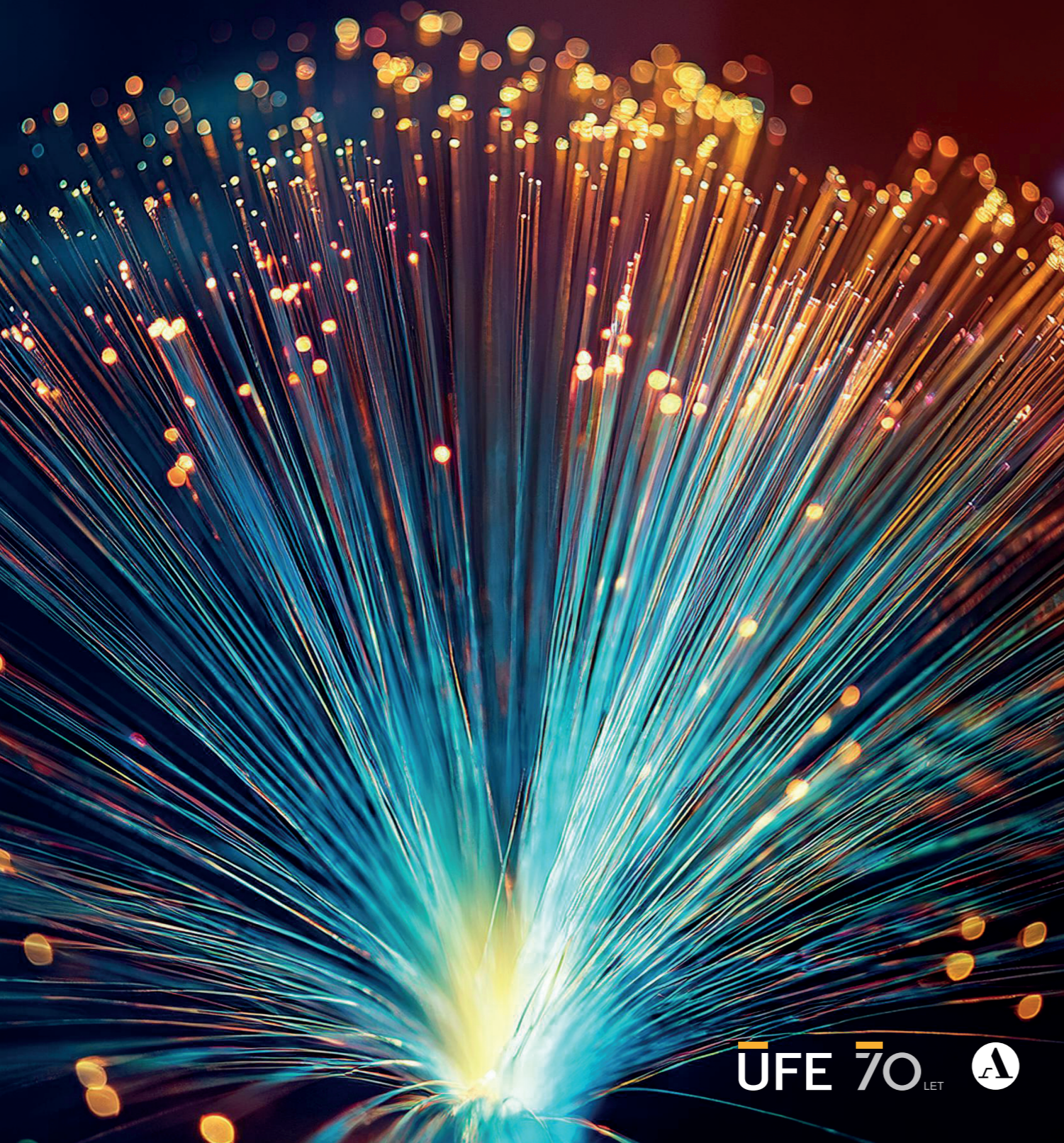
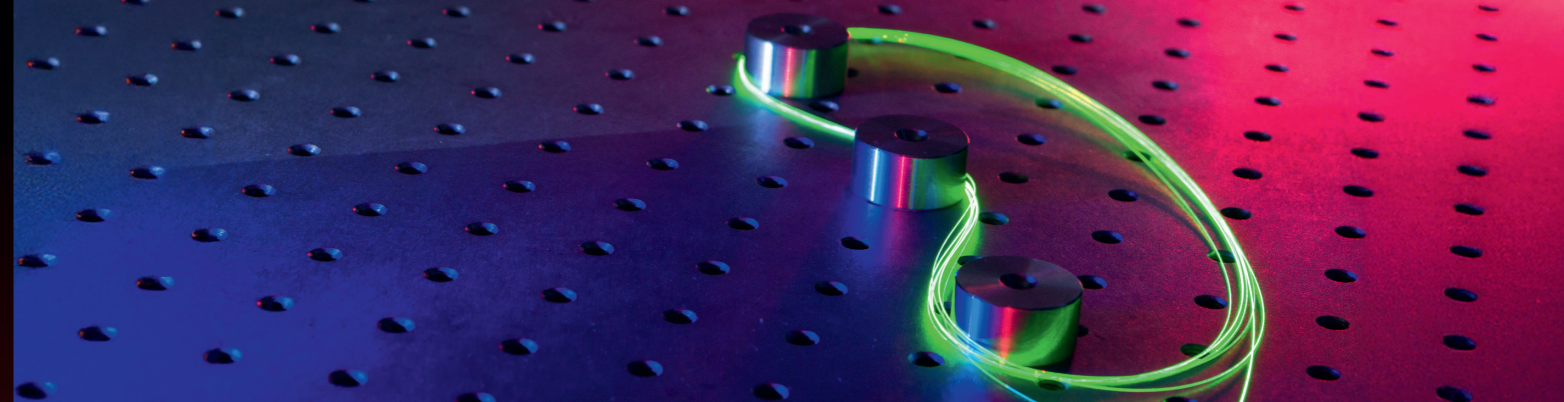


70 LET

ÚSTAVU FOTONIKY A ELEKTRONIKY

Akademie věd ČR

Speciální vydání časopisu Vesmír č. 12/2024



“

Přispíváme k technologickému rozvoji českého průmyslu a poznání v oborech fotoniky a elektroniky ... jinými slovy aplikovaný a základní výzkum ve výše uvedených dvou technických vědách, to je hlavní poslání Ústavu fotoniky a elektroniky Akademie věd ČR, který na přelomu roku oslaví 70 let. V tomto čísle Vesmíru vám představíme 6 příkladů našeho současného výzkumu.



PAVEL PETERKA, ředitel ÚFE AV ČR



700 J. HOMOLA Optické biosenzory ve výzkumu i medicíně

Vývoj optických biosenzorů není možný bez spolupráce vědeckých oborů od fotoniky po biologii. Podrobněji o nich mluví Jiří Homola, který tento program vede...



702 M. PILIARIK Mikroskopie, kde byste ji nečekali

Vidět na vlastní oči je od nepaměti jedním z klíčů k pochopení záhad přírody a světa kolem nás. Uvěřit, že lidské tělo se skládá z jednotlivých buněk ne nepodobných těm, které tvoří třeba žížalu...



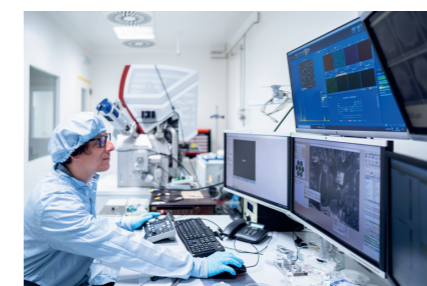
704 M. CIFRA Pozoruhodná elektrina a světlo organismů

Na odlehle planetě, vzdálené miliony světelných let od Země, leží mezi troskami a popelem postava, jejíž život visí na vlásku...



706 P. HONZÁTKO, I. KAŠÍK Jasnější nad tisíc sluncí

Řeč bude o jasů až o mnoho řádů vyšším, než je jas na povrchu Slunce, jenže jen na ploše několika desítek mikrometrů čtverečních uvnitř jádra optického vlákna...



708 J. GRYM Polovodičové nanostruktury pro zelené technologie

S polovodičovými materiály a strukturami se dnes setkáváme ve všech oblastech života...



710 A. KUNA Kde se bere přesný čas?

ÚFE provozuje a rozvíjí mj. také specializovanou laboratoř státního etalonu času a frekvence...



PAVEL PETERKA

Přispíváme k rozvoji českého průmyslu a poznání

Ústav fotoniky a elektroniky Akademie věd ČR (ÚFE AV ČR) si na přelomu roku připomíná 70 let od svého založení. Jeho hlavním posláním je základní a aplikovaný výzkum v oborech, které má dnes ve svém názvu.

Prezidium Československé akademie věd od r. 1953 připravovalo zřízení Ústavu teoretické radiotechniky, který zahájil činnost 1. 1. 1955. Jeho první ředitel Sergej Djadkov měl dobrodružný osud. Jako bývalý bělogvardějský námořník přišel do Československa po ruské občanské válce. Vystudoval elektrotechniku na ČVUT v Praze, vedl vývoj radiopřijímačů v podniku Telefunken. Když po válce založil nový ústav, svou houževnatostí se zasloužil o brzké vybudování jeho sídla v Kobylisích. Ústav, tehdy už pod názvem Ústav radiotechniky a elektroniky (ÚRE), tedy měl jako jeden z prvních nových ústavů i novou vlastní budovu a ve svém areálu hostil i týmy z Ústavu fyziky plazmatu a Fyzikálního ústavu ČSAV. Přejmenování na Ústav fotoniky a elektroniky v r. 2007 akcentovalo význam fotoniky a optoelektroniky ve výzkumném zaměření naší instituce.

Historie ústavu je bohatá. Připomeňme první laserovou operaci oční sítnice v Československu nebo celosvětově rozšířenou metodu distribuce přesného času pomocí televizního signálu. Přispěli jsme také k pochopení, rozvoji a využití analytické metody SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy), k vybudování

1) Peterka P. a Zavřil J.: 60 let světla v Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR. Jemná mechanika a optika 60, 200–203, 2015

technologické základny průmyslu pro optické vláknové komunikace a k mnohému dalšímu.¹

Nabízíme vám malou ochutnávku toho, na čem v současnosti šest výzkumných týmů ústavu pracuje. Práci týmu *optických biosenzorů* představí v rozhovoru **Jiří Homola**. Tým je součástí distribuovaného Národního ústavu pro výzkum rakoviny (NÚVR) a jsme rádi, že takto můžeme přispívat k rozvoji našeho zdravotnictví. **Michal Cífra** v odlehčené formě sci-fi příběhu představí výzkum týmu *bioelektrodynamiky*, který provádí v rámci projektu EXPRO Grantové agentury ČR. Trojici biofotonických týmů uzavírá **Marek Piliarik**, který s týmem *nanooptiky* posouvá hranici poznání optické mikroskopie a jejího prostorového rozlišení. Tým úspěšně patentoval technologie pro modulaci optické vlnoplochy, které nacházejí praktické využití nejen ve studiu mikrosvětla, ale jsou slibné i pro vesmírné teleskopy.

Pavel Honzátko a **Ivan Kašík** představí dva příklady výzkumu týmu *vláknových laserů a nelineární optiky*: aktivní vlákna pro vláknové lasery a optická vlákna se vzduchovým jádrem. Více než tři desetiletí rozvíjíme velkou infrastrukturu pro výzkum vláknových laserů a technologie optických vláken. Špičkovou úroveň našeho výzkumu potvrzuje i naše práce v evropských projektech zaměřených na vývoj laserů s vysokým výkonem pro zbraně se směřovanou

energií. Tým také vede konsorcium velkého projektu *LasApp*, spolufinancovaného EU, jehož cílem je rozvoj centra vědecké excelence a kompetence v laserové technice se zaměřením na vláknové a tenkodiskové lasery a jejich potenciální aplikace.

Jan Grym z týmu *přípravy a charakterizace nanomateriálů* vysvětluje projekt vývoje senzorů pro detekci vodíku a oxidu uhelnatého v energetice a automobilovém průmyslu, který financuje Technologická agentura ČR. Tým **Alexandra Kuby** je odpovědný za správu infrastruktury *Státního etalonu času a frekvence*, přidružené laboratoře Českého metrologického institutu. V komiksovém příběhu představí začátek celosvětového úspěchu přijímače přesného času GTR a jeho roli při objasnění záhady neutrin „rychlejších než světlo“ při experimentu v CERN.

Věřím, že vás výsledky našeho výzkumu zaujmou a že využijete i příležitosti setkat se s vědci z ÚFE osobně, třeba na dnech otevřených dveří v rámci listopadového Týdne Akademie věd nebo na Veletrhu vědy začátkem června.

Doc. Ing. Pavel Peterka, Ph.D., (*1970) studoval na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské (Ing., 1993) a Fakultě elektrotechnické (Ph.D., 2000) ČVUT v Praze. Na postdoktoráckém pobytu na Univerzitě v Nice ve Francii začal s vývojem optických vláken s příměsí *thulia* pro lasery a zesilovače, v ÚFE pracuje od r. 1993, ředitelem je od r. 2021. Vyučuje vláknové lasery na FJFI ČVUT, kde v roce 2020 obhájil habilitační práci.

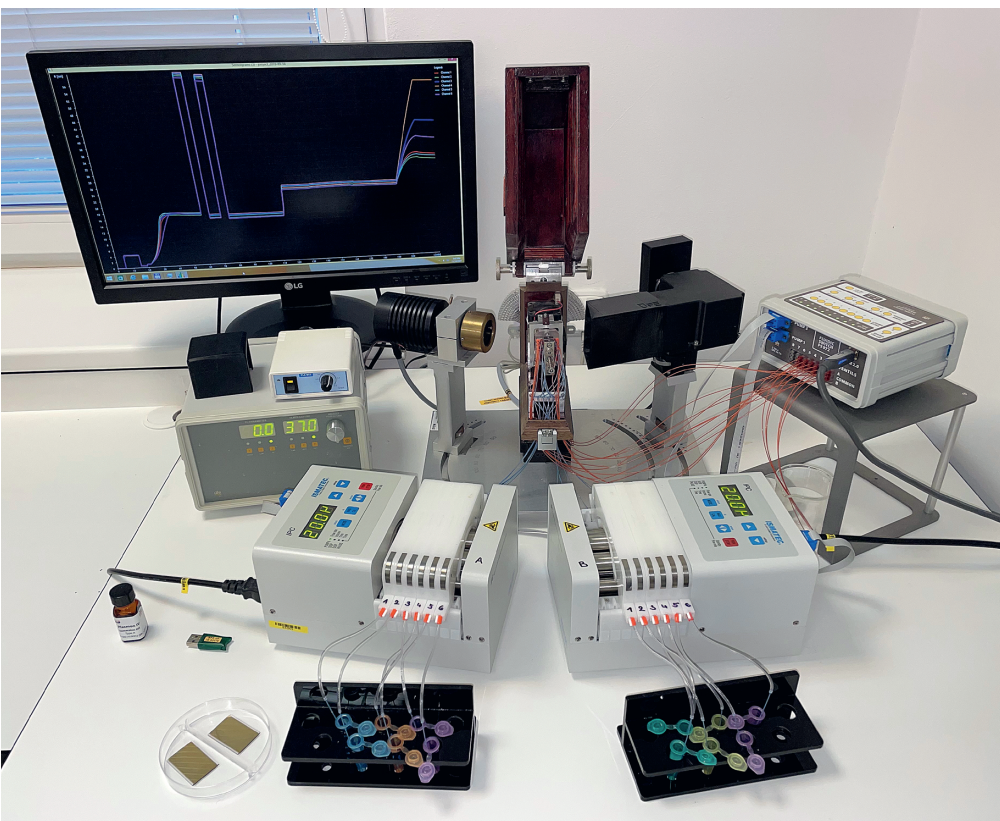


Optické biosenzory ve výzkumu i medicíně

Vývoj optických biosenzorů není možný bez spolupráce vědeckých oborů od fotoniky po biologii. Podrobněji o nich mluví Jiří Homola, který tento program vede.

„Optické biosenzory s povrchovými plazmony“ – to zní pro laika téměř magicky. Jak si je máme představit? – Tyto senzory, detekující biomolekuly (ale třeba i větší objekty, jako jsou

buňky), fungují na principu měření změny indexu lomu vyvolaných záchytem biomolekul na povrchu senzoru. Povrchové plazmony jsou, zjednodušeně řečeno, speciální elektromagnetické



Laboratorní optický biosenzor vyvinutý v Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR.

vlny šířící se na rozhraní kovu a dielektrika, které umožňují soustředit elektromagnetické pole do extrémně malých oblastí srovnatelných s velikostí biomolekul. Zachycení „správné“ biomolekuly zajišťují tzv. funkční vrstvy obsahující speciální molekuly (receptory), které jsou schopné detekovanou látku (analyt) rozpoznat a zachytit. A to i v prostředích, která obsahují

minulého století, kdy optické biosenzory získávaly ve světě na popularitě, jsme využili našich zkušeností z optických měřicích metod a vlnodvodné optiky a začali jsme se této problematice věnovat. Do týmu se postupně zapojili odborníci z různých oborů od chemie přes biologii po medicínu, abychom pokryli všechny důležité aspekty výzkumu včetně potenciálních aplika-

Biosenzory lze přizpůsobit pro detekci nejrůznějších biologických látek a zároveň dosáhnout vysoké citlivosti.

velké množství dalších molekul v koncentracích výrazně převyšujících koncentraci analytu. Výhodou těchto biosenzorů je, že nepotřebují, aby detekované molekuly vykazovaly nějaké speciální vlastnosti (např. fluorescenci, specifické absorpční či rozptylové vlastnosti).

Jak jste se k tématu optických biosenzorů dostali? — Počátkem devadesátých let

cí. Tento multidisciplinární přístup, kterého se držíme dodnes, byl svou šíří neobvyklý nejen v České republice, ale i v zahraničí. Významnými partnery v této spolupráci jsou Ústav makromolekulární chemie AV ČR a Ústav hematologie a krevní transfuze.

Jaké výzkumné otázky řešíte? — Zabýváme se výzkumem optických struktur

a nanostruktur, vývojem optických měřicích systémů, mikrofluidních zařízení a funkčních vrstev. Věnujeme se i vývoji konkrétních postupů pro biosenzorickou detekci biologických a chemických látek v extrémně nízkých koncentracích a komplexních biologických vzorcích. Důležitým cílem je optimální rozložení elektromagnetického pole povrchového plazmonu s ohledem na charakteristické rozměry detekovaných biomolekul. Biosenzory lze díky tomu uzpůsobit pro detekci různých biologických látek a dosáhnout vysoké citlivosti. Pro detekci velkých objektů, jako jsou třeba bakterie, jsou to tzv. povrchové plazmony s dalekým dosahem buzené na velmi tenkých kovových vrstvách; naopak pro detekci malých molekul jsou vhodnější lokalizované povrchové plazmony buzené na speciálních kovových nanostrukturách.

Kde se takové biosenzory v praxi uplatňují? — Námí vyvinuté laboratorní systémy využívá řada výzkumných pracovišť v ČR i v zahraničí ve výzkumu biomolekul a jejich interakcí. Uplatnit se mohou i ve výzkumu a diagnostice nemocí, při monitorování životního prostředí nebo kontrole bezpečnosti potravin. Věnovali jsme se i miniaturizaci pro potenciální využití v terénu. Zúročili jsme zkušenosti z výzkumu plazmonických biosenzorů založených na difrakčních strukturách, které vedly ke vzniku nových kompaktních biosenzorů pro detekci patogenů v mléce (projekt EU *Pathomilk*) či biomarkerů rakoviny tlustého střeva (projekt EU *Ultraplacard*).

Zmínil jste výzkum a diagnostiku nemocí. Kterých – kromě už zmíněných karcinomů tlustého střeva? — Například myelodysplastického syndromu (MDS), který často přechází do akutní myeloidní leukémie. Vyvinuli jsme extrémně citlivou analytickou metodu, kterou jsme ve spolupráci s ÚHKT úspěšně použili pro detekci potenciálních biomarkerů MDS. Na rozdíl od standardní metody založené na PCR odhalí přítomnost charakteristických mikroRNA¹ přímo ve vzorku krevní plazmy bez složitých přípravných kroků. Místo standardního přístupu, kdy se zachycená mikroRNA dále zviditelňuje pomocí zlatých nanočástic, jsme použili obrácený postup – tyto nanočástice jsme kontrolovaně uvolňovali. Potlačili jsme tak efekt vnitřních nespecifických interakcí s biomolekulami obsaženými v krevní plazmě a dosáhli jsme stonásobně vyšší citlivosti.

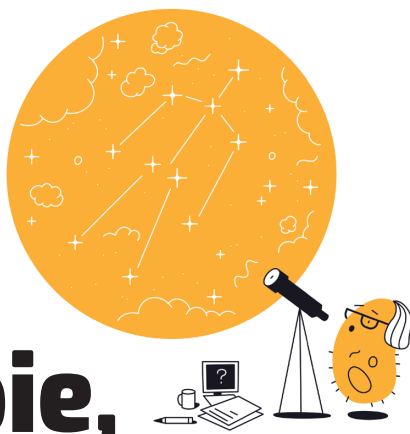
Dále jsme se ve spolupráci s NÚDZ a 2. LF UK věnovali výzkumu Alzheimerovy choroby. Studovali jsme mechanismus jejího vzniku, jako první jsme prokázali interakci dvou specifických proteinů a vyvinuli jsme citlivou metodu pro detekci komplexu tau-amyloid β v mozkomíšním moku, což by mohl být nový biomarker pro včasnou diagnostiku této nemoci.

Na co se chcete zaměřit do budoucna? — Rádi bychom dále rozvíjeli výzkum plazmonických biosenzorů pro studium buněk a buněčných procesů. Velkou perspektivu vidíme také v analýze exozomů a molekul v nich obsažených, které mohou sloužit jako biomarkery neurodegenerativních a nádorových onemocnění.



Prof. Ing. Jiří Homola, CSc., DSc., (*1965) vystudoval Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT; aspiranturu absolvoval na AV ČR, kde následně získal i titul DSc. Je profesorem fyziky na Univerzitě Karlově. Obdržel mimo jiné ocenění Česká hlava, je členem Učené společnosti ČR a Fellow of SPIE.

1) Viz Vesmír 103, 600, 2024/11.



MAREK PILIARIK

Mikroskopie, kde byste ji nečekali

Od titěrných molekul až k záhadám vesmíru

Vidět na vlastní oči je od nepaměti jedním z klíčů k pochopení záhad přírody a světa kolem nás. Uvěřit, že lidské tělo se skládá z jednotlivých buněk ne nepodobných těm, které tvoří třeba žížalu, vyžaduje obrovskou míru představivosti a důvěry. Až do té doby, než je poprvé uvidíte, třeba v mikroskopu. Představa, že každá taková buňka žije vlastní život, pracuje, dělí se a všechno to řídí kaskáda zdánlivě náhodných pohybů jakýchsi molekul, zní naprosto bláznivě až do okamžiku, kdy tyto pohyby můžeme pozorovat. Otázka, jestli i kolem ostatních hvězd obíhají planety, trápila lidstvo od doby, kdy pochopilo, že na jedné takové planetě sedí, až do chvíle, kdy tyto planety dokázalo vidět. Protože vidět znamená uvěřit.

Mikroskopii lze označit za matku přírodních věd, která od sklonku 16. století, kdy otec a syn Janssenovi sestavili první mikroskop, pomáhá rozkrývat nevidané kolem nás. Je až neuvěřitelné, čím si tento výzkumný obor prošel a s jakou vervou drží dynamiku průlomových objevů už přes čtyři sta let. Již v 17. století Anton van Leeuwenhoek pomocí svých mikroskopů pochopil složení krve a jako první pozoroval nejmenší živé organismy, kterým dnes říkáme bakterie, jako rozmazané pohyblivé tečky. Na konci století 19. bylo jasno. Ernst Abbe ukázal, že optická mikroskopie neumožňuje zobrazit menší detaily, než je přibližně polovina vlnové délky světla. V zásadě tím potvrdil, že o moc lepší než v té době 200 let staré pozorování van Leeuwenhoeka to nikdy nebude. Hotovo, jedna uzavřená vědní disciplína, ve které lidstvo poznalo už vše, co poznat šlo. Jenomže vědci milují, když se řekne, že něco nejde. Následovala smršť objevů a Nobelových cen. Namátkou uvedme zobrazování průhledných vzorků, elektronovou mikroskopii, konfokální mikroskopii, tunelovací mikroskop, laserový rastrovací mikroskop, fluorescenční mikroskop, superrozlišovací mikroskopii, fluorescenční proteiny nebo kryogenní elektronovou mikroskopii. Některé z těchto metod nám umožnily pozorovat strukturu hmoty až na úroveň rozložení jednotlivých atomů. Dlužno podotknout,

strukturu obvykle zcela mrtvé hmoty, často zmražené a usazené ve vakuu. Pokud chceme vidět, jak děje fungují a jak do sebe zapadají ozubená kolečka jednotlivých přírodních procesů, obzvláště v živých organismech, omezujeme se obvykle na pozorování nedestruktivní, které zachovává přirozené vlastnosti pozorovaného vzorku. A přesně tuto oblast pozorování v mikroskopii zaujímá mikroskopie optická, tedy využívající běžné, obvykle viditelné světlo, a v té pořadí omezuje Abbeho limit obraz malých bakterií na rozmazané pohyblivé tečky.

Podívejme se podrobněji, co to znamená, když něco, ať už s mikroskopem, nebo bez mikroskopu, vidíme. Když světlo dopadne na vzorek, tedy na to, co chceme pozorovat, mohou se stát tři věci: světlo se může odrazit jiným směrem (říkáme tomu rozptyl), může být pohlceno (neboli absorbováno) a může se vyžářit. A to

je vše. Po stovky let badatelé spoléhali na dva z těchto procesů – absorpci a rozptyl. Tedy buďto pozorovali potměný stín v prošlém světle, nebo jakési kontrastnější prozáření z důvodu rozptýleného světla. Až na konci 20. století se ke slovu dostala fluorescenční mikroskopie, tedy mikroskopie pozorující světlo ze vzorku vyžárené. To není samo sebou. Málomocné vzorky samy od sebe svítí. Svítí některé medúzy, ale většina našich čtenářů zcela jistě nesvítí, nebo svítí jen velmi málo (viz článek Michala Cifry na s. 704). Proto se ke vzorku zpravidla musí přidat malé množství svítících látek, fluoroforů, které vzorek označí, a někdy se dají takové svítící molekuly dokonce vypěstovat přímo ve vzorku. Fluorescenční mikroskopie přinesla zásadní zjednodušení v tom, že se přestáváte dívat na vzorek v jeho nepřehledné složitosti, ale svítící značkou označíte pouze tu část, kterou chcete pozorovat a pochopit. Avšak ani tento mikroskopu neukázal svět v ostřejším detailu. Rozklíčování složité mašinerie molekulárních procesů, která žene naše životy kupředu, tak zůstávalo v nedohlednu.

Jeden z velikanů světové fyziky, Erwin Schrödinger, byl ještě v roce 1952 skálopevně přesvědčen, že nikdy nebudeme experimentovat s objekty, jako je jedna molekula nebo atom, že tento koncept je čistě doménou myšlenkových pokusů. Už jsem zmínil, že vědci milují, když se řekne, že něco nejde. A tak v roce 1989 americký vědec W. E. Moerner, pozdější nositel Nobelovy ceny, publikoval stať o optickém zobrazování jednotlivých fluorescenčních molekul. Když se následně podařilo tyto fluorescenční molekuly rozblikat a navíc zobrazit v živých buňkách, nemluvilo se dalších dvacet let v optické mikroskopii skoro o ničem jiném než o superrozlišovací mikroskopii. Problém optického rozlišení omezeného Abbeho difrakčním limitem tkví v tom, že když vidíte v mikroskopu rozmazaný flek velikosti poloviny vlnové délky, nevíte, na jak velký objekt se díváte ani jaký má tvar. Ale pokud víte, že se díváte na jednu jedinou malou molekulu a můžete ji považovat za jednu jedinou svítící tečku někde uprostřed toho rozmazaného fleku, pak z těchto postupně zobrazených teček můžete sestavit celý obraz vzorku v mnohem vyšším detailu, než přímo v mikroskopu vidíte. Superrozlišovací mikroskopie je jednoduše fenomenální počín, jednoduchý, snadno pochopitelný, zdánlivě popírající základní principy fyziky a ukazující

Marek Piliarik, Ph.D. (*1977) vystudoval Matematicko-fyzikální fakultu Univerzity Karlovy v Praze, pracoval na Washingtonské univerzitě v Seattlu, ETH v Curychu a v Ústavu Maxe Plancka v Erlangenu. V současnosti působí v Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR v Praze, kde vede výzkumný tým nanooptiky, zabývající se ultracitlivou a superrozlišovací mikroskopii.





Studentka Kateřina Jiříková v laboratoři nanooptiky v Ústavu fotoniky a elektroniky. Optický stůl nese experimentální systém ultracitlivého mikroskopu.

úchvatné detaily života kolem nás. Prostě sexy. Pro lidstvo to bylo, jako když dítě poprvé vezme do ruky lupu a zjistí, že mravenec má kusadla.

A tak si vědci postupně zvykli na to, že musejí pečlivě volit, co si ve svém vzorku označují a co budou ve vysokém detailu studovat. Dávají si tím sice na oči klapky, přes které nevidí celou složitost pozorovaných dějů, a to, co neoznačí, v obrázku prostě není, ale bez fluorescenčních značek se superrozlišovací mikroskopie přece dělat nedá, že?

Takže se zdálo, že opět „něco nejde“. Že ne? Když jsem před více než deseti lety poprvé na konferenci ukazoval data zobrazující jednotlivé molekuly proteinů bez použití fluorescenčních nebo jakýchkoli jiných značek, vzbudilo to poprask. V podstatě mi nikdo nevěřil, alespoň z těch, co se odvážili ozvat. Byl to zvláštní pocit zadostiučnění, být jediným člověkem na světě, který věděl, že to jde, a uměl to postavit. Dnes už tomu věří, dokonce si takový přístroj může kdokoli koupit a spočítat si molekuly ve svém vzorku jednu po druhé. Experiment, který mně trval tři roky, může udělat za deset minut.

Zobrazení jediné molekuly biologické hmoty byl nepochybně průlom. Ale na příkladu prvního zobrazení fluorescenční molekuly jsem zmínil, že pro revoluci v optické mikroskopii byly potřeba ještě minimálně další dvě věci – ty molekuly rozblíkat a zobrazit v živé buňce. To první se nám podařilo až po mém návratu do Čech v našem malém výzkumném týmu v Ústavu fotoniky a elektroniky. Všimli jsme si, že je užitečné dívat se na změny pozorovaných molekul, když dělají něco zajímavého, třeba když se na chvíli zastaví, aby provedly svou oblíbenou chemickou reakci. Díváte-li se na tisíce volně proplouvajících molekul, tak tím, jak jsou všechny trochu pohyblem rozmazané,

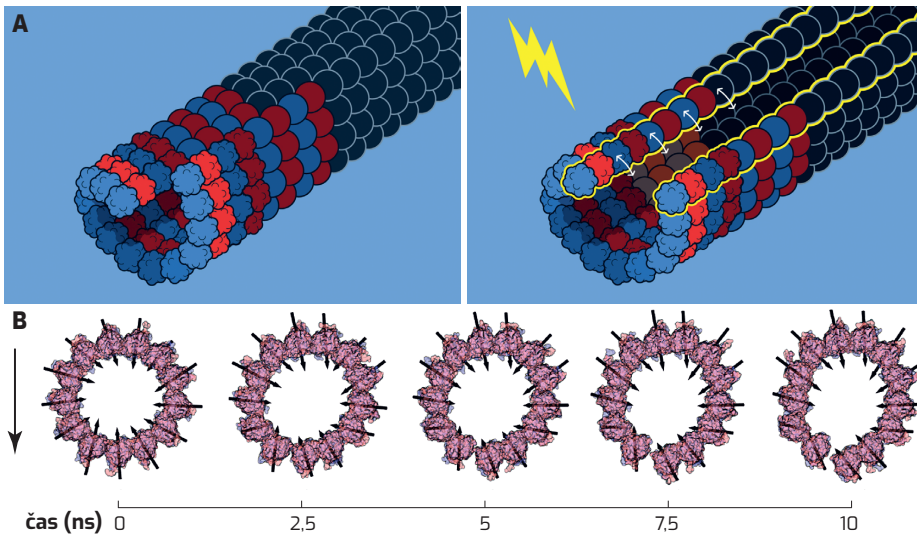
splynou v dokonale hladký a neměnný obraz. Jakmile se ale jedna z těch molekul zastaví, obraz se malinko změní. Ne moc, ale porovnáte-li obraz před zastavením a po zastavení, můžete si na okamžik všimnout změny. Říkejme tomu bliknutí. To bliknutí vychází z jednoho bodu a je přesně tam, kde se něco děje. A protože chemické reakce neprobíhají všechny najednou, ale v náhodném sledu jedna po druhé, můžeme s dostatečnou rychlostí snímání zachytit skoro všechny tyto změny. Tohle už ale není žádné šolichání, tady jsme se od populárně-historického úvodu dostali k tvrdé vědě na hranici dnešního poznání, vědě plné nezdarů a občasných zázračných pozorování, prozření a dlouhých odboček.

Pozorovat mašinerii všech jednotlivých molekul v tak komplikované soustavě, jakou je živá buňka, nám pravděpodobně ještě chvíli potrvá. Jednak proto, že těch molekul může být opravdu hodně, a pak všechny ty jednotlivé chemické reakce probíhají až tisíckrát rychleji, než jsme zatím schopni zaznamenat. Ale dobrá zpráva je, že jsme dosud nenarazili na žádné principiální omezení, kde by nám příroda zakazovala náš vysněný experiment udělat. Omezení jsou technická, elektronika je pomalá, vzorek se přehřívá a tak podobně. Ve vědě jsou ovšem technická omezení výzvou k řešení a obvykle se prací a zkušeností dají překonat.

Zajímavým příkladem je naše hledání třetího rozměru. Zatímco náš svět je třírozměrný, obrázek z mikroskopu je zpravidla placatý. Mikroskopie dnes už zná postupy, jak zaznamenat celou hloubku mikroskopické scény, jenom v našich mikroskopech bylo využití těchto obvyklých postupů komplikovanější. Zatímco obrazovou informaci v mikroskopu lze zachytit jako rozložení intenzity světla kamerou,

ten třetí rozměr pozorovaného vzorku je popsán do tvaru vlnoplochy (obvykle mluvíme o fázi světelné vlny). Tu sice není jednoduché změřit, ale lze ji měnit, ovlivňovat fázovými modulátory. Prostorové fázové modulátory se používají například v astronomii. Světlo ze vzdálené hvězdy k Zemi doputuje zpravidla jako dokonalá rovinná vlna, jejíž vlnoplocha nevykazuje prakticky žádné zakřivení. To se ale změní průchodem atmosférou a fázové modulátory umožňují tyto změny opravit. Problém byl v tom, že dostupné fázové modulátory pro náš mikroskop nebyly ani zdaleka dostatečně rychlé, ani stabilní, a museli jsme pro svá měření vyvinout modulátory zcela nové. Ukazuje se, že tyto nové modulátory fáze by mohly s výhodou najít uplatnění nejenom v našich extrémně citlivých mikroskopech, ale mohly by se vydat i zpátky ke kořenům a vylepšit astronomické dalekohledy budoucnosti. Protože fyzika je jenom jedna a dalekohled je v podstatě jenom takový mikroskop na galaxie.

Výzkumný tým nanooptiky rozvíjí v Ústavu fotoniky a elektroniky moderní zobrazovací metody od roku 2016. Vyvíjíme nové experimentální metody a snažíme se odpovídat na základní otázky fungování přírody kolem nás. Pochopení molekulárních mechanismů živých soustav je jednak fascinující dobrodružství, jednak nabízí odpovědi v případě, že některé tyto mechanismy přestanou fungovat. Naše práce stojí na úsilí studentů, doktorandů a postdoktorandů odhodlaných zkusit to, o čem všichni předpokládají, že nejde. Je to příležitost srovnatelná s prvovýstupem na dosud nezdořlanou horu, pro který nemá odvahu každý, ale ti, kteří se na tuto cestu vydají, získávají smysl života překračující hranice v nás i mezi státy. Díky nim i po 430 letech ve službě dobrodružství optické mikroskopie pokračuje.



1A. Schematické zobrazení otevírání mikrotubulu elektrickým polem. B. Časový vývoj molekulární simulace, zobrazení průřezu mikrotubulem. Velká černá šipka vlevo zobrazuje směr vektoru elektrického pole, malé černé šipky v struktuře mikrotubulu zobrazují dipolový moment u každého heterodimeru tubulinu (celkem zobrazeno 13).

a elektrické potenciály byly objeveny nejen v nevěch a svalu, ale i v jiných tkáních těla, což naznačilo, že bioelektrické jevy jsou univerzálním mechanismem pro regulaci biologických procesů. Tyto objevy vedly k rozvoji nových lékařských technologií, včetně srdečních kardiostimulátorů a elektrické stimulace mozku, které dnes umožňují léčit poruchy jako Parkinsonova choroba či epilepsie. Elektrické signály však nejsou omezeny pouze na lidské tělo – podobné mechanismy byly nalezeny v rostlinách, v houbách, a dokonce i v bakteriích, což naznačuje, že bioelektrika může být univerzálním jazykem života.

Přes všechny pokroky v oblasti bioelektriky stále neznáme celý obraz. V posledních letech výzkum ukázal, že bioelektrické signály mají mnohem rozmanitější škálu funkcí, než jsme si dříve mysleli. Vědci dnes hovoří o „elektromu“ – souhrnu všech elektrických procesů v těle od orgánů až po molekuly. Tento nový koncept bioelektrického kódu má potenciál odemknout tajemství toho, jak elektrické signály ovlivňují expresi genů, vývoj buněk, a dokonce i regeneraci tkání.

Pokud dokážeme dešifrovat tento bioelektrický kód, mohli bychom jednou ovládat regeneraci buněk, léčit rakovinu nebo dokonce znovu nechat narůst ztracené končetiny. Výzkum v oblasti bioelektriky naznačuje, že porozumění a ovládnutí těchto mechanismů by mohlo znamenat revoluci v medicíně, kde bychom nejen opravovali poškozené tkáně, ale také je redesignovali a přepisovali bioelektrické signály v reálném čase.

Abychom plně porozuměli bioelektrickým jevům a mohli je efektivně využít, musíme se zaměřit nejen na buněčnou a tkáňovou úroveň, ale také na biomolekulární úroveň, kde se otevírají nové možnosti pro medicínu a technologii. Biomolekuly vykazují díky své malé velikosti pohybu a tvarové změny na mnohem kratších časových škálách než buňky. Tato rychlá dynamika je klíčová pro fungování velkých biomolekul, jako jsou například bílkoviny. Ty působí jako „stroje“ v biologických systémech a vykonávají většinu životně důležitých funkcí – od stavby buněk po přenos signálů, řízení chemických reakcí a ochranu proti nemocem. Abychom dokázali efektivně

MICHAL CIFRA

Pozoruhodná elektrina a světlo organismů

Na odlehle planetě, vzdálené miliony světelných let od Země, leží mezi troskami a popelem postava, jejíž život visí na vlásku. Dr. Mara Ryan, brilantní vědkyně a neohrožená průzkumnice, je po tragickém incidentu jediným přeživším expedice. Její tělo je poseto popáleninami a krvavými ranami po nečekaném souboji s nepřátelskými tvory. Z posledních sil se doplazuje k lékařské stanici, kde leží její jediná naděje na přežití – pokročilý medicínský přístroj, Tricorder. Ruce se jí třesou, když ho aktivuje, a obrazovka se rozsvítí sérií složitých grafů a dat. Tricorder pomocí sofistikovaných bioelektromagnetických senzorů rychle analyzuje její vitální funkce a zahajuje samo-ošetření. Přístroj vysílá pulsy elektromagnetických vln do Marina těla, které okamžitě začínají regenerovat poškozené tkáně a stabilizovat její oběhový systém. Mara cítí, jak se bolest zmírňuje a její tělo začíná nabývat na síle. Když Mara opět nabere dostatek síly, aby se postavila, ví, že tento technologický zázrak jí právě zachránil život.

Abyste se tento typ technologie ze sci-fi příběhu stal skutečností, je potřeba získat množství poznatků ze základního výzkumu a dosáhnout významného technologického rozvoje. Historie systematického výzkumu bioelektrických jevů sahá hluboko do 18. století, kdy vědci jako Luigi Galvani poprvé zkoumali roli elektrického náboje v živých organismech. Právě jeho experimenty se žabími stehýnkami, při kterých pozoroval svalové kontrakce způsobené

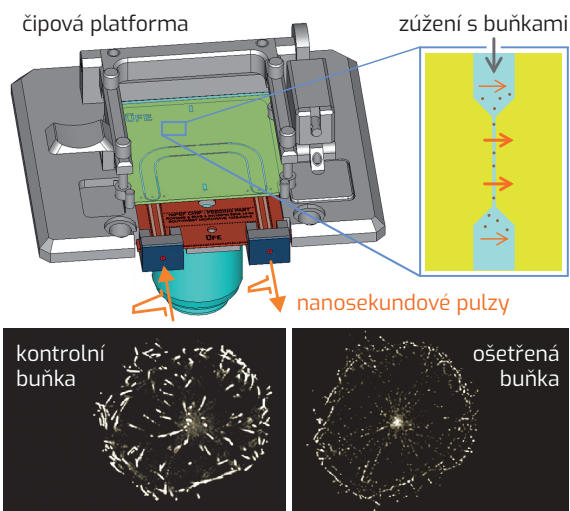
elektrickými impulsy, daly vzniknout oboru, který dnes známe jako bioelektrika. I přes významné pokroky, které byly v té době učiněny, trvalo mnoho let, než byla bioelektrická povaha nervového systému plně uznána.

V průběhu 19. století vědci, jako byli Emil du Bois-Reymond a Hermann von Helmholtz, dále prohlubovali znalosti o bioelektrických signálech v nervovém systému. Helmholtz měřil rychlost přenosu nervových impulsů, čímž potvrdil, že tyto impulsy nejsou okamžité, ale mají měřitelnou rychlost, což byl přelomový objev v neurovědě. Tento základní výzkum umožnil rozvoj moderní neurovědy a pochopení toho, jak elektrické signály ovlivňují každý aspekt života od pohybu svalů po složité procesy v mozku.

Během 20. století se bioelektrika začala zkoumat i mimo nervový systém. Iontové kanály

Ing. Michal Cifra, Ph.D., (*1983) je vzděláním biomedicínský inženýr, doktorát získal z radioelektroniky na ČVUT FEL v Praze a působil jako hostující profesor na Chicagské univerzitě. Zabývá se vývojem technologií pro výzkum interakce elektromagnetického pole s biologickou hmotou na molekulární úrovni. Vede výzkumný tým bioelektrodynamiky na ÚFE AV ČR. V roce 2020 získal EXPRO projekt na téma modulace funkce proteinových nanostruktur pomocí vysokofrekvenčních elektromagnetických polí. Více na <https://bioed.ufe.cz>.





2. Čipová platforma na superrozlišovacím mikroskopu typu strukturovaného osvětlení. Buňky jsou umístěné do zúžené mezery mezi vodiči koplanárního vedení, kterým se šíří nanosekundové pulsy. Tyto pulsy pak mají v buňce dvojitý efekt – jednak ovlivňují délku špičky mikrotubulů, značené fluorescenčním proteinem EB1, a také remodelují mikrotubulární skelet buňky.

ovlivnit tuto dynamiku, musí elektrická pole působit na porovnatelných časových škálách. To znamená, že je potřeba využívat elektrických polí s vyššími frekvencemi. Při nich dochází k výraznějšímu propojení elektrických a magnetických polí, což nás vede k tomu, abychom mluvili spíše o elektromagnetických než čistě elektrických polích.

Ve výzkumném týmu bioelektrodynamiky v Ústavu fotoniky a elektroniky Akademie věd ČR se soustředíme na odhalení a pochopení elektrických a elektromagnetických procesů v biologických systémech na molekulární úrovni. Naše práce se rozděluje do dvou hlavních směrů: na studium pasivních a aktivních elektromagnetických vlastností biosystémů. Zabýváme se širokou škálou biosystémů – od roztoků biomolekul přes bílkovinné struktury až po buňky a tkáně.

V rámci pasivních elektromagnetických vlastností zkoumáme, jak biosystémy reagují na vnější elektromagnetická pole. Sem patří výzkum dielektrických vlastností bílkovin a buněk, ale také jejich reakce na intenzivní

elektrické impulsy. Aktivní elektromagnetické vlastnosti se zaměřují na elektromagnetické pole generované samotnými biologickými procesy v živých organismech. Náš výzkum je postaven na třech vzájemně propojených pilířích:

- teorie a výpočtové modelování,
- vývoj nových technologických platform včetně mikrofluidních elektromagnetických čipů a
- experimentální ověřování našich teorií.

V poslední době se soustředíme na několik klíčových oblastí. První z nich je výzkum interakce proteinových struktur s elektromagnetickým polem, zejména s pulsním elektrickým polem a mikrovlnným zářením. Naším hlavním zájmem jsou mikrotubuly – bílkovinná nanovláčna, která hrají klíčovou roli ve vnitrobuněčném transportu a dělení buněk. Mikrotubuly jsou zajímavé pro výzkum z několika důvodů. Intenzivní elektrické pole může ovlivnit jejich strukturu, přičemž krátké pulsy nevedou k zahřívání, což je výhodné pro zachování biologické integrity. Na základě našich simulací molekulární dynamiky jsme předpověděli, že

pulsy intenzivního elektrického pole mohou způsobit otevření stěny mikrotubulů, a tím ovlivnit jejich funkci (viz **obr. 1**).

Vývoj pokročilých technologií, jako jsou elektromagnetické biočipy, nám umožňuje doručit přesné dávky elektromagnetického pole do biologických vzorků a sledovat jejich reakci v reálném čase pomocí superrozlišovací mikroskopie. Nedávno jsme představili novou technologii, která dokáže do biologických vzorků dodávat pulsy o intenzitě 6 MV/m a délce 11 nanosekund. V experimentech jsme demonstrovali, že tyto pulsy mohou remodelovat mikrotubulární síť v leukemických krysích buňkách (viz **obr. 2**), což představuje slibný směr pro budoucí terapeutické aplikace.

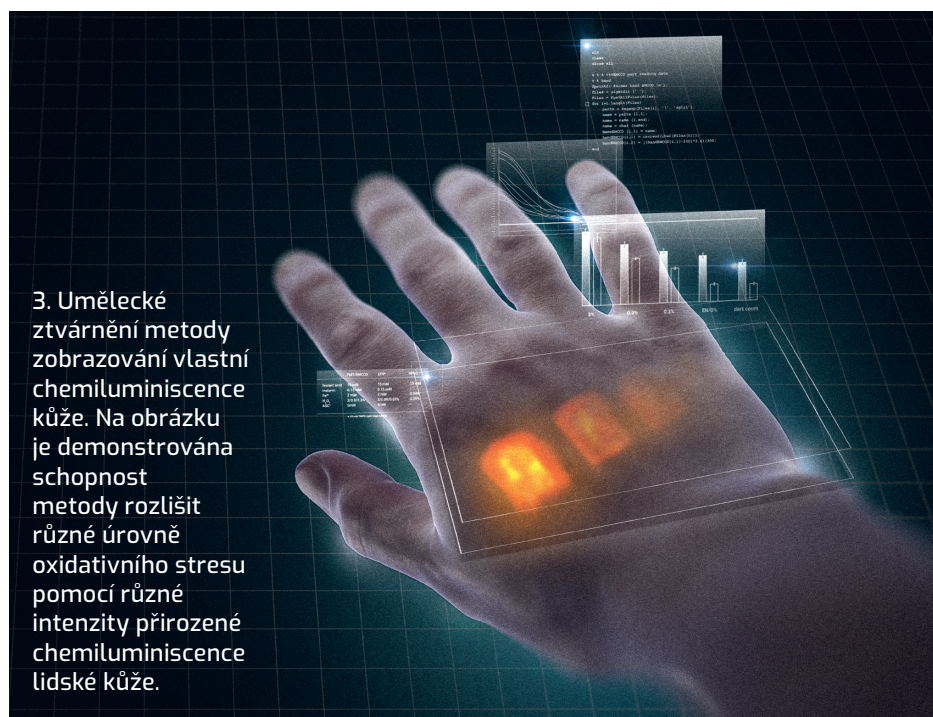
Dalším významným směrem našeho výzkumu je analýza biologické autoluminiscence – fenoménu slabé světelné emise, který je vlastní všem živým organismům. Tento jev souvisí s oxidativními procesy probíhajícími v tkáních a jeho sledování nám poskytuje neinvazivní způsob, jak v reálném čase monitorovat biologické procesy spojené s různými onemocněními nebo metabolickými změnami. Náš výzkum ukázal, že autoluminiscence může sloužit jako spolehlivá metoda pro sledování oxidačního stresu a dalších patologických stavů.

Význam elektromagnetických polí ve výzkumu biologických systémů je stále uznávanější. Elektromagnetické technologie nám nejen umožňují ovlivňovat chování buněk a molekul bílkovin, ale také nabízejí nové způsoby, jak monitorovat dynamické biologické procesy. Naše výsledky naznačují, že elektromagnetické pole, které působí na molekulární úrovni, má potenciál otevřít dveře k novým diagnostickým a terapeutickým metodám. Kromě medicíny vidíme potenciální využití v oblastech jako zemědělství a nanotechnologie, kde elektromagnetické technologie mohou přinést revoluční změny.

V celosvětové komunitě výzkumu bioelektroniky a bioelektromagnetismu věříme, že naše práce na rozvoji elektromagnetických technologií a pochopení jejich vlivu na biologické systémy bude mít dalekosáhlé důsledky nejen pro medicínu, ale i pro další oblasti vědy a průmyslu. Elektromagnetická pole nejsou jen nástrojem pro manipulaci s biosystémy, ale také klíčem k odhalení hlubších biologických principů, které mohou vést k novým způsobům léčby a prevence nemocí.

Mara Ryan již stála na můstku průzkumné lodi Endeavour na orbitě neznámé planety, kde téměř přišla o život, a vzpomínala, jak ji ho Tricorder zachránil. Předtím si plně neuvědomovala, jak velký vliv mohou mít bioelektromagnetické technologie na lidské zdraví. Bioelektromagnetické technologie nebyly v její době jen nástrojem první pomoci, jejich schopnost léčit pomocí elektromagnetických vln poskytovala naději na léčbu akutních zranění, ale i léčbu a prevenci mnoha civilizačních chorob. Budoucnost plná zdraví a vitality není jen sci-fi snem, ale dosažitelnou realitou. S touto myšlenkou se Mara rozhodla zasvětit svůj život tomu, aby pomohla přinést tyto technologie do každodenního života lidí...

Autor děkuje kolegům z týmu bioelektrodynamiky za připomínky k textu a zvláště Neuron Collective a Danielu Havelkovi za obrázky. Jako asistenta při jeho psaní použil ChatGPT4 a nese plnou odpovědnost za celý text článku.



3. Umělecké ztvárnění metody zobrazování vlastní chemiluminiscence kůže. Na obrázku je demonstrována schopnost rozlišit různé úrovně oxidativního stresu pomocí různé intenzity přirozené chemiluminiscence lidské kůže.

PAVEL HONZÁTKO a IVAN KAŠÍK

Jasnější nad tisíc sluncí

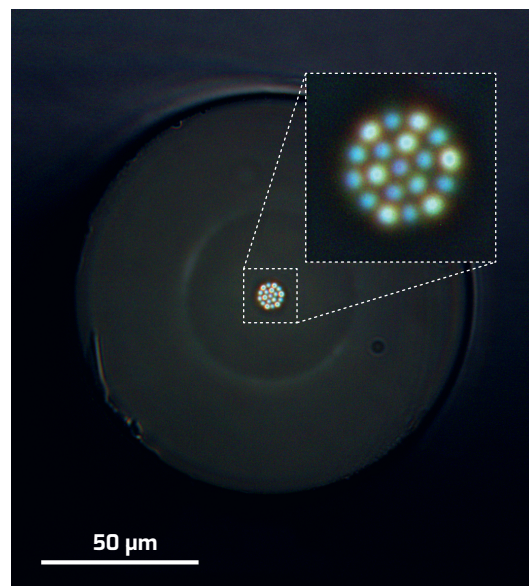
Ne, nejde o inspiraci snímkem Christophera Nolana „Oppenheimer“ a výbuchem pumy Trinity v Nevadské poušti v závěru filmu. Řeč sice bude o jasu až o mnoho řádů vyšším, než je jas na povrchu Slunce, jenže jen na malinkaté plošce několika desítek mikrometrů čtverečních uvnitř jádra optického vlákna pro optické komunikace, senzory, medicínu i pro hrubou sílu pro řezání a sváření v průmyslu... a nakonec i v obraně, ve vláknových laserech pro zbraně se směřovanou energií. Již více než třicet let rozvíjíme velkou výzkumnou infrastrukturu vláknových laserů a technologie optických vláken a jsme hrdí na to, že v těchto oborech jsme na světové špičce. Nabízíme vám nahlédnutí do dvou našich výzkumných oblastí: našeho tradičního tématu aktivních vláken a nedávno zahájeného výzkumu hypocykloidních vláken se vzduchovým jádrem.

Aktivní vlákna pro lasery a zesilovače

Výzkumný tým vláknových laserů a nelineární optiky z ÚFE systematicky rozvíjí technologii dopování preforem nanočásticemi. Základní principy této technologie publikoval tento tým jako první na světě už v r. 2007 a postupně zdokonaloval a aplikoval na různé typy dopantů – ytterbium, erbium, thulium a holmium. Ytterbiová optická vlákna se používají v průmyslových laserech s výkonem typicky do 10 kW na vlnové délce ~1,07 μm. Erbiová optická vlákna našla uplatnění v telekomunikacích pro zesilování optických signálů. Thuliová optická vlákna mají šanci na využití v kilowatových laserech. Pracují na vlnové délce kolem 2 μm, která je téměř

dvojnásobkem vlnové délky ytterbiových laserů. Dají se proto využít pro řezání a sváření některých materiálů, které jsou pro ytterbiové lasery transparentní. Jejich svazky se méně rozptylují v atmosféře, což je činí zajímavým pro vojenské využití. Dnes tým z ÚFE dokáže připravit thuliová optická vlákna s účinností 64 %, která je vyšší než účinnost komerčně dostupných thuliových vláken.

V posledních letech tým vyvinul dvě technologie přípravy preforem: s kompozitním pláštěm a s kompozitním jádrem (**obr. 1**). Tyto technologie umožňují připravovat optická vlákna s komplexní vnitřní strukturou, např. optická vlákna s trojitým pláštěm a velkou plochou jádra pro výkonové lasery nebo vlákna



1. Optické vlákno s kompozitním jádrem.

s extrémně velkou plochou jádra pro zesilovače pulzů s vysokou energií.

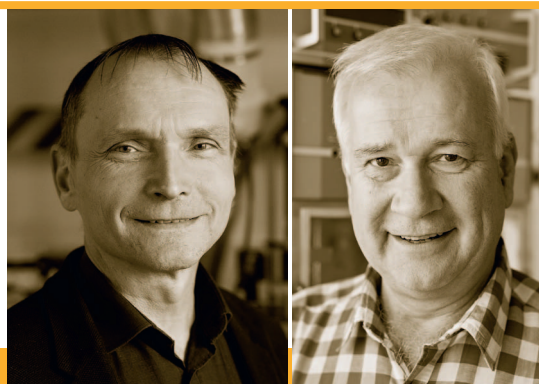
Na výzkumu optických vláken s kompozitním jádrem tým spolupracuje s týmem prof. Ryszarda Buczynského z Varšavské univerzity. Výsledkem této spolupráce byla mj. bezpe-destalová thuliová vlákna, která zachovávají kvalitu svazku a současně usnadňují sváření s ostatními vláknovými součástkami.

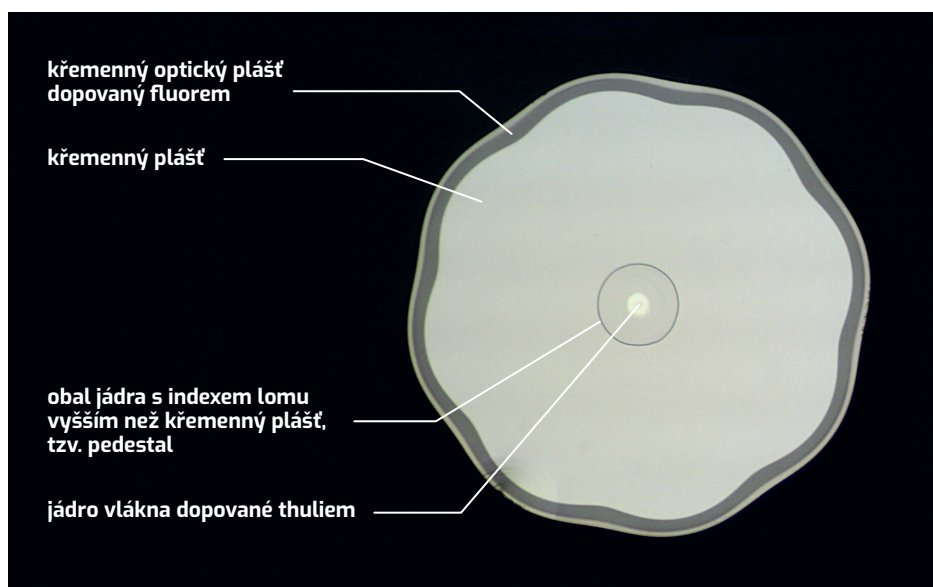
Z výzkumu thuliových vláken se skládá- ným pláštěm vzešlo pro projekt TALOS (Tactical Advanced Laser Optical System), financovaný Evropskou obrannou agenturou vlákno pro protidronové laserové systémy (**obr. 2**). Toto vlákno bylo použito zahraničním partnerem projektu ve výkonových zesilovacích stupních.

Na základě svých vláken tým vyvíjí mnoha- setwattové ytterbiové a thuliové lasery vhodné pro průmyslové použití. Zkoumá též cesty k prolomení stávající 1kW výkonové hranice thuliových laserů. Tým je členem Národního centra kompetence s názvem Centrum pokročilé elektronové a fotonové optiky, financovaného Technologickou agenturou ČR, a koordinuje velký infrastrukturní projekt LasApp, spolufinancovaný EU, který je zaměřený na rozvoj centra excelence a kompetence

Dr. Ing. Pavel Honzátko (*1966) získal doktorát na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy. Zabývá se výzkumem vláknových laserů a zesilovačů. V Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR vede tým vláknových laserů a nelineární optiky, který se snaží prolomit stávající výkonová omezení thuliových a holmiových laserů.

Dr. Ing. Ivan Kašík (*1963) absolvoval Fakultu chemicko-technologickou VŠCHT v Praze, kde v r. 1995 obhájil doktorát na téma technologie přípravy optických křemenných vláken. Vede laboratoř technologie optických vláken ÚFE. Podílel se na zavedení technologie telekomunikačních optických vláken do výroby a v současné době se podílí na výzkumu a vývoji speciálních vláken pro vláknové lasery a zesilovače.





2. Optické vlákno s kompozitním pláštěm, připravené pro mezinárodní projekt TALOS.

výzkumu laserových technologií a jejich aplikací. V obou těchto velkých projektech nese me zodpovědnost za rozvoj vláknově optických technologií.

Hypocykloidní optická vlákna

Standardní křemenná vlákna našla široké uplatnění v telekomunikacích nejenom kvůli nízkému útlumu, ale také díky excelentním mechanickým vlastnostem, odolnosti a životnosti. Útlum moderních optických vláken je z větší části daný rozptylem na nehomogenitách indexu lomu, které jsou způsobené dopováním jádra křemenného vlákna oxidem germaničitým, a z menší části absorpcí na poruchách v chemických vazbách a na příměsích. Útlum se pohybuje kolem hodnoty 0,2 dB/km, to znamená, že na 15 km vlákna se rozptýlí či jinak poztrácí polovina fotonů.

Nízký útlum světla se ovšem u konvenčních křemenných vláken dosahuje v nepřilíší širokém rozsahu kolem vlnové délky 1550 nm. Na obě strany od této vlnové délky útlum strmě narůstá a to omezuje přenosovou kapacitu optických vláken. I tak se v r. 2023 podařilo po jediném křemenném vlákně přenést informace rychlostí 22,9 petabitů za sekundu.

Pokud je zapotřebí přenášet po konvenčním křemenném optickém vlákně světlo na jiných vlnových délkách, je nutné smířit se kvůli vyššímu útlumu s menším dosahem. Zkoumají se sice optická vlákna vyrobená z alternativních materiálů, ale postrádají dobré mechanické vlastnosti křemenných vláken a navíc je velmi obtížné je svářet. Syntetický křemen, ze kterého jsou konvenční optická vlákna vyrobena, je totiž velmi tvrdý a taví se při vysokých teplotách kolem 2000 °C. To může na první pohled

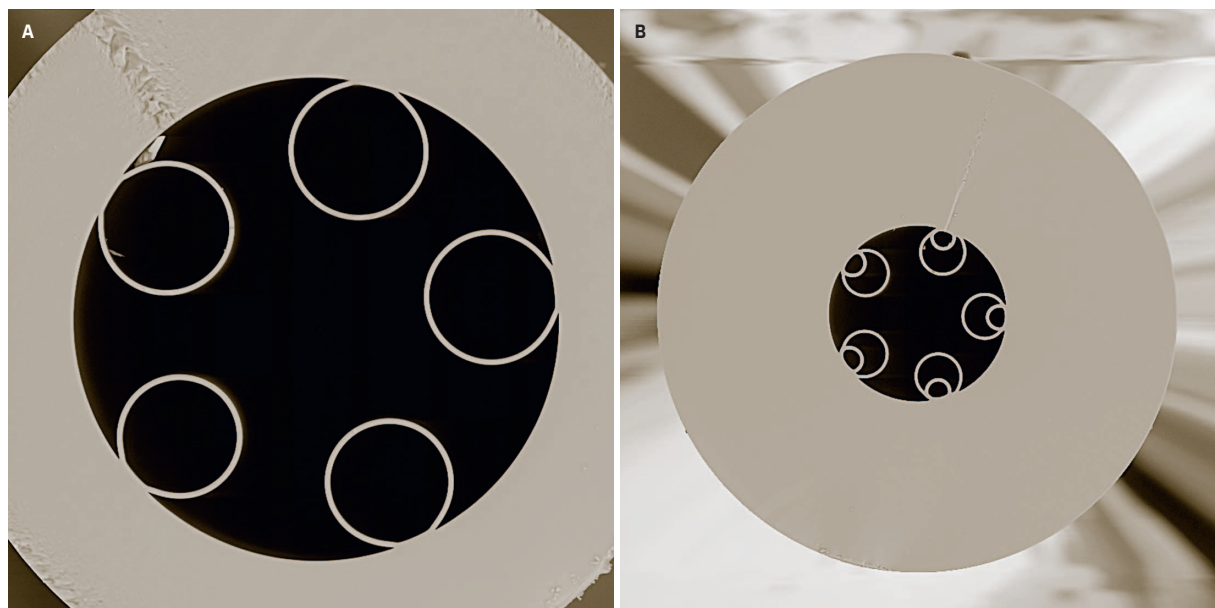
vypadat jako komplikace při spojování optických vláken svářením, ale kvůli pomalé změně viskozity s rostoucí teplotou je dnes svářením optických vláken rutinním způsobem jejich spojování i v polních podmínkách.

Optická vlákna pro střední infračervenou oblast lze připravit z fluoridového, teluridového nebo chalkogenidového skla. Tato skla se taví při mnohem nižších teplotách, ale snížení jejich viskozity s teplotou je strmé a koeficient teplotní roztažnosti je vysoký, což značně komplikuje spojování těchto vláken svářením. Ani mechanické vlastnosti optických vláken vyrobených ze zmíněných měkkých skel nejsou příznivé.

Ráznou odpovědí na volání po kvalitních optických vláknách pro střední infračervenou nebo ultrafialovou (UV) spektrální oblast jsou hypocykloidní křemenná vlákna s dutým jádrem. V těchto vláknách se světlo šíří vzduchem, popřípadě jiným plynem, kterým je jádro naplněné. Dnešní křemenná hypocykloidní vlákna dosahují menšího útlumu než konvenční vlákna na všech cílových vlnových délkách včetně vlnové délky 1550 nm. Jsou přitom připravená ze stejného základního materiálu, který je prověřený desetiletími. Jejich transmisní charakteristika je však pásová, tj. mají spektrální intervaly s nízkým útlumem, které jsou oddělené rezonančními pásy s obrovským útlumem. Někdy se jim proto říká antirezonanční optická vlákna.

Výzkumný tým vláknových laserů a nelineární optiky z ÚFE postupně zdokonaluje technologii přípravy hypocykloidních křemenných optických vláken revolverového typu s jednoduchými a vnořenými kapilárami. Ukázky těchto vláken jsou na **obr. 3**.

Výzkum byl spolufinancován Evropskou unií a státním rozpočtem ČR v rámci Operačního programu Jan Amos Komenský MŠMT, projektem LasApp CZ.02.01.01/00/22_008/0004573.



3. Hypocykloidní křemenná optická vlákna revolverového typu (A) s jednoduchými a (B) vnořenými kapilárami, připravená v ÚFE.

JAN GRYM

Polovodičové nanostruktury pro zelené technologie

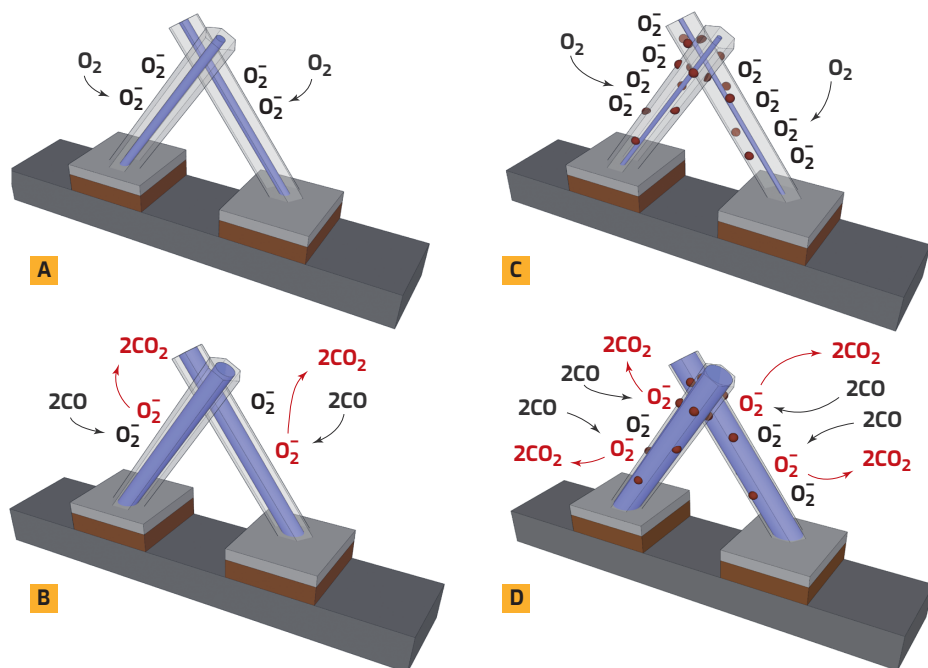
S polovodičovými materiály a strukturami se dnes setkáváme ve všech oblastech života od osvětlení vnitřních i venkovních prostor přes elektroniku v automobilech, solární panely na střechách domů, inteligentní elektrorozvodné sítě a senzory, chytré telefony, výkonné počítače až po ultrarychlé optické sítě. Rozměry polovodičových struktur se neustále zmenšují. Nejsou to však jen médii široce zmiňované čipy s miliardami tranzistorů pro výpočetní techniku. Jsou to také optoelektronické součástky, jako jsou svítivé diody, lasery a detektory záření pro displeje, osvětlovací techniku a optické komunikace, fotovoltaická zařízení pro bezemisní energetiku nebo senzory plynů pro průmysl a monitorování životního prostředí. S rychle rostoucí životní úrovní lidí se kvalita životního prostředí a ochrana klimatu staly předmětem každodenních odborných i laických diskusí. Až přímé dopady změny klimatu na společnost a životy lidí, jako jsou výkyvy počasí, extrémní sucha, požáry, tání ledovců nebo stoupající hladiny moří, však vedly k zásadním krokům. Hodnotící zpráva Mezvládního panelu pro klimatickou změnu varuje, že pokud nedojde k masivnímu snížení emisí skleníkových plynů, nastanou zásadní změny klimatu (v některých případech v horizontu staletí nevratné).

Česká republika je vysoko průmyslovou zemí s energetikou založenou téměř z poloviny na fosilních, zejména uhelných zdrojích. V přepočtu na počet obyvatel je bohužel největším emitentem skleníkových plynů v Evropě. Energetika, průmysl a doprava stojí za více než třemi čtvrtinami emisí skleníkových plynů. Česká energetika a teplárenství jakožto klíčové zdroje emisí projdou zásadními změnami. Vysoké ceny emisních povolenek již v průběhu několika let povedou k odstavení většiny uhelných zdrojů, které budou muset být nahrazeny dovozem a propojením sítí, úsporami, řízenou spotřebou a novými zdroji s nízkými emisemi. V českém prostředí zejména obnovitelnými zdroji zálohovanými zemním plynem a v dlouhodobém horizontu jadernými elektrárnami. Místo současného krátkodobého poklesu spotřeby elektřiny bude poptávka v budoucnu

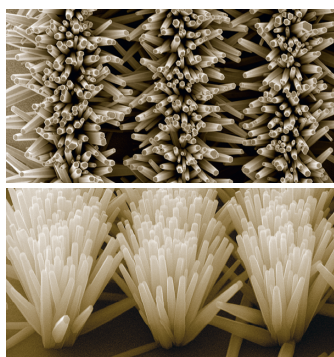
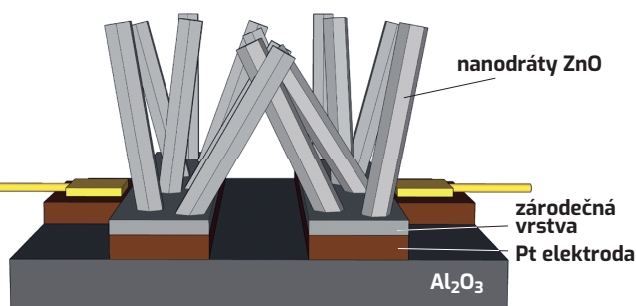
v souvislosti s výrazným snížením spotřeby fosilních paliv a elektrifikací průmyslu, dopravy a domácností rychle narůstat.

Ke snížení emisí skleníkových plynů významně přispěje rozvoj elektromobility a fotovoltaických instalací s bateriovými úložišti elektrické energie. To přináší bezpečnostní rizika spojená s jejich haváriemi, které sice nejsou četné, mohou však napáchat rozsáhlé škody. V souvislosti s lithiovými bateriemi se mluví o „tepelném úniku baterie“, jevu anglicky označovaném jako „thermal runaway of batteries“. Při zkratu uvnitř baterie dochází k lokálnímu přehřátí a porušení elektrické izolace, což vede k chemickým reakcím a možnému uvolnění toxických nebo výbušných plynů. S rostoucí teplotou se zvyšuje rychlost chemických reakcí, klesá elektrický odpor, dochází k dalšímu zhoršení stavu elektrické izolace a zvyšuje se vnitřní tlak plynů až do

stavu, který je nevratný a může vést k výbuchu a požáru. Ve všech typech lithiových baterií se v havarijních stavech uvolňují oxid uhličitý (CO_2), vodík (H_2) a oxid uhelnatý (CO). Zatímco CO_2 může baterii poškodit „jen“ zvýšeným tlakem, CO a H_2 mohou v uzavřeném prostoru vyvolat ještě druhotnou explozi. CO je navíc toxický a v již malých koncentracích nad 150 ppm ohrožuje zdraví a život člověka. V současné době jsou pro včasné varování před haváriemi baterií používány senzory pracující na tepelně-vodivostním principu, které však reagují až na poměrně vysoké koncentrace H_2 a CO . Ve spolupráci s VŠCHT Praha a Teslou Blatná v rámci projektu H2COTrack vyvíjíme senzory založené na principu měření změn elektrické vodivosti v závislosti na okolní atmosféře, tzv. chemirezistory, které jsou schopny detekovat velmi nízké koncentrace plynů, jako jsou H_2 a CO , a varovat tak před nebezpečím havárie



1. Schematické znázornění mechanismu detekce CO ve strukturách s nanodráty ve vzájemném kontaktu. Obrázky (A) a (B) znázorňují detekci CO bez přítomnosti nanočástic katalytického kovu, zatímco obrázky (C) a (D) znázorňují zesílený efekt změny odporu za jejich přítomnosti.



2. Schematické znázornění chemirezistoru s citlivou vrstvou tvořenou polovodičovými nanodráty.

výrazně dříve než např. tlakové senzory uvnitř zapouzdřených baterií. Přestože byly první chemirezistory vyrobeny již v šedesátých letech minulého století, rozvoj nanotechnologií v posledních desetiletích umožnil nahradit citlivou vrstvu nanostrukturami a výrazně tak zlepšit jejich sensorické parametry. Běžné chemirezistory pracovaly pouze za vysokých teplot, protože aktivní plocha citlivé vrstvy byla malá. Proto neumožňovaly detekovat výbušné plyny.

Chemirezistory s citlivou vrstvou tvořenou polovodičovými oxidy kovů pracují na principu změny elektrického signálu (proudu) dané vzájemným působením mezi detekovanými molekulami plynu a adsorbovanými ionty kyslíku (**obr. 1**). Pro polovodičivodivostního typu n, jako je např. ZnO, molekuly kyslíku adsorbované ze vzduchu zachycují elektrony z polovodiče a tvoří kyslíkové anionty. Na povrchu polovodiče tak vzniká oblast ochuzená o elektrony a klesá elektrická vodivost struktury (základní vodivost na vzduchu). Pokud k takovému povrchu přivedeme redukující plyn, jako je H₂ nebo CO, molekuly detekovaného plynu reagují s adsorbovanými ionty kyslíku za vzniku vody nebo CO₂ (při detekci H₂ se uvolňuje voda, při detekci CO se uvolňuje CO₂, viz **obr. 1**) a elektrony jsou uvolněny zpět do polovodiče, elektrická vodivost tak roste na úroveň základní vodivosti poté, co je znovu adsorbován kyslík.

Pokud připravíme citlivý materiál ve formě nanostruktur, v našem případě nanodrátů, chovají se jednotlivé nanodrátů jako vodovodní potrubí, které se na vzduchu zaškrtní, zatímco v přítomnosti molekul CO nebo H₂ potrubí využívá plně svého průřezu. Když cíleně propojíme obrovské množství nanodrátů, získáme vysoce citlivý senzor, který je schopen reagovat i na

velmi nízké koncentrace detekovaného plynu. K vysoké citlivosti navíc přispívají i oblasti, kde jsou jednotlivé nanodrátů ve vzájemném kontaktu (**obr. 2**). Když se vrátíme k paralele s potrubím, na vzduchu tato místa působí, jako by je někdo ucpal hustým sítem, které propustí jen malé množství kapaliny, zatímco za přítomnosti molekul CO nebo H₂ se velikost otvorů v sítu zvětší a proudění kapaliny tak brání jen málo. Pozorného čtenáře napadne, že redukcijících plynů je mnoho, a senzor tak bude reagovat na všechny plyny a nebude schopen rozpoznat, o který plyn se jedná. Selektivitu vůči různým plynům můžeme zajistit např. dekorací nanodrátů vhodnými nanočásticemi katalytických kovů, které výrazně zvyšují pravděpodobnost toho, že na povrchu nanodrátů dojde k reakci iontů kyslíku s molekulami detekovaného plynu. Takto mohou působit třeba nanočástice platiny (Pt) pro H₂ nebo nanočástice zlata (Au) pro CO.

Zelený vodík získaný pomocí obnovitelných zdrojů je slibným zdrojem čisté energie. Může vyrábět elektřinu, pohánět stroje a vlaky, posloužit při výrobě oceli. Může také být přeměněn na syntetická paliva nebo sloužit k výrobě amoniaku pro zemědělská hnojiva, přičemž jediným vedlejším výstupem je voda. Má to ale háček. Když se smísí se vzduchem, může snadno vybuchnout. Využití námi vyvíjených senzorů se neomezuje jen na bateriová úložiště, ale lze jimi monitorovat skladování vodíku a manipulaci s ním, výrobní procesy a obecně bezpečnost všech vodíkových zařízení. Senzory CO jsou klíčové při monitorování kvality ovzduší, prevenci požárů, sledování úniku nebezpečných plynů a mohou ukazovat na přítomnost hořlavých materiálů nebo naznačovat problémy s výfukovými plyny.

Obnovitelné zdroje elektřiny musí být v síti doplněny zdroji poskytujícími požadovaný výkon i v době, kdy není elektřina z obnovitelných zdrojů energie k dispozici. Náhraza uhlí zemním plynem vede ke snížení emisí, zemní plyn je však stále fosilní palivo. Dlouhodobým cílem je proto nahradit zemní plyn bezemisními plyny, jako je vodík. Protože průmysl ani energetika nejsou současnými rozvozy plynu na čistý vodík připravené a zelený vodík je zatím velmi drahý, jako přechodné řešení bylo navrženo přimíchání vodíku do zemního plynu. Do rozvodných systémů nelze namísto zemního plynu začít automaticky přivádět čistý vodík. Za schůdný kompromis je považován přídavek řádově jednotek procent „zeleného“ vodíku do zemního plynu při použití stávající rozvodné soustavy. Vzniká tak nová poptávka po senzorech, které by umožňovaly uvnitř potrubí detekovat vodík na pozadí zemního plynu. Do hry vstupují senzory využívající povrchové akustické vlny (SAW), jejichž aktivní vrstvou mohou opět tvořit už popsané nanostruktury oxidů kovů. Tento typ senzoru nevyžaduje pro detekci vodíku srovnávací atmosféru s obsahem kyslíku a dokáže detekovat malé molekuly (vodík) v plynu s velkými molekulami (zemní plyn tvořený převážně metanem). Senzory SAW tvoří vysílač a přijímač na piezoelektrickém substrátu. Na vysílač je přiváděn vysokofrekvenční elektrický signál, který se díky nepřímému piezoelektrickému jevu mění na povrchovou akustickou vlnu. Tato vlna se šíří k přijímači, jenž ji zpětně převede na elektrický signál, který je však fázově zpožděný. Pokud takovéto akustické vlně postavíme do cesty vrstvu citlivou na detekovaný plyn, změní se v závislosti na koncentraci plynu fázové zpoždění a další parametry akustické vlny.

V týmu nanomateriálů v Ústavu fotoniky a elektroniky vyvíjíme od roku 2015 metody přípravy polovodičových nanostruktur a charakterizujeme jejich elektrické a optické vlastnosti až na úroveň základních stavebních kamenů, např. nanodrátů. Díky tomu víme, jak připravit síť nanodrátů v ideálním uspořádání (což je zásadní pro chemirezistory i pro senzory SAW), a umíme popsat, co přesně se odehrává v sítích polovodičových nanodrátů, když je na ně přiloženo elektrické napětí (což je klíčové pro chemirezistory). Tyto znalosti nám umožňují zlepšovat parametry senzorů plynů pro danou aplikaci.

Měříme každý nanodrát zvlášť

V současné době jsou senzory většinou studovány pouze jako celek, kdy se vyhodnocují vlastnosti rozsáhlých polí nanodrátů. Pro pochopení toho, jakým způsobem se v sítích nanodrátů šíří elektrický náboj, vyvíjíme postupy, které nám umožňují vytvořit elektrické kontakty na jednotlivém nanodrátu, na jejich dvojici v kontaktu nebo ve struktuře s omezeným počtem nanodrátů. Celou síť nanodrátů jsme tak schopni rozebrat na základní stavební



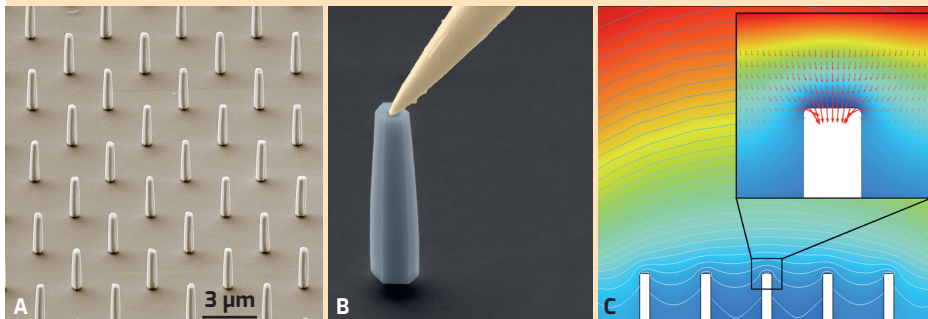
Ing. Jan Grym, Ph.D., (*1974) vystudoval Fakultu elektrotechnickou ČVUT v Praze. V rámci studia a jako postdoktorand působil na Universidad Complutense v Madridu, v Ústavu polovodičů v Pekingu a v Národní laboratoři v americkém Brookhavenu. V ÚFE AV ČR se zabývá přípravou a charakterizací polovodičových materiálů a nanostruktur pro elektroniku a optoelektroniku.

jednotky a z jejich elektrických vlastností se staví obrázek o tom, jak celý senzor funguje. A to v běžné atmosféře i atmosféře detekovaného plynu. K přímým elektrickým měřením používáme nanomanipulátory umístěné v komoře elektronového mikroskopu nebo je přenášíme pomocí nanomanipulátoru na litograficky připravené kontakty.

Vaříme z vody

Nanodráty připravujeme z vodných roztoků. Protože je to technicky jednoduché (lze to v principu zvládnout i na vařiči v kuchyni) a nanodráty mohou narůst na velkých substrátech ve velkém množství. Cílem je připravit nanodráty s požadovaným tvarem, rozměry, orientací a fyzikálními vlastnostmi. V přípravě nanodrátů z roztoků převládá empirický přístup, který je ale zdoluhavý a nevede k hlubokému poznání jevů, které se při jejich růstu odehrávají. Tento přístup výrazně posouváme tím, že modelujeme chemické a fyzikální jevy probíhající v růstových roztocích a studujeme mechanismy nukleace a růstu. Vyvíjíme nové metody přípravy a také techniky, jak donutit nanodráty růst daným směrem na místech, kde si to přejeme. Polovodičové nanodráty jsou monokrystalické. Zjednodušeně si je můžeme představit, jako by byly celé sestavené z velkého množství kostek lega. V roztoku tak musí být kostek dostatečný

Zaměřujeme se na základní výzkum fyzikálních a chemických dějů při přípravě polovodičových nanostruktur, kontrolu jejich morfologie a vlastností. Vyvíjíme metody, které nám umožňují studovat elektrické a optické vlastnosti jednotlivých nanostruktur. Základní poznání pak využíváme při vývoji nových elektronických a optoelektronických zařízení, jako jsou detektory a zdroje světla, senzory plynů a zdroje zelené energie.



3. Snímek pole nanodrátů ZnO na litograficky upraveném substrátu (A), nanodrát ZnO v kontaktu s hrotem nanomanipulátoru v elektronovém mikroskopu při elektrické charakterizaci (B) a model rozložení koncentrace růstových jednotek v okolí pole nanodrátů (C).

počet, aby je měl stavitel k dispozici, ale ne moc; při příliš rychlém tempu stavby by se mohly některé kostky ocitnout na špatném místě. I jedna špatně umístěná kostka ze stovek tisíc může mít v polovodičích zásadní vliv na jejich fyzikální

vlastnosti. Počtem kostek v roztoku a jejich druhů pak můžeme řídit, jaký tvar a rozměry bude nanodrát mít a kterým směrem poroste. A to je pro senzory plynů založené na sítích polovodičových nanodrátů klíčové.

ALEXANDER KUNA

Kde se bere přesný čas?

Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR provozuje a rozvíjí mj. také specializovanou laboratoř státního etalonu času a frekvence, která je v rámci národního metrologického systému přidruženou laboratoří Českého metrologického institutu a aktuálně je pověřena uchováváním Státního etalonu času a frekvence. Vytváří se zde fyzická aproximace jednotky času – sekundy, a to s využitím kvantového etalonu času a frekvence, konkrétně cesiových svazkových hodin, které se často označují jako atomové hodiny.

Laboratoř dále vytváří národní časovou stupnici označovanou UTC(TP), což znamená Coordinated Universal Time (www.presny-cas-online.cz/obsah/presny-cas-v-cr), která je predikcí světového koordinovaného času UTC a přesným časem v ČR. Laboratoř navazuje další kvantové etalony času a frekvence v ČR na

UTC(TP) pomocí signálů satelitních navigačních systémů (GNSS – GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou) nebo prostřednictvím vyhrazených optických vláken, případně vyhrazených kanálů v plně optických sítích. Takto navazované atomové hodiny se spolu s UTC(TP) podílejí na tvorbě světového koordinovaného času UTC ve spolupráci s Mezinárodním úřadem pro míry a váhy (BIPM) v Paříži.

Laboratoř provádí náročné kalibrace primárních a sekundárních etalonů času a frekvence, autonomních nebo řízených zdrojů přesného času a frekvence a zařízení pro tzv. časový transfer, tj. porovnávání časových stupnic na velkou vzdálenost pomocí GNSS, optických vláken a optických sítí.

Vědci z laboratoře Státního etalonu času a frekvence spolupracují s dalšími ústavu Akademie věd ČR v rámci programu Strategie AV21, s vysokými školami a průmyslem. Ve spolupráci s českou firmou Dicom/MESIT ASD byla vyvinuta a posléze inovována měřicí aparatura pro časový transfer pomocí GNSS, která se stala světově úspěšnou a využívá se v několika národních metrologických institucích, kalibračních laboratořích, vesmírných agenturách (ESA, NASA, DLR) nebo při špičkovém výzkumu (ESA, CERN). A právě o zařízení GTR50 a jeho nástupcích vypráví náš komiksový příběh. Dílo vzniklo ve spolupráci s CETAV a ÚFE AV ČR ještě před začátkem ruské agrese na Ukrajině v roce 2022.

Ing. Alexander Kuna, Ph.D., (*1978) absolvoval Fakultu elektrotechnickou ČVUT v Praze. Od roku 2004 pracuje v laboratoři Státního etalonu času a frekvence ÚFE AV ČR, přidružené laboratoři Českého metrologického institutu a od roku 2009 tuto laboratoř vede. Podílel se na vývoji celosvětově používaných přijímačů přesného času řady GTR5X. V projektu OP JAK QueenTec: Kvantové inženýrství a nanotechnologie vede tým ÚFE v pracích na distribuci ultrapřesných signálů na národní a evropské úrovni.



Přesný čas je věda

november 2011

CERN CHYBOVAL!

neutrina nejsou rychlejší než světlo

Měření byla chybná. „Za 60 nanosekundový rozdíl může špatné spojení mezi počítačem a optickým kabelem připojeným k přijímači GPS signálu,“ napsal časopis Science.

JAK SYNCHRONIZOVAT ČAS?

"Satelitní navigační systém se používá mimo jiné i k časovému porovnávání atomových hodin na vzdálenost až tisíců kilometrů. Pro takové porovnání potřebujete velice přesné přístroje, tzv. časové přijímače."

Na přednášce inženýra Kuna

UFE, Laboratoř Státního etalonu času a frekvence

Potřebovali jsme obnovit zastaralé přijímače pro časový transfer TTR-6.

Ing. Alexander Kuna, Ph.D. vedoucí vědeckého týmu

rok 2002

A nebude vývoj nového přijímače úřadu pro míry a váhy (BIPM) vadit?

Nebude, dodáváme méně dat, než dokážou zpracovat.

Potřebujeme nový přijímač

Na nákupy zahraničních zařízení letos nemáme.

Na trhu stejně chybí špičková aparatura, nabízí se jen geodetické přijímače modifikované na časové.

Pustíme se do toho sami ... Pane doktore ujmete se toho?

Měli bychom využít kontakty, které máme.

Myslíte Dicom?

Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR (UFE)

DICOM

Dicom je technologická společnost, která vyvíjí a vyrábí m.j. produkty pro hlasovou a datovou komunikaci, přesný čas a frekvenční zařízení.

Znali jsme se. Byli jsme z oboru, potkávali jsme se pracovně. K neformální spolupráci to byl jen krok.

2002 odstartoval projekt vývoje přijímačů pro časový transfer GTR. Společný projekt UFE a Dicomu.

My v UFE jsme přesně věděli, jaké parametry přijímače mají mít. Vývoj udělali v Dicomu. Metodické postupy pro kalibrace a ověřovací měření zase u nás.

„Hotovo“

Jane, vy máte spoustu kontaktů v odborných kruzích.

Mohl byste jim představit GTR, ať vědí, na čem pracujeme.

Za týden jedu na setkání s kolegy do Madridu.

Díky našim kontaktům s laboratořemi po celém světě se povedlo přijímač GTR dostat do povědomí zahraničních kolegů.

Skvělý marketing

BANG!

ÚSPĚCH se zrodil poměrně rychle.

BUREAU INTERNATIONAL DES Poids ET MESURES

Mezinárodní úřad pro míry a váhy

Oficiální doporučení BIPM, pokud chcete přesné výsledky měření (přispívat do světového koordinovaného času) doporučujeme časové přijímače Dicomu GTR.

Přístroj používají státní laboratoře v Belgii, Finsku, Francii, Itálii, Německu, Velké Británii.

cofee break

Prezentace byla skvělá, a ještě to doporučení od BIPM, ale GTR fungují jen se sítí GPS.

Co až budete chtít prodávat v Rusku?

GLOBAL POSITIONING SYSTEM

Bylo potřeba doplnit ostatní navigační systémy Glonass, Galileo, BeiDou.

ČÍNSKÁ STOPA

Ta prodaná GTR 51 se vrátila z Číny. Tady píšou, že nefunguje. Reklamače?

Někdo se v tom šfoural, podívejte.

Po dvou letech

Máme problém u GTR 55 s testováním příjmu signálů čínské sítě BeiDou. Viditelnost jejich družic je u nás omezená.

Pomohou nám v jejich Národním metrologickém institutu NIM?

Laboratoř NIM, Peking

Tady otestujeme GTR 55.

Podívejte, támhle ten přijímač vypadá jako naše 51.

Že by ta reklamače?

结束

Kromě metrologie a telekomunikací jsou dnes naše přijímače používány téměř ve všech kosmických agenturách.

Eesa

Přístroj je úspěšný, prodává se všude po světě.

GTR byl první z nové generace přijímačů, má unikátně řešený patentovaný měřící časových intervalů a umí přijímat a zpracovávat všechny signály, co se dnes nabízí.

Situace se obrátila, BIPM se učí pracovat s daty, která umíme poskytnout.

bliv

pr-pri-pri-pri