

Laserowa korekcja kompozytowych rezystorów grubowarstwowych opartych na nanoformach węgla

Lucja Dybowska-Sarapak¹, Konrad Kielbasiński¹, Małgorzata Jakubowska^{1,2}, Anna Młodziak¹,
Daniel Janczak², Iwona Wyżkiewicz¹

¹ Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych
ul. Wólczyńska 133, 01 - 919 Warszawa
e-mail: lucja.dybowska@itme.edu.pl

² Wydział Mechatroniki Politechniki Warszawskiej
ul. Św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa

Streszczenie: W artykule przedstawiono zagadnienia związane z korekcją elementów biernych metodą piaskową oraz laserową. Wytworzono polimerowe rezystory z trzech rodzajów past rezystywnych: grafenowej, grafitowej i z nanorurek węglowych oraz sprawdzono ich właściwości, m.in. wartości rezystancji, TWR oraz grubości warstw. Przeprowadzono korekcję laserową polegającą na nacinaniu warstwy rezystywnej oraz wykonano szereg badań mających na celu sprawdzenie zmian właściwości elementów biernych po korekcji. Poddano analizie uzyskane wyniki badań pod kątem efektywności korekcji laserowej rezystorów z trzech badanych materiałów.

Słowa kluczowe: korekcja laserowa, rezystory kompozytowe

Laser trimming of thick film composite resistors based on nanoforms of carbon

Abstract: This paper examines issues related to the correction of resistors using the abrasive and laser methods. Three types of resistors, i.e. graphene, graphite and carbon nanotube resistors, were manufactured and their properties such as resistance, TWR and thickness of resistive layers were measured. Laser correction involving cutting of the resistive layer was performed. This part of work included the execution of a series of tests to verify changes in the properties of passive components after trimming. As the final step, the obtained results were analyzed to check the efficiency of laser correction of the resistors based on the three tested materials.

Key words: laser trimming, composite resistors

1. Wstęp

Technologia grubowarstwowa wykorzystywana jest od lat do wytwarzania elektronicznych elementów biernych, także rezystorów, o grubościach warstw nie przekraczających kilkudziesięciu mikrometrów [1]. W wyniku drukowania i wypalania rezystywnych warstw grubych, bez korekcji, osiągana niedokładność rezystancji względem wartości oczekiwanej wynosi do 20 %. Wraz z rozwojem technologii rośnie zapotrzebowanie na elementy o dokładności wykonania zawierającej się w zakresie od kilku dziesiątych do kilku procent [2]. Dla zaspokojenia tych potrzeb, odpowiedniego zbliżenia wartości rezystancji po obróbce cieplnej rezystora do jego wartości nominalnej, konieczna jest regulacja rezystancji, zwana korekcją [3].

Jednym z najczęściej stosowanych rodzajów korekcji jest korekcja subtraktywna [3]. Polega ona na zmianie geometrii rezystora poprzez usunięcie części powierzchni warstwy rezystywnej [4]. Przycięcie warstwy powoduje zmniejszenie jej szerokości. Zatem we wzorze (1) opisującym wpływ geometrii rezystora na rezystancję zmniejszeniu ulega parametr W . Skutkuje to wydłużeniem drogi prądu i wzrostem wartości rezystancji, która jest odwrotnie proporcjonalna do poprzecznego przekroju warstwy rezy-

stywnej. Korekcja subtraktywna jest realizowana przez korekcję mechaniczną piaskową lub korekcję laserową wypalającą.

$$R = \rho \frac{L}{tW}, \quad (1)$$

gdzie: R – wartość rezystancji, ρ – wartość rezystancji właściwej, L – długości warstwy rezystywnej, W – szerokości warstwy rezystywnej, t – grubość warstwy rezystywnej

Podczas korekcji piaskowej materiał rezystywny usuwany jest w sposób mechaniczny za pomocą strumienia zawierającego proszek ścierny [3]. Wypuszczany jest on na powierzchnię elementu z mikrodyszy razem z powietrzem pod dużym ciśnieniem i z dużą prędkością. Energia kinetyczna cząstek powoduje ścieranie warstwy rezystywnej, a w konsekwencji zmniejszenie jej grubości t , co zgodnie ze wzorem (1) powoduje wzrost rezystancji R . Jako cząstek ściernych używa się drobnoziarnistego piasku korundowego (tlenku glinu) [2] lub pyłu kwarcowego [5]. Korekcja mechaniczna ścierna cechuje się jednak niską wydajnością procesu oraz łatwością zanieczyszczenia powierzchni elementu korygowanego pozostałościami z usuwanego materiału. Ponieważ rozbieżność strumienia proszku ściernego jest stosunkowo duża, powstałe nacięcie

także jest szerokie co utrudnia korekcję układów miniaturowych. Z tych powodów, w dużej części, metoda ta zastąpiona została korekcją laserową wypalającą materiał rezystywny.

Korekcja laserowa, zwana korekcją wypalającą lub cięciem laserowym polega na usunięciu materiału rezystywnego poprzez jego lokalne odparowanie do stanu gazowego – zwane ablacją. Wykonywana jest ona za pomocą silnie skoncentrowanej wiązki promieni pochodzącej z urządzenia laserowego. Przy użyciu odpowiednio małej mocy urządzenia promienie laserowe nie niszczą płytek podłożowych. Nie powodują one bowiem odparowania ceramiki lub alundu będącego najczęściej materiałem podłoża. Ponadto korekcja laserowa zapewnia dużą dokładność poprawy wartości rezystancji i czystość procesu. Usuwany materiał jest odparowywany, nie zanieczyszcza on powierzchni elementu. Umożliwia on korygowanie elementów o bardzo małej powierzchni. Szerokość cięcia jest w przybliżeniu równa średnicy zogniskowanej wiązki laserowej. Ponadto korekcja ta zapewnia dobre własności elementów po procesie – stabilność długoterminową, gęstość mocy, niskie szумы w rezystorach. Jedną z ważniejszych zalet procesu jest to, że praca lasera może być w pełni zautomatyzowana [5]. Wybór kształtu cięcia, moc, pomiar rezystancji, korekcja z zadaną tolerancją oraz zakończenie korekcji po osiągnięciu założonej wartości mogą ulec automatyzacji. Główną wadą tego rodzaju korekcji jest jednak wysoki koszt procesu.

Celem niniejszego eksperymentu było sprawdzenie podatności na korekcję laserową polimerowych rezystorów warstwowych, które zostały wykonane z past rezystywnych zawierających, w postaci wypełniacza nanopłatki grafenu, nanorurki węglowe lub proszek grafitowy. Rezystory tego typu stanowią alternatywę dla rezystorów zawierających związki rutenu (dwutlenek, rutenian bizmutu). Nie wymagają one wypalania w temperaturze ponad 700 °C, a jedynie suszenia w temperaturach do 120 °C, co umożliwia ich zastosowanie na podłożach nieodpornych na wysoką temperaturę jak plastik czy Kapton. Ponadto warstwy charakteryzują się pochłanianiem światła na poziomie od 10 % do 90 % w zależności od koncentracji cząstek węglowych w polimerze co umożliwia ich zastosowanie w roli elektrod transparentnych.

2. Opis eksperymentu

2.1. Wybór materiałów rezystorów

W celu przeprowadzenia eksperymentu wytworzono rezystory z trzech rodzajów past rezystywnych: z grafitem (30 wt %), płatkami grafenowymi (2 wt %) oraz nanorurkami węglowymi (2 wt %). Dla pasty grafitowej nośnikiem była żywica Laroflex rozpuszczona w octanie karbinolu butylowego (OKB), a dla dwóch pozostałych polimetakrylan metylu, także rozpuszczony w OKB. Temperatura utwardzania struktury rezystorów wynosiła 130 °C. Na materiał podłożowy wybrano płytki z ceramiką

alundowej. Jest to materiał, który trudniej przeciąć wiązką laserową niż materiały miękkie, z folii. Założono więc, iż pozwoli on na lepsze zbadanie możliwości obróbki i odparowywania warstw rezystywnych. Pastą przewodzącą wykorzystaną do wykonania pól kontaktowych próbek była grubowarstwowa pasta srebrowa.

2.2. Urządzenia pomiarowe

Za pomocą profilografometru stykowego HOMMEL WERKE zbadano grubości warstw rezystywnych wytworzonych próbek. Następnie, dzięki uprzejmości firmy Solaris Laser, poprzez wykonanie podłużnego nacięcia przeprowadzona została korekcja laserowa. W tym celu wykorzystany został impulsowy laser światłowodowy o mocy średniej 20 W oraz długości fali 1,06 μm, generującym światło bliskiej podczerwieni. Przy użyciu stworzonego na potrzeby firmy programu SolMarII ustawiono odpowiednie parametry procesu: moc [%], częstotliwość [kHz], prędkość przesuwu wiązki [m/s]. Wprowadzana moc była procentowym stosunkiem nominalnej mocy średniej lasera. Prędkość wiązki wybierana była z zakresu 1 m/s - 20000 m/s. Zdjęcia skorygowanych warstw wykonane zostały przy użyciu Hand USC Digital Microscope MDA 2000. Wartości rezystancji oraz temperaturowego współczynnika rezystancji przed i po korekcji zmierzono wykorzystując multimetr cyfrowy SOLARTRON 7150 plus.

Wytworzenie opisanych wyżej rezystorów oraz ich korekcja jest wynikiem badań związanych z dyplomową pracą inżynierską [6].

3. Wyniki eksperymentu

3.1. Grubości warstw rezystywnych

Użycie profilometru pozwoliło uzyskać profile grubości charakteryzujące powierzchnie warstw rezystywnych wszystkich rodzajów wykonanych rezystorów. Zmierzone grubości zestawiono poniżej w Tab. 1.

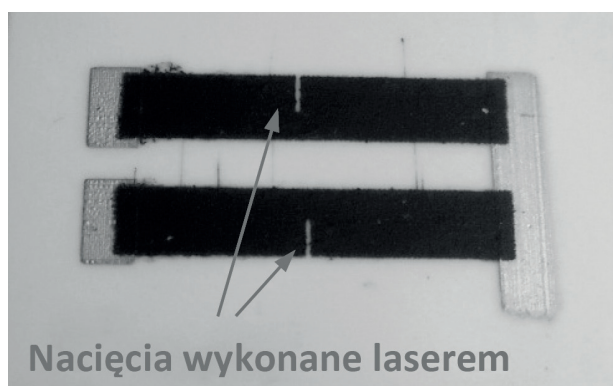
Pośród wszystkich wytworzonych rezystorów to rezystory grafenowe charakteryzowały się najmniejszą grubością wytworzonej warstwy rezystywnej, w przybliżeniu zawierały się w przedziale 4 - 5 μm. Największe grubości warstwy wynoszące ponad 20 μm posiadały rezystory grafitowe. Rezystory wytworzone przez nadruk pasty zawierającej nanorurki węglowe miały grubości niemal dwukrotnie większe od warstw grafenowych oraz dwukrotnie mniejsze od warstw grafitowych.

3.2. Korekcja laserowa rezystorów

W celu zbadania podatności na korekcję rezystorów grubowarstwowych za pomocą wiązki laserowej wykonano w warstwie rezystywnej o szerokości 4 mm pojedyncze, poprzeczne nacięcie o długości w przybliżeniu 2,45 mm na głębokość odpowiadającej całej grubości warstwy. Aby wyniki były porównywalne, w ten sam sposób nacięto wszystkie trzy typy rezystorów. Korekcję wykonywano

Tab. 1. Przybliżone grubości warstw rezystywnych rezystorów: grafenowych, z nanorurkami węglowymi oraz grafitowych.
Tab. 1. The approximate thicknesses of the resistive layers based on: graphene, carbon nanotubes and graphite resistors.

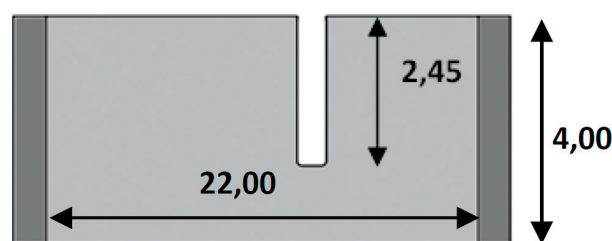
GRAFEN		NANORURKI WĘGLOWE		GRAFIT	
Nr	Grubość warstwy [μm]	Nr	Grubość warstwy [μm]	Nr	Grubość warstwy [μm]
GNPC 2	4,5	CNT II 1	10,0	L-951 1	20,0
GNPC 4	5,0	CNT II 3	8,5	L-951 2	21,0
GNPC 6	4,0	CNT II 4	11,0	L-951 3	21,5
GNPC 8	4,5	CNT II 5	10,0	L-951 7	22,0
GNPC 10	5	CNT II 6	10,5	L-951 9	23,0



Rys. 1. Zdjęcia nacięć wykonanych w warstwach z cząsteczkami węglowymi.
Fig. 1. The photographs of carbon based layers after laser correction.

dla wszystkich próbek przy stałej częstotliwości pracy 20 kHz, mocy 50 % oraz prędkości cięcia 500 mm/s. Na Rys.1 przedstawiono mikroskopowe zdjęcia korygowanych próbek. Na Rys. 2. znajduje się opis wymiarów rezystora oraz geometrii nacięcia.

Analiza mikroskopowych obrazów nacięć wykonanych w trakcie korekcji laserowej pozwoliła stwierdzić, iż spośród wszystkich badanych elementów, dającymi obrabiać się najdokładniej, były rezystory grafenowe. Stosunkowo łatwe okazało się dobranie odpowiednich parametrów procesu cięcia. Materiał warstwy rezystywnej został odparowany w całości, a dzięki ablacji po procesie nie pozostały żadne zanieczyszczenia. Ani nieusunięta warstwa, ani materiał podłożowy nie uległy uszkodzeniu. Rezystory z lakieru grafitowego okazały się mniej podatne na działanie korygującej wiązki laserowej. Wykonane nacięcia jest znacznie węższe niż w przypadku innych materiałów. Trudność natomiast sprawiło dobranie parametrów obróbki tych elementów. Nawet przy użyciu urządzeń powiększających obraz, niełatwo było stwierdzić, czy



Rys. 2. Rzut z góry na kształty i wymiary rezystora i realizowanych cięć.

Fig. 2. A sketch of a resistor and laser scribe geometry.

przy dobranych parametrach materiał warstwy rezystywnej został w pełni usunięty oraz czy nie nastąpiło przy tym nacięciu płytki podłożowej. Część pozostałej w pobliżu wyciętego wzoru warstwy wyglądała na uszkodzoną przez spalanie. Rezystory z wypełniaczem w postaci nanorurek okazały się bardzo trudno obrabialne. Pomimo długiego dobierania parametrów procesu, modyfikacji średnicy płamki laserowej, a nawet zmianie głowicy laserowej, wykonywane nacięcia nie były zadowalające. Pozostały materiał warstwy rezystywnej w pobliżu miejsc przejścia wiązki laserowej kruszył się, po obróbce pozostało dużo nieodparowanego materiału – zanieczyszczeń. Nacięty kształt nie miał prostych krawędzi, wyglądał na nierównomiernie poszarpany.

3.3. Wartości rezystancji rezystorów

Wartości rezystancji próbek zostały zmierzone w temperaturze 21,2 °C dwukrotnie: zaraz po ich wytworzeniu oraz po wykonaniu korekcji laserowej. Odczytane wartości oraz policzoną względną zmianę rezystancji pokazano w Tab. 2 - 4.

Dla próbek grafenowych wartość rezystancji przed korekcją zawierała się w przedziale 23,5 – 28,1 kΩ. Względna zmiana wartości rezystancji przed i po korekcji wynosiła ~ 14 %.

Początkowa wartość rezystancji rezystorów nanorurkowych zawierała się w granicach 1,9 - 2,1 k Ω . Zaobserwowano duży wzrost wartości ich rezystancji. Średnia wartość zmiany rezystancji wynosiła w przybliżeniu 15 %.

Początkowa wartość rezystancji próbek grafitowych wynosiła ~ 4 k Ω . Potwierdzeniem, dającej się zauważyć już przy wykonywaniu nacięć mniejszej podatności rezystorów grafitowych na korekcję, była niewielka względna zmiana rezystancji przed i po procesie nacinania i wynosiła ona około 7 %.

Porównanie średnich wartości względnych zmian rezystancji wszystkich materiałów, które nastąpiły po korekcji laserowej pokazano na wykresie na Rys. 3.

Największą względną zmianę wartości rezystancji zaobserwowano dla rezystorów wykonanych z nanorurek węglowych. Zmiana rezystancji próbek grafitowych była od niej tylko nieznacznie mniejsza. Elementy bierne grafitowe wykazały najmniejszą podatność na korekcję. Zmiana rezystancji była ponad dwukrotnie mniejsza niż w przypadku rezystorów wykonanych na bazie grafenu.

GRAFEN

Tab. 2. Zmierzone wartości rezystancji rezystorów grafitowych.

Tab. 2. The measured resistance values for graphene resistors.

Numer próbki	Przed korekcją [k Ω]	Po korekcji [k Ω]	Względna zmiana [%]
1	23,57	26,22	11,24
2	24,56	26,95	9,73
3	28,07	32,51	15,82
4	28,12	33,49	19,10
Średnia wartość zmiany [%]			13,97

NANORURKI WĘGLOWE

Tab. 3. Zmierzone wartości rezystancji rezystorów zawierających nanorurki węglowe.

Tab. 3. The measured resistance values for resistors with carbon nanotubes.

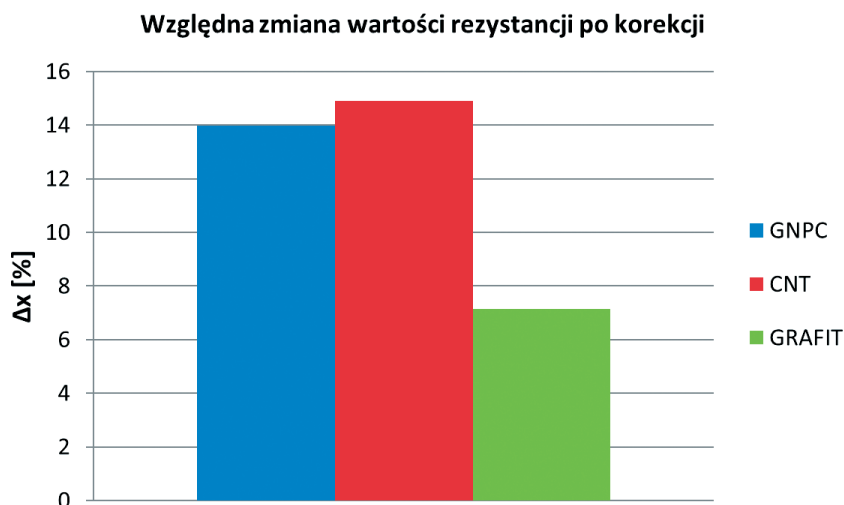
Numer próbki	Przed korekcją [k Ω]	Po korekcji [k Ω]	Względna zmiana [%]
1	1,98	2,25	13,71
2	2,08	2,47	18,87
3	1,91	2,15	12,77
4	2,00	2,29	14,31
Średnia wartość zmiany [%]			14,91

LAKIER GRAFITOWY

Tab. 4. Zmierzone wartości rezystancji rezystorów grafitowych.

Tab. 4. The measured resistance values for graphite resistors.

Numer próbki	Przed korekcją [k Ω]	Po korekcji [k Ω]	Względna zmiana [%]
1	4,32	4,65	7,52
2	4,15	4,43	6,76
3	4,30	4,62	7,36
4	4,34	4,64	6,96
Średnia wartość zmiany [%]			7,15



Rys. 3. Względna zmiana wartości rezystancji po korekcji.
Fig. 3. A change of the mean resistance values after laser trimming.

3.4. Temperaturowy współczynnik rezystancji

Temperaturowy współczynnik rezystancji TWR charakteryzuje zmiany rezystancji początkowej R_1 zachodzące w każdego typu rezystorach pod wpływem jednostkowej zmiany temperatury. Wartość jego podaje się zazwyczaj w ppm/K oraz ppm/°C. Przy czym ppm oznacza *parts per milion*, co oznacza, że $1 \text{ ppm} = 10^{-6}$ [7].

$$(2) \quad \text{TWR} = \frac{(R_2 - R_1)}{R_1 (T_2 - T_1)}$$

T_1 jest określana jako temperatura odniesienia. Jest to zazwyczaj temperatura pokojowa w jakiej dokonywany jest pomiar rezystancji początkowej R_1 . W zależności od wartości T_2 wyznacza się tzw. „zimny” lub „gorący” TWR. W pierwszym przypadku $T_2 < 0$ wynosi zazwyczaj $-55 \text{ }^\circ\text{C}$. Gdy wartość $T_2 > 0$ rozpatrywany jest drugi przypadek wtedy T_2 wynosi $125 \text{ }^\circ\text{C}$ [7 - 8]. Stwierdzono, że dobre rezystory powinny cechować się niewielką wartością TWR [9].

Jako rezystancje początkowe wykorzystywane do obliczenia TWR wytworzonych próbek wykorzystano opisane w poprzednim podpunkcie wartości rezystancji. Za pomocą grzałki nagrzewano badane elementy do temperatury $125 \text{ }^\circ\text{C}$ oraz wykonywano drugi pomiar rezystancji. Przy wykorzystaniu programu komputerowego obliczającego

wartość TWR dla danego rezystora ze wzoru (2) uzyskano średnie wartości TWR próbek, zarówno po ich wytworzeniu (przed korekcją), jak i korygowanych wiązką laserową (po korekcji). Wyniki przedstawiono w Tab. 5.

Rezystory grafenowe wykazywały się dużą niestabilnością przy pomiarze rezystancji w podwyższonej temperaturze. Z tego powodu otrzymane wyniki wartości temperaturowego współczynnika rezystancji TWR obarczone są z pewnością dużym błędem pomiarowym. Niestabilność wartości rezystancji przy podwyższonej temperaturze wzrosła jeszcze po wykonaniu korekcji. Rezystory wykazały bardzo dużą zmianę TWR po procesie nacinania. Obliczona względna zmiana to ponad 45 %.

Jedynie w przypadku rezystorów z nanorurek węglowych wartości temperaturowego współczynnika rezystancji były ujemne, wynosiły one $-374 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Po korekcji laserowej nastąpiły niewielkie zmiany tej wartości.

Średnia wartość temperaturowego współczynnika rezystancji TWR przed korekcją rezystorów grafitowych miała wartość dodatnią i wynosiła $499 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Jest to, spośród modułów wartości TWR wszystkich badanych rezystorów, wartość największa. Spadła ona nieznacznie po wykonanej korekcji: cięciem pojedynczym – o $63 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$.

Tab. 5. Średnie wartości TWR [ppm/°C] rezystorów grafenowych, grafitowych i z nanorurek węglowych.
Tab. 5. The average values of TWR [ppm/°C] for graphene, graphite and carbon nanotube resistors.

	TWR przed	TWR po	Wzgl. zmiana TWR [%]
Grafen	362,8	527	45,3%
Nanorurki węglowe	-374	-332,8	11,0%
Grafit	499	436,2	12,6%

4. Podsumowanie i wnioski

Na rezystorach grafenowych udało się wykonać dokładne i poprawne nacięcia warstwy rezystywnej. Prostota doboru parametrów obróbki cięcia oraz możliwość poprawnego wykonania samego procesu daje nadzieję na częstsze wykorzystywanie grafenu w technologii grubowarstwowej elementów biernych oraz możliwość ich korekcji. Mimo to, pewne jest, iż nad grafenem jako wypełniaczem past rezystywnych, należy przeprowadzić jeszcze szereg prac badawczych. Dalsze prace należy skoncentrować nad badaniami korekcji laserowej na foliach polimerowych. Zaobserwowano znaczące rozrzuty zmian rezystancji po korekcji i znacznie większą zmianę niż w przypadku rezystorów grafitowych. Po zastosowaniu identycznego nacięcia wiązką laserową zmiany rezystancji rezystorów zawierały się w granicach 9,73 % – 19,10 %. Duże rozrzuty świadczą o małej powtarzalności operacji wynikającej najprawdopodobniej z gwałtownego wrzenia polimeru w warstwie zawierających duży udział polimeru względem wypełniacza. Zdaniem autorów przejście z trybu ciągłego lasera na impulsowy powinno załagodzić ten problem.

W przypadku rezystorów grafitowych wystąpiły trudności w doborze odpowiednich parametrów procesu cięcia, przy których korekcja mogłaby przebiec prawidłowo. Rezystory te miały najniższą spośród badanych elementów zmianę rezystancji w wyniku korekcji, być może spowodowaną największą grubością warstwy rezystywnej i znacznie większą koncentracją materiału wypełniacza. Te dwa czynniki zwiększają odprowadzanie ciepła zmniejszając jednocześnie szybkość usuwania korygowanego materiału. Jeśli udałoby się wyeliminować negatywny wpływ nacinającej wiązki laserowej na pozostającą na podłożu warstwę rezystywną, być może dałoby się je poprawnie korygować.

Rezystory z pasty z wypełniaczem w postaci nanorurek węglowych wykazały się największą podatnością na działanie wiązki laserowej. Ich rezystancja po procesie korekcji wzrosła najbardziej ze wszystkich badanych elementów biernych. Jednakże sam proces nacinania nie przebiegł poprawnie. Świadczą o tym poszarpane krawędzie nacinanego kształtu, pozostałości substratów obróbki w postaci okruchów usuniętej warstwy, a przede wszystkim kruszenie się pozostałej warstwy rezystywnej. Ze względu na właściwości rezystorów na bazie nanorurek węglowych można założyć, że po wykonaniu szeregu badań i prac eliminujących błędy i udoskonalających proces cięcia możliwe będzie stosowanie tego materiału do warstwowych elementów biernych na większą skalę.

Rezystory polimerowe stanowią pewną lukę w dziedzinie elektroniki drukowanej. Gdyby udało się znaleźć sposób na poprawną korekcję tych elementów biernych, także na podłożach polimerowych – elastycznych, dla których są przeznaczone, byłby to duży postęp technologiczny. Przewiduje się, że zmiana trybu pracy lasera z cią-

głego na impulsowy pozwoliłaby na istotne zmniejszenie narażenia termicznego podłoża. Ciepło z absorbowanego promieniowania laserowego dyfunduje w stronę podłoża, co powoduje, że podłoże nagrzewa się z opóźnieniem i wolniej w porównaniu do korygowanej warstwy w obszarze oddziaływania promieniowania laserowego. Skrócenie czasu trwania pojedynczego cyklu pracy lasera do wartości krótszej, niż wartość opóźnienia nagrzewania podłoża oraz wprowadzenie odstępu czasowego pomiędzy impulsami laserowymi o wartości pozwalającej na wystygnięcie warstwy i podłoża pozwoliłoby na zmniejszenie temperatury podłoża przy zachowaniu temperatury szczytowej korygowanej warstwy na podobnym poziomie. Z uwagi na zastosowany sposób nacięcia rezystora w kierunku poprzecznym szerokość linii cięcia ma znaczący wpływ na zmianę rezystancji rezystora w wyniku korekcji. Zastosowanie profilu cięcia o kształcie litery L zdaniem autorów znacząco zredukowałoby rozrzuty wyników ze względu na małą podatność szerokości cięcia na rezystancję, jednakże wówczas problemy podczas korekcji i uwidocznione w postaci rozrzutów uzyskanych przyrostów rezystancji byłyby zamaskowane.

Literatura

- [1] Praca zbiorowa pod redakcją Janke W., Jakubowska M., Kulawik J., Stadler A., *Technologia grubowarstwowa – wybrane zagadnienia*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2011, str. 67 - 98
- [2] Achmatowicz S., Jakubowska M.: *The adjustment of thick film components and circuits*, Handbook of Thick Film Technology, , Ayr, Scotland, Electrochemical Limited, 2005, 978-0904705379
- [3] Góral A.: *Technika warstwowa w mikroelektronice*, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1973
- [4] Miś E.: *Wytwarzanie i właściwości strukturalne, elektryczne oraz stabilność miniaturowych elementów biernych na potrzeby technologii grubowarstwowej i LTCC*, Rozprawa doktorska, 2008, Politechnika Wrocławska, Wrocław, 8 - 20, 26-28
- [5] Szczepański Z., Okoniewski S.: *Technologia i materiałoznawstwo dla elektroników*, 3, Warszawa, WSiP, 2007, 978-83-02-09879-6, 78-81, 177 - 188
- [6] Dybowska Ł.: *Badanie procesu korekcji laserowej kompozytowych rezystorów grubowarstwowych*, Praca dyplomowa inżynierska, 2013, Politechnika Warszawska, Warszawa
- [7] Stanclik J.: *Elementy biernie i podzespoły elektroniczne*

- ne, Karkonoskie Towarzystwo Naukowe Kolegium Karkonoskie, Jelenia Góra 2005
- [8] Golonka L., Cermetowe rezystory grubowarstwowe, Wrocław 1991, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej
- [9] Dybowska Ł., Właściwości rezystorów grubowarstwowych, Praca przejściowa, 2013, Politechnika Warszawska, Warszawa