

**Lidia MAKSYMOWICZ, Stanisław NOWAK, Edward LEJA,
Tadeusz PISARKIEWICZ, Tomasz STAPIŃSKI, Katarzyna ZAKRZEWSKA***
AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA ELEKTRONIKI

Mikrosystemy i Sensory

Prof. dr hab. Lidia J. MAKSYMOWICZ

Dyplom magistra fizyki w 1962 r. na UJ, doktorat nauk fizycznych w 1969 r. oraz habilitacja w 1980 r. na AGH, tytuł profesora w 1992. Jest współautorem jednej książki oraz 130 publikacji naukowych na temat magnetycznych struktur cienkowarstwowych, rezonansu fal spinowych, półprzewodników magnetycznych Stypendystka the British Council. W latach 1996-2002 dziekan Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH, a od roku 2002 kierownik Katedry Elektroniki.

e-mail: limaksy@agh.edu.pl



Dr hab. Tadeusz PISARKIEWICZ

Kieruje zespołem zajmującym się badaniem struktur fotowoltaicznych i mikrosystemów pomiarowych. Jest autorem ponad 120 prac naukowych oraz 7 patentów. W 1992 roku był stypendystą Katolickiego Uniwersytetu w Leuven (Belgia). Wypromował 2 doktorów nauk technicznych. Obecnie jest prodziekanem Wydziału EAiE AGH.

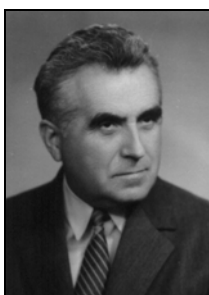
e-mail: pisar@agh.edu.pl



Prof. dr hab. inż. Stanisław NOWAK

Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej (1957), doktorat w 1968 r., habilitacja w 1986 w Politechnice Wrocławskiej, tytuł profesora zwyczajnego w 1992 r. w AGH. Od 1978 do 1984 r. zatrudniony w Krakowskich Zakładach Elektronicznych "Telpod" na stanowisku głównego konstruktora. Od 1984 r. do 2003 kierownik Instytutu a później Katedry Elektroniki AGH. Autor ponad 100 publikacji dotyczących zagadnień technologii elektronicznej i optoelektroniki. Współautor 28 patentów.

e-mail: zrnnowak@cyf-kr.edu.pl



Dr hab. Tomasz STAPIŃSKI

Absolwent Wydz. Mat-Fiz-Chem. UJ (1977). Od 1977 r. zatrudniony na AGH. W 1985 r. uzyskał stopień dr nauk fizycznych (UJ), a w 2000 stopień dr hab. w dyscyplinie elektronika na AGH. Zatrudniony jest na stanowisku profesora nadzwyczajnego w Katedrze Elektroniki AGH. Jest autorem ponad 100 prac naukowych dotyczących badań podstawowych i zastosowań cienkich warstw i struktur cienkowarstwowych w elektronice. Wypromował 2 doktorów nauk technicznych.

e-mail: stap@agh.edu.pl



Dr hab. Edward LEJA

Absolwent Wydziału Fizyki Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Opolu (1958). W 1969 r. uzyskał tytuł doktora na wydziale EAiE AGH. Stopień doktora habilitowanego uzyskał w 1984 r. w Wojskowej Akademii Technicznej. Jest profesorem w AGH. Pionier w dziedzinie wykorzystania techniki jonowego rozpylania. Jego publikacje dotyczą zagadnień technologii próżniowych, materiałów cienkowarstwowych dla optoelektroniki i zastosowań zaawansowanych technologii próżniowych w przemyśle.

e-mail: leja@agh.edu.pl



Dr hab. inż. Katarzyna ZAKRZEWSKA

Absolwentka Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, Akademii Górniczo-Hutniczej w zakresie fizyki technicznej. W 1986 roku uzyskała stopień doktora nauk technicznych. Od 1988 zatrudniona w AGH. Stopień doktora habilitowanego uzyskała w 2004 w AGH. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Elektroniki zajmując się półprzewodnikowymi sensorami gazu na bazie TiO₂ i SnO₂.

e-mail: zak@agh.edu.pl



Streszczenie

Prezentowana praca zawiera wybrane zagadnienia naukowe związane z rozwijaną od lat tematyką w Katedrze Elektroniki dotyczącą mikrosystemów i sensorów. Autorzy odnieśli się do szczegółowych zagadnień takich jak: półprzewodnikowe sensory gazu, zmodyfikowane struktury multikrystalicznego krzemu jako detektor światła, cienkowarstwowe magnetyczne złącza tunelowe i ich zastosowania. Opisano również opracowywane technologie i konstrukcje urządzeń próżniowych do wytwarzania cienkich warstw i układów wielowarstwowych. Zaprezentowano przykładowe zastosowania techniki sensorowej i radiowej identyfikacji obiektów RFID w sektorze energetycznym. Przedstawiono zastosowanie dwóch zaawansowanych technologii ceramicznych – współwypalanych folii ceramicznych LTCC oraz warstw grubych fotofornowalnych do wytworzenia elementów składowych mikrosystemu ceramicznego dla chromatografii – mikrokanalu oraz płomieniowego detektora jonizacyjnego.

Słowa kluczowe: optoelektronika, sensor gazu, półprzewodnik, zmodyfikowane struktury multikrystalicznego krzemu jako detektory światła, technologia cienkowarstwowa, urządzenia próżniowe, magnetyczne złącza tunelowe, magnetyczne pamięci o dostępie swobodnym MRAM, radiowa identyfikacja obiektów RFID, strefy zagrożone wybuchem, mikrosystem ceramiczny, mikrofluidyka, LTCC, warstwy grube fotofornowalne.

* Dziękujemy pozostałym współautorom artykułu: Tomaszowi STOBIECKIEMU, Henrykowi JANKOWSKIEMU, Konstantemu MARSZAŁKOWI, Cezaremu WORKOWI, Wojciechowi MAZIARZOWI, Barbarze SWATOWSKIEJ, Barbarze DZIURDZI, Zbigniewowi MAGOŃSKIEMU, których nazwiska ze względów formalnych nie mogły być umieszczone w wykazie autorów

Microsystems and Sensors

Abstract

The work deals with scientific problems connected with microsystems and sensor technology developed in Department of Electronics. The authors present their achievements such as semiconductor gas sensors, microcrystalline silicon light detectors, thin film magnetic tunnel junctions and their applications. Some vacuum systems for films and multilayers depositions were also designed and constructed by our scientific staff. The sensor and radio frequency identification (RFID) applications were also described. Two advanced ceramic technologies (photoimageable thick films and LTCC) has been successfully combined to obtain microfluidic structures – the microchannel and the flame ionisation detector which are intended to use in a simple, portable ceramic microsystem for chromatography.

Keywords: optoelectronics, semiconducting gas sensors, modified multicrystalline silicon structures as a light detector thin film technology, vacuum equipment, magnetic tunnel junctions, magnetic random access memory MRAM, Radio Frequency Identification (RFID), mine underground environment, ceramic microsystem, microfluidics, LTCC, photoimageable thick-films.

1. Wstęp

Katedra Elektroniki AGH od lat prowadzi działalność naukowo-badawczą związaną z mikrosystemami i sensorami. Są to zarówno badania podstawowe jak i aplikacyjne. W artykule przedstawiono szerokie spektrum zagadnień będących przedmio-

tem zainteresowania pracowników Katedry, począwszy od półprzewodnikowych sensorów gazu, zmodyfikowanych struktur multikrystalicznego krzemu jako detektorów światła, spintroniki (cienkowarstwowych magnetycznych złącz tunelowych), poprzez nowatorskie technologie próżniowe do wytwarzania cienkich warstw i układów wielowarstwowych oraz zastosowania techniki sensorowej i radiowej identyfikacji obiektów RFID w sektorze energetycznym. Omówiono także zastosowania zaawansowanych technologii ceramicznych – współwypalanych folii ceramicznych LTCC oraz warstw grubych fotofornalnych w mikrofluidyce.

2. Półprzewodnikowe sensory gazu

Na obecnym etapie rozwoju cywilizacji obserwuje się zasadniczy wzrost zagrożenia dla środowiska naturalnego człowieka. Przyczyniają się do tego w największym stopniu przemysł motoryzacyjny i energetyczny, oba oparte na spalaniu paliw naturalnych: węgla, ropy naftowej i gazu ziemnego. Najważniejsze składniki szkodliwych dla środowiska zanieczyszczeń stanowią pyły oraz takie gazy toksyczne jak: SO_x , NO_x , CO, CH_x , NH_3 , H_2S , pary metali ciężkich.

W rozwiązywaniu tego problemu obserwuje się działania w dwóch, tylko pozornie nie mających ze sobą nic wspólnego, kierunkach: z jednej strony - wykorzystanie ekologicznie bezpiecznych źródeł i nośników energii, jak energia słoneczna i wódór, z drugiej - konstruowanie czujników do ciągłej kontroli i monitorowania atmosfery. Dwutlenek tytanu jest półprzewodnikiem mającym podstawowe znaczenie dla obu tych kierunków badań [1-6]. Z jednej strony, wykazuje on znane i bardzo obiecujące własności fotokatalityczne, co powoduje iż jest stosowany jako fotoelektroda w urządzeniach służących do produkcji wodoru na drodze fotoelektrolizy. Z drugiej strony, czysty lub modyfikowany TiO_2 jest wykorzystywany jako materiał aktywny w półprzewodnikowych sensorach gazów zarówno redukujących (H_2 , CO) jak i utleniających (NO_x , O_2). Badania zmierzają do połączenia w jednym urządzeniu obu tych cech TiO_2 : fotoaktywności i czułości na oddziaływanie z gazem w celu skonstruowania na bazie nano- i mikrokrystalicznego dwutlenku tytanu aktywowanego światłem rezystancyjnego sensora gazu. Aktywacja światłem ma do spełnienia podwójną rolę:

- zapewnia samoczynną regenerację sensora poprzez dezaktywację zatrujących sensor zanieczyszczeń – samoczyszczący się sensor,
- pozwala ograniczyć pobór mocy przez sensor poprzez obniżenie temperatury jego pracy.

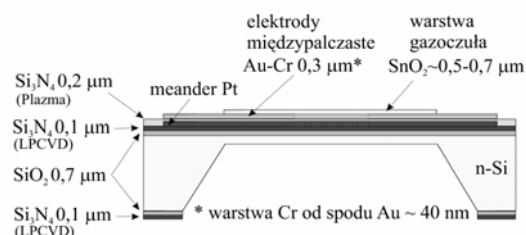
W pracy badano charakterystyki sensorowe czyli dynamiczne odpowiedzi czujników gazu w postaci zmian rezystancji na zadaną skokową zmianę koncentrację gazu. Aktywny element czujnika stanowi cienka warstwa półprzewodnika otrzymana w technologii rozpylania rf.

Do najważniejszych osiągnięć pracy nad technologią i konstrukcją rezystancyjnych sensorów gazów redukujących na bazie TiO_2 oraz SnO_2 zaliczyć należy [1-6]:

- opracowanie metod otrzymywania sensorów o dużej czułości i powtarzalności odpowiedzi na zmianę koncentracji wodoru i metanu,
- uzyskanie poprawy odpowiedzi po zatruciu sensora gazu na drodze naświetlania sensora promieniowaniem UV,
- obniżenie temperatury pracy do $250^\circ C$.

W Katedrze Elektroniki wytworzono i przetestowano kilka wersji sensorów, m.in. zbudowanych na podłożach ceramicznych Low Temperature Cofired Ceramic – LTCC (współpraca z Technicznym Uniwersytetem Ilmenau w Niemczech) [7, 8] oraz krzemowych (współpraca z Instytutem Technologii Elektronowej w Warszawie) [9]. Czujnik gazu w postaci mikroukładu na mem-

brane krzemowej pozwolił na przeprowadzanie eksperymentów z modulacją temperatury pracy (rys. 1).



Rys. 1. Ogólny przekrój mikrosensora gazu na membranie
Fig. 1. Cross section of a gas microsensor on a membrane

Technologię podłoża sensorowego wykonano w całości na linii technologicznej układów CMOS w ITE-Warszawa. Kształtka stanowiąca podłożo sensora wykonana jest z krzemu o grubości 0,4 mm i wymiarze bocznym 3 mm. Od spodu wytrawiono wnękę, dzięki czemu powstała cienka membrana o grubości kilku μm . Od strony górnej naniesiono cienkie warstwy SiO_2 oraz Si_3N_4 izolujące strukturę od krzemowego podłoża. Odpowiednią temperaturę pracy zapewnia wbudowany grzejnik platynowy o kształcie meandry. Kontakty do warstwy gazoczułej wykonano ze złota w postaci międzypalczastych elektrod.

Kolejne etapy technologiczne przeprowadzono w Katedrze Elektroniki AGH. Były to: próżniowe naniesienie tlenkowej warstwy gazoczułej (stanowiła ją cienka warstwa SnO_2 lub ZnO) oraz montaż mikrostruktur sensorowych w typowych obudowach TO-5.

Szybkość reakcji fizykochemicznych zachodzących na powierzchni sensora w obecności atmosfery gazowej silnie zależy od temperatury. Modulacja temperatury pozwala analizować odpowiedź sensora w stanie przejściowym.

Wytworzony sensor mikromechaniczny pracujący w trybie zmiennej-temperatury testowano w atmosferze gazowej o ustalonej wilgotności dla różnych kombinacji koncentracji gazów w mieszaninie. Analiza odpowiedzi sensora i zastosowanie odpowiedniej metody ekstrakcji cech pozwoliły na rozpoznanie gazów w mieszaninie binarnej za pomocą pojedynczego sensora z modulowaną temperaturą pracy [9]. Wykonany mikrosensor zbudowany na membranie krzemowej jest pierwszym tego typu układem wykonanym w Polsce. Może on współpracować z modulem sensorowym, zapewniającym odpowiednie warunki zasilania grzejnika i pomiaru warstwy gazoczułej. Układ zawiera też bloki wzmacniania i kondycjonowania sygnału. Komunikacja z komputerem osobistym pozwala na konfigurację modułu i transmisję danych z sensora. (Autorzy: W. Maziarz, T. Pisarkiewicz, K. Zakrzewska).

3. Zmodyfikowane struktury multikrystalicznego krzemu jako detektor światła

Detektory krzemowe stanowią szeroką grupę przetworników światło-prąd. Wśród nich wyróżnia się detektory kwantowe, których działanie obejmuje oddziaływanie kwantowe między światłem a elektronami, m.in. fotoemisję, fotoprzewodnictwo i efekt fotoelektryczny [10]. Struktury fotowoltaiczne na bazie krzemu odpowiednio modyfikowane również mogą stanowić rodzaj fotodetektora światła.

Amorficzne warstwy krzem-węgiel otrzymywano przy użyciu wielomodułowego systemu MW – PE CVD firmy Elettrorava S.p.A [11] w mieszaninie gazowej SiH_4+CH_4 , gdzie zawartość procentowa metanu w plazmie zawierała się w granicach 20% do 75%. Reakcja zachodziła w temperaturze $180^\circ C$ na podłożu, przy mocy RF 5 W i ciśnieniu ok. 80 Pa [12]. Warstwy nałożono na podłożo krzemu multikrystalicznego stanowiącego bazę struktur

fotowoltaicznych (ogniw słonecznych). Autorzy scharakteryzowali powierzchnię warstwy typu a-Si:C:H jak i wykonane struktury fotowoltaiczne. W celu określenia wpływu warstw na własności modyfikowanych struktur przeprowadzono szereg kompleksowych badań: optycznych – transmisji i odbicia, elektrycznych – wyznaczanie charakterystyk I-V ogniw słonecznych oraz analiza spektralnej fotoczułości.

Warstwy a-Si:C:H cechuje współczynnik załamania w granicach 1,75÷2,15 oraz optyczna przerwa energetyczna w przedziale od 2,46 do 3,17 eV. Pozwoliło to uzyskać istotną redukcję całkowitego odbicia światła od podłoża krzemowego z 26% do 6% [13], stąd też warstwy te pełnią funkcję powłok antyrefleksyjnych.

Do badania fotoczułości zastosowano zestaw złożony z monochromatora firmy Oriol z modulowaną wiązką światła z zakresu od 360 do 2500 nm, z siatka dyfrakcyjno-odbiciową o stałej siatki 0,033 mm [14]. Fotoczułość tych struktur badano w temperaturze pokojowej metodą napięciową i prądową. Sygnał napięciowy podawano na wejście przedwzmacniacza SR550 woltomierza selektywnego lock-in SR830 DSP Stanford Research System. Rejestrowano go w funkcji długości fali padającego światła z zakresu 400-1100 nm. Częstotliwość modulacji wiązki padającej wynosiła 90 Hz.

Zaobserwowano wzrost fotoczułości struktur pokrytych warstwą a-Si:C:H w stosunku do struktury niemodyfikowanej w obszarze spektralnym 600–1100 nm. Otwiera to nowe możliwości aplikacyjne wspomnianych warstw a-Si:C:H dla detektorów światła w zakresie czerwieni i bliskiej podczerwieni. (Autorzy rozdzielu: T. Stapiński, B. Swatowska).

4. Cienkowarstwowe magnetyczne złącza tunelowe i ich zastosowania

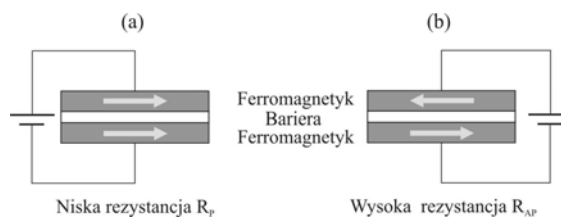
Odkrycie gigantycznego efektu magnetorezystancyjnego (GMR, Giant Magnetoresistance) [15] w magnetycznych układach cienkowarstwowych w końcu lat osiemdziesiątych zapoczątkowało rozwój nowej dziedziny zwanej spintroniką*. Spintronika zajmuje się badaniem spinowo zależnego przewodnictwa. Cechą charakterystyczną elementów spintronicznych jest to, że ich przewodnictwo może być sterowane zarówno polem elektrycznym jak i polem magnetycznym. Ponadto elementy spintroniczne wykazują nieulotny (zachowany po odłączeniu zasilania) stabilny stan wysoko lub nisko-rezystancyjny, który związany jest z ich magnetyzmem. Dwuzaciskowe elementy spintroniczne (wykorzystujące efekt GMR i AMR -Anisotropic Magnetoresistance) znalazły zastosowanie na skalę komercyjną jako czujniki pola magnetycznego [16] oraz głowice odczytowe twardych dysków [17]. Spektakularnym efektem zastosowania dwuzaciskowych elementów spintronicznych w głowicach odczytowych twardych dysków, zamiast indukcyjnych, był wzrost pojemności dysków z 10 Mbitów/cal² w latach osiemdziesiątych do około 100 Gbitów/cal² obecnie.

Magnetyczne Złącze Tunelowe

Spśród dwuzaciskowych elementów spintronicznych magnetyczne złącze tunelowe (MTJ, Magnetic Tunnel Junction) [18] jest obecnie przedmiotem bardzo intensywnych badań aplikacyjnych i podstawowych [25, 26], prowadzonych również w Katedrze Elektroniki AGH [19-24]. Zainteresowania aplikacyjne wynikają z jego specjalnych własności, niespotykanych w innych dwuzaciskowych elementach spintronicznych, do których należy zaliczyć duży współczynnik tunelowej magnetorezystancji i modyfikowalną w szerokim zakresie rezystancję (od omów do megaomów). Dzięki tym własnościom uważa się, że magnetyczne złącze tunelowe stanie się kluczowym elementem nowej generacji magnetorezystancyjnych pamięci o swobodnym dostępie (MRAM, Magnetic Random Access Memory) [26], nowego typu reprogramowalnych układów logicznych (RSP Reprogrammable Spin

Logic) [27], nowej generacji głowic odczytowych dysków twardych [28] oraz wysokoczułych czujników pola magnetycznego [29].

Magnetyczne złącze tunelowe w swojej podstawowej formie składa się z dwóch ferromagnetycznych elektrod przedzielonych barierą w postaci dielektryka (rys. 2). Działanie złącza opiera się na zjawisku tunelowania elektronów przez barierę potencjału. Prąd tunelowy zależy od parametrów bariery oraz wzajemnego kierunku namagnesowania elektrod. W efekcie spinowo zależnego tunelowania elektronów złącze wykazuje dwa stany rezystancyjne – wysoki i niski. Niski stan rezystancyjny (R_P) występuje w przypadku, gdy kierunki namagnesowania elektrod złącza są równoległe (rys. 2a) natomiast wysoki stan rezystancyjny (R_{AP}) występuje, gdy kierunki namagnesowania elektrod złącza są antyrównoległe (rys. 2b).



Rys. 2. Magnetyczne złącze tunelowe. Strzałki oznaczają kierunki namagnesowania elektrod ferromagnetycznych

Fig. 2. Magnetic tunnel junction. The arrows denote magnetization directions of ferromagnetic electrodes

Parametrem, który określa względną różnicę tych rezystancji jest tunelowa magnetorezystancja definiowana jako $TMR = (R_{AP} - R_P) / R_P$. Ponadto dla złącza określa się takie parametry jak: rezystancję na powierzchnię ($R \times A$) oraz pola przełączeń warstwy swobodnej (H_S) i przytrzymanej (H_P).

Ze względu na swoją „dwustanowość”, duży współczynnik TMR (dochodzący do 355% [15]), modyfikowalną w szerokim zakresie wartość $R \times A$ ($\Omega \mu m^2$ do $M\Omega \mu m^2$), małe wartości pól przełączeń warstwy swobodnej (H_S) oraz duże wartości pól przełączeń warstwy przytrzymanej (H_P), uważa się że magnetyczne złącze tunelowe typu zawór spinowy (spin valve magnetic tunnel junction SV-MTJ) stanie się wykorzystywanym w gigabajtowych magnetorezystancyjnych pamięciach MRAM, reprogramowalnych spinowych układach logicznych oraz głowicach odczytowych twardych dysków o wysokiej gęstości upakowania dochodzącej do Tb/cal².

Pamięć MRAM

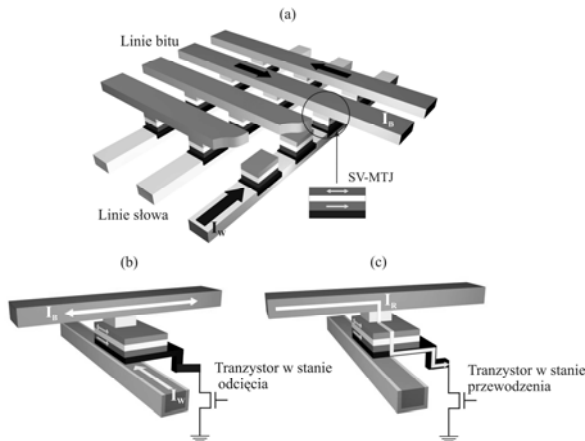
Komórka MRAM zbudowana na SV-MTJ [17, 25] wykorzystuje dwa stabilne nisko i wysoko rezystancyjne stany. Niski stan reprezentuje logiczne „0”, natomiast wysoki stan reprezentuje logiczne „1”. Zmiana stanu komórki (zapis informacji) realizowana jest przez zmianę kierunku namagnesowania warstwy swobodnej za pomocą prądów (I_B , I_W) przepływających w liniach umieszczonych nad i pod SV-MTJ (rys. 3b). Odczyt stanu komórki realizowany jest przez przepuszczenie prądu (I_R) przez złącze i porównanie rezystancji złącza z wartością referencyjną (rys. 3c). Pamięć MRAM zbudowana w oparciu o SV-MTJ (prototypy między innymi zaprezentowały Motorola [25], Infineon-IBM) oferuje nieulotność, zbliżony czas odczytu i zapisu do pamięci SRAM (Static Random Access Memory), porównywalne rozmiary komórek do DRAM (Dynamic Random Access Memory) i FLASH, nieograniczoną liczbę cykli zapisu oraz odporność na promieniowanie radiacyjne.

Reprogramowalne spinowe układy logiczne

Obiecującym zastosowaniem magnetycznych złączy tunelowych są nowego typu reprogramowalne układy logiczne, w których przy pomocy złącza lub kilku złączy [26] można zbudować reprogramowalne bramki logiczne. Na rysunku 4 przedstawiono przykła-

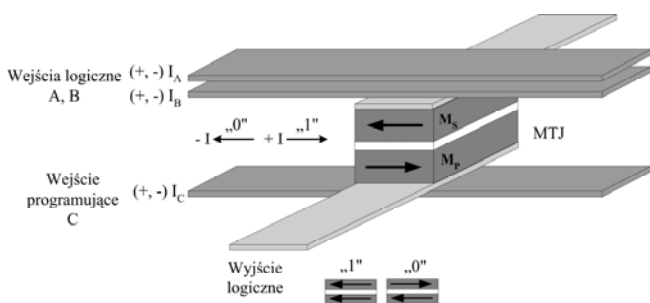
* Używa się też nazw elektronika spinowa oraz magnetoelektronika

dowy schemat układu bramki logicznej zrealizowanej w oparciu o jedno złącze MTJ. W tym przypadku wysoki lub niski stan rezystancyjny (zależny od kierunków namagnesowania M_S i M_P elektrod ferromagnetycznych) złącza jest wyjściowym stanem logicznym a kierunki prądów w liniach, stosowane do zmiany kierunków namagnesowań elektrod ferromagnetycznych, reprezentują logiczne sygnały wejściowe bramki.



Rys. 3. Budowa i organizacja pamięci MRAM (a), zapis informacji do komórki (b), odczyt stanu komórki (c)

Fig. 3. Design and organization of MRAM memory (a) writing (b), reading (c)



Rys. 4. Koncepcja realizacji reprogramowalnej spinowej bramki logicznej na jednym MTJ

Fig. 4. Schematic of a reprogrammable magnetic logic based on a MTJ device

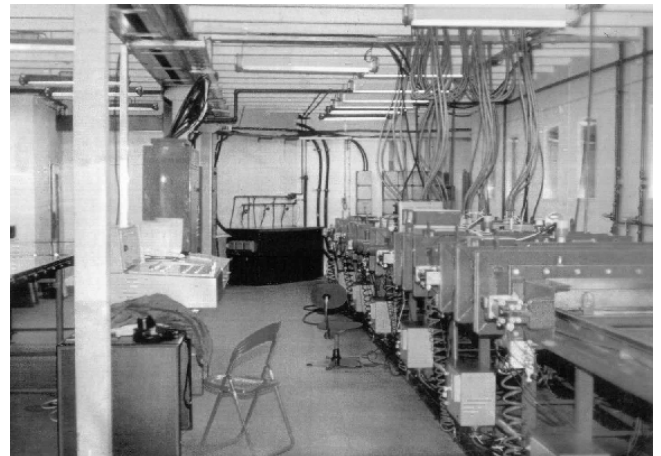
Poprzez zmianę wzajemnej relacji pomiędzy kierunkami namagnesowania elektrod ferromagnetycznych można zaprogramować złącze (ustalić wyjściowy kierunek wzajemnego namagnesowania M_S i M_P), aby w zależności od potrzeb zrealizować funkcje logiczne AND lub OR oraz NAND lub NOR.

Od MTJ działającego jako komórka pamięci MRAM lub bramka logiczna wymagany jest jak najwyższy TMR (decyduje między innymi o rozróżnialności stanu „0” i „1”), małe pola przełączeń warstwy swobodnej oraz duże pola przełączeń warstwy przytrzymanej. Mała wartość pól przełączeń warstwy swobodnej wymagana jest ze względu na minimalizację poboru mocy przez układ (prąd potrzebny do zmiany stanu komórki lub układu logicznego). Duża wartość pól przełączeń warstwy przytrzymanej wymagana jest, aby uniemożliwić prądom stosowanym do zmiany kierunku namagnesowania warstwy swobodnej zmianę kierunku namagnesowania warstwy przytrzymanej (osiągnięcie dwóch wyraźnie rozróżnialnych stanów rezystancyjnych). (Autor rozdziału: T. Stobiecki).

5. Urządzenia próżniowe do wytwarzania cienkich warstw

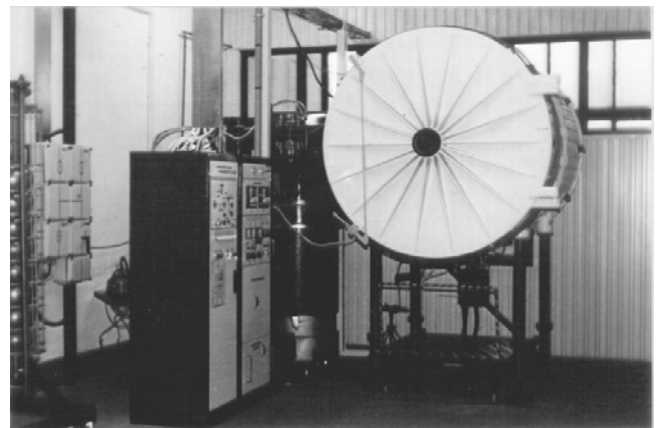
W Katedrze Elektroniki opracowywane są konstrukcje urządzeń do wytwarzania cienkich warstw i układów cienkowarstwowych

oraz technologicie próżniowe dla tych urządzeń. Szereg oryginalnych konstrukcji znalazło zastosowanie w jednostkach badawczych oraz w przemyśle. Zbudowane systemy miały konstrukcje wsadowe i potokowe. Stosowane są różne metody wytwarzania cienkich warstw takie jak naporowanie próżniowe, jonowe rozpylanie dc i magnetronowe, naporowanie łukowe czy odparowanie laserowe. Konstrukcje urządzeń jak i użyte technologie wytwarzania warstw uzależnione były od wymagań stawianych systemowi cienkowarstwowemu (np. dla systemów fotowoltaicznych stosowano rozpylenie jonowe). Przykład skonstruowanej w ramach projektu celowej linii potokowej przedstawiono na rysunku 5 a systemu wsadowego na rysunku 6 [30-34]. (Autorzy rozdziału: E. Leja, K. Marszałek).



Rys. 5. Potokowa linia przemysłowa do wytwarzania cienkich warstw metodą jonowego rozpylania magnetronowego

Fig. 5. Industrial magnetron sputtering in-line system for thin film deposition



Rys. 6. Urządzenie do pokrywania podłoży o złożonych kształtach metodą platerowania łukowego

Fig. 6. Arch plating system for film deposition on multi-shape-substrates

6. Przykładowe zastosowania techniki sensorowej i radiowej identyfikacji obiektów RFID w sektorze energetycznym

Opracowanie, a następnie wdrożenie do eksploatacji przemysłowej systemów kontrolno-pomiarowych jest efektem, często bardzo rozbudowanej, współpracy ośrodków naukowych, firm produkujących aparaturę i odbiorcy. Prace prowadzone w Katedrze Elektroniki obejmują głównie fazę badawczą [35, 36], budowę modeli laboratoryjnych i prototypu aparatury (oprogramowa-

nia) oraz uczestnictwo w wdrożeniu, i dotyczą określonych podzespółów systemu przemysłowego. Są to głowice pomiarowe do monitorowania zjawisk fizycznych (charakterystycznych dla przebiegu procesu technologicznego) występujących w obiekcie objętym przez system pomiarowo-kontrolny. Rola tych przyrządów jest kluczowa w zapewnieniu wiarygodnej informacji o procesie i niezawodności przemysłowego systemu pomiarowego. Prezentowane rozwiązania zaprojektowano do pracy w trudnych warunkach (wysokie temperatury, zapylenie, zagrożenie wybuchem) w ramach projektów celowych [37, 38]. Optoelektroniczną głowicę pomiarową opracowano do systemu monitoringu niespalonego węgla w popiołach energetycznych przeznaczonego dla elektrowni ciepłych [37]. Natomiast dla górnictwa podziemnego opracowano czytnik i terminal RFID (Radio Frequency Identification) jako elementy systemu RFID do zdalnej identyfikacji metalicznych obiektów przemysłowych [38, 41].

System ciągłego pomiaru niespalonego węgla w popiołach energetycznych

Kontrola niespalonego węgla w popiołach jest stale aktualnym zagadnieniem w eksploatacji elektrowni ciepłych ze względu na optymalizację spalania i ochronę środowiska. W konstrukcji prezentowanego systemu ciągłego oznaczania węgla reszkowego w procesie produkcyjnym (rys. 7) została wykorzystana technika optycznego odbicia rozproszonego [39, 40]. System zapewnia bieżącą kontrolę i rejestrację procesu spalania, a także wytworzenie źródła sygnału dla układów automatyki sterowania kotłem.

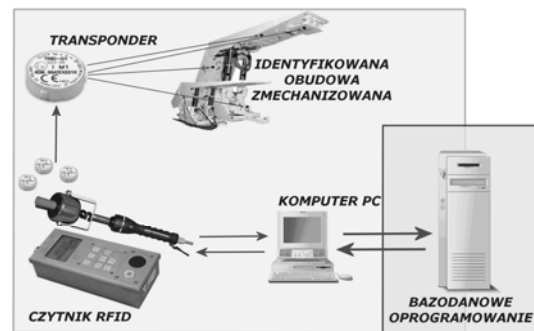


Rys. 7. Głowica pomiarowa na kanale emisji spalin w elektrowni
Fig. 7. Optical measurement head mounted in the power plant emission channel

System identyfikacji elementów maszyn górniczych

System identyfikacji elementów maszyn górniczych (rys. 8) jest przeznaczony do prowadzenia gospodarki materiałowej w kopalniach, w szczególności eksploatujących pokłady węglowe. System zapewnia jednoznaczną identyfikację elementów, rejestrację czasu użytkowania tych elementów oraz warunków ich pracy, a także pozwoli na przetwarzanie niezbędnych danych dla oceny stopnia ich zużycia. Jest to niezwykle ważne dla bezpieczeństwa pracy

w ścianowych przodkach wydobywczych kopalń podziemnych [38, 41, 43].



Rys. 8. Schemat blokowy systemu RFID do zdalnej identyfikacji elementów maszyn górniczych

Fig. 8. Structure of RFID system for remote identification of parts of mining machines

Efekty wdrożeniowe

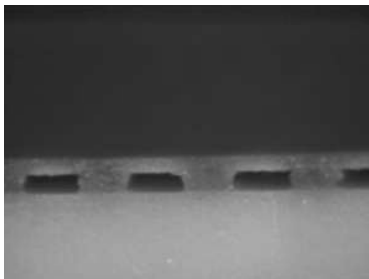
Efektywna realizacja wdrożeń z zakresu optoelektronicznej techniki sensorowej i radiowej identyfikacji obiektów jest bezpośrednio związana z prowadzonymi w Katedrze Elektroniki badaniami podstawowymi nad materiałami półprzewodnikowymi (fotodetekcja) [np. 35, 36] i modelowaniem pól elektromagnetycznych [41]. Przedmiotem opracowań wykonanych w Katedrze Elektroniki są: optoelektroniczna głowica pomiarowa dla analizatora popiołu kotłów energetycznych [42] i czytnik z terminalem RFID [43]. Całościowe wdrożenie systemów kontrolno-pomiarowych realizowane było przez uczelniano-przemysłowe zespoły badawcze w ramach projektów celowych [37, 38]. Analizator popiołu do kotłów energetycznych produkowany jest przez ZAP „Kwant” – Kraków, natomiast system RFID dla górnictwa przez ELSTA – Wieliczka. (Autorzy rozdziału: Henryk Jankowski, Cezary Worek, Lidia J. Maksymowicz).

7. Zaawansowany mikrosystem ceramiczny dla mikrofluidyki

Zaawansowane technologie mikroelektroniczne stosowane dotąd do produkcji układów elektronicznych znajdują coraz szersze zastosowanie również do wytwarzania układów mikromechanicznych i układów dla mikrofluidyki. Technologie krzemowe pełnią w tych zastosowaniach wiodącą rolę, ale okazuje się, że również zaawansowane technologie ceramiczne takie jak technologia folii ceramicznych współwypalanych LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic) i technologia warstw grubych fotoformowalnych (photoimageable thick-film technology) są użyteczne. Mikroukłady ceramiczne charakteryzują się odpornością na wysoką temperaturę i trudne warunki środowiskowe, są łatwiejsze do wykonania i tańsze niż układy krzemowe. Ich atutem jest również to, że umożliwiają zbudowanie na jednym podłożu układów zintegrowanych zawierających np. grzejnik, detektor i separator.

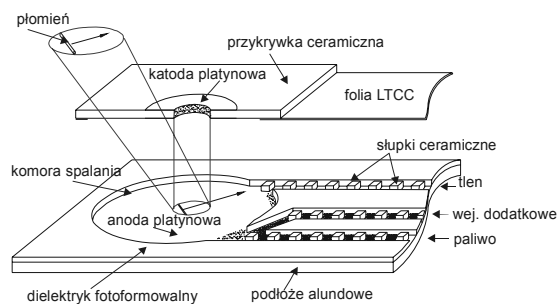
Zaawansowane technologie ceramiczne – technologię LTCC i technologię warstw grubych fotoformowalnych – wykorzystano do zbudowania dwóch układów dla mikrofluidyki: mikrokanalu o szerokości 200 μm , głębokości 100 μm oraz długości 5 m mieszczącego się na płytce o wymiarach 5 cm x 5 cm (rys. 9) oraz płomieniowego detektora jonizacyjnego (rys. 10). Obydwa układy są elementami będącego w trakcie realizacji mikrosystemu ceramicznego do zastosowania w prostym, przenośnym chromatografie [44, 45]. Mikrokanal pełni rolę separatora, płomieniowy detektor jonizacyjny znajduje zastosowanie w analizie jakościowej substancji chemicznych np. paliwa. W trakcie prac nad elementami mikrosystemu ceramicznego opracowano innowacyjną metodę łączenia dwóch ceramiek: fotoformowalnego dielektryka, przy

pomocy którego buduje się kanał, z ceramiką LTCC, która służy do zamknięcia kanału od góry. Opatentowano również nową metodę wywoływania warstw grubych światłoczułych w parach wywoływacza [46] wytwarzanych przez generatory ultradźwiękowe. (Autorzy rozdziału: Stanisław Nowak, Barbara Dziurdzia, Zbigniew Magoński).



Rys. 9. Mikrokanal zbudowany z połączenia warstwy grubej fotoformalnej z LTCC

Fig. 9. Microchannel formed by combination of a photoimageable dielectric and LTCC



Rys. 10. Grubowarstwowy płomieniowy detektor jonizacyjny

Fig. 10. Thick-film flame ionisation detector

8. Podsumowanie

Tematyka badawcza prowadzona w Katedrze Elektroniki AGH odpowiada najnowszym trendom światowym i w szczególności włącza się w główny nurt działań zmierzających do ochrony środowiska naturalnego człowieka, w tym rozwój odnawialnych źródeł energii w ramach europejskich projektów badawczych. Perspektywnym i niezwykle nowoczesnym obszarem działań pozostaje spintronika z jej niezwykleymi urządzeniami wykorzystującymi tunelowy efekt magnetorezystancyjny (TMR). Działania wdrożeniowe i patentowe Katedry w dziedzinie technologii cienkowarstwowej i przemysłowych systemów sensorowych oraz układów sterujących przyczyniają się do umocnienia więzi nauki z przemysłem.

9. Literatura

- [1] K.Zakrzewska, M.Radecka and M.Rękas: "Effect of Nb, Cr, Sn additions on gas sensing properties of TiO₂ thin films", *Thin Solid Films*, 310 (1997) 161-166,
- [2] M.Radecka, K.Zakrzewska, M.Rękas: "SnO₂-TiO₂ solid solutions for gas sensors", *Sensors & Actuators: B Chemical*, 47 (1998) 193-203,
- [3] M.Radecka, P.Pasierb, K.Zakrzewska, M.Rękas: "Transport properties of (Sn, Ti)O₂ polycrystalline ceramics and thin films", *Solid State Ionics*, 119 (1999) 43-48,
- [4] M.Radecka, J.Przewoźnik, K. Zakrzewska: "Microstructure and gas-sensing properties of (Sn,Ti)O₂ thin films deposited by RGTO technique", *Thin Solid Films*, 391 (2001) 247-254,
- [5] K.Zakrzewska, M.Radecka, A.Kruk and W.Osuch: "Noble metal/titanium dioxide nanocermet for photoelectrochemical applications", *Solid State Ionics*, 157 (2003) 349-356,
- [6] M.Radecka, K.Zakrzewska, M.Wierzbička, A.Gorzowska, S.Komornicki: "Study of the TiO₂-Cr₂O₃ system for photoelectrolytic decomposition of water", *Solid State Ionics*, 157 (2003) 379-386,
- [7] W.Maziarz, P.Potempa, A.Sutor, T.Pisarkiewicz, "Dynamic response of a semiconductor gas sensor analysed with the help of fuzzy logic", *Thin Solid Films* 436 (2003) 127,
- [8] T.Pisarkiewicz, A.Sutor, P.Potempa, W.Maziarz, H.Thust, T.Thelemann, "Microsensor based on low temperature cofired ceramics and gas-sensitive thin film", *Thin Solid Films* 436 (2003) 84,
- [9] W.Maziarz, "Zintegrowany sensor gazów wytworzony w technologii mikromechanicznej", *Rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2006*,
- [10] H.Wong, "Recent developments in silicon optoelectronic devices", *Microelectronics Reliability* 42 (2002) 317,
- [11] S. Jonas, P. Rava, T. Stapiński, E. Walasek, "UHV plasma enhanced CVD system for preparation of new generation amorphous silicon based efficient solar cells", *Optoelectronic Review* 9/1 (2001) 91,
- [12] T. Stapiński, B. Swatowska, S. Kluska, E. Walasek, "Optical and structural properties of amorphous silicon - carbon films for optoelectronics applications", *Applied Surface Science* 238 (2004) 367,
- [13] B.Swatowska, H.Czternastek, M.Lipiński, T.Stapiński, K.Zakrzewska, "Antireflective coatings of a-Si:C:H on silicon", *Proc. of the XXVIII International. Conference of IMAPS Poland Chapter, Wrocław, 2004*, 385
- [14] Z.Sobków, B.Cięciwa, "Pomiar fotoprzewodnictwa w magnetycznych półprzewodnikach cienkowarstwowych", *Proc Conf. ELTE 2000, Polanica Zdrój, Poland, 18-22nd September 2000*, 1093,
- [15] M.N.Baibich, J.M.Brato, A.Fert, F.Nguyen Van Dau, F.Petroff, P.Etienne Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices, *Phys. Rev. Lett.* 61 (1988) 2472,
- [16] S. Tumański *Thin Film Magnetoresistive Sensors*, Institute of Physics Publishing (2001),
- [17] Y.Wu, *Nano Spintronics for Data Storage in Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology*, edited by H. S. Nalwa, American Scientific Publishers, X, 2003,
- [18] J.S. Moodera, L.R.Kinder, T.M.Wong, and R.Meservey, Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junctions, *Phys. Rev. Lett.* 74 (1995) 3273,
- [19] T.Stobiecki, C.G. Kim, C.O. Kim, Y.K. Hu, M. Czapkiewicz, J. Kanak, J. Wrona, M. Tsunoda, M. Takahashi - The influence of NiFe thickness of top-electrode on exchange coupling parameters of IrMn based MTJ. *J.Magn.Magn. Mat.*, 272-276 (2004) 1503,
- [20] P. Wiśniowski, T. Stobiecki, M. Czapkiewicz, J. Wrona, M. Rams, C. G. Kim, C. O. Kim, Y.K.Hu, M.Tsunoda and M.Takahashi - Temperature dependence of tunnel magnetoresistance and magnetization of IrMn based MTJ, *phys. stat. sol. a*, Vol. 201 (2004) 1648,
- [21] M.Czapkiewicz, M.Żołędź, J.Wrona, P.Wiśniowski, R.Rak, T.Stobiecki, C. G. Kim, C. O.Kim, M.Takahashi, M.Tsunoda - Magnetization process and domains in MTJ, *phys. stat. sol. b*, Vol. 241(2004) 1477,
- [22] T.Stobiecki, J.Kanak, J.Wrona, M.Czapkiewicz, C.G. Kim, C.O. Kim, M.Tsunoda and M.Takahashi - Correlation between structure and exchange coupling parameters of IrMn based MTJ *phys. stat. sol. a*, Vol. 201 No 8, (2004) 1621-1627,
- [23] J.Kanak, T.Stobiecki, O. Schebaum, G. Reiss and H. Brückl, Microstructure and exchange coupling parameters of MTJ with CoFeB bottom electrode, *phys. stat. sol. b*, 243 (2006) 197,
- [24] P.Wiśniowski, T.Stobiecki, J.Kanak, G.Reiss, H. Brückl, Influence of buffer layers texture on magnetic electrical properties of IrMn spin valve magnetic tunnel junctions, *J. Appl. Phys.* 100 (2006) 013906,
- [25] S.Tehrani, B.Engel, J.M.Slaughter, E.Chen, M.DeHerrera, M.Durlam, Magnetoresistive Random Access Memory Using Magnetic Tunnel Junctions, *Proceedings of the IEEE*, 91 (2003) 703,

- [26] R. Richter, H. Boeve, L. Bar, J. Bangert, G. Rupp, G. Reiss, Field Programmable Spin-Logic Realized with Tunneling-Magnetoresistance Devices, *Solid-State Electronics* 46 (2002) 639.
- [27] K. Nakamoto, Tunneling Magnetoresistive Heads Beyond 150 Gb/in², *IEEE Trans. Magn.*, 40 (2004) 290.
- [28] C. H. Smith, Spin-Dependent Tunneling: A New Magnetic Sensing Technology, *Sensors*, 21 (2004).
- [29] S. Ikeda, J. Hayakawa, Y. M. Lee, R. Sasaki, T. Meguro, F. Matsukura and H. Ohno, Dependence of Tunnel Magnetoresistance in MgO Based Magnetic Tunnel Junctions on Ar Pressure during MgO Sputtering, *Jpn. J. Appl. Phys.* 44 (2005) L1442.
- [30] K. Marszałek, E. Leja, "Przemysłowe urządzenie dla pokryć dekoracyjnych ze źródłem łukowym", *Materiały I Kongresu Polskiego Towarzystwa Próżniowego* Kraków, 1998, 146-151.
- [31] K. Marszałek, E. Leja, "Industrial arc based equipment for decorative coating deposition", *Nucleonica*, vol. 44, no 2, 1999, 357-362.
- [32] K. Marszałek, A. Dziadecki, T. Żegleń, "Mikrokomputerowy system sterowania przemysłową linią próżniową do nanoszenia cienkich warstw metodą jonowego rozpylania magnetronowego", *PAK*, 3, 2002, 5-8.
- [33] E. Leja, K. Marszałek, "Potokowe i wsadowe systemy próżniowe w praktyce przemysłowej", VII Krajowa Konferencja Techniki Próżni Cezdyna, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej-Elektronika*, 153, 2005, 125-131.
- [34] E. Leja, K. Marszałek, "Problemy konstrukcyjne i technologiczne w instalacjach próżniowych do nanoszenia warstw na wielkoformatowe powierzchnie w systemie in line", *ELTE 2004: Materiały VIII Konferencji Naukowej „Technologia elektronowa”*: Stare Jabłonki, 2005, 639-644.
- [35] L. J. Maksymowicz, M. Lubecka, R. Szymczak, W. Powroźnik, H. Jankowski "Magnetic parameters of diluted magnetic semiconductors CdCrSe₄", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 242-245 (2002) 927.
- [36] B. T. Cięciwa, L. J. Maksymowicz, M. Lubecka, H. Jankowski, J. Sokulski, Z. St. Sobków, "Influence of indium dilution level on magnetic properties and photoconductivity of Cd_{1-y}Cr_{2-2x}In_{2x+y}Se₄ magnetic semiconductors", *Materials Science* 21 (2003) 99.
- [37] Raport KBN: "Analizator popiołu kotłów energetycznych". Projekt celowy nr 8T10B04797C/3766, 1999/2000 (prof. Janusz Gołaś AGH).
- [38] Raport „System identyfikacji czasu i warunków użytkowania elementów sekcji ścianowej obudowy zmechanizowanej”, Projekt celowy ROW-394-2004 (ELSTA – Wieliczka).
- [39] K. Styszko-Grochowiak, J. Gołaś, H. Jankowski, S. Koziński, „Characterization of the coal fly ash for the purpose of improvement of industrial on line measurement of unburned carbon content”, *Fuel*, 83 (2004) 18447-1853.
- [40] J. Gołaś, H. Jankowski, B. Niewczas, J. Piechna, A. Skiba, Z. Szkutnik, C. Worek, "Fotometryczny pomiar zawartości węgla w popiołach energetycznych emitowanych podczas procesu produkcyjnego elektrowni", *Elektronizacja*, nr 9 (2000) 18-22.
- [41] M. Szczurkowski, H. Jankowski, C. Worek, L. J. Maksymowicz, „Czytnik RFID do identyfikacji metalicznych obiektów przemysłowych”, IX Konferencja Naukowa Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne COE 2006, Kraków - Zakopane 19-22 czerwca 2006, 519-522.
- [42] Patent nr PL178781 pt. "Reflektometryczny analizator pyłu unoszonego w strumieniu gazu, zwłaszcza pozostałości węgla w popiele emitowanym w gazach odlotowych z urządzeń grzewczych opalanych węglem kamiennym", 1996.01.15 (2000.06.30). H. Jankowski, C. Worek, B. Niewczas, S. Wydziałkiewicz.
- [43] Zgłoszenie patentowe, UP RP 20 czerwca 2005r numer P 375 806, "Przenośny zestaw do radiowej identyfikacji urządzeń w wyrobiskach górniczych, zwłaszcza sekcji obudów zmechanizowanych", K. Fitowski, H. Jankowski, J. Stankiewicz, C. Worek.
- [44] Magoński Z., Dziurdzia B., Nowak St., „Fabrication of Micro-Fluidic Devices with Fodel Dielectric”, *Proc. XXIX International Conference of IMAPS Poland Chapter Koszalin-Darłowo*, 19-21 September 2005, p.369-372.
- [45] Magoński Z., Dziurdzia B., Nowak St., Jankowski H., Sokulski J., „Grubowarstwowy katalityczny detektor jonizacyjny do mikroanalizatorów”, IX Konferencja Naukowa Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne, Kraków-Zakopane, 19-22.06.2006, 493-496.
- [46] Zgłoszenie patentowe P362452 – B. Dziurdzia, Z. Magoński, M. Cież, St. Nowak, "Sposób wywoływania wzorów precyzyjnych struktur grubowarstwowych i urządzenie do wywoływania".

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Najnowsza książka Wydawnictwa PAK



Książka „Światłowodowe czujniki i przetworniki pomiarowe” jest pierwszą książką w języku polskim, która obejmuje całościowo zarówno współczesną problematykę światłowodowych czujników i przetworników pomiarowych, jak i systemów telemetrycznych. Autorem tej książki jest dr hab. inż. Zdzisław Kaczmarek – profesor Politechniki Świętokrzyskiej.

Treść książki zawiera zasady i opisy budowy czujników i przetworników pomiarowych różnych

wielkości fizycznych, ich modele matematyczne, metody detekcji sygnału pomiarowego z wyjściowego sygnału optycznego czujnika, metody zwielokrotniania kanału światłowodowego. W opracowaniu występują zagadnienia wspólne dla wszystkich rodzajów czujników: światłowodowy, źródła światła, modulatory optyczne i odbiorniki optyczne. Na końcu książki zestawiono w tabelach

dane techniczne światłowodowych czujników pomiarowych oferowanych przez firmę FISO-FIBEROPTIC.

Książka wydana przez Wydawnictwo PAK pod patronatem Polskiego Stowarzyszenia Pomiarów Automatyki i Robotyki „POLSPAR”, powinna znaleźć wielu odbiorców, ponieważ na rynku krajowym jest pierwszym wartościowym podręcznikiem omawiającym w sposób komplementarny technikę światłowodowych czujników i przetworników pomiarowych.

Zamówienia prosimy składać na adresy PAK:

Wydawnictwo PAK
00-050 Warszawa, ul. Świętokrzyska 14A,
tel./fax: 022 827 25 40

Redakcja PAK
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, p. 30b,
tel./fax: 032 237 19 45
e-mail: pak.redaktor@polsl.pl