
**XXV Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 20-22 marca 2019**

**SZYBKIE SYSTEMY SKANUJĄCE W PAŚMIE THZ NA
PRZYKŁADZIE SKANERA POCZTY**

Maciej SYPEK

Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

Orteh Sp. z o. o., Ilskiego 25, 04-479 Warszawa

maciej.sypek@orteh.pl

1. WSTĘP

Do grupy nieniszczących badań materiałów w ostatnich latach dołączyły metody oparte na promieniowaniu terahercowym. Na uwagę zasługuje bardzo dobra transmisja promieniowania terahercowego przez niepolarne i niemetaliczne materiały, które przeważnie nie przepuszczają światła widzialnego. Do tego typu substancji zaliczamy takie dielektryki jak papier, tworzywa sztuczne, ubrania, drewno, porcelana, tektura itp. Z drugiej strony długość fali elektromagnetycznej z pasma THz w powietrzu waha się od ułamka milimetra do pojedynczych milimetrów. W artykule opisany został – jako przykład - układ kontroli zawartości przesyłek pocztowych pracujący na częstotliwości 0.3 THz. Należy sprawdzić, czy w kopercie jest tylko papier, czy jest też coś jeszcze. Wymagana szybkość pracy skanera THz w sortowni listów to typowo kilkadziesiąt kopert A4 na sekundę. W przypadku, gdy w kopercie zawarte jest coś poza papierem, koperta jest odrzucana, a następnie kierowana do specjalistycznego zbadania.

2. NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW

Badania nieniszczące urządzeń i konstrukcji stanowią grupę metod badawczych, które dostarczają informacji o własnościach materiału obiektu, nie wpływając w istotny sposób na jego właściwości strukturalne i powierzchniowe.

Zgodnie z definicją [1] w odniesieniu do maszyn i urządzeń możemy rozważać następujące rozwiązania:

- badania wizualne, czyli oględziny zewnętrzne;
- badania endoskopowe;
- badania penetracyjne;
- badania magnetyczno-proszkowe;
- badania ultradźwiękowe;
- badania prądami wirowymi;
- radiografia przemysłowa.

Powyższą listę warto rozszerzyć o dodatkowe metody, nad którymi pracował autor niniejszego opracowania. Chronologicznie chciałbym wspomnieć o holografii optycznej [2] (w paśmie światła widzialnego). W najprostszym przypadku metoda bazuje na zapisie dwóch hologramów badanego elementu na jednej i tej samej kliszy fotograficznej. Zapis pierwszego hologramu następuje przed obciążeniem obiektu, a kolejnego, po przyłożeniu obciążenia. W tym drugim przypadku obiekt ulega minimalnemu odkształceniu. Na odtworzonym z

hologramu obiekcie widoczny jest rozkład prążków interferencyjnych. Analiza komputerowa rozkładu prążków prowadzi do trójwymiarowej mapy odkształceń obiektu. Dokładności pomiaru odkształceń są na poziomie ułamka długości fali stosowanej do odczytu czy zapisu hologramu, czyli plasują się na poziomie 10^{-7} m. Analiza rzeczywistych odkształceń porównana z założeniami projektowymi świadczy o braku lub obecności wewnętrznych wad badanego obiektu. W praktyce przemysłowej możemy zastosować tzw. holografię cyfrową [3]. Czyli hologram nie jest zapisywany na kliszy fotograficznej (warunki ciemni, obróbka chemiczna kliszy) a na odpowiedniej matrycy CMOS lub CCD. Natomiast odtworzenie i złożenie obu hologramów następuje komputerowo. Do wad metody trzeba zaliczyć obecność zestawu, który przykłada i usuwa mechaniczne obciążenie badanego elementu. Wpływa to na złożoność całego układu pomiarowego a także na jego szybkość działania. Drugim poważnym ograniczeniem są maksymalne rozmiary badanego elementu. W praktyce nie przekraczają one kilkudziesięciu cm dla każdego z kierunków x, y, oraz z.

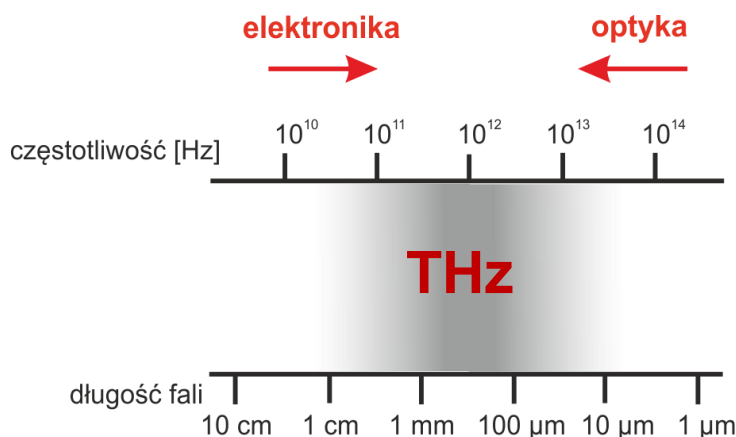
Kolejną metodą, o której warto dodatkowo wspomnieć jest termowizja aktywna [4]. W podstawowej wersji metoda polega ona na cyklicznym podgrzewaniu obiektu (promienniki podczerwieni, ultradźwięki, prądy wirowe) z częstotliwością mHz. Równolegle bada się termiczną odpowiedź widoczną na powierzchni obiektu. Analiza lock-in (fazowa) nagranych filmów (najczęściej kilkadziesiąt klatek na sekundę, całe nagranie trwa pojedyncze minuty) pozwala na zobrazowanie ukrytych wad i niejednorodności obiektu. Do wad metody należą ograniczona rozdzielczość przestrzenna oraz czas badania. Ponadto głębokość penetracji jest ograniczona i silnie zależy od materiału.

Warto podkreślić, że do grupy nieniszczących badań materiałów w ostatnich latach dołączyły metody oparte na promieniowaniu terahercowym.

3. PROMIENIOWANIE TERAHERCOWE

W widmie promieniowania elektromagnetycznego możemy wyróżnić pewien pas częstotliwości, który - do niedawna - był pomijany. Mowa tutaj o paśmie, które znajduje się pomiędzy mikrofalowym i podczerwonym zakresem widma promieniowania elektromagnetycznego (Rys. 1.).

Promieniowanie to, ze względu na przedział wartości częstotliwości, zostało nazwane promieniowaniem terahercowym bądź też promieniowaniem THz. Warto zaznaczyć, że w paśmie promieniowania terahercowego, ze względu na jego charakterystyczne położenie, można wykorzystać połączenie udoskonalonych technik stosowanych w obu sąsiadujących zakresach, elektroniki i optyki.



Rys. 1. Promieniowanie terahercowe a widmo promieniowania elektromagnetycznego [5]

Promieniowanie terahercowe zostało po raz pierwszy zaobserwowane ponad 100 lat temu [6]. Pomimo tego do dziś pozostaje najmniej zbadanym rejonem widma. Wynika to głównie z braku tanich i kompaktowych źródeł oraz detektorów tego typu promieniowania, bowiem nie można przy ich produkcji wykorzystać przemysłowych metod z sąsiednich zakresów. Brak odpowiedniej technologii spowodował, że zakres ten nazywany jest również „THz gap”. Dzięki dużemu postępowi technologicznemu ta „terahercowa luka” w ostatnich 20 lat stopniowo zanika

Jak wcześniej wspomniano granice widm promieniowania elektromagnetycznego często są nieostre. W związku z tym promieniowanie terahercowe nie doczekało się jeszcze ścisłej definicji. Powszechnie stosowany zakres zawarty jest w paśmie od 0.1 do 30 THz. Z drugiej strony przedział promieniowania elektromagnetycznego od 10 do 30 THz pokrywa się z zakresem dalekiej podczerwieni oraz – częściowo - z zakresem średniej podczerwieni. Dlatego też w niniejszym artykule przyjmiemy, że promieniowanie terahercowe jest promieniowaniem elektromagnetycznym o częstotliwości od 0.1 do 10 THz co odpowiada – w powietrzu - długościom fal z zakresu od 30 μm do 3 mm.

Charakter promieniowania terahercowego sprawia, że pomimo problemów w jego generacji i detekcji, zainteresowanie nim z roku na rok szybko wzrasta. Charakterystyczne dla pasma THz są:

- Znaczne tłumienie w atmosferze ziemskiej w porównaniu z sąsiednimi zakresami widma promieniowania elektromagnetycznego. Z drugiej strony występują obszary („okna atmosferyczne”) częstotliwości o względnie małym tłumieniu. Duże tłumienie promieniowania terahercowego spowodowane jest obecnością w atmosferze różnego rodzaju molekuł, które posiadają linie absorpcyjne w zakresie fal THz. Absorbpcja wynika z ruchu rotacyjnego i wibracyjnego molekuł. Dominującym procesem w tym zjawisku jest absorpcja przez parę wodną zawartą w powietrzu [7].
- Bardzo dobre odbicie promieniowania terahercowego od powierzchni metalicznych, z racji dużej przewodności elektrycznej metali [7].
- Bardzo dobra transmisja promieniowania terahercowego przez niepolarne i niemetaliczne materiały, które przeważnie nie przepuszczają światła widzialnego. Do tego typu substancji zaliczamy dielektryki takie jak papier, tworzywa sztuczne, ubrania, drewno, porcelana, tektura itp. [7].
- Substancje polarne oświetlone promieniowaniem terahercowym wykazują silne właściwości absorpcyjne i dyspersyjne. Jest to związane z charakterystyczną budową cząsteczek umożliwiającą ruchy rotacyjne oraz wibracyjne. W ogólności wspomniane oscylacje są charakterystyczne dla każdej z substancji i stanowią swego rodzaju „finger prints” w postaci pików absorpcyjnych [7].
- Fotony z zakresu promieniowania terahercowego mają niską energię równą ok. 4 meV dla częstotliwości 1 THz. Jest to rzędu miliona razy mniej niż energia fotonu z zakresu promieniowania X [8].
- W związku z niską energią fotonu promieniowanie terahercowe nie powoduje jonizacji tkanek, w przeciwieństwie do promieniowania rentgenowskiego. Ponadto ze względu na silną absorpcję wody promieniowanie THz nie wnika do wnętrza naszego ciała tak głęboko jak to mogą zrobić mikrofałe. Dlatego też nawet jeśli powodowałoby ono jakieś zagrożenie to ryzyko ewentualnych powikłań ograniczone jest tylko do zewnętrznej warstwy skóry. Z tego wynika, że promieniowanie terahercowe jest bezpieczne zarówno dla operatora jak i samych badanych tkanek.

Proces obrazowania w zakresie THz opiera się bardziej na zjawisku odbicia fali niż na zjawisku rozproszenia, co jest z kolei typowe dla światła widzialnego.

Rozdzielczość przestrzenna uzyskanych obrazów jest powiązana z długością fali promieniowania THz w danym ośrodku i waha się w praktyce od kilkudziesięciu mikrometrów do pojedynczym milimetrów.

Promieniowanie THz można znacznie łatwiej skupiać i kolimować niż dłuższe fale centymetrowe.

W tym miejscu można podać już pewne przykładowe, aplikacyjne rozwiązania techniczne bazujące na użyciu promieniowania THz w dziedzinie badań nieniszczących.

Zdalne wykrywanie niebezpiecznych przedmiotów (broń palna metalowa lub kompozytowa, broń biała metalowa lub ceramiczna, ładunki wybuchowe lub ich komponenty) umieszczonych pod ubraniem.

Zdalne wykrywanie zakopanych, niebezpiecznych obiektów w warunkach suchego podłoża lub pod warstwą suchego asfaltu czy betonu.

Nieinwazyjne, zdalne wykrywanie urządzeń podsłuchowych umieszczonych pod powierzchnią ściany.

Nieinwazyjne, zdalne metody badania materiałów potencjalnie niebezpiecznych w oparciu o analizę obrazową i spektralną.

Nieinwazyjne metody badania dzieł sztuki w oparciu o analizę obrazową i spektralną w transmisji i odbiciu.

Analiza powierzchni skóry człowieka w celu wykrycia zmian rakowych w diagnostyce medycznej. Dodatkowo, analiza w czasie rzeczywistym tkanki, którą należy usunąć podczas zabiegu chirurgicznego. Metody te łączą często zarówno podejścia bazujące na obrazowaniu jak też i analizie spektralnej.

Układy kontroli na liniach produkcyjnych badające zawartość opakowań z tektury lub tworzyw sztucznych. Jako przykłady można podać nalewaki cieczy do nieprzezroczystych butelek, badanie, czy w tekturowym pudełku są wszystkie czekoladki, kapsułki w kawę itp. W ten sposób można prowadzić nadzór linii produkujących wyroby medyczne. Sprawdzamy, czy w opakowaniu z tworzywa sztucznego (jeszcze przed oklejeniem metalizowaną folią z nadrukiem) są prawidłowo ułożone tabletki, czy jest ich odpowiednia ilość, czy nie „wpadła” uszkodzona tabletką lub jej część.

Wspomniane metody nie wymagają zwykle dużej dynamiki, w skrajnym przypadku wystarcza 1 bit (jest/brak), ale wymagają dużej szybkości pracy (kilka/kilkadziesiąt pudełek na sekundę).

Z drugiej strony warto jednak dodać, że znane są systemy nieniszczącej diagnostyki w paśmie THz – np. systemy liczące banknoty, badające ich znaki wodne – wymagające dynamiki 16, a nawet 32 bitowej.

Układy kontroli zawartości przesyłek pocztowych. Należy sprawdzić, czy w kopercie jest tylko papier, czy jest też coś jeszcze. Wymagana szybkość pracy skanera THz w

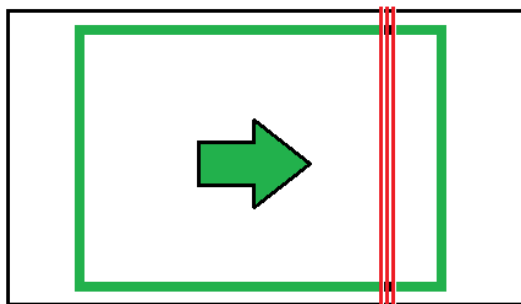
sortowni listów to typowo kilkadziesiąt kopert A4 na sekundę. W przypadku, gdy w kopercie zawarte jest coś poza papierem, koperta jest odrzucana, a następnie kierowana do specjalistycznego zbadania (promieniowanie X, spektroskopia masowa itp.). Należy jednak pamiętać, że taka procedura trwa całe sekundy czy też minuty w odniesieniu do pojedynczej przesyłki.

W dalszej części pracy zostanie bardziej szczegółowo opisany system szybkiego skanera pocztowego. Generalnie można założyć, że podstawowe komponenty systemu to:

- źródło promieniowania THz;
- pracujący w paśmie THz „optyczny” układ oświetlający;
- pracujący w paśmie THz „optyczny” układ ogniskujący na detektorach;
- macierze/linijki detektorów THz;
- elektroniczne systemy odczytu i procesowania danych bazujące na FPGA;
- oprogramowanie wyższego poziomu kwalifikujące przesyłkę.

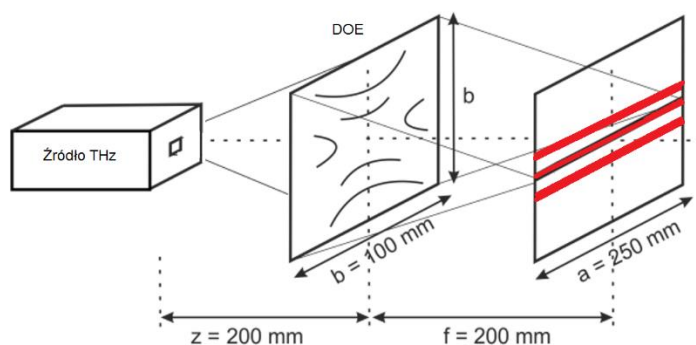
4. SZYBKI SKANER POCZTOWY W PAŚMIE THz.

Zakłada się, że docelowe rozwiązanie jest zintegrowane z urządzeniem sortującym z napędem pneumatycznym, który zapewnia szybkość pracy rzędu dziesiątek kopert na sekundę. Zakłada się również, że w obszarze skanowania koperta przesuwa się ze stałą prędkością kilku, kilkunastu metrów na sekundę. Maksymalna grubość pojedynczej koperty wynosi 10 - 15 mm. Szerokość obszaru skanowania to 250 mm. Jedynym elementem ruchomym w systemie jest sama koperta. Koncepcja procesu skanowania przedstawiony jest na rysunku (Rys. 2.). Element ruchomy – kopertę A4 - zaznaczono na zielono.



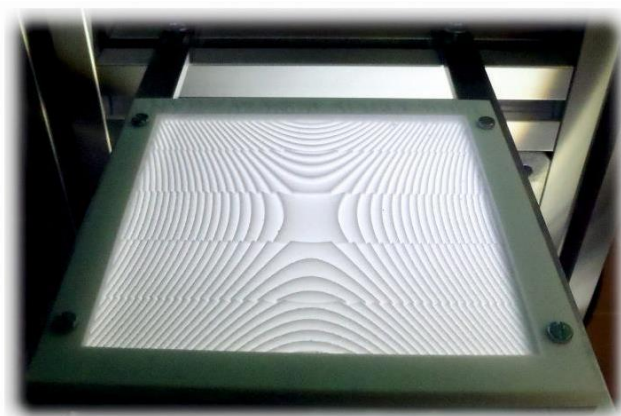
Rys. 2. Koncepcja układu skanującego

Do oświetlenia koperty promieniowaniem pasma THz zostało zastosowane źródło VDI [9] pracujące na częstotliwości 0.3 THz i mocy 18 mW. Odpowiada to długości fali 1 mm w powietrzu. Kolejny rysunek (Rys. 3.) przedstawia układ optyczny, który dokonuje projekcji 3 pasków o długości 250 mm każdy i szerokości połówkowej c.a. 2 mm. Paski są odległe od siebie o 5 mm (zaznaczone kolorem czerwonym na Rys. 2).



Rys. 3. Układ oświetlający [10]

Głównym elementem układu oświetlającego skanera jest dyfrakcyjny element optyczny (DOE) o rozmiarach roboczych 100 mm na 100 mm, który łączy w sobie trzy funkcje. Po pierwsze element kolimuje rozbieżną wiązkę promieniowania THz pochodzącą ze źródła. Po drugie element dokonuje projekcji odcinka o długości 250 mm w płaszczyźnie skanowanej koperty, czyli długości większej niż bok apertury DOE. Po trzecie powiela pojedynczy pasek w trzy paski. Z punktu widzenia optyki dyfrakcyjnej element łączy w sobie cechy nieprzyosiowo projektowanej sferycznej soczewki skupiającej z nieprzyosiowo projektowaną soczewką hiperboliczną oraz fazową, specjalnie optymalizowaną siatką dyfrakcyjną. Metody nieprzyosiowego projektowania użyto ze względu na duże wartości kątów ugięcia. Element DOE (Rys. 4.) został wykonany z poliamidu (PA12) przy użyciu techniki druku 3D (SLS – selective laser sintering). Współczynnik załamania materiału PA12 przy częstotliwości 0.3 THz wynosi 1.59.



Rys. 4. Dyfrakcyjny element optyczny (DOE) wykonany metodą druku 3D [10]

Promieniowanie pasma THz, po przejściu przez badaną kopertę trafia na macierz detektorów. Pojedynczy panel detektorów składa się z trzech linijek po 12 detektorów każda. Średnica czynna każdego detektora wynosi 1.8 mm. Odległość pomiędzy środkami detektorów w linii wynosi 5 mm. Jak wspomniano odległość pomiędzy linijkami wynosi 5 mm. Na zdjęciu (Rys. 5.) widoczne jest przesunięcie każdego z trzech pasków o $5/3$ mm względem siebie. Rozwiązanie takie – w połączeniu z projekcją trzech pasków przez element DOE – zwiększa rozdzielczość przestrzenną skanera. W celu zapewnienia szerokości analizowanego pola równej 240 mm stosuje się 4 panele o szerokości 60 mm każdy. W sumie w systemie skanera zamontowano $4 \times 36 = 144$ detektory, które pozwalają – z pewnym zapasem – na analizę zawartości koperty A4 (210 x 197 mm). Jako detektory wykorzystywano pracujące w pasmach 8-12 i 18-27 GHz (pasma X i K) tranzystory typu HEM FET w obudowach ceramicznych lub dedykowane detektory bazujące na GaN wykonywane w Unipress (Instytut Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk). Należy jednak pamiętać, że w przypadku użycia komercyjnych tranzystorów pracujących w pasmach X i K, a wykonanych w technologii GaAs, elementy te działały nie jako wzmacniacze wysokiej częstotliwości, ale jako detektory wykrywające plazmony powierzchniowe [11] generowane przez promieniowanie o częstotliwości 0.3 THz. Graniczna częstotliwość wykrywanej modulacji promieniowania 0.3 THz (300 GHz) sięga 1 GHz. Parametr NEP (Noise Equivalent Power) określający czułość każdego z detektorów jest na poziomie od kilkudziesięciu do kilkuset pikowatów dzielonych przez pierwiastek z Hz. Warto dodać, że komercyjne tranzystory na bazie GaAs mają bardzo powtarzalne parametry jako wzmacniacze. Niestety wykorzystywane niestandardowo – jako detektory – mają już bardzo duże wahania parametrów. Z tego powodu zostały opracowane zaawansowane procedury kalibracji, które ustawiają niezależnie każdy z 144 detektorów w odpowiednim punkcie charakterystyki. Przeprowadzenie wspomnianego procesu kalibracji zapewnia

powtarzalność parametrów każdego tranzystora pracującego jako detektor promieniowania o częstotliwości 0.3 THz.



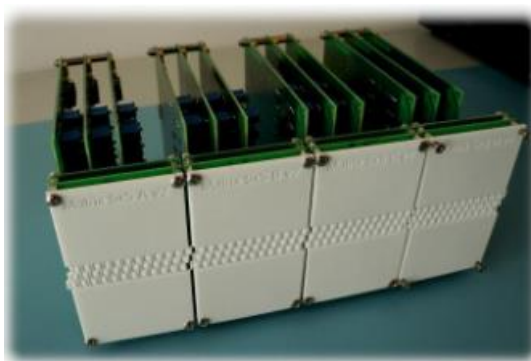
Rys. 5. Pojedynczy panel 3 x 12 detektorów

W celu dodatkowej poprawy parametrów układu stosujemy macierze soczewek [12] wykonane również z poliamidu PA12 przy użyciu techniki druku 3D. Zadaniem macierzy soczewek (Rys. 6.) jest lepsze skupienie promieniowania na detektorach i zmniejszenie przesłuchów optycznych pomiędzy detektorami. Macierz soczewek składa się z pojedynczych soczewek o prostokątnej aperturze 5 x 5 mm. Każda z soczewek ma ogniskową 5 mm. Jak wcześniej wspomniano pod każdą soczewką umieszczony jest detektor o efektywnej średnicy 1.8 mm czyli powierzchni około 2.5 mm². Powierzchnia pojedynczej soczewki wynosi 25 mm². Czyli – uwzględniając odbicia fresnelowskie i tłumienie materiału – zastosowanie soczewki zwiększa czułość systemu kilkukrotnie (w idealnym przypadku 10 razy).



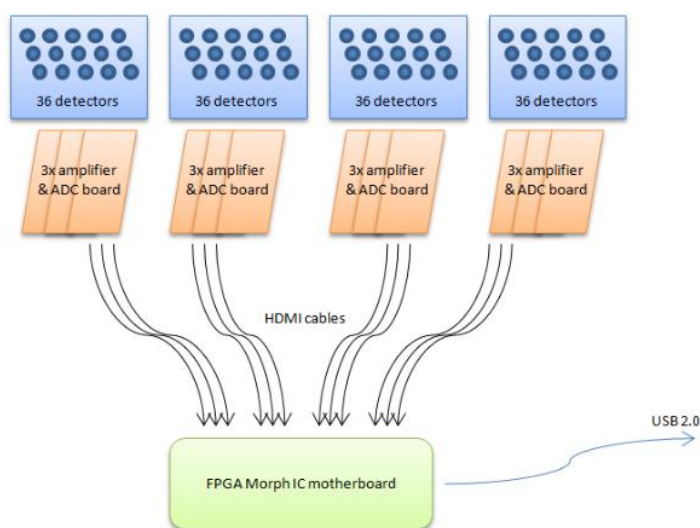
Rys. 6. Macierze soczewek wykonane metodą druku 3D

Kolejny rysunek (Rys. 7.) przedstawia 4 zmontowane panele z zamontowanymi macierzami soczewek. Dzięki temu możliwe jest skanowanie kopert do szerokości 240 mm.



Rys. 7. Zmontowane 4 panele detektorów z zamontowanymi macierzami soczewek

Dosyć zaawansowany jest sposób odczytu sygnałów z każdego panelu. Ze względu na oczekiwaną prędkość odczytu nie stosuje się multipleksacji. W szybkim skanerze pocztowym stosowany jest odczyt równoległy każdego z detektorów. Czyli każdy z detektorów posiada dedykowany przetwornik analogowo cyfrowy (12-14 bitów). Szybkość niezależnego odczytu każdego z detektorów to 100 kHz. W dalszej części toru cyfrowego stosowane są specjalnie opracowane, własne, szybkie standardy transmisji danych wspomagane układami FPGA (Bezpośrednio programowalna macierz bramek - od ang. field-programmable gate array). Stosowane są też zaawansowane algorytmy uśredniania i przetwarzania danych. Algorytmy te poprawiają stosunek sygnału do szumu. Dzieje się to jednak kosztem zmniejszenia efektywnego próbkowania w czasie do zakresu 1 - 10 kHz. Z drugiej strony odpowiada to jednak maksymalnej prędkości skanowania w przedziale 5-50 m/s co odpowiada skanowaniu w praktyce 15-150 kopert A4 na sekundę. Wstępne przetwarzanie danych przez FPGA umożliwia redukcję ilości przesyłanych danych do poziomu akceptowanego przez standard USB 2.0. Rysunek (Rys. 8.) przedstawia schemat blokowy części elektronicznej.



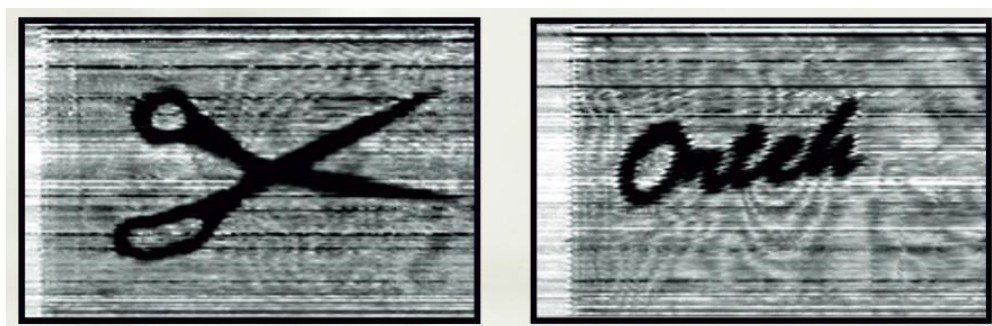
Rys. 8. Schemat blokowy części elektronicznej skanera



Rys. 9. Widok wnętrza skanera (zdjęta ściana boczna)

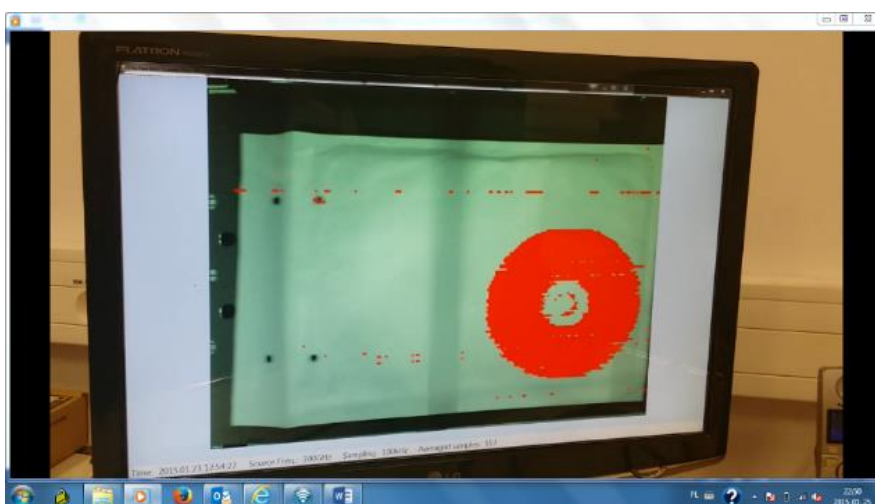
Działający skaner (Rys. 9) umożliwił analizę zawartości kopert A4 (nożyce, logo firmy Ortech wycięte w folii metalowej). Widoczne są jednak dodatkowe prążki interferencyjne (Rys.

10.) spowodowane odbiciami promieniowania THz od dolnej i górnej powierzchni koperty. Dzieje się tak ze względu na bardzo wysoką koherencję czasową źródła promieniowania THz.



Rys. 10. Przykładowe skany zawartości koperty A4

W celu zmniejszenia koherencji źródła wymuszono szybkie (z częstotliwością rzędu kilkunastu kHz) wahania częstotliwości w granicach 0.28-0.29 THz. Dodatkowo skaner został wyposażony w kamerę działającą w świetle widzialnym. Dzięki temu urządzenie umożliwiło pracę w trybie „fusion vision” (Rys. 11.) łączącym obrazowanie w świetle widzialnym górnej powierzchni koperty z obrazem zawartości koperty uzyskanym przy częstotliwości 0.28 – 0.29 THz w transmisji.



Rys. 11. Przykładowy skan zawartości koperty A4 w trybie „fusion vision”

5. PODSUMOWANIE I DALSZE PRACE.

Z kontaktów z zespołami pracującymi w dziedzinie badań nieniszczących wynika, że zadania polegające na analizie obiektów, elementów, nadzór linii produkcyjnej o prędkości wielu metrów na sekundę nie są zadaniami trywialnymi. Z reguły stosowane metody są zbyt wolne lub brakuje – przy znacznych prędkościach skanowania – czułości detektorów. Z kolei stosowanie bardzo mocnych źródeł promieniowania jest problematyczne. Można tu podać za przykład radiografię przemysłową bazującą na promieniowaniu X czy też γ .

Okazuje się, że wykorzystanie niejonizującego promieniowania terahercowego na poziomie kilkunastu mW umożliwia szybkie procesy skanowania z zachowaniem dostatecznej rozdzielczości i dynamiki.

Ze względu na wysoką koherencję czasową źródeł promieniowania THz można – przyszłościowo - rozważyć zastosowanie metod analogicznych do holografii cyfrowej.

Techniki ta prawdopodobnie umożliwią badanie objętości obiektów przestrzennych. W odniesieniu do zastosowań pocztowych pozwoli to na szybkie skanowanie obiektów typu paczka. Wymagać to będzie jednak macierzy detektorów o znacznie wyższych rozdzielczościach.

6. PODZIĘKOWANIA.

Budowa terahercowego skanera pocztowego pierwszej generacji została sfinansowana w ramach grantu sponsorowanego przez Marszałka Województwa Mazowieckiego. Naukowa i techniczna strona przedsięwzięcia była możliwa dzięki współpracy z grupą prof. Wojciecha Knapa.

7. LITERATURA

- [1] P. Zientek, "Metody badań nieniszczących wybranych elementów konstrukcji turbozespołu małej mocy ", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* Nr 3/2016 (111).
- [2] U. Schnars, H-J. Hartmann, and W. Jüptner "Digital recording and numerical reconstruction of holograms for nondestructive testing", *Proc. SPIE 2545, Interferometry VII: Applications*, (23 June 1995)
- [3] U. Schnars, W. Jüptner „Digital recording and reconstruction of holograms in hologram interferometry and shearography” (*Applied Optics*, vol. 33, no. 20, 1994)
- [4] O. Breitenstein, W. Warta, M. Langenkamp, „Lock-in thermography, basics and use for evaluating electronic devices and materials”, *Springer Series*, 2010.
- [5] M. Doch, „Porównanie właściwości optycznych elementów dyfrakcyjnych projektowanych przyosiowo i nieprzyosiowo dla pasma THz”, *Praca magisterska na WF PW, Warszawa*, 2015.
- [6] G. Gallerano, Overview of terahertz radiation sources, *Proceedings of the 2004 FEL Conference*, pp. 216 - 221.
- [7] Y.Lee, *Principles of Terahertz Science and Technology*, Springer, Nowy Jork 2009
- [8] R. E. Milles, X. Zhang, H. Eisele, A. Krotkus. *Terahertz frequency detection and identification of materials and objects*, Springer, Dordrecht 2007.
- [9] <http://www.vadiodes.com>
- [10] J. Suszek i inni, “3-D-Printed Flat Optics for THz Linear Scanners”, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, Volume: 5 Issue: 2 , p. 314-316, (2015)
- [11] W. Knap i inni, “Field Effect Transistors for Terahertz Detection: Physics and First Imaging Applications”, *J. Infrared MilliTerahz Waves* 30, 1319-1337 (2009).
- [12] Krzesimir Szukdlarek i inni, “Terahertz 3D printed diffractive lens matrices for field-effect transistor detector focal plane arrays”, *Optics Express*, Vol. 24, Issue 18,p. 20119 (2016) – IF2016 3.307