

Podívejte se na diskuse, statistiky a profily autorů této publikace na adrese: <https://www.researchgate.net/publication/41408417>.

100GHz tranzistory z epitaxiálního grafenu v měřítku destiček

Článek v časopise Science - únor 2010

DOI: 10.1126/science.1184289 - Zdroj: PubMed

CITACE

2,208

ČTENÍ

681

7 autorů, včetně:



Christos Dimitrakopoulos
University of Massachusetts Amherst

105 PUBLIKACÍ 22 749 CITACÍ

PODÍVEJTE SE
NA PROFIL

Damon B. Farmer
IBM

121 PUBLIKACÍ 13 533 CITACÍ

PODÍVEJTE SE
NA PROFIL

K.A. Jenkins
IBM

231 PUBLIKACÍ 12 412 CITACÍ

PODÍVEJTE SE
NA PROFIL

Hsin-Ying Chiu
Apple Inc.

43 PUBLIKACÍ 6 063 CITACÍ

PODÍVEJTE SE
NA PROFIL

Někteří z autorů této publikace pracují také na těchto souvisejících projektech:

Chemie studeného plazmatu [Zobrazit projekt](#)Transport elektronů v uhlíkových nanotrubičkách [Zobrazit projekt](#)

Veškerý obsah následující po této stránce nahrál [Christos Dimitrakopoulos](#) dne 23. května 2014.

Uživatel požádal o vylepšení staženého souboru.

100 GHz tranzistory z epitaxiálního grafenu v měřítku destičky

Y.-M. Lin, C. Dimitrakopoulos, K. A. Jenkins, D. B. Farmer,
H.-Y. Chiu, A. Grill a Ph. Avouris**

IBM T. J. Watson Research Center, Yorktown Heights, NY 10598.

Abstrakt: Na epitaxním grafenu syntetizovaném na dvoupalcovém SiC plátku byly vyrobeny vysoce výkonné grafenové tranzistory s polem, které dosahují mezní frekvence 100 GHz při délce hradla 240 nm. Vysokofrekvenční výkon těchto epitaxních grafenových tranzistorů nejenže vykazuje nejvyšší rychlost u všech dosavadních grafenových zařízení, ale také překonává výkon Si MOSFETů při stejné délce hradla. Výsledek potvrzuje vysoký potenciál grafenu pro pokročilé elektronické aplikace a představuje důležitý milník pro uhlíkovou elektroniku.

Jako nejtenčí možný elektronický materiál o tloušťce pouhého jednoho atomu s velmi vysokou pohyblivostí nosičů nabízí grafen velký potenciál pro vytvoření nejmenších a nejrychlejších tranzistorů ze všech polovodičových materiálů. Proof-of-concept demonstrací elektroniky na bázi grafenu byl zajištěn demonstrováním stejnosměrného provozu tranzistorů s polem (FET) - základního stavebního kamene moderní mikroelektroniky - pomocí grafenových vloček extrahovaných z přírodního grafitu (1), grafenových filmů vyrobených rozkladem povrchu substrátů z karbidu křemíku (SiC) (2) nebo chemickou depozicí z par uhlovodíků na katalytické kovové povrchy (3). Navzdory velkým nadějím a tvrzením o debutu éry uhlíkové elektroniky v posledním desetiletí spočívají chybějící kritické zkoušky pro vyhodnocení životaschopnosti tohoto nového materiálu pro praktické aplikace v problémech s demonstrací vysokofrekvenčních grafenových tranzistorů a jejich kompatibilitou s výrobou v měřítku destiček, která by umožnila integraci obvodů.

Tato práce představuje takové vysoce výkonné vysokofrekvenční tranzistory vyrobené na dvoupalcovém grafenovém plátku (obr. 1A), u nichž je dosaženo mezní frekvence až 100 GHz (obr. 1D). Vzhledem k tomu, že toho bylo dosaženo pomocí zpracování v měřítku destičky, představuje to důležitý milník na cestě ke konečnému cíli terahertzových integrovaných obvodů využívajících grafen. Výsledky nejenže demonstrují dosud nejvyšší rychlost grafenových tranzistorů, ale také ověřují vynikající elektronické vlastnosti grafenových materiálů bez ohledu na jejich původ.

V této práci byl grafen epitaxiálně vypěstován na Si povrchu vysoce čistého poloizolačního plátku SiC 4H(0001) tepelným rozkladem při teplotě 1450 °C, čímž vznikla vrstva 1 až 2 vrstev grafenu na celém plátku. Takto narostlý grafenový film má hustotu nosičů elektronů (*n-typu*) $\sim 3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ a pohyblivost s Hallovým efektem mezi 1000-1500 cm^2 / Vs . Zatímco pohyblivost nosičů v grafenu může být v zásadě velmi vysoká díky potlačení zpětného rozptylu na základě pseudozachování spinu pro chirální nosiče, pohyblivost ve skutečných grafenových zařízeních je velmi citlivá na prostředí a může dojít k jejímu výraznému zhoršení depozicí izolantu hradla. Aby se zachovala vlastní pohyblivost grafenu ve struktuře zařízení s horním hradlem, byla mezifázová polymerní vrstva (o tloušťce přibližně 9-3 nm) nanášena spinovou vrstvou na zařízení s horním hradlem.

grafen před nanesením oxidu (4), na kterém byla vytvořena *πψσοχε κπαλιτνί* vrstva HfO_2 (tloušťka 10 nm) pomocí depozice atomárních vrstev (ALD). Pohyblivost nosičů v zařízeních s Hallovoú tyčí s horním uzávěrem se pohybovala v rozmezí 900-1520 cm^2/Vs na 2" destičce, což naznačuje, že během výrobních procesů došlo k malému zhoršení pohyblivosti grafenu, pokud vůbec k nějakému došlo.

Za účelem vyhodnocení vysokofrekvenční odezvy grafenových vrstev vypěstovaných epitaxí byla vyrobena pole FETů s horním hradlem o délce hradla 240 nm. Na obr. 1A je zobrazen snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu a příčný schematický řez takovým zařízením. Na obr. 1B je znázorněn odtokový proud grafenového FETu měřený jako funkce napětí na hradle V_G , který vykazuje charakteristiky tranzistoru *typu n*, kde převažuje transport elektronů. U všech grafenových FETů této studie se Diracův bod, charakterizovaný proudovým minimem v závislosti na napětí na hradle V_G , vyskytuje vždy při napětí na hradle menším než -3,5 V. To odpovídá poměrně vysoké hustotě elektronů větší než $4,010^{12} \text{ cm}^{-2}$ v grafenovém kanálu při nulovém stavu předpětí hradla. Takto vysoká koncentrace elektronů je typická pro grafen vyrobený z Si povrchu SiC destičky a je výhodná pro dosažení nízkého sériového odporu grafenových FETů zvýšením vodivosti v nezapouzdřených grafenových oblastech mezi kontakty source a drain. Výsledkem je, že transkonduktance zařízení g_m , definovaná vztahem dI_D/dV_G , je téměř konstantní v širokém rozsahu V_G v zapnutém stavu (pravá osa na obr. 1B). Grafenový FET vykazuje výstupní charakteristiky (obr. 1C), které se liší od charakteristik běžných Si-MOSFETů v důsledku absence pásmové mezery v grafenu. Zatímco proud na odtoku grafenového FETu má sublineární závislost $I_D - V_D$ s rostoucím předpětím na odtoku, při předpětí na odtoku do 2 V nebo před průrazem zařízení není pozorováno žádné zřetelné nasycení proudu. Tato výstupní charakteristika vede u grafenových FETů k transkonduktanci zařízení, která roste s napětím na drenáži.

U těchto tranzistorů byly měřeny parametry rozptylu (S), aby bylo možné zkoumat jejich vysokofrekvenční výkon. V tomto ohledu poskytuje izolační SiC destička ideální platformu pro konstrukci a charakterizaci vysokofrekvenčních zařízení a obvodů díky snížení parazitní kapacity mezi kontakty a propojeními. Na obr. 1B je znázorněno proudové zesílení krátkého obvodu $|h_{21}|$, které je jako poměr malosignálových proudů drain a gate a

je odvozen z naměřených S-parametrů jako funkce frekvence pro grafenové FETy o dvou délkách hradla, 240 nm a 550 nm. Naměřené proudové zesílení vykazuje $1/f$ frekvenční závislost očekávanou pro ideální FET, z níž lze získat dobře definovanou mezní frekvenci f_T jako frekvenci, při níž se proudové zesílení stává jednotkovým. Velikost f_T označuje nejvyšší frekvenci, při které může tranzistor šířit elektrický signál, a je nejzákladnějším údajem pro porovnání výkonu tranzistoru. Pro délku hradla 550 nm se naměřená hodnota f_T pohybuje v rozmezí 20 až 53 GHz. Pro kratší délku hradla 240 nm bylo při předpětí na odtoku 2,5 V naměřeno f_T až 100 GHz. Tato mezní frekvence 100 GHz je dosud nejvyšší dosaženou rychlostí pro jakýkoli typ grafenových zařízení, včetně exfoliovaného a CVD vypěstovaného grafenu. Je také pozoruhodné, že zde demonstrováné grafenové FETy mají mezní frekvenci vyšší než nejmodernější Si MOSFETy se stejnou délkou hradla (~ 40 GHz při 240 nm) (5). Kromě proudového zisku mají grafenové FETy také výkonový zisk G_{MAG} až $f_{MAX} \sim 14$ GHz a 10 GHz pro délky hradel 550 nm a 240 nm (6). Jak f_T , tak f_{MAX} jsou důležitými hodnotami výkonu tranzistoru. f_T odráží vnitřní chování kanálu tranzistoru, zatímco f_{MAX} silně závisí i na dalších faktorech, jako je uspořádání zařízení, a lze jej dále zvýšit například optimalizací vedení kontaktů hradla.

Vysoce výkonné grafenové VF tranzistory, demonstrováné v tomto dokumentu pomocí syntézy grafenu v měřítku destičky a konvenčních postupů výroby zařízení, jasně ukazují vysoký potenciál grafenu pro pokročilé elektronické aplikace.

Reference a poznámky

1. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, *Science* **306**, 666 (2004).
2. J. Kedzierski, P.-L. Hsu, P. Healey, P. W. Wyatt, C. L. Keast, M. Sprinkle, C. Berger, W. A. de Heer, *IEEE Trans. Electron Devices*, **55**, 2078-2085 (2008).
3. K. S. Kim, Y. Zhao, H. Jang, S. Y. Lee, J. M. Kim, K. S. Kim, J.-H. Ahn, P. Kim, J.-Y. Choi, B. H. Hong, *Nature* **457**, 706 (2009).
4. D. B. Farmer, H.-Y. Chiu, Y.-M. Lin, K. A. Jenkins, F. Xia, P. Avouris, *Nano Lett.* **9**, 4474 (2009).
5. [Odkaz] <http://www.itrs.net/Links/2008ITRS/Home2008.htm>
6. f_{MAX} nevykazuje zvláštní škálování s délkou hradla, na rozdíl od f_r . Viz také podpůrné materiály online.
7. Tato práce je podporována agenturou DARPA na základě smlouvy FA8650-08-C-7838 v rámci programu CERA. Obsažené názory, stanoviska a/nebo zjištění jsou názory autorů a neměly by být interpretovány jako oficiální názory agentury DARPA nebo ministerstva obrany.

OBRÁZEK

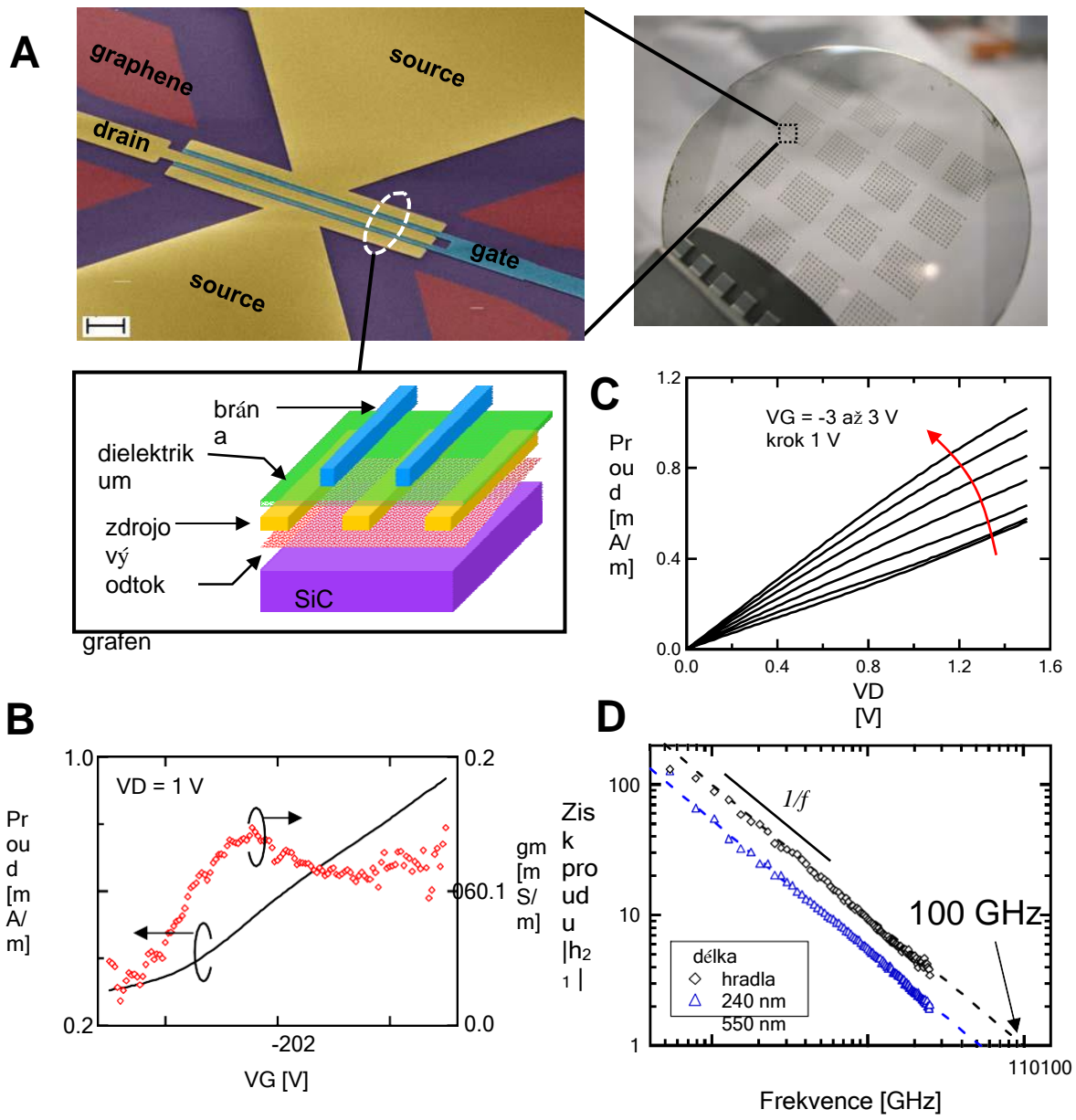
(A) Snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu a schematický průřez grafenového tranzistoru s horním hradlem. Vpravo je zobrazen optický snímek dvoupalcové grafenové/SiC destičky s poli grafenových zařízení. Tranzistory mají dvoubranových kanálů, aby se zvýšil řídicí proud a snížil odpor hradla. Měřítka je 2 μ m.

(B) Drenový proud I_D grafenového tranzistoru s délkou hradla 240 nm v závislosti na napětí na hradle V_G při předpětí na hradle 1 V a uzemněné elektrodě zdroje. Zobrazený proud byl normalizován vzhledem k celkové šířce kanálu. Na pravé ose je znázorněna vodivost zařízení $g_m = dI_D/dV_G$.

(C) Naměřený drainový proud I_D v závislosti na drainovém předpětí grafenového FETu s délkou hradla 240 nm pro různá napětí na horním hradle.

(D) Naměřené malosignálové proudové zesílení $|h_{21}|$ jako funkce frekvence f pro grafenový FET s 240 nm hradlem a 550 nm hradlem, znázorněné (○) a (◇). Proudové zesílení pro obě zařízení vykazuje závislost $1/f$, kde a a w well-

definovanou mezní frekvenci f_T lze určit na 53 GHz pro 550nm a 100 GHz pro 240nm zařízení.



OBR. 1