

Piaseczno, 08.04.2020

Prof. dr hab. inż. Jacek Marczewski
Sieć Łukasiewicza – Instytut Technologii Elektronowej
Al. Lotników 32/46
02-668 Warszawa

RECENZJA

Rozprawy Doktorskiej
mgr inż. Martyny Rachoń

Techniki korekcji fazy struktur dyfrakcyjnych dla promieniowania terahercowego

Rozprawa doktorska mgr. inż. Martyny Rachoń została przedstawiona celem dopuszczenia do obrony na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Maciej Sypek zaś promotorem pomocniczym dr inż. Jarosław Suszek.

Wstęp.

W rozprawie przedstawiono metodę korekcji fazy dla struktur dyfrakcyjnych wykonanych w technice druku 3D, skupiających promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie sub-THz. Praca ma charakter teoretyczno-eksperymentalny. Wykazano, że zastosowanie warstw korygujących fazę, zbudowanych „od spodu” soczewki, może prowadzić do znacznego wzrostu koncentracji energii promieniowania. Przy zoptymalizowanej korekcji uzyskano subfalowe rozmiary plamki ogniskowej. Praca ma charakter oryginalnego osiągnięcia naukowo-technicznego.

Opis zawartości poszczególnych elementów Rozprawy wraz z uwagami Recenzenta.

Rozprawa ma 100 stron a jej bibliografię 78 pozycji (w tym 2 prace, w których pierwszym autorem jest Doktorantka i jedno współautorstwo). Jedną z prac autorstwa

Doktorantki poz. [5] została zgłoszona do Wydawnictwa i nie jest jasne dla Recenzenta, jaki jest jej obecny status. Z tytułu można wnosić, że jej tematem są prace z zakresu prezentowanego w Rozprawie, co zostało potwierdzone odpowiednią uwagą Autorki w Rozdziale 2.

Rozprawę rozpoczyna dwujęzyczne **Streszczenie**. W wersji angielskiej znajduje się niezręczność językowa (zdanie zaczęte od Which...).

Następną częścią pracy jest kllkustronicowy Rozdział 1 zawierający **Wstęp**. Jest napisany jasno, zawiera m.in. cel: Analiza wpływu korekcji fazy na wydajność struktur dyfrakcyjnych pracujących w oświetleniu monochromatycznym oraz tezę pracy. Jest nią: Zastosowanie struktur dwustronnych o dużych aperturach i małych ogniskowych wykonanych metodą druku 3D umożliwia zwiększenie poosiowej koncentracji energii w zakresie promieniowania THz. Jest to zdaniem Recenzenta ambitny zakres prac mający istotny aspekt aplikacyjny.

W Rozdziale 2, zatytułowanym **Wprowadzenie do technik THz**, Autorka najpierw bardzo skrótowo opisuje źródła i detektory THz. Stwierdzenie, że rozmiar anten zintegrowanych z detektorami rzadko przekracza kilkadziesiąt mikrometrów może nie być spełnione np. dla często używanego do eksperymentów zakresu sub-THz. Jest to o tyle istotne, że większość detektorów opartych o elementy elektroniczne przekształcające energię promieniowania (na napięcie bądź prąd) ma rozmiar rzędu mikronów (są wówczas najbardziej sprawne), zaś zintegrowana z nimi antena ma często rozmiar kilkaset razy większy. Wystarczyłoby zdaniem Recenzenta konkluzja, że jest to rozmiar (wraz z anteną) zawsze porównywalny z długością fali, i w celu maksymalnego wykorzystania apertury anteny energia powinna być skupiona na właśnie takim obszarze.

Niejasny jest dla Recenzenta podział detektorów, w którym diody Schottky'ego zliczono do detektorów elektronicznych zaś polowe tranzystory HEMT do fonicznych. Czyżby chodziło o podkreślenie w tych drugich efektów plazmonowych? Nie wspomniano także o innych detektorach np. bardzo często stosowanych ze względu na osiągalność usług MPW krzemowych tranzystorów FET wytwarzanych w technologii CMOS.

W dalszej części rozdziału wspomniano krótko o cechach promieniowania THz i jego zastosowaniach. Nasuwa się uwaga, że perspektywy szerokich aplikacji zarysowane przez Autorkę pozostają zdaniem Recenzenta daleko w tyle za zaimplementowanymi w praktyce zastosowaniami THz, które pozwoliłyby wyprzeć z rynku inne stosowane dotąd techniki. Wąskim gardłem pozostają źródła THz, których rozwój wyraźnie nie nadąża za detektorami oraz ograniczenia związane z pochłanianiem fal THz przez wilgoć medium.

Następny fragment dotyczy klasycznych (refrakcyjnych bądź odbiciowych) układach skupiających promieniowanie THz. Wspomniano tu także krótko o soczewkach krzemowych podając jako kontrargument ich stosowania wysoką cenę. Jest to prawda, chociaż dla niektórych aplikacji małe soczewki krzemowe z ew. warstwą przeciwoodbiciową stanowią rozwiązanie zawsze warte rozważenia.

Rozdział 3 p.t. **Struktury dyfrakcyjne** stanowi początek wstępu do właściwej części Rozprawy. Wydaje się, że niektóre terminy powinny być tłumaczone bliżej, zwłaszcza gdy są używane po raz pierwszy. Dotyczy to np. terminu „kodowanie” użytego w znaczeniu metody modyfikacji amplitudy bądź fazy promieniowania. Szybkie przejście do wzorów

opisujących poszczególne metody kodowania nie sprzyja zrozumieniu celu kształtowania frontu falowego. Brak też definicji kinoformu oraz kilku innych terminów (zapewne uznanych za powszechnie zrozumiałe). Może słowniczek terminów takich jak DOE, kinoform, strefa Fresnela itd. byłby niezłym rozwiązaniem. Autorka przyjmuje, że czytelnik jest biegły w dziedzinie i używa slangu (np. „wystłonięcie” zamiast zasłonięcie; voxel (*ang.*), czyli trójwymiarowy odpowiednik piksela, pojawia się jako „voksel”, choć polskim terminem jest woksel).

Wracając do treści rozdziału - opis różnych metod kodowania nie budzi istotnych zastrzeżeń. Natomiast w części dotyczącej metod wytwarzania znajduje się stwierdzenie „Rozdzielczość teoretyczna technologii spiekania laserowego wynosi...”. Recenzent rozumie, że dotyczy to konkretnego urządzenia o takich a nie innych parametrach. W tym kontekście nie jest dla czytelnika w tym momencie jasne, co oznacza „rozdzielczość teoretyczna” i jaka jest wobec tego rozdzielczość praktyczna i od czego ew. ona zależy. Odpowiedź znajduje się dopiero w następnym podrozdziale, gdzie stwierdzono, że ze względu na sztywność struktury rzeczywista rozdzielczość jest o wiele mniejsza od uprzednio zadeklarowanej wartości teoretycznej ($1/40 \lambda$) i jej wartość oszacowano na $1/14 \lambda$.

Na początku podrozdziału 3.3 Autorka stwierdza, że w roku 1879 Lord Rayleigh....[62].... wyliczył, że rozmiar dysku centralnego w płaszczyźnie ogniskowej dany jest....wzorem (3.15). Należy stwierdzić, że rozmiar dysku Airy’ego został wyliczony prawie pięćdziesiąt lat wcześniej przez tego ostatniego. Odnośnikiem dla wzoru powinna być więc praca Airy’ego „On the Diffraction of an Object-glass with Circular Aperture” opublikowana w Trans. of the Cambridge Philosophical Soc. 1835 str. 283-291 dostępna w Internecie w zbiorach Uniwersytetu Cambridge.

Rozdział 4 p.t. **Zagadnienia teoretyczne** porusza sprawy związane ze zjawiskami dyfrakcyjnymi w kontekście ich modelowania. Treść rozdziału nie budzi zastrzeżeń Recenzenta. Natomiast w Rozdziale piątym p.t. **Optymalizacja struktur dyfrakcyjnych, stan wiedzy** znajdujemy na wstępie bardzo ważne oświadczenie o oryginalności rozwiązań Autorki dot. korekcji fazy. Rozdział ten stanowi podkreślenie odrębności autorskiego podejścia Doktorantki na tle istniejących w literaturze rozwiązań z konkluzją jak powyżej.

W Rozdziale 6 p.t. Korekcja **fazy** przechodzimy do najważniejszej części Rozprawy. Wywody są jasne, przekonywujące i dobrze udokumentowane. Ta część rozprawy wraz z następnym rozdziałem jest najlepsza. Recenzent nie widzi błędów, rozumowania są klarowne mimo ich lakoniczności. Warstwa eksperymentalna jest poprawnie opisana.

Podobnie rozważania z Rozdziału 7 **Ogniskowanie subfalowe** są przekonywujące. Jedynie informacje dotyczące tzw. podkładu (termin użyty już w Rozdziale 3, jednak bez żadnego komentarza) wymagałyby takowego (np. dotyczącego kryterium wyboru jego grubości). Także termin „interferencja konstruktywna” w opisie struktur FreeForm wymagałby zdaniem Recenzenta drobnego komentarza.

Rozdział 8 stanowi ostateczne, zwarte i dobrze napisane autorskie **Podsumowanie** Rozprawy.

Podsumowanie opinii Recenzenta

Wyniki eksperymentalnych pomiarów udowadniają, że metody modelowania stosowane przez Autorkę w celu zaprojektowania struktur dyfrakcyjnych są poprawne (a w przypadku odstępstwa pomiędzy modelowaniem a eksperymentem istnieje racjonalne jego uzasadnienie).

W trakcie pierwszego opisanego eksperymentu wykazano, że poprzez kodowanie struktury bez stosowania przybliżenia przyosiowego możliwe jest zwiększenie koncentracji energii w płaszczyźnie ogniska, zaś zastosowanie korekcji fazy daje wzrost prawie trzykrotny w stosunku do kinoformu z przybliżeniem przyosiowym. Należy wspomnieć, że w tym eksperymencie stosowano średnicę soczewki równą ogniskowej a uzyskane plamki ogniskowe były rzędu 4-6 długości użytej fali, co dla wielu aplikacji jest niezadawalające.

Drugi eksperyment dotyczył takiej optymalizacji soczewki, aby otrzymać plamkę o średnicy rzędu długości fali a nawet mniejszą. W tym celu zaprojektowano struktury o ogniskowej 5-krotnie mniejszej od średnicy soczewki. Do modelowania nie stosowano przybliżenia przyosiowego. Zoptymalizowana warstwa korekcyjna dała wzrost koncentracji energii o 46% - znacznie mniej niż oczekiwano. Prawdopodobną przyczyną była korekcja wymagająca gwałtownych różnic wysokości drukowanych warstw, co w technice 3D było bardzo trudne do spełnienia (prawdopodobnie ze względów na ograniczenia technologiczne drukarki). W tej sytuacji wypróbowano opatentowane przez zespół promotora rozwiązanie w postaci struktury FreeForm zawierającej odwrotny rozkład fazy w obszarze gęstych stref kinoformu. Rozwiązanie to, nawet bez korekcji, dawało większą energię plamki niż kinoform skorygowany. Autorka zastosowała dodatkową korekcję dla struktury FreeForm uzyskując prawie trzykrotny wzrost poosiowej koncentracji energii względem struktury projektowanej nieprzyosiowo bez korekcji. Wszystkie rozkłady natężenia promieniowania z rysunku 7.16 wskazują na skupienie energii na obszarze znacznie mniejszym od limitu dyfrakcyjnego. Wykazano więc eksperymentalnie, że stosowanie krótkiej ogniskowej stanowi remedium na duże straty energii związane z częścią energii będącej poza aperturą detektora, zaś ostatecznie ze stosowanych rozwiązań (struktura FreeForm z korekcją) daje wysoką gęstość energii w centralnym obszarze plamki.

Zdaniem Recenzenta należy stwierdzić, że sukces eksperymentów dotyczących korekcji fazy struktur dyfrakcyjnych dla promieniowania THz (poprzedzonych żmudnymi modelowaniami) wykazał biegłość Autorki w rozwiązywaniu naukowych i technicznych problemów. Jednocześnie potwierdził tezę Rozprawy stanowiącą, że zastosowanie struktur dwustronnych o dużych aperturach i małych ogniskowych wykonanych metodą druku 3D umożliwia zwiększenie poosiowej koncentracji energii w zakresie promieniowania THz.

Konkluzja

Recenzent stwierdza, że drobne usterki pracy omówione w pierwszej części Recenzji nie mają wpływu na jego bardzo wysoką ocenę całości Rozprawy. Biorąc pod uwagę powyższe argumenty, w świetle obowiązujących przepisów, Recenzent uważa, że przedstawiona Rozprawa spełnia wynikające z przepisów kryteria i może być podstawą do ubiegania się o stopień doktora nauk fizycznych. Wnosi więc o dopuszczenie Rozprawy do obrony publicznej i o jej wyróżnienie.

M. Marozewski 8/4/2020