مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

مطالعه نظری رسانندگی در $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ نامتجانس تحت تابش لیزر

مصطفی شیری ، سعید حسامی پیله رود

دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده

در این مقاله به مطالعه نظری ترابرد غیرخطی در $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ متجانس می پردازیم .با در نظر گرفتن $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ متجانس بصورت سیستم نیمرسانای دو بعدی تحت تابش لیزر ، معادلات توازن تکانه و انرژی را با رهیافتی مبتنی بر معادله بولتزمن درحالت پایا حل کرده و رسانندگی $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ نامتجانس به شدت تابش و چگالی الکترونی بررسی می کنیم.

از مهمترین ترکیبات شناخته شده بین نیمرسانا های مرکب GaAs می باشد که از خواص منحصر به فرد از جمله گاف نواری مستقیم برخوردار است. همچنین این ماده از تحرک الکترونی بالایی برخوردار است که سبب کاربرد آن در ساخت ترانزیستورهای پر سرعت شده است. علاوه بر این خصوصیات می توان به قابلیت آلیاژی شدن آن با عناصر گروه III مانند In، Al و گروه V مانند P و Sb اشاره نمود که این خاصیت می تواند در کنترل بزرگی گاف انرژی ماده آلیاژی حاصل مورد استفاده قرار گیرد .پیشرفت های اخیر در ساخت نیمرساناها امکان های تقریبا نامحدودی برای طراحی ساختارهایی در مقیاس نانومتر با خواص الکترونیکی و اپتوالکترونیکی فوق العاده ای فراهم کرده است.فهم نظری ترابرد در چنین نانوساختارهایی اهمیت فراوانی در پیشرفت و کاربرد ابزارهای نیمرسانا دارد.[1]

معادله بولتزمن حالت پایای وابسته به زمان در حضور میدان الکترو مغناطیسی برای سیستم نیمرسانای دوبعدی به صورت زیر است:[2]

$$\frac{\partial f_n(k,t)}{\partial t} + \frac{F}{\hbar}.\nabla_k f_n(k,t) = I_n(k,t) \qquad (۱)$$

که دران $\mathbf{f(k,t)}$ تابع توزیع الکترون در حالت $\boldsymbol{\psi_k}$ در زمان t می باشد. $\mathbf{F = -e\,E(t)}$ نیروی اعمالی توسط میدان الکتریکی تابش لیزر برالکترون است، و سهم پراکندگی در مورد آمار غیرتبهگن برابر است با :

$$I_n(k,t) = g_s \sum_{n',k'} [f_{n'}(k',t) W_{nn'}(k,k') - f_n(k,t) W_{n'n}(k',k)] \qquad (۲)$$

با $\boldsymbol{g_s = 2}$ برای تبهگنی اسپین و و $\mathbf{W(k',k)}$ آهنگ گذار حالت پایا برای الکترون پراکنده شده از حالت $\boldsymbol{\psi_k}$ به حالت $\boldsymbol{\psi_{k'}}$ می باشد. برای محاسبه آهنگ گذار $\mathbf{W(k',k)}$ از قاعده طلایی فرمی با عناصر ماتریسی هامیلتونی برهمکنش الکترون–فونون فروهلیچ (Fröhlich) [3]

$$H' = \sum_q (V_q\, e^{i\,q.r}\, b_q + V^+_q\, e^{i\,q.r}\, b^+_q) \qquad (۳)$$

استفاده می شود که در آن $\boldsymbol{b^+_q}$ و $\boldsymbol{b_q}$ به ترتیب عملگرهای خلق و نابودی فونون،

$$V_q = -i\,\hbar\,\omega_{LO} \left(\frac{4\,\pi\,\alpha}{L^2}\right)^{1/2} \left(\frac{\hbar}{2\,m^*\,\omega_{LO}}\right)^{1/4} \frac{1}{q} \qquad (٤)$$

$$\alpha = \frac{e^2}{2\,\hbar\,\omega_{LO}} \left(\frac{2\,m^*\,\omega_{LO}}{\hbar}\right)^{1/2} \left(\frac{1}{\varepsilon_\infty} - \frac{1}{\varepsilon_0}\right) \qquad (۵)$$

ثابت جفت شدگی الکترون با فونون نوری طولی (LO) می باشد. در روابط بالا $\hbar\,\omega_{LO}$ انرژی فونون و ε_∞ و ε_0 ضریب دی الکتریک نوری می باشند. برای یک سیستم با چگالی الکترونی پایین و دمای الکترونی بالا، با فرض اینکه با گذشت زمان شکل $\mathbf{f(k,t)}$ تغییر نمی کند و تنها در امتداد میدان

مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

جابجا می شود، شکل مناسب تابع توزیع الکترون $\mathbf{f(k,t) = exp[E\left(k_x - \frac{m*v}{\hbar}, k_y\right)/k_B T_e]}$ با $\mathbf{E(k) = \epsilon_0 + \frac{\hbar^2}{2m*}(k_x^2 + k_y^2)}$ است. $\mathbf{T_e}$ دمای الکترونی، $\mathbf{k_B}$ ثابت بولتزمن، $\mathbf{v = v_0 e^{-i\omega t}}$ سرعت متوسط الکترون و $\mathbf{E(k)}$ طیف انرژی گاز الکترون شبه دو بعدی در پائین ترین زیرنوار الکترونی با انرژی $\mathbf{\epsilon_0}$ است. همچنین می توان با استفاده از این که در حضور تابش الکترومغناطیسی شدید و برای میدان dc ضعیف، میانگین سرعت در مقایسه با بردار موج الکترون خیلی کوچک است ،زمان واهلش تکانه، $\boldsymbol{\tau}$، بصورت زیر بدست می آید:

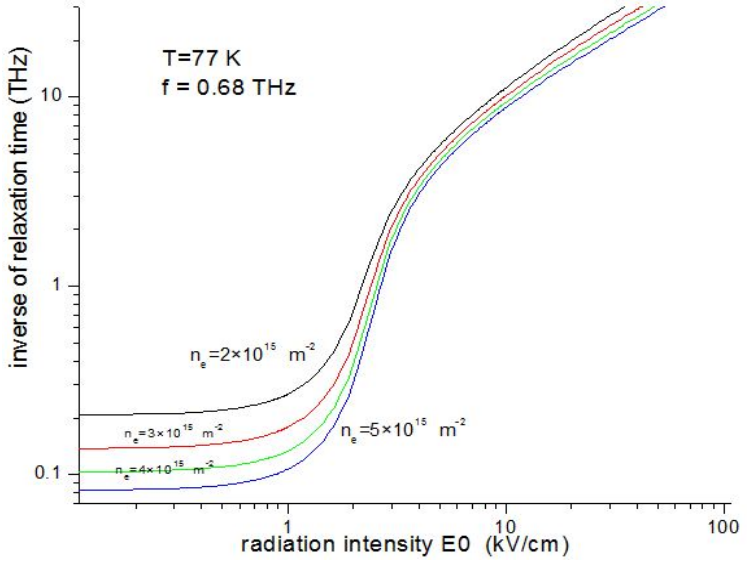
$$\frac{1}{\tau} = \frac{\hbar^2}{4\pi^4 n_e m*} \int d^2k\, d^2k'\; k_x(k'_x - k_x)\frac{\partial f(\epsilon_0 + x)}{\partial x} W(k', k) \qquad (٦)$$

که در آن $\mathbf{x = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}}$ است،با ضرب $\sum_{n,k}$ به دو طرف معادله بولتزمن، معادله بالانس تکانه بدست می آید که از روی آن رسانندگی بصورت زیر بدست می آید

$$\sigma = \frac{n_e e^2}{m*}\frac{\tau}{1 - i\omega\tau} \qquad (٧)$$

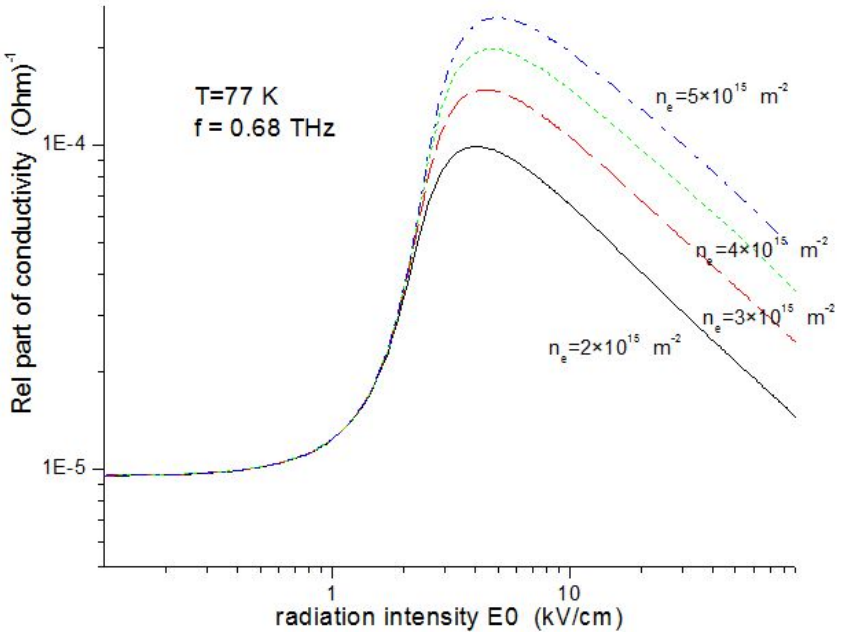
محاسبات و نتایج

با استفاده از نتیجه بدست آمده برای زمان واهلش تکانه در مرجع (Xu and Chang, 1997) و انجام محاسبات عددی رسانندگی الکترون را برای ساختارنا متجانس $\mathbf{Al_xGa_{1-x}As/GaAs}$ محاسبه شده است. در انجام محاسبات عددی با احتساب مقادیر $\mathbf{m^* = 0.0665\, m_e}$، $\mathbf{m_e}$ جرم الکترون آزاد، چگالی بار تهی $\mathbf{n_{depl} = 5 \times 10^{14} m^{-2}}$، $\mathbf{\epsilon_0 = 12.9}$، انرژی فونون $\mathbf{\hbar\omega_{LO} = 13.6 meV}$، و ثابت جفت شدگی $\mathbf{\alpha = 0.068}$ انجام پذیرفته است. رسانندگی برحسب شدت میدان تابشی در دمای ۷۷ کلوین برای فرکانس تابشی 0.68THz در چگالی های الکترونی مختلف بصورت زیر بدست آمدند.



نمودار۱-وارون زمان واهلش برحسب شدت تابش برای چگالی های الکترونی های مختلف

مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)



نمودار۲-وارون رسانندگی برحسب شدت تابش برای چگالی های الکترونی های مختلف

با افزایش شدت تابش، زمان واهلش کاهش و رسانندگی ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد.برای یک شدت تابش معین،با افزایش چگالی الکترونی ،رسانندگی و زمان واهلش افزایش می یابد. با افزایش شدت میدان تابشی،وابستگی رسانندگی به چگالی الکترونی افزایش می یابد.و در شدت های پایین،اثر چگالی از بین میرود.با افزایش شدت میدان تابشی،پیش از نمایان شدن اثر چگالی،رسانندگی افزایش می یابد ولی پس از آن رسانندگی کاهش می یابد و اثر چگالی بر آن ظاهر می شود. نتایج بدست آمده از این پژوهش با نتایج تجربی آقای آزمار و همکارانش[4] همخوانی دارد.

مراجع

[1] Eckehard Scholl.(1998).Theory of Transport Properties of Semiconductor Nanostructures. SPRINGER SCIENCE BUSINESS MEDIA, B.V
[2] W. Xu and C. Zhang. Nonlinear transport in steady-state terahertz-driven twodimensional electrongases. Physical Review B, 55, 5259 , 1997.
[3] John S.Blakemore(1994).Gallium Arsenide.Ammerican Inst of Physics
[4] N. G. Asmar, J. Cerne, A. G. Markelz, E. G. Gwinn, M. S. Sherwinand K. L. Campman, and A. C. Gossard. Temperature of quasi-two-dimensional electron gases under steady-state terahertzdrive. Applied Physics Letters, 68, 829, 1996.