VLASTNOSTI GRAFENU

- → **TLOUŠŤKA:** Při tloušťce 0,34 nanometru je grafen milionkrát tenčí než list papíru.
- → **HMOTNOST:** Grafen je extrémně lehký. Kilometr čtverečný tohoto materiálu váží jen 757 gramů.
- → **PEVNOST:** Ve směru vrstvy je grafen stejně pevný jako diamant.
- → **PRŮSVITNOST:** Grafen je průhlednější než sklo – pohlcuje pouze 2,3 procenta procházejícího světla.
- → **ELEKTRICKÁ VODIVOST:** Miliardkrát vyšší než u obohaceného křemíku používaného při výrobě počítačových procesorů.

Zázračný materiál GRAFEN

Pomocí sítě atomů uhlíku budou počítače pracovat rychleji. Grafen se bude brzy používat v řadě komponent.

MARKUS MANDAU

Zabývá se výkonnostními limity současných počítačů. Věří, že pokud by grafenová technologie fungovala, mohla by výrazně posunout výkon současné PC technologie.

Žádný materiál na světě není tak lehký, pevný a propustný, a přesto tak ohebný jako ten, který běžně najdeme na konci obyčejné tužky. Tuha je vyrobena z grafitu, tedy uhlíku v krystalické podobě. Při psaní se třením přenášejí jednotlivé atomové vrstvy tuhy ze špičky tužky na list papíru. Pokud se na papíru zachytí pouze vrstva o tloušťce jednoho atomu uhlíku, vzniká vrstva grafenu. Grafen je extrémně stabilní a zároveň velice ohebný materiál. Stejně dobře, možná dokonce ještě lépe než kovy dokáže vodit teplo i elektřinu a přitom propouští světlo lépe než sklo. Elektrony se grafenem pohybují téměř stokrát rychleji než křemíkem, který je dnes základním materiálem pro výrobu polovodičů. Využití grafenu by přineslo ohromné zvýšení výkonu počítačových čipů.

Grafen byl objeven před devíti lety. Fyzikové Andre Geim a Konstantin Novoselov odebírali za pomoci lepicí pásky postupně jednotlivé vrstvy grafitu, dokud jim nezbyla poslední vrstva o tloušťce jediného atomu. Za objev grafenu dostali v roce 2010 Nobelovu cenu. Kvality grafenu jsou známé, otázkou zůstává, k čemu všemu by bylo možné tento zázračný materiál využít. Odpověď na tuto otázku má pro Evropskou unii hodnotu miliardy eur. Přesně tolik peněz totiž hodlá EU během příštích deseti let vložit do podpory výzkumných projektů souvisejících s využitím grafenu. Zkoumání vlastností a možností grafenu se však nevěnují pouze státy, ale i velké IT firmy, jako jsou Nokia nebo Samsung.

Sotva představitelný technologický skok

Představa 100GHz procesoru nebo baterií, které by bylo možné dobít během několika sekund, samozřejmě láká vědce i investory po celém světě. Využít ohromný potenciál, který díky svým vlastnostem grafen skrývá, ale není tak jednoduché. Tento materiál totiž vede elektrický proud příliš dobře na to, aby jej bylo možné použít na výrobu tranzistorů v podobě, v jaké je známe dnes, takže by musela být jejich architektura pozměněna. Jednodušího využití se grafen může dočkat při vývoji displejů, baterií, solárních buněk a dokonce sluchátek. Na následujících stránkách vám ukážeme řadu projektů, ve kterých hraje grafen hlavní roli.

AUTOR@CHIP.CZ

VLASTNOSTI:

Extrémně vodivý a odolný

Elektrony probíhají grafenem mnohem rychleji než křemíkem. Tento materiál je navíc odolný, ohebný a propustný.

Tajemství grafenu nám osvětlí jediný pohled na jeho atomovou strukturu. Síť šestihranných atomů uhlíku je vytvořena tak, že tři ze čtyř vnějších elektronů tvoří vazbu s okolními atomy uhlíku. Poslední, čtvrtý elektron se nachází na orbitu a je umístěn kolmo na plástve uhlíkové struktury. Svazky tří valenčních elektronů tvoří síť uhlíkových atomů a čtvrtý volný elektron dokáže vést elektrickou energii nebo teplo. Díky pevným vazbám mezi atomy uhlíku je vrstva grafenu stejně pevná jako diamant a lze ji poškodit pouze po vyvinutí velice značné síly. Struktura sítě atomů grafenu je ale zároveň dostatečně pružná a dokáže se roztáhnout až o 20 procent. Konstantin Novoselov, který za objev grafenu získal spolu s Andre Geimem Nobelovu cenu, dále zjistil, že za pomoci určitých katalyzátorů (palladium, nikl) a dostatečného množství náhradních uhlíkových atomů se poškozená struktura sítě grafenu dokáže sama opravit.

Z hlediska vývoje počítačových technologií je zajímavý hlavně čtvrtý volný elektron, protože grafen má jednu zajímavou vlastnost, a to že energetická hladina elektronů, které se volně pohybují grafenem, a energetická hladina čtvrtého vnějšího elektronu se překrývají. Díky tomu se skrze strukturu grafenu pohybují elektrony větší rychlostí a téměř bez odporu. Grafenové tranzistory, které by mohly tvořit základ budoucích procesorů, by mohly pracovat s vyšším kmitočtem než tranzistory křemíkové, a přesto by se nijak nezahřívaly. Společnost IBM vyvinula v roce 2010 tranzistor, který pracuje s kmitočtem 100 GHz.

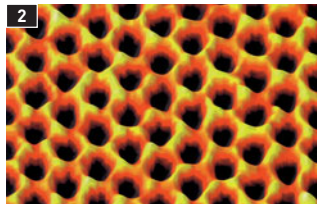
Obtíže se sériovou výrobou

Veškeré přísliby masového využití grafenu stojí a padají s možností hromadné výroby, která zajistí jeho cenovou dostupnost. V současnosti existuje několik set patentovaných způsobů výroby grafenu, zmíníme ale pouze tři nejznámější. Prvním je tzv. exfoliace, během které se z grafitu odštěpují vločky grafenu o délce jednoho milimetru. Výtěžky tohoto procesu stačí pro výzkumné účely, ale ne pro sériovou výrobu. Grafen lze dále vyrábět redukcí karbidu křemíku, tedy postupem, při kterém se odpařuje křemík při teplotě okolo 1 100 °C, přičemž na povrchu vzniká vrstva uhlíku. Pokud se tato vrstva dostane do styku s plynem obsahujícím uhlík, ten se usadí v mezerách po křemíku. Touto metodou se vyrábí wafery o průměru 50 mm, které obsahují vrstvu grafenu a podkladovou vrstvu z karbidu křemíku.

Tyto wafery lze využít i pro výrobu tranzistorů, ale povrch, na kterém je grafen umístěn, zpomaluje tok elektronů. Pohyblivost elektronů v grafenu na takovém nosném povrchu je na úrovni 2 000 cm^2/Vs, což je sice více než u dopovaného křemíku (1 400 cm^2/Vs), ale mnohem méně, než je teoretický limit grafenu (200 000 cm^2/Vs). Při výrobě pomocí depozice chemickým odpařováním (tedy tzv. CVD, Chemical Vapor Deposition) vzniká materiál s pohyblivostí elektronů 16 000 cm^2/Vs. Při výrobě metodou CVD dochází k tvorbě grafenu rozkladem plynu obsahujícího uhlík na měděném povrchu při teplotě 900 °C. Jelikož měď ale není vhodným nosným materiálem, je nutné ji odstranit a grafenovou vrstvu přemístit na křemíkový substrát. Metoda CVD se zatím jeví jako nejlepší varianta pro sériovou výrobu.

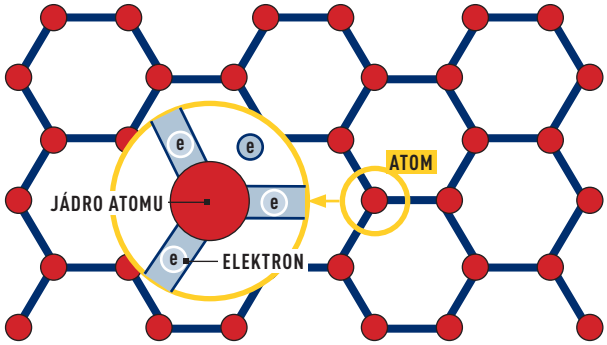
OD GRAFITU KE GRAFENU

Grafen získáme oddělením jedné atomové vrstvy z tak běžného materiálu, jako je grafit **1**. Pod elektronovým mikroskopem **2** vidíme pravidelnou šestiúhelnou strukturu grafenu.



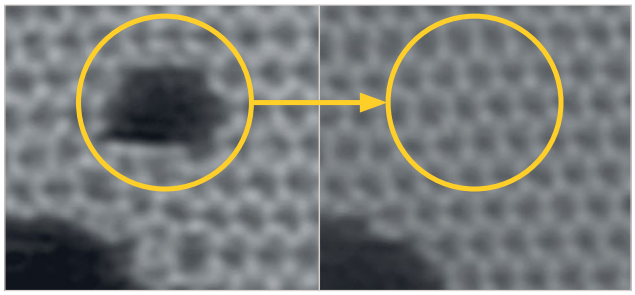
SÍŤ ATOMŮ UHLÍKU

Ve struktuře grafenu jsou tři vnější elektrony atomu uhlíku spojeny se sousedícími atomy uhlíku, čtvrtý elektron zůstává nevázaný. Díky třem elektronovým vrstvám je grafen pevný a čtvrtý elektron zajišťuje jeho vodivost.



STRUKTURA GRAFENU SE DOKÁŽE SAMA OPRAVIT

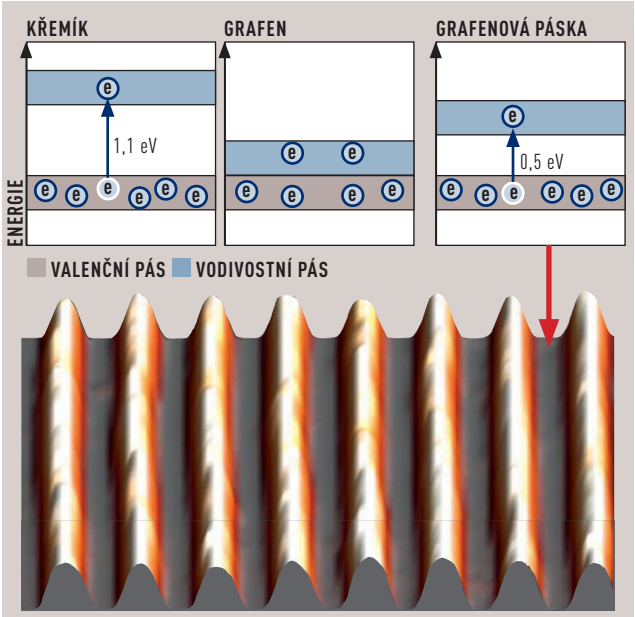
Na Manchesterské univerzitě zjistili, že poškozená struktura grafenu se dokáže za pomoci katalyzátoru sama opravit. K opravě je třeba jen doplnit potřebné množství „náhradních" atomů uhlíku.



Grafen je stále poměrně drahý materiál. Čtyři malé destičky grafenu umístěné na křemíkovém substrátu přijdou v internetovém obchodě graphenea.com na téměř 250 eur.

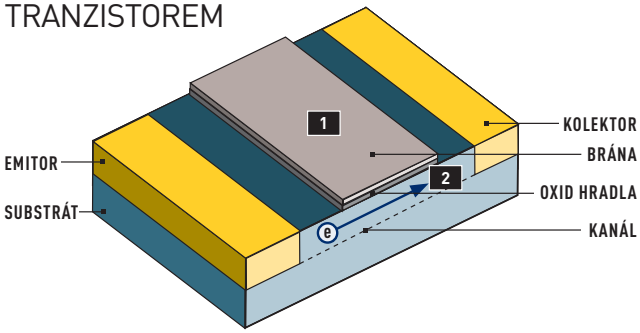
TVORBA ZAKÁZANÉHO PÁSU U GRAFENU

Křemíkové tranzistory pracují pouze tehdy, pokud se elektrony nachází ve vodivostním pásu. Pro přechod z valenčního pásu do vodivostního musí překonat bariéru tzv. „zakázaného pásu". Grafen zakázaný pás nemá, takže tranzistor se neustále nachází v sepnutém stavu.

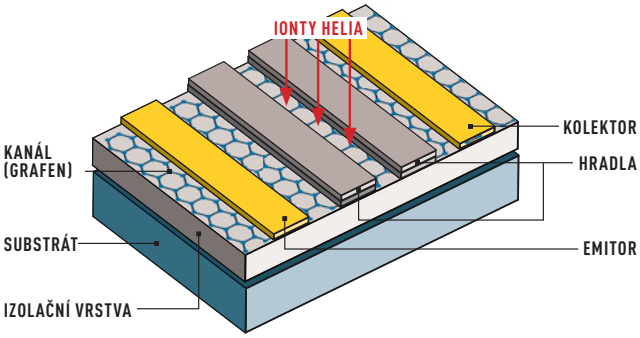


Řešení: Zakázaný pás u grafenu lze podle zjištění vědců z Manchesterské univerzity vytvořit jeho zvlněním do podoby tzv. grafenové pásky (Grafen Nano Ribbon, GNR).

ROZDÍL MEZI KŘEMÍKOVÝM A GRAFENOVÝM TRANZISTOREM



Křemíkový tranzistor je sepnutý, pokud jím prochází elektrický proud **1**. V takovém případě se v substrátu otevírá kanál, kterým protékají elektrony od emitoru do kolektoru **2**.



Grafenový tranzistor potřebuje k sepnutí dvě hradla. Struktura grafenových vazeb je navíc narušena ostřelováním ionty helia, díky kterému vzniká zakázaný pás.

TRANZISTORY: Grafenová architektura

Přechod z křemíkových na grafenové tranzistory nebude snadný – bude nutné poněkud změnit strukturu tranzistoru.

Tranzistory jsou základními součástkami počítačů, protože každý z těchto miniaturních obvodů reprezentuje jeden bit. Dnes jsou vyráběny z polovodivého křemíku, který obsahuje čtyři valenční elektrony, jež jsou všechny propojeny vazbami se sousedními atomy. Na rozdíl od grafenu se v něm nenachází volný elektron. Kanál křemíkového tranzistoru se otevírá poté, co je do tranzistoru přiveden proud a elektrony se v něm pohybují od emitoru (source) ke kolektoru (drain), přičemž křemík tranzistoru je obohacen o atomy jiných prvků. Emitor a kolektor jsou například tzv. n-dopované a jsou do nich přidávány třeba atomy arzenu s pěti vnějšími elektrony. Přidáním atomů arzenu k atomům křemíku dochází k obohacení o jeden volný elektron. Kanál tranzistoru je na druhou stranu p-dopovaný například bórem, který má pouze tři vnější elektrony, to znamená, že ve své struktuře má volnou „díru" pro jeden elektron.

Pohyb elektronů je vyvolán elektrickým proudem, jehož síla závisí na úrovni dopování použitého materiálu. Křemík má šířku zakázaného pásu 1,1 elektronvoltu (eV), což je hodnota udávající množství energie potřebné k uvolnění vnějšího valenčního elektronu z valenčního pásu do pásu vodivostního. Tranzistor propouští elektrickou energii pouze pokud se nachází ve vodivostním pásu a elektrony prochází od emitoru ke kolektoru. Oproti tomu grafen nemá zakázaný pás a jeho elektrony se neustále nachází ve vodivostním pásu. Grafenový tranzistor je neustále vodivý, a to pokud do něj nepřichází proud.

Reformovaný grafen se stává polovodičem

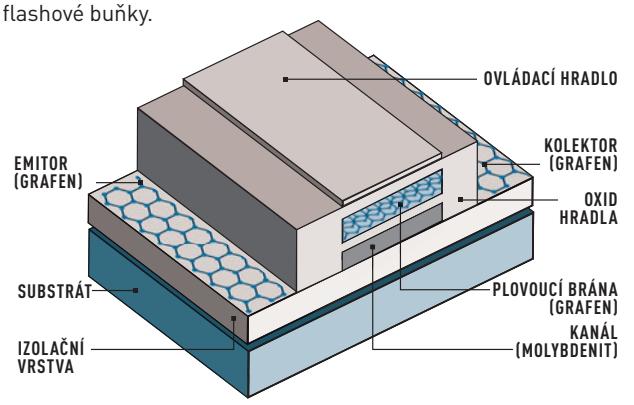
Aby bylo možné z grafenu vyrábět tranzistory, musí tento materiál obsahovat zakázané pásmo elektronů. Výzkumníci upravili grafen pomocí technologie karbidu křemíku tak, že obsahuje tzv. „nanopásma". Úpravou grafenu do vlnovité podoby dosáhli vytvoření zakázaného pásma o šířce 0,5 eV. Japonští vědci jsou ještě o krok dál. Pomocí metody CVD dokázali vyrobit grafenový tranzistor o rozměru 30 nm. Tato velikost již odpovídá technologii 22nm tranzistorů Intel „Tri-Gate". Japonský tranzistor používá s ohledem na omezenou šířku zakázaného pásma k řízení průchodu elektronů dvě brány. Ty jsou vytvořeny za pomoci ostřelování grafenu ionty helia, které má za následek narušení pravidelné struktury atomů grafenu.

Japonský výzkum se nyní zaměřuje na možnost výroby grafenových waferů obsahujících tyto tranzistory a v současnosti zkoumá použitelné technologie, které by dokázaly zajistit jejich dostatečně efektivní a ekonomickou výrobu. Možná ale bude nutné při vývoji ideálního grafenového tranzistoru opustit tradiční schéma této základní počítačové součástky. Výsledkem projektu Manchesterské univerzity je koncept dvou grafenových vrstev vyrobených metodou CVD, jež jsou odděleny vrstvou disulfidu wolframu (WS2), která vytváří zakázané pásmo o šířce 2,1 eV, jímž procházejí elektrony obou vrstev grafenu.

PLACENÁ INZERCE

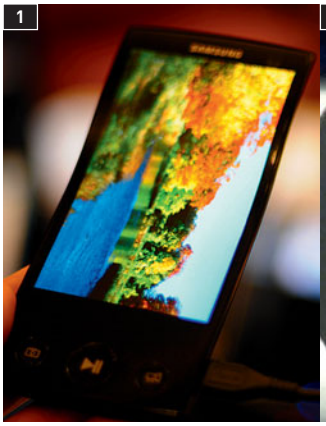
RYCHLÉ FLASHOVÉ BUŇKY S DLOUHOU VÝDRŽÍ

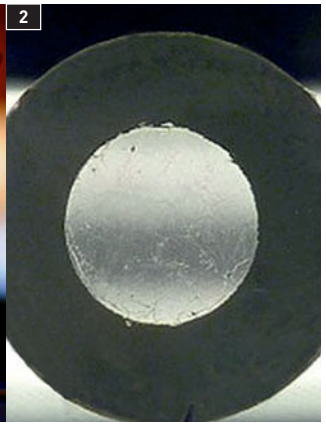
Švýcarští vědci postavili flashovou buňku, která dokáže uchovávat informace v plovoucí bráně vyrobené z grafenu. Díky kanálu z molybdenitu je rychlejší a energeticky výhodnější než současné flashové buňky.



OHYBNÉ DISPLEJE, DOKONALÁ SLUCHÁTKA

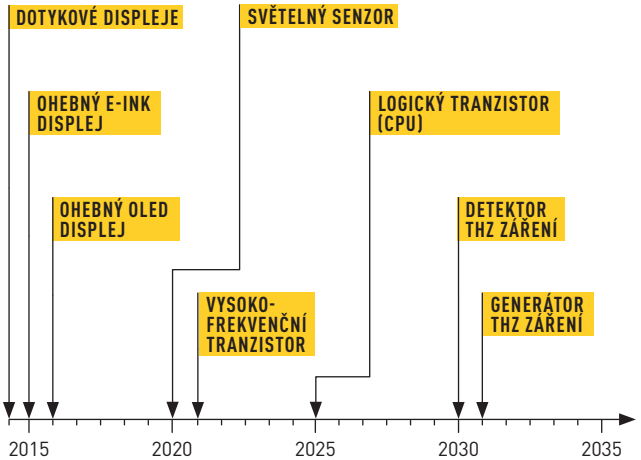
Dokonalé vlastnosti grafenu lze využít i v počítačových periferiích. Díky průhlednosti a ohebnosti je ideální pro výrobu ohebných displejů **1**. Grafenové membrány mohou přinést dokonalou zvukovou reprodukci i do malých sluchátek **2**.





PLÁNY BUDOUCÍHO VÝVOJE

Tým fyziků, kteří úzce spolupracují s nositelem Nobelovy ceny Konstantinem Novoselovem, předpokládá, že první produkty z grafenu přijdou na trh již v dohledné době. Nejprve jej najdeme v displejích, poté ve vysokofrekvenčních tranzistorech určených pro bezdrátovou komunikaci, a za nějakých deset let bychom se mohli dočkat prvního grafenového procesoru s frekvencí okolo 100 GHz.



VYUŽITÍ:
Paměti, baterie, displeje

Grafen má potenciál změnit celou řadu počítačových komponent. Pravděpodobně ale bude nejprve využit v displejích.

Vytvoření grafenového tranzistoru je prvním krokem k použití grafenu jak v modulech krátkodobé paměti, tak ve flashových buňkách, které umožní dlouhodobý záznam dat. Flashová buňka pracuje jako tranzistor, takže je-li do ní přiváděn proud, elektrony cestují od emitoru do kolektoru. Jediným rozdílem je, že mezi ovládacím hradlem a kanálem je umístěna plovoucí brána. Paměťovou funkci vykonává plovoucí brána, protože její bitovou hodnotu při následném čtení obsahu buňky určuje množství elektronů, které jí proteče. Plovoucí brána je plněna za pomoci dostatečně vysokého kladného napětí o úrovni 10 V a vyprázdní se při použití odpovídajícího záporného napětí.

Výzkumníci ze švýcarského technologického institutu ETH sestavili flashovou buňku, jejíž plovoucí brána je vyrobena z grafenu. Kanál grafenové buňky je vyroben z atomické vrstvy molybdenitu (MoS_2), v němž se elektrony pohybují stejně efektivně jako v grafenu a mají zakázaný pás o šířce 1,8 eV. Grafenová buňka navíc vydrží víc zápisových cyklů než klasické křemíkové buňky, jaké se používají v SSD nebo USB flash discích, a to proto, že k jejímu vymazání stačí menší napětí. Zároveň tak dosahuje i vyšších rychlostí čtení a zápisu.

Grafen dokáže nahradit dražší materiály

Vynikající vodivost předurčuje grafen k použití v solárních buňkách a akumulátorech. Experimenty provedené v Rensselaerském polytechnickém institutu ukázaly, že díky grafenu lze zkrátit délku nabíjení akumulátorů z dvanácti minut na 90 sekund. Díky tomu, že je grafen nejen extrémně vodivým, ale zároveň průhledným materiálem, ideálně se hodí pro využití v displejích. Již v roce 2010 byly na Stanfordově univerzitě vyvinuty OLED diody s grafenovými elektrodami, ve kterých grafen nahradil drahou směs oxidu cíničitého a oxidu inditého, zvanou ITO, která se rovněž používá v buňkách solárních panelů. Díky mechanickým vlastnostem, hlavně nízké hmotnosti a vysoké pevnosti a ohebnosti, představuje grafen ideální materiál pro výrobu membrán do sluchátek. Takovou membránu o průměru sedmi milimetrů nedávno vyrobili na univerzitě v Berkeley. K jejímu ovládání postačí dvě křemíkové elektrody a kvalita vibrací a produkovaného zvuku je stejně vysoká jako u drahých high-endových sluchátek.

Nedokážeme zatím říct, zda grafen splní všechna očekávání, která do tohoto materiálu výzkumníci a výrobci vkládají. Hromadná výroba grafenu je stále v nedohlednu a technologie grafenových tranzistorů má pořád řadu nevyřešených problémů. Tým fyziků, kteří úzce spolupracují s nositelem Nobelovy ceny Konstantinem Novoselovem, zveřejnil plán budoucího vývoje, podle kterého můžeme některé grafenové produkty, jako například OLED diody, očekávat již v dohledné době. Na grafenový procesor s frekvencí 100 GHz si však počkáme ještě minimálně deset let. V každém případě jde ale o splnitelný úkol, zatímco 100GHz křemíkový procesor by se sám roztavil.