



بررسی نظری خواص ترابری الکتریکی تحت تاثیر "پدیده فوتورسانش پایدار (PPC)" در

ساختار ناهمگون $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$

عطیه قلیچ لی، حسین عشقی*

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

چکیده

در این مقاله به مطالعه نظری وابستگی تحرک پذیری الکترونی به تراکم گاز الکترون دو بعدی (2DEG) در ساختار ناهمگون $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ ($x=0/15$ و $0/25$) تحت تاثیر پدیده فوتورسانش پایدار در دمای پایین ($1/6\text{ K}$) پرداخته ایم. نتایج تحلیل ما مبتنی بر انواع سازوکارهای پراکندگی و قاعده ماتیسین حاکی از آن است که در تراکم‌های الکترونی پایین، پراکندگی دررفتگی‌ها سهم غالب را در کنترل تحرک گاز الکترون دو بعدی برای هر دو نمونه بر عهده داشته‌اند؛ اما در تراکم‌های بالاتر، نه تنها دررفتگی‌ها بلکه سازوکارهای "ناخالصی‌های بخشنده‌های از راه دور" و "ناهمواری‌های سطح مشترک" نیز بر تحرک الکترون‌ها تاثیر می‌گذارند. محاسبات ما همچنین نشان می‌دهد که با کاهش کسر مولی آلومینیوم در لایه سد AlGaN ، تراکم دررفتگی‌ها کاهش یافته و منجر به تحرک پذیری الکترونی بالاتری شده است.

واژه‌های کلیدی: خواص ترابری الکتریکی، ساختار ناهمگون، چاه کوانتومی مثلثی، گاز الکترون دو بعدی، سازوکارهای پراکندگی.

h_eshghi@shahroodut.ac.ir : ایمیل نویسنده مسئول

۱- مقدمه

$x=0/15$ و $0/25$) تحت تاثیر پدیده فوتورسانش پایدار^۱ (افزایش تراکم الکترون‌های آزاد از طریق نوردهی) در دمای $T=1.6\text{ K}$ است. محاسبات ما در این مقاله توصیفگر داده‌های تجربی بیکلی و همکاران [۱۸] در مورد وابستگی تحرک پذیری الکترونی به تراکم گاز الکترون دو بعدی می‌باشد. نمونه‌های مورد نظر به روش MOVPE بر روی زیر لایه سفایر (0.001) رشد یافته‌اند. شکل ۱ طرح ساده‌ای از ساختار لایه‌ای این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. فرآیند رشد با رشد یک لایه هسته GaN دمای پایین (با دمای تقریباً 550°C) به ضخامت 25 nm آغاز شده است. همان طور که مشاهده می‌شود این ساختار شامل یک لایه GaN به ضخامت $3\text{ }\mu\text{m}$ (با دمای رشد 1010°C)، یک لایه سطحی AlN به ضخامت 1 nm (برای کاهش پراکندگی ناخالصی‌های یونیده)، لایه‌ای از جنس $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ به ضخامت 25 nm و یک لایه کلاهی GaN به ضخامت 3 nm می‌باشد.

GaN نیم‌رسانای ترکیبی گروه III-V با گاف نواری مستقیم پهن [۱-۲] و آلیاژهای وابسته آن در کاربردهای الکترونیکی [۳-۵] و اپتوالکترونیکی [۵-۹] نظیر دیودهای گسیلنده نور آبی و فرابنفش [۱۰-۱۱] و دیودهای لیزری [۱۱-۱۳] مورد استفاده واقع می‌شوند. همچنین در سال‌های اخیر از این ماده در مهندسی ساختار نواری به ویژه در ساخت ترانزیستورهای الکترونی با تحرک بالا [۱۳-۱۴] استفاده شده است. با توجه به مزیت‌های مربوطه مانند ولتاژ شکست بالا، سرعت حداکثر الکترون و چگالی الکترون بالا، ساختارهای ناهمگون AlGaN/GaN برای کاربردهای فرکانس بالا و قدرت بالا در دماهای بالاتر هنگامی که با دستگاه‌های مبتنی بر GaAs و Si قابل مقایسه هستند سودمند می‌باشند [۱۵-۱۷]. هدف ما در این مقاله تحلیل نظری داده‌های وابسته به خواص ترابری الکتریکی در ساختار ناهمگون $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$

¹Persistent Photoconductivity (PPC)

$$\mu_{dp}(T) = \frac{e\hbar^3 \rho u_l^2 L}{m^* E_d^2 k_B T} \quad (2)$$

که در آن ρ چگالی بلور، u_l سرعت فونون آکوستیک طولی، m^* جرم موثر الکترون، E_d پتانسیل تغییر شکل و L عرض چاه کوانتومی می‌باشد که برای تعیین عرض تقریبی کانال گاز الکترون دو بعدی، می‌توان از عبارت داده شده توسط لی و همکاران [۲۱] استفاده کرد:

$$L = \frac{4E_1}{3eF} \quad (3)$$

در این رابطه F بزرگی میدان الکتریکی داخلی و E_1 اولین تراز پایه در چاه کوانتومی می‌باشد که به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۲۲-۲۳]:

$$F = \frac{n_s e}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (4)$$

$$E_i = \left(\frac{\hbar^2}{2m^*} \right)^{1/3} \left(\frac{3\pi e F}{2} \left(i + \frac{3}{4} \right) \right)^{2/3} \quad (5)$$

جدول ۱. مقادیر پارامترهای ماده‌ی GaN مورد استفاده در روابط پراکندگی‌ها.

$\rho = 6.15 \times 10^3 \text{ (kg/m}^3\text{)} [24]$	چگالی بلور
$u_l = 6.56 \times 10^3 \text{ (m/s)} [24]$	سرعت فونون آکوستیک طولی
$u_t = 2.68 \times 10^3 \text{ (m/s)} [24]$	سرعت فونون آکوستیک عرضی
$h_{14} = 4.28 \times 10^9 \text{ (V/m)} [25]$	ثابت پیزوالکتریک
$E_d = 12 \text{ (eV)} [24]$	انرژی پتانسیل تغییر شکل
$\hbar\omega = 95 \text{ (meV)} [24]$	انرژی فونون قطبی-نوری
$\epsilon_\infty = 5.35 [26]$	ثابت دی الکتریک فرکانس بالا
$\epsilon_s = 8.9 [26]$	ثابت دی الکتریک استاتیکی
$m^*/m_0 = 0.2 [27]$	جرم موثر
$a_B = 23.1 \text{ (Å)} [27]$	شعاع بوهر موثر
$c = 5.185 \text{ (Å)} [27]$	ثابت شبکه در جهت (۰۰۱)

۲-۱-۲- پراکندگی پیزوالکتریک

در بیشتر نیمرساناهای ترکیبی با دو اتم با الکترونگاتیوی مختلف، ارتعاشات صوتی تولید یک میدان الکتریکی داخلی می‌کند [۲۸]. این میدان الکتریکی باعث بوجود آمدن اختلال در پتانسیل دوره‌ای بلور می‌شود. پراکندگی حامل‌ها از این میدان‌های الکتریکی را پراکندگی پیزوالکتریک می‌نامند. در مواد قطبی و در دماهای کمتر از دمای اتاق، قوی‌ترین برهمکنش با فونون‌های

3 nm GaN (Cap)
25 nm Al _x Ga _{1-x} N (Barrier)
1 nm AlN (Spacer)
3 μm GaN (Channel)
25 nm GaN nucleation layer
Sapphire substrate

شکل ۱. طرح ساختاری لایه‌ها در نمونه‌های بیکلی و همکاران با مقادیر کسر مولی آلومینیوم ۱۵ و ۲۵% [۱۸].

برای مطالعه اثر ترکیب آلیاژی آلومینیوم در لایه Al_xGa_{1-x}N دو نمونه با x=۰/۲۵ (نمونه ۱) و x=۰/۱۵ (نمونه ۲) در دمای ۲۰۰ °C رشد داده شده‌اند. به منظور افزایش تراکم حامل‌ها، نمونه‌ها از طریق پنجره دسترسی اپتیکی برای دوره‌های کوتاه با یک چراغ قوه نوررسانی شده‌اند.

۲- مبانی نظری

در اینجا، محدودیت در تحرک پذیری سیستم گاز الکترون دو بعدی به دلیل هر یک از فرآیندهای پراکندگی به طور مستقل با استفاده از عبارات نظری مربوطه (μ_i) ارائه شده است. به منظور بررسی اثر کلی این عوامل در حامل‌ها از قاعده ماتیسین [۱۹]:

$$\frac{1}{\mu_{tot}} = \sum_i \frac{1}{\mu_i} \quad (1)$$

استفاده شده است. از آنجا که بزرگی تحرک پذیری وابسته به هر یک از انواع سازوکارهای پراکندگی حامل‌ها تابع پارامترهای ماده‌ی لایه مورد نظر می‌باشد، به همین منظور جدول ۱ مقادیر کمیت‌های مورد استفاده در محاسبات ما را نشان می‌دهد.

۲-۱-۲- سازوکارهای پراکندگی ذاتی

۲-۱-۲-۱- پراکندگی پتانسیل تغییر شکل آکوستیکی

ارتعاشات شبکه اتمی وابسته به فونون‌های آکوستیکی طولی، نوارهای رسانش و ظرفیت را تحت تاثیر قرار داده و پتانسیل تناوبی بلور را مختل می‌کند. این پتانسیل که پتانسیل تغییر شکل شبکه نامیده می‌شود باعث پراکندگی حامل‌ها می‌شود. مقدار تحرک گاز الکترون دو بعدی بر اثر این سازوکار پراکندگی به صورت زیر با دما تغییر می‌کند [۲۰]:



شده با این سازوکار به کمک فرمول زیر قابل پیش‌بینی است [۲۰]:

$$\mu_{remote} = \frac{64\pi\hbar^3 k_F^3 \epsilon_0^2 \epsilon_s^2 S_0^2}{e^3 m^* N_d} \left(\frac{1}{L_0^2} - \frac{1}{(LM_0)^2} \right)^{-1} \quad (۱۳)$$

که در آن N_d چگالی ناخالصی‌های بخشنده در لایه سد و S_0 تابع پوشش (ضریب وابسته به اثر استتار حامل‌ها) تابعی از تراکم حامل سطحی (n_s) و دمای شبکه (T_L) است که در حالت ناتبهن توسط:

$$S_0 = \frac{e^2 n_s}{2\epsilon_0 \epsilon_s k_B T_L} \quad (۱۴)$$

و در حالت تبهن به صورت:

$$S_0 = \frac{e^2 m^*}{2\pi \epsilon_0 \epsilon_s \hbar^2} \quad (۱۵)$$

ارائه می‌شود. از آنجا که پراکندگی ناخالصی‌ها معمولاً در دماهای پایین غالب است، وضعیت حالت تبهن باید برای S_0 استفاده شود. سایر کمیت‌های معرفی شده در این معادلات به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$L_0 = d_0 + \frac{L}{2} \quad (۱۶)$$

$$LM_0 = L_0 + d_1 \quad (۱۷)$$

در اینجا، d_0 عرض لایه میانی و d_1 ($\approx n_s / N_d$) عرض لایه تهی می‌باشد.

۲-۲-۲- پراکندگی ناخالصی‌های یونیده بارهای فصل مشترک

این سازوکار پراکندگی ناشی از برهم‌کنش الکترون‌ها با ناخالصی‌های یونیده در فصل مشترک ساختار ناهمگون است و غالباً در دماهای پایین بر تحرک پذیری حامل‌ها تأثیر می‌گذارد. تحرک محدود شده بر اثر این سازوکار به صورت زیر توصیف می‌شود [۲۰]:

$$\mu_{BI} = \frac{4\pi\epsilon_0^2 \epsilon_s^2 \hbar^3 k_F^3}{e^3 m^* N_{BI} I_B} \quad (۱۸)$$

که N_{BI} چگالی ناخالصی‌ها در چاه پتانسیل پیوندگاه ناهمگون است که مقدار این کمیت در ساختارهای ناهمگون AlGaIn/GaN از مرتبه 10^{14} cm^{-3} گزارش شده است [۲۹] و I_B برابر است با:

آکوستیکی از طریق اثر پیزوالکتریک صورت می‌گیرد. تحرک محدود شده توسط این سازوکار پراکندگی در سیستم‌های گاز الکترون دو بعدی توسط رابطه زیر ارائه می‌شود [۲۰]:

$$\mu_{pe}(T) = \frac{\pi k_F E_d^2}{Le^2 \hbar^4} \left[\frac{9}{32} + \frac{13}{32} \left(\frac{u_l}{u_t} \right)^2 \frac{I_A(\gamma_t)}{I_A(\gamma_l)} \right]^{-1} \mu_{dp}(T) \quad (۶)$$

که در آن $k_F = (2\pi n_s)^{1/2}$ بردار موج سطح فرمی بوده و مقادیر $I_A(\gamma_t)$ و $I_A(\gamma_l)$ از روابط:

$$I_A(\gamma_t) = \left[\left(\frac{4\gamma_t}{3\pi} \right)^2 + 1 \right]^{1/2} \quad (۷)$$

$$I_A(\gamma_l) = \left[\left(\frac{4\gamma_l}{3\pi} \right)^2 + 1 \right]^{1/2} \quad (۸)$$

حاصل می‌شوند به طوری که

$$\gamma_t = \frac{2\hbar u_t k_F}{k_B T} \quad (۹)$$

$$\gamma_l = \frac{2\hbar u_l k_F}{k_B T} \quad (۱۰)$$

۲-۱-۲- پراکندگی فونون‌های قطبی-نوری

پراکندگی حامل‌های بار از فونون‌های قطبی-نوری از میدان الکتریکی حاصل از قطبش یون‌ها در سلول واحد بلور ناشی می‌شود. این قطبش اساساً توسط مولفه طولی فونون‌های اپتیکی ایجاد می‌شود. در نیمرساناهای یونی در دماهای بالا، تحرک پذیری حامل‌ها عمدتاً توسط این سازوکار پراکندگی محدود می‌شود. تحرک محدود شده به وسیله فونون‌های قطبی-نوری به صورت [۲۰]:

$$\mu_{pop}(T) = \frac{4\pi\epsilon_0 \epsilon_P \hbar^2}{e \omega m^* L} [\exp(\hbar\omega/k_B T) - 1] \quad (۱۱)$$

ارائه می‌شود که

$$\frac{1}{\epsilon_P} = \frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_s} \quad (۱۲)$$

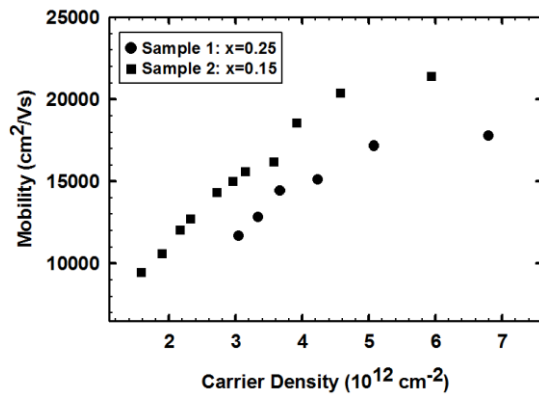
در اینجا، $\hbar\omega$ انرژی فونون‌های قطبی-نوری و ϵ_∞ ثابت دی الکتریک بلور در بسامد بالا می‌باشد.

۲-۲- سازوکارهای پراکندگی غیرذاتی

۲-۲-۱- پراکندگی ناخالصی‌های یونیده بخشنده‌های از راه دور

این سازوکار پراکندگی ناشی از تأثیر ناخالصی‌های بخشنده یونیده در لایه سد بر حرکت الکترون‌ها در لایه چاه می‌باشد. این سازوکار عمدتاً در دماهای پایین که چگالی فونون‌ها کم است بر تحرک گاز الکترون دو بعدی تأثیر می‌گذارد. مقدار تحرک محدود

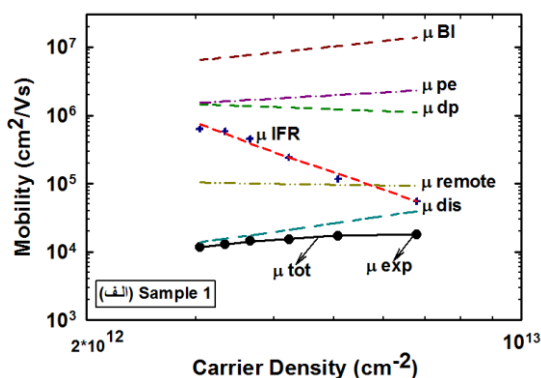
در GaN و لایه‌های AlGa_N به مجموعه نقایص بلوری نظیر نهی جاهای گالیوم، قرار گرفتن اتمی در جایگاه نیتروژن و ناخالصی‌های تراز عمیق نسبت داده می‌شود [۱۸].



شکل ۲. داده‌های تجربی مربوط به وابستگی تحرک گاز الکترون دو بعدی به تراکم حامل در دمای ۱/۶ K [۱۸].

با توجه به این داده‌ها ملاحظه می‌شود که افزایش تحرک با افزایش تراکم در تراکم‌های الکترونی بالاتر از 10^{12} cm^{-2} با آهنگ کمتری ادامه می‌یابد. همچنین همان طور که مشاهده می‌شود نمونه ۲ با کسر مولی آلومینیوم کمتر از تحرک پذیری بیشتری نسبت به نمونه ۱ برخوردار است. این امر می‌تواند به دلیل تاثیر کمتر نقایص بلوری در این نمونه نسبت به نمونه ۱ باشد.

محاسبات ما در این بخش مبتنی بر سازوکارهای موثر پراکندگی‌های ذاتی و غیر ذاتی در دمای ثابت ۱/۶ K بنا بر آنچه که در بخش ۲ گفته شد می‌باشد. با توجه به سازوکار پراکندگی‌های موثر در این نمونه‌ها (شکل ۳) ملاحظه می‌شود همان طور که انتظار می‌رود پراکندگی‌های ذاتی حاملها (وابسته به فونونها) تاثیر در تحرک پذیری الکترون‌ها در این نمونه‌ها نداشته باشند و تحرک گاز الکترونی عمدتاً تحت تاثیر عوامل غیرذاتی پراکندگی قرار گیرد.



$$I_B = \int_0^\pi \frac{\sin(\varphi)}{\left[2 \sin(\varphi) + \frac{S_0}{k_F}\right]^2} d\varphi \quad (19)$$

۳-۲-۲- پراکندگی از دررفتگی‌ها

به دلیل عدم تطابق شبکه‌ای زیرلایه و لایه‌ها و ضرایب انبساط گرمایی متفاوت، شبکه بلوری از حالت منظم خود خارج شده و ناراستی‌های بلند برد که غالباً به دررفتگی‌ها موسوم‌اند تشکیل می‌شوند. این ناراستی‌ها خود می‌توانند سبب پراکندگی حاملها از مسیرشان شده و یا باعث تله اندازی آنها شوند. تحرک محدود شده بر اثر این سازوکار که در دماهای پایین غالب است با رابطه زیر داده می‌شود [۲۰]:

$$\mu_{dis} = \frac{4\pi\epsilon_0^2\epsilon_s^2\hbar^3k_F^4c^2}{e^3m^{*2}N_{dis}I_t} \quad (20)$$

که در اینجا، N_{dis} چگالی دررفتگی‌ها در واحد سطح است که مقدار این کمیت در ساختارهای ناهمگون AlGa_N/GaN در گستره 10^{10} - 10^{11} cm^{-2} گزارش شده است [۳۰] و C ثابت شبکه بلور در لایه چاه کوانتومی می‌باشد که این کمیت در مواد آلیاژی از قانون وگارد به صورت:

$$C_{Al_xGa_{1-x}N} = xC_{AlN} + (1-x)C_{GaN} \quad (21)$$

پیروی می‌کند. همچنین I_t در رابطه از عبارت:

$$I_t = \frac{1}{2}\xi^2 \int_0^1 \frac{1}{(1+\xi^2u^2)\sqrt{1-u^2}} du \quad (22)$$

حاصل می‌شود. به طوری که $\xi = (2k_F/q_{TF})$ کمیتی بدون بعد بوده و در آن $q_{TF} (=2/a_B)$ بردار موج توماس-فرمی 2D و $a_B (= \epsilon_s\epsilon_0\hbar^2/\pi e^2m^*)$ شعاع موثر بوهر می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

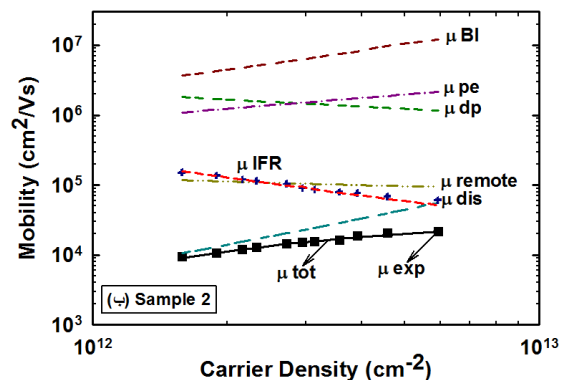
شکل ۲ داده‌های تجربی مربوط به وابستگی تحرک به تراکم گاز الکترون دو بعدی در دمای ۱/۶ K در ساختار ناهمگون Al_xGa_{1-x}N/AlN/GaN (x=۱۵ و ۲۵%) با چاه کوانتومی مثلی را نشان می‌دهد. چنانچه از داده‌های تجربی ملاحظه می‌شود با افزایش تراکم حاملها، تحرک الکترونی برای هر دو گاز الکترون دو بعدی AlGa_N/GaN و AlGaAs/GaAs در توافقی است. افزایش مداوم در تراکم حاملها توسط انتقال الکترون‌های تحریک شده نوری از تراز ناخالصی‌های عمیق در لایه سد AlGa_N توضیح داده می‌شود. اثر PPC مشاهده شده

۴. نتیجه گیری

بررسی داده‌های تجربی تحرک الکترونی بر حسب تراکم الکترونی در طی فرآیند فوتورسانش پایدار در دمای پایین (۱/۶ K) در نمونه‌های $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ نشانگر آن است که در نمونه ۱ به ازای $x=0.25$ در گستره تراکم الکترونی $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} < n_s$ و در نمونه ۲ به ازای $x=0.15$ در گستره تراکم الکترونی $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} < n_s$ سازوکار پراکندگی دررفتگی‌ها سهم غالب را در کنترل تحرک گاز الکترون دو بعدی بر عهده دارند. اما در تراکم‌های بالاتر از این مقادیر برای هر دو نمونه، تحرک حامل‌ها توسط سه سازوکار دررفتگی‌ها، ناخالصی‌های بخشنده‌های از راه دور و ناهمواری‌های سطح مشترک محدود می‌شود. نتایج همچنین بیانگر آن است که با کاهش کسر مولی آلومینیوم در نمونه ۲، تراکم دررفتگی‌ها کاهش یافته و منجر به تحرک پذیری بالاتری در این نمونه نسبت به نمونه دیگر شده است.

۵. منابع

1. A. Nakajim; P. Liu; M. Ogura; T. Makino; K. Kakushima; SI, Nishizawa; H. Ohashi; S. Yamasaki; H. Iwai; Generation and transportation mechanisms for two-dimensional hole gases in $\text{GaN}/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ double heterostructures. *Journal of Applied Physics* 115 (15): 153707, 2014.
2. N. Biyikli; J. Xie; YT, Moon; F. Yun; CG, Stefanita; S. Bandyopadhyay; H. Morkoc; I. Vurgaftman; JR, Meyer; Quantitative mobility spectrum analysis of AlGaIn/GaN heterostructures using variable-field hall measurements. *Appl. Phys. Lett* 88: 142106, 2006.
3. H. Wang; Y. Chen; Y. Li; X. He; Dependence of the Structure, Optical Phonon Modes and Dielectric Properties on Pressure in Wurtzite GaN and AlN . *Advances in Materials Physics and Chemistry* 5 (08): 316-324, 2015.
4. E. Tiras; O. Celik; S. Mutlu; S. Ardali; SB, Lisesivdin; E. Ozbay; Temperature dependent energy relaxation time in $\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaN}$ heterostructures. *Superlattices and Microstructures* 51 (6): 733-744, 2012.
5. C. Liu; S. Yang; K. Shi; G. Liu; H. Zhang; D. Jin; C. Gu; G. Zhao; L. Sang; X. Liu; Q. Zhu; Z. Wang; Two dimensional electron gas mobility limited by scattering of quantum dots with indium composition transition region in quantum wells. *Physica E*: 52: 150-154, 2013.
6. A. Mohanbabu; N. Anbuselvan; N. Mohankumar; D. Godwinraj; CK, Sarkar; Modeling of sheet carrier



شکل ۳. نتایج بررسی نظری وابستگی تحرک گاز الکترون دو بعدی به تراکم الکترونی در (الف) نمونه ۱ ($x=0.25$)، (ب) نمونه ۲ ($x=0.15$) در طی فرآیند فوتورسانش پایدار.

شایان ذکر است که در شکل ۳ از پراکندگی IFR (ناهمواری سطح مشترک) برای سازگاری بین داده‌های تجربی و نظری استفاده کرده‌ایم. این سازوکار از تفاضل داده‌های تجربی و نظری بدست آمده است.

از شکل ۳-الف واضح است که در تراکم‌های کمتر از $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ پراکندگی دررفتگی‌ها به همراه سهم اندکی از ناخالصی‌های بخشنده‌های از راه دور کنترل تحرک الکترونی را بر عهده دارند. اما در تراکم‌های بالاتر از آن مقدار تحرک الکترونی توسط سه سازوکار شامل: دررفتگی‌ها، ناخالصی‌های بخشنده‌های از راه دور و ناهمواری‌های سطح مشترک محدود می‌شود. همان طور که از شکل ۳-ب دیده می‌شود، به ازای $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} < n_s$ سازوکار پراکندگی دررفتگی‌ها سهم غالب را در کنترل تحرک بر عهده دارد. برای تراکم‌های بیشتر از این، پراکندگی دررفتگی و ناهمواری سطح مشترک به همراه سهمی از ناخالصی‌های یونیده بخشنده‌های از راه دور تحرک الکترونی را محدود می‌کنند.

کمیت برازشی (N_{dis}) بدست آمده از این محاسبات در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به این نتایج ملاحظه می‌شود که با کاهش کسر مولی آلومینیوم در نمونه ۲، تراکم دررفتگی‌ها کاهش یافته و منجر به تحرک پذیری بالاتری در این نمونه نسبت به نمونه ۱ شده است.

جدول ۲. پارامتر برازشی محاسبه شده در نمونه‌های بیکلی و همکاران.

نمونه	$N_{dis}(\text{cm}^{-2})$
Sample 1 ($x=0.25$)	8.5×10^8
Sample 2 ($x=0.15$)	5×10^8



grown by MOCVD. Phys. Status Solidi A 209 (3): 434-438, 2012.

16. A, Bengi; SB, Lisesivdin; M, Kasap; T, Mammadova; S, Ozcelik; E, Ozbay; Analysis of defect related optical transitions in biased AlGa_N/Ga_N heterostructures. Materials Science in Semiconductor Processing 13 (2): 105-108, 2010.

17. RB, Tan; W, Xu; Y, Zhou; XY, Zhang; H, Qin; Two-dimensional electron transport in AlGa_N/Ga_N heterostructures. Physica B: Condensed Matter 407 (21): 4277-4280, 2012.

18. N, Biyikli; Ü, Özgür; X, Ni; Y, Fu; H, Morkoç; Ç, Kurdak; Illumination and annealing characteristics of two-dimensional electron gas systems in metal-organic vapor-phase epitaxy grown Al_xGa_{1-x}N/AlN/GaN heterostructures. J. Appl. Phys 100: 103702, 2006.

19. J, Singh; Semiconductor Optoelectronic. Mc Graw-Hill, Inc, 1995.

20. H, Eshghi; M, Mootabian; A quantitative study on the effect of nitrogen concentration on two-dimensional electron gas (2DEG) mobility in a dilute nitride GaAsN/AlGaAs heterostructure. Solid State Communications 151 (1): 80-83, 2011.

21. K, Lee, MS, Shur; TJ, Drummond; CH, Morko; Low field mobility of 2d electron gas in modulation doped Al_xGa_{1-x}As/GaAs layers. J. Appl. Phys 54 (11): 6432, 1983.

22. JH, Davies; The Physics of Low dimensional Semiconductors. Cambridge University Press, Cambridge, 1998.

23. I, Lo; JK, Tsai; Li-Wei Tu; KY, Hsieh; MH, Tsai; CS, Liu; JH, Huang; S, Elhamri; WC, Mitchel; JK, Sheu; Piezoelectric effect on Al_{0.35-0.6}In_{0.65}Ga_{0.65}N/GaN heterostructures. Appl. Phys. Lett 80: 2684, 2002.

24. KR, Begum; NS, Sankeshwar; Phonon-limited electron mobility in III-nitride heterojunctions. Diamond & Related Material 49: 87-95, 2014.

25. A, Asgari; M, Kalafi; L, Faraone; The effects of GaN capping layer thickness on two-dimensional electron mobility in GaN/AlGa_N/Ga_N heterostructures. Physica E 25 (4): 431-437, 2005.

26. R, Tülek; E, Arslan; A, Bayraklı; S, Turhan; S, Gökden; Ö, Duygulu; AA, Kaya; T, Fırat; A, Teke; E, Özbay; The effect of GaN thickness inserted between

density and microwave frequency characteristics in Spacer based AlGa_N/AlN/GaN HEMT devices. Solid-State Electronics 91: 44-52, 2014.

7. S, Baskaran; A, Mohanbabu; N, Anbuselvan; N. Mohankumar, D, Godwinraj; CK, Sarkar; Modeling of 2DEG sheet carrier density and DC characteristics in spacer based AlGa_N/AlN/GaN HEMT devices. Superlattices and Microstructures 64: 470-482, 2013.

8. M, Demir; Z, Yazar; M, Ozdemir; Effect of polarization and interface roughness on the transport properties of AlGa_N/Ga_N heterostructure. Solid State Communications 158: 29-33, 2013.

9. Y, Du; B, Chang; X, Fu; X, Wang; M, Wang; Electronic structure and optical properties of zinc-blende GaN. Optik 123 (24): 2208-2212, 2012.

10. T, Arai; D, Timmerman; R, Wakamatsu; DG, Lee; A, Koizumi; Y, Fujiwara; Enhanced excitation efficiency of Eu ions in Eu-doped GaN/AlGa_N multiple quantum well structures grown by organometallic vapor phase epitaxy. Journal of Luminescence 158: 70-74, 2015.

11. VS, Katti; SS, Kubakaddi; High field transport properties in a GaN/AlGa_N heterostructure. Physica E: 44 (1): 156-162, 2011.

12. Y, Sato; S, Ishizaki; Y, Murakami; M, Idham; N, Ain; T, Matsunaga; Some Properties of Group-III Nitride Thin Films Directly Grown on Non-Single-Crystalline Substrates by Using a Molecular Beam Epitaxy Apparatus. Journal of Modern Physics 6 (09): 1289-1297, 2015.

13. SW, Kaun; E, Ahmadi; B, Mazumder; F, Wu; EC, Kyle; PG, Burke; UK, Mishra; JS, Speck; GaN-based high-electron-mobility transistor structures with homogeneous lattice-matched InAlN barriers grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy. Semicond. Sci. Technol 29 (4): 045011, 2014.

14. E, Arslan; S, Bütün; SB, Lisesivdin; M, Kasap; S, Ozcelik; E, Ozbay; The persistent photoconductivity effect in AlGa_N/Ga_N heterostructures grown on sapphire and SiC substrates. J. Appl. Phys 103 (10): 103701, 2008.

15. Ö, Kelekçi; PT, Taşlı; H, Yu; M, Kasap; S, Özçelik; E, Özbay; Electron transport properties in Al_{0.25}Ga_{0.75}N/AlN/GaN heterostructures with different InGa_N back barrier layers and Ga_N channel thicknesses



School of Physics and Chemistry, University of Surrey, 2000.

29. S, Gökden; A, Ilgaz; N, Balkan; S, Mazzucato; The effect of scattering mechanisms on the low field mobility in GaN/AlGa_N heterostructures. *Physica E* 25: 86–92, 2004.

30. S, Gokden; Dislocation scattering effect on two-dimensional electron gas transport in GaN/AlGa_N modulation-doped heterostructures. *Physica E*: 23 (1): 19-25, 2004.

two AlN layers on the transport properties of a lattice matched AlInN/AlN/GaN/AlN/GaN double channel heterostructure. *Thin Solid Films* 551: 146–152, 2014.

27. SL, Rumyantsev; MS, Shur; ME, Levinshtein; MATERIALS PROPERTIES OF NITRIDES. SUMMARY. *International Journal of High Speed Electronics and Systems* 14 (01): 1–19, 2004.

28. H, Eshghi; PhD. Thesis; Electron and Hole Transport in GaN and InGa_N. Department of Physics,