

Badania nieniszczące materiałów kompozytowych metodą terahercową

Nondestructive testing of composite materials using terahertz method

Streszczenie

Ciągły postęp w elektronice wysokich częstotliwości, fotonice i inżynierii materiałowej umożliwił szybki rozwój technologii terahercowej w ostatniej dekadzie. Badania nad źródłami i detektorami fal elektromagnetycznych w zakresie terahercowym umożliwiają ich zastosowanie w różnych dziedzinach nauki i techniki, począwszy od medycyny i biotechnologii, a kończąc na przemyśle farmaceutycznym, chemicznym i inżynierii materiałowej. W niniejszej pracy przedstawione zostaną wybrane zastosowania w dziedzinie badań nieniszczących, ze szczególnym uwzględnieniem badań materiałów kompozytowych wzmocnionych włóknem szklanym i bazaltowym.

Abstract

Advances in high frequency electronics, photonics and materials science enabled rapid development of terahertz technology in the last decade. Research on reliable sources and detectors of electromagnetic waves in the terahertz range allows their application in various fields of science and technology ranging from medicine and biotechnology to pharmaceutical, chemical and material sciences. In this paper selected applications in nondestructive testing are shown, especially glass and basalt fiber-reinforced composites inspection.

Wstęp

Fale elektromagnetyczne z zakresu terahercowego (o częstotliwości od 0,5 do 10 THz) znajdują coraz szersze zastosowanie w różnych dziedzinach nauki i przemysłu [1]:

- spektroskopii,
- biotechnologii,
- przemyśle farmaceutycznym,
- telekomunikacji,
- bezpieczeństwie publicznym (*Homeland Security*),
- badaniach nieniszczących.

Zakres terahercowy znajdujący się na styku techniki mikrofalowej i podczerwieni (IR) umożliwia uzyskanie wyższej rozdzielczości przestrzennej niż w przypadku techniki mikrofalowej i większej przenikliwości dla nie-

przewodzących materiałów niż badania IR. W związku z trudnościami technologicznymi w generowaniu i detekcji promieniowania terahercowego (zbyt wysokie częstotliwości dla techniki mikrofalowej i zbyt niskie dla tradycyjnych urządzeń optycznych) ten zakres częstotliwości nazywany był *przerwą terahercową (terahertz gap)*. Jest to stosunkowo nowa technologia i podlega dynamicznemu rozwojowi, a wachlarz jej zastosowań ulega ciąglemu rozszerzeniu.

W badaniach nieniszczących technologia terahercowa używana jest do oceny stanu różnych struktur m.in. kompozytów dielektrycznych, powłok i materiałów piankowych [1÷3]. Propagacja fali elektromagnetycznej zależna jest od współczynnika refrakcji n i dzięki temu następujące kategorie wad mogą być wykrywane za pomocą techniki THz: rozwarstwienia, puste przestrzenie, uszkodzenia wywołane czynnikiem mechanicznym lub cieplnym, korozja występująca pod farbą lub powłoką ochronną, lokalny brak kleju w połączeniach klejonych. Zawartość włókien, ich

Dr inż. Przemysław Łopato, dr hab. inż. Tomasz Chady, prof. ZUT – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin.

orientacja i falistość, jak również grubość warstw kompozytów polimerowych mogą być również określane za pomocą impulsowego wzbudzenia i detekcji fal THz.

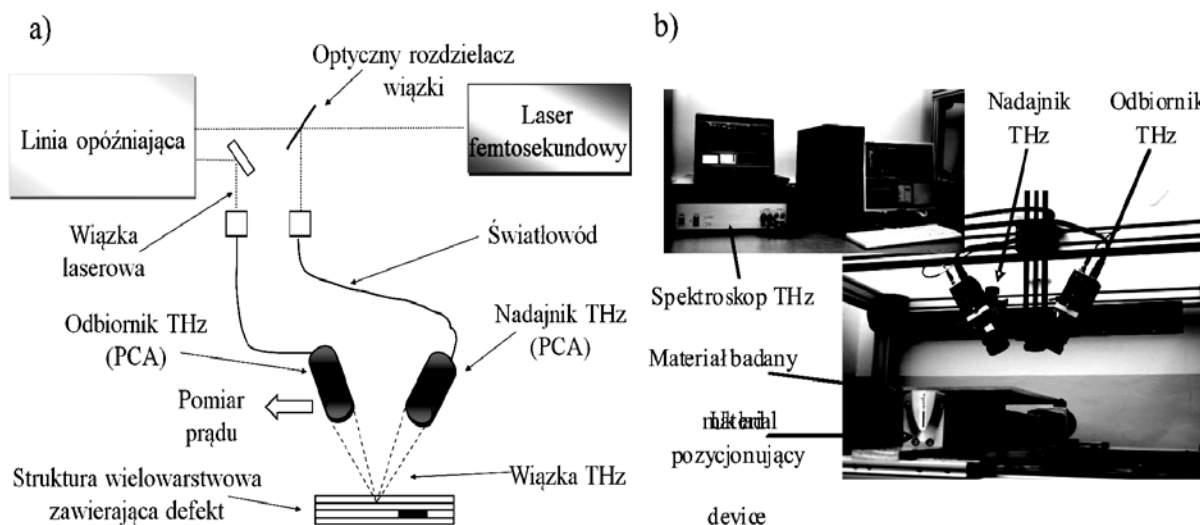
Na początku tej pracy zaprezentowano impulsowy, terahercowy system obrazowania. Następnie przedstawiono wybrane wyniki testowania kompozytów ze wzmocnieniem w postaci włókien szklanych i bazaltowych (w tym próbki pochodzące z przemysłu jachtowego). Na końcu znajdują się wnioski z przeprowadzonych badań oraz uwagi dotyczące zastosowania metody terahercowej do nieniszczącego badania materiałów kompozytowych.

System obrazowania z zastosowaniem fal EM w zakresie terahercowym

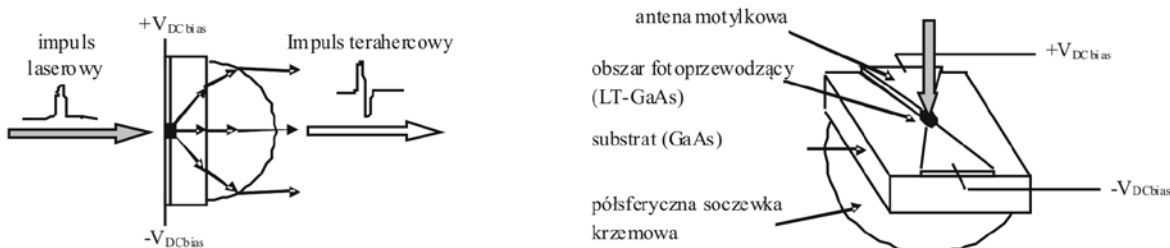
Terahercowe systemy obrazowania wykorzystywać mogą wzbudzenie ciągłe (CW – *Continuous Wave*) lub impulsowe (TDS – spektroskopia w dziedzinie czasu – *Time Domain Spectroscopy*). W drugim przypadku wady wykrywane są dzięki odbiciu impulsów terahercowych od granic i niejednorodności materiału (zmian przewodności elektrycznej i współczynnika refrakcji) [1]. Metoda ta nadaje się do oceny materiałów warstwowych. Każdy interfejs pomiędzy poszczególnymi warstwami powoduje odbicie padającego impulsu

i tłumienie przechodzącego. Różnice opóźnień propagowanych impulsów i ich echo (opóźnione odbicia od warstw) umożliwiają identyfikację grubości i wewnętrznego stanu konstrukcji. W wielu aspektach impulsowa metoda terahercowa podobna jest do metody ultradźwiękowej, co umożliwia adaptację algorytmów odwrotnych bardzo już zaawansowanych dla metod ultradźwiękowych.

Uproszczony schemat terahercowego systemu przedstawiono na rysunku 1. Głównymi składnikami systemu są: ultraszybki laser (generujący impulsy o czasie trwania rzędu femtosekund), optyczna linia opóźniająca oraz para przetworników (nadajnik i odbiornik) sprzężonych z laserem poprzez światłowody. Impulsy terahercowe są generowane i odbierane przez znajdujące się w przetwornikach anteny fotoprzewodzące PCA (ang. *Photo-Conductive Antenna*) [1]. Schemat budowy takich anten przedstawiono na rysunku 2. Główną część stanowi antena motylkowa z przerwą fotoprzewodzącą, która oświetlana jest przez bardzo krótkie impulsy z lasera. Taki sposób pobudzenia i zastosowanie zewnętrznego napięcia polaryzującego powoduje impulsowy przepływ prądu przez ramiona anteny, który indukuje falę elektromagnetyczną o częstotliwościach terahercowych. Otrzymane w ten sposób promieniowanie przechodzi przez półsferyczną soczewkę krzemową, a następnie jest skupiane na powierzchni materiału badanego przez soczewkę wykonaną z HDPE.



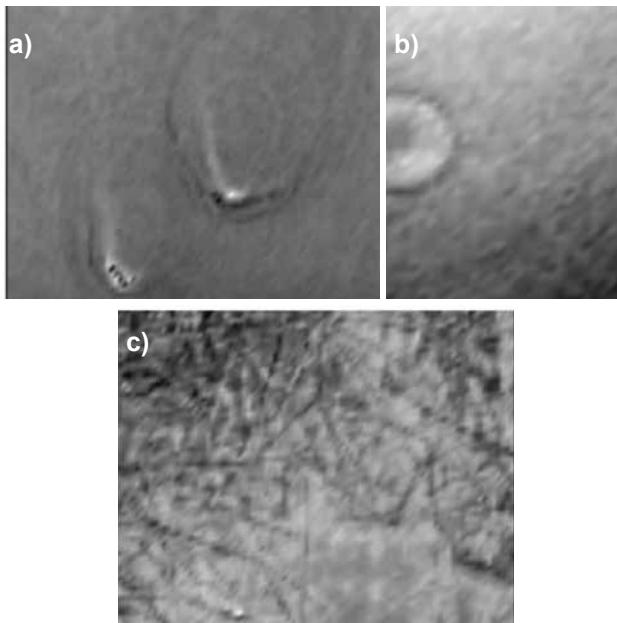
Rys. 1. System do terahercowych badań nieniszczących: a) uproszczony schemat, b) widok systemu w układzie odbiciowym
Fig. 1. A THz system for non-destructive testing: a) a simplified diagram, b) a view of the system in the reflection mode



Rys. 2. Budowa urządzenia nadawczo-odbiorczego w technice terahercowej (anteny fotoprzewodzącej PCA)
Fig. 2. Construction of the transceiver in terahertz technology (photoconductive antenna PCA)

Wyniki badań metodą terahercową kompozytów szklanych z przemysłu jachtowego

Kompozyty wzmocnione włóknem szklanym są najczęściej wykorzystywanymi kompozytami polimerowymi w przemyśle lotniczym, stoczniowym (szczególnie jachtowym) i w produkcji łopatek turbin wiatrowych. Zarówno defekty powstające w fazie produkcji, jak i eksploatacji możliwe są do wykrycia za pomocą metody terahercowej. Przykładowe wyniki badań próbek pozyskanych z przemysłu jachtowego zostały przedstawione na rysunku 3.

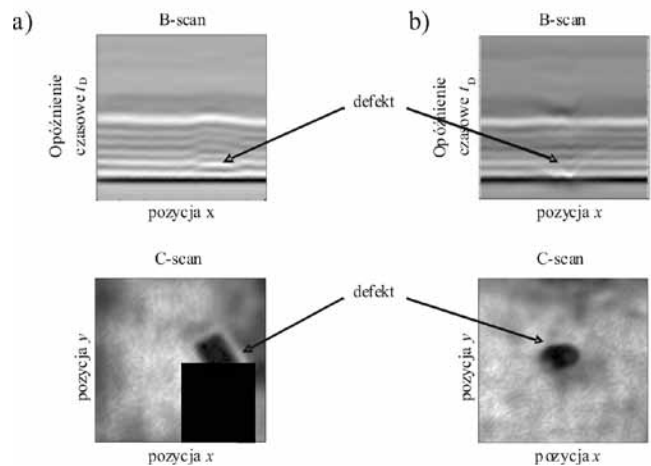


Rys. 3. Przykładowe rezultaty inspekcji próbek kompozytów ze wzmocnieniem szklanym pozyskanych z przemysłu jachtowego: a) uszkodzenie żelkotu wywołane uderzeniem, b) pusta przestrzeń pod powłoką żelową, c) określanie orientacji włókien wewnątrz materiału

Fig. 3. Examples of the inspection results obtained for samples made of composites reinforced with glass fiber (from the yacht industry): a) gelcoat damage caused by impact, b) the empty space under the gelcoat, c) determination of the fibers orientation inside the material

Wyniki badań metodą terahercową kompozytów bazaltowych

Kompozyty wzmocnione włóknami bazaltowymi są stosunkowo nowymi materiałami, które są coraz częściej wykorzystywane w różnych gałęziach przemysłu, np. samochodowym, stoczniowym, lotniczym i szeroko pojętym budownictwie (izolacja cieplna i dźwiękowa, rurociągi, zbrojenia betonu, mostów i tuneli). Przykładowe wyniki badań próbek z materiałów kompozytowych wzmocnionych włóknami bazaltowymi przedstawiono na rysunku 4. Pomiarzy zostały wykonane w konfiguracji odbiciowej (nadajnik i odbiornik po tej samej stronie materiału). Inspekcji poddano próbki (wykonane w Instytucie Polimerów, ZUT w Szczecinie) składające się z sześciu warstw tkaniny włókna bazaltowego oraz żywicy poliestrowej (Polimal 1094 AWTP-1). Badane próbki testowe zawierały sztuczne wady (wtrącenia). Niektóre z nich poddawane były uderzeniom mechanicznym.



Rys. 4. Przykładowe wyniki badań materiałów kompozytowych ze wzmocnieniem bazaltowym: a) wtrącenie pod pierwszą warstwą, b) defekt wywołany uderzeniem o energii 4J

Fig. 4. Examples of the inspection results obtained for composite materials reinforced with basalt fiber: a) inclusion under the first layer, b) the defect caused by impact of energy 4J

Wnioski

Uzyskane wyniki eksperymentów potwierdziły możliwość wykrycia różnorodnych defektów w materiałach kompozytowych, a tym samym przydatność metody terahercowej w zastosowaniach przemysłowych. Głównymi ograniczeniami metody są: mała

moc stosowanych źródeł, konieczność rastrowego skanowania badanych elementów oraz wysoka cena przyrządów pomiarowych. Szybki rozwój technologii (zwłaszcza źródeł i detektorów, w tym terahercowych kamer) pozwoli wkrótce znacznie poszerzyć zakres zastosowań tej metody.

Literatura

- [1] D. Mittelman (Ed.): Sensing with terahertz radiation, Berlin, 2010.
- [2] C. Stoik, M. Bohn, J. Blackshire: Nondestructive evaluation of aircraft composites using reflective terahertz time domain spectroscopy, NDT&E International 43 (2010), 106-115.
- [3] D. Zimdars, J. A. Valdmans, J. S. White, G. Stuk, S. Williamson, W. P. Winfree, E. I. Madaras: Technology and applications of terahertz ima-

ging non-destructive examination: Inspection of space shuttle sprayed on foam insulation, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation vol. 24 (2005), 570-577.

- [4] P. Lopato, T. Chady: Terahertz detection and identification of defects in layered polymer composites and composite coatings, Nondestructive Testing and Evaluation, Vol. 28, 1 (2013), 28-43.