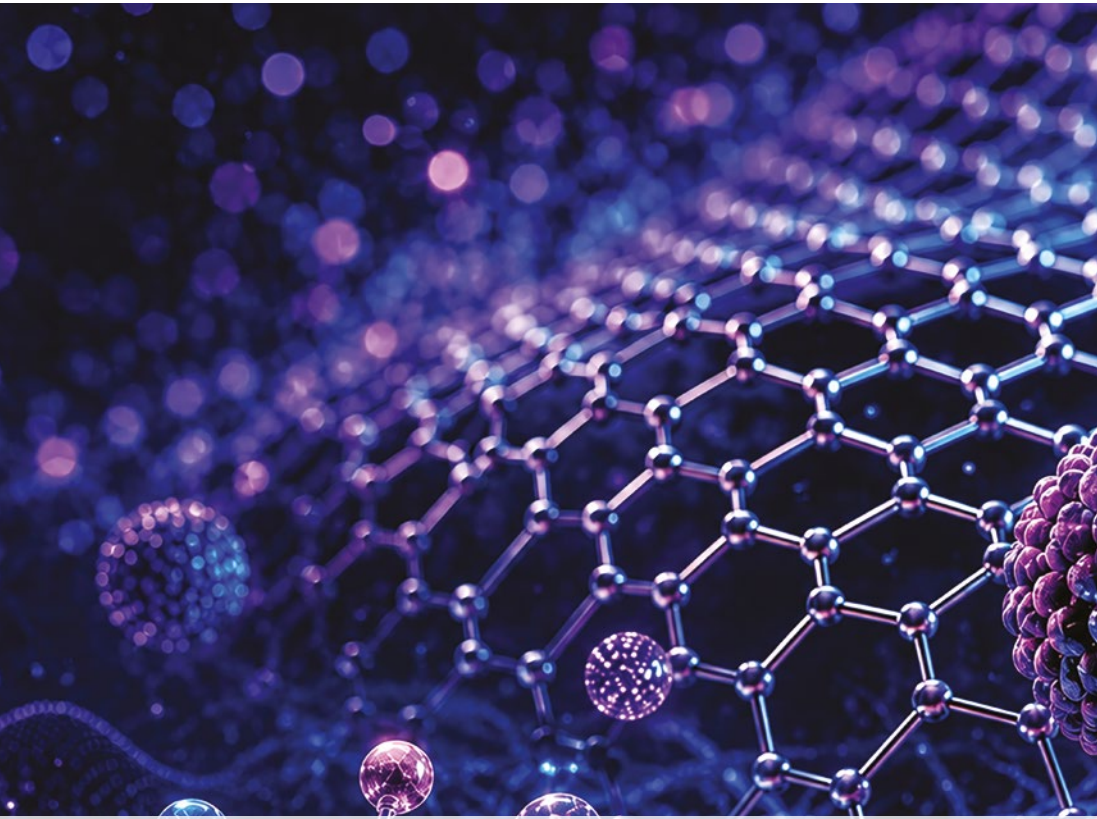
Nanotechnologie budoucnosti



AMULET

Akademie věd České republiky

Heyrovského ústav

věda kolem nás
výzvy a otázky

147

Heyrovského ústav AV ČR, v. v. i. (dříve Ústav fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR, HEÚ), je veřejná výzkumná instituce, která rozvíjí vědecký odkaz nositele Nobelovy ceny profesora Jaroslava Heyrovského v oborech spojených s fyzikální chemií. Soustavnému základnímu i aplikovanému výzkumu se zde věnuje přes dvě stě vědkyň a vědců, od nadějných mladých badatelek a badatelů po světově uznávané špičkové odbornice a odborníky.

Kořeny ústavu sahají k výzkumu polarografie – elektrochemické metody, kterou Jaroslav Heyrovský objevil v roce 1922. Za její objev a rozvoj získal v roce 1959 Nobelovu cenu za chemii jako dosud jediný český vědec v oblasti technických a přírodních věd. Po řadu desetiletí patřila polarografie mezi významné analytické metody využívané ve vědě i průmyslu.

Na tradici polarografického výzkumu pak v roce 1950 navázalo založení nového Polarografického ústavu, jehož prvním ředitelem byl právě Jaroslav Heyrovský. Ústav se stal významným centrem výzkumu elektrochemie. O několik let později vznikl v rámci Československé akademie věd také samostatný Ústav fyzikální chemie, vedený Heyrovského žákem Rudolfem Brdičkou. Obě instituce se v roce 1972 spojily a vytvořily Ústav fyzikální chemie a elektrochemie J. Heyrovského ČSAV – přímého předchůdce dnešního Heyrovského ústavu. Instituce tak od svého počátku spojovala tradici polarografie a elektrochemie s široce zaměřeným výzkumem fyzikální chemie.

Výzkum Heyrovského ústavu dnes zdaleka přesahuje původní oblast elektrochemie. Vědkyně a vědci se zde zabývají například teoretickou a výpočetní chemií, spektroskopií, biofyzikální chemií, katalýzou, elektrochemickými materiály, nanochemií, nízkorozměrnými systémy, chemií iontů v plynné fázi, molekulární dynamikou a nově také kosmickou chemií a technikou. Společným jmenovatelem těchto různorodých oblastí je snaha porozumět tomu, jak se chovají atomy a molekuly, jak mezi sebou interagují a jak lze jejich vlastností využít pro vývoj nových technologií.

Foto na obálce: nanosvět pohledem AI
Zdroj: vygenerován nástrojem ChatGPT

Nanoúvod

Nanotechnologie patří mezi nejdynamičtěji se rozvíjející oblasti současné vědy. Na nanoúrovni vznikají materiály s jedinečnými vlastnostmi, které nacházejí uplatnění v medicíně, energetice, elektronice, ochraně životního prostředí i v řadě dalších oblastí. Porozumění procesům probíhajícím na atomární a molekulární úrovni a možnost jejich řízeného ovlivňování otevírá cestu k vývoji materiálů s vlastnostmi, kterých nelze běžnými postupy dosáhnout. Výzkum nanomateriálů přispívá k vývoji inovativních technologií a pomáhá úspěšně čelit řadě současných společenských i průmyslových výzev.

Výzkum nanomateriálů je ze své podstaty interdisciplinární. Vyžaduje úzkou spolupráci odborníků z oblastí fyziky, chemie, materiálového inženýrství, medicíny i dalších vědních oborů. Právě na rozhraní jednotlivých disciplín dnes často vznikají nejvýznamnější vědecké objevy a technologické inovace. Sdílení znalostí, zkušeností i různých přístupů k řešení stejného problému umožňuje nacházet postupy, které by v rámci jednoho oboru vznikaly jen obtížně.

Právě na tomto principu je založen projekt AMULET, který propojuje osm výzkumných institucí s různým odborným zaměřením. Společně pokrývají široké spektrum výzkumu pokročilých materiálů – od jejich návrhu a přípravy přes studium fyzikálních a chemických vlastností až po aplikace v optice, energetice, katalýze či senzorice. Tato brožura představuje jednotlivé oblasti výzkumu i odborné týmy zapojené do projektu a ukazuje, jak se základní výzkum propojuje s praktickými aplikacemi a technologiemi budoucnosti.

Každý z partnerů konsorcia přináší jedinečné znalosti, zkušenosti i špičkové experimentální a teoretické zázemí. Propojení těchto kompetencí vytváří prostor pro vznik nových vědeckých poznatků, inovativních technologií a dlouhodobé spolupráce, která přispívá k dalšímu rozvoji výzkumu pokročilých nanomateriálů.

Co je nano?

Nanoškála označuje mimořádně malé rozměry v řádu miliardtin metru (10^{-9} m), tedy takové, které jsou běžnému vnímání skryté. Jde o svět, který dosud není zcela probádaný a nabízí mimořádné možnosti řízeného ovlivňování struktury hmoty, a tím i jejích fyzikálních, chemických či biologických charakteristik.

Uvedené principy využívá materiálová genetika. V dalším článku se proto podíváme na to, jak vědci navrhují nové materiály s vlastnostmi na míru a jakou roli v tomto procesu hraje světlo.

Materiálová genetika: Jak navrhujeme materiály, které rozumějí světlu

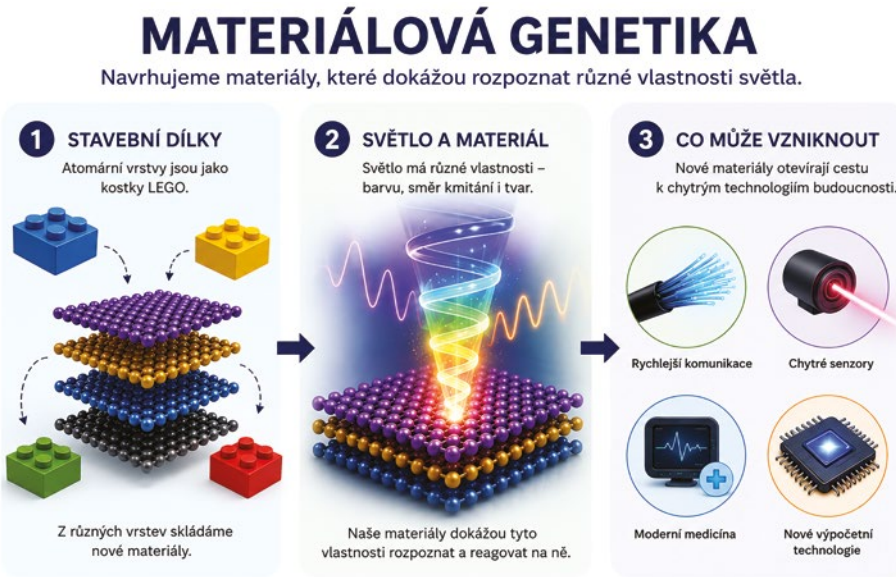
Jana Kalbáčová Vejpravová, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova, Ke Karlovu 3, 121 16 Praha 2

Když se řekne genetika, většina z nás si představí dědičnost, DNA a živé organismy. Vědci dnes ale uplatňují podobnou myšlenku i při výzkumu nových materiálů. Stejně jako genetická informace určuje vlastnosti organismů, uspořádání atomů rozhoduje o tom, jak se bude chovat daný materiál. Pokud tomuto „jazyku atomů“ porozumíme, můžeme nejen vysvětlit vlastnosti již známých materiálů, ale také navrhovat a vytvářet zcela nové, jejichž vlastnosti budou přesně odpovídat našim potřebám.

Od objevování k návrhu materiálů

Po většinu historie lidstvo materiály především objevovalo. Naučili jsme se využívat kámen, bronz, železo, sklo nebo křemík a každá nová materiálová technologie zásadně ovlivnila vývoj civilizace. Moderní věda však přináší novou možnost – materiály nejen hledat, ale přímo navrhovat. Díky pokročilým experimentálním metodám a výpočetním simulacím dnes dokážeme vytvářet struktury určené pro konkrétní použití. Cílem moderního materiálového inženýrství je tedy vyvíjet materiály, které umožní vyrobit rychlejší elektronická zařízení, účinnější zdroje energie, citlivější senzory nebo nové komunikační technologie.

Velkou pozornost dnes přitahují materiály tvořené jedinou nebo několika vrstvami atomů, tzv. dvojdimenzionální (2D) nebo van der Waalsovy krystaly. Přestože



Obr. 1 Jak vznikají moderní technologie díky materiálové genetice 2D LEGA a jejich interakci se světlem.

jsou extrémně tenké – jejich tloušťka je často desetitisíckrát menší než průměr lidského vlasu –, mohou vykazovat pozoruhodné vlastnosti. Některé vedou elektrický proud mnohem lépe než kovové vodiče, jiné účinně pohlcují nebo vyzařují světlo a další reagují na magnetické pole způsobem, který u běžných látek nepozorujeme. Vlastnosti těchto 2D krystalů se často výrazně liší od vlastností jejich objemových protějšků, což otevírá zcela nové možnosti jejich využití.

Materiály jako stavebnice

Zajímavé je, že tyto extrémně tenké krystaly lze kombinovat podobně jako kostky stavebnice LEGO. Každá vrstva představuje jiný „stavební dílek“ s unikátními vlastnostmi. Jejich skládáním vznikají nové materiály, které se v přírodě vůbec nevyskytují. Někdy stačí pootočit jednu vrstvu vůči druhé o několik stupňů, a výsledný materiál začne vykazovat zcela nové chování. Takové uspořádání může například zásadně změnit elektrickou vodivost, optické vlastnosti nebo magnetickou odezvu materiálu. Vědci tak získávají mimořádně široké možnosti, jak vlastnosti materiálů promyšleně navrhovat a měnit. Právě zde se naplno projevuje princip materiálové genetiky – vztah mezi strukturou pevných látek a výslednými vlastnostmi, který nachází uplatnění v různých oblastech.

Jedním z hlavních témat současného výzkumu je interakce 2D materiálů se světlem. Světlo totiž není jen zdrojem energie nebo prostředkem, díky kterému vidíme okolní svět. Kromě barvy a intenzity může mít i další vlastnosti, jež lze využít pro přenos a zpracování informací. Moderní optické technologie se proto snaží využívat stále více „rozměrů“ světla, aby bylo možné přenášet větší objem dat rychleji a efektivněji.

Interakce světla a hmoty

V projektu AMULET proto zkoumáme, jak mohou nové materiály různé vlastnosti světla rozpoznávat a jak na ně dokážou reagovat. Snažíme se pochopit, jak světlo a hmota vzájemně komunikují a jak tuto komunikaci využít pro vývoj nových optických, optoelektronických a kvantových technologií. Představit si to lze jako vývoj stále dokonalejších smyslů. Zatímco běžný detektor zaznamená pouze přítomnost světla, materiály budoucnosti by mohly rozlišovat mnohem více informací a vlastností světla a reagovat na ně různými způsoby.

Takové součástky by mohly najít využití v komunikačních technologiích, přesnějších senzorech, medicíně nebo v nových typech výpočetních zařízení. Mohly by například umožnit rychlejší přenos dat, citlivější diagnostické metody nebo nové způsoby zpracování informací s nižší spotřebou energie. Některé z těchto aplikací jsou zatím ve fázi základního výzkumu, jiné již vznikají v laboratořích po celém světě a postupně se přibližují praktickému využití.

Výzkum nových materiálů dnes tedy nespočívá pouze v objevování neznámých látek, ale stále více také v porozumění vztahu mezi jejich strukturou a vlastnostmi a jejich cíleným designem.

Schopnost využívat světlo otevírá řadu nových možností. V dalším článku si ukážeme jednu z nich – jak lze světelnou energii využít k rozkladu nebezpečných látek ve vodě a jakou roli v tomto procesu hraje fotokatalýza.

Když světlo čistí vodu: Příběh fotokatalýzy

Eliška Mikysková, Heyrovského ústav AV ČR, v. v. i., Dolejškova 2155/3, 182 00 Praha 8

Když si vezmeme antibiotikum proti angíně, tabletu proti bolesti nebo použijeme opalovací krém, většina z nás nad jejich dalším osudem nepřemýšlí. Jenže příběh těchto látek nekončí ve chvíli, kdy splní svůj účel. Část léčiv a dalších chemických látek se z těla vyloučí a spolu s odpadní vodou putuje do čistíren odpadních vod. Tam začíná jejich další cesta.

Moderní čistírny odpadních vod jsou technologicky velmi vyspělé a dokážou odstranit většinu běžného znečištění. Některé látky jsou však natolik odolné, že jimi projdou téměř beze změny. Patří mezi ně například některá léčiva, hormony, pesticidy nebo složky kosmetických přípravků. Přestože se ve vodě nacházejí jen ve velmi malých koncentracích, mohou ovlivňovat vodní organismy, narušovat fungování ekosystémů a dlouhodobě zatěžovat životní prostředí. Jak takové látky odstranit? Jednou z možností je využít něco, co máme všichni kolem sebe – světlo.

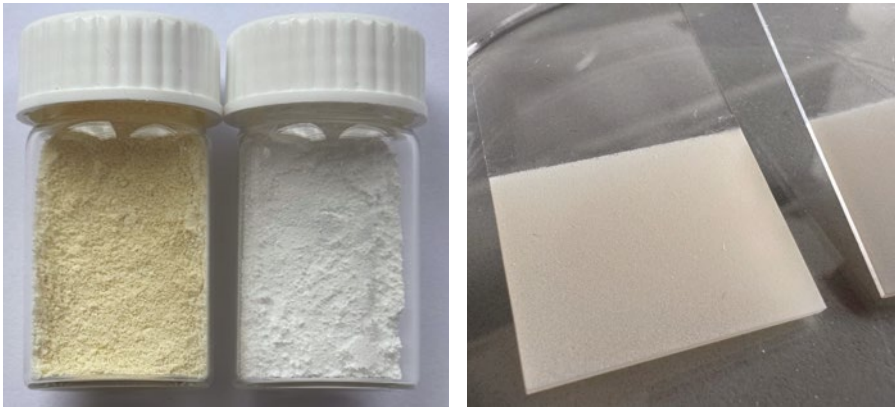
Proces zvaný fotokatalýza

Historie fotokatalýzy se začala psát již před více než sto lety, ale nejvíce se tento proces dostal do povědomí na počátku 70. let 20. století. V roce 1972 japonští vědci A. Fujishima a K. Honda zjistili, že pokud posvítíme na oxid titaničitý ultrafialovým zářením, dojde k rozkladu vody na vodík a kyslík. Jejich objev, známý jako Honda–Fujishimův efekt, ukázal, že světelná energie může na povrchu některých materiálů spouštět zajímavé chemické reakce. Zpočátku se vědci zajímali především o možnost výroby vodíku jako čistého zdroje energie. Brzy se však ukázalo, že fotokatalýza má mnohem širší využití. Reaktivní částice vznikající při ozáření fotokatalyzátoru totiž dokážou rozkládat i řadu organických látek, včetně těch, které znečišťují vodu nebo vzduch. A přestože se dnes fotokatalýza využívá například při vývoji samočisticích povrchů, antibakteriálních materiálů nebo technologií pro čištění vody a vzduchu, stále patří mezi intenzivně zkoumané oblasti.

Představme si fotokatalyzátor

Fotokatalyzátor je speciální materiál, nejčastěji polovodič (materiál, jehož elektrická vodivost se může výrazně měnit například působením světla) ve formě prášku. Jeho fungování lze přirovnat k solárnímu panelu. Zatímco však solární panel přeměňuje energii světla na elektrickou energii, fotokatalyzátor využívá energii světla k nastartování chemických reakcí. Když na fotokatalyzátor dopadne světlo s dostatečnou energií, vzniknou v jeho struktuře kladné a záporné náboje. Ty následně reagují s molekulami vody a kyslíku přítomnými v okolí a vytvářejí velmi reaktivní částice, například hydroxylové radikály. Tyto částice lze považovat za jakési „chemické uklízeče“ – napadají molekuly znečišťujících látek a postupně je rozkládají na jednodušší sloučeniny. Ideálním výsledkem je úplný rozklad na oxid uhličitý, vodu a minerální kyseliny.

Přestože princip fotokatalýzy zní jednoduše, její praktické využití není samozřejmé. Vědci musí nejprve najít vhodné materiály, které budou dostatečně účinné, stabilní a zároveň ekonomicky dostupné. V našem výzkumu se konkrétně zaměřujeme



Obr. 2 Vlevo práškový fotokatalyzátor. Vpravo vrstva fotokatalyzátoru nanesená na sklíčko.

na vývoj a studium nových fotokatalyzátorů určených pro odstraňování mikropolutantů z vody. Snažíme se porozumět tomu, proč některé materiály fungují lépe než jiné a jak jejich vlastnosti dále zlepšovat.

Nejčastěji se přitom fotokatalyzátory používají ve formě jemných prášků rozptýlených ve vodě. Vedle práškových fotokatalyzátorů připravujeme také fotokatalytické vrstvy nanesené například na sklo nebo kovové podložky (**viz obr. 2**). Takové uspořádání by mohlo usnadnit budoucí praktické využití technologie. Pokud je totiž fotokatalyzátor pevně uchycen na nosiči, není po čištění nutné jej z vody složitě odstraňovat. Následně testujeme, jak účinně dokážou připravené materiály odstraňovat různé typy znečišťujících látek, například léčiva nebo látky narušující hormonální systém organismů.

Světlem k čisté vodě

Požadavky na kvalitu vody se neustále zvyšují a zároveň roste počet nových látek, které se dostávají do životního prostředí. Technologie budoucnosti proto budou muset být stále účinnější a šetrnější. Důležité je také sledovat nejen to, zda původní látka zmizí, ale také co vzniká během jejího rozkladu. Fotokatalýza nabízí zajímavou možnost, jak využít energii světla k odstraňování problematických látek z vody. A možná právě díky výzkumu probíhajícímu dnes v laboratořích budou jednou čistírny odpadních vod využívat k odstraňování nebezpečných látek to nejdostupnější, co máme – světlo.

Fotokatalýza je jen jedním z příkladů toho, jak lze nanomateriály a jejich povrchové vlastnosti účelně využívat v praxi. Podobné principy – tedy řízená úprava povrchů a jejich funkcí – se uplatňují i v celé řadě dalších oblastí. V následujícím článku se proto podíváme na širší svět nanomateriálů a jejich různorodé aplikace.

Nanomateriály v akci

Zdeňka Kolská, Viktorie Neubertová a Jaroslava Jarolímková, CENAB, Přírodovědecká fakulta, Univerzita J. E. Purkyně, Pasteurova 1, 400 96 Ústí nad Labem

Portfolio nanomateriálů pro různé typy výzkumu je velmi široké, počínaje různými typy nanočástic (NPs z anglického *nanoparticles*), které mohou být případně modifikovány účinnými látkami, přes nanovlákna až po nanostrukturované materiály, tvořené různými substráty, jež se povrchově aktivují a/nebo chemicky modifikují. Tým UJEP se věnuje jak studiu NPs, tak i přípravě nanostrukturovaných materiálů, a to pro široké spektrum aplikací.

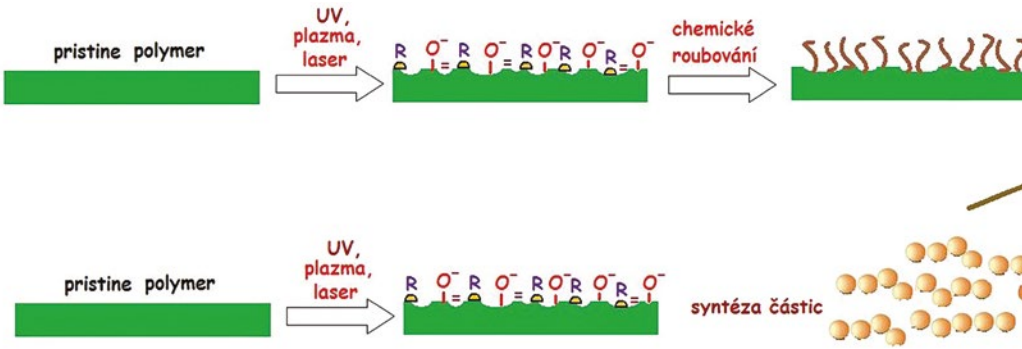
Příprava nanostrukturovaných materiálů

V případě NPs jde převážně o optimalizaci jejich syntézy a následné modifikace vhodnými chemickými látkami pro předem určené využití (antimikrobiální účinky, záchyty plynů apod.). Nanostrukturované materiály jsou připravovány vícekrokově. Substráty, kterými mohou být různé pevné látky (polymery, sklo, keramika, ocel a další materiály, včetně různých částic a NPs), jsou nejprve na povrchu takzvaně aktivovány. Aktivace může probíhat pomocí různých technik, a to fyzikálně (působením plazmatu, UV záření, laseru apod.) nebo chemicky pomocí tzv. Piranha roztoků. Po aktivaci povrchů dochází k tzv. roubování vhodných chemických látek na povrch substrátu za účelem „ukotvení" látek, aby bylo možné na povrchu ukotvit látky ovlivňující požadovaný výsledný efekt. Zmíněné postupy mohou být různě kombinovány, možnosti jsou prakticky neomezené, dokonce i dříve připravené a modifikované NPs lze následně naroubovat na aktivované nebo chemicky modifikované substráty. Tyto možnosti ukazuje **obr. 3**.

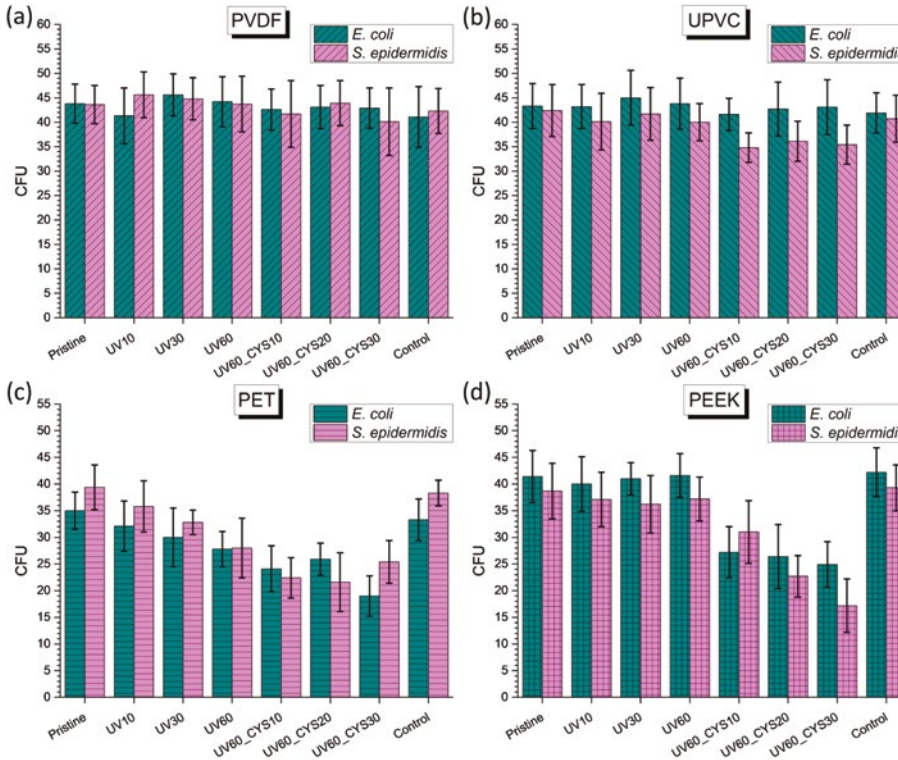
V oblasti přípravy a studia nanomateriálů jsme dosáhli řady výsledků. Zde představíme dva z nich:

Antibakteriální fólie

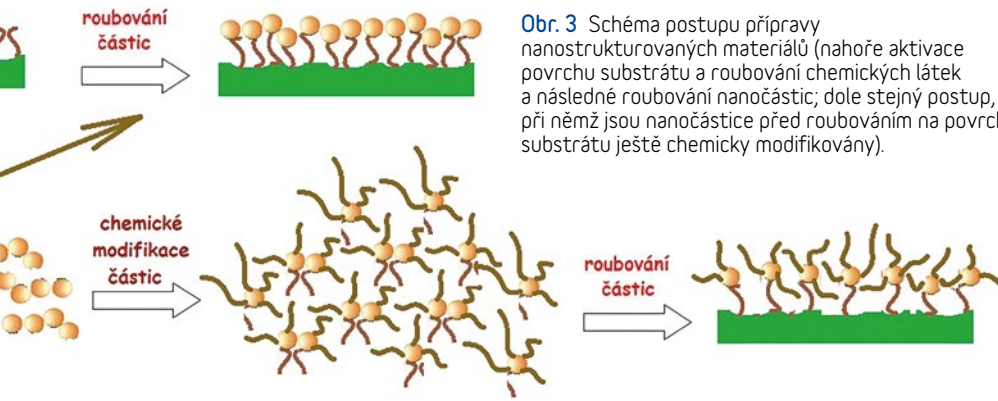
Jeden ze směrů výzkumu na UJEP se zaměřuje na povrchovou modifikaci desítek různých polymerních fólií s cílem zvýšit jejich antibakteriální účinnost. Povrchy těchto polymerů byly aktivovány pomocí UV záření o vlnové délce 254 nm, což je světlo používané v UV lampách na dezinfekci vody a vzduchu, a následně chemicky



roubovány speciální molekulou – cysteaminem (CYS). Pro lepší pochopení principu byly studovány různé doby UV expozice a rozdílné koncentrace cysteaminu. Navíc byla antibakteriální aktivita testována vůči dvěma nejznámějším bakteriálním kmenům, konkrétně *Escherichia coli* (E. coli, zástupce Gram-negativních bakterií)



Obr. 4 Počet CFU *E. coli* a *S. epidermidis* pro různé vzorky polymerů. UV10 a UV30 znamenají UV ozařování po dobu 10, resp. 30 min., CYS 10-CYS30 označují koncentrace cysteaminu (doi.org/10.3390/polym17020251).



Obr. 3 Schéma postupu přípravy nanostrukturovaných materiálů (nahoře aktivace povrchu substrátu a roubování chemických látek a následné roubování nanočástic; dole stejný postup, při němž jsou nanočástice před roubováním na povrch substrátu ještě chemicky modifikovány).

a *Staphylococcus epidermidis* (S. epidermidis, zástupce Gram-pozitivních bakterií). Některé z testovaných vzorků vykazovaly ve srovnání s nemodifikovanými (*pristine*) polymery pokles počtu bakteriálních kolonií (CFU) až o 45,7 % u *E. coli* a o 55,6 % u *S. epidermidis*, jak ukazuje **obr. 4**. Získané výsledky ukazují, že tato metoda povrchové modifikace má značný potenciál pro přípravu polymerních materiálů s výrazně zvýšenou antibakteriální aktivitou.

Nanočástice pro zachytávání plynů

Druhý výsledek se zaměřuje na nanočástice, které mohou zachytávat plyny z prostředí. Může jít například o plyny, které se podílejí na znečištění ovzduší nebo jsou významné v průmyslových procesech. Připravili jsme dva typy polyanilinových nanočástic (PANI NPs) ve dvou různých formách jako emeraldinové soli (ES) a emeraldinové báze (EB). Tyto drobné částice byly připraveny různými způsoby chemické přípravy, které se lišily i použitím stabilizace (s HCl a bez HCl). Výzkum se zaměřil na zjištění, jak tyto rozdíly v přípravě ovlivní jejich chování – zejména schopnost zachytávat plyny. Výsledky ukazují, že i malé změny v přípravě materiálu mohou výrazně ovlivnit jeho schopnost vázat plyny, například dusík (N_2) nebo oxid uhličitý (CO_2).

Tabulka 1 Porovnání maximálních objemů sorbovaných plynů (N_2 nebo CO_2) na vzorcích PANI ES a PANI EB se stabilizací HCl a bez ní (víc v článku: doi.org/10.1002/ntls.70025).

Vzorek	Max. objem sorbovaného N_2 [cm^3/g]	Max. objem sorbovaného CO_2 [cm^3/g]
PANI ES	94,1 ± 3,4	24,6 ± 1,2
PANI ES + HCl	107,9 ± 1,4	30,6 ± 2,1
PANI EB	144,4 ± 1,3	29,7 ± 2,4
PANI EB + HCl	138,4 ± 2,2	27,8 ± 2,3

Schopnost navrhovat materiály v nanoměřítku otevírá široké spektrum aplikací, kde rozhodují i nepatrné změny struktury. Jednou z oblastí, kde je tento přístup naprosto klíčový, jsou moderní baterie. Nanomateriály se v nich uplatňují při zvyšování výkonu, bezpečnosti i životnosti. Pojďme si ukázat, jak.

Bezpečnější a výkonnější baterie díky nanomateriálům

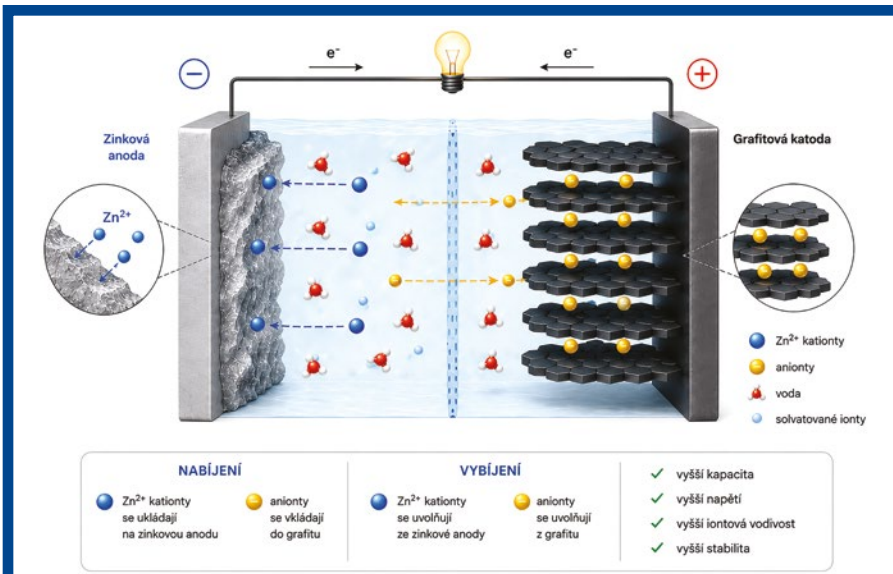
Jiří Červenka, Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Cukrovarnická 10/112, 162 00 Praha 6

Když nabíjíme mobilní telefon nebo se rozjíždí elektromobil, málokdo přemýšlí nad tím, co se odehrává uvnitř baterie. Přitom právě tam probíhá nepřetržitý pohyb iontů mezi elektrodami, který umožňuje ukládání a uvolňování elektrické energie. Aby byly budoucí baterie bezpečnější, vydržely více nabíjecích cyklů a dokázaly uložit více energie, hledají vědci nové materiály. A právě zde vstupují do hry nanomateriály – látky, jejichž strukturu dokážeme navrhovat v měřítku miliardtin metru.

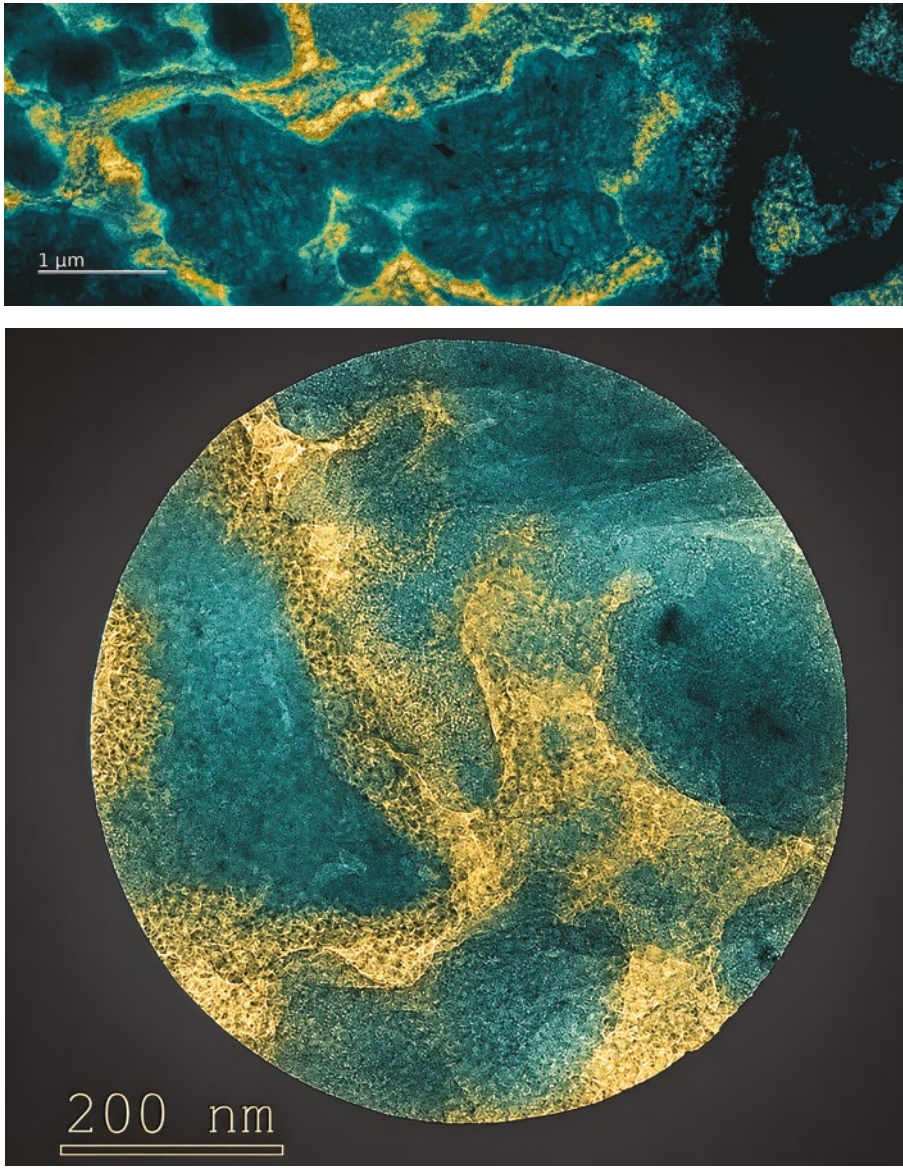
Proč právě nanomateriály?
V takto malém měřítku se materiály chovají jinak než ve světě, který běžně pozorujeme. Velikost částic, jejich tvar nebo uspořádání mohou rozhodovat o tom, jak rychle se v baterii pohybují elektrony a ionty. Díky tomu lze ovlivnit kapacitu baterie, rychlost nabíjení i její životnost.

Jedním z perspektivních směrů vývoje jsou vodné baterie, které místo hořlavého organického elektrolytu využívají vodný roztok. Jsou bezpečnější, šetrnější k životnímu prostředí a mohou najít uplatnění například při ukládání energie z obnovitelných zdrojů. Ve Fyzikálním ústavu AV ČR výzkumníci navrhují nanostrukturované elektrody, které umožňují rychlý pohyb iontů a současně si zachovávají stabilitu během stovek až tisíců nabíjecích a vybíjecích cyklů.

Křemík – materiál pro novou generaci lithium-iontových baterií
Dalším směrem výzkumu jsou nové anody pro lithium-iontové baterie. Dnes používaný grafit se již blíží svému teoretickému limitu, zatímco křemík dokáže uložit až desetkrát více lithia. To by mohlo výrazně prodloužit dojezd elektromobilů nebo výdrž přenosné elektroniky. Křemík však při nabíjení několikanásobně zvětšuje svůj objem a při vybíjení se opět smršťuje, což vede k praskání materiálu a rychlejšímu stárnutí baterie. Řešením jsou nanostrukturované částice a kompozity s uhlíkem, které tyto objemové změny lépe snášejí.



Obr. 5 Jak funguje vodná baterie s interkalací iontů. Schéma principu vodné baterie vyvíjené ve Fyzikálním ústavu AV ČR. Při nabíjení se ionty Zn^{2+} ukládají na zinkové anodě, zatímco záporně nabité anionty se vkládají mezi vrstvy grafitové katody (*interkalace*). Při vybíjení probíhají oba procesy opačným směrem a uložená energie se uvolňuje ve formě elektrického proudu. Díky vodnému elektrolytu jsou tyto baterie bezpečnější než běžné lithium-iontové články a představují perspektivní řešení pro stacionární ukládání energie.



Obr. 6 Pohled do nitra elektrody. Barevně zvýrazněný snímek z transmisního elektronového mikroskopu (TEM). Zobrazuje mikrostrukturu kompozitní elektrody, v níž se nacházejí aktivní částice křemíku (modře) propojené vodivou uhlíkovou sítí (žlutě). Právě uspořádání těchto struktur v měřítku mikrometrů a nanometrů rozhoduje o tom, jak rychle se mohou v elektrodě pohybovat elektrony a ionty. Měřítko 200 nanometrů odpovídá přibližně pětisetině tloušťky lidského vlasu. Právě na této úrovni vědci navrhují a studují nové nanomateriály, které mohou zvýšit kapacitu, zrychlit nabíjení a prodloužit životnost baterií.



Obr. 7 Laboratorní testování experimentálních bateriových článků. Vědci ověřují kapacitu, životnost i rychlost nabíjení nových elektrodových materiálů. Každý článek absolvuje stovky až tisíce nabíjecích a vybíjecích cyklů, aby bylo možné posoudit jeho stabilitu a odhalit procesy vedoucí ke stárnutí baterie.

Jak vznikají nové nanomateriály?

Vývoj nových bateriových materiálů ale nezačíná výrobou baterie. Nejprve je potřeba připravit materiály s přesně definovanou strukturou. K tomu slouží například metoda depozice atomárních vrstev (ALD), která umožňuje nanášet vrstvy silné jen několik atomů. Takové ochranné nebo funkční povlaky mohou výrazně zvýšit stabilitu elektrod a prodloužit životnost baterií.

Jak vědci nahlížejí do nitra baterie?

Jak ale zjistit, zda nový materiál skutečně funguje? Odpověď nabízí moderní elektronové mikroskopy. Ty umožňují nahlédnout hluboko dovnitř elektrod a zobrazit jejich strukturu až na úrovni jednotlivých atomů. Vědci tak mohou sledovat, jak jsou aktivní částice propojeny vodivou uhlíkovou sítí nebo jak se jejich struktura mění během provozu baterie.

Ještě podrobnější pohled odhaluje samotný svět nanometrů. Na snímcích z transmisního elektronového mikroskopu lze rozlišit struktury tisíckrát menší, než je tloušťka lidského vlasu. Právě na této úrovni vznikají vlastnosti, které rozhodují o výkonu, rychlosti nabíjení a životnosti baterie.

Od laboratoře k baterii budoucnosti

Posledním krokem je ověření, zda materiál funguje i v reálné baterii. Výzkumníci proto připravují experimentální články a podrobují je stovkám až tisícům nabíjecích a vybíjecích cyklů. Sledují jejich kapacitu, rychlost nabíjení i postupné stárnutí. Teprve když materiál obstojí v těchto zkouškách, může se stát kandidátem pro budoucí průmyslové využití.

Vývoj nové baterie je dlouhodobý proces, který propojuje fyziku, chemii, materiálové inženýrství i nejmodernější zobrazovací metody. Od prvního návrhu materiálu až po jeho testování může uplynout mnoho let. Každý nový nanomateriál ale

Když se mluví o bateriích, většina z nás si představí zařízení, která ukládají energii v makroskopickém světě. Ve skutečnosti ale lze stejné procesy – tedy pohyb a přenos elektronů – zkoumat i na úrovni jednotlivých molekul. V tomto měřítku se otevírá prostor pro vývoj zcela nových systémů pro ukládání a řízení elektrického náboje.

představuje další krok k bezpečnějšímu, výkonnějšímu a udržitelnějšímu ukládání energie. A právě v nanometrech dnes vznikají technologie, které mohou ovlivnit podobu energetiky i každodenního života v příštích desetiletích.

Superkondenzátory – „sprinteři" mezi zařízeními pro ukládání energie

Roman Elashnikov, Oleksiy Lyutakov, Václav Švorčík, Fakulta chemické technologie, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6

Co je superkondenzátor?
Když se rozjíždí tramvaj, startuje motor a elektronické zařízení potřebuje během zlomku sekundy velký příkon. Samotný akumulátor nemusí reagovat dostatečně rychle. Právě pro takové situace se používají superkondenzátory – elektrochemická zařízení, která dokážou elektrickou energii velmi rychle přijmout a stejně rychle ji znovu odevzdat.

Svými vlastnostmi stojí superkondenzátor mezi klasickým kondenzátorem a akumulátorem. Uloží více energie než běžný kondenzátor, ale méně než akumulátor. Jeho silnými stránkami jsou naopak vysoký měrný výkon, krátká doba odezvy a mimořádně dlouhá cyklická životnost (běžně 10^5–10^6 cyklů).

Právě nižší schopnost ukládat energii oproti akumulátorům se snaží řešit vědci VŠCHT. Studují uhlíkové materiály s co největším vnitřním povrchem a s póry přesně na míru iontům. Dále se zabývají i novými elektrolyty, které snesou vyšší napětí. Výhodou je, že se přitom obejdou bez lithia a kobaltu. Uhlík pro elektrody lze získat třeba i z „obyčejných pilin nebo dřevěného odpadu".

Jak superkondenzátor „funguje"?
Uvnitř zařízení jsou dvě elektrody, elektrolyt a separátor, který brání přímému elektrickému kontaktu elektrod, ale umožňuje průchod iontů. Při nabíjení se elektrony hromadí na jedné elektrodě a z druhé jsou odváděny. Ionty v elektrolytu se přeskupí tak, aby tento náboj vyrovnaly.

Na rozhraní mezi elektrodou a elektrolytem tak vzniká elektrická dvojvrstva (dvě velmi blízké vrstvy opačných nábojů). Náboj se ukládá převážně na povrchu elektrod, aniž by se celý materiál musel výrazně chemicky přeměnit. Proto může nabíjení a vybíjení probíhat velmi rychle a opakovaně po desítky až stovky tisíc cyklů.

Pseudokapacita – když nestačí jen povrch
Zatímco v elektrické dvojvrstvě se ionty pouze přitahují k povrchu elektrody, u některých materiálů se navíc uplatňují rychlé a vratné oxidačně-redukční děje. Tento mechanismus se nazývá *pseudokapacita*. Může probíhat na povrchu materiálu nebo při rychlém vkládání iontů mezi jeho vrstvy – *interkalaci*. Pseudokapacita může zvýšit množství uložené energie, avšak někdy zhoršuje stabilitu nebo rychlost zařízení.

Z čeho se vyrábějí elektrody?
Neexistuje jeden univerzálně nejlepší elektrodový materiál. Vždy je nutné hledat rovnováhu mezi kapacitou, výkonem, rychlostí, stabilitou, bezpečností, cenou a dopadem výroby na životní prostředí. Vědci sledují např. i to, kolik kapacity „zůstane“ po tisících nabíjecích a vybíjecích cyklů.

Materiál	Vlastnosti
Uhlíkové materiály	Aktivní uhlíky, grafen a uhlíkové nanotrubice mají velký povrch, dobrou vodivost a vysokou stabilitu. Důležitá není jen plocha, ale také správná kombinace mikro- a mezopórů, aby se ionty mohly rychle pohybovat.
Oxidy kovů	Oxid manganičitý (MnO_2) nebo oxid rutheničitý (RuO_2) ukládají náboj pseudokapacitně a nabízejí vysokou kapacitu. RuO_2 je ale velmi drahý a MnO_2 špatně vede proud, proto se používá v tenkých vrstvách nebo v kombinaci s uhlíkem.
Vodivé polymery	Polyanilin, polypyrrol nebo PEDOT vedou elektrický proud a poskytují pseudokapacitní příspěvek. Jejich nevýhodou může být bobtnání, smršťování a postupná ztráta mechanické stability při dlouhém cyklování.
MXeny	Moderní dvourozměrné materiály (anorganické nanomateriály tvořené tenkými vrstvami přechodných kovů a karbidů, nitridů nebo karbonitridů) s vrstevnatou strukturou a vysokou vodivostí. Ionty mohou pronikat mezi jejich vrstvy, a proto nabízejí vysokou objemovou kapacitu. Výzvou je především ochrana před oxidací a opětovným skládáním jednotlivých vrstev na sebe.

Proč hledat nové materiály?
Superkondenzátor má jednu velkou slabinu – do jednoho kilogramu uloží zhruba dvacetkrát méně energie než lithiový akumulátor. Právě to se vědci snaží změnit – a klíč k tomu leží v materiálech. Energie kondenzátoru totiž závisí na ploše elektrod a na napětí, které zařízení „snese“. Uhlík se proto vyrábí tak, aby měl co největší vnitřní povrch – 1 gram aktivního uhlí má plochu kolem 2 000 m^2, tedy asi jako třetina fotbalového hřiště. Nestačí ale plochu jen zvětšovat. Póry musí být velké přesně tak, aby se do nich vešly ionty elektrolytu. Póry, do kterých se iont nevejde, „jsou k ničemu“. Druhou cestou je nový elektrolyt, který vydrží vyšší napětí; energie totiž roste s druhou mocninou napětí, takže i malé zvýšení se výrazně projeví. A do třetice – dnešní superkondenzátory se obejdou bez lithia a kobaltu. Uhlíkové elektrody lze vyrobit i z kokosových skořápek nebo dřevěného odpadu. Lepší materiály tak neznamenají jen výkonnější zařízení, ale jsou i levnější a šetrnější k životnímu prostředí.

Co přinese budoucnost?
Výzkumníci hledají materiály, které spojí rychlost superkondenzátoru s vyšším množstvím uložené energie. Perspektivní jsou hybridní elektrody kombinující uhlík, vodivé polymery nebo MXeny. Současně se vyvíjejí gelové elektrolyty, 3D tištěné struktury, pružná zařízení, a dokonce samoopravitelné superkondenzátory pro nositelnou elektroniku.

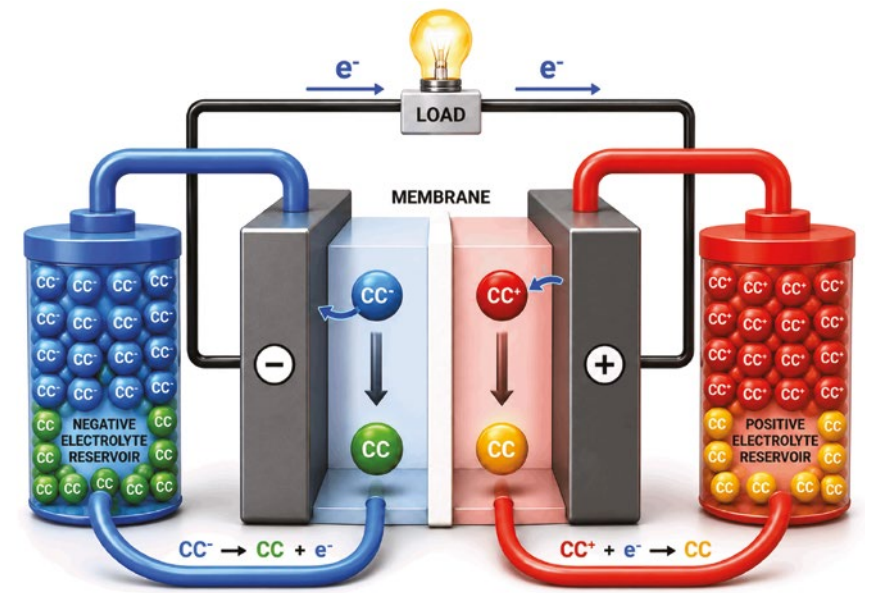
Flexibilní molekuly

Magdaléna Hromadová, Heyrovského ústav AV ČR, v. v. i., Dolejškova 2155/3, 182 00 Praha 8

Nové typy organických molekul, které dokážou přijímat a odevzdávat více elektronů v jednom kroku, se díky výzkumu v Heyrovského ústavu ukázaly jako perspektivní pro efektivní skladování energie, např. v redoxních průtokových bateriích. Ty ukládají a uvolňují energii redukcí a oxidací kapalných elektrolytů. Zkoumané molekuly by mohly najít využití jako pokročilé nosiče negativního náboje. Neméně zajímavé je jejich možné využití jako přepínačů v tzv. molekulární elektronice, která nabízí možnost dosáhnout vyššího počtu operací oproti polovodičovým technologiím využitím molekul jako elektronických součástek.

Nejdříve je třeba se seznámit

Než bude možné některou z námi studovaných molekul využít v bateriích nebo v molekulární elektronice, je zapotřebí detailně poznat vztah mezi její strukturou a způsobem přenosu elektronu, tedy redoxním mechanismem přenosu náboje. Přenos více než jednoho elektronu na molekulu totiž stále není dostatečně objasněn, a to i když probíhá za stejných energetických podmínek jako u přenosu jednoho elektronu.

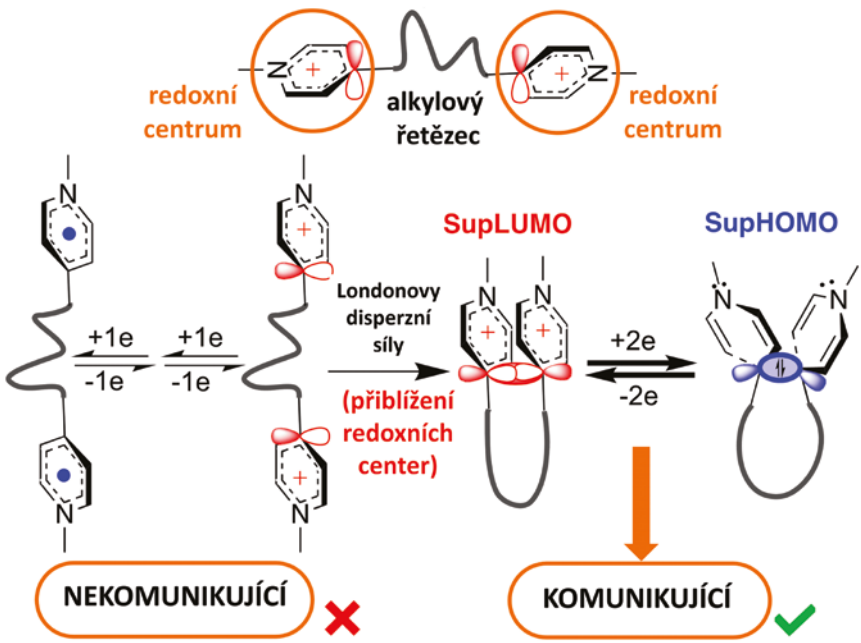


Obr. 8 Schematické zobrazení redoxní průtokové baterie, CC označuje nosič náboje.

Chemici dlouho předpokládali, že dvě části molekuly schopné přijímat a odevzdávat elektrony se budou chovat nezávisle na sobě, pokud je spojuje pružný uhlíkový řetězec tvořený pouze jednoduchými vazbami. Takový řetězec byl tradičně považován za jakýsi molekulární „izolant“, který brání vzájemnému ovlivňování elektronových vlastností obou částí. To je v kontrastu s řetězci, v nichž se střídají jednoduché a násobné vazby a které umožňují elektronům snadněji se rozprostírat podél celé molekuly.

Naše společná práce (více v článku: doi.org/10.1002/anie.202406299) však ukazuje, že tento předpoklad nemusí platit obecně. Na sérii příkladů jsme ukázali, že pružnost uhlíkového řetězce může obě elektronově aktivní části molekuly přiblížit natolik, že mezi nimi dojde k přímému elektronovému ovlivnění. Vzniká tak zvláštní molekulární uspořádání, v němž se elektronové vlastnosti obou částí propojí prostřednictvím společného supramolekulárního vazebného orbitalu (**viz obr. 9**).

Tento pohled zároveň přináší nové vysvětlení jednoho zdánlivého paradoxu. Pokud by obě redoxní centra skutečně reagovala zcela nezávisle, očekávali bychom,



Obr. 9 Schematické zobrazení mechanismu přenosu náboje v molekule sestávající se ze dvou identických redoxních center spojených vzájemně alifatickým (alkylovým) řetězcem. Vlevo je zobrazen mechanismus pomocí radikálů (modré tečky), tj. nespárovaných elektronů na jednotlivých redoxních centrech. Vpravo je mechanismus využívající přímou komunikaci redoxních center a tvorbu supramolekulárního orbitalu (SupLUMO), který je schopen přijmout oba elektrony.

že při postupném přijímání elektronů vzniknou molekuly, v nichž bude jeden elektron lokalizován pouze na jednom z center. Takové meziprodukty s nespárovaným elektronem však u tohoto typu molekul nebyly pozorovány. Naše výsledky naznačují, že důvodem může být právě vzájemné propojení obou redoxních center: elektron se mezi nimi může sdílet, místo aby zůstal „uvězněn“ pouze na jednom z nich. Výsledky tedy ukazují, že samotné spojení dvou stejných redoxních center nasyceným, byť pružným uhlíkovým řetězcem automaticky neznamená, že se budou elektrochemicky chovat zcela nezávisle. Tato nová perspektiva může být důležitá při navrhování molekul pro uchovávání energie nebo pro molekulární elektroniku a obecně také při vývoji nových materiálů s širokým aplikačním potenciálem.

Ukazuje se, že práce s elektrony na úrovni jednotlivých molekul může vést nejen k novým způsobům ukládání energie, ale i k úplně jinému typu technologií. Pokud dokážeme velmi citlivě sledovat, co se děje na povrchu materiálu, můžeme z něj udělat mimořádně přesný senzor. Právě na tomto principu stojí optické biosenzory.

Nanostrukturováním k biosenzorům budoucnosti

Markéta Bocková, Jiří Homola a Jiří Slabý, Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v. v. i., Chaberská 1014/57, 182 00 Praha 8 – Kobylisy

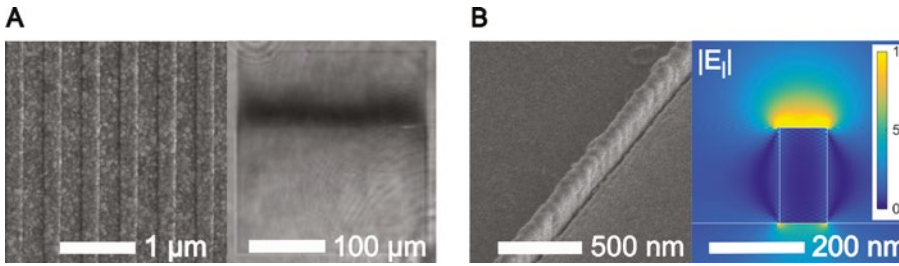
Plazmonické efekty

Plazmonické efekty vznikají na povrchu kovů a kovových nanostruktur. Vedou k barevným jevům, se kterými se můžeme setkat i v běžném životě. Právě plazmonické jevy stojí za neobvyklou sytostí barev některých skleněných vitráží ve středověkých katedrálách nebo za charakteristickým červeným proužkem na rychlotestech, například těhotenských, které můžeme koupit v lékárně.

Podstatou těchto jevů je interakce světla, tedy elektromagnetického záření, s elektrony v kovu. Když světlo dopadne na vhodně navrženou kovovou nanostrukturu, může rozkmitat elektrony na jejím povrchu. Tím vzniká takzvaná plazmonická rezonance. Elektromagnetické pole světla je přitom soustředěno do oblastí mnohem menších, než je vlastní vlnová délka dopadajícího záření. Struktury, ve kterých se takové jevy uplatňují, proto obvykle vykazují charakteristické rozměry od stovek nanometrů až po jednotky nanometrů, případně zasahují až na atomární úroveň. Podle počtu rozměrů, jež daná struktura v trojrozměrném prostoru výrazně vyplňuje, rozlišujeme 2D struktury, například velmi tenké vrstvy, 1D struktury, například nanodráty, a 0D struktury, například nanočástice či kvantové tečky.

Optické biosenzory

Jednou z významných aplikací plazmonických struktur a nanostruktur jsou senzory, zejména biosenzory pro detekci chemických a biologických látek. Tyto biosenzory využívají interakce světla s plazmonickými strukturami k „přečtení“ dějů probíhajících v jejich bezprostřední blízkosti. Zachycení sledovaného objektu, například



Obr. 10 Nanostruktury pro optické biosenzory s povrchovými plazmony: **A:** Difrakční mřížky s proměnnou periodou: snímek ze skenovací elektronové mikroskopie (vlevo) a snímek ze zobrazování povrchových plazmonů – tenký černý proužek značí vybuzení povrchových plazmonů na dané periodě (vpravo); **B:** Zlaté nanodráty: snímek ze skenovací elektronové mikroskopie (vlevo) a vypočítaná absolutní hodnota svislé složky elektrického pole $|E_{\|}|$ povrchového plazmonu na takovém nanodrátu pomocí metody vázaných vln (vpravo).

molekuly, na povrchu senzoru se projeví změnou indexu lomu v okolí nanostruktury. To ovlivní charakteristiky plazmonické rezonance, například vlnovou délku, při níž rezonance nastává. Sledováním vývoje rezonanční vlnové délky lze v reálném čase monitorovat dynamiku procesů, které probíhají u povrchu plazmonické nanostruktury.

V týmu Optické biosenzory Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR se v rámci projektu AMULET věnujeme výzkumu a vývoji biosenzorických technologií. Zkoumáme a vytváříme nanostruktury, které poskytují optimální rozložení elektromagnetického pole a umožňují co nejcitlivější „čtení“ sledovaných procesů. Protože plazmonické efekty jsou velmi citlivé na materiálové vlastnosti nanostruktur, pozornost věnujeme i volbě materiálů, případně jejich kombinací v multimateriálových nanostrukturách.

Výroba plazmonických struktur

Výroba plazmonických struktur a nanostruktur je mnohakrokový proces, který zahrnuje množství vzájemně provázaných technologických operací. Patří mezi ně příprava povrchu substrátů (chemické i fyzikální čištění), nanášení tenkých vrstev z kapalin (rotační nanášení) či vakuovými procesy (napařování), nanostrukturování (*patterning*), přenos vzoru do materiálu, modifikace materiálových vlastností i následné čisticí a dokončovací procesy (např. *lift-off*). Po dokončení přípravy nanostruktur následuje obvykle podobně náročná příprava funkčních biomolekulárních vrstev, které biosenzorům umožňují rozpoznat a zachytit vybrané biomolekuly, například biomarkery onemocnění.

Klíčovou součástí procesu přípravy nanostruktur je samotné nanostrukturování materiálů. Nejčastěji se k němu využívá optická nebo elektronová litografie, při níž světelný nebo elektronový svazek ozařuje fotorezist či elektronově citlivou vrstvu. V ozářených oblastech dochází ke změně rozpustnosti fotorezistu. U pozitivního fotorezistu se ozářená část stane rozpustnější a následně se odstraní. U negativního fotorezistu se naopak ozářená část stane méně rozpustnou, a proto po vyvolání zůstane na povrchu. Elektronová litografie běžně dosahuje rozlišení přibližně v řádu desítek nanometrů, zatímco konvenční optická litografie typicky pracuje v oblasti

stovek nanometrů (výjimku představují pokročilé litografické kopírovací systémy využívající extrémní ultrafialové záření).

Na našem pracovišti jsme v posledních letech věnovali pozornost různým mikro- a nanostrukturám. V našich biosenzorech jsme například využili speciální difrakční mřížky s proměnnou periodou a tenkou vrstvou zlata, které umožňují mnohobodové měření pro citlivou detekci několika látek současně. Věnovali jsme se též různým typům zlatých nanodrátů, jejichž soubory jsme využili v biosenzorech s optimalizovaným transportem detekovaných látek k povrchu senzoru (**viz obr. 10**).

Nová generace optických senzorů

Plazmonické biosenzory již dnes nabízejí řadu výjimečných vlastností, zejména vysokou citlivost a možnost měření v reálném čase bez nutnosti značení detekovaných molekul. Integrace 2D materiálů, jako jsou grafen nebo MXeny (dvourozměrné materiály tvořené atomově tenkými vrstvami karbidů, nitridů nebo karbonitridů přechodných kovů), přináší do plazmonických struktur nové optické, elektronické a elektrochemické možnosti. Kombinace těchto materiálových platforem otevírá cestu k nové generaci biosenzorů s vyšší citlivostí, lepší selektivitou a širším spektrem aplikací v biomedicíně, environmentální analýze i monitorování průmyslových procesů.

Výzkum nanomateriálů dnes stále častěji směřuje od složitých struktur k ještě hlubší úrovni – k porozumění a využití kvantových jevů v jednotlivých částicích. Některé materiály v tomto měřítku překvapivě mění své chování, a posouvají tak hranice toho, co si pod pojmem „materiál" vůbec představujeme. Kvantové nanodiamanty patří mezi ně – v miniaturním měřítku spojují vlastnosti klasického diamantu s mimořádně citlivou odezvou na své okolí.

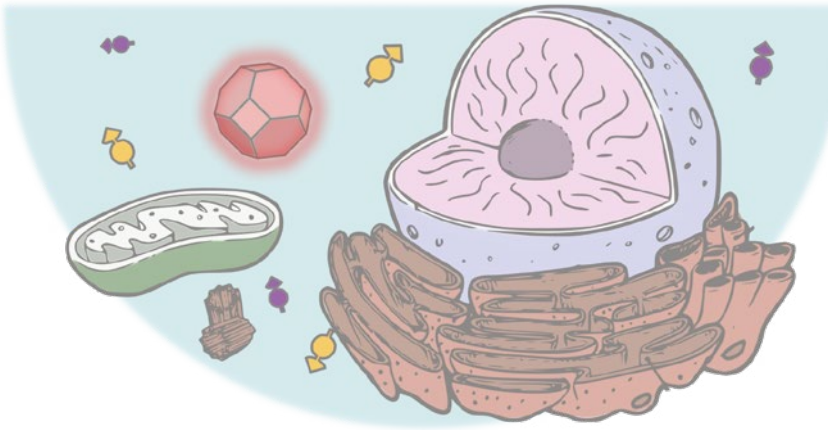
Recept na zázrak: Jak kuchyňská sůl zkrotila kvantové diamanty

Filip Steiner, Ústav organické chemie a biochemie AV ČR, v. v. i., Flemingovo náměstí 542/2, 160 00 Praha 6

Představte si diamant. Pravděpodobně vidíte luxusní šperk, který se třpytí ve výloze klenotnictví, případně extrémně odolný vrták schopný prorazit i tu nejtvrdší skálu. V rukou vědců se však tento symbol věčnosti scvrkl do rozměrů menších, než jsou lidské viry, a proměnil se v jeden z nejslibnějších nástrojů pokročilé medicíny a kvantových technologií. Řeč je o kvantových nanodiamantech: materiálu, který v sobě spojuje mechanickou neústupnost uhlíkové mřížky s fascinujícími zákonitostmi nanosvěta.

Co dělá nanodiamant „kvantovým"?

Čistý diamant tvoří výhradně atomy uhlíku. Pokud však v jeho krystalové mřížce záměrně nahradíme jeden atom uhlíku atomem dusíku a hned vedle něj vytvoříme



Obr. 11 Kvantový nanodiamant snímající magnetické pole uvnitř buňky.

prázdné místo (tzv. *vakanci*), vznikne unikátní defekt známý jako NV centrum (z anglického *nitrogen-vacancy center*). Toto centrum funguje jako kvantový bit (*qubit*) uvězněný v diamantové mřížce, který dokáže nést a předávat informaci. Jeho vlastnosti jsou fascinující. Když na něj posvítíme zeleným laserem, začne svítit červeně. Co je však nejdůležitější: intenzita a frekvence tohoto záření se velmi citlivě mění i při sebemenších změnách v okolí. Kvantové nanodiamanty díky tomu fungují jako neuvěřitelně přesné nanosondy. Dokážou zcela neinvazivně měřit magnetická i elektrická pole nebo teplotu přímo uvnitř živých buněk. Vzhledem k tomu, že jsou pro živé organismy netoxické, představují ideální adepty pro revoluci v lékařské diagnostice.

Až dosud měla masová produkce kvantových nanodiamantů jeden velký háček – extrémně náročnou výrobu. Aby v diamantovém prášku požadovaná NV centra vůbec vznikla, musel se materiál v urychlovači celé týdny ozařovat proudem nabitých částic a následně zahřívat na vysoké teploty. Výsledkem týdnů náročné a energeticky nákladné práce byl často jen necelý gram použitelného materiálu.

Sůl nad… diamant

Zásadní průlom přinesl tým vědců z několika zahraničních pracovišť koordinovaný Ústavem organické chemie a biochemie AV ČR (ÚOCHB). Vědci vyvinuli revoluční metodu PTQ (z anglického *Pressure and Temperature Qubits*), která přípravu kvantových center v nanodiamantech zrychlila více než tisíckrát.

Celé kouzlo přitom trvá pouhých pár minut. Vědci vzali obyčejný diamantový prášek a vystavili ho v lisu extrémnímu tlaku a teplotě, čímž nasimulovali podmínky plastické deformace diamantové mřížky, jaké panují hluboko v zemském plášti. Aby se však mikroskopické diamanty pod obrovským tlakem nespekly do jednoho velkého kusu, přidali vědci jednoduchou ingredienci: obyčejnou kuchyňskou sůl (chlorid sodný). Sůl se při vysokých teplotách roztaví, jednotlivé nanodiamanty

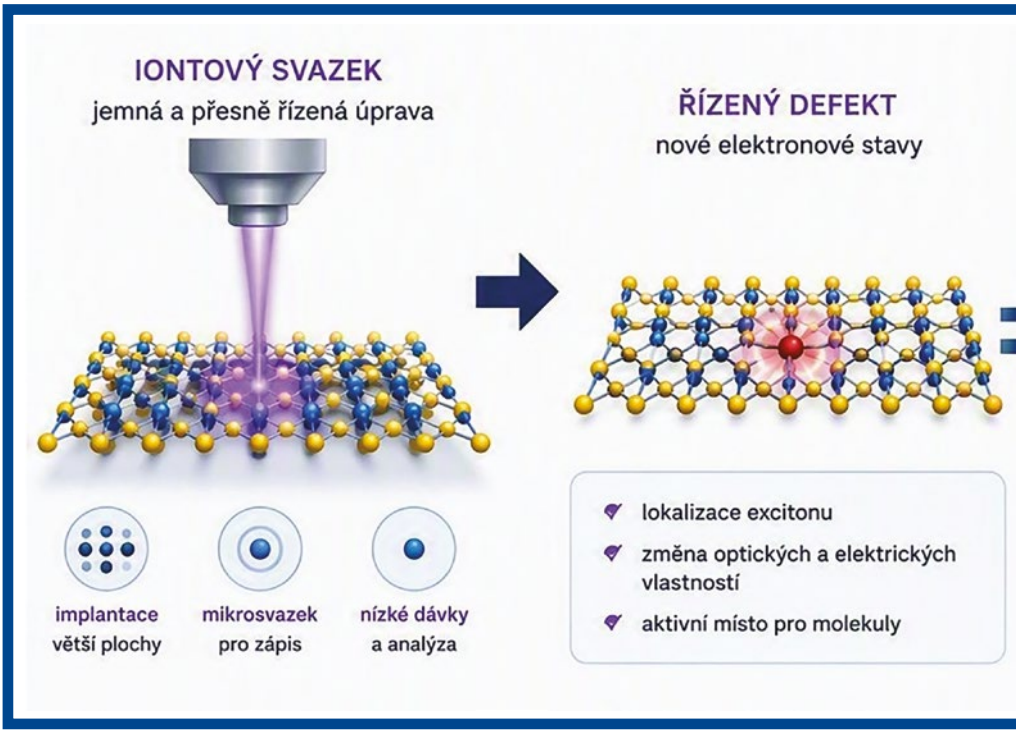
obalí a vytvoří pro ně bezpečné ochranné prostředí. Po skončení procesu stačí celou směs jednoduše propláchnout čistou vodou. Sůl se rozpustí a vědcům v rukou zůstane čistý a zářící kvantový materiál. Množství, jehož výroba by dříve zabrala téměř čtyřicet let, tak dnes dokážou připravit za jediný týden.

Objev vědců z ÚOCHB AV ČR posouvá nanodiamanty z kategorie laboratorních kuriozit přímo na práh průmyslové i medicínské revoluce. Dostupná a rychlá produkce materiálu s kvalitními kvantovými vlastnostmi otevírá dveře k včasné diagnostice rakoviny, sledování metabolických procesů v buňkách nebo k vývoji ultracitlivých senzorů. Zdá se, že odpovědi na některé z nejsložitějších otázek moderní vědy a medicíny by mohly být zprostředkovány nepatrnými, pro lidské oko neviditelnými třpytivými částečkami.

Když se vada stane výhodou

Anna Macková, Ústav jaderné fyziky AV ČR, v. v. i., Husinec-Řež 292, 250 68

Když si koupíme nový telefon nebo počítač, očekáváme, že materiály uvnitř budou co nejdokonalejší. Vada v elektronické součástce obvykle znamená problém. Ve světě atomů však může platit pravý opak: chybějící atom, atom jiného prvku nebo drobné

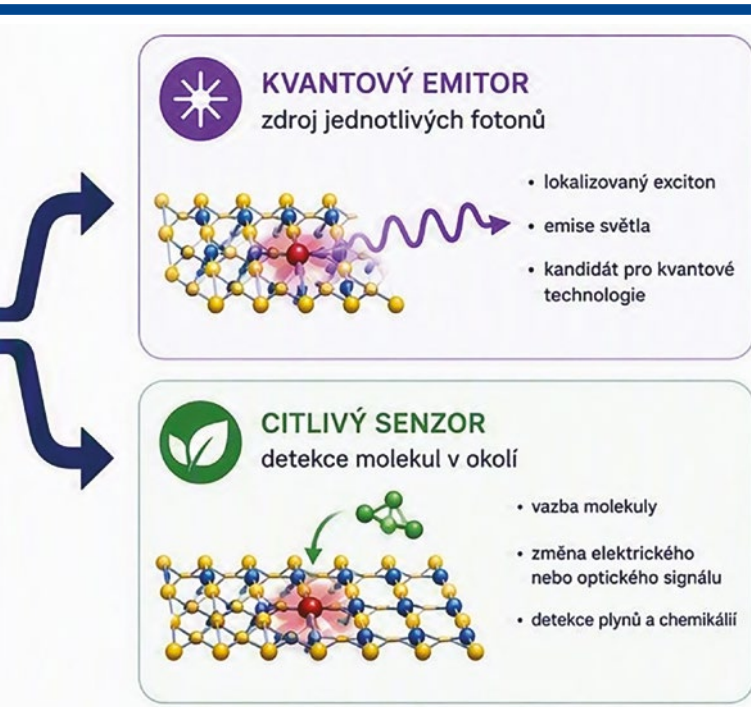


napětí v krystalové mřížce mohou vytvořit místo s úplně novými optickými a elektronickými vlastnostmi.

Pokud takovou poruchu dokážeme připravit záměrně a na správném místě, může se stát nejdůležitější funkční částí materiálu. Může například zachytit energii světla, vyzářit foton nebo citlivě reagovat na molekulu z okolního prostředí. Právě řízená příprava takových „užitečných vad" je jednou z cest k novým kvantovým technologiím a mimořádně citlivým senzorům. Lze využít energetické iontové svazky k vytváření kvantově aktivních defektů, lokalizovaných excitonových stavů a kandidátů na kvantové emitory ve dvojrozměrných materiálech.

Jak může porucha vytvářet kvantové světlo

Konkrétní příklad nabízí monovrstva MoS_2 ozářená zaostřeným svazkem heliových iontů. Dopadající iont může z krystalové mřížky vyrazit atom síry a vytvořit díru, tzv. vakanci. V okolí vzniklé poruchy se změní elektronová struktura materiálu a defekt může zachytit exciton, tedy vázanou dvojici elektronu a díry. Když exciton zanikne, může se jeho energie uvolnit jako foton. V materiálu tak vzniká velmi malé, přesně lokalizované světélkující centrum. Místně selektivní příprava fotonových emitorů v monovrstvě MoS_2 pomocí heliových iontů již byla experimentálně prokázána. Ještě více možností nabízí heterostruktura MoS_2/ZnO, ve které se setkávají dva různé polovodiče. Iontové ozáření zde může vytvářet vakance



Obr. 12
Schéma řízené tvorby defektů v 2D materiálech pomocí iontového svazku. Vhodně vytvořený defekt může fungovat jako zdroj jednotlivých fotonů nebo jako aktivní místo citlivého senzoru.

a další defekty nejen v MoS_2 a ZnO, ale zejména v jejich společném rozhraní. Tím se mění energetické podmínky pro přenos elektronů a děr mezi oběma materiály. Elektron, který před ozářením rychle přecházel přes rozhraní, může být po vytvoření defektu dočasně zachycen. V důsledku toho se změní rychlost rekombinace náboje a také intenzita, barva nebo doba dosvitu emitovaného světla. Změna se může projevit rovněž v elektrické vodivosti nebo optické odezvě heterostruktury. Účinek ale závisí na množství a druhu vytvořených defektů. Malý počet vhodně umístěných poruch může vytvořit užitečná optická centra nebo zlepšit požadovaný přenos náboje. Příliš mnoho defektů naopak poskytne cestu pro nezářivý zánik excitonů a může optickou odezvu zeslabit. Iontový svazek proto nepůsobí jako jednoduchý „zesilovač světla“, ale jako nástroj pro přesné ladění vrstev a rozhraní a jejich funkčních vlastností.

Cílem není materiál poškodit

Rozdíl mezi funkční úpravou a zničením materiálu může být velmi malý. Příliš vysoká dávka iontů může narušit souvislost atomární vrstvy, vytvořit příliš mnoho defektů nebo způsobit její amorfizaci. Strategie ozařování musí být zvolena s ohledem na teoretické simulace průniku iontů a hustoty vznikajících defektů, dále s ohledem na vlastnosti materiálu a známým fyzikálním vlastnostem. Proto se u senzorických a kvantových aplikací počítá spíše s velmi nízkými dávkami iontů ozařujícími jednotku plochy. Úspěch tedy nezávisí jen na vytvoření vady, resp. defektu. Je nutné zjistit, jaký defekt skutečně vznikl, kde se v materiálu nachází, zda je stabilní, jak ovlivňuje světlo a elektrický náboj, zda lze stejný výsledek opakovaně připravit a zda nebyla současně znehodnocena okolní struktura.

Užitečná chyba na správném místě

Budoucnost kvantových technologií nemusí začínat celým kvantovým počítačem. Může začít jedinou přesně vytvořenou poruchou v atomárně tenké vrstvě. Stejně tak jak je důležité vytvoření této chyby, je důležitá i následná analýza, která musí potvrdit, co v materiálu skutečně vzniklo. Teprve spojení urychlovačové fyziky, materiálového výzkumu, optické spektroskopie, elektroniky a teoretických výpočtů ukáže, které poruchy jsou opravdu užitečné. Některé se mohou stát základem kvantových emitorů, jiné aktivními místy citlivých senzorů. V obou případech platí, že to, co bychom v běžném materiálu označili za vadu, se může v přesně navrženém 2D materiálu stát jeho nejcennější vlastností.

Výzkum v oblasti pokročilých materiálů dnes neznamená jen vývoj nových látek a technologií, ale také hledání odpovědí na otázky, jak se tyto objevy dostávají do praxe a jak je společnost dokáže využívat. S tím, jak se věda stává stále komplexnější a provázanější, roste i potřeba rozumět jejím širším dopadům – od způsobu sdílení výsledků až po organizaci samotné výzkumné práce. Právě proto projekt AMULET propojuje materiálový výzkum se sociálněvědní perspektivou, která sleduje, jak se principy otevřené vědy promítají do každodenního fungování výzkumných týmů.

Otevřená věda v každodenní praxi

Michal Trčka, Heyrovského ústav AV ČR, v. v. i., Dolejškova 2155/3, 182 00 Praha 8

Komunikace výsledků výzkumu je nutnou součástí všech vědních oblastí – a to jak směrem k široké veřejnosti, tak mezi samotnými vědci. Principy otevřené vědy (*Open Science*) směřují k maximální otevřenosti, k transparentnějšímu, inkluzivnějšímu a demokratičtějšímu fungování vědy a zpřístupňování vědeckých publikací, dat i dalších výsledků výzkumu odborné i širší veřejnosti. Ačkoli je projekt AMULET zaměřen na výzkum pokročilých víceškálových materiálů, zahrnuje také sociálněvědní část, která zkoumá společenské souvislosti vyvíjených technologií a pomáhá přispět k jejich rozvoji právě v souladu s principy otevřené vědy. Přestože je tato snaha podporována evropskými institucemi i českými poskytovateli financování, její zavádění do každodenní praxe přináší řadu výzev.

V období od prosince 2024 do června 2025 bylo v projektu realizováno více než třicet hloubkových rozhovorů s výzkumníky, datovými specialisty a dalšími členy konsorcia AMULET. Na výzkum následně navázalo veřejné slyšení „Jak dát smysl otevřené vědě?“ a on-line diskusní platforma *eDemOS* inspirovaná nástroji participativní demokracie. Záměrem bylo porozumět tomu, jak se požadavky otevřené vědy promítají do každodenní práce výzkumníků a vytvořit prostor pro širší diskusi o jejím fungování v praxi.

Sdílení dat

Jedním z hlavních témat byla správa a sdílení výzkumných dat. Rozhovory například ukázaly, že zatímco některé disciplíny vnímají otevřená data jako přirozenou součást výzkumu, v jiných zaznívaly pochybnosti, zda samotné zveřejnění dat umožňuje experiment reprodukovat. Výzkumníci upozorňovali, že výsledky závisejí také na zkušenostech laboratorního personálu, specifických podmínkách experimentu či unikátním vybavení. Zároveň se ukazuje, že role správců dat (data stewardů) je časově velmi náročná. Tuto činnost většinou vykonávají vedle vlastní vědecké práce a současně musí zvládat i publikační povinnosti.

Ekonomické aspekty

Přestože většina participantů podporovala volný přístup k výsledkům výzkumu, kriticky se vyjadřovala k rostoucím publikačním poplatkům, které představují významnou finanční zátěž pro výzkumné instituce i grantové rozpočty. Respondenti se shodovali, že snížení ekonomické zátěže spojené s transparentním publikováním by umožnilo směřovat více prostředků přímo do výzkumu. Výsledky on-line diskuse uspořádané během meziprojektového setkání a organizované v projektu AMULET byly následně předány k projednání Ministerstvu školství, mládeže a tělovýchovy a Radě pro výzkum, vývoj a inovace. Celý proces ukazuje, jak může sociálněvědní výzkum nejen analyzovat fungování vědy, ale také vytvářet prostor pro dialog a přispívat k formulaci doporučení pro vědní politiku.

Markéta Bocková, Roman Elashnikov, Jiří Červenka, Jiří Homola, Magdaléna Hromadová, Jaroslava Jarolímková, Jana Kalbáčová Vejpravová, Zdeňka Kolská,

Oleksiy Lyutakov, Anna Macková, Eliška Mikysková, Viktorie Neubertová, Jiří Slabý, Filip Steiner, Václav Švorčík, Michal Trčka

Autorka úvodu a textů v modrých boxech: Zuzana Sochorová Vokáčová



















Výsledky zdejší práce mohou přispívat k vývoji účinnějších katalyzátorů, nových materiálů pro ukládání a přeměnu energie, citlivějších analytických metod, pokročilých nanomateriálů nebo technologií využitelných v medicíně a při ochraně životního prostředí. Základní výzkum a praktické využití zde přitom nejsou oddělené světy – právě hlubší porozumění tomu, jak se hmota chová na úrovni atomů a molekul, často otevírá cestu k technologiím, které by jinak nebylo možné navrhnout.

Od 1. července 2026 nese instituce název Heyrovského ústav AV ČR. Změna názvu odráží skutečnost, že dnešní výzkum ústavu již výrazně přesahuje tradiční hranice fyzikální chemie. Zároveň však zůstává pevně spojen s odkazem Jaroslava Heyrovského: s odvahou hledat nové cesty, propojovat základní poznání s praktickými aplikacemi a posouvat hranice toho, co lze o světě kolem nás zjistit.

Facebook:	facebook.com/heu.avcr
Instagram:	heyrovskeho_ustav_av
LinkedIn:	www.linkedin.com/company/heyrovskeho-ustav
YouTube:	https://www.youtube.com/@heyrovskeho_ustav
BlueSky:	@heyrovskeho-ustav.bsky.social
Web:	https://www.heu.cas.cz/

Jedním z významných projektů řešených na HEÚ je projekt pojmenovaný **AMULET** (Pokročilé víceškálové materiály pro nosné klíčové technologie, v angličtině **A**dvanced **MU**ltisca**L**e Materials for Key **E**nabling **T**echnologies), který je zaměřen na pokročilé inženýrství víceškálových materiálů od subnanometrového designu až po integraci do funkčních architektur pro využití v četných aplikacích v elektrotechnice, lékařství i environmentálních technologiích, a to včetně posouzení socioekonomických dopadů. Jedná se o klíčové základní technologie, které mají zásadní význam pro konkurenceschopnost EU. Mezioborový excelentní výzkum je realizován špičkovým týmem těžícím z rozsáhlých mezinárodních synergií.

Tato brožura si klade za cíl představit čtenářům alespoň malou část širokého spektra výzkumných aktivit realizovaných v rámci projektu AMULET. Prostřednictvím vybraných příkladů nabízí pohled na některé z mnoha vědeckých směrů, inovativních přístupů a výsledků, které vznikají díky spolupráci výzkumných týmů napříč obory a přispívají k rozvoji technologií budoucnosti.

Web: https://www.projekt-amulet.cz/

Předkládaná brožura přináší krátký přehled vybraných výzkumných cílů a výsledků dosažených v rámci projektu **AMULET** (Pokročilé víceškálové materiály pro nosné klíčové technologie), který je koordinován Heyrovského ústavem AV ČR, v. v. i. (dříve Ústavem fyzikální chemie Jaroslava Heyrovského AV ČR, v. v. i.). Prostřednictvím několika článků představuje aktivity a dosažené výsledky jednotlivých částí projektového konsorcia. Další informace o projektu naleznete na webových stránkách projektu www.projekt-amulet.cz.

*Autoři děkují za podporu poskytnutou v rámci projektu **AMULET** (Pokročilé víceškálové materiály pro nosné klíčové technologie), reg. č. CZ.02.01.01/00/22_008/0004558, podpořeného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR a spolufinancovaného Evropskou unií.*

V EDICI VĚDA KOLEM NÁS PŘIPRAVUJEME:
Reysa Alenzuela: **Knihovna Orientálního ústavu (překlad do ČJ)**
Martina Chromá: **Slovníček staroslověnštiny**
Martin Klement: **Masarykův státní stadion**

DOSUD VYŠLO:
Pavlína Kellarová a kol.: **Od knih k datům, od dat k příběhům**
Eliška Koňaříková: **Ph.D. studium: Vaše cesta k vědecké kariéře**

Spolufinancováno Evropskou unií

Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy

Akademie věd České republiky

STRATEGIE AV21

Edice Věda kolem nás | Výzvy a otázky
Nanotechnologie budoucnosti | *Markéta Bocková, Roman Elashnikov, Jiří Červenka, Jiří Homola, Magdaléna Hromadová, Jaroslava Jarolímková, Jana Kalbáčová Vejpravová, Zdeňka Kolská, Oleksiy Lyutakov, Anna Macková, Eliška Mikysková, Viktorie Neubertová, Jiří Slabý, Filip Steiner, Václav Švorčík, Michal Trčka*

Vydalo Středisko společných činností AV ČR, v. v. i., Nakladatelství Academia. Grafická úprava dle osnovy Jakuba Krče a sazba Serifa. Odpovědný redaktor Vojtěch Němec. Vydání 1., 2026. Ediční číslo 13300. Tisk SERIFA®, s. r. o., Jinonická 80, 158 00 Praha 5.

ISSN 2464-6245
Evidováno MK ČR pod e. č. E 22344

Další svazky získáte na:
www.vedakolemnas.cz | www.academia.cz