a\right)\left(۱۰^{-۱۳}\omega_{LO}\right)\left(e^{z}-۱\right)\left(G\left(z\right)\right) \quad (۳)$$

به طوری که:

$$\varepsilon_c^* = \sqrt{M\,\omega_{LO}^{۲}V_a\varepsilon_.\left(\frac{۱}{\varepsilon_\infty}-\frac{۱}{\varepsilon_s}\right)}$$

موسوم به بار یونی مؤثر کالن، M جرم کاهش یافته نزدیک‌ترین اتم‌های همسایه و V_a حجم سلول واحد است (دو کمیت اخیر برای GaN با ساختار وورتسایت به ترتیب برابر $۱/۹۳۶ \times ۱۰^{-۲۳}$ g و $۲/۲۸۳ \times ۱۰^{-۲۳}$ cm^۳ [۹] است). همچنین در این معادله، $G\left(z\right)$ تابعی از $z\left(\frac{\theta_{LO}}{T}=\frac{\hbar\omega_{LO}}{k_BT}\right)$ با تغییرات بسیار آهسته است و مقادیر آن توسط هامر و مگناسون [۱۰] محاسبه شده است.

ب – تحرک‌پذیری الکترونی محدود به پراکندگی فونون‌های پیزوالکتریکی از فرمول‌بندی زیر به‌دست می‌آید [۱۱]:

$$\mu_{PZ} = \frac{۱۶(۲\pi)^{۱/۲}\rho\upsilon_s^{۲}\hbar^{۲}q}{۳(qh_{pz}/\varepsilon_.\varepsilon_s)^{۲}(m_n^*)^{۳/۲}(k_BT)^{۱/۲}} \quad (۴)$$

ج – تحرک‌پذیری الکترونی محدود به پراکندگی فونون‌های آکوستیکی [۱۲] به صورت زیر با کمیت‌های فیزیکی ماده در ارتباط است:

$$\mu_{ac} = \frac{۲(۲\pi)^{۱/۲}\rho\upsilon_s^{۲}\hbar^{۴}q}{۳E_{dp}^{۲}(m_n^*)^{۵/۲}(k_BT)^{۳/۲}} \quad (۵)$$

پراکندگی حاصل از ناخالصی‌های یونیده، وجود تهیجاها و نیز دررفتگی‌ها از سازوکارهای غیرذاتی مهم در محدودسازی تحرک حامل‌ها به‌شمار می‌آیند که عبارتند از:

د– تحرک‌پذیری الکترونی محدود به پراکندگی ناخالصی‌های یونی [۱۳] :

$$\mu_{imp} = \frac{۱۲۸(۲\pi)^{۱/۲}\varepsilon_.^{۲}\varepsilon_s^{۲}(k_BT)^{۳/۲}}{q^{۳}(m_n^*)^{۱/۲}(n+۲N_a)}\left[\ln(۱+b)-\frac{b}{۱+b}\right]^{-۱} \quad (۶)$$

که در آن:

$$b = \frac{۲۴m_n^*\varepsilon_.\varepsilon_s(k_BT)}{q^{۲}\hbar^{۲}n'}$$

و

$$n' = n + \frac{(N_d - N_a - n)(n+N_a)}{N_d}$$

ه – تحرک‌پذیری الکترونی محدود به پراکندگی تهیجاهای نیتروژن در GaN از جمله سازوکارهای پراکندگی است که توسط چن [۱۴] گزارش شده است و از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$\mu_{vac} = \frac{۹}{۱۶\sqrt{۳}\pi}\frac{e\hbar^{۴}}{\left(m^*\right)^{۵/۲}}\frac{۱}{N_v}\frac{۱}{U_.^{۲}a^{۶}}\left(k_BT\right)^{-۱/۲} \quad (۷)$$

که در آن a ثابت شبکه، N_v تراکم تهیجاهای نیتروژن و U_0 ضریب تناسب در پتانسیل‌نمایی $U(r)=U_0e^{-r/\beta}$ وابسته به تهیجاها (در GaN برابر $۰/۴$ meV [۱۴]) است به طوری که β پهنای مؤثر این پتانسیل ($\beta \approx a$) می‌باشد.

و – تحرک‌پذیری الکترونی محدود به پراکندگی دررفتگی‌ها توسط پودور [۱۵] با فرمول‌بندی زیر بیان شده است:

$$\mu_{dis} = \frac{۳۰\sqrt{۲\pi}\varepsilon_s^{۲}\varepsilon_.^{۲}d^{۲}(k_BT)^{۳/۲}}{q^{۳}N_{dis}f^{۲}L_Dm^{*۱/۲}} \quad (۸)$$

که در آن $d\left(\frac{۲}{\sqrt{N_{dis}.\pi}}=\right)$ [۱۶] فاصلهٔ بین مراکز نقایص در امتداد خط دررفتگی، f کسر مراکز اشغال شده که برابر واحد اختیار شده است [۸]، N_{dis} چگالی

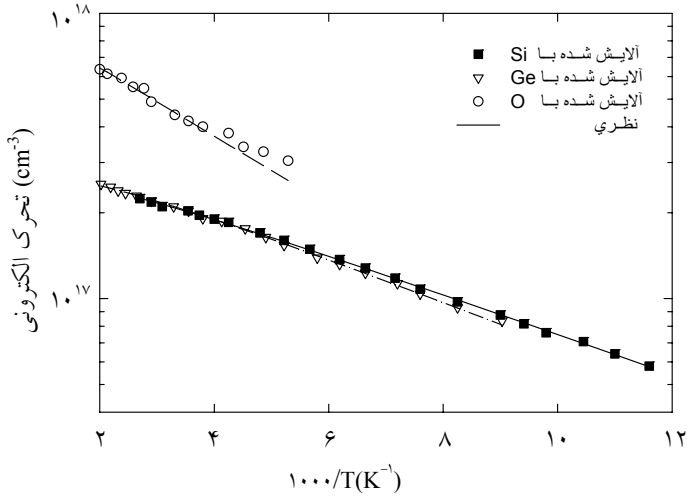
www.SID.ir

Archive of SID

در رفتگی‌ها در واحد سطح و $L_D\left(=\sqrt{\varepsilon_s\varepsilon_0\frac{k_BT}{q^2n}}\right)$ [۱۷] طول دبای است.

تحلیل داده‌های تجربی

شکل ۱ داده‌های تجربی مربوط به تغییرات تراکم الکترونی (n) بر حسب دما (برگرفته از مقالهٔ گاتز و همکارانش [۲]) و همچنین منحنی‌های برازشی مبتنی بر روش کوچک‌ترین مربعات داده‌های تجربی و معادلهٔ (۱) را نشان می‌دهد. با انجام این کار مقادیر تراکم‌های N_d، N_a و نیز انرژی فعال‌سازی اتم‌های بخشنده، ΔE_d، به‌دست آمده‌اند. این مقادیر به همراه نتایج اندازه‌گیری شده با روش *SIMS* که توسط گاتز برای مشخصه‌یابی این نمونه‌ها انجام داده‌اند در جدول ۲ آمده است.



شکل ۱- تراکم الکترونی برحسب عکس دما برای نمونه‌های GaN با آلایش Si، Ge و O همراه با منحنی‌های نظری برازشی (به متن مراجعه شود).

جدول ۲- نتایج محاسبات برازشی توسط رابطه (۱)، همراه با نتایج اندازه‌گیری شده با روش SIMS [۲]

آلاینده	آزمایش *SIMS*	مقادیر به‌دست آمده از برازش نتایج تجربی		
	تراکم (cm^{-3})	$N_d\,(cm^{-3})$	$\Delta E_d\,(meV)$	$N_a\,(cm^{-3})$
Si	۴×۱۰ ^۱۷	۳/۰۲×۱۰ ^۱۷	۱۷	۲/۴۲×۱۰ ^۱۶
Ge	۱×۱۰ ^۱۷	۳/۱۱×۱۰ ^۱۷	۱۹	۲/۵×۱۰ ^۱۶
O	۸×۱۰ ^۱۸	۱×۱۰ ^۱۸	۲۸	۵×۱۰ ^۱۶

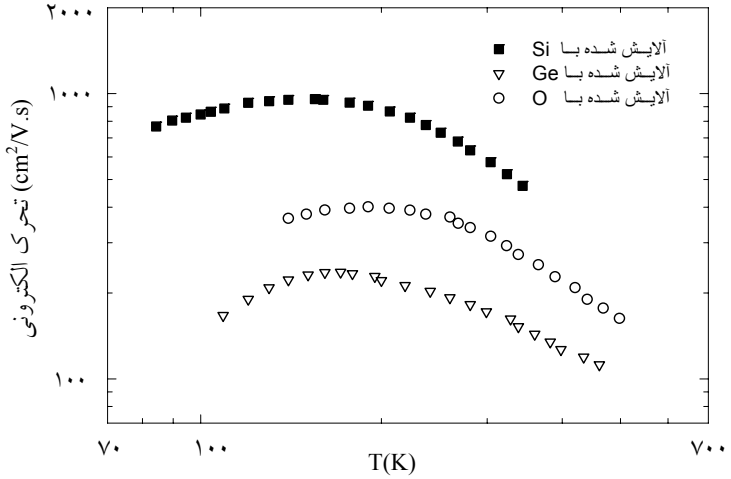
از مقایسهٔ نتایج این تحلیل و اندازه‌گیری‌های *SIMS* پیداست که در نمونه‌های با آلایش *Si* و *Ge* مقادیر متناظر مربوط به تراکم ناخالصی‌های بخشنده با دقت خوبی به یکدیگر نزدیک‌اند، اما در نمونهٔ آلایش شده با *O* تفاوتی در حدود ۱۰ برابر ظاهر می‌شود. این اختلاف به باور ما می‌تواند ناشی از جایگزین نشدن برخی از اتم‌های اکسیژن به جای اتم‌های نیتروژن و عمل نکردن به عنوان یک ناخالصی بخشنده مؤثر در شبکه بلوری *GaN* باشد. نکته جالب توجه دیگر آن که در نمونه‌های آلاییده با *Si* و *Ge* تراکم اتم‌های ناخالصی بخشنده، انرژی فعال‌سازی آن‌ها و نیز تراکم اتم‌های پذیرنده در این نمونه‌ها با تقریب بسیار خوبی به هم نزدیک‌اند. این موضوع با توجه به منحنی‌های منطبق شده بر داده‌های

www.SID.ir

Archive of SID

تجربی در این شکل نیز قابل مشاهده است. در مقایسه، نمونهٔ آلایش شده با اکسیژن، از تراکم و همچنین انرژی فعال‌سازی بزرگ‌تری نسبت به ناخالصی‌های دیگر برخوردار است.

شکل ۲ بستگی دمایی تحرک الکترون‌ها را در این سه نمونه نشان می‌دهد. همان طور که پیداست نمونه با آلایش *Si* دارای بیش‌ترین تحرک و نمونهٔ آلاییده با *Ge* کم‌ترین تحرک الکترونی را داراست. به منظور تفسیر این داده‌ها لازم است تأثیر پراکندگی سازوکارهای گوناگون الکترونی مشتمل بر فونون‌های قطبی- نوری، پیزوالکتریکی و آکوستیکی و نیز عوامل غیر ذاتی شامل ناخالصی‌های یونی، تهیجاهای نیتروژن و دررفتگی‌ها در نظر گرفته شوند. شکل ۳ نتیجه این محاسبات را در هر یک از این نمونه‌ها و تأثیر حضور سازوکارهای پراکندگی مختلف (معادلات ۳ تا ۷) و نیز تحرک کل (معادله ۲) را بر حسب تابعی از دما نشان می‌دهد.



شکل ۲- داده‌های تجربی تحرک الکترونی بر حسب دما برای نمونه‌های GaN آلاییده با ناخالصی‌های Si، Ge و O [۲].

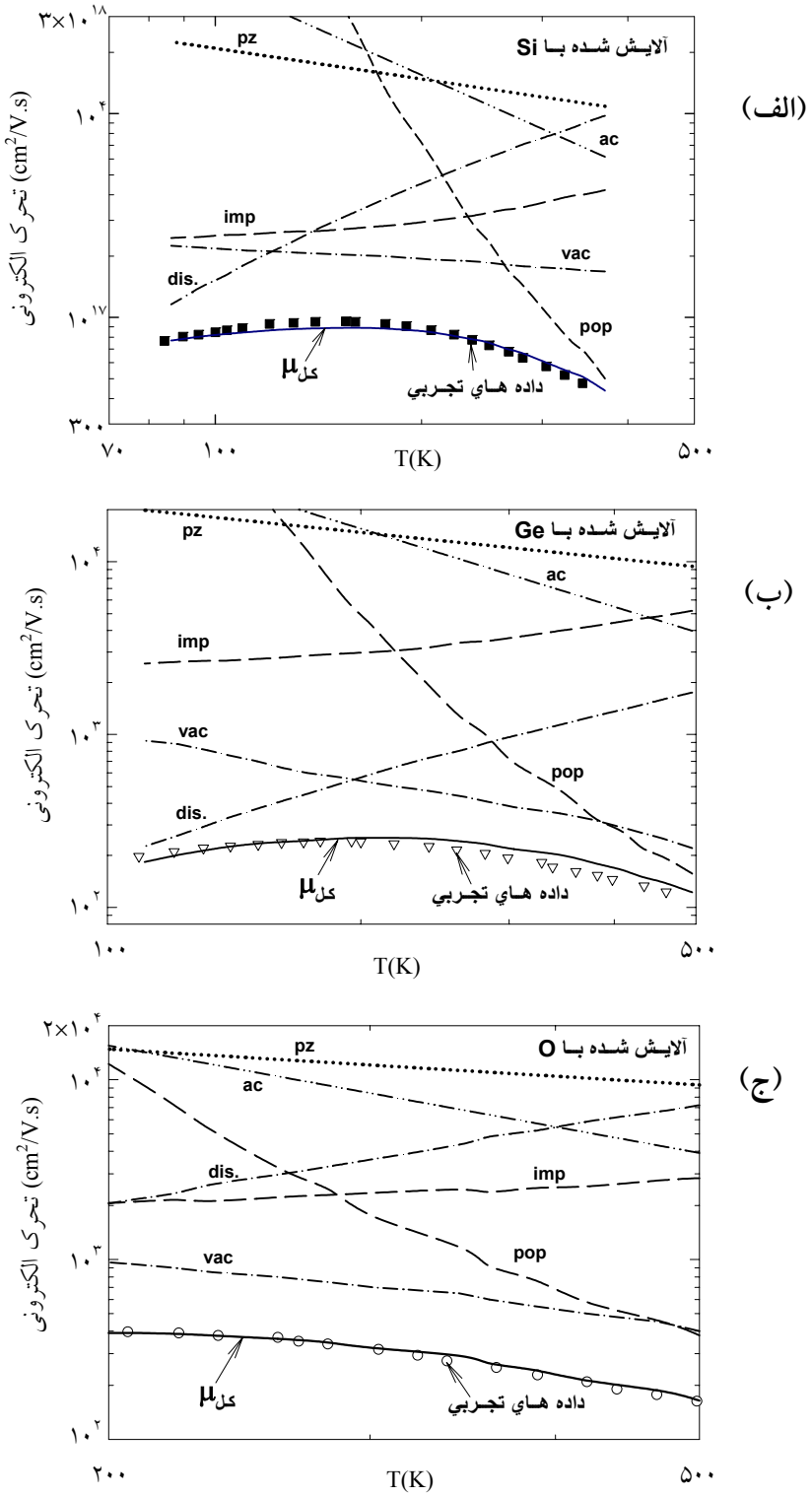
در این نمونه‌ها حصول به یک برازش قابل قبول در داده‌های تجربی در محدودهٔ دماهای متوسط و پایین تنها هنگامی میسر می‌گردد که تأثیر پراکندگی ناشی از تهیجاها و همچنین دررفتگی‌های بلوری در نظر گرفته شوند. جدول ۳ مقادیر حاصل از برازش داده‌ها در نظریه‌های پراکندگی یاد شده را برای نمونه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. در این تحلیل مقادیر وابسته به تراکم دررفتگی‌ها و نیز تراکم تهیجاهای نیتروژنی به عنوان پارامترهای برازشی اختیار شده‌اند.

جدول ۳- نتایج محاسبات برازشی وابسته به تحرک الکترونی در نمونه‌های آلاییده گالیوم نیتراید

آلاینده	$N_{dis.}\left(cm^{-2}\right)$	$N_v\left(cm^{-3}\right)$
Si	۲×۱۰^{۹}	۱×۱۰^{۱۷}
Ge	$۱/۵\times۱۰^{۱۲}$	۳×۱۰^{۱۷}
O	$۱/۴\times۱۰^{۱۲}$	۲×۱۰^{۱۷}

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳- منحنی‌های برازشی برحسب داده‌های تجربی مربوط به تحرک محدود شده توسط سازوکارهای مختلف پراکندگی الکترونی، برای نمونه‌های GaN آلاییده با (الف) Si، (ب) Ge، و (ج)O

www.SID.ir

Archive of SID

با توجه به این نتایج ملاحظه می‌شود که: (الف) آلایش GaN با ناخالصی Ge در مقایسه با Si، تراکم دررفتگی‌ها را تا حدود ۳ مرتبه بزرگی افزایش داده و همین سبب کاهش قابل ملاحظه تحرک حامل‌ها در نمونه آلاییده با Ge شده است. همچنین در نمونه‌های آلاییده با Ge و O ملاحظه می‌شود با وجود نزدیکی مقادیر تراکم دررفتگی‌ها، تحرک الکترون‌ها در نمونه آلاییده با O بیشتر است. به باور ما این می‌تواند ناشی از بالاتر بودن تراکم الکترون‌های آزاد در نمونه با آلایش O باشد که تحت تأثیر پدیدهٔ استتار آثار پراکندگی دررفتگی‌ها را تقلیل داده است. البته تأیید این امر نیازمند مطالعات نظری و تجربی بیش‌تر می‌باشد. (ب) در نمونه‌های آلاییده با O و Ge تراکم تهیجاها (نقص‌های بلوری) بین ۲ تا ۳ برابر بیش از نمونهٔ آلایش شده با Si است. این نتیجه می‌تواند به عنوان شاهد دیگری در رشد کیفیت بالاتر این نمونه در مقایسه با دو نمونه دیگر باشد. (ج) با توجه به شکل ۳، اگرچه تأثیر عوامل پراکندگی ذاتی در هر سه نمونه قابل مقایسه با یکدیگر است، لکن در سازوکارهای وابسته به پراکندگی‌های غیرذاتی به علت متفاوت بودن پارامترهای برازشی مربوط به هر نمونه (جداول ۲ و ۳) تفاوت قابل ملاحظه‌ای در میزان تأثیر آن‌ها در محدودسازی تحرک کلی حامل‌ها (کل μ) مشاهده می‌شود.

نتیجه‌گیری

با به‌کارگیری معادلهٔ خنثایی بار و تحلیل داده‌های مربوط به تحرک کلی الکترون‌ها توسط قاعده ماتیسن برای سه نمونهٔ GaN با آلایش‌های بخشنده Si، Ge و O میزان تراکم این ناخالصی‌ها به همراه انرژی فعال‌سازی آن‌ها، تراکم پذیرنده‌های ناخواسته همچنین تراکم دررفتگی‌ها و تهیجاهای مربوط به این نمونه‌ها را به‌دست آوردیم. دریافتیم که اتم‌های Si دارای کوچک‌ترین انرژی فعال‌سازی ($۱۷\ meV$) در بین سایر ناخالصی‌ها است. همچنین ملاحظه شد که نمونهٔ آلاییده با Si از تحرک الکترونی بیش‌تری (در حدود ۵ برابر) در مقایسه با نمونهٔ آلاییده با Ge برخوردار است، که می‌تواند به دلیل پایین‌تر بودن تراکم دررفتگی‌های بلوری (در حدود ۳ مرتبه بزرگی) و همچنین تراکم تهیجاهای نیتروژن (در حدود ۳ برابر) در این نمونه باشد. همچنین ملاحظه شد که اتم‌های آلاینده O با انرژی فعال‌سازی $۲۸\ meV$ احتمالاً به علت واقع نشدن تمامی آن‌ها در موضع درست اتم‌های نیتروژن در جایگاه‌های شبکه‌ای، به‌خوبی به صورت اتم‌های بخشنده فعال عمل نمی‌کنند. بدین ترتیب با ویژگی‌های نشان داده شده می‌توان گفت Si مناسب‌ترین ناخالصی در حصول به یک لایه GaN با رسانندگی الکتریکی نوع n است.

مراجع

[1] Nakamura, S., Mukai, T. and Senoh, M. Jap. J. Appl. Phys. 31 (1992) 2883.

[2] Gotz, W., Kern, R.S., Chen, C.H., Liu, H., Steigerwald, D.A. and Fletcher, R.M., Materials Science and Engineeing B 59 (1999) 211.

[3] Look, D.C., Electrical Characterization of GaAs Material and Devices, John Wiley, New York, (1989).

[4] Huang, D., Yun, F., Reshchikov, M.A., Morkoc, H. and Rode, D.L., Solid State Electronics 45 (2001) 714.

[5] Tang, H., Kim, W., Botchkarev, A., Popovici, G., Hamdani, F. and Markoc, H., Solid State Electronics, 42 (1998) 839.

www.SID.ir

Archive of SID

[6] Eshghi, H. and Lancefield, D., Phys. stat. sol (b) 216 (1999) 733.

[7] Lancefield, D. and Eshghi, H., J. Phys.: Condens. Matter 13, (2001) 8939.

[8] Tansley, T.L. and Egan, R.J., Physica B 185 (1993) 190.

[9] Ehrenreich, H., J. Phys. Chem. Solid 8, 130 (1959).

[10]Morkoc, H., Nitride Semiconductors and Devices, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (1999).

[11]Hammar, G. and Magnusson, B., Phys. Scripta 6 (1972) 206.

[12]Anderson, D.A. and Aspley, N., Semicond. Sci. Technol. 1 (1986) 187.

[13]Brooks, H., Adv. Electron. Phys., 7, 85 (1955).

[14]Zhen Chen, hairong Yuan, Da- Cheng Lu, Xuehao Sun, Solid State Electronics 46 (2002) 2069.

[15]Pödör, B., Phys. Stat. Sol. 16, K167 (1966).

[16]Leonid Chernyak, Andrei Osinsky, Alfons Schulte, Solid-State Electronics 45 (2001) 1692.

[17]Eckhause, T.A., Suzer, O., Kurdak, C., Yun, F.and Morkoc, H., Appl. Phys. Lett. 82 (2003) 3037.

[18]Subhabrata Dhar, Subhasis Ghosh, J. Appl. Phys. 86, (1999) 2674.

[19]Fonciulli, M., Lei, T. and Moustakas, T.D., Phys. Rev. B 48, 48 (1993).

[20]Bykhovski, A.D., Kaminski, V.V., Shur, M.S., Chen, Q.C. and Khan, M.A., Appl. Phys. Lett. 68, (1996) 818.

[21]Lagerstedt, O. and Monemar, B., Phys. Rev. B 19 (1979) 3064.

www.SID.ir