

Elżbieta DĄBROWSKA<sup>1</sup>, Marian TEODORCZYK<sup>1</sup>, Ludwika LIPIŃSKA<sup>1</sup>, Konrad KRZYŻAK<sup>1</sup>,  
Andrzej DĄBROWSKI<sup>1</sup>, Grzegorz SOBCZAK<sup>1</sup>, Anna KOZŁOWSKA<sup>1</sup>,  
Przemysław MATKOWSKI<sup>2</sup>, Anna MŁOŻNIAK<sup>1</sup>, Andrzej MALAĞ<sup>1</sup>

Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, Warszawa (1), Wydział Elektroniki, Mikrosystemów i Fotoniki, Politechnika Wroclawska (2)

doi:10.15199/48.2015.09.01

## Zastosowanie tlenku grafenu i grafenu w technologii diod laserowych

**Streszczenie.** Wykazano, że tlenek grafenu na krawędziach bocznych chipa laserowego powoduje zmniejszenie rezystancji termicznej diody laserowej. Obserwowane jest również zmniejszenie temperatury samego chipa laserowego. Natomiast tlenek grafenu na n-kontakcie powoduje zwiększenie temperatury chipa. Na n-kontakcie korzystne jest zastosowanie grafenu. Pokazano przesuwanie się charakterystyk spektralnych przy zastosowaniu tlenku grafenu i grafenu, jak również zmiany ugięcia chipa laserowego w obecności tlenku grafenu i grafenu. Pomiary wykonano dla diod na pasmo 880 nm.

**Abstract.** It has been shown that covering side walls of a laser diode's chip with graphene oxide (GO) results in reduction of the laser diode's thermal resistance. Reduction of the temperature of the diode itself is also observed. In turn, additional covering the n-contact of the chip with GO results in the diode's temperature increase. On the other hand, alternative application of a chemical graphene layer in this place gives further temperature decrease. This can be explained by much higher emissivity of graphene layer compared to GO. The shifts of lasing spectral characteristics (in the 880 nm band) as well as changes in chip's deflection connected with GO and graphene applications are also shown. (*Application of graphene oxide and graphene in laser diodes technology.*)

**Słowa kluczowe:** tlenek grafenu, grafen, dioda laserowa, charakterystyki spektralne, rezystancja termiczna, pomiary termowizyjne.

**Keywords:** graphene oxide, graphene, laser diode, spectral characteristics, thermal resistance, thermal measurements.

### Wprowadzenie

Diody laserowe wytwarzają duży strumień ciepła podczas pracy, dlatego w celu skutecznego rozpraszania ciepła, a tym samym osiągnięcia lepszych parametrów elektro-optycznych są lutowane na chłodnicy 'stroną p-do dołu'. Autorzy sprawdzili możliwość dodatkowego odprowadzenia ciepła z obszaru aktywnego diody laserowej do chłodnicy poprzez zastosowanie warstwy tlenku grafenu (TG) na ściankach bocznych chipa laserowego, a także na n-kontakcie z wyprowadzeniami drutowymi. TG, uzyskiwany z wodnej zawiesiny, jest dobrym izolatorem elektrycznym, ale jednocześnie bardzo dobrym przewodnikiem ciepła. W dalszej kolejności sprawdzono możliwość zastosowania na n-kontakcie wodnego roztworu grafenu. Płatki grafenu ma znacznie większą emisyjność w porównaniu z materiałem n-kontaktu co pozwala na efektywniejsze wypromieniowanie ciepła z diody.

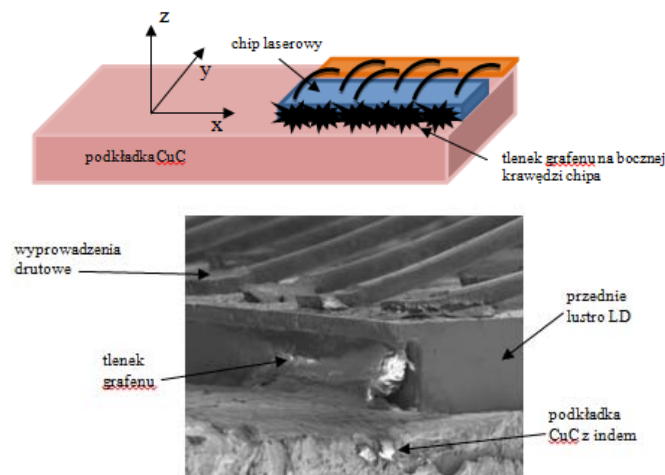
W pracy wykorzystano struktury diodowe (chipy) na pasmo 880 nm o długości rezonatora 3 mm. Szerokość obszaru aktywnego wynosiła 180  $\mu\text{m}$  a odległości obszar aktywny – p-kontakt około 3  $\mu\text{m}$ . Diody montowane były na podkładkach ze spieku CuC, który ma współczynnik rozszerzalności termicznej zbliżony do współczynnika dla arsenku galu. Badania prowadzono dla 45 diod, w tym pomiary termowizyjne dla 12 diod.

### Zastosowanie tlenku grafenu w technologii diod laserowych

Wodny roztwór tlenku grafenu (w dalszej części zwany w skrócie tlenkiem grafenu) nakładano na chipy diod laserowych w kilku etapach:

- cienką warstwę na boczne krawędzie chipa laserowego,
- powtórnie warstwę na krawędzie boczne chipa laserowego (gruba warstwa TG),
- na n-kontakt z istniejącymi już wyprowadzeniami drutowymi.

Na każdym z tych etapów dla diod mierzono charakterystyki mocowo-prądowe, napięciowo-prądowe, spektralne w warunkach impulsowych i cw. Dodatkowo dla 12 diod prowadzono pomiary termowizyjne. Na rysunku 1 pokazano schemat i zdjęcie SEM diody laserowej z nałożoną warstwą TG.



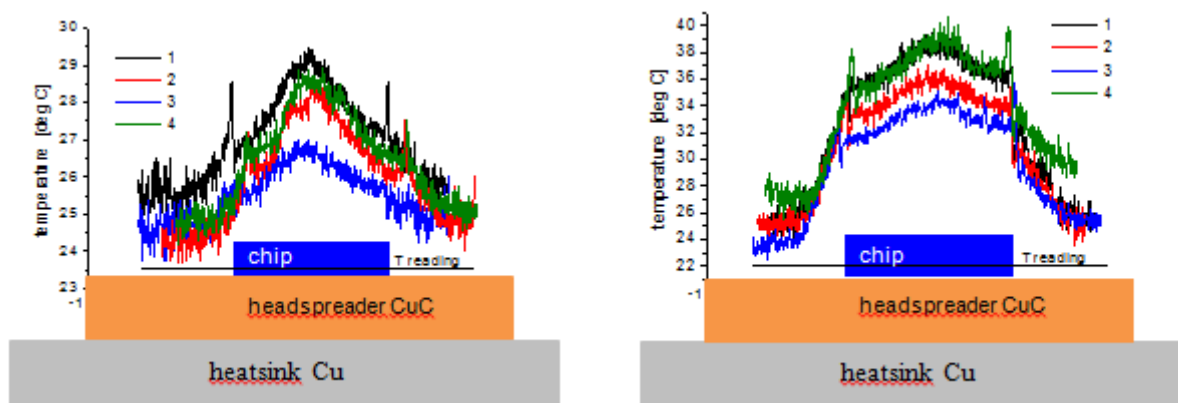
Rys. 1. Schemat diody laserowej i zdjęcie SEM z tlenkiem grafenu widocznym na bocznej krawędzi chipa laserowego

## Pomiary termowizyjne i elektrooptyczne diod na różnych etapach nakładania tlenku grafenu

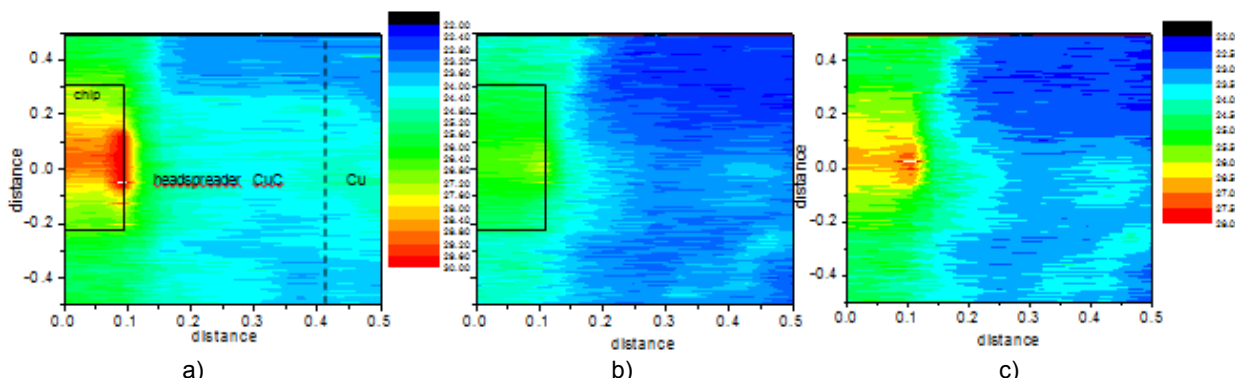
Dla diod w warunkach pracy ciągłej badano rozkład temperatury na chipie na lustrze przednim, oraz na przedniej ścianie podkładki CuC i chłodnicy Cu. Pomiarom poddano diody bez TG, następnie na każdym etapie stosowania TG. Na rysunku 2 pokazano rozkład temperatury na przedniej ścianie chipa (na przednim lustrze laserowym) nad studnią kwantową dla dwóch różnych diod na kolejnych etapach zalewania TG. Po początkowym obniżeniu temperatury przy zalewaniu chipa wzdłuż krawędzi bocznych, następuje ponowny wzrost

temperatury pracującej diody po zalaniu TG chipa od strony wyprowadzeń drutowych.

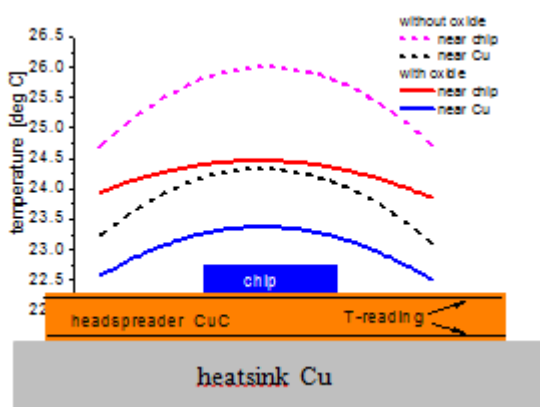
Na rysunku 3 przedstawiono „mapkę” (ze sztucznie wprowadzonymi kolorami) rozkładu temperatury dla diody przed (a) i po (b) nałożeniu TG na krawędzie boczne chipa. Na mapce zaznaczono pozycję chipa z wyraźnie cieplejszą warstwą aktywną. Pod chipem znajduje się chłodniejsza podkładka CuC i chłodnica Cu. Ciepło wypromieniowane jest również przez krawędzie boczne chipa. Po nałożeniu TG na krawędzie boczne chipa widać wyraźny spadek temperatury. Dla wyrazistego zobrazowania różnicy temperatur w chipie i podkładce przedstawiono również rozkład temperatury diody z TG w innej skali temperatur (c).



Rys. 2. Przykładowe rozkłady temperatury mierzone kamerą termowizyjną nad studnią kwantową (wzdłuż linii T reading) dla dwóch różnych diod laserowych przy prądzie zasilania 3 A na różnych etapach zalewania tlenkiem grafenu: 1 – bez TG, 2 – cienka warstwa TG, 3 – gruba warstwa TG, 4 – TG na n-kontakcie. Schematycznie zaznaczono położenie chipa laserowego i podkładki CuC



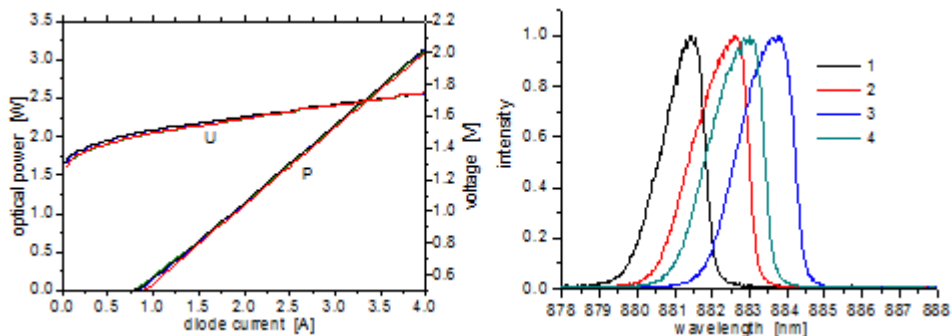
Rys. 3. Komputerowo opracowana mapka rozkładu temperatury wzdłuż chipa, podkładki CuC i chłodnicy Cu przed (a) i po (b) zalaniu TG krawędzi bocznych chipa. Obok (c) rozkład temperatury diody z TG w innej skali temperatur



Rys. 4. Rozkład temperatury wzdłuż osi y w podkładce CuC przed i po zalaniu TG krawędzi bocznych chipa

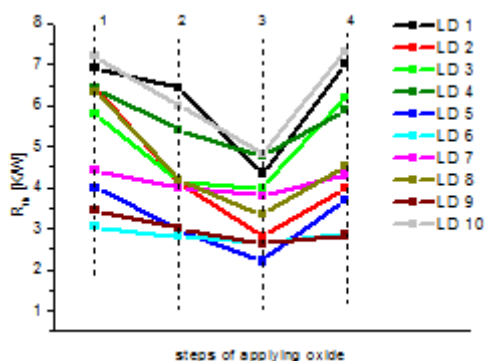
Po nałożeniu TG temperatura podkładki CuC uległa nie tylko obniżeniu, ale również obserwujemy bardziej równomierny rozkład ciepła wzdłuż osi y (z rys. 1) co przedstawia rysunek 4. W chłodnicy natomiast temperatura malała wraz z oddalaniem się od podkładki CuC.

Przy nakładaniu TG na kolejnych etapach nie zauważono istotnych różnic w charakterystykach mocowo-prądowych i napięciowo-prądowych badanych diod (rys. 5). Natomiast duże różnice wystąpiły w położeniach charakterystyk spektralnych mierzonych w warunkach impulsowych i w cw. Po nałożeniu TG na krawędzie boczne chipa charakterystyki spektralne najczęściej przesuwają się, zarówno w warunkach impulsowych jak i w cw, w kierunku długofalowym w porównaniu z charakterystyką diody bez TG. Takie przesunięcie w pomiarach impulsowych może świadczyć o wprowadzeniu naprężenia rozciągającego do studni kwantowej diody laserowej. W pomiarach tych można z rozważań wyeliminować grzanie się lasera.



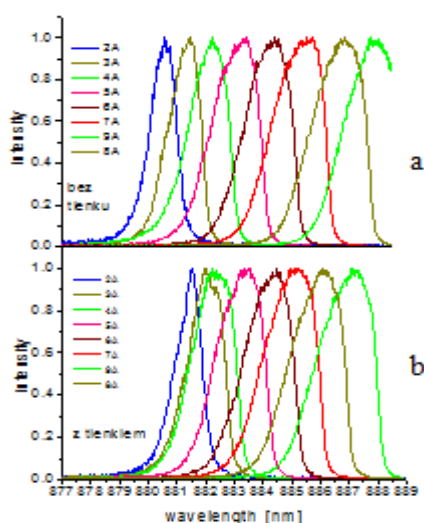
Rys. 5. Impulsowe charakterystyki mocowo-prądowe, napięciowo-prądowe i spektralne dla przykładowej diody na różnych etapach nakładania tlenku grafenu: 1 – bez TG, 2 – cienka warstwa TG, 3 – gruba warstwa TG, 4 – TG na n-kontakcie

Charakterystyki spektralne w warunkach cw zmierzono przy różnych wartościach prądu, w ten sposób można było obliczyć rezystancję termiczną diod  $R_{th}$  [1].  $R_{th}$  zmniejszała się wraz z nakładaniem TG na powierzchnie boczne chipa laserowego, natomiast po nałożeniu TG na n-kontakt  $R_{th}$  gwałtownie wzrastała [2], co zostało pokazane na rysunku 6 dla 10 przykładowych diod. Im większa rezystancja początkowa, co wiąże się z gorszym montażem, tym wpływ chłodzenia przez ścianki jest bardziej zauważalny.



Rys. 6. Zmiany rezystancji termicznej  $R_{th}$  dla diod na różnym etapie nakładania TG: 1 – bez TG, 2 – cienka warstwa TG na krawędziach bocznych chipa, 3 – gruba warstwa TG, 4 – TG na n-kontakcie

To zgadza się z wcześniejszymi pomiarami termowizyjnymi, gdzie temperatura diody obniżała się przy zastosowaniu TG na krawędziach bocznych chipa i wzrastała po nałożeniu TG na n kontakt.

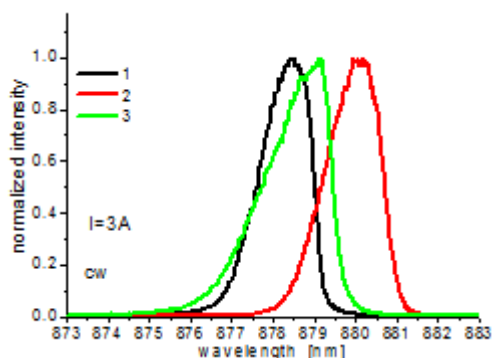


Rys. 7. Charakterystyki spektralne w warunkach cw diody przed (a) i po zalaniu TG (b)

Na rysunku 7 przedstawiono charakterystyki spektralne diody zalanej tlenkiem (b) i bez tlenku grafenu (a). Większe zagęszczenie charakterystyk spektralnych na węższym przedziale długości fali wskazuje, że rezystancja termiczna diody jest mniejsza. Dioda z TG grzeje się mniej w porównaniu z diodą bez tlenku. Pozostaje na razie bez odpowiedzi pytanie, co jest przyczyną przesunięcia charakterystyk w kierunku fal dłuższych dla niższych prądów.

### Zastosowanie wodnej zawiesiny grafenu

Ponieważ TG położony na n-kontakcie nie spełnił oczekiwań, podjęto próby z nakładaniem w to miejsce zawiesiny wodnej grafenu (dalej w skrócie nazywanej grafenem). Po nałożeniu grafenu na n-kontakt charakterystyki spektralne przesuwały się w kierunku krótkofalowym, co daje podstawy do stwierdzenia, że temperatura diody w czasie pracy obniżyła się. Charakterystyki mocowo-prądowe nie ulegały istotnym zmianom (rys. 8). Również zmniejszyła się rezystancja termiczna takiej diody. W tabeli 1 przedstawiono  $R_{th}$  dla 4 różnych diod przed oraz po zastosowaniu TG i po zastosowaniu grafenu.

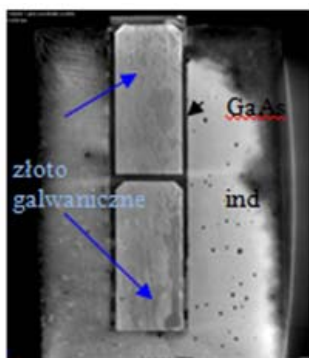


Rys. 8. Charakterystyki spektralne w warunkach cw przed (1) i po nałożeniu tlenku grafenu (2) na krawędzie boczne chipa laserowego i po nałożeniu grafenu (3) na n kontakt

Tabela 1. Zmiana rezystancji termicznej diod zmontowanych (a), po zastosowaniu TG na krawędziach bocznych chipa (b) i grafenu na n kontakcie (c)

$R_{th}$	a	b	c
1	$4,6 \pm 0,2$	$3,1 \pm 0,15$	$1,2 \pm 0,1$
2	$3,5 \pm 0,15$	$4,1 \pm 0,2$	$1,5 \pm 0,1$
3	$3,6 \pm 0,15$	$2,9 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,1$
4	$3,5 \pm 0,15$	$2,4 \pm 0,1$	$2,2 \pm 0,1$

Tak więc mamy do czynienia z efektywniejszym wypromieniowaniem ciepła przez n-kontakt z powodu znacznie większej emisyjności grafenu płatkowego w porównaniu z emisyjnością kontaktu AuGe.



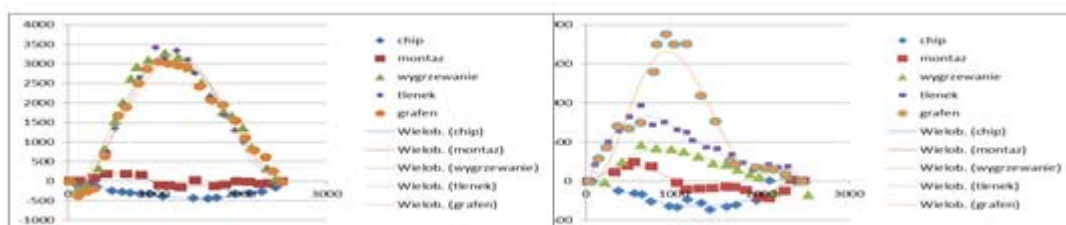
Rys. 9. Zdjęcia z rentgenowskiego tomografu poprawnie pracującej diody. Czarne obszary na brzegach chipa poza obszarami Au są odkrytymi, niezwilżonymi indem, powierzchniami Pt

W celu zrozumienia niespójnych wyników: obniżenia temperatury (rys. 2) przy jednoczesnym przesunięciu charakterystyk spektralnych w kierunku długofalowym po zastosowaniu TG (rys. 5), przeprowadzono badania diod z zastosowaniem rentgenowskiego tomografu na Wydziale Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej. Pomiary ujawniły brak zwilżalności indem krawędzi chipa nie pokrytych złotem galwanicznym. Na

rysunku 9 pokazano zdjęcia poprawnie pracującej diody laserowej.

Być może w te wolne przestrzenie wpływa TG powodując lepsze odprowadzanie ciepła z pracującej diody. Potwierdzeniem tego może być fakt, że dla diod z większą początkową rezystancją termiczną obserwujemy większe jej zmiany po zalaniu TG krawędzi chipa w porównaniu z diodami ze stosunkowo niską rezystancją termiczną początkową, dla których te zmiany są nie są już tak spektakularne. Będzie to jeszcze przedmiotem dalszych badań.

Dla wielu diod zaobserwowano zmiany ugięcia chipów laserowych po zastosowaniu TG i grafenu. Na rysunku 10 przedstawiono pomiary ugięcia dla dwóch przykładowych diod dodatkowo na różnych etapach montażu (luźny chip, po procesie lutowania, po procesie odprężania). Dla pierwszej diody występuje duża zmiana ugięcia po odprężaniu, procesy nakładania TG i grafenu już nie wpływają na zmiany. Natomiast dla drugiej diody zmiany ugięcia następują na każdym etapie wytwarzania. Dla badanych diod nie zaobserwowano związku pomiędzy zmianami ugięcia a przesunięciem się charakterystyk spektralnych w wyniku stosowania TG.



Rys. 10. Zmiany ugięcia diod laserowych po montażu, odprężaniu, zastosowaniu TG na krawędziach bocznych chipa laserowego i grafenu na kontakcie n

## Podsumowanie

Stosowanie TG na krawędziach bocznych chipa wydaje się zasadne. Zostaje obniżona temperatura chipa podczas pracy i rezystancja termiczna diody, co powinno przedłużyć czas życia tej diody. Dla niskich prądów zostają przesunięte charakterystyki spektralne w kierunku długofalowym, czego wyjaśnienie wymaga dalszych badań.

Jednak nie można stosować TG na n-kontakcie z powodu wzrostu temperatury chipa laserowego. Natomiast przy zastosowaniu na n-kontakcie wodnej zawiesiny grafenu uzyskujemy obniżenie rezystancji termicznej diody. Decydującym czynnikiem wydaje się tutaj bardzo duża emisyjność płatkowego (grubego) grafenu.

Praca finansowana przez NCBiR w ramach projektu GRAF-TECH/NCBR/09/07/2013 pt: "Grafenowe pasty i atramenty do drukowania ścieżek i warstw przewodzących w zastosowaniu do zabezpieczenia dokumentów" i współfinansowana przez ITME w ramach prac statutowych.

## LITERATURA

- [1] Dąbrowska E., Małąg A., Metody pomiaru rezystancji termicznej diod laserowych, *Przegląd Elektrotechniczny* 4'2011, 232-238
- [2] Dąbrowska E., Teodorczyk M., Lipińska L., Koziński R., Małąg A., Application of graphene oxide for reduction of thermal resistance of high-power laser diodes, *Electronics Letters* 21st November 2013 Vol. 49 No. 24, 1550-1551

**Autorzy:** mgr Elżbieta Dąbrowska, Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, E-mail: [Elzbieta.Dabrowska@itme.edu.pl](mailto:Elzbieta.Dabrowska@itme.edu.pl); inż. Marian Teodorczyk, Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, E-mail: [Marian.Teodorczyk@itme.edu.pl](mailto:Marian.Teodorczyk@itme.edu.pl); dr inż. Ludwika Lipińska, Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa; inż. Konrad Krzyżak, Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa; mgr inż. Andrzej Dąbrowski, Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa; mgr inż. Grzegorz Sobczak, Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, E-mail: [grzegorz.sobczak@itme.edu.pl](mailto:grzegorz.sobczak@itme.edu.pl); dr inż. Anna Kozłowska, Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa; dr hab. inż. Andrzej Małąg, Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa E-mail: [amalaq@itme.edu.pl](mailto:amalaq@itme.edu.pl); dr inż. Przemysław Matkowski, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki, Mikrosystemów i Fotoniki, ul. Długa 65, Wrocław. mgr Anna Młodziak, Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, E-mail: [Anna.Mlozniak@itme.edu.pl](mailto:Anna.Mlozniak@itme.edu.pl)