

Małgorzata Jakubowska^{1,2}, Maciej Sibiński³, Marcin Słoma^{1*}, Anna Młożniak², Daniel Janczak¹

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, ul. św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa, Poland

² Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, Poland

³ Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź, Poland

* Corresponding author. E-mail: marcin.sloma@mchtr.pw.edu.pl

Otrzymano (Received) 31.05.2010

DRUKOWANE CZUJNIKI ELEKTRONICZNE ZBUDOWANE Z KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH ZAWIERAJĄCYCH NANORURKI WĘGLOWE

Przedstawiono wyniki badań nad opracowaniem rodziny kompozycji polimerowych z nanorurkami węglowymi do zastosowania w produkcji czujników technikami drukarskimi. Przebadano wpływ zawartości nanorurek węglowych w kompozycjach polimerowych na właściwości elektryczne warstw nanoszonych sitodrukiem oraz przydatność do zastosowania ich w produkcji czujników temperatury i nacisku. Kompozycje te przeznaczone są do zastosowania w produkcji układów elektroniki drukowanej na podłożach elastycznych, gdzie kluczowym aspektem jest uzyskanie wysokiej wytrzymałości na naprężenia mechaniczne oraz cykliczne naprężenia zmęczeniowe. W przypadku pomiarów temperatury w zakresie 5÷273 K istotne jest również utrzymanie stabilności rezystancji przy zmiennych cyklach wzrostu i spadku temperatury. Kompozycje o zawartości od 0,1 do 1% nanorurek pozwalają na wytworzenie warstw o zakresach rezystancji 10^3 - 10^6 Ω, adekwatnych do zastosowania w rezystancyjnych układach pomiaru temperatury. Możliwość nadrukowania dowolnego wzoru pozwala na wytworzenie czujników nacisku dostosowanych do powierzchni, dla których ma być dokonywany pomiar, upraszczając procedurę i zwiększając dokładność.

Słowa kluczowe: nanorurki węglowe, elektronika drukowana, czujniki temperatury, czujniki nacisku

PRINTED ELECTRONIC SENSORS FABRICATED FROM POLYMER COMPOSITES CONTAINING CARBON NANOTUBES

Paper presents results of experiments related to fabrication of polymer compositions filled with carbon nanotubes. This type of materials were used for production of printed electronics sensors, which is a new trend in production of electronic devices and circuits for elastic and disposable electronics. Nanotube amount in compositions was evaluated in relation to electric properties of screen printed layers. Obtained polymer-nanotube layers demonstrate favourable electrical properties and high mechanical durability, what inspired authors to use that potential in production of various types of sensors including temperature and pressure sensors. Compositions are optimized for production of printed electronics elastic structures where key aspect is to obtain highly durable layers especially resistant to mechanical fatigue. Low temperature (5÷273 K) measurements demands to preserve measurement stability in cyclical temperature drops and raises. Specially developed pattern of screen printed silver paths and carbon nanotube areas was fabricated for pressure measurement through contact resistance changes. It is widely used method in application such as electronic foil keypads, potentiometers or pressure sensors. Investigated samples demonstrated over thousandfold change in measured contact resistance. This is way above resistance changes measured for other carbonic filling material such as fine grained graphite or carbon black. Compositions with 0.1÷1 wt.% of carbon nanotubes allows to fabricate conductive layers with resistance range 10^3 - 10^6 Ω adequate for resistive temperature sensors. By special manufacturing technology and thermal processes stable and linear characteristics were obtained. By employment of carbon nanotubes as the active material, parasitic tensometric effects were eliminated. Ability to print various patterns allows to manufacture sensors adjusted to complicated shapes of objects, what makes measurements more precise. This type of sensors can meet the conditions of elastic skin temperature sensors for textronic applications.

Keywords: carbon nanotubes, printed electronics, temperature sensors, pressure sensors

WPROWADZENIE

Czujniki zawierające nanorurki węglowe (CNT) znalazły się w ostatnim czasie w kręgu zainteresowania ze względu na swoje wszechstronne zastosowania. Ostatnie doniesienia literaturowe opisują możliwości stworzenia czujników biochemicznych [1-4], czujników gazów [5-7], w tym czujników poziomego próżni [8, 9], ale także czujników kontrolujących naprężenia w kon-

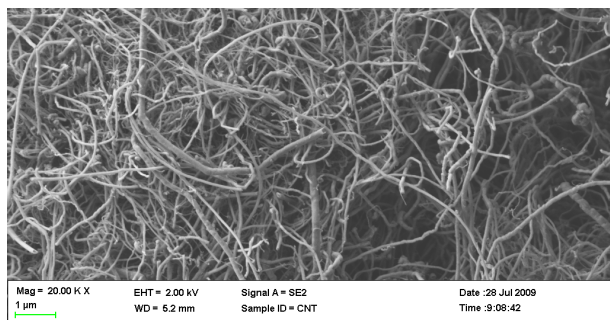
strukcjach [10, 11] oraz innego przeznaczenia [12]. Materiałami, które często są stosowane do wytwarzania tego rodzaju czujników, są kompozyty polimerowe z nanorurkami węglowymi [13-15], stosowane do wytwarzania czujników elastycznych [16, 17], w tym nanoszone technikami drukarskimi [18-20]. Na wytworzenie tak zróżnicowanej rodziny czujników pozwalają

unikatowe właściwości elektryczne i mechaniczne nanorurek węglowych.

Celem badań było opracowanie autorskich rozwiązań czujników, wytwarzanych z zastosowaniem kompozycji polimerowych zawierających nanorurki węglowe. Wprowadzenie nanorurek węglowych do nośników polimerowych wymagało opracowania metodyki ich dyspersji. Jednym z głównych celów było wytworzenie czujników przy zastosowaniu popularnych technik drukarskich. Nanoszenie warstw sitodrukiem jest dobrze znaną metodą wytwarzania elektrod kompozytowych, stosowaną w wielkoseryjnej produkcji tanich czujników jednorazowego użytku [21-24]. Istnieje wiele rozwiązań wykorzystujących różne rodzaje fazy funkcjonalnej w kompozytach, jednakże najczęstszym rozwiązaniem jest stosowanie elektrod wytworzonych z kompozytów węglowych ze względu na niskie koszty produkcji i szerokie spektrum zastosowań. Tego rodzaju kompozycje złożone są z proszków grafitu lub sadzy w osnowie żywic polimerowych. Zastosowanie nanorurek węglowych pozwoliło na uzyskanie większej czułości w przypadku czujników nacisku oraz możliwość otrzymania czujników elastycznych, zachowujących niezmiennie właściwości elektryczne pod wpływem czynników mechanicznych. W ten sposób uzyskano warstwy o nowych właściwościach, możliwe do wytworzenia z zastosowaniem taniej i efektywnej techniki sitodruku.

MATERIAŁY I PREPARATYKA

Do opracowania kompozycji wykorzystano wielowarstwowe nanorurki węglowe (MWCNT). Wymiary charakterystyczne określono na podstawie obserwacji pod mikroskopem elektronowym SEM (rys. 1). Średnia średnica nanorurek w stosowanym materiale to 10÷40 nm, a długość 0,5÷5 μm, choć zaobserwowano również dłuższe struktury.



Rys. 1. Obraz HRSEM stosowanych nanorurek węglowych
Fig. 1. HRSEM picture of used carbon nanotubes

Materiały stosowane w wytwarzaniu układów elektroniki drukowanej powinny odznaczać się niskimi kosztami ze względu na możliwość wytwarzania układów jednorazowego użytku. Z tego względu zastosowano nanorurki otrzymywane w procesie rozpadu węglowodorów, obecnie jedynym, pozwalającym na uzy-

skiwanie masowych ilości nanorurek. Efektem ubocznym wysokiej wydajności procesu jest obecność innych struktur węglowych oraz katalizatora metalicznego w znaczących ilościach. Jednakże inne metody otrzymywania nanorurek oraz techniki oczyszczania czy segregacja potrafią zwiększyć koszt materiału o kilka rzędów wielkości.

Jako nośnik polimerowy wytypowano roztwór polimetakrylanu metylu (PMMA) w octanie karbitolu butylowego, stosowany już przez autorów [25]. Nanorurki węglowe zdyspersjowano w osnowach polimerowych w celu osiągnięcia ostatecznych kompozycji. W zależności od oczekiwanych właściwości elektrycznych wytworzono zawiesiny o różnych zawartościach nanorurek od 0,1 do 1% wagowo. Warstwy otrzymano poprzez naniesienie kompozycji techniką sitodruku na folie poliestrowe i odparowanie rozpuszczalnika w temp. 130°C przez 15 min.

WYNIKI BADAŃ

Po nadrukowaniu warstw zmierzono ich właściwości elektryczne, aby określić zależność pomiędzy zawartością nanorurek w kompozycji a rezystancją powierzchniową warstw. Pomiary przeprowadzono na multimetrze cyfrowym Keithley 2001. Wartości rezystancji zawarte są w tabeli 1. Wszystkie próbki wykazywały przewodnictwo elektryczne z wartościami rezystancji wskazującymi na zawartość nanorurek powyżej progu perkolacji.

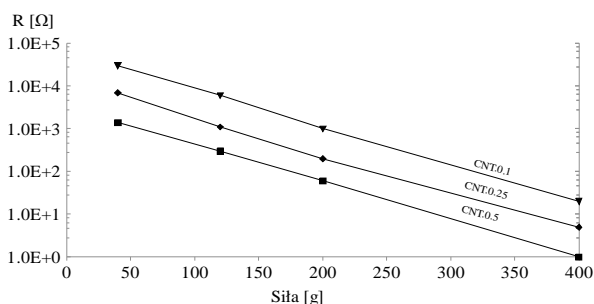
TABELA 1. Wartości rezystancji powierzchniowej dla próbek o różnej zawartości nanorurek
TABLE 1. Sheet resistance values for samples with different nanotube amount

| Nr pasty | Zawartość nanorurek w kompozycji, % | Rezystancja powierzchniowa warstw, Ω/□ |
|----------|-------------------------------------|--|
| CNT.0.1 | 0,1 | 613 k |
| CNT.0.25 | 0,25 | 28 k |
| CNT.0.5 | 0,5 | 3,3 k |
| CNT.1.0 | 1,0 | 870 k |

Czujniki nacisku

Występująca na kontakcie dwóch warstw polimerowo-węglowych rezystancja przejścia jest parametrem niezwykle istotnym w takich aplikacjach, jak czujniki ciśnienia czy potencjometry kontaktowe. Ze wzrostem przyłożonego ciśnienia rezystancja maleje z charakterystyką liniową w układzie logarytmicznych wartości współrzędnych. Dzięki zastosowaniu nanorurek węglowych można uzyskać warstwy o własnościach znacząco różnych niż w przypadku innych wypełniaczy węglowych. Niespotykany w przypadku innych struktur współczynnik długości do średnicy dochodzący do kilku tysięcy, pozwalający na wytworzenie warstw o niewielkiej zawartości wypełniacza, umożliwia stworzenie zupełnie nowego rodzaju czujników.

Wzór czujnika nacisku może być dowolny, odpowiadający kształtowi powierzchni nacisku. W tym przypadku warstwy pomiarowe nadrukowane zostały w postaci powierzchni kolistych o średnicy 5 mm z dodatkowymi elektrodami polimerowo-srebrowymi. Wzór został zgięty wzdłuż osi położonej w połowie odległości pomiędzy nadrukami PMMA-CNT tak, aby nadruki stykały się bezpośrednio ze sobą. Nadrukowano trzy rodzaje czujników z kompozycji CNT.0.1, CNT.0.25 i CNT.0.5. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiarów rezystancji kontaktowej w funkcji siły przyłożonej prostopadle do powierzchni kontaktujących się warstw rezystywnych.



Rys. 2. Zależność zmian rezystancji kontaktowej od przyłożonej siły nacisku

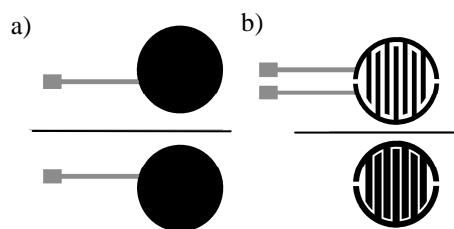
Fig. 2. Relation between tension changes and sample contact resistance

Początkowo zmiany rezystancji w funkcji siły wykazywały duży rozrzut. Dopiero po kilku cyklach pomiarowych dokładność pomiaru poprawiła się i odczyty były powtarzalne w kolejnych cyklach pomiarowych. Mała zawartość nanorurek w warstwie sprawia, że ilość czynnych kontaktów elektrycznych w miarę wzrostu siły gwałtownie rośnie. W badanym zakresie zmiany siły uzyskano około 1500-krotną zmianę wartości rezystancji. Jest to wartość wielokrotnie wyższa od uzyskanej dla innych wypełniaczy węglowych uzyskujących najwyżej 100-krotną zmianę [26]. Mała zawartość nanorurek powoduje, że wszystkie warstwy były transparentne optycznie, z transmitancją optyczną w zakresie od 40 do 85%. Pozwala to na stworzenie nowego rodzaju czujników, jak chociażby transparentnych czujników nacisku.

Na podstawie uzyskanych wyników stworzono projekt aplikacji tego rodzaju czujników do produkcji mat sensorycznych do zastosowania w medycznych badaniach rozkładu nacisku na podszewie stopy ludzkiej. Projekt zakłada stworzenie matrycy czujników złożonych z kompozytów polimerowo-nanorurkowych i elektrod srebrnych. Pojedyncze czujniki matrycy, przedstawione na rysunku 3, wykonane będą z zastosowaniem elektrod pełnych (a) lub grzebieniowych (b).

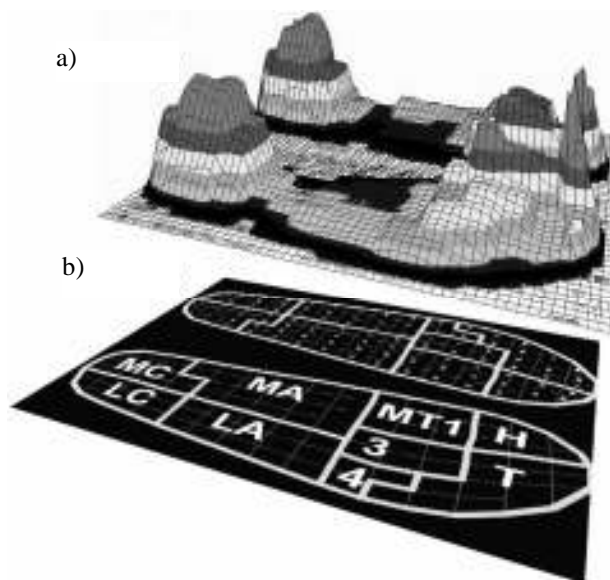
Obecnie prowadzone badania koncentrują się nad wykonaniem drukowanej matrycy czujników, która będzie służyła jako wkładka umieszczana w buty osoby badanej lub na stacjonarnej platformie pomiarowej. Podobne istniejące rozwiązania wykorzystują najczęściej czujniki pojemnościowe [27], jednak są to rozwią-

zania kosztowne. Możliwość wykonania tego rodzaju czujników z zastosowaniem tanich technik drukarskich umożliwi wykonywanie elementów dopasowanych do fizjonomii pacjenta, a także pozwoli na wykonywanie tanich elementów jednorazowego użytku.



Rys. 3. Czujniki nacisku do zastosowania w matrycy pomiarowej. Czujnik z elektrodami pełnymi (a) i elektrodami grzebieniowymi (b). Czarne obszary przedstawiają kompozyt PMMA-CNT, a szare drukowane elektrody srebrne

Fig. 3. Pressure sensors used for mapping matrix. Sensor with filled electrodes (a) and comb-shape electrodes (b). Black areas indicating PMMA-CNT layers, and gray areas indicating printed silver electrodes

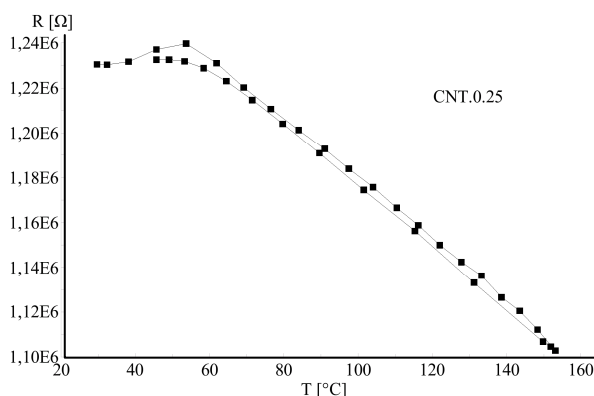
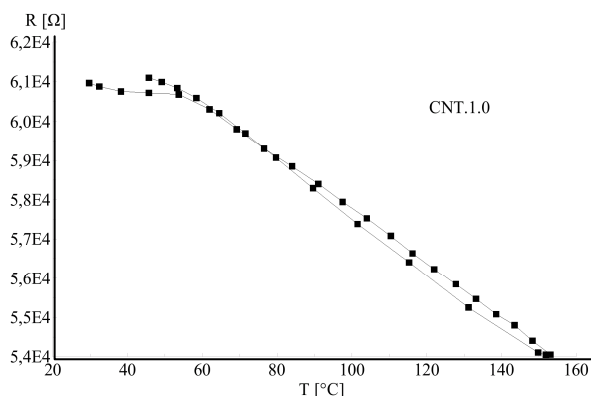


Rys. 4. Mapa rozkładu nacisku w podszewie stopy (a) uzyskana z matrycy czujników pomiarowych (b) [26]

Fig. 4. Pressure map of foot pressure distribution (a) obtained from sensor matrix (b) [26]

Elastyczne czujniki temperatury

Idea stworzenia elastycznych czujników temperatury powstała po przeprowadzeniu badań nad stabilnością termiczną warstw i określeniem wartości temperaturowego współczynnika rezystancji TWR. Pomiary zależności rezystancji od temperatury przeprowadzone zostały dla dwóch rodzajów próbek CNT.0.25 i CNT.1.0 w zakresie temperatur od 20 do 155°C w czasie 20 sekund. Pomiary rezystancji przeprowadzone w trakcie pierwszego cyklu podgrzewania wykazały występowanie znaczącej wartości histerezy. Z tego względu właściwy pomiar TWR został przeprowadzony po wygrzaniu i wystygnięciu próbek. Przebiegi zmian rezystancji w funkcji temperatury przedstawione są na rysunku 5.

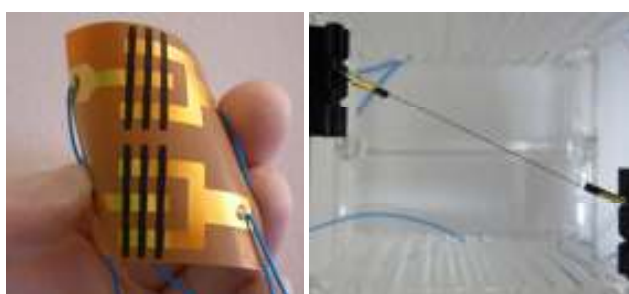


Rys. 5. Zależność zmian rezystancji w funkcji temperatury

Fig. 5. Relation between sample resistance related to temperature changes

Zmiany rezystancji w całym zakresie zmian temperatury wyniosły ok. 18% dla próbek CNT.1.0 i ok. 11% dla próbek CNT.0.25, co odpowiada wartości ok. 1500 i 800 ppm. W okolicy temperatury 50°C można zaobserwować nieliniowość zmian rezystancji. Jest to spowodowane reorganizacją nieuporządkowanych łańcuchów polimerowych około temperatury mięknięcia osnowy polimerowej.

Charakterystyczną właściwością badanych czujników był również brak efektu tensometrycznego. Warstwy poddane stałym w czasie naprężeniom mechanicznym nie zmieniały swojej rezystancji. Umożliwia to wytworzenie w pełni elastycznych czujników dla rozwiązań typu „inteligentnej odzieży”, zarówno w postaci warstw, jak i włókien termistorowych (rys. 6). Pozwala to na wyeliminowanie jednej z podstawowych barier stosowania elementów termistorowych w układach elastycznych, jaką jest występowanie efektu tensometrycznego.



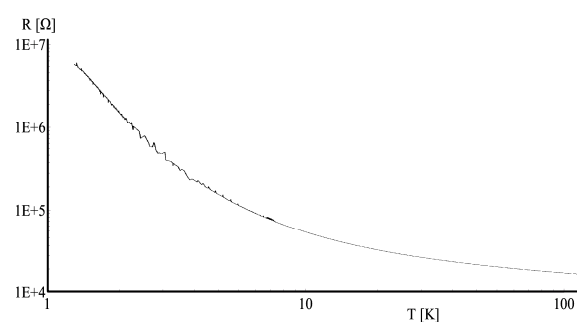
Rys. 6. Przykładowe elastyczne czujniki temperatury: nadruk na folii (z lewej), włókno termistorowe (z prawej)

Fig. 6. Elastic temperature sensors: printed on foil (left), thermistor fiber (right)

Czujniki kriostatyczne

Badania stabilności termicznej warstw zostały przeprowadzone również w niskich temperaturach. Eksperyment przeprowadzono w komorze kriostatycznej z ciekłym heliem. Próbką CNT.1.0 była chłodzona i podgrzewana w zakresie temperatur 1÷273 K. W trakcie zmian temperatury rejestrowano zmianę rezystancji

próbki (rys. 7). Zmiany rezystancji przebiegały w sposób stabilny w całym zakresie temperatur bez gwałtownych skoków wartości. Mimo przeprowadzenia wielokrotnego cyklu chłodzenia i podgrzewania nie zaobserwowano histerezy zmian wartości rezystancji. Próbkę podgrzaną do temperatury pokojowej wykazywały tę samą wartość rezystancji co przed całym eksperymentem.



Rys. 7. Zależność zmian rezystancji w funkcji temperatury próbek ochładzanych ciekłym heliem

Fig. 7. Relation between resistance and temperature changes for samples immersed in liquid helium

Charakterystyczne zachowanie warstw z nanorurkami zaowocowało powstaniem idei stworzenia elastycznych czujników niskich temperatur. Wytworzenie czujników na elastycznych podłożach umożliwiłoby wstępne dopasowanie ich do kształtu obiektu badanego, co pozwoliłoby na dokładny pomiar temperatury powierzchni. Po schłodzeniu do niskich temperatur czujnik traciłby elastyczność i nie byłaby możliwa powtórna zmiana jego kształtu do czasu ponownego podgrzania. Obecne rozwiązania najczęściej bazują na stacjonarnym czujniku umieszczonym w przestrzeni komory, a to, jak wiadomo, może wprowadzać błędy w oszacowaniu temperatury obiektu. Dzięki zastosowaniu warstw polimerowo-nanorurkowych połączonych z odpowiednim układem pomiarowym możliwe byłoby stworzenie nowatorskiego rozwiązania do zastosowania w pomiarach układów w niskich temperaturach.

PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki są częścią badań nad wytworzeniem grupy materiałów kompozytowych zawierających nanorurki węglowe do zastosowania w elektronice drukowanej - coraz bardziej popularnej dziedzinie wytwarzania obwodów elektronicznych. Otrzymane elektrody polimerowo-nanorurkowe odznaczają się korzystnymi właściwościami elektrycznymi i wysoką odpornością mechaniczną, co zachęciło autorów do wytworzenia grupy czujników zbudowanych z kompozytów PMMA-CNT. Drukowane czujniki nacisku wykonano z wykorzystaniem efektu zmiennej rezystancji kontaktowej dwóch warstw rezystywnych. Tego rodzaju czujniki są łatwe do przygotowania, mogą mieć kształt dopasowany do analizowanej powierzchni oraz wielokrotnie przewyższając czułością pomiarów podobne czujniki zawierające sadzę węglową lub grafit. Elastyczne czujniki temperatury wytworzone w postaci pasków nadrukowanych na elastyczne podłoże lub włókien pokrytych kompozycjami polimerowo-nanorurkowymi odznaczają się wysoką wartością współczynnika TWR, brakiem negatywnego efektu tensometrycznego oraz wysoką elastycznością, co umożliwia wykorzystanie ich przy produkcji inteligentnych ubrań. Ciekawymi właściwościami elektrycznymi charakteryzują się warstwy PMMA-CNT poddane niskim temperaturom. Zmiany rezystancji są stabilne oraz powtarzalne w cyklach chłodzenia i grzania. W połączeniu ze wstępną elastycznością w temperaturze pokojowej pozwala to na wytworzenie czujników niskich temperatur montowanych bezpośrednio na badanych obiektach, nawet o skomplikowanej geometrii przestrzennej.

Podziękowania

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2010 jako projekt badawczy.

LITERATURA

- [1] Lim S.H., Wei J., Lin J., Li Q., KuaYou J., A glucose biosensor based on electrodeposition of palladium nanoparticles and glucose oxidase onto nafion-solubilized carbon nanotube electrode, *Biosensors and Bioelectronics*, 15 May 2005, 20, 11, 2341-2346.
- [2] Tran T.H., Kwon J.H., Lee K.S., Lee J.W., Ju B.K., pH sensor using carbon nanotubes as sensing material, *First International Conference on Communications and Electronics ICCE '06*, Hanoi 10-11 Oct. 2006, 490-493.
- [3] Kwon J.H., Lee K.S., Ju B.K., Fabrication of single walled-carbon nanotubes based pH sensor using ultra-precision spray, *Key Engineering Materials Vols. 326-328*, 2006, 1479-1482.
- [4] Pham A., Carbon nanotube resonator sensors for remote sensing systems, *Proc. of IEEE Wireless, Communication Technology*, Oct. 2003, 233-236.
- [5] Suehiro J., Zhou G., Hara M., Fabrication of a carbon nanotube-based gas sensor using dielectrophoresis and its application for ammonia detection by impedance spectroscopy, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003, 36, 109-114.
- [6] Xin L., Junhua L., Yong Z., Study of catalyst grains effect on electrode of self-sustaining discharge carbon nanotubes gas sensor array, *Proceedings of the 14th International Vacuum Microelectronics Conference IVMC 2001*, Davis 2001, 65-66.
- [7] Lu G., Ocola L.E., Chen J., Room-temperature gas sensing based on electron transfer between discrete tin oxide nanocrystals and multiwalled carbon nanotubes, *Adv. Mater.* 2009, 21, 1-5.
- [8] Wu D.H., Chien W.T., Chen Ch. S., Chen H.H., Resonant frequency analysis of fixed-free single-walled carbon nanotube-based mass sensor, *Sensors and Actuators A: Physical* 2006, 126, 1, 117-121.
- [9] Zhang Y., Guo H., Acoustic analysis of single-walled carbon nanotube-based vacuum sensor, *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems NEMS 2007*, Bangkok 2007, 1163-1166.
- [10] Zhao Q., Frogley M.D., Wagner H.D., Direction-sensitive strain-mapping with carbon nanotube sensors, *Composites Science and Technology* 2002, 62, 1, 147-150.
- [11] Bai H.L., Li W.J., W. Chow W., Zhou Y., A carbon nanotube sensor for wall shear stress measurement, *Experiments in Fluids*, 48, 4, 679-691.
- [12] Deng J., Ghosh K., Modeling carbon nanotube sensors, *IEEE Sensors Journal* 2007, 7, 9.
- [13] Pumera M., Merkoci A., Alegret S., Carbon nanotube-epoxy composites for electrochemical sensing, *Sensors and Actuators B* 2006, 113, 617-622.
- [14] Wei Ch., Dai L., Roy A., Benson Tolle T., Multifunctional chemical vapor sensors of aligned carbon nanotube and polymer composites, *J. Am. Chem. Soc.* 2006, 128(5), 1412-1413.
- [15] Pradhan B., Setyowati K., Liu H., Waldeck D.H., Jian Chen J., Carbon nanotube-polymer nanocomposite infrared sensor, *Nano Lett.* 2008, 8(4), 1142-1146.
- [16] Parikh K., Cattanach K., Rao R., Suh D.S., Wu A., Manohar S.K., Flexible vapour sensors using single walled carbon nanotubes, *Sensors and Actuators B* 2006, 113, 55-63.
- [17] Sun Y., Wang H. H., High-Performance, Flexible hydrogen sensors that use carbon nanotubes decorated with palladium nanoparticles, *Advanced Materials* 2007, 19, 19, 2818-2823.
- [18] Wang J., Musameh M., Carbon nanotube screen-printed electrochemical sensors, *Analyst* 2004, 129, 1004, 1-2.
- [19] Mäklin J., Mustonen T., Halonen N., Tóth G., Inkjet printed resistive and chemical-FET carbon nanotube gas sensors, *Physica Status Solidi (b) Special Issue: Electronic Properties of Novel Materials: "Molecular nanostructures"* 2008, 245, 10, 2335-2338.
- [20] Moon S-IL., Paek K-K., Lee Y-H., Park H-K., Bias-heating recovery of MWCNT gas sensor, *Materials Letters* 2008, 62, 16, 2422-2425.
- [21] Avramescu A., Andreescu S., Noguer T., Bala C., Biosensors designed for environmental and food quality control based on screen-printed graphite electrodes with different configurations, *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 2009, 374, 1, 25-32.
- [22] Wring S., Hart J., Chemically modified, screen-printed carbon electrodes, *Analyst* 1992, 117, 1281-1286.
- [23] Wring S.A., Harta J.P., Bracey L., Birch B.J., Development of screen-printed carbon electrodes, chemically modified with cobalt phthalocyanine, for electrochemical sensor applications, *Analytica Chimica Acta* 1990, 231, 203-212.
- [24] Wanga J., Tiana B., Nascimento V. B., Angnes L., Performance of screen-printed carbon electrodes fabricated from dif-

- ferent carbon inks, *Electrochimica Acta*, 30 July 1998, 43, 23, 3459-3465.
- [25] Jakubowska M., Słoma M., Młóżniak A., Grubowarstwowe kompozyty polimerowe zawierające nanorurki węglowe w zastosowaniach elektroniki drukowanej, *Elektronika* 2010, 1, 66.
- [26] Łukasik A., Degradation in carbon-poliester film pressure sensors, XXXI International Conference of IMAPS Poland Chapter, Rzeszów-Kraciczyn, 23-26 September 2007.
- [27] Hessert M.J., Vyas M., Leach J., Hu K., Lipsitz L.A., Novak V., Foot pressure distribution during walking in young and old adults, *BMC Geriatrics* 2005, 5, 8.