



**Wojskowa
Akademia
Techniczna**
im. Jarosława Dąbrowskiego



płk prof. dr hab. inż. Przemysław Wachulak
Instytut Optoelektroniki
Wojskowa Akademia Techniczna
Warszawa

Warszawa, 14 kwiecień 2020 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Karoliny Liebert
pt. „Struktury dyfrakcyjne zmniejszające aberracje chromatyczne
w zakresie terahercowym”**

Praca doktorska magister Karoliny Liebert powstała pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Macieja Sypka. Praca została złożona na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej w 2020 roku. Praca dotyczy aktualnych i bardzo ważnych zagadnień związanych z tematyką zastosowania optyki dyfrakcyjnej w zakresie fal terahercowych.

Celem rozprawy było udowodnienie możliwości opracowania elementów optyki dyfrakcyjnej na zakres terahercowy, mających za zadanie koncentrację energii promieniowania terahercowego o szerokim zakresie spektralnym na szerokopasmowym detektorze, w których zminimalizowany zostanie wpływ aberracji chromatycznej. Elementy dyfrakcyjne posiadają bardzo duże aberracje chromatyczne, proporcjonalne do długości fali promieniowania, a więc typowo używa się ich w kombinacji z quasi-monochromatycznymi źródłami, jednakże często zachodzi konieczność ogniskowania wiązki promieniowania elektromagnetycznego o szerokim widmie. W takim przypadku elementy optyki dyfrakcyjnej często są pomijane jako mniej efektywne od optyki odbiciowej, czy też refrakcyjnej. Praca mgr Karoliny Liebert demonstrowa możliwości optymalizacji kilku struktur dyfrakcyjnych w taki sposób, aby częściowo skompensować wpływ wspomnianych przez mnie aberracji na efektywność ogniskowania promieniowania elektromagnetycznego w zakresie terahercowym.

Praca doktorska pani mgr Liebert składa się z siedmiu rozdziałów. Posiada 72 odnośniki literaturowe. W rozdziale pierwszym zaprezentowano wstęp do pracy oraz motywację podjęcia tematyki badań związanej z zaprojektowaniem, modelowaniem, a także badaniami eksperymentalnymi weryfikującymi założenia teoretyczne dla kilku elementów optycznych na zakres sub-THz, a mianowicie soczewki sferycznej w postaci kinofornu pierwszego rzędu, soczewki sferycznej w postaci kinofornu drugiego rzędu, a także trzech innych elementów optycznych, tj aksikona, „miecza świetlnego” oraz

soczewki wieloogniskowej, również w postaci kinoformów pierwszego rzędu. Elementy te były eksperymentalnie weryfikowane dla trzech różnych technologii wytwarzania, a mianowicie spiekania laserowego, toczenia i techniki druku 3D. Autorka przedstawia również główną tezę pracy, zgodnie z którą mówi, że możliwe jest zmniejszenie aberracji chromatycznych układów THz przy pomocy optyki dyfrakcyjnej, a którą w następnych rozdziałach będzie starała się udowodnić. W końcowej części rozdziału pierwszego przedstawia także z skrócie układ pracy oraz zawartość merytoryczną poszczególnych rozdziałów, a także publikacje naukowe związane bezpośrednio z pracą doktorską oraz dotyczące pokrewnej tematyki badawczej.

W rozdziale drugim zostały przedstawione podstawowe zagadnienia teoretyczne związane z pracą. Przystawiono właściwości i zastosowania promieniowania terahercowego, a także parametry kilku materiałów często wykorzystywanych na elementy optyczne w tym zakresie spektralnym. Zawarto również podstawy teoretyczne w postaci informacji o optycznej funkcji przenoszenia, odpowiedzi impulsowej układu, funkcji rozmycia punktu dla promieniowania monochromatycznego i rozszerzenie definicji na promieniowanie polichromatyczne, a także wpływ aberracji na funkcję przenoszenia. Omówiono również kilka przykładów dyfrakcyjnych elementów optycznych, które realizować można w zakresie THz, takich jak aksikony, elementy optyczne tzw. „miecze świetlne” oraz elementy wieloogniskowe. Wyprowadzono lub przedstawiono zaczerpnięte z literatury wzory na radialną zmianę fazy dla tych elementów na podstawie zasady zachowania energii. Wprowadzono Czytelnika również w podstawy zmodyfikowanej metody propagacji wiązki, która była podstawowym narzędziem, wykorzystywanym przez Autorkę, w modelowaniu wspomnianych wcześniej elementów optycznych. Jest to metoda autorska opracowana przez Promotora pracy i opublikowana w 1995 roku w *Optics Communications*.

W rozdziale trzecim Autorka przeanalizowała wpływ procesu projektowania struktur z zastosowaniem przybliżenia przyosiowego na ich wydajność w przypadku poosiowego skupiania energii. Dodatkowo, przeanalizowany został również kształt ogniska w zależności od rodzaju struktury. Symulacje wykonane zostały przy pomocy programu Light Sword 6.0 dostępnego w Pracowni Informatyki Optycznej na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej. Wpływ procesu projektowania z lub bez uwzględnienia przybliżenia przyosiowego Autorka zilustrowała dla dwóch soczewek sferycznych, zakodowanych w formie kinoformu pierwszego i drugiego rzędu oraz wcześniej wspomnianego elementu typu miecz świetlny, zakodowanego także w formie kinoformu pierwszego rzędu, oświetlonych monochromatyczną falą płaską dla trzech częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego. Dzięki symulacjom numerycznym Autorka udowodniła, iż struktury zaprojektowane bez przybliżenia przyosiowego mają od kilku do kilkunastu razy wyższą wydajność skupianego promieniowania. Biorąc to pod uwagę, a także duże kąty ugięcia promieniowania (duże apertury numeryczne) w dalszej części pracy Autorka rozważa jedynie założenie braku przybliżenia przyosiowego.

W rozdziale czwartym przedstawione zostały rezultaty modelowania komputerowego działania różnych rodzajów struktur dyfrakcyjnych, które zostały oświetlone promieniowaniem polichromatycznym z zakresu THz. Autorka wybrała pięć

elementów dyfrakcyjnych ze względu na ich charakterystykę i potencjalne właściwości achromatyczne. Są to te same elementy, które wspomniane były w rozdziale trzecim, a także aksikon wsteczny logarytmiczny oraz struktura wieloogniskowa. W pracy zbadane zostały funkcje rozmycia punktu (PSF) i rozkłady natężenia promieniowania wzdłuż osi optycznych dla trzech częstotliwości: projektowanej 0.3 THz i skrajnych z rozpatrywanego zakresu częstotliwości, tj. 0.15 THz i 0.6 THz. Badania te miały na celu analizę działania zaprojektowanych elementów przy oświetleniu promieniowaniem monochromatycznym, o ściśle określonych częstotliwościach. Ponadto, w podrozdziałach 4.3 i 4.4, przeprowadzone zostały dwa eksperymenty numeryczne badające działanie struktur oświetlonych promieniowaniem polichromatycznym. Autorka obliczyła maksymalne natężenia promieniowania wzdłuż osi optycznej struktur w celu uzyskania wykresu aberracji chromatycznych oraz wyznaczyła funkcję przenoszenia tych struktur dla promieniowania polichromatycznego z zakresu długości fali od 0.5 mm do 2 mm. Według mnie najbardziej wartościowe w tym rozdziale są symulacje komputerowe wykresu aberracji chromatycznych i wyniki modelowania komputerowego przedstawiające funkcje OTF dla wszystkich elementów oświetlonych promieniowaniem polichromatycznym (Rys. 4.3 i 4.4). Przedstawiają one (na razie numerycznie) możliwości opracowania elementów dyfrakcyjnych, które charakteryzują się mniejszymi aberracjami chromatycznymi w zakresie THz.

W rozdziale piątym Autorka przedstawia eksperymentalną weryfikację wcześniej wykonanych symulacji numerycznych. Opisuje precyzyjnie układ eksperymentalny, który składa się z przestrajalnego źródła promieniowania THz i detektorów w postaci różnych diod Schottky'ego dla różnych częstotliwości oraz badanych elementów dyfrakcyjnych wytworzonych za pomocą selektywnego spiekania laserowego z materiału PA12. Podobnie jak w rozdziale czwartym, przedstawione zostały wyniki analizy funkcji rozmycia punktu, przekroje wzdłuż osi optycznej, wykresy aberracji chromatycznych, analiza polichromatycznej optycznej funkcji przenoszenia, a także porównanie wyników modelowania komputerowego i wyników eksperymentalnych dla wszystkich rozważanych wcześniej elementów dyfrakcyjnych. Również tu pragnę podkreślić dużą wartość naukową danych przedstawionych na wykresie aberracji chromatycznych oraz wyniki eksperymentalne przedstawiające funkcje OTF dla wszystkich elementów oświetlonych promieniowaniem polichromatycznym, które pomimo faktu, iż zostały zarejestrowane z dość dużym krokiem przestrzennym, jednak w mojej opinii silnie korelują się z obliczeniami numerycznymi.

W rozdziale szóstym Autorka omawia soczewki sferyczne zakodowane jako kinoformy pierwszego i drugiego rzędu wykonane za pomocą różnych metod i materiałów (wcześniej PA12, teraz papier i HDPE). Dla tych dwóch soczewek przedstawione zostały porównania rozkładów PSF dla obliczeń numerycznych i rezultatów eksperymentalnych. Możemy również znaleźć analizę polichromatycznej optycznej funkcji przenoszenia, z której wynika dość dobra zgodność wyznaczonych szerokości połówkowych POTF dla eksperymentu i symulacji. Niejasność budzi jednak Tab. 6.4, która pokazuje dane dla SLH2, natomiast Tab. 6.5 nie podaje szerokości połówkowych dla tego elementu. Więcej w uwagach krytycznych.

Rozdział siódmy zawiera podsumowanie rezultatów pracy i wnioski końcowe. Autorka przedstawiła również możliwości zastosowań opracowanych przez siebie struktur dyfrakcyjnych oraz wspomniała o planowanych dalszych pracach badawczych w tym zakresie.

Z pracą doktorską powiązane bezpośrednio są dwa artykuły:

1. K. Liebert, M. Rachon, J. Bomba, A. Sobczyk, P. Zagrajek, M. Sypek, J. Suszek, A. Siemion, "THz diffractive focusing structures for broadband application", *Photonics Letters of Poland*, 10(3):76–78, 2018;
2. K. Liebert, M. Rachon, A. Kolodziejczyk, M. Sypek, I. Ducin, P. Zagrajek and A. Siemion, "Study of thin, achromatic diffractive structures to focus terahertz radiation on detector", *Optica Applicata*, 50(3), 2020;

Są to publikacje wieloautorskie, w których Autorka jest pierwszym, wiodącym autorem. Do czasu sporządzania tej recenzji prace te nie były jeszcze cytowane (Scopus, na dzień 03.04.2020 r.).

Ponadto, w swoim dorobku posiada ona dwa artykuły dotyczące pokrewnej tematyki, związanej z użyciem optyki dyfrakcyjnej do modyfikacji wiązek terahercowego promieniowania quasi-monochromatycznego:

1. K. Liebert, M. Rachon, A. Siemion, J. Suszek, D. But, W. Knap, M. Sypek, "THz beam shaper realizing fan-out patterns", *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 38(8):1019–1030, 2017.
2. M. Rachon, K. Liebert, A. Siemion, J. Bomba, A. Sobczyk, W. Knap, D. Coquillat, J. Suszek, M. Sypek, "Geometrical aberration suppression for large aperture sub-THz lenses", *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 38(3):347–355, 2017.

Do czasu sporządzania tej recenzji prace te były cytowane odpowiednio 6 i 4 razy (Scopus, na dzień 03.04.2020 r.).

Dodatkowo, rezultaty swoich badań Autorka przedstawiła na jednej konferencji międzynarodowej:

1. K. Liebert, M. Rachon, J. Bomba, A. Sobczyk, A. Siemion, J. Suszek, M. Sypek, "Diffractive focusing structures for broadband application in THz range", 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), strony 1–3. IEEE, 2018.

W pracy przedstawiono następujące nowości w stosunku do aktualnego stanu wiedzy:

1. zaprojektowano, wykonano i zastosowano struktury dyfrakcyjne zwiększające głębokość ostrości do koncentracji promieniowania terahercowego o szerokim zakresie spektralnym,
2. zademonstrowano dwukrotne poszerzenie zakresu spektralnego elementów optycznych w stosunku do istniejącej metody wykorzystującej komputerową optymalizację siatek dyfrakcyjnych do działania szerokopasmowego, praca [15],
3. zrealizowano badania różnych elementów dyfrakcyjnych na zakres THz promieniowania elektromagnetycznego w zależności od procesu ich wykonania i rodzaju materiału, w którego powstały.

Praca jest według mnie przygotowana w sposób merytorycznie poprawny, jest interesująca i posiada aspekty nowości w dziedzinie fizyki. Jednakże, Autorka moim zdaniem nie poświęciła wystarczającej ilości czasu na odpowiednio rygorystyczne przedstawienie swoich bardzo interesujących wyników w formie odpowiedniej dla rozprawy doktorskiej. Uważam, iż jakość zaprezentowania tych wyników i poziom przygotowania pracy jest na poziomie dostatecznym. Poniżej przedstawiam listę uwag i komentarzy, które miałem podczas lektury tej pracy:

1. literówki, gramatyka: „dyfrakcyny” str. 11, „optyczne funkcja przenoszenia” str. 23, „wychądzące”, „płaszczyźnie” str. 27, „ze względu na blisko 99 % współczynniki odbicia w zakresie fal terahercowych” str. 28, „kąten jest różny od zera” str. 29, „pasozytnicze” str. 41, „w infinitezymalnej odcinek o długości”, „odpowiednio”, „płaszczyźnie” str. 47, „zaprojektowana” str. 51, „projektownaiu” str. 59, „katy” str. 60, „płaszczyźnie” str. 85,
2. Rys. 1.2: skoro przedstawiono 4 różne krzywe, należałoby zaznaczyć, co one reprezentują, albo chociaż do której z nich Autorka się odnosi.
3. Autorka wspomina o trzech różnych technologiach wytwarzania badanych struktur dyfrakcyjnych: spiekania laserowego, toczenia i techniki druku 3D. Wszystkie te sposoby są w miarę dokładne, zatem czy spodziewała się różnic wywołanych technologicznie, np. chropowatością wykończonej powierzchni tych struktur, skoro przy $f = 300 \text{ GHz}$ $\lambda = 1 \text{ mm}$, zaś jakość wykończenia tych struktur z pewnością jest $\ll \lambda$ i wszelkie niedokładności powierzchni powinny być w tym zakresie podfalowe. Autorka nie komentuje tego w podrozdziale 6.2, jedynie prezentuje różnice w wynikach, które tłumaczy dokładnością wykonania elementów.
4. Skoro zaprojektowanie elementu dyfrakcyjnego w postaci kinofornu drugiego rzędu pozwala uzyskać działanie w szerszym zakresie spektralnym, to dlaczego wszystkie inne elementy nie były zaprojektowane jako kinoforny drugiego rzędu?
5. strona 16: Autorka twierdzi, iż „Główne aspekty tezy pracy zostały opublikowane w recenzowanych czasopismach ... oraz przedstawione na konferencjach o zasięgu międzynarodowym [18], [19].” Są to dwa artykuły wspomniane wcześniej z 2018 i 2020 roku oraz konferencja z 2018 roku. Jednak w konferencji z odnośnika [19] Autorka pracy nie jest współautorem. Poza tym jest to konferencja z 2015 roku, więc nie bardzo rozumiem jak mogły być tam zaprezentowane główne tezy pracy, które opublikowano dopiero w 2018 i 2020 roku, zaś sama praca złożona została w 2020 roku?
6. strona 20: „HDPE i PTFE mają niski i stały współczynnik absorpcji w rozważanym w pracy zakresie częstotliwości”. Jeśli chodzi o PTFE to mogę się zgodzić, szczególnie dla niższych częstotliwości gdzie zmiana wynosi 5%, dla najwyższej częstotliwości już 50%, jednakże dla HDPE dla najniższej częstotliwości wynosi on 0, potem 0.2 a dla najwyższej jest ponad 3x większy niż dla dwukrotnie niższej częstotliwości. Trudno tu mówić o stałym współczynniku absorpcji.
7. strona 23: „Funkcja rozmycia punktu opisuje odpowiedź impulsową układu optycznego na punktowe niekoherentne przestrzennie źródło promieniowania”. Proszę o podanie przykładu takiego źródła. Zgodnie z teorią, źródło punktowe wytwarza falę sferyczną propagującą się od źródła punktowego o całkowicie

- zdefiniowanym i niestochastycznym froncie falowym / fazie, przez co jest z natury źródłem o pełnej spójności przestrzennej.
8. strona 24: „Wykazano, że modulacyjna funkcja przenoszenia układu obciążonego aberracjami wartości nie większe od funkcji MTF układu pozbawionego tych aberracji” – zdanie wydaje się nie mieć sensu; brakuje tam chyba jednego wyrazu. Rys. 2.3 na szczęście to wyjaśnia.
 9. strona 29: „Elementy optyczne refrakcyjne, czyli skupiające wiązkę promieniowania na detektorze”, a zatem odbiciowe, czy też dyfrakcyjne to takie, które nie skupiają? czy też skupiają na czymś innym niż detektor? To zdanie jest nieprecyzyjne.
 10. strona 35: równanie 2.23 i 2.24. Nie widzę potrzeby zmiany znaku fazy przy przejściu z przybliżenia przyosiowego do nieprzyosiowego. Równanie 2.23 bardzo łatwo wyprowadzić z 2.24, bez zmiany znaku fazy na przeciwny. Byłoby to wtedy bardziej czytelne matematycznie. Tutaj natomiast zapis równań 2.23 i 2.24 sugeruje zmianę znaku fazy przy przejściu z przybliżenia nieprzyosiowego do przyosiowego, czy też odwrotnie.
 11. strona 35: „Wielkość elementu zależy od długości fali”. Nie zgodzę się. Są elementy na zakres widzialny, które są znacznie większe od prezentowanych elementów na zakres THz. Wiem, co Autorka miała na myśli, ale jest to zapisane w nieodpowiedni sposób.
 12. strona 37: aby zachować poprawność matematyczną ze wzorem 2.27 należałoby we wzorze 2.26 użyć λ_{DWL} zamiast λ .
 13. równanie 2.30: nie zdefiniowano parametru α , natomiast poniżej podano nieużywany w równaniu parametr λ , który był wcześniej użyty jako długość fali (np. równanie 2.26).
 14. równanie 2.36: we wzorze powinno być f' , a nie f bez przybliżenia przyosiowego.
 15. równanie 2.39: skoro ma przedstawiać „wydajność dyfrakcyjną kinofornu oświetlonego promieniowaniem o długości fali różnej od projektowanej”, to we wzorze powinna znaleźć się λ_{DWL} zamiast λ .
 16. tabela 2.4: dobrze byłoby jeszcze skomentować zwiększenie intensywności i zawężenie ogniska na rys. d).
 17. strona 43: równania 2.49, 2.50, 2.52, 2.53, nie zgadzają się jednostki.
 18. strona 45: równanie 2.56, czy k to wektor falowy? jeśli tak, a zgodnie z poprzednimi oznaczeniami oznaczenie wektora falowego nie uległo zmianie, to równanie 2.56 jest błędne. Φ to faza bezjednostkowa lub w radianach ($k \cdot x$). Równanie 2.47 – tu znów faza ma jednostkę [1/m] ($ik\Phi$ musi być bezjednostkowe), natomiast w opisie pod równaniem jest bezjednostkowe ($k \cdot x$).
 19. strona 46: dlaczego faza w równaniu 2.58 ma jednostki w [m]? Wcześniej miała już w rad. i [1/m] $\Phi = k \cdot x$, $k\Phi = k^2 \cdot x$. W podrozdziale 2.9.2 jest niekonsekwencja definicji fazy.
 20. strona 48: równanie 2.64: brak informacji o rozkładach $P_G(r)$ i $P_z(z)$ wziętych do całkowania. Skoro są one zależne od r i z , ale raptem nie są całkowane odpowiednio po r i z , tylko zastąpione przez 1 to należało by to skomentować. Zgodnie z dalszym całkowaniem (równanie 2.64) w prawej stronie równania 2.63 nie powinno być rdz tylko dz . Idąc dalej, prawe strony równań 2.61, 2.62, 2.66, 2.70, 2.73 są również błędne.

21. równanie 2.66: lewa strona zakłada transmisję elementu dyfrakcyjnego równą 1, Autorka tego nie komentuje.
22. strona 49: jednostki w równaniu 2.77 nie zgadzają się. Dlaczego zmienna $d\phi/dr$ jest bezjednostkowa, skoro Autorka definiuje r jako promień w jednostkach odległości? To dotyczy pozostałych równań aż do 2.82 włącznie. Co ciekawe, równanie 2.83 (zaczepnięte z literatury – ref. 66) nie ma tego problemu.
23. strona 59, tabela 3.3: czym różnią się opisy „SLH1 p.” od „SLH1”. Nie jest to wyjaśnione.
24. Rozdział 3: Autorka nie porównuje liczbowo rozmiarów ognisk uzyskanych dla różnych elementów optycznych z i bez przybliżenia, albo absolutnych wartości, albo w odniesieniu do długości fali. Używa mało precyzyjnych określeń „większy” i „mniejszy”, które w tym rozdziale i pracy o takiej tematyce powinny być bardziej doprecyzowane.
25. strona 62, tabela 4.1: pojawia się znowu sprawa niezgodności jednostek w równaniu fazy dla aksikonu.
26. strona 63, „Dodatkowo w symulacjach uwzględniony został podkład o grubości 1 mm.”. Autorka nie przedstawia żadnych dodatkowych informacji o rodzaju podkładu i jego wpływie na rezultaty modelowania. Czy był on konieczny? Struktury nie były przecież wolnostojące.
27. strona 67: „Struktura SLH2 poprawnie skupia na zadanej odległości (53 mm) promieniowanie o wszystkich trzech częstotliwościach”. Patrząc na obrazy dla SLH2 w Tab. 4.4 (str. 68) maksimum intensywności po z , który definiuje ognisko zgodnie z teorią dyfrakcji, dla 0.15 THz leży na odległości 46-47 mm, a dla 0.3 THz i 0.6 THz na odległości 49-50 mm, a nie na wspomnianej 53 mm.
28. strona 69 i Rys. 4.3: „na wykresie przedstawionym na Rys.4.3 czerwonym kolorem zaznaczony został poziom f_{des} .”. Nie jest to prawdą, ponieważ zaznaczony jest na wykresie kolorem czerwonym poziom zerowy, a zakładam, że Autorka nie projektowała optyki o ogniskowej $f_{des} = 0$. Na rysunku zaznaczono natomiast poziom $W = 0$ dla którego odległość $Z = f_{des}$.
29. strona 70: „Współczynnik kierunkowy linii trendu przyjmuje najmniejsze wartości dla elementu LS”. Z wykresu wynika, iż najbardziej achromatyczny jest element wieloogniskowy – dla różnych częstotliwości $W \sim 0$, więc tam współczynnik kierunkowy (nachylenie) linii trendu powinno również być ~ 0 .
30. strona 83, Rys. 5.3: co było powodem ograniczenia częstości przestrzennych na wykresie dla elementu LS? Czy było to związane z krokiem dwuwymiarowego skanu wynoszącym 1 mm?
31. strona 69 i 95: niekonsekwencja w ilości częstotliwości w przypadku rozważania promieniowania polichromatycznego: podrozdział 4.3 mówi o sumowaniu 38 częstotliwości, zaś rozdział 7 – 30 częstotliwości. Proszę o wyjaśnienie.

Moje uwagi i komentarze zostały przekazane Autorce pracy.

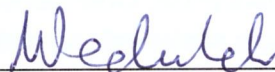
Mam również kilka pytań, które narodziły się podczas lektury rozprawy. Chciałbym zatem poprosić Autorkę o odniesienie się podczas publicznej obrony do punktów 4, 7, 26, 29-31.

Podsumowując, uzyskane przez Autorkę wyniki są bardzo ważne z punktu widzenia rozwoju polichromatycznej optyki dyfrakcyjnej na zakres terahercowy, ale

również na inne zakresy spektralne. Nie widzę większych przeszkód, aby podobna metodologia znalazła zastosowanie w zakresie podczerwieni, widzialnym, czy nawet w zakresie promieniowania rentgenowskiego, oczywiście biorąc pod uwagę różny sposób oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z tych zakresów spektralnych z materią. Praca porusza problemy jak najbardziej aktualne i budzące duże zainteresowanie w środowisku naukowym, jednocześnie przedstawiając sposób ich rozwiązania. Kolejne przykłady elementów dyfrakcyjnych zaprojektowanych, wykonanych i przebadanych przez Autorkę są przedstawione sukcesywny i logiczny. Stwierdzam, iż rozprawa jest merytorycznie poprawna. Jej układ i struktura nie budzą zastrzeżeń. Jest napisana w sposób zwarty, prostym i zrozumiałym językiem. Pomimo faktu niestaranności w przygotowaniu samej rozprawy i całej długiej liście moich uwag i komentarzy, na której, oprócz typowych błędów edytorskich, są również usterki poważniejsze, w wywodach matematycznych oraz pojedyncze błędy merytoryczne, to jednak nie mogę nie docenić wysiłku oraz interesujących rezultatów badań przedstawionych przez Autorkę. Pod tym kątem uważam pracę za wartościową, posiadającą aspekty nowatorskie oraz interesującą z fizycznego i optycznego punktu widzenia. Wyniki swoich badań Autorka przedstawiła i omówiła w sposób przejrzysty i jasny, odnosząc się do treści zawartych w publikacjach naukowych swojego autorstwa, nie pomijając jednak doniesień innych grup badawczych. Wyciągnięte wnioski są poprawne i przekonujące.

Bazując na przedstawionej pracy mogę stwierdzić, iż jej wykonanie wymagało od Autorki dogłębnego zrozumienia zjawisk zachodzących w czasie propagacji, dyfrakcji i interferencji promieniowania elektromagnetycznego przez obiekty (dyfrakcyjne elementy optyczne), co pozwoliło jej na opracowanie interesujących przykładów szerokopasmowych elementów dyfrakcyjnych na zakres THz promieniowania elektromagnetycznego. Aby tego dokonać musiała opanować szeroki zakres wiedzy z fizyki (optyki) i matematyki oraz posiadała profesjonalne umiejętności pracy w laboratorium optycznym. Zdobyta wiedza pozwoliła jej na samodzielne posługiwanie się nią i wyrażanie nowatorskich idei przedstawionych w jej pracy doktorskiej.

Zatem z przekonaniem uważam, iż przedstawione w pracy wyniki badań spełniają wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie magister Karoliny Liebert do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



płk prof. dr hab. inż. Przemysław Wachulak