

«یادداشت تحقیقاتی»

ترانزیستور مسفت با ساختار ناهمگون همراه با درین کم غلظت و ناخالصی دلتاگونه

کامیار ثقفی^۱، محمد کاظم مروج فرشی^{۲*} و وحید احمدی^۳

۱- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران

۲- استاد بخش مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار بخش مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۵

farshi_k@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: آذر ۱۳۸۱، پذیرش مقاله: تیر ۱۳۸۲)

چکیده - در این مقاله ساختار جدید δ -doped LDD HMESFET را معرفی و شبیه سازی می کنیم. یکی از راههای افزایش سرعت حامل در کانال در مجاورت سورس ترانزیستور مسفت، استفاده از ساختار ناهمگون HMESFET است؛ یعنی از سورس $Al_xGa_{1-x}As$ در مجاورت کانال GaAs استفاده می شود. با افزایش x (درصد مولی Al) می توان ناپیوستگی گاف نوار (ΔE_G) در فصل مشترک سورس - کانال را افزایش داد و سرعت حامل را در ناحیه میدان ضعیف زیاد کرد. اما افزایش بیش از حد x مراکز DX را افزایش داده موجب کاهش جریان می شود. لذا برای اجتناب از افزایش مراکز DX، باید به روش دیگری روی آورد. رویکرد جایگزین پیشنهاد شده در این مقاله استفاده از لایه های ناخالصی دلتاگونه (δ -doping) در فصل مشترک سورس - کانال است. این کار موجب افزایش ناپیوستگی در گاف نوار در فصل مشترک سورس - کانال می شود. افزایش ΔE_G معادل افزایش درصد مولی Al است. در این مقاله با شبیه سازی ساختار پیشنهادی با درصد مولی Al کمتر از اندازه استفاده شده در ترانزیستور مرجع [۱]، نشان می دهیم که متوسط سرعت الکترون، بدون در نظر گرفتن مراکز DX، در دو ترانزیستور برابر است.

کلید واژگان: ناخالصی دلتاگونه، درین کم غلظت، مسفت ساختار ناهمگون، شبیه سازی، مراکز DX.

۱- مقدمه

با افزایش بیش از حد معین درصد مولی آلومینیوم x ، جریان درین کاهش می یابد [۲]. در واقع با افزایش x ناپیوستگی در گاف نوار (ΔE_G) در فصل مشترک سورس - کانال افزایش یافته و الکترونهایی که از سورس به کانال تزریق می شوند برای ورود به دره L انرژی کافی خواهند داشت. بدین ترتیب، با افزایش x حامل های دره L افزایش می یابد و با کاهش متوسط سرعت حامل جریان درین نیز کاهش می یابد. بنابراین به نظر می رسد، برای x مقدار

به منظور افزایش متوسط سرعت حامل در سراسر کانال مسفت و در نتیجه افزایش جریاندی آن، از ساختار مسفت ناهمگون^۱ (HMESFET) با سورس $Al_xGa_{1-x}As$ و یک لایه درین کم غلظت^۲ (LDD) استفاده می شود [۱]. از سوی دیگر

1. Heterostructure Metal Semiconductor Field Effect Transistor
2. Lightly Doped Drain

ساختار عمودی مشکل لایه‌نشانی برای لایه دلتاگونه را برطرف خواهد کرد.

۲- مدل ناخالصی دلتا گونه

در این تحقیق، دولایه ناخالصی دلتاگونه p^+ و n^+ به صورت یک دوقطبی، در دوطرف فصل مشترک مطابق شکل ۱ نشان داده شده است [۱۲]. در شکل ۱-الف نمودار نوار انرژی یک پیوند ناهمگون ایده‌آل با صرفنظر از انحنا نوار رسم شده است. در شکل ۱-ب، یک لایه بسیار نازک دهنده در طرف شکاف انرژی باریکتر و یک لایه بسیار نازک پذیرنده در طرف شکاف انرژی بهتر به فاصله d از یکدیگر قرار گرفته‌اند. غلظت ناخالصی (حدود 10^{17}cm^{-3} تا 10^{19}cm^{-3}) و همچنین ضخامت ($t < 100 \text{\AA}$) برابر انتخاب می‌شود. برای شرایط داده شده این دولایه از حامل‌ها تهی خواهند شد.

میدان الکتریکی بین این دو لایه که مانند یک خازن عمل می‌کند از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E = \frac{qNt}{\epsilon} \quad (1)$$

در این رابطه N غلظت ناخالصی هر یک از لایه‌ها است.

اختلاف پتانسیل بین صفحات این خازن برابر است با:

$$\Delta\Phi = \frac{qNt}{\epsilon} d \quad (2)$$

بدین ترتیب، پتانسیل دوقطبی در نمودار نوار انرژی، در اطراف پیوند تغییر به وجود می‌آورد. وضعیت جدید نوار انرژی در شکل ۱-ج نشان داده شده است. ارتفاع سد پتانسیل در نوار هدایت در شرایط جدید از رابطه ذیل به دست می‌آید:

$$\Delta E_c^{new} = \Delta E_c^{old} + q\Delta\Phi + q \frac{qNt}{\epsilon} t \quad (3)$$

با فرض اینکه افت پتانسیل روی لایه‌ها در مقایسه با $q\Delta\Phi$ ناچیز باشد داریم:

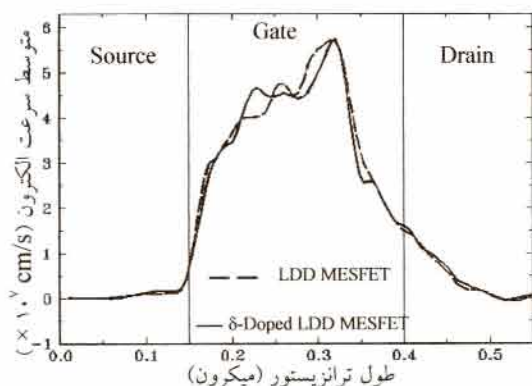
$$\Delta E_c^{new} = \Delta E_c^{old} + q\Delta\Phi \quad (4)$$

بهینه‌ای وجود دارد که به ازای آن متوسط سرعت حامل‌ها حداکثر خواهد بود. اضافه کردن یک لایه درین کم غلظت (LDD) در فصل مشترک درین-کانال، تا حدودی سرعت حامل را در طرف درین بهبود می‌بخشد. عامل دومی نیز با افزایش درصد مولی Al سبب کاهش جریان می‌شود. به ازای مقادیر $x < 0.22$ ، عمق تراز دهنده‌ها در $Al_xGa_{1-x}As$ (تقریباً 6 meV) کمتر از عمق این تراز در $GaAs$ است. در نتیجه غلظت حامل‌ها مستقل از اندازه x است. در حالی‌که به ازای مقادیر $x > 0.22$ تراز دهنده‌ها عمیق می‌شود. در چنین شرایطی انرژی یونش دهنده‌ها تا حدود 150 meV تا 250 meV می‌رسد، و در نتیجه غلظت حامل‌ها با افزایش x سرعت کاهش می‌یابد. این ترازهای عمیق به نام مراکز DX^1 شناخته می‌شوند [۳]. بدین ترتیب به ازای مقادیر $x > 0.22$ غلظت حامل‌های آزاد نسبت به غلظت ناخالصی‌ها کاهش چشمگیری خواهد داشت. این کاهش به نوبه خود موجب کاهش چشمگیر جریان کانال می‌شود. بنابراین، چنانچه بتوان ΔE_G را بدون افزایش x تا حد مورد نظر افزایش داد، درحالی‌که متوسط سرعت افزایش می‌یابد غلظت حامل دیگر کاهش نخواهد یافت و در نتیجه جریان درین افزایش می‌یابد. در واقع تنظیم ناپیوستگی گاف نوار انرژی در محل فصل مشترک سورس-گیت، راه حل مورد نظر است. برای این منظور از ایده به کارگیری ناخالصی دلتاگونه^۲ در مجاورت فصل مشترک سورس-کانال استفاده شد. به کارگیری توزیع دلتاگونه ناخالصی در ترانزیستورهای مسافت بیش از یک دهه قدمت دارد [۴-۱۱]. در این ترانزیستورها لایه ناخالصی دلتا به صورت افقی در طول کانال قرار گرفته و از آن به عنوان کانال هدایت استفاده می‌شود. اما برای تنظیم ناپیوستگی در گاف نوار انرژی، لایه ناخالصی دلتا باید به طور عمودی در فصل مشترک سورس-گیت قرار گیرد. استفاده از مسافت با

1. DX Centers

2. δ -doping

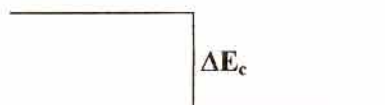
بررسی صحت این مدل، شبیه‌سازی برای ترانزیستور با ابعاد و مشخصات و روش شبیه‌سازی مشابه ترانزیستور مرجع [۱] انجام شده است. تنها تفاوت ترانزیستور جدید با ترانزیستور مرجع [۱] وجود ناخالصی دلتا گونه در مجاورت فصل مشترک سورس-کانال است. شکل ۲ متوسط سرعت را برای این دو ساختار نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل تا حد زیادی با یکدیگر تطابق دارند.



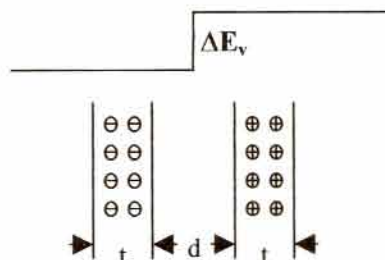
شکل ۲ مقایسه متوسط سرعت الکترون در LDD HMESFET به ازای $x=0.2$ با δ -Doped LDD HMESFET به ازای $x=0.17$ در شرایط $V_{GS}=-0.2V$, $V_{DS}=0.8V$ و دمای $T=77^\circ K$.

شکل ۳ توزیع انرژی الکترون‌ها را با در نظر گرفتن ناخالصی دلتا نشان می‌دهد. در این شکل ملاحظه می‌شود، اگرچه درصد مولی به 0.17 کاهش یافته است، اما سطح انرژی الکترون‌ها در مجاورت سورس همچنان حدود $0.2eV$ معادل درصد مولی 0.2 برای Al است.

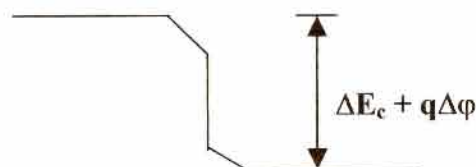
بدین ترتیب با اضافه کردن لایه‌های ناخالصی دلتاگونه در طرفین پیوند، ناپیوستگی نوار هدایت را می‌توان به اندازه $q\Delta\phi$ افزایش داد. با انتخاب $d=80\text{ \AA}$, $N=10^{18}\text{ cm}^{-3}$ و $t=20\text{ \AA}$ ، اندازه این افزایش در ناپیوستگی نوار هدایت برابر $\Delta E_c=25\text{ meV}$ خواهد شد که معادل 0.3 افزایش x است.



الف



ب



ج

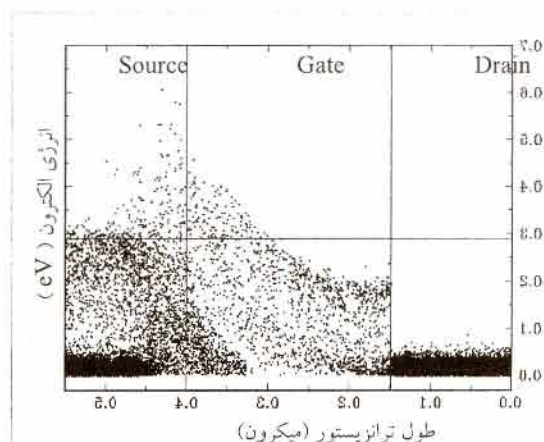


شکل ۱ (الف) نمودار نوار انرژی پیوند ناهمگون ایده آل، (ب) شمای ساده‌ای از دوقطبی، (ج) نمودار نوار انرژی پیوند ناهمگون پس از نشان دادن دولایه دلتاگونه به صورت دوقطبی در فصل مشترک پیوند.

براساس توضیح بالا انتظار می‌رود رفتار مسفت ناهمگون با درصد مولی $x=0.17$ همراه با LDD و دوقطبی دلتاگونه با شرایط یاد شده، معادل رفتار مسفت مشابهی با درصد مولی $x=0.20$ همراه با LDD و عاری از دوقطبی باشد. برای

۴- منابع

- [1] K. Saghafi; M. K. Moravvej-Farshi; "Effects of Doping and Alloy Composition on Electron Transport in Submicron GaAs/AlGaAs MESFETs: A Monte Carlo Simulation;" Scientia Iranica; Vol. 7; No. 3-4; pp. 164-168; 2000.
- [2] K. Tomizawa; N. Hashizume; "Method of Monte Carlo Simulation for Submicron Heterojunction Devices;" Proc. NASECODE IV Conf.; pp. 98; 1985.
- [3] F. Schubert; K. Ploog; "Shallow and Deep Donors in Direct Gap n-type AlGaAs:Si grown by MBE;" Phys. Rev. B; Vol. 30; No. 12; 1984.
- [4] Yokogawa, T.; Takahashi, K.; Uenoyama, T.; Kusumoto, O.; Uchida, M.; Kitabatake, M.; "Nitrogen Delta Doping in 6H Silicon Carbide Layers;" J. Appl. Phys.; Vol. 89; No. 3; pp.1794-9; 2001.
- [5] Chanhoo Lee; Dong Myoung Kim; "Performance Enhancement of Si Channel MESFET Using Double Delta-Doped Layers;" J. of Inst. of Elect. Eng. of Korea D; Vol. 34D; No. 12; pp. 68-75; 1997.
- [6] K. Nishimura; K. Miyata; T. Kobori; K. Kobashi; "Device Simulation of Diamond FETs with MES, p+-i-p+ and 'delta-doped' Structures in Comparison with 6H-SiC MESFET;" Proc. 4th International Symp. Diamond Materials; pp.588-594; 1995.
- [7] H. Shiomi; Y. Kumazawa; "Development of Diamond Devices and Recent Progress in Diamond Growth;" Diamond Films and Technology; Vol. 6; No. 2; pp. 95-120; 1996.
- [8] San Lein Wu; Shui Jinn Wang; Chen Chin Liu; "High-Performance Double Delta-Doped Channel Si Metal Semiconductor Field-Effect Transistors;" Japan. J. of Appl. Phys., Part 2; Vol. 33; No. 9A; pp. 1195-1197; 1994.
- [9] S. J. Wang; S. L. Wu; H. D. Chung; T. K. Carns; X. Zheng; K. L. Wang; "A p-Channel



شکل ۳ توزیع انرژی الکترون در δ -Doped LDD HEMSFET با کانال GaAs و سورس $\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ به ازای $V_{GS} = -0.2\text{ V}$, $V_{DS} = 0.8\text{ V}$

دمای

$$T = 77^\circ\text{K}$$

۳- نتیجه گیری

ایده تنظیم ناپیوستگی نوار انرژی در فصل مشترک سورس و کانال، به معرفی یک ساختار جدید به نام δ -doped LDD HEMSFET منجر شد. با استفاده از لایه‌های ناخالصی دلتاگونه در دو طرف فصل مشترک سورس-کانال با چگالی 10^{18} cm^{-3} ضخامت $20\text{ \AA}$ و به فاصله $80\text{ \AA}$ از یکدیگر، دوقطبی ایجاد شده، افزایشی حدود $\Delta E_c = 25\text{ meV}$ در ناپیوستگی نوار هدایت به وجود می‌آورد. این افزایش معادل افزایش $\Delta x = 0.03$ در درصد مولی Al است. ترانزیستور جدید برای شرایط فوق و به ازای $x = 0.17$ شبیه‌سازی شد. با چشم پوشی از مراکز DX، در شکل ۲ نشان داده شد که متوسط سرعت الکترون در ساختار جدید معادل سرعت الکترون در LDD HEMSFET عاری از دوقطبی با سورس $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ است.

- [11] H. C. Nutt; K. Board; R. Smith; "Characteristics of Delta-Doped FETs in GaAs;" IEE Proc. G; Vol. 138; No. 6; pp. 633-636; 1991.
- [12] F. Capasso; A. Y. Cho; K. Mohammed; P. W. Foy; "Doping Interface Dipoles: Tunable Heterojunction Barrier Heights and Band-Edge Discontinuities by MBE;" Appl. Phys. Lett.; Vol. 46; No. 7; 1985.
- Coupled Delta-Doped Silicon MESFET Grown by Molecular Beam Epitaxy;" IEEE Elec. Dev. Lett.; Vol. 15; No. 6; pp. 206-208; 1994.
- [10] Q. Chen; M. Willander; J. Carter; C. H. Thaki; E. R.A. Evans; "Fabrication and Performances of Delta-Doped Si n-MESFET Grown by MBE;" Electronics Letters; Vol. 29; No. 8; pp. 671-673; 1993.