

Recenzja rozprawy doktorskiej nt. „Aktywne i pasywne elementy mikroelektroniki i optyki giga- i terahercowej” mgr. Pawła Zięby

Tematyka pracy dotyczy najbardziej aktualnych zagadnień z zakresu mikroelektroniki i inżynierii materiałowej. Jest to kierunek badań polegających na konstruowaniu struktur o precyzyjnie określonych właściwościach – głównie dotyczących przewodnictwa elektrycznego, podatności elektrycznej i magnetycznej, a niekiedy także układu pasm energetycznych – i geometrii z dokładnością sięgającą skali mikroskopowej, a nawet wielkości pojedynczych cząsteczek chemicznych. Układy będące przedmiotem recenzowanej rozprawy powstają dzięki postępom technologii wytwarzania precyzyjnych siatek elektrod w kształcie prostopadłościennych sztabek oraz nanocząstek magnetycznych o dobrze określonych sferycznych kształtach i jednakowych rozmiarach.

Rozprawa przedstawia trzy projekty urządzeń związanych z generowaniem promieniowania terahercowego oraz jego oddziaływania z materią. Zagadnienie to ma duże znaczenie praktyczne, o czym może świadczyć liczba publikacji i stron internetowych prezentujących zastosowanie tego promieniowania, m.in. w diagnostyce medycznej, kontroli jakości, defektoskopii materiałów nieprzewodzących i wykrywaniu broni. Atrakcyjność promieniowania terahercowego w tych dziedzinach bierze się stąd, że przenika ono przez suche materiały dielektryczne i jest absorbowane przez przewodniki oraz elektrolity, ale nie powoduje uszkodzeń jonizacyjnych, które są głównym efektem niepożądanym obrazowania za pomocą promieni rentgena. Autor wymienia niektóre zastosowania promieniowania terahercowego we wstępie swojej pracy, a jako główny motyw podjęcia swych badań przytacza istnienie „luki terahercowej” (ang. terahertz gap), tj. braku ekonomicznych i łatwych w użyciu źródeł takiego promieniowania pracujących w temperaturze pokojowej. Zatem "Filling the Terahertz Gap", czyli - jak to czytamy w artykule R. Kleinera w *Science* (Abstract) **318**, 1254–5 (2007) - wypełnienie luki terahercowej pozostaje wyzwaniem dla nauk podstawowych w poszukiwaniu zjawisk przydatnych do wytwarzaniu omawianego promieniowania.

W rozdziale 1 swej rozprawy Autor przedstawia koncepcję generatora promieniowania terahercowego wykorzystującego efekt undulatorowy oraz zjawisko Gunna. Autor zaproponował wyposażenie Diody Gunna w dodatkową siatkę równoodległych elektrod prostopadłych do osi napięcia diody. Elektrody te wprawiają elektrony przewodnictwa w ruch oscylacyjny prostopadle do średniej prędkości dryftowej. Przyspieszenie związane z tym oscylacjami jest powodem powstawania promieniowania hamowania w zakresie THz. Promieniowanie to miałoby jednak bardzo słabe natężenie, gdyby elektrony poruszały się z różnymi fazami. Z pomocą przychodzi tu jednak efekt Gunna: przy odpowiednim napięciu

diody, z powodu bliskości energetycznej den pasm przewodnictwa, w pewnym zakresie napięcie różniczkowa oporność materiału staje się ujemna, co sprawia, że elektrony grupują się przestrzennie w obszarze, który przy zaprojektowanych parametrach urządzenia jest mały zarówno w porównaniu z odległością elektrod, jak i z długością generowanej fali. Taka „zgęstka” jest więc praktycznie obiektem punktowym, zapewniającym spójność oraz polaryzację generowanego promieniowania. Trzeba zaznaczyć, że generator taki pracuje impulsowo. Długość pakietu falowego impulsu jest porównywalna z długością przyrządu, a dokładnie odpowiada odległości przebieganej przez zgęstkę. W praktyce, mimo że pakiety falowe są krótkie, liczba oscylacji jest na tyle duża, że mamy do czynienia z promieniowaniem dobrze monochromatycznym. Ubocznym, ciekawym wynikiem tych rozważań jest stwierdzenie, że czas życia zgęstek jest skończony, porównywalny z czasem przelotu przez diodę. Wydaje się, że ten czas życia jest także zależny od temperatury. Natężenie promieniowania okazuje się proporcjonalne do kwadratu liczby elektronów w zgęstce, pod warunkiem, że zgęstka jest skoncentrowana w dostatecznie małym obszarze przestrzeni. Autor nazywa to efektem N^2 . Kształt zgęstki opisuje za pomocą współczynnika kształtu P . Gdy współczynnik ten wynosi 1, wtedy funkcja sfazowania też jest równa 1 i prawo N^2 jest spełnione doskonale. W przyjętym modelu, z zastosowaniem konstrukcyjnie realistycznych parametrów, współczynnik kształtu okazuje się około 0.1. Różnica w porównaniu z wartością 1 jest znaczna, zatem szkoda, że Autor nie wykazał, że dla tej wartości współczynnika P sfazowanie jest praktycznie takie samo jak dla $P = 1$.

Do obliczenia funkcji sfazowania Autor wykorzystał model wzięty z teorii laserów. Model ten prowadzi do równania ruchu sprzężonych oscylatorów według W.E. Lamba Jr. i M. Borensteina [42]. Za pomocą obliczeń numerycznych 10^4 równań nieliniowych (na rys. 1.14 i 1.15 mamy 25 elektronów) Autor wykazuje, że funkcja sfazowania dla realistycznych rozmiarów zgęstki jest rzeczywiście równa 1 oraz że przykładowe pole elektryczne nie powoduje rozfazowania, co dowodzi, wg Autora, że zaprojektowane urządzenie będzie rzeczywiście działać. Oprócz waloru projektu urządzenia, rozdział 1 przynosi ważny wynik z dziedziny badań podstawowych. Wyjaśnia mianowicie, że obserwowane w pracach Ericha Gornika promieniowanie terahercowe nie może być wynikiem zjawiska Smitha Purcella, gdyż tam byłyby potrzebne prędkości relatywistyczne, osiągalne tylko w warunkach próżni, a poza tym nie wystąpiłby efektu N^2 .

W rozdziale 2 Autor proponuje ulepszenie projektu generatora, tak aby tworzenie zgęstki nie było potrzebne. W tym wariantcie urządzenia napięcie osiowe może być mniejsze niż w diodzie Gunna, ale kryształ musi mieć większe rozmiary, a siatka elektrod musi być gęstsza, (choć częstotliwości własne modelowych oscylatorów mogą wykazywać pewien rozkład). Dzięki temu można osiągnąć istotne rozszerzenie zakresu uzyskiwanych częstotliwości (przestrajalność za pomocą pola elektrycznego) oraz wzrost mocy promieniowania. Mechanizm działania polega tu na wytworzeniu przez mikroundulator fali pompującej, która - zgodnie z koncepcją M. Kuramoto - sprawia, że elektrony zaczynają poruszać się w sposób spójny w reżimie

nadpromienistym mimo, że nie są przestrzennie zgrupowane. Zgromadzona energia zostaje wypromieniowana w postaci promieniowania terahercowego. Ilościowa analiza tej wersji generatora opiera się w zasadzie na tym samym modelu Lamba i Borensteina, z tym że częstości własne oscylatorów są tu losowo rozrzucone wokół pewnej częstości średniej, a efektywne przyłożone pole jest zależne od czasu poprzez funkcję koherencji. Autor wykazuje za pomocą obliczeń numerycznych, że w zbiorze 10^3 oscylatorów (elektronów) o fazach początkowo przypadkowych można rzeczywiście osiągnąć zakładaną spójność faz. Wyniki tych obliczeń wskazują także przewidywany czas potrzebny na uformowanie impulsu oraz czas trwania samego impulsu terahercowego.

Trzeci rozdział rozprawy jest poświęcony ciekawemu aspektowi oddziaływania promieniowania z materią, jakim jest osiągnięcie ujemnego współczynnika załamania w tym zakresie częstości, tzn. wytworzenie w tym zakresie metamateriału. Na obecnym etapie projektowania i wytwarzania takich materiałów dominują układy ściśle periodyczne, wymagające bardzo precyzyjnych technik litograficznych w skali nanometrycznych. Zostało to w skrócie przedstawione w podrozdziale 3.2. Model zaproponowany przez Autora wydaje się znacznie prostszy w realizacji. Zamiast precyzyjnych, a w konsekwencji kosztownych nanoobwodów, wymaga w zasadzie tylko wytworzenia z materiałów o odpowiednim namagnesowaniu spontanicznym sferycznych cząstek o dość wyrównanych rozmiarach nanometrycznych, i zmieszaniu ich w odpowiednim stężeniu ze znanym kompozytem dielektryczno-metalicznym wykazującym ujemną przenikalność elektryczną. W przedstawionych rozważaniach metalem jest srebro, a dielektrykiem odpowiednio domieszkowany kadm tellurek rtęci. Powtarzające się tu słowo „odpowiedni” podsumowuje główną trudność, która zostaje do pokonania: należy dobrać parametry układu tak, aby obszar dyspersji anomalnej przypadł na zakres terahercowy w żądanej temperaturze. Autor zatem przeszukał za pomocą napisanego przez siebie programu numerycznego ośmiowymiarową przestrzeń parametrów (siedem niezależnych): temperatura T , zewnętrzne pole magnetyczne B , promień nanocząstek magnetycznych r , ich moment magnetyczny, stężenie kadmu w tellurku rtęciowo-kadmowym, i stężenia trzech składników: metalicznego, dielektrycznego i magnetycznego.

Wszystkie trzy projekty urządzeń zaprezentowane w pracy zostały opublikowane w najlepszych światowych czasopismach poświęconych fizyce stosowanej, co świadczy, że zyskały one uznanie recenzentów. Oczywiście najlepszym potwierdzeniem przewidywań teoretycznych byłaby próba wytworzenia działających układów, co jednak wykracza poza przyjęte ramy tej pracy. Autor wykazał się natomiast sprawnością w stosowaniu niekiedy bardzo zaawansowanych modeli z fizyki matematycznej i fizyki laserów, fizyki ciała stałego i układów nanometrycznych. Zwraca uwagę samodzielność i pomysłowość w tworzeniu kodów numerycznych do rozwiązywania napotkanych zagadnień ilościowych w środowiskach Matlab i Mathematica.

Choć prezentacja problemów i wyników jest na ogół zrozumiała i poprawna, czytelnik niezbyt wyspecjalizowany w omawianej tematyce miałby zapewne trudności w powiązaniu modelowych wzorów (1.10) i (2.1) z koncepcjami i parametrami projektowanych układów bez odwoływania się do – co najmniej - zacytowanej literatury. Np. nigdzie nie dowiadujemy się skąd pochodzi wymuszające pole elektryczne E_0 , oscylujące z częstością ν i co to jest za częstość w zestawieniu z (prawdopodobnie) częstością kołową ω . A przecież to numeryczna analiza tych właśnie wzorów ma przekonać czytelnika o realizmie zaprojektowanych urządzeń. Ponieważ obydwaj generatory promieniowania terahercowego mają działać impulsowo, przydałoby się też porównanie długości impulsów w obydwu przypadkach oraz omówienie wpływu temperatury na tę długość, gdyż zaletą tych urządzeń ma być ich funkcjonowanie w temperaturze pokojowej. Autor sam zauważa w „podsumowaniu”, że kwestia doboru składników kompozytu pozostaje jeszcze do przedyskutowania. Nie mamy praktycznie żadnych informacji nt. składu chemicznego składnika magnetycznego. Można by zatem zapytać czy taki materiał w ogóle istnieje.

Uchybień redakcyjnych jest niewiele jak na pracę o tej objętości: np. brak czynnika o wymiarze prędkości we wzorze (1.1), lub z rzadka pojawiające się anglicyzmy, np. „Region” zamiast „obszar” w podpisie rysunku 1.9 i kilka typowych błędów korektorskich, głównie dotyczących rodzaju i przypadków. Zwraca uwagę szata graficzna ułatwiająca orientację w tekście i sugestywne rysunki, choć nieraz pochodzą one z innych prac.

Wskazane usterki w prezentacji i dyskusji wyników nie umniejszają osiągnięć naukowych Autora. W pewnej części powinny być potraktowane jako sugestie dalszych badań. Natomiast umiejętności rozwiązywania przez Autora konkretnych problemów naukowych i jego sprawność w tworzeniu skutecznych algorytmów numerycznych oraz ogólnie poprawne przedstawienie zagadnień i wyników pozwalają stwierdzić, że rozprawa spełnia wymogi ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym. Zatem wnoszę o dopuszczenie pana mgr. Pawła Zięby do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Kraków, 14 maja 2015 r.

