

Wykorzystując promieniowanie terahercowe, można sprawdzić zawartość walizki na lotnisku lub policzyć orzechy w tabliczce czekolady produkowanej w fabryce słodczy. Choć technologia ta rozwijana jest od 20 lat i znajduje zastosowanie w różnych dziedzinach życia, wykrywanie promieniowania terahercowego i jego precyzyjny pomiar wciąż pozostają wyzwaniem. Naukowcy z Wydziału Fizyki i Centrum Nowych Technologii UW pod kierunkiem prof. Michała Parniaka stworzyli „kwantową antenę” – detektor fotonów teraherców, który bardzo dokładnie rozpoznaje promieniowanie o tej częstotliwości. Odkrycie to otwiera drogę do dalszego rozwoju technologii terahercowej oraz nowej gałęzi metrologii opartej na precyzyjnych pomiarach.

Naukowcy z Wydziału Fizyki i Centrum Optycznych Technologii Kwantowych, działającego w ramach Centrum Nowych Technologii UW – prof. Michał Parniak, prof. Wojciech Wasilewski, dr Mateusz Mazelanik, Wiktor Krokosz, Jan Nowosielski, Bartosz Kasza i Sebastian Borówka – opracowali nową metodę pomiaru nieuchwytnych sygnałów terahercowych. Wykorzystując nowatorski układ do detekcji fal radiowych przy pomocy atomów rydbergowskich – „kwantową antenę” – badacze wykryli i precyzyjnie skalibrowali tzw. grzebień częstości w paśmie terahercowym, który do niedawna nie był widoczny w widmie elektromagnetycznym, czyli zbiorze wszystkich rodzajów fal elektromagnetycznych, od fal radiowych (o najmniejszych częstotliwościach) po bardzo silne promieniowanie gamma.

TERAHERCOWE WYZWANIA

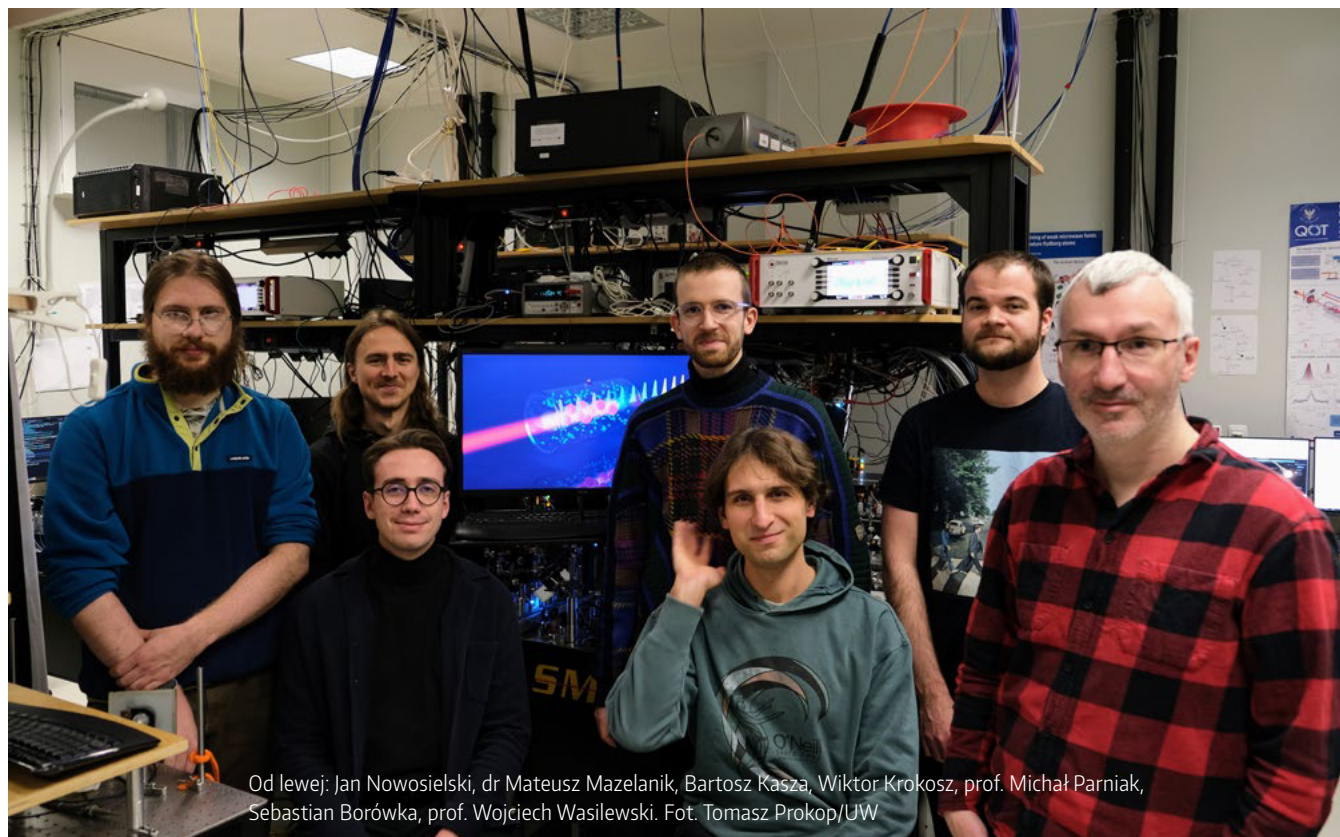
Specyfika promieniowania terahercowego polega na tym, że przechodzi ono tylko przez pewne materiały, takie jak tworzywa sztuczne, papier, tkaniny czy żywność. Nie przechodzi natomiast m.in. przez metale lub wodę. Dzięki tym właściwościom promieniowanie terahercowe można wykorzystać np. do skanowania przesyłek i bagażu na lotniskach, żywności na liniach produkcyjnych, obrazowania ukrytych struktur w materiałach czy wykrywania wad produkcyjnych w elektronice, bez potrzeby szczegółowego demontażu sprzętu.

Promieniowanie terahercowe (o zakresie od 0,1 do kilkunastu teraherców) to rodzaj fal elektromagnetycznych rzędu bilionów drgań na sekundę. Znajduje się na pograniczu elektroniki i optyki – w zakresie częstotliwości pomiędzy falami mikrofalowymi (używanymi

np. w technologii Wi-Fi) a promieniowaniem podczerwonym (używanym np. w kamerach termowizyjnych). Zastosowanie promieniowania terahercowego w przyszłości ma

Spektrum fal elektromagnetycznych w kolejności od najwyższej częstotliwości:

- promieniowanie gamma
- promieniowanie rentgenowskie
- promieniowanie ultrafioletowe
- światło widzialne
- podczerwień
- **promieniowanie terahercowe**
- mikrofałe
- fale radiowe



Od lewej: Jan Nowosielski, dr Mateusz Mazelanik, Bartosz Kasza, Wiktor Krokosz, prof. Michał Parniak, Sebastian Borówka, prof. Wojciech Wasilewski. Fot. Tomasz Prokop/UW

wielki potencjał związany z prześwietlaniem przesłęk bez szkodliwego promieniowania rentgenowskiego, zastosowaniem sieci przesłęk danych 6G i obrazowaniem związków organicznych. Jego praktyczne użycie do precyzyjnych pomiarów pozostaje jednak dużym wyzwaniem technicznym.

– Do tej pory mieliśmy rozpoznane fale mikrofalowe, których częstotliwość jest mniej więcej 10 razy mniejsza od częstotliwości terahercowej. Dobrze znane było również promieniowanie podczerwone, którego częstotliwość wyrażona w terahercach to jakieś 100 teraherców, czyli 100 tys. gigaherców. Pomiędzy mikrofalam a podczerwienią znajdował się cały rejon tzw. promieniowania terahercowego, który nie został przeanalizowany ze względów praktycznych – nie mieliśmy ani naturalnie dobrych źródeł fal terahercowych, ani dobrych detektorów, które mogłyby te fale wykryć – mówi prof. Michał Parniak, kierownik badań.

LINIJKA CZĘSTOTLIWOŚCI

Mimo dużego postępu w nauce i funkcjonowania zespołów analizujących zagadnienia teraherców (m.in. w Zakładzie Fizyki Ciała Stałego na Wydziale Fizyki UW) wyzwaniem nadal pozostaje precyzyjny pomiar terahercowego grzebienia częstości, który jest strukturą równomiernie rozłożonych częstości.

Grzebienie częstości przypominają bardzo dokładną „linijkę”, w której zamiast milimetrów są równomiernie rozstawione linie zwane „zębami”, pokazujące ściśle określone częstości. Ten wzór na „linijce” pozwala fizykom mierzyć częstość nieznanego sygnału z bardzo dużą dokładnością – badacze sprawdzają, do którego „zęba” na „linijce” pasuje dany sygnał. Grzebienie częstości mogą pełnić funkcję bardzo dokładnego wzorca częstości, dzięki czemu używa się ich do kalibrowania i strojenia różnych urządzeń pomiarowych. W zależności od położenia „grzebienia” w spektrum elektromagnetycznym nazywa się go optycznym, radiowym etc.

Pomiar terahercowych częstości jest wyzwaniem, ponieważ współczesne urządzenia elektroniczne nie mają możliwości jego uchwycenia, nie można również zarejestrować częstości za pomocą zwykłych metod optycznych. Możemy określić, jak są rozmieszczone „zęby” takiego grzebienia częstości terahercowych oraz zmierzyć jego moc, ale trudno jest stwierdzić, jaką moc ma każdy pojedynczy „ząb”.

PRECYZYJNY CZUJNIK

Dzięki zastosowaniu nowego rodzaju czujnika naukowcy z Wydziału Fizyki i Centrum

Nowych Technologii UW po raz pierwszy zmierzili sygnał emitowany przez pojedynczy „ząb” grzebienia terahercowego. Aby było to możliwe, wykorzystali gaz atomów rubidu w stanie rydbergowskim, czyli takim, w którym jeden elektron pod wpływem oświetlenia odpowiednio dostrojonymi laserami zostaje wzbudzony na bardzo wysoką orbitę. Taki atom staje się „kwantową anteną”, bardzo precyzyjnie wyczuwającą zewnętrzne pola elektryczne. Można go następnie dostroić przy pomocy przestrajalnych laserów do konkretnej częstości pola elektrycznego, w zakresie sięgającym aż do fal terahercowych.

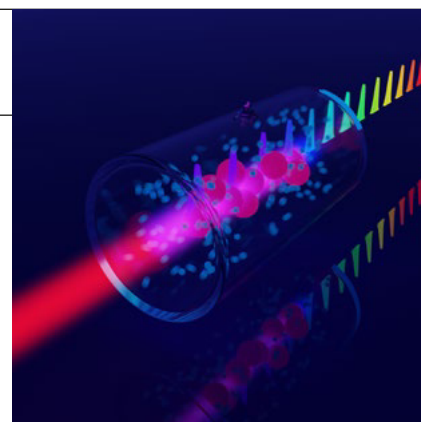
– W przeciwieństwie do klasycznych „anten” układ oparty na atomach jest w pewnym sensie wzorcem samym w sobie. Dzięki bogactwu stanów energetycznych w atomie taki czujnik można przestawiać w sposób niemal ciągły w olbrzymim zakresie, o rozpiętości od sygnału stałego aż po teraherce. Metoda ta ma jednak swoje ograniczenie: sama w sobie nie jest wystarczająco czuła, by zarejestrować bardzo słabe sygnały teraherców – podkreśla prof. Michał Parniak.

W celu zwiększenia efektywności detekcji badacze zastosowali technikę konwersji fal radiowych na światło. W tym procesie słaby sygnał terahercowy jest przemieniany w fotony optyczne, które następnie można wykryć z bardzo dużą precyzją przy użyciu liczników pojedynczych fotonów. Jest to podejście, które łączy ekstremalną czułość detekcji fotonowej z właściwościami kalibracyjnymi nawet dla najsłabszych sygnałów. Opracowany przez naukowców z UW czujnik oparty na atomach rydbergowskich można dostroić do pojedynczego „zęba” grzebienia częstości, a następnie przestroić do kolejnego. Naukowcy zaobserwowali w ten sposób wiele „zębów” w szerokim zakresie częstości, dzięki czemu możliwe było dokładne określenie natężenia grzebienia.

PRZYSZŁOŚĆ POMIARÓW

Dzięki właściwościom atomów rydbergowskich przełomowe zastosowania optycznych grzebieni częstości będą mogły zostać wykorzystane do pomiarów grzebieni terahercowych.

– W naszym zespole stworzyliśmy najbardziej, jak do tej pory, czuły detektor fotonów terahercowych, czyli pojedynczych cząstek promieniowania terahercowego. Działanie czujnika opiera się na atomach w stanie rydbergowskim wzbudzonym do takiego stanu przez lasery. Zastosowaliśmy w czujniku mały czip z arsenku galu, który emituje terahercowe



Grzebień częstości konwertowany na światło przez komórkę z atomami rubidu. Autorzy wizualizacji: Mateusz Mazelanik, Wiktor Krokosz/UW

impulsy w precyzyjnej odległości od siebie. Terahercowe impulsy przychodzą w bardzo dobrej synchronizacji pomiędzy sobą i takie źródło nazywa się właśnie tzw. terahercowym grzebieniem częstości, które mają ważne zastosowanie w precyzyjnych pomiarach. Aby możliwe było ich wykorzystanie, trzeba je najpierw wykryć, co jest bardzo trudne ze względu na małą liczbę fotonów w grzebieniu częstości. Zastosowanie czujnika, który wykrywa każdy foton, jest w tym procesie bardzo istotne – wyjaśnia prof. Michał Parniak.

Wyniki pracy fizyków z Uniwersytetu Warszawskiego mają istotne znaczenie dla przyszłości pomiarów, ponieważ umożliwiają rozwój nowej gałęzi metrologii. Jak podkreśla prof. Michał Parniak, w przeciwieństwie do wielu technologii kwantowych wymagających skrajnie niskich temperatur i w konsekwencji – specjalistycznych warunków, opracowany układ działa w temperaturze pokojowej, dzięki czemu zastosowanie nowej technologii wiąże się z mniejszymi kosztami.

Badania nad detektorem otwierają drogę do przyszłej komercjalizacji technologii, a także stworzenia nowych standardów pomiarowych i dalszego rozwoju nauki. Ich wyniki badacze opisali w czasopiśmie naukowym „Optica”.

Projekt *Optyczne Technologie Kwantowe* (FENG.02.01-IP.05-0017/23) jest realizowany w ramach działania 2.1 Międzynarodowe Agendy Badawczej Fundacji na rzecz Nauki Polskiej współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków 2. Priorytetu Programu Fundusze Europejskie dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027 (FENG). Badania zostały także sfinansowane ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach grantów SONATA 17 oraz PRELUDIUM 23.