



ارائه شده توسط:

سایت ترجمه فا

مرجع جدیدترین مقالات ترجمه شده

از نشریات معتبر

# ترانزیستورهای گرافنی متاثر از میدان برای الکترونیک قابل انعطاف فرکانس

## رادیویی

چکیده: الکترونیک فرکانس رادیویی منعطف (RF)، نیازمند موادی است که هم دارای خصوصیت الکترونی منحصر به فردی و هم محدودیت‌های فشار بالا هستند. در حالی که ترانزیستورهای گرافنی متاثر از میدان منعطف (GFETs)، محدودیت‌های فشار بالاتری را نسبت به FETs ساخته شده از لایه‌ی نازک نیمه‌رساناهای Si و III-V نشان داده‌اند. تا به امروز عملکرد RF، محدود به محدوده‌ی فرکانس گیگاهرتز پایین، بدترین بوده است. با این حال، GFETs انعطاف پذیر، تنها با طول کانال متوسط ساخته شده است. در این مقاله، ما GFETs را بر روی بسترهای منعطف با طول کانال 260 nm می‌سازیم. این دستگاه‌ها، فرکانس‌های واحد قدرت بهره‌برداری بیرونی را،  $f_{max}$ ، بالا تا 7.6 GHz و محدودیت‌های فشار 2٪، به نمایندگی محدودیت‌های فشار یک مقدار بالاتر از  $f_{max}$  گزارش شده نمایش می‌دهند.

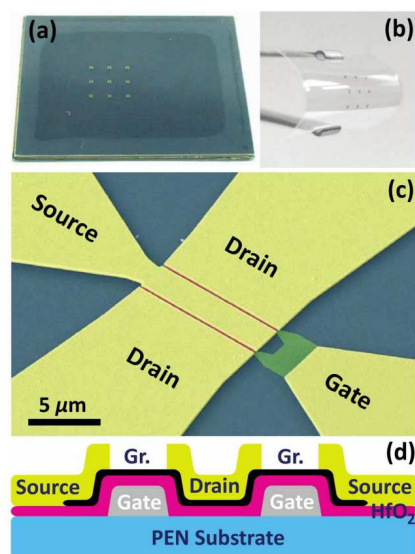
عبارت شاخص: ته‌نشست بخار شیمیایی (CVD)، FET، الکترونیک منعطف، گرافن، فرکانس رادیویی (RF)

### 1. مقدمه

ادغام ارتباطات وایرلس (بی‌سیم) در الکترونیک‌های منعطف نیاز به ترانزیستورهای متاثر از میدان (FETs) دارد که هر دو فرکانس قطع واحد قدرت بهره‌برداری،  $f_{max}$ ، در محدوده‌ی فرکانسی گیگاهرتز نشان می‌دهند و می‌توانند در برابر سطوح بالایی از فشار مقاوت کنند. در حالی که بالاترین عملکرد الکترونیکی برای فرکانس رادیویی انعطاف‌پذیر FET (RF-FET) در لایه‌های نازک نیمه‌هادی‌های Si و III-V روکش شده بر روی بسترهای پلیمری به دست آمده است، انعطاف‌پذیری مکانیکی ضعیف، محدودیت‌های فشار را در این دستگاه‌ها معمولاً به زیر ~0.25٪ [1]، [2]، با پیش‌فشاری در نتیجه‌ی بهبود جزئی محدودیت‌های فشار در تنش بالا تا 1.08٪ [3] محدود کرده است.

در مقابل، گرافن یک نامزد ایده‌آل برای استفاده در FET-RF های انعطاف‌پذیر است زیرا آن هم خواص الکترونیکی استثنایی و هم ( تحرک دمایی بیش از  $10000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$  و سرعت اشباع  $107 \text{ cms}^{-1} \times 1-5$ ) عملکرد اشباع بالا (محدودیت‌های فشار بالا تا 25٪) را نشان می‌دهد. بعلاوه سطحی با فیلم‌های گرافنی می‌تواند در فرایندهای مقیاس پذیر با استفاده از ته‌نشست بخار شیمیایی که خواص مکانیکی و الکترونیکی معادل را برای کریستال‌های گرافنی طبیعی نشان می‌دهد تولید شود. در حقیقت، RF-FETs های انعطاف‌پذیر از گرافن CVD ساخته شده‌اند که  $f_{\text{max}}$  بالایی تا 8٪ با محدودیت‌های فشار 1.75٪ را نشان می‌دهد. محدودیت‌های کرنش (فشار) در GFETs منعطف با  $f_{\text{max}}=2.1 \text{ GHz}$  بدست آورده شده‌اند.

در حالی که RF-FETs های گرافنی، عملکرد مکانیکی بهبود یافته‌ای را نسبت با انهایی که از نیمه‌هادی‌های Si و III-V ساخته شده‌اند نشان می‌دهند، عملکرد الکترونیکی در محدوده‌ی گیگاهرتز پایین باقی می‌ماند. RF-FETs گرافنی منعطف با مقیاس‌گذاری طول کانال پایین 500 nm ساخته شده‌اند که پتانسیلی را برای بهبود  $f_{\text{max}}$  برای سطح رقابتی با نیمه‌هادی‌های سنتی توسط مقیاس‌گذاری طول کانال میسر می‌سازند. در این کار، ما RF-FETs منعطف را با گرافن CVD بعنوان مواد کانال فعال با طول کانال 260 nm ساختیم. دستگاه‌ها،  $f_{\text{max}}$  خارجی بالا تا 7.6 GHz با محدودیت‌های فشار بالا تا 2٪ را نشان دادند. این کار نه تنها، بالاترین عملکرد RF خارجی گزارش شده برای GFETs منعطف تا به امروز فراهم می‌کند، بلکه یک محدودیت کرنش، مقداری بالاتر از فیلم‌های نازک InAs، فناوری RF-FET منعطف با بهترین  $f_{\text{max}}$  رقابتی را نشان می‌دهد.



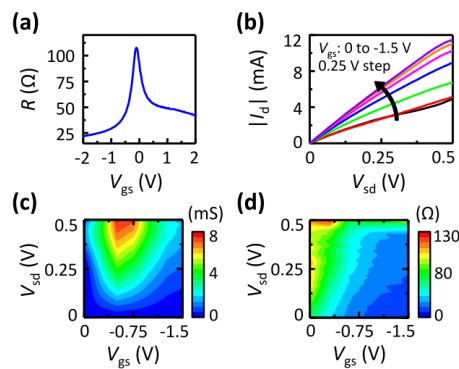
شکل 1. (a) و (b) فتوگرافی از FET گرافن (GFETs). ساختارهای تعبیه‌ی ساخته شده بر روی یک بستر PEN شفاف و انعطاف‌پذیر هم (a) سوار شده بر و هم (b) رها شده از یک بستر گیره‌ی Si- (c) میکروگراف الکترونی پوشی بطور مصنوعی رنگ شده و (d) مقطع عرضی شماتیک یک GFET منعطف. طول کانال 260 nm و عرض موثر 20 میکرو متر است.

## II ساخت دستگاه

ترانزیستورهای گرافنی متأثر از میدان (GFETs)، بر روی بسترهای شفاف و انعطاف‌پذیر پلی‌اتیلن نفتالات (PEN) ساخته شدند. روش‌های جدید ساخت، قادر به تولید GFETs منعطف در 260 nm می‌باشند. PEN بر روی یک بستر سخت، برای ساخت دستگاه و یک ساختار دستگاه بهینه شده استفاده شد، که قادر به وضوح لیتوگرافی پرتوی الکترونی افزایش یافته و تنظیم دقیق می‌باشد. در حقیقت این کار، تا به امروز، کوتاهترین GFETs کانالی ساخته شده از گرافن CVD را بر روی بستر منعطف ارائه می‌دهد.

بسترهای PEN در ابتدا به بسترهای گیره‌ای Si با استفاده از فیلم نازک ( $\sim 6 \mu\text{m}$ ) دی‌متیل سیلوکسان (PDMS) بعنوان یک لایه‌ی چسبنده متصل شدند، مدخل‌های پایینی دو انگشتی بر روی بسترهای PEN توسط EBL به دنبال تبخیر آلیاژ 1nm Cr/20 nm Au-Pd (40-60 wt. %) و بلند شدن لگو شدند. سپس دی‌الکتریک مدخل 6nm از HfO<sub>2</sub> ( $\kappa \approx 13$ ) توسط ته‌نشست لایه‌ی اتمی (ALD) رشد داده شد. گرفتن CVD سنتز شد و بعد از

آن در سراسر مدخل با استفاده از روش‌های توضیح داده شده‌ی قبلی در متن منتقل شد. کانال گرافنی توسط EBL تعریف شد و در پلاسمای اکسیژن قلمزنی شد. ساخت GFET با تماس کانال با منبع و تخلیه‌ی الکترودهایی (1 nm Cr/20 nm Pd/110 nm Au) که با مدخل همپوشانی می‌کنند به پایان رسید. دستگاه‌ها با استفاده از یک طول مدخل کلی 400nm ساخته شدند: همپوشانی مدخل منبع و مدخل تخلیه تقریباً 70 nm بود در نتیجه یک طول کانال مدخلی 260 nm (معادل فضای تخلیه-منبع). دستگاه دو نگشتی دارای یک عرض کانال کلی 20 میکرومتر می‌باشد. برای اهداف داده‌های فرکانس بالای تعبیه‌ی شده، دستگاه‌های کوتاه و باز استاندارد، همزمان بر روی تراشه‌ایی با ابعادی معادل GFETs ساخته شدند. ابعاد ساختارهای تعبیه شده و RF-FET با استفاده از تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی پوشی (SEM) برای اطمینان از راستی و دقت روش‌های تعبیه شده تایید شدند.



شکل 2. ویژگی‌های DC گرافن منعطف FET. (a) مقاومت دستگاه،  $R$ ، رسم شده بصورت تابعی از ولتاژ منبع به مدخل  $V_{gs}$  در یک بایاس منبع به کانال (تخلیه) و  $V_{sd} = 10 \text{ mV}$ . (b) خصوصیات ( $I-V$ ) انتقالی که جریان کانال یا تخلیه را  $I_d$  در برابر  $V_{sd}$  رسم می‌کنند. منحنی‌های  $I-V$  در کاهش ثابت  $V_{gs}$  از صفر ولت (سیاه) تا  $-1.5$  ولت (صورتی) در افزایش‌هایی در  $0.25$  ولت داده می‌شوند. (c) رسانایی متقابل  $g_m$  (d) مقاومت خروجی  $r_o$ ، رسم شد بصورت تابعی از یک  $V_{sd}$  و  $V_{gs}$ ..

شکل 1 یک آرایه‌ایی از RF-FETs و ساختار تعبیه شده بر روی PEN هم قبل (a) و هم بعد از (b) رهایی مکانیکی از بستر گیره‌ی Si را نشان می‌دهد. یک تصویر SEM رنگ شده بطور مصنوعی و مقطع عرضی شماتیکی از RF-FET منعطف در شکل 1(c) و (d) نشان داده شده است.

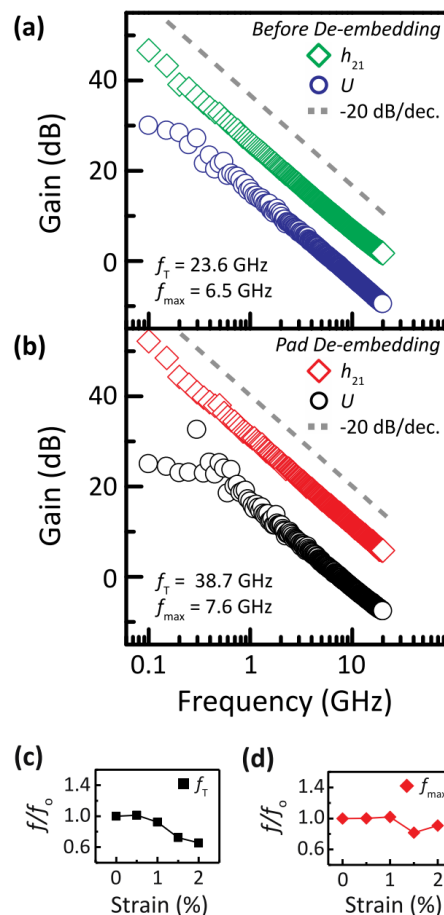
### III بحث و نتیجه‌گیری

شکل 2(a) مقاومت دستگاه،  $R$ ، بصورت تابعی از ولتاژ منبع به مدخل،  $V_{gs}$ ، و ولتاژ بایاس منبع به کانال  $V_{sd} = 10 \text{ mV}$  را نشان می‌دهد. برای هر دستگاه ارائه شده در شکل 2(a)، تحرک موثر ز میدان در میدان کم  $\mu_{FE} \approx 1000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  بود که بصورت  $\mu_{FE} = (L_{ch}g_m)/(W_{ch}C_{tot}V_{sd})$  محاسبه شد که در این فرمول  $g_m$  رسانایی متقابل سیگنال کوچک اندازه‌گیری شده می‌باشد،  $L_{ch}$  طول کانل مدخل (260 nm) می‌باشد،  $W_{ch}$  عرض موثر کانال (20 میکرومتر) و  $C_{tot}$  ظرفیت الکتریکی موثر مدخل در هر واحد سطح ( $920 \text{ nF cm}^{-2}$ ) محاسبه شده بصورت ترکیب سری‌های ظرفیت الکتریکی الکتروستاتیک و ظرفیت الکتریکی کوانتومی برای محدوده‌ی چگالی ناقل مربوطه  $C_q \approx 2000 \text{ nF cm}^{-2}$  می‌باشد

شکل 2b مشخصات ولتاژ-جریان بایاس بالا (I-V) GFET منعطف را رسم می‌کند برای جریان کانال (تخلیه) اندازه-گیری شده  $I_d$  که بصورت تابعی از  $V_{sd}$  در مقادیر ثابت شده‌ی کاهش  $V_{gs}$  از 0 تا -1.5V رسم می‌شود. مقدار میدان بالای  $g_m$  و مقاومت خروجی  $r_o$  از مشخصات I-V استخراج می‌شوند و بصورت تابعی از  $V_{gs}$  و  $V_{sd}$  در شکل 2c d، استخراج می‌شوند. حداکثر  $g_m = 7.6 \text{ mS}$  ( $0.38 \text{ mS}/\mu\text{m}$ ) در قطه‌ی بایاس  $V_{sd} = 0.5 \text{ V}$  و  $V_{gs} = -0.5 \text{ V}$  بدست ورده می‌شوند. در این نقطه‌ی بایاس  $r_o = 123 \Omega$ ، تنها به میزان جزئی کمتر از یک حداکثر  $157 \Omega$  بدست آمده در  $V_{sd} = 0.33 \text{ V}$ ،  $V_{gs} = 0 \text{ V}$  می‌باشد. در حالی که مقدار  $g_m$  و  $r_o$  کمتر از بیشترین مقادیر گزارش شده برای GFETs بر روی بستر جامد می‌باشد. آنها قابل مقایسه با مقدار گزارش شده برای GFETs ها بر روی بسترهای قابل انعطاف می‌باشند.

شکل 3a، بهره‌ی جریان ( $h_{21}$ ) و بهره‌ی توان یک طرفه (U) بصورت یک تابعی از فرکانس برای GFET را رسم می‌کند. هم ( $h_{21}$ ) و هم U از پارامترهای S اندازه‌گیری شده در نقطه‌ی بایاسی که  $g_m$  را ( $V_{sd} = 0.5 \text{ V}$ ,  $V_{gs} = -0.5 \text{ V}$ ) شکل 2c را ببینید) حداکثر می‌کند استخراج می‌شوند. در این نقطه‌ی بایاس، دستگاه، بصورت کانال نوع p تک قطبی عمل می‌کند. دستگاه ساخته شده، یک فرکانس قطعی را برای مدخل جریان واحد  $f_T$  و  $f_{max}$  به ترتیب 23.6 GHz و 6.5 GHz نشان می‌دهد. این مقادیر بهبود  $\sim 2x$  را در  $f_T$  و  $f_{max}$  در تمام گزارش بالاترین مقادیر قبلی، در GFET منعطف ساخته شده در یک طول کانال 500 nm نمایش می‌دهند. فرمانس قطع در عبارتی از مدخل واحد قابل دسترس حداکثر، 6.6 Hz، می‌باشد.

روش‌های تعبیه‌شده‌ی کوتاه و باز (تعبیه‌کننده‌ی پد)، برای پیاده‌سازی ساختار بازی که فقط شامل ظرفیت خازنی پارازیتی از پدهای الکتروودی و فضای منبع-کانال (تخلیه‌ی 600nm) (نه همپوشنی الکترودهای منبع و کانال با

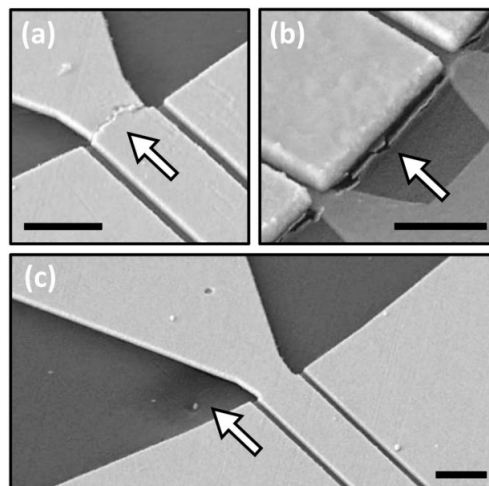


شکل 3. خصوصیات RF گرافن FET. بهره‌ی جریان،  $h_{21}$  و بهره‌ی توان نهایی U بصورت تابعی از فرکانس عملی در روی هم (a) قبل و هم (b) بعد از تعبیه‌ی پد رسم شده است. مقادیر  $f_t$  و  $f_{max}$  نشان داده می‌شوند. خط چین در هر دو نمودار نشان‌دهنده‌ی یک  $-20 \text{ dB/dec}$  می‌باشد. شیب نشان‌دهنده‌ی این می‌باشد که وابستگی فرکانس هم قبل و هم بعد تعبیه دنبال می‌شود. (c)  $f_t$  و (d)  $f_{max}$  با استفاده از مقادیر غیر تنشی رسم شده بصورت تابعی از یک تنش نرمال می‌شوند.

مدخل می‌باشند بکار برده شدند. شکل  $b_3$   $h_{21}$  و U را بصورت تابعی از فرکانس بعد از عملکرد پد تعبیه طراحی می‌کند.  $f_t$  خارجی و  $f_{max}$  به ترتیب در  $38.7 \text{ GHz}$  و  $7.6 \text{ GHz}$  یافت می‌شوند. اینها اولین GFETs منعطف برای نشان داده بهره‌ی توان خروجی در تمام فرکانس‌های بالا تا  $7.6 \text{ GHz}$  می‌باشند، یک محدوده‌ی فرکانس مربوطه بطور فنی اخیراً برای بسیاری از ارتباط وایرلس یا بی‌سیم استفاده شده‌اند. برای تجزیه و تحلیل بهتر دقت، روش‌های تعبیه شده‌ی بکار برده شده در این کار، خازن مدخل،  $C_g$ ، از پارمترهای پراکندگی اندازه‌گیری شده استخراج شد و با مقدار مورد انتظار برای  $C_{tot}$  ( $920 \text{ nF cm}^{-2}$ ) مقایسه شدند. تعبیه‌ی  $C_g = 1250 \text{ nF cm}^{-2}$ ، نشان‌دهنده‌ی اینکه ظرفیت‌های الکتریکی پارازیتی مربوط شده به پدهای الکترودی  $\sim 330 \text{ nF cm}^{-2}$  از ظرفیت کلی دستگاه را دربردارند و یک محدودیت غالبی را برای عملکرد RF تشکیل می‌دهند. به هر حال بعد از عملکرد پد تعبیه‌ی  $C_g$ ، بصورت  $885 \text{ nF cm}^{-2}$  در توافق عالی با مقدار مورد انتظار برای هندسه‌ی کانال GFET می‌باشد. پد تعبیه بنابراین برای حذف با دقت خازن‌های پارازیتی ناشی از پد الکترودی ساخته شده از GFETs و بنابراین توابعی برای فراهم کردن یک تخمین قابل اعتماد برای عملکرد RF خارجی خود GFETs دیده می‌شود. توجه داشته باشید که در حالی که روش‌های کامل تعبیه شده (de-embedding) (که یک ساختار باز با ابعادی معادل با FET اندازه‌گیری شده را بکار می‌برند) معمولاً برای اندازه‌گیری ترانزیستورهای متاثر از میدان گرافنی بکار برده می‌شوند، این فرایند، پارازیت‌های مربوط به تمام اتصالات فلزی، حتی آنهایی که توسط دستگاه ادغام شده با یک مدار کاربردی و در نتیجه فرکانس‌های قطع که عملاً دست نیافتنی هستند (برای اطلاعات بیشتر ضمیمه را ببینید) را حذف می‌کند. افزایش  $f_t$  و  $f_{max}$  از GFETs های منعطف قبلاً گزارش شده در  $500 \text{ nm}$  می‌توانند به مقیاس‌گذاری طول کانال در رابطه با بهبود بری



معماری دستگاه نسبت داده شود. کارهای قبلی از یک ساختار دستگاه با مناطق جدا کننده‌ی غیر مدخل در کانال گرافنی استفاده می‌کنند که مقاومت تماسی کلی را افزایش و عملکرد RF را کاهش می‌دهند. در این کار با تداخل الکترودهای منبع / کانال (تخلیه) با مدخل، این مناطق جدا کننده‌ی مقاومتی بطور موثر برای کاهش مقاومت تماسی (کمتر از 200 میکرومتر) حذف می‌شوند. روندها در دستگاه‌های ساخته شده بر روی بسترهای سخت نشان می‌دهند که عملکرد RF GFETs منعطف، از مقیاس گذاری طول کانال بیشتر بهره‌مند خواهد شد. بعلاوه، این دستگاه‌ها، افزایش ذاتی مدخل ولتاژ ( $g_{mro} = 0.93$ ) را در نقطه‌ی بایاس نشان می‌دهند که در این نقطه توصیف خصوصیات RF انجام می‌شود.  $g_{mro}$  به میزان زیادی با ناتوانی بایاس دستگاه جریان به شدت شباع بدلیل محدودیت حرارتی محدود می‌شود.



شکل 4. میکروگراف الکترونی پوششی GFET بعد از (a) شکست مکانیکی (b) و (c) شکست حرارتی. (a) ترک‌های توسعه یافته در الکتوردهای منبع در تنش‌های بزرگتر از 2٪. گرمای ژول در دستگاه ناشی از (b) تاب خوردگی بستر و پوشش GFET (c) ترک خوردگی دی‌الکتریک HfO<sub>2</sub>. بندهای مقیاسی 2 میکرومتر در صفحات (a) و (c) و 1 میکرومتر در صفحه می‌باشند.

محدودیت‌های مکانیکی RF-FETs منعطف، بعد از آن با استفاده از اندازه‌گیری خصوصیات الکترونیکی در حین بکارگیری همزمان فشار کششی تک محوری،  $\epsilon$ ، متعامد با کانال دستگاه تحت دو نقطه‌ی خمشی تعیین شدند. شکل 3c و d نشان می‌دهند که  $f_T$  و  $f_{max}$  به ترتیب کمتر از 35٪ و 20٪ کاهش را از قادر غیر کششی در تمام محدوده‌های کششی اندازه‌گیری شده نشان می‌دهند ( $\epsilon = 0-2\%$ ). بدون تغییر معناداری در جریان منبع به مدخل، ما

بالای 2٪ کشش را مشاهده کردیم که نشان دهنده‌ی نشت ناچیز از طریق دی‌الکتریک می‌باشد. دستگاها برای نقطه‌ی شکست مکانیکی، تحت تنش قرار گرفتند. شکل 4a نشان می‌دهد که در کشش‌ها یا تنش‌های بیشتر از 2٪، ترک‌ها در الکترودهای منبع/ تخلیه (کانال) منطبق با کاهش برگشت‌ناپذیر ویژگی‌ها (اندازه‌گیری شده‌ی ولتاژ اتصال باز) تشکیل می‌شوند. به دلیل اینکه حد کششی دستگاه با الکترودها نسبت به کانال گرافنی محدود می‌شود، انعطاف‌پذیری بهبود یافته بطور بالقوه با پیاده‌سازی مواد الکتروود با حدهای کششی بالاتر مانند گرافیت بدست آورده می‌شود. توجه به این نکته مهم است که عملکرد RF دستگاه با محدودیت‌های حرارتی بستر محدود می‌شود. در  $V_{sd}$  کمتر از 0,5 V، حرارت ژول در کانال‌های دستگاه ناشی از ذوب منطقه‌ای بستر PEN، تاب برگشت‌ناپذیر کانال GFET، و ترک خوردگی دی‌الکتریک  $HfO_2$  چنانکه در شکل 4b و c نشان داده شده می‌باشد. محدودیت‌ها برای محدوده‌ای از میدان الکتریکی که می‌تواند بکار برده شود، دستگاه‌ها را از رسیدن به اشباعیت کامل، حد  $g_{m2o}$  قابل دسترس و فرکانس‌های قطع جلوگیری می‌کنند. بهبود مدیریت حرارتی که چگالی جریان بالاتری را میسر می‌سازند، مانند استفاده از یسترهایی با دمای انتقال بالاتر به دستگاه برای گرایش یافتن به اشباع شدگی، بهبود  $r_o$ ، و بهره‌ی ولتاژ ذاتی را میسر خواهند ساخت.

#### IV نتیجه‌گیری

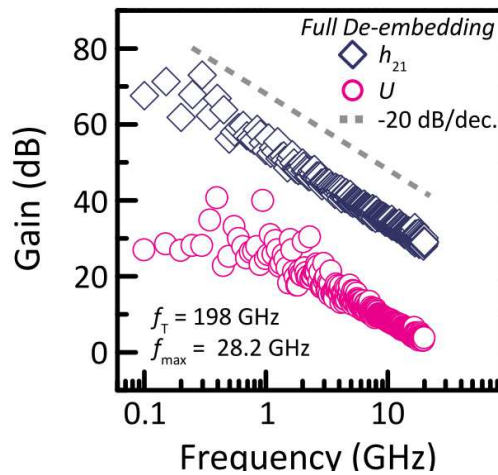
ما RF-FETs منعطف ساخته شده از گرافن CVD با طول کانال 260 nm را که  $f_{max}$  خارجی بالای 7.6 GHz و حد تنش یا کشش 2٪ را نشان می‌دهند ارائه می‌دهیم. این مقادیر نه تنها بالاترین مقدار گزارش شده  $f_{max}$  خارجی را در هر فن‌آوری GFET نشان می‌دهد بلکه آنها یک مقداری از بهبود یافتگی را در حد کششی، در تمام فن‌آوری انعطاف‌پذیر نشان دهنده‌ی بهترین عملکرد RF رقابتی، نشان می‌دهند. این کار بیشتر، پتانسیل گرافن را برای الکترونیک‌های فعالی که هم عملیات فرکانس بالا و هم انعطاف‌پذیری مکانیکی بال را نشان می‌دهند تخمین می‌زند. بهبود بیشتر، برای مدیریت حرارتی برای بهبود بیشتر عملکرد RF GFETs های منعطف لازم می‌باشند.

ضمیمه

کامل تعبیه شده، از ترانزیستور ذاتی بعنوان یک ساختار باز استفاده می‌کند. آن در ابعاد و طراحی ترانزیستور یکسان است اما شامل مواد کانال گرافن نمی‌باشد. به هر حال تعبیه‌ی کامل، نه تنها تعبیه‌ی پدهای الکترودی را نتیجه می‌دهد بلکه اتصالات فلزی (و ظرفیت‌های مرتبط به آنها) در ساختار دستگاه را نیز نتیجه می‌دهد. در حالی که هدف از این روش تعبیه، تعیین عملکرد ذاتی کانال FET فعال می‌باشد، در عمل، حد جبران تعبیه‌ی کامل، با حذف پارازیت‌های مرتبط به اجزایی از دستگاه، ادغام در یک مدار عملی را مورد نیاز می‌کند. این نتایج، یک تخمین برجسته‌ایی از فرکانس‌های قطع، فراتر از چیزی که در FET عملی ساخته شده در طول کانال معادل قابل دستیابی است. متأسفانه، این د تعبیه بیشتر برای تعبیه‌ی ساختار استفاده شده برای فن‌آوری‌های GFET تجربی معمول می‌باشد.

برای اهداف فرضی، ما تعبیه‌ی کامل را بر روی دستگاه‌های منعطف‌مان با استفاده از یک ساختار تعبیه‌ی باز عادل با GFET تحت آزمایش انجام دادیم. شکل 5 h21 و U را بصورت تابعی از فرکانس بعد از انجام تعبیه‌ی کامل رسم می‌کند.  $f_T$  و  $f_{max}$  ذاتی به ترتیب 198 GHz و 28.2 GHz می‌باشند. تمام نتایج تعبیه ناشی از یک مقدار  $f_T$  است که یک مرتبه‌ی کاملی از مقدار بالاتری از مقدار قبلی برای تعبیه می‌باشد. در حقیقت، نتایج تعبیه‌ی کامل،  $C_g = 92 \text{ nF cm}^{-2}$  (چنانکه از پارامترهای پراکندگی استخراج شد)، بطور مشابه یک مرتبه‌ی کاملی از مقدار زیر مقدار مورد انتظار برای هندسه‌ی کانال تنها، ( $2920 \text{ nF cm}^{-2}$ ). را نتیجه می‌کند. این یافته‌ها، پیاده‌سازی روش‌های تعبیه‌ی دقیق را در طول توصیف مشخصات RF هشدار می‌دهند. اگرچه فرکانس‌های قطع استخراج شده از تعبیه‌ی کامل، نمی‌توانند بصورت دقیق اندازه‌گیری شوند، آنها مقایسه‌ی مستقیم عملکرد RF را با پیاده‌سازی فن‌آوری‌های FET منعطف گزارش شده‌ی معادل با روش‌های تعبیه مقایسه می‌کند. در حقیقت،  $f_T$  198 GHz اندازه‌گیری شده در این کار بطور قابل توجهی بالاتر از مقدار گزارش شده‌ی قبلی برای GFETs منعطف می‌باشد ( $f_T \sim 25 \text{ GHz}$ ) ذاتی برای طول کانال (500 nm) و قابل قایسه با GFETs ساخته شده بر روی بستر سخت با طول کانال مشابه می‌باشد.  $f_{max}$  28.2 GHz نه تنها یک مرتبه بزرگتر از مقدار گزارش شده‌ی قبلی برای GFETs ساخته شده با طول کانال 500 nm می‌باشد بلکه بالاترین  $f_{max}$  گزارش شده در هر فن‌آوری انعطاف‌پذیر تا به امروز می‌باشد. بعلاوه، این دستگاه‌ها یک مرتبه‌ایی از بهبود در حد تنش را در تمام فن‌آوری‌های انعطاف‌پذیر نشان دهنده‌ی بالاترین  $f_{max}$  ذاتی بعدی

را نشان می‌دهند. در حالی که مقایسه‌ی فرکانس‌های قطع استخراج شده بعد از تعبیه، یک ارزیابی کمی دقیقی از عملکردهای دستگاهی را میسر نمی‌کند، آن قادر به یک نمایش کیفی از عملکرد الکترونیک بهبود یافته‌ی کانال گرافن در این کار است.



شکل 5. خصوصیات RF یک FET گرافنی منعطف بعد از اجرای تعبیه‌ی کامل. بهره‌ی جریان،  $h_{21}$ ، و بهره‌ی توان نهایی،  $U$ ، بصورت تابعی از فرکانس عملیاتی رسم می‌شوند.  $f_T$  و  $f_{\text{max}}$  ارائه می‌شوند. خط چین یک شیب  $-20 \text{ dB/dec.}$  را نشان می‌دهد.



این مقاله، از سری مقالات ترجمه شده رایگان سایت ترجمه فا میباشد که با فرمت PDF در اختیار شما عزیزان قرار گرفته است. در صورت تمایل میتوانید با کلیک بر روی دکمه های زیر از سایر مقالات نیز استفاده نمایید:

لیست مقالات ترجمه شده ✓

لیست مقالات ترجمه شده رایگان ✓

لیست جدیدترین مقالات انگلیسی ISI ✓

سایت ترجمه فا ؛ مرجع جدیدترین مقالات ترجمه شده از نشریات معتبر خارجی