

## بررسی اثر ترازهای تله ای بر جریان گیت ترانزیستورهای با تحرک پذیری بالای

الکترونی  $Al_{0.25}Ga_{0.75}N / GaN$

کارآمد، محمدرضا؛ عسگری، اصغر؛ کلافی، منوچهر

پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، دانشگاه تبریز

### چکیده

در ترانزیستورهای اثر میدان ساختارهای نامتجانس  $AlGaN/GaN$  ترازهای تله ای سطحی متناظر با نواحی گیت نشده بین گیت و درین و نیز ترازهای تله ای موجود در لایه  $AlGaN$  باعث نشت جریان گیت از فلز گیت به گاز الکترونی دو بعدی و به درین می شوند. همچنین این ترازها از جمله عوامل ایجاد نویز در این ترانزیستورها می باشند. در این مقاله یک مدل تئوری بر اساس تونل زنی وابسته به ترازهای تله ای لایه  $AlGaN$  و نیز جریانهای ناشی ایجاد شده بواسطه ترازهای تله ای سطحی ارائه شده است. جریان ناشی محاسبه شده از مدل فوق سازگاری بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد.

## Investigation of effects of traps on gate current in $AlGaN/GaN$ high electron mobility transistors

Karamad, M.; Asgari, A.; Kalafi, M..

Research institute of Applied Physics and Astronomy, University of Tabriz, Tabriz, Iran

### Abstract

Surface state traps in ungated region between gate and drain and trap levels within  $AlGaN$  layer cause the gate leakage current in  $AlGaN/GaN$  heterostructures field effect transistors and are one reasons for noise in this transistors. A theoretical model according to trap assisted tunneling model in  $AlGaN$  layer and currents leakage due to surface state traps was proposed. The calculated leakage current has good agreement with exist experimental data.

PACS No. 72; 73;

گیت است که به دلیل حضور ترازهای تله ای بوجود می آید [۱، ۲]. کمینه کردن جریان ناشی از گیت بمنظور کاربرد این ترانزیستورها در مدارها و سیستمهای با نویز پایین امری ضروری است. [۳]

### مدلبندی و محاسبات:

برای محاسبه جریان ناشی از گیت دو حالت مجزای زیر را مورد بررسی قرار میدهیم:

### الف) جریان از فلز به نیمرسانا:

### مقدمه

ترانزیستورهای با تحرک پذیری بالای الکترونی بر مبنای ساختارهای نیتریدی به دلیل توان بالای خروجی این قطعات، به عنوان یکی از کاندیدای مهم در مدارهای فرکانس بالا در دهه های اخیر مورد توجه بوده است. در ساختار نامتجانس  $AlGaN/GaN$  تشکیل گاز الکترونی دو بعدی با چگالی بالا در فصل مشترک  $AlGaN$  و  $GaN$  حتی در غیاب هر گونه آلایش عمدی بدلیل خاصیت پیزوالکتریکی ساختارهای نیتریدی امکانپذیر است. یکی از موانع اصلی در پیشرفت و دستیابی به توانهای بالا در این قطعات وجود یکسری نویزها در این قطعات است. از جمله عوامل ایجاد نویز در این ترانزیستورها نشت جریان

$$R1 = C_t f_m (1 - f_t) N_t P1 \quad (5)$$

$$R2 = C_t f_t N_t P2 \quad (6)$$

که  $f_t$  و  $f_m$  به ترتیب تابع توزیع فرمی دیراک فلز و تابع توزیع فرمی دیراک الکترونیهای تراز تله ای است، که از مساوی قرار دادن  $R1$  و  $R2$  در حالت پایا بدست میاید.  $C_t$  تابعی از انرژی الکترون و انرژی تراز تله ای است. که توسط رابطه زیر داده میشود [۶]:

$$C_t = \frac{8E_1^2}{3\hbar\sqrt{q\phi_t - E_1}} \quad \text{و} \quad E_1 = .2(eV) \quad (7)$$

بنابراین جریان تونل زنی ناشی از تراز تله ای و جریان تونل زنی از سد پتانسیل بصورت زیر بدست می آیند:

$$J_{TT} = \int_{q\phi_t}^{q\phi_m} \frac{q^2}{c_t N_t} \left( \frac{1}{f_m P1} + \frac{1}{P2} \right) d\Phi \quad (8)$$

$$J_T = \frac{A^* T}{K_B} \int_0^{q\phi_s} dE f_m(E) P(E) \quad (9)$$

که در این رابطه  $A^*$  ثابت ریچاردسون،  $T$  دما،  $K_B$  ثابت بولتزمن،  $E$  انرژی الکترون و  $P(E)$  ضریب عبور از سد پتانسیل است. AlGaIn

### ب) جریان از نیم رسانا به فلز:

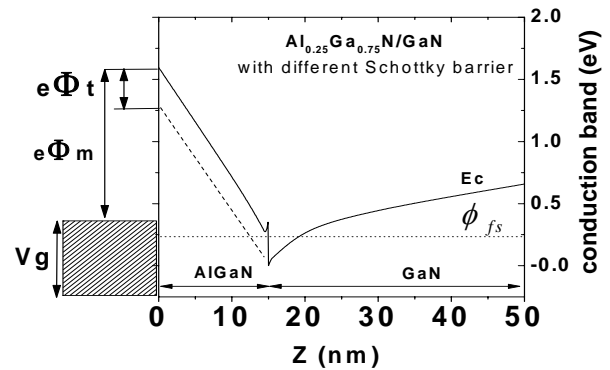
در این حالت الکترونیهای واقع در باند هدایت GaIn و AlGaIn و الکترونیهای واقع در گاز الکترونی دو بعدی از طریق تونل زنی وابسته به تراز تله ای یا از طریق تونل زنی از سد پتانسیل میتوانند به درون فلز تونل بزنند. نرخ تونل زنی به تراز تله ای برابر با  $R1 = C_t f_s (1 - f_t) N_t P2$  و نرخ تونل زنی از تراز تله ای برابر با  $R2 = C_t f_t N_t P1$  است. جریان تونل زنی وابسته به تراز تله ای و تونل زنی از سد پتانسیل بصورت زیر بدست می آیند:

$$J_{TT} = \int_{q\phi_t}^{q\phi_m} \frac{q^2}{c_t N_t} \left( \frac{1}{f_s P2} + \frac{1}{P1} \right) d\Phi \quad (11)$$

$$J_T = \frac{A^* T}{K} \int_0^{q\phi_s} f_s(E) P(E) dE \quad (12)$$

که  $\phi_s$  مکان تراز فرمی گاز الکترونی دو بعدی است.

پروفایل بانندی مربوط به ساختار نامتجانس AlGaIn/GaIn مطابق شکل (1) با حل خودسازگار معادله شرودینگر و پواسون قابل دسترس است [۴].



شکل (۱): پروفایل بانندی ساختار نامتجانس AlGaIn/GaIn

که تراز تله ای با انرژی  $q\phi_t$  در زیر کمینه باند هدایت AlGaIn در نظر گرفته شده است. الکترونیهای درون فلز میتوانند بواسطه جریان تونل زنی وابسته به ترازهای تله ای  $J_{TT}$  و جریان تونل زنی از سد  $J_T$  به GaIn بروند [۵]. بنابراین در این حالت جریان گیت بصورت مجموع دو جریان فوق خواهد بود:

$$J_{gate} = J_{TT} + J_T \quad (1)$$

جریان تونل زنی وابسته به ترازهای تله ای در دو مرحله صورت میگیرد. ابتدا الکترونها از فلز به ترازهای تله ای با نرخ تونل زنی  $R1$  تونل میزنند و سپس از آنجا با نرخ تونل زنی  $R2$  به باند هدایت AlGaIn یا GaIn تونل میزنند. احتمال تونل زنی در مرحله اول و دوم به ترتیب برابر با  $P1$  و  $P2$  است که از طریق روش WKB محاسبه و بصورت زیر بدست می آیند:

$$P1 = \exp\left[-\frac{4\sqrt{2mq}}{3\hbar v} (\phi_t^2 - \phi_t^2)\right] \quad (2)$$

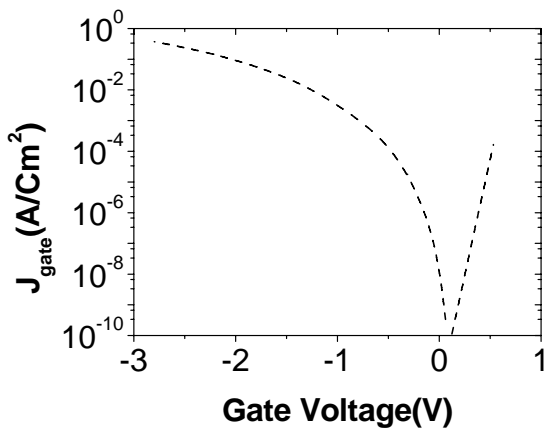
$$P2 = \exp\left[-\frac{4\sqrt{2mq}}{3\hbar v} (\phi_t^2)\right] \quad (3)$$

که  $v$  شیب پتانسیل یا همان میدان الکتریکی در طول لایه AlGaIn است و  $q\phi$  انرژی الکترون که از نوک سد AlGaIn سنجیده میشود. نرخهای تونل زنی  $R1$  و  $R2$  از طریق روابط زیر بدست میآید [۶]:

در حالی که بایاس اعمالی به گیت مثبت باشد علاوه بر جریانهای فوق باید جریانهای نشتی ای که بخاطر حضور ترازهای تله ای سطحی واقع در ناحیه بدون گیت ( بین گیت و درین) بوجود می‌آیند، نیز لحاظ شود. بدلیل حضور ترازهای تله ای سطحی، تراز فرمی سطحی دچار خمیدگی میشود. لذا از دید الکترون با انرژی در محدوده گاف، ارتفاع سد پتانسیل به اندازه  $\Delta E$  کاهش مییابد که منجر به ایجاد چگالی الکترونی برابر با

$$N_c \exp\left(\frac{-(E_c - E_{fs}) - \Delta E}{KT}\right)$$

گاز الکترونی دو بعدی خواهد یافت [۸].  
 در شکل (۳) چگالی جریان ایجاد شده ناشی از حضور تراز تله ای با انرژی در لایه **AlGaIn** بر حسب ولتاژهای اعمالی گیت رسم شده است.



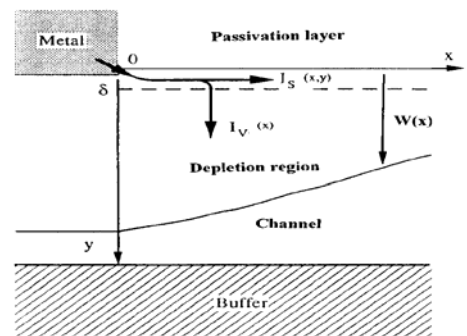
شکل (۴): چگالی جریان ناشی از تونل زنی وابسته به تراز تله ای به ازای  $q\Phi_i = .48(\text{eV})$

وقتی که ولتاژ گیت منفی است تراز فرمی فلز به اندازه  $qV_g$  بالاتر از تراز انرژی فرمی گاز الکترونی دو بعدی قرار می گیرد. که این امر امکان تونل زنی الکترونها از فلز به باند هدایت **AlGaIn** و **GaN** را ممکن میسازد. با منفی تر شدن ولتاژ گیت فاصله تراز فرمی با ته چاه کم میشود و لذا از غلظت گاز الکترونی دو بعدی کاسته شده و اختلاف تراز فرمی گاز الکترونی دو بعدی با تراز فرمی فلز زیاد میشود که این امر امکان تونل زنی برای تعداد زیادتری از الکترونهای درون فلز را فراهم میکند. از طرفی با منفی تر شدن ولتاژ گیت، شیب سد پتانسیل افزایش مییابد و طبق روابط (۲) و (۳)، باعث افزایش احتمال تونل زنی خواهد شد و در نهایت

در حالی که بایاس اعمالی به گیت مثبت باشد علاوه بر جریانهای فوق باید جریانهای نشتی ای که بخاطر حضور ترازهای تله ای سطحی واقع در ناحیه بدون گیت ( بین گیت و درین) بوجود می‌آیند، نیز لحاظ شود. بدلیل حضور ترازهای تله ای سطحی، تراز فرمی سطحی دچار خمیدگی میشود. لذا از دید الکترون با انرژی در محدوده گاف، ارتفاع سد پتانسیل به اندازه  $\Delta E$  کاهش مییابد که منجر به ایجاد چگالی الکترونی برابر با

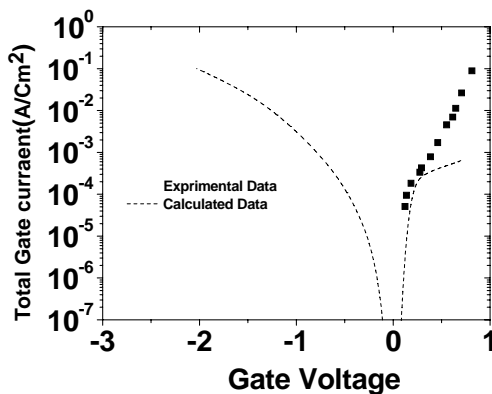
در سطح خواهد شد. که  $N_c$  چگالی موثر حالات در باند هدایت و  $E_c - E_{fs}$  اختلاف انرژی فرمی با کمینه باند هدایت است. الکترونهای محدود شده توسط سد الکترونی تولید چگالی جریان سطحی  $I_s(x)$  در لایه سطحی به ضخامت  $\delta$  میکنند. بخشی از الکترونها که با غلبه بر سد الکترونی در جهت لایه **AlGaIn** حرکت میکنند، تولید چگالی جریان حجمی  $I_v(x)$  میکنند [۷].

این جریانها بصورت شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است. جریان گیت در حالت اعمال ولتاژ گیت مثبت از مجموع جریانهای تونل زنی از سد و تونل زنی بواسطه تراز تله ای و  $I_s(x)$  و  $I_v(x)$  که بواسطه اثرات سطح بوجود آمده اند بدست می آید.



شکل (۲): جریانهای تولید شده در اثر ترازهای تله ای سطحی

نتیجه و بحث:



شکل (۴): چگالی کل جریان نشتی گیت در ساختار نامتجانس AlGaIn/GaN با  $q\Phi_f = 0.48$  (eV).

### نتیجه گیری:

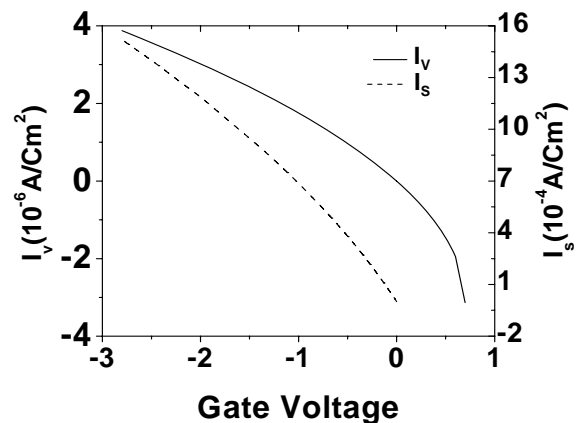
جریان نشتی گیت بر اساس یک مدل تئوری بر اساس تونل زنی از تراز تله ای و ترازهای سطحی محاسبه شده است. در این محاسبات انرژی تراز تله ای برای کسر مولی آلومینیوم،  $x=0.25$  برابر  $q\Phi_f = 0.48$  (eV) بدست آمده است. جریان نشتی محاسبه شده از مدل فوق سازگاری تقریباً خوبی با نتایج تجربی دارد.

### مراجع

- [1]. A. Asgari, M. Kalafi, and L. Faraone, J. Appl. Phys. 95, 1185 (2004).
- [2]. G. Koley, V. Tilka, L. F. Eastman, M. G. Spencer, IEEE, Trans. Electron Devices, 50, 886 (2003).
- [3]. E. J. Miller, X. Z. Dang, T. E. Yu, J. Appl. Phys. 88, 5951 (2000).
- [4]. A. Asgari, M. Kalafi, and L. Faraone, Physica E 25, 431 (2005).
- [5]. A. J. Sierakowski, L. F. Eastman, J. Appl. Phys. 88, 3398 (1999).
- [6]. Fliescher, P. T. Lia, J. Appl. Phys. 80, 634 (1996).
- [7]. G. Jin, B. K. Jones, J. Appl. Phys. 80, 6340 (1996).
- [8]. A. Asgari, M. Kalafi, "The Control of Two-Dimensional-Electron-Gas density and Mobility in AlGaIn/GaN Heterostructures with Schottky gate", (To be published in Materials Science and Engineering B).

$qV_g$  پایتتر از تراز انرژی فرمی گاز الکترونی دو بعدی قرار می گیرد، که این امر امکان تونل زنی الکترونها از باند هدایت AlGaIn و GaN و گاز الکترونی دو بعدی را ممکن میسازد. با افزایش ولتاژ گیت فاصله تراز فرمی با تله چاه زیاد شده و لذا به غلظت گاز الکترونی دو بعدی افزوده میشود و منجر به تونل زنی تعداد زیادتری از الکترونها از گاز الکترونی دو بعدی میگردد. از طرفی با افزایش ولتاژ گیت شیب سد پتانسیل AlGaIn کاهش یافته و در نتیجه کاهش احتمال تونل زنی خواهیم داشت.

چگالی جریان ایجاد شده در لایه سطحی AlGaIn،  $I_s(x)$ ، و چگالی جریان حجمی،  $I_v(x)$ ، به ازای ولتاژهای مختلف در شکل (۳) نشان داده شده است



شکل (۳): چگالی جریان حجمی و چگالی جریان سطحی در بایاسهای مستقیم و معکوس

در محاسبه چگالی جریان سطحی و حجمی پارامتر  $\Delta E$  برای سطح را برابر با  $0.2$  (eV) در نظر گرفته ایم. بلاخره در شکل (۴) چگونگی تغییرات چگالی کل جریان نشتی گیت همراه با داده های تجربی، به منظور مقایسه رسم شده است. که سازگاری تقریباً خوبی بین آنها وجود دارد.