پژوهشگاه دانش‌های بنیادی

شماره مقاله : ۴۸

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

تحرک پذیری الکترونی در گاز الکترونی شبه دو بعدی تحت تابش تراهرتز

مصطفی شیری ، سعید حسامی پیله رود

دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده

در اینجا با استفاده از رهیافتی مبتنی بر معادله ترابرد بولتزمن و با احتساب پراکندگی های الکترون-فونون نوری طولی و محاسبه زمان واهلش تکانه، وابستگی تحرک پذیری الکترون های تحت اثر تابش تراهرتز گاز الکترون شبه دوبعدی در ساختارنا متجانس $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ به شدت و فرکانس تابش بررسی می گردد. نتایج حاکی از کاهش نقش اثرات جفت شدگی الکترون-فوتون در شدت های تابش بالا است.

دستگاه گاز الکترونی شبه دو بعدی (لایه الکترونی با ضخامت بسیار کم) در صفحه xy را تحت اثر تابش تراهرتز با فرکانس ω به شکل $\boldsymbol{E(t) = E_o e^{-i\omega t}}$ با قطبش میدان الکتریکی در راستای x در نظر می گیریم. برای شباهت بیشتر با شرایط تجربی ضخامت لایه صفر فرض نمی شود. لذا برای توصیف حالت و حرکت الکترون در راستای z (عمود بر سطح لایه) از تابع موج وردشی $\boldsymbol{\psi_0(z) = (b^3/2)^{1/2}\ z\, e^{-bz/2}}$ استفاده می شود. متغیر b بطور تقریبی از رابطه $\boldsymbol{b = \frac{48\,\pi\, m^*\, e^2}{\hbar^2\, \varepsilon_0}\ (n_d + \frac{11}{32}\, n_e)}$ تعیین می گردد که در آن m* جرم مؤثر الکترون، e بار الکترون، nd و ne به ترتیب چگالی بار تهی (depletion) و بار الکترونی، و $\boldsymbol{\varepsilon_0}$ ضریب دی الکتریک (ایستا) می باشند [2]. می توان حالت های الکترونی وابسته به زمان متناظر با حرکت الکترون در صفحه xy در حضور میدان تابشی را با استفاده از تبدیلات یکانی مناسب بدست آورد.

$$\boldsymbol{\psi_k\,(x,y,t) = \frac{1}{L}\, e^{i\,\gamma_1[sin(\omega\, t) - 2\,\omega\, t]}\, e^{i\,\gamma_0\, k_x[1-cos(\omega\, t)]}\, e^{i\,E(k)t/\hbar}\, e^{ik_x\, x}\ e^{ik_y\, y}} \qquad (۱)$$

در رابطه فوق $\boldsymbol{\gamma_0 = e\,E_0/(m^*\omega^2)}$ ، $\boldsymbol{\gamma_1 = (e\,E_0)^2/(8\,\hbar\, m^*\omega^3)}$ بردار موج الکترون، و L ابعاد لایه می باشند [3]. در اینجا $\boldsymbol{2\,\gamma_1\hbar\,\omega}$ انرژی متوسط القایی ناشی از برهم کنش الکترون ها با میدان تابشی تراهرتز است. برای توصیف ترابرد الکترونی تحت اثر نیروی ناشی از میدان خارجی و اتلاف ناشی از پراکندگی های الکترون-فونون می توان از معادله ترابرد بولتزمن به همراه قاعده طلایی فرمی برای محاسبه آهنگ گذار در پراکندگی های الکترون-فونون بهره برد. با در نظر گرفتن گذارهای درون زیرنواری برای الکترون در پائین ترین زیر نوار، شکل منا سب معادله بولتزمن برای توصیف ترابرد الکترونی پایای وابسته به زمان دستگاه گاز الکترون شبه دوبعدی در حضور میدان الکترو مغناطیسی عبارت است از:

$$\boldsymbol{\frac{\partial f(k,t)}{\partial t} + \frac{F}{\hbar}.\nabla_k f(k,t) = g_s \sum_{k'}[f(k',t)W(k,k') - f(k,t)W(k',k)]} \qquad (۲)$$

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 تراهرتز برالکترون، $\mathbf{g_s = 2}$ تبهگنی اسپین الکترون، 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) استفاده می شود.

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 جابجا می شود، شکل منا سب 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

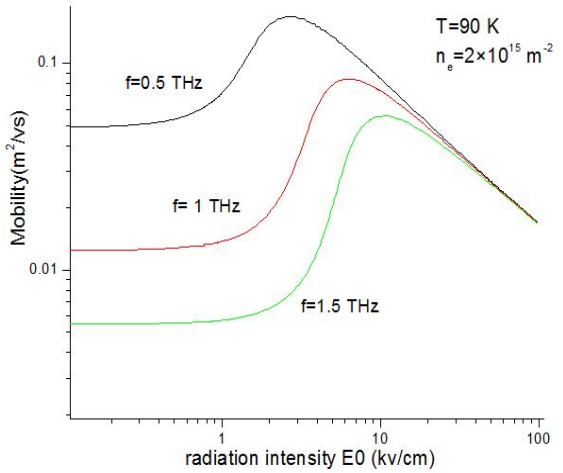
الکترونی با انرژی ϵ_0 است. همچنین می توان با استفاده از این که در حضور تابش الکترومغناطیسی شدید و برای میدان dc ضعیف، میانگین سرعت در مقایسه با بردار موج الکترون خیلی کوچک است و با محاسبه زمان واهلش تکانه، τ،

$$\frac{1}{\tau} = \frac{\hbar^2}{4\pi^4 n_e m^*} \int d^2k\, d^2k'\; k_x(k'_x - k_x) \frac{\partial f(\epsilon_0+x)}{\partial x} W(k', k) \qquad (۳)$$

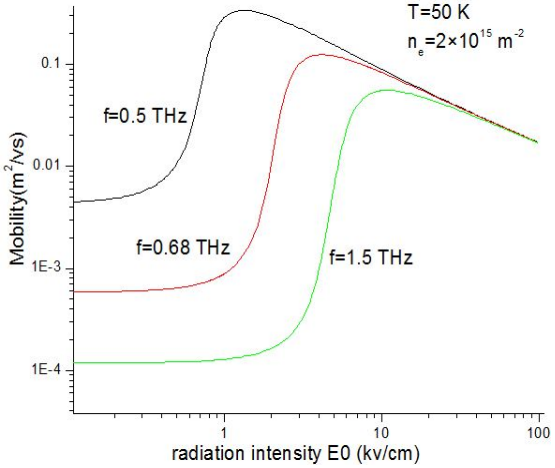
که در آن $x = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}$ است، رسانندگی $\sigma = \frac{n_e e^2}{m^*} \frac{\tau}{1-i\omega\tau}$ و تحرک پذیری الکترون $\mu = \frac{Re\sigma}{en_e}$ را محاسبه نمود [1].

محاسبات و نتایج

با استفاده از نتیجه بدست آمده برای زمان واهلش تکانه در مرجع (Xu and Chang, 1997) و انجام محاسبات عددی تحرک پذیری الکترون، μ، را برای ساختارنا متجانس $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ محاسبه شده است. در انجام محاسبات عددی با احتساب مقادیر $m^* = 0.0665\, m_e$، جرم الکترون آزاد، چگالی الکترونی $n_e = 2\times10^{15} m^{-2}$ ، چگالی بار تهی $n_{depl} = 5\times10^{14} m^{-2}$، $\epsilon_0 = 12.9$، انرژی فونون $\hbar\omega_{LO} = 13.6meV$، و ثابت جفت شدگی $\alpha = 0.068$ انجام پذیرفته است. تحرک پذیری برحسب شدت میدان تابشی برای دماهای ۹۰ کلوین و ۵۰ کلوین برای فرکانس های تابشی مختلف بصورت زیر بدست آمدند.

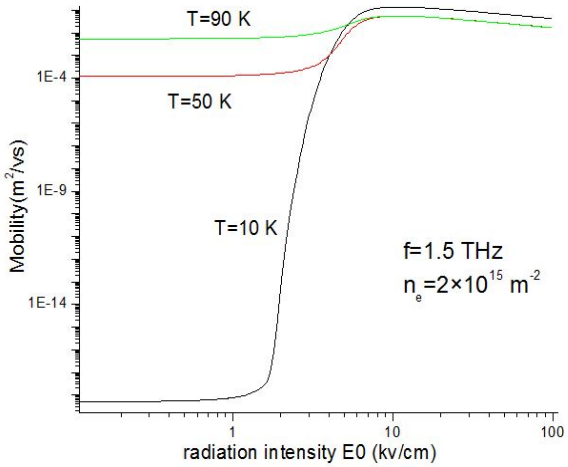


نمودار۱-تحرک پذیری برحسب شدت تابش برای دمای ۹۰ کلوین برای فرکانس های مختلف



نمودار۲-تحرک پذیری برحسب شدت تابش برای دمای ۵۰ کلوین برای فرکانس های مختلف

افزایش شدت تابش، تحرک پذیری ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد.برای یک شدت تابش معین،با افزایش f تحرک پذیری کاهش می یابد.درشدت میدان های بزرگ،اثر f روی تحرک پذیری ضعیف می شود و نیز در شدت های بسیار بالا وابستگی تحرک پذیری الکترونی به فرکانس تابش f از بین می رود. به عبارتی اثرات جفت شـــدگی الکترون-فونون در شـــدت های تابش بالا تعیین کننده رفتار و نحوه ترابرد الکترونی نبوده و لذا تحرک پذیری تابع فرکانس تابش نیست.



نمودار۳-تحرک پذیری برحسب شدت تابش برای دما های مختلف در فرکانس ثابت

با مقایسه نتایج مشاهده می شود که با افزایش فرکانس آستانه توقف وابستگی تحرک پذیری الکترونی به فرکانس، به شدت های تابش بالاتر جابجا می شود.و نیز در شدت های کم میدان تابشی با افزایش بسامد تحرک پذیری کاهش می یابد ونیز در فرکانس ثابت با افزایش دما تحرک پذیری کاهش می یابد.نتایج بدست آمده از این پژوهش با نتایج تجربی آقای آزمار و همکارانش[4] همخوانی دارد.

نتیجه‌گیری

با استفاده از رهیافتی مبتنی بر معادله ترابرد بولتزمن و با احتساب پراکندگی های الکترون-فونون نوری طولی و محاسبه زمان واهلش تکانه، وابستگی تحرک پذیری الکترون های تحت اثر تابش تراهرتز گاز الکترون شبه دوبعدی در ساختارنا متجانس $\boldsymbol{Al_xGa_{1-x}As/GaAs}$ به شدت و فرکانس تابش بررسی گردید. با افزایش شدت تابش تحرک پذیری ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد و در میدان های شدید وابستگی به فرکانس ازبین میرود و در در میدان های نه چندان قوی، با افزایش فرکانس،تحرک پذیری کاهش می یابد. نتایج حاکی از کاهش نقش اثرات جفت شدگی الکترون-فوتون در شدت های تابش بالا است.

مراجع

[1] W. Xu and C. Zhang. Nonlinear transport in steady-state terahertz-driven twodimensional electrongases. Physical Review B, 55, 5259 , 1997.
[2] J.T. Devreese, F. Peeters, and North Atlantic Treaty Organization. Scientific Affairs Division. The physics of the two-dimensional electron gas. NATO ASI series: Physics. Plenum Press, 1987.
[3] Chao Zhang. Frequency-dependent electrical transport under intense terahertz radiation. P
hysical Review B, 66, 081105, 2002.
[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.