



Patronat Honorowy
Ministerstwa
Rozwoju

Symposium

6 czerwca 2016 r.

godz. 10⁰⁰

PROGRAM

50
lat

Instytutu Technologii Elektronowej

1966-2016

PROGRAM

10.00 - 10.15 słowo wstępne Dyrektora Instytutu prof. Anny Piotrowskiej

10.15 - 11.00 50 lat działalności Instytutu Technologii Elektronowej
– prof. Bohdan Mroziewicz

11.00 - 12.00 wręczenie odznaczeń zasłużonym pracownikom Instytutu

12.00 - 13.30 poczęstunek

prezentacja aktualnych obszarów badawczych i kierunków rozwoju

13.30 - 14.00 Nanotechnologia przyrządów dla fotoniki podczerwieni
- dr hab. inż. Agata Jasik

14.00 - 14.30 Technologia krzemowa - układy scalone, mikrosystemy i sensory
- dr inż. Dariusz Szmigiel

14.30 - 15.00 Mikro i nanotechnologie półprzewodników szerokoprzerwowych
- dr Michał Borysiewicz

15.00 - 15.30 Technologia wielowarstwowych struktur elektronicznych
- dr inż. Agata Skwarek



Prof. dr hab. inż. Bohdan Mroziewicz

6 maja 2016 r.

Instytut Technologii Elektronowej widziany z perspektywy jego 50-letniej działalności

Niezwykłe dynamiczny rozwój elektroniki, jaki nastąpił na świecie po roku 1948 wskutek wynalezienia tranzystora, nie mógł zostać niezauważony w Polsce zarówno w gremiach naukowych, jak i gospodarczych. Dało temu wyraz Prezydium PAN, które uchwałą nr 6/65 postanowiło doprowadzić do utworzenia Instytutu Technologii Elektronowej. Choć zapropozowana nazwa mogła wydawać się enigmatyczna, to jednak okazała się pojemna i adekwatna do założonego celu. Postanowiono bowiem, że Instytut Technologii Elektronowej „*obejmie swoją działalnością badania naukowe związane z poszukiwaniem metod wytwarzania i badania właściwości nowych materiałów. a zwłaszcza materiałów półprzewodnikowych, dielektrycznych i magnetycznych oraz nowych elementów, układów elektronicznych mikrostruktur scalonych, ze szczególnym uwzględnieniem problemów mających służyć rozwojowi nowoczesnej elektroniki w kraju*”. Postanowiono również, że fundamentem nowego Instytutu będzie Zakład Elektroniki Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, kierowany przez prof. Janusza Groszkowskiego, a także, że wejdą do niego: Zakład Magnetyków IPPT PAN (kier. prof. Adam Smoliński) i Zakład Technologii Półprzewodników Instytutu Fizyki PAN (kier. dr. Tadeusz Niemyski). Ponadto przyjęto, że w skład Instytutu mogą wejść grupy pracowników działalności podstawowej z innych jednostek organizacyjnych PAN, szkolnictwa wyższego i innych resortów. Nowy Instytut zlokalizowano tymczasowo w budynku zajmowanym przez IPPT PAN (przy ul. Świętokrzyskiej 21), chociaż przez pewien czas funkcjonowały jeszcze laboratoria ulokowane w innych miejscach.

Zgodnie z obowiązującymi procedurami uchwała Prezydium PAN weszła w życie po zaakceptowaniu jej przez Radę Ministrów w trybie uchwały nr 206/66 z dnia 17 lipca 1966 r. W jej tekście powtórzono sformułowane wyżej zadania stawiane nowemu Instytutowi, przy czym nieco je rozszerzono, dodając zdanie: „*opracowywanie metod technologicznych i metod badania nowych przyrządów i urządzeń*”.

Wymienione w obydwu Uchwałach zadania znalazły pełne odzwierciedlenie w schemacie organizacyjnym i statucie ITE. Było to zasługą dyrektora Instytutu, którym został prof. Bohdan Paszkowski, członek PAN, wykładowca na Politechnice Warszawskiej, będący człowiekiem o szerokiej wiedzy, niezwykle rzutkim i łatwo nawiązującym kontakty z otoczeniem. Bezpośrednio po utworzeniu ITE do jego najważniejszych zadań należało badanie własności i opracowywanie metod wytwarzania nowych materiałów półprzewodnikowych, dielektrycznych, magnetycznych i nadprzewodzących, a następnie metod wytwarzania nowych przyrządów elektronicznych, elementów elektronicznych oraz struktur cienkowarstwowych i układów scalonych. Do zadań ITE należało także opracowywanie metod badania i pomiarów nowych układów i urządzeń oraz budowa modelowych urządzeń do pomiaru własności materiałów półprzewodnikowych i parametrów wytworzonych z nich przyrządów.

Chociaż w skład Instytutu weszło kilka wymienionych wyżej zakładów naukowych o tematyce określonej przez ich nazwy, nie ma wątpliwości, że od początku dominowały w nim półprzewodniki. Poza ich znaczeniem merytorycznym była to bowiem spuścizna po wieloletniej działalności Zakładu Elektroniki utworzonego w 1952 r., początkowo przy PAN, a następnie w listopadzie 1953 r. włączonego do nowo tworzonego IPPT PAN. Zakład powstał z inicjatywy i był kierowany przez prof. Janusza Groszkowskiego, przy aktywnym udziale Jego zastępcy – ówczesnie inżyniera Witolda Rosińskiego. Siedzibą Zakładu były początkowo pomieszczenia Katedry Radiotechniki i Katedry Podstaw Telekomunikacji Politechniki Warszawskiej przy ul. Nowowiejskiej oraz Pałac Staszica, a następnie budynek przy ul. Świętokrzyskiej, przejęty przez IPPT PAN od Banku Narodowego, dla którego został zaprojektowany. Wzmianka na temat lokalizacji Zakładu Elektroniki ma uzasadnienie, gdyż wskazuje na warunki, w jakich rodziła się nowa dziedzina elektroniki w Polsce, nie wspominając już o zagrożeniach wynikających z operacji technologicznych prowadzonych w urządzeniach wypełnionych wodorem, a ustawionych w typowo biurowych pomieszczeniach. Jednakże mimo wielu trudności, ten pionierski okres przyniósł znaczące rezultaty. Należy do nich zaliczyć zbudowanie w 1953 r. pierwszego polskiego tranzystora ostrzowego (w czym brał udział mgr inż. Jerzy Pułtorak i in.), a autorem patentu nr 73802, był prof. Janusz Groszkowski. Do osiągnięć tego okresu zaliczyć również należy nowe konstrukcje fotodetektorów (mgr inż. Cezary Andrzej Ambroziak i mgr inż. Tadeusz Janicki) oraz wiele typów diod prostowniczych, które dały potem początek diodom mikrofalowym (bezpośredni udział mgr inż. Jerzego Klamki). Do listy tej należy jeszcze dopisać nowe konstrukcje tranzystorów germanowych ze złączem p-n (mgr inż. Bohdan Mroziwicz i in.), a także tranzystorów krzemowych (mgr inż. T. Janicki i in.). O poziomie tych prac i dokonaniach tego okresu może świadczyć fakt, że wyniki Zakładu Elektroniki PAN w zakresie technologii przyrządów krzemowych zostały dostrzeżone przez specjalistów General Electric (Syracuse, USA). Konkretnie były to prace prowadzone przez inż. C.A. Ambroziaka, które w 1962 r. zaowocowały skonstruowaniem układu licznika w formie krzemowej linijki z wykonanymi na niej 10 wtopionymi emiterami. Układ ten zainspirował inżynierów w General Electric do kontynuowania prac nad podobnymi konstrukcjami (Electronics/ Feb.19, 1968, p.118) i można uznać, że wszedł do historii jako jeden z prekursorów układów scalonych. Podobną rolę w pewnym stopniu odegrał wykonany w Zakładzie Elektroniki demonstrator 7 segmentowego wskaźnika cyfrowego, który w ramach współpracy z czechosłowackim instytutem URE CSAV został w 1969 r. zgłoszony do Urzędu Patentowego w Pradze i w 1972 r. uzyskał patent nr 145009 (jako współautor występuje w nim B. Mroziwicz). Pomysłem zainteresowała się firma IBM, ale nie miało to dalszego ciągu formalnego, chociaż tego rodzaju wskaźniki były w późniejszych latach masowo produkowane w wielu krajach. Warto dodać, że wskaźnik cyfrowy był sukcesorem wcześniejszych prac w Zakładzie Elektroniki nad półprzewodnikowymi laserami i diodami elektroluminescencyjnymi, które wraz z fotodetektorami dały początek optoelektronice półprzewodnikowej w Polsce. Równoległe z tematyką opisaną wyżej, w Zakładzie Elektroniki IPPT PAN prowadzono prace

nad termistorami (mgr inż. Barbara Schmidt i in.) oraz nad przyrządami galwanomagnetycznymi (mgr inż. Andrzej Kobus i in.). Rozwijano także badania nad zjawiskami zachodzącymi w materiałach i strukturach półprzewodnikowych, w tym badania nad niejednorodnością monokryształów (mgr inż. Jarosław Świdorski i in.), jak również nad relacjami pomiędzy strukturą krystalograficzną a właściwościami cieplno-elektrycznymi tworzyw termistorowych. W związku z tymi badaniami skonstruowano również szereg urządzeń pomiarowych (mgr St. Sikorski i in.), którymi posługiwano się zarówno w Zakładzie Elektroniki, jak i w innych jednostkach naukowych, a nawet produkcyjnych. Lista ta w żadnym razie nie wyczerpuje tematyki prowadzonych prac ani ich uczestników, których nazwiska można znaleźć w spisach publikacji z tego okresu. Warto natomiast w tym miejscu przypomnieć, że większość prowadzonych prac miała charakter całkowicie pionierski, zważywszy braki w podstawowym wyposażeniu ówczesnych laboratoriów, które uzupełniano budowanymi na miejscu urządzeniami.

Wspomniane osiągnięcia zostały dostrzeżone i wyróżnione nagrodami: Nagrodą Państwową Zespołową I stopnia w 1955 r. za osiągnięcia naukowe w dziedzinie półprzewodników, a w 1964 r. Nagrodą Państwową Zespołową II stopnia w dziedzinie postępu technicznego „za udział w opracowaniu konstrukcji i w osiągnięciach naukowo badawczych uzyskanych w zakresie przyrządów półprzewodnikowych”. Należy wspomnieć, że większość wymienionych przyrządów półprzewodnikowych i urządzeń była również produkowana w skali laboratoryjnej przez pracowników Zakładu Elektroniki, w ramach gospodarstwa pomocniczego w IPPT PAN, zwanego Zakładem Konstrukcji Prototypów (ZKP). Produkcja ta dostarczała konstruktorom urządzeń podzespoły elektroniczne trudne do importu, a jednocześnie była skuteczną formą sprawdzenia przydatności opracowywanych wyrobów i celowości prowadzenia nad nimi dalszych badań. W ITE PAN rolę ZKP spełniał zorganizowany przy Instytucie Ośrodek Doświadczalno-Wytwórczy (ODW). Doprowadziło to do powstania w 1969 r. Zakładu Doświadczalnego, który podjął seryjną produkcję opracowanych w ITE wyrobów, w tym między innymi termistorów, diod tunelowych i mnożników hallotronowych.

Ogromne znaczenie dla rozwoju ITE miało przeniesienie go w latach 1971 -1972 do nowych budynków na terenie przy Al. Lotników. Lokalizacja ta została przyznana przez PAN do wspólnego użytkowania z Instytutem Fizyki PAN i stwarzała możliwości rozszerzenia działalności Instytutu w zakresie badań nad technologią przyrządów półprzewodnikowych.

Truizmem byłoby podkreślanie, że znaczenie ITE szybko rosło zarówno w środowiskach naukowych, jak i w opinii organów państwowych zarządzających gospodarką. Był to skutek autentycznego zaangażowania i rzetelnej pracy wielu ludzi, niezależnie od posiadanych przez nich tytułów naukowych czy zawodowych.

Tymczasem przemysł półprzewodnikowy okazał się na świecie gałęzią wyznaczającą rozwój wielu dziedzin gospodarki, co oznaczało pilną potrzebę zbudowania go także w naszym kraju. Trzeba wprawdzie wspomnieć, że od 1957 r. działał w Warszawie Ośrodek Doświadczalny Półprzewodników, utworzony przy Instytucie Łączności, który wspólnie z Oddziałem Przemysłowego Instytutu Elektroniki wszedł w 1958 r. do nowo utworzonej

Fabryki Tranzystorów. Niestety fabryka ta, nawet po przekształceniu w Fabrykę Półprzewodników TEWA, produkowała w skali przemysłowej jedynie tranzystory i wyroby opracowane w utworzonym w 1961 r. Centralnym Biurze Naukowo-Badawczym. Biuro to działało potem pod nazwą Biuro Naukowo-Badawcze Półprzewodników. Już sam fakt kolejnych reorganizacji świadczy jednak o trudnościach towarzyszących tworzeniu nowego przemysłu. Po kilku latach władze uświadomiły sobie zatem konieczność wsparcia produkcji półprzewodników przez włączenie w jej nurt instytutów zajmujących się w Warszawie elektroniką, w tym Instytutu Technologii Elektronowej. Proces ten rozpoczął się w dniu 1 kwietnia 1970 r. Choć data 1 kwietnia bywa traktowana w Polsce z przymrużeniem oka, to właśnie w tym dniu wydano uchwałę nr 47/70 podpisaną przez Prezesa Rady Ministrów w sprawie powołania i rozwoju Centrum Naukowo-Produkcyjnego Półprzewodników i Mikroelektroniki. Kolejne zarządzenia Przewodniczącego Komitetu Badań Naukowych i Ministra Przemysłu doprowadziły do powstania Naukowo-Produkcyjnego Centrum Półprzewodników (NPCP), do którego, zgodnie z zarządzeniem Nr 40/ORG/70 z dnia 10 czerwca 1970 r. wydanym przez Ministra Przemysłu Maszynowego i Sekretarza PAN, włączony został ITE PAN i Zakład Doświadczalny ELPAN. Z oczywistych względów ITE poddany został znacznej reorganizacji, mającej na celu skupienie tematyki badawczej na półprzewodnikach. Opuściły go zatem, wchodząc do IF PAN oraz odpowiednio do IPPT PAN, zakłady zajmujące się magnetykami, dielektrykami, piezotroniką i kilkoma innymi pomniejszych zagadnieniami. W zamian dokooptowane zostały zespoły badawcze Centralnego Biura Naukowo-Badawczego Półprzewodników, zlokalizowane na terenie TEWY. W schemacie organizacyjnym ITE utworzono Pion Badań Podstawowych, Pion Badań Rozwojowych i Pion Badań Specjalnych. Ten ostatni skupiał zakłady zajmujące się przyrządami mikrofalowymi, optoelektronicznymi, galwanomagnetycznymi i termistorami oraz ich aplikacjami. W skład Instytutu wszedł też Ośrodek Doświadczalny ITE, Zakład Doświadczalny Półprzewodników w Warszawie oraz Zakład Doświadczalny w Łęcznej. Zgodnie z założeniami, tak zreformowany Instytut pełnił w NPCP funkcję jednostki odpowiedzialnej za rozwój szeroko rozumianej technologii półprzewodników. Rozumieć przez to należało prowadzenie systematycznego rozeznania dotyczącego rozwoju naukowego i postępu technicznego w dziedzinie technologii półprzewodników na świecie, prowadzenie badań podstawowych nad nowymi kierunkami rozwoju technologii elektronowych, opracowywanie nowoczesnych technologii oraz nowych typów przyrządów półprzewodnikowych i układów scalonych, wdrażanie ich do produkcji doświadczalnej lub przemysłowej oraz udzielanie pomocy naukowo-technicznej jednostkom produkcyjnym Centrum przy wdrażaniu licencji zagranicznych, koordynowanie prac innych placówek naukowo-badawczych w zakresie techniki półprzewodnikowej, a także wytyczanie kierunków prac rozwojowych w dziedzinie materiałów oraz urządzeń technologicznych i pomiarowych. Nie bez znaczenia był również oczywisty obowiązek wspierania zarządu NPCP ekspertyzami wykonywanymi w ITE na tematy związane z podejmowaniem decyzji o produkcji nowych asortymentów oraz zakupu licencji na ich produkcję. Równolegle i niezależnie ITE

organizował i nadzorował produkcję termistorów w Oddziale Instytutu na terenie Łęcznej.

Rok 1973 zapisał się w historii ITE zmianą dyrektora. Miejsce prof. B. Paszkowskiego zajął doc. dr hab. Cezary Andrzej Ambroziak. Pociągnęło to za sobą reorganizację Instytutu w 1974 r. znamienne położeniem akcentu na rozwój i zintensyfikowanie prac w dziedzinie mikroelektroniki poprzez utworzenie Oddziału Mikroelektroniki. W skład tego Oddziału wszedł nowo utworzony Pion Konstrukcji, Pion Technologii Struktur oraz Pion Miernictwa i komórki wyodrębnione: Zakład Mikromontażu oraz Dział Organizacji Wdrożeń. Pozostałą część Instytutu włączono w Oddział Optoelektroniki i Mikrofal. Schemat ten został nieco zmieniony w 1975 r., ale nie zmieniła się jego istota. Warto zwrócić uwagę, że każda zmiana organizacyjna budzi kontrowersje, historia ITE wykazała jednak, że skupienie zakładów Instytutu w ciągi tematyczne, zaczynające się od badań naukowych, a kończące przygotowaniem prototypów przyrządów o parametrach spełniających wymogi produkcji, przyniosło wyniki oczekiwane przez fabryki NPCP. Nie ma wątpliwości, że Instytut, realizując zadania postawione na różnych etapach jego istnienia, odegrał dużą rolę w rozwoju przemysłu półprzewodnikowego w Polsce, zdobył ogromne doświadczenie w opracowywaniu i wdrażaniu do produkcji skomplikowanych podzespołów półprzewodnikowych, szczególnie mikroelektronicznych (włącznie z rodziną mikroprocesorów), przyrządów optoelektronicznych i mikrofalowych oraz termistorów. Przez dwadzieścia kilka lat pracy na rzecz przemysłu ITE wdrożył do fabryk ponad dwieście wyrobów, a trzy jego zakłady doświadczalne zostały przekształcone w zakłady przemysłowe produkujące podzespoły opracowane w Instytucie. Osiągnięcie, jakim było uruchomienie produkcji układów scalonych LSI, zostało wyróżnione Nagrodą Państwową Zespołową II stopnia, przyznaną 8 osobowemu zespołowi ITE w 1984 r.

W obszarze optoelektroniki na szczególne wyróżnienie zasługuje uruchomienie w TEWIE produkcji półprzewodnikowych wskaźników cyfrowych, o których był mowa na wstępie. Zapotrzebowanie na nie było tak pilne, że postanowiono zakupić w USA licencję na ich produkcję w Polsce. Na przeszkodzie stanęła decyzja Kongresu USA, który uznał, że technologia ta ma znaczenie strategiczne i umowa nie doszła do skutku. W rezultacie technologia ta została opracowana w ITE i wdrożona do produkcji ze skutkiem lepszym niż wynikało to z negocjowanej licencji. Te i inne osiągnięcia przyniosły Instytutowi i jego pracownikom wiele nagród i budowały jego reputację.

Nie do końca znane obecnie przyczyny spowodowały, że w 1987 r. Minister Przemysłu zarządzeniem nr 3/ORG/87 z dnia 10 listopada 1987 r. zmienił status NPCP, które stało się przedsiębiorstwem NPCP CEMI. W nowej organizacji ITE został wyłączony z CEMI i stał się Instytutem w kategorii Jednostek Badawczo Rozwojowych (JBR), pozostając pod nadzorem dyrektora CEMI. Początkowo nie miało to większego znaczenia, ale przełom nastąpił w 1988 r. kiedy prof. C. A. Ambroziak ustąpił z funkcji dyrektora w związku z wyjazdem na placówkę dyplomatyczną w USA. Po krótkim okresie przejściowym rolę dyrektora ITE powierzono dr hab. inż. Andrzejowi Jakubowskiemu – docentowi na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej. Kadencja nowego dyrektora trwała jednak tylko do 1992 r. Nowym dyrektorem został prof. dr hab. Maciej Bugajski. Nominacja ta odcisnęła wyraźne piętno

na tematyce prac badawczych Instytutu, gdyż z racji wykształcenia (Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego), nowy dyrektor kładł silniejszy nacisk na badania z zakresu fizyki półprzewodników oraz zaawansowane technologie w rodzaju MBE (epitaksja z wiązki molekularnej). Dało to nowy oddech pracom prowadzonym w Instytucie, nie miało już jednak większego znaczenia dla działalności fabryk CEMI. Wprawdzie Instytut notował nadal znaczne osiągnięcia w zakresie projektowania mikroprocesorów i układów ASIC oraz systemów zarządzania produkcją (DIASTEMOS) i wspomagania procesów diagnostycznych (DIAMOS), ale ostatecznie trudna sytuacja gospodarcza kraju zaznaczyła się spadkiem dochodów z produkcji i środków finansowych dotowanych przez państwo na działalność naukową w kraju. Poza oczywistymi brakami finansowymi, niezbędnymi do funkcjonowania Instytutu przełożyło się to na konieczność redukcji zatrudnienia w ITE, o ok. 30%. Spadek ten był częściowo kompensowany przez niezwykle intensywne rozwinięcie współpracy naukowej z zagranicą, w tym, poza Europą, również z USA, a nawet z Australią.

Swoistym ewenementem w tej sytuacji było nawiązanie w styczniu 1991 r. kontaktu z amerykańską firmą XSIRIUS zlokalizowaną w Marina Del Ray w Kalifornii. W ofercie ITE zamieszczona została m.in. informacja o opracowanych w ITE i produkowanych w małej skali krzemowych fotodiodach lawinowych (opracowanych przez mgr inż. Iwonę Węgrzecką i mgr inż. Macieja Węgrzeckiego). Cechą szczególną tych fotodiod była ich duża powierzchnia czynna i w swojej klasie stanowiły wyrób na poziomie światowym. Propozycja ta została przez stronę amerykańską przekazana następnie do firmy Advanced Photonics Inc. z siedzibą w Santa Monica, Los Angeles, która produkowała fotodiody krzemowe i uznała propozycję polską za interesującą. Ustalono, że ITE będzie dostarczał chipy fotodiod, określono parametry i warunki zbytu. Począwszy od lipca 1991 r. rozpoczęto dostawy tych chipów, które w ilości kilkunastu tysięcy sztuk. Ku obopólnemu zadowoleniu z wyników współpracy, 24 czerwca 1993 r. strona amerykańska wystąpiła z inicjatywą zawarcia porozumienia w sprawie utworzenia Joint Venture pomiędzy ITE a Advanced Technology Management – utworzonym w tym celu w USA. Niestety ciąg dalszy tej sprawy rozczarował obie strony, gdyż władze w Warszawie, do których zgłoszono projekt, nie wyraziły zainteresowania i oddaliły projekt, argumentując brakiem kompetencji. Jednakże upór obydwu stron doprowadził do tego, że ostatecznie diody produkowano w ITE i ich sprzedaż do USA trwała do 2000 r.

Mimo tak głębokiego, opisanego wyżej, zaangażowania w rozwiązywanie problemów przemysłu, ITE nie tylko nie utracił swojej wysokiej rangi naukowej, ale podniósł ją do takiego poziomu, że od wielu lat (ściślej od 1984 r.) ma uprawnienia do nadawania stopnia doktora habilitowanego. Niemal całą kadrę naukową Instytutu stanowią jego wychowankowie. Przed Radą Naukową ITE broniło swoich dysertacji także wielu pracowników innych instytucji naukowych, w tym dużych, renomowanych uczelni, jak m. in. Akademia Górniczo-Hutnicza, Instytut Fizyki PAN i Wojskowa Akademia Techniczna.

Prawdziwy przełom w działalności ITE nastąpił w 1994 r., gdy w wyniku postępowania konkursowego na stanowisko dyrektora Instytutu powrócił prof. C.A. Ambroziak. Najważniejszym tego wyrazem była radykalna zmiana schematu organizacyjnego Instytutu,

dokonana w 1995 r., w wyniku której nastąpiła likwidacja pionów tematycznych i powołanie na ich miejsce nowych zakładów. Ich zadaniem miały być badania w zakresie ustalonym przez dyrekcję i kierowników zakładów, którzy uzyskali w tym zakresie znaczną samodzielność. Za cel działalności Instytutu przyjęto realizację zadań sformułowanych w trzech punktach:

- 1) prowadzenie badań naukowych i prac rozwojowych w dziedzinie elektroniki i fizyki ciała stałego, a w szczególności mikroelektroniki i optoelektroniki półprzewodnikowej, dyskretnych przyrządów półprzewodnikowych, charakteryzacji materiałów i struktur półprzewodnikowych oraz przystosowywania wyników tych badań do wdrażania w praktyce;
- 2) rozwój i doskonalenie metod prowadzenia badań naukowych;
- 3) upowszechnianie wyników badań naukowych i prac rozwojowych.

W programie tym nie ma już mowy o przekazywaniu wyników do produkcji, gdyż CEMI upadło w 1994 r. i Instytut musiał całkowicie zmienić strategię działania. Zamiast opracowywania technologii i wyrobów dojrzałych do produkcji masowej w przemyśle, skupiono się na bardziej skomplikowanych, specyficznych wyrobach opracowywanych na zamówienie odbiorców rynkowych (m. in. specjalizowane układy scalone ASIC). Reorganizacja Instytutu pod tym kątem prowadziła do swoistej dezintegracji tematycznej całości Instytutu, skutkowałą jednak przekazaniem kierownikom zakładów inicjatywy w zakresie pozyskiwania dodatkowych środków finansowych na ich funkcjonowanie. Możliwość ta zaistniała w wyniku stworzenia w kraju systemu przyznawania grantów na realizację projektów akceptowanych początkowo przez KBN i MNiSW, a w późniejszych latach, po rozwiązaniu KBN, również przez NCN i NCBiR. Sytuacja ta trwa zresztą do dzisiaj, można zatem uznać, że rewolucja dokonana w ITE w 1995 r. zawierała w sobie racjonalne przesłanki. Podstawą polityki naukowo-technicznej Instytutu stało się również wspomniane wyżej wejście we współpracę z instytucjami naukowymi całego wysoko rozwiniętego świata. Między innymi, dzięki tej współpracy, już w drugiej połowie lat dziewięćdziesiątych w ITE zostało zbudowane laboratorium projektowania układów scalonych na światowym poziomie, pozwalające na projektowanie układów możliwych do wykonania przy zastosowaniu nowoczesnych technologii dostępnych w krajach zachodnich. Dzięki temu laboratorium możliwe było zaprojektowanie w Polsce i wytworzenie w Europie Zachodniej konkretnych układów scalonych dla przedsiębiorstw w kraju i zagranicą. Nie bez znaczenia w tym względzie było przeniesienie w 1998 r. Zakładu Technologii Mikroelektronicznej ze zrujnowanego już budynku C1/2 na terenie dawnego CEMI do nowej lokalizacji w Piasecznie. Staraniem dyrekcji ITE i z poparciem Agencji Rozwoju Przemysłu wybudowano tam nowoczesny budynek laboratoryjny, który był pierwszym własnym obiektem Instytutu i w dodatku zaprojektowanym specjalnie dla technologii stosowanych w Instytucie. Jednym ze znaczących wyników naukowych uzyskanych w nowych warunkach były konstrukcje detektorów cząstek w tym unikalnego w skali światowej pikselowego detektora promieniowania jonizującego o dużej

rozdzielczości (projekt SUCIMA realizowany wspólnie z AGH). Równocześnie modernizowano laboratoria zlokalizowane przy al. Lotników. Przykładowo, pod koniec lat 90-tych ubiegłego wieku Zakład Technologii Struktur Optoelektronicznych, kierowany przez prof. Annę Piotrowską, dysponował już aparaturą stanowiącą kompletny ciąg technologiczny umożliwiający wytwarzanie złożonych struktur i przyrządów półprzewodnikowych grupy III-V. W szczególności laboratoria tego Zakładu zostały dobrze wyposażone w urządzenia służące do osadzania cienkich warstw metalicznych i dielektrycznych, fotolitografii oraz obróbki chemicznej i termicznej. Przyniosło to znaczące osiągnięcia w zakresie badań nad technologią i właściwościami struktur GaN i SiC, i w następstwie doprowadziło do wytworzenia pierwszych w kraju tranzystorów HEMT wykonanych na podłożu GaN. Na wymienienie zasługuje również uruchomienie w 1993 r. reaktora do epitaksji z wiązek molekularnych (MBE), co dało początek nowej erze w technologii wzrostu supercienkich warstw półprzewodnikowych. Technologia ta zaowocowała w kolejnych latach opracowaniem technologii wytwarzania kwantowych laserów kaskadowych (QCL), detektorów supersieciowych, modulatorów typu SESAM (ang. Semiconductor Saturable Absorber Mirror) oraz półprzewodnikowych luster dyspersyjnych SDCM (ang. Semiconductor Double-Chirped Mirror).

Kolejne restrukturyzacje Instytutu, choć mniej radykalne niż ta w 1995 r., zaznaczyły się niestety całkowitym wyeliminowaniem zespołów zajmujących się przyrządami mikrofalowymi. Późniejsze lata dowiodły, że był to błąd. Polski przemysł produkujący radary przetrwał zawirowania historii i kontynuowanie w ITE szeroko rozumianej tematyki mikrofalowej opartej na półprzewodnikach miałyby obecnie głębokie uzasadnienie. Koronnym dowodem może być zainteresowanie prowadzonymi obecnie w ITE pracami nad mikrofalowymi tranzystorami HEMT wytwarzanymi na bazie GaN.

Lata 2000-2002 zaznaczyły się konsolidacją ITE z Ośrodkiem Badawczo-Rozwojowym Mikroelektroniki Hybrydowej i Rezystorów w Krakowie, która została zakończona włączeniem tego ośrodka do ITE w 2002 r., jako Oddziału Zamiejscowego Instytutu. Działalność Oddziału uzupełnia tematykę badań prowadzonych przez ITE i jest ważnym fragmentem aktywności Instytutu.

Rok 2010 zapisał się zmianami personalnymi w dyrekcji Instytutu związanymi z wygaśnięciem kadencji prof. C.A. Ambroziaka. W wyniku postępowania konkursowego Minister Gospodarki powołał na tę funkcję mgr inż. Zbigniewa Poznańskiego – dotychczasowego Zastępcę Dyrektora ITE. Zmiana ta nie miała większego wpływu na działalność badawczą i osiągnięcia naukowe Instytutu, wniosła natomiast zauważalny nacisk na problemy finansowe Instytutu, co doprowadziło do znaczącej poprawy jego sytuacji finansowej. Na wymienienie zasługuje również umiejętne wkomponowanie w działalność ITE Ośrodka Badawczo-Rozwojowego PREDOM - OBR. To ostatnie nastąpiło na podstawie rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 23 grudnia 2011 r. na mocy, którego Ośrodek ten został włączony w strukturę organizacyjną ITE jako Oddział PREDOM. Oddział ten dysponuje laboratoriami mającymi certyfikat akredytacji, wydany przez Polskie Centrum Akredytacji,

potwierdzający zgodność systemu zarządzania z wymaganiami obowiązujących norm. Zakres akredytacji obejmuje ok. 21 dziedzin wyrobów i ok. 480 procedur badawczych. Wyroby objęte tym zakresem to elektryczny sprzęt gospodarstwa domowego, domowe wyroby gazowe, wyroby radiowe, sprzęt elektroniczny RTV, sprzęt komputerowy i biurowy, sprzęt oświetleniowy, w tym oświetlenie LED, elektronarzędzia, wyroby medyczne, sprzęt laboratoryjny i związane z tym podzespoły.

Osiągnięcia naukowe Instytutu w okresie ostatnich kilkunastu lat znalazły swój oczywisty wyraz w licznych publikacjach i prezentacjach konferencyjnych. Na szczególnie wyeksponowanie jednak zasługuje w tym miejscu przyznawanie niemal corocznie bądź Instytutowi, bądź indywidualnie jego pracownikom, prestiżowych nagród fundowanych przez agencje rządowe, a także pozarządowe. Łącznie, w latach 2005-2015, ich liczba wyniosła 10. Do tego należy dołączyć dwukrotne przyznanie nagrody "Kryształowej Brukselki", w tym jako pierwszej nagrody w kategorii instytutów badawczych biorących udział w 5 Programie Ramowym Unii Europejskiej. W 2014 r., wśród 10 najczęściej opisywanych na świecie wydarzeń naukowych, znalazły się dwa, w których realizację był zaangażowany ITE. Są to: potwierdzenie istnienia pierwiastka 117, do czego przyczyniły się opracowane w Instytucie detektory krzemowe, oraz misja „Rosetta”, w ramach której wysłano sondę MUPUS, zawierającą elementy wyprodukowane w Oddziale Krakowskim ITE.

Na osobną wzmiankę zasługuje aktywny udział Instytutu w licznych (bo aż 49) projektach finansowanych bezpośrednio z funduszy UE, w których Instytut współpracował ze wszystkimi niemal europejskimi znaczącymi ośrodkami badawczymi, a także przedsiębiorstwami prowadzącymi działalność w obszarze mikroelektroniki półprzewodnikowej i mikrosystemów.

Miarą osiągnięć Instytutu jest niewątpliwie to, że jako jeden z nielicznych instytutów naukowo-badawczych utrzymuje się stale w pierwszej, najwyższej kategorii w rankingu MNiSW i innych ciał opiniodawczych. Wyrazem tego może być przyznanie ITE w 2014 r. kategorii A+.

Pięćdziesiąt lat działalności każdego instytutu to oczywiście przede wszystkim historia pracujących w nim ludzi. Z Instytutem związało się w tym czasie ponad tysiąc osób, a znaczna część obecnie zatrudnionych spędziła w nim całe swoje życie zawodowe. Ich praca i sukcesy tworzą nasz wspólny dorobek i naszą historię.

Nanofotonika podczerwieni – badania nad strukturami do generacji i detekcji promieniowania

Agata Jasik

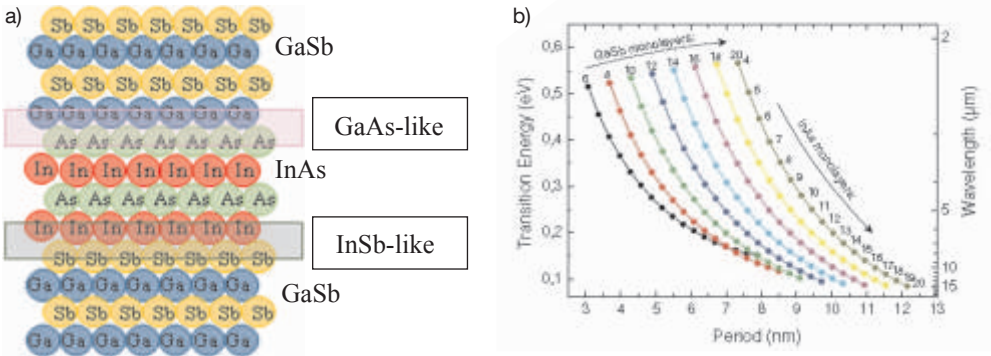
Materiały i struktury ze związków półprzewodnikowych III-V, otrzymywane metodą epitaksji z wiązek molekularnych wykorzystywane są do wytwarzania źródeł i detektorów promieniowania średniej i dalekiej podczerwieni. Nowatorstwo badań polega na wykorzystaniu do tego celu złożonych struktur supersieciowych (*ang. superlattice, SL*).

W przypadku źródeł promieniowania są to struktury unipolarnych laserów kaskadowych, w których generacja promieniowania podczerwonego ma miejsce w wyniku elektronowych przejść wewnątrzpasmowych. Długość fali emitowanego promieniowania zależy w głównej mierze od geometrii struktury, w mniejszym stopniu od rodzaju użytych do jej wytworzenia materiałów. Badane są kaskadowe emitery promieniowania laserowego wytwarzane z GaAs/AlGaAs i InP/AlInAs/GaInAs. Tego rodzaju lasery mają szeroki zakres potencjalnych zastosowań, z których najważniejsze to: detekcja śladowych ilości zanieczyszczeń gazowych, wykrywanie substancji stanowiących zagrożenie chemiczne i biologiczne, a także materiałów wybuchowych i narkotyków.

Drugą grupę zagadnień stanowią struktury detektorów promieniowania podczerwonego wytwarzane z antymonkowych supersieci II-go rodzaju InAs/GaSb. Zainteresowanie tymi strukturami wynika z faktu, że obecnie stosowane do tego celu detektory z HgCdTe będą w najbliższej przyszłości, zgodnie z Dyrektywami Unii Europejskiej, stopniowo wycofywane z rynku z powodu zawartości toksycznych pierwiastków rtęci i kadmu. Ponadto detektory supersieciowe wykazują elastyczność w projektowaniu przerwy energetycznej dając możliwość pokrycia szerokiego zakresu podczerwieni, charakteryzują się stłumioną rekombinacją Auger, co przekłada się na mniejsze prądy ciemne i większą detekcyjność a dobrze opanowana technologia otrzymywania związków AIII BV gwarantuje jednorodność na dużej powierzchni, co pozwala na wykonywanie matryc detektorów.

SL II rodzaju InAs/GaSb są strukturami naprężonymi na skutek niedopasowania warstwy InAs do materiału GaSb. Stan naprężeń kontrolowany jest za pomocą grubości i typów obszarów międzyfazowych (*ang. interface, IF*), które mogą być dwojakiego rodzaju: GaAs-like i InSb-like. Arsenek galu wprowadza naprężenia rozciągające natomiast antymonek indu – ściskające. Ilościowo jest to przedstawione na rysunku 1 a. Dopasowanie SL można uzyskać wprowadzając do niej warstwę InSb.

Efektywna przerwa energetyczna tworzona jest pomiędzy pasmem przewodnictwa w InAs i walencyjnym w GaSb. O wielkości przerwy decyduje grubość warstw i może się ona zmieniać w szerokim zakresie od średniej do dalekiej podczerwieni opierając się o zakres THz oraz interesujące badawczo zjawisko przejścia metal-półprzewodnik (rys. 1 b).

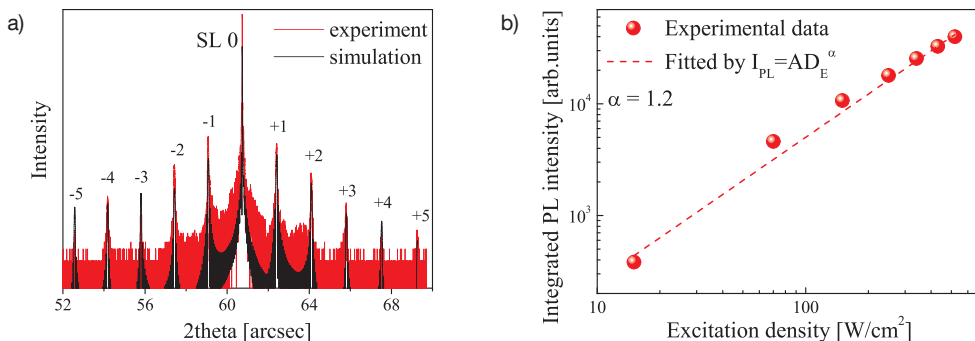


Rys.1 Schematyczne przedstawienie obszarów międzyfazowych w strukturze SL InAs/GaSb a) i zależność przerwy energetycznej od grubości periodu b), [G.J. Brown et al., Proc. SPIE 4999, 457 (2003)].

Obiektem badań Zakładu Fotoniki są SLs InAs/GaSb o grubości poszczególnych warstw równej 10 monowarstw (ang. monolayer, ML), co pozwala konstruować detektory pracujące na długości fali ok. 5 μm . Badane w Zakładzie detektory mają konstrukcję typu diody p-i-n (z barierą dla elektronów bądź/i dziur): pomiędzy warstwami/SLs o przewodnictwie typu p i n znajduje się obszar niedomieszkowanej SL, będący obszarem absorbera.

Struktury wytwarzane są na podłożach GaSb i GaAs w urządzeniu do epitaksji z wiązek molekularnych (ang. Molecular Beam Epitaxy MBE) typu Riber 32P, wyposażonym w klasyczne komórki efuzyjne dla In i Al, komórkę typu SUMO dla Ga i krakerowe komórki z zaworem dla pierwiastków z grupy V: As i Sb. Temperatura kontrolowana jest za pomocą termopary i pirometru IRCON, natomiast strumienie pierwiastków oraz ciśnienie w poszczególnych komorach urządzenia mierzone jest za pomocą mierników Bayarda-Alperta.

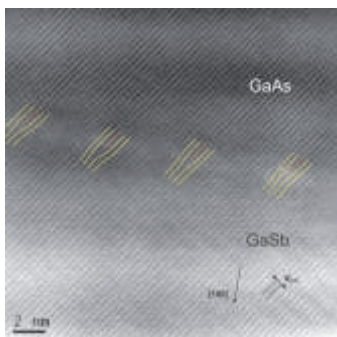
Warunki technologiczne wytwarzania supersieci nie są optymalne dla żadnego z materiałów tworzących SL. Trudność optymalizacji technologii polega na tym, że od samego początku badania prowadzone były na tak złożonym obiekcie jakim jest supersieć zawierająca kilkadziesiąt razy powtórzony period składający się z czterech warstw (wliczając IFs) GaSb/IF:InSb-like/InAs/IF:GaAs-like. Zbadano wpływ szeregu parametrów technologicznych na jakość SLs takich, jak temperatury i szybkości wzrostu, stosunek strumienia pierwiastka z gr. V do pierwiastka z gr. III i przede wszystkim sposobu i warunków wykonania obszarów międzyfazowych. Uzyskano SLs o bardzo dobrej jakości, zarówno krystalicznej jak i optycznej. Wyniki uzyskane za pomocą wysokorozdzielczej dyfraktometrii rentgenowskiej pokazują krzywą złożoną z pików satelitarnych aż do 5-go rzędu i pików interferencyjnych świadczących o zachowaniu periodyczności i płaskorównoległości płaszczyzn atomowych (rys. 2 a). Zależność natężenia fotoluminescencji (ang. photoluminescence PL) od mocy wzbudzenia jest bliska liniowej, co świadczy o rekombinacji ekscytonowej w materiale, a tym samym o zredukowanej gęstości defektów (rys. 2 b).



Rys.2 Krzywa dyfrakcyjna (a), [I.Sankowska] i natężenie PL w funkcji mocy wzbudzenia b), [D.Pierścińska] uzyskane dla SLs II rodzaju 10ML InAs/ 10ML GaSb.

Zarówno doniesienia literaturowe jak i zaprezentowane wyniki świadczą o dobrze opanowanej technologii SLs InAs/GaSb na podłożach GaSb, jednakże dla wielu zastosowań pożądanym jest wzrost na podłożach GaAs. Materiał ten, w porównaniu do GaSb, ma szereg zalet, do których należą lepsza jakość, zredukowana absorpcja promieniowania w zakresie IR, właściwości półizolujące, mniejszy koszt zakupu. Jednakże wzrost struktur z antymonem na podłożach GaAs następuje z wieloma trudnościami związanymi z dużym niedopasowaniem sieciowym (7,8% dla GaSb/GaAs), a co za tym idzie, generacją dyslokacji niedopasowania ($n \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$). Redukcja gęstości dyslokacji z grubością warstwy wymaga wzrostu grubych (mikrometrowych) buforów, co wydłuża czas wzrostu, a przez to zwiększa koszt badań/struktur. Celowa jest taka relaksacja struktur, która zachodzi w cienkim przygranicznym obszarze i nie prowadzi do zwiększenia gęstości dyslokacji w warstwie. Oznacza to konieczność wymuszenia relaksacji poprzez generację dyslokacji 90° , które mają łuzszą składową wektora Burgersa odpowiedzialną za relaksację sieci.

Zbadano wpływ podstawowych warunków wzrostu na efektywność generacji dyslokacji 90° mającą miejsce podczas wzrostu/chłodzenia heterostruktur. Najlepszy wynik, uzyskany za pomocą wysokorozdzielczego transmisyjnego mikroskopu elektronowego (*ang. High Resolution Transmission Electron Microscope HR TEM*), został przedstawiony poniżej.



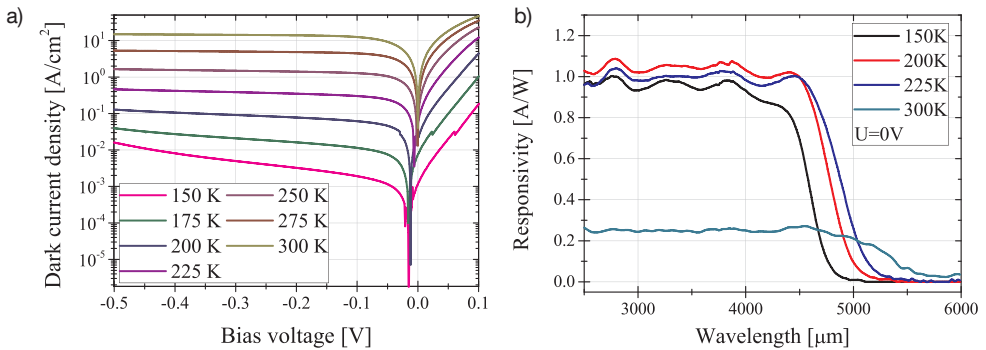
Rys. 3 Obraz międzypowierzchni GaSb/GaAs uzyskany za pomocą HR TEM. Kolorem czerwonym zaznaczono nadmiarowe płaszczyzny (11-1) w GaAs [M.Wzorek].

Na obrazie zaznaczono dyslokacje będące skutkiem występowania nadmiarowej płaszczyzny (11-1) GaAs w stosunku do płaszczyzn tego typu w GaSb. Średnia odległość pomiędzy dyslokacjami wynosi 4,5 nm. Odległość pomiędzy dyslokacjami 90° określona na podstawie wektora Burgersa wynosi 5,5 nm,

natomiast pomiędzy 60° - 2,7 nm. Oznacza to, że w analizowanym przypadku większa część naprężenia relaksuje poprzez 90° dyslokacje, jednakże dyslokacje 60° są również obecne w strukturze. W tabeli 1 i częściowo na rysunku 4 (dla GaSb₂/GaSb) zostały przedstawione parametry detektorów supersieciowych ($T=225$ K) wykonanych na różnych podłożach w zestawieniu z parametrami detektora wykonanego z HgCdTe dostępnego komercyjnie.

Tab. 1 Zestawienie parametrów detektorów wytworzonych na bazie SLs II rodzaju InAs/GaSb w porównaniu do komercyjnie dostępnego detektora z HgCdTe z firmy Vigo SA dla temperatury 225K. Symbol przy wartości mesy odpowiada kształtowi mesy.

Struktura	Rozmiar mesy [μm]	R_s [A/W]	$R_s A$ [$\Omega\text{-cm}^2$]	D^* [$\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$]
HgCdTe	□ 100	$\geq 1,3$	$\geq 0,1$	$9,0\cdot 10^9$
GaSb ₁ /GaSb	○ 200	0,95	0,13	$1,0\cdot 10^9$
GaSb/GaAs	○ 200	0,72	0,09	$0,7\cdot 10^9$
GaSb ₂ /GaSb	○ 300	1,13	3,3	$3,5\cdot 10^9$



Rys.4 Gęstość prądu ciemnego (rys.4a) i odpowiedź prądowa (rys.4b) zmierzone w różnych temperaturach dla detektora otrzymanego na podłożu GaSb [K. Czuba].

Zasadnicza różnica w jakości widoczna jest pomiędzy detektorami wykonanymi na różnych podłożach - technologia arsenkowa ciągle wymaga optymalizacji, natomiast parametry detektora oznaczonego jako GaSb₂/GaSb można uznać za zbliżone do parametrów komercyjnie dostępnego detektora na HgCdTe.

W najbliższej przyszłości w Zakładzie Fotoniki prowadzone będą prace zarówno nad przeniesieniem technologii detektorów bazujących na SL II rodzaju InAs/GaSb na podłoża z arsenku galu, jak i opracowaniem przyrządów na dalszą podczerwień (LWIR).

Technologia krzemowa - układy scalone, mikrosystemy i sensory

Dariusz Szmigiel

Gwałtowny rozwój mikroelektroniki, oprócz umożliwienia szybkiego rozwoju technologii złożonych układów scalonych, zaowocował na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat również intensywnym rozwojem technologii sensorów i mikrosystemów. Pierwsze mikrosystemy, oparte o krzem jako podstawowy materiał konstrukcyjny łączyły funkcje elektryczne i mechaniczne. Określano je mianem MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Współcześnie, wykorzystując obok krzemu również ceramikę, szkło, polimery i szereg innych materiałów opracowuje się mikrosystemy realizujące najróżniejsze funkcje. Również nowoczesne przyrządy fotoniczne wymagają integracji z układami elektronicznymi, a często mikro-mechanicznymi tworząc systemy określane jako Smart-MOEMS. Oprócz integracji systemów w jednej obudowie (SiP – System in Package) coraz większego znaczenia nabiera tzw. integracja 3D oraz integracja w podłożach elastycznych. Ta ostatnia jest szczególnie ważna dla zastosowań w coraz popularniejszej elektronice ubieralnej (wearable electronics). Ważną cechą mikrosystemów jest ich szeroki zakres funkcjonalności, a w konsekwencji również szeroki obszar aplikacyjnych. Podobnie jak układy scalone, mikrosystemy znajdują coraz powszechniejsze zastosowanie, począwszy od ochrony środowiska, poprzez technikę samochodową, lotniczą, urządzenia gospodarstwa domowego, technologię żywienia i rolnictwo, aż po biologię i medycynę. Szczególnie istotne obszary aplikacyjne to diagnostyka techniczna, włączając w to monitorowanie stanu konstrukcji inżynierskich np. budynków, hal, mostów itp. (SHM - Structural Health Monitoring), monitorowanie środowiska oraz zastosowania medyczne np. implanty lub przyrządy do diagnostyki medycznej.

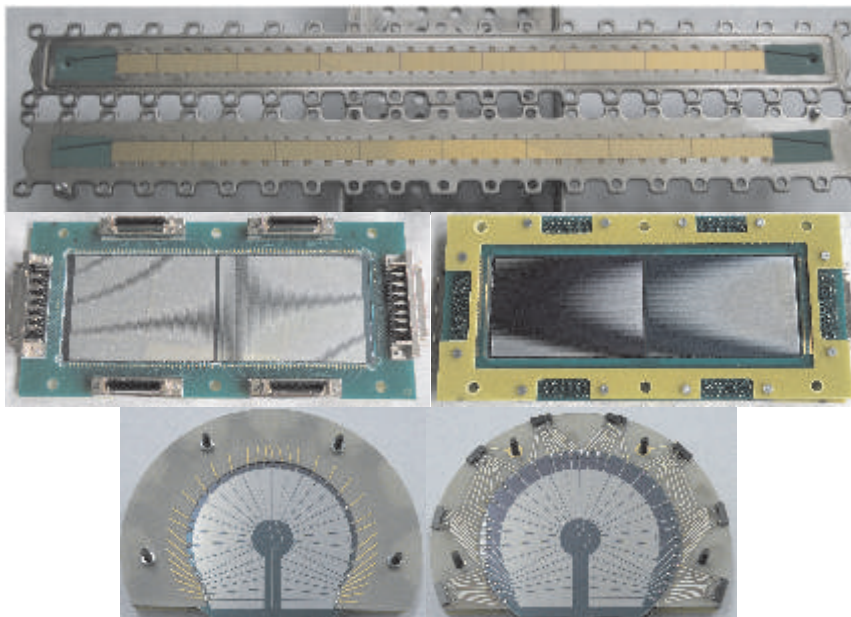
Istotna rola prac badawczych, które mają zapewnić osiągnięcie konkretnych celów dla powyżej wspomnianych aplikacji ma swoje silne odzwierciedlenie między innymi w programie Krajowych Inteligentnych Specjalizacji (KIS 7, KIS 14 i KIS 18), dokumentach Komisji Europejskiej definiujących obszary tzw. Kluczowych Technologii Pro-rozwojowych (KET) oraz priorytetach Programu Ramowego Wspólnoty Europejskiej w zakresie badań naukowych i innowacji – „HORYZONT 2020”. Duże znaczenie mikro(nano)technologii wynika z faktu, że jest ona jednym z podstawowych narzędzi do wytwarzania komponentów złożonych systemów realizujących tzw. Internet Rzeczy, czyli łączenie w inteligentny sposób ludzi, rzeczy i maszyn. Oczekuje się, że idea IoT przeniesiona bezpośrednio na grunt przemysłowy znana pod nazwą Industry 4.0 - w oparciu o wykorzystanie systemów cyber-fizycznych (CPS – cyber-physical systems) integrujących inteligentne sensory oraz przyrządy MEMS/MOEMS z układami mikroelektronicznymi i wbudowanym oprogramowaniem - umożliwi tworzenie całkowicie nowych modeli biznesowych i przyczyni się do podniesienia konkurencyjności przemysłu poprzez tworzenie inteligentnych fabryk, optymalizując cykle projektowo-produkcyjne, metody wytwarzania produktów i ich dystrybucji (sprzedaży).

W Zakładzie Technologii Mikrosystemów i Nanostruktur Krzemowych ITE oraz Zakładach współpracujących od szeregu lat prowadzone są prace B+R w obszarze technologii

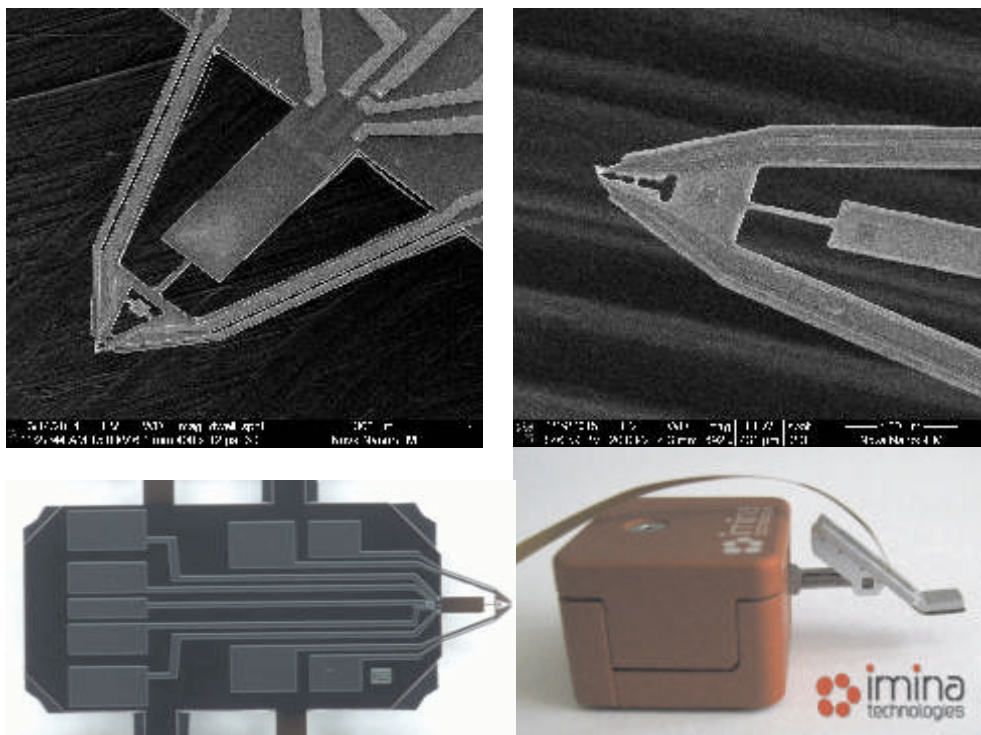
mikrosystemów zarówno w ramach krajowych projektów badawczych jak i projektów kolejnych programów ramowych Unii Europejskiej oraz programu ENIAC JU. Bazą dla podejmowania takich wyzwań jest doświadczony zespół naukowców i inżynierów oraz rozbudowana infrastruktura technologiczna umożliwiająca realizację projektów w różnych blokach tematycznych takich jak: specjalizowane układy scalone (ASIC – Application- Specific Integrated Circuits), fotodetektory, detektory promieniowania jonizującego oraz terahertzowego, czujniki i aktulatory mikromechaniczne, sensory chemiczne i biologiczne, mikroreaktory dla potrzeb analityki chemicznej i bio-medycznej, a także zintegrowane systemy mikro/opto-elektro-mechanicznych (MEMS i MOEMS).

Jednym z ostatnich znaczących osiągnięć Zakładu na polu realizacji projektów B+R jest koordynacja zakończonego właśnie projektu europejskiego 7-go Programu Ramowego pt. „NANOHEAT”, do którego włączony był zespół badawczy z Politechniki Wrocławskiej, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Carl Zeiss SMS, Fraunhofer IKTS, Imina Technologies, Technische Universität Ilmenau, Université de Franche-Comte oraz IBM Zurich. Projekt ten poświęcony był opracowaniu metod badania zjawisk cieplnych na powierzchni struktur w skali nano przy użyciu specjalnie skonstruowanych, współpracujących ze sobą nano-sond.

Przykłady przyrządów opracowanych i wytworzonych w Zakładzie Technologii Mikrosystemów i Nanostruktur Krzemowych ITE



Rys.1. Detektory naładowanych cząstek; w kolejności od góry – detektory chromatograficzne: matryca do systemu COMPACT, dwustronny detektor paskowy (144 x 48 pasków), zintegrowany przepływowy detektor do systemu ALBEGA.



Rys. 2. Opracowane w Instytucie dźwignie z piezorezystywną detekcją ugięcia oraz sterujący dźwigniami manipulator produkcji Irimina Technologies (Szwajcaria). Dźwignie oraz integrację sond z manipulatorem wykonano w ramach projektu NANOHEAT.

Opracowywanie konkretnych technologii, demonstratorów, modeli i prototypów przyrządów podejmowane jest przede wszystkim w ramach projektów pozyskanych na drodze konkursowej oraz zleceń od partnerów przemysłowych i akademickich. Tego typu wyzwania oraz towarzysząca im presja czasu wynikająca z konieczności terminowego wywiązywania się ze zobowiązań praktycznie uniemożliwia podejmowanie, z reguły długotrwałych, badań nad opracowaniem elementów składowych złożonych technologii. Jednocześnie dynamiczny postęp w dziedzinie mikrosystemów wymusza nieustające poszukiwania nowych rozwiązań, które pozwolą sprostać wymaganiom coraz bardziej konkurencyjnego rynku. Efektywność takich rozwiązań musi być jednak zawsze zweryfikowana zanim zostaną wprowadzone na stałe do praktyki technologicznej na poziomie wytwarzania kompletnych przyrządów oferowanych partnerom. Znakomitym poligonem dla testowania nowych rozwiązań, rozpoznawania nowych obszarów badawczych, a także badań o charakterze bardziej podstawowym jest projekt finansowany ze środków statutowych. Ciągłość finansowania badań statutowych ułatwia również zaplanowanie ścieżki kariery zawodowej członków Zespołu, w tym młodych naukowców. Z uwagi na bardzo daleko posuniętą dywersyfikację konstrukcji, technologii oraz aplikacji mikrosystemów i sensorów, prowadzone w ramach

projektu statutowego prace przyporządkowane są bardzo różnym obszarom tematycznym, często znacznie wykraczającym poza granice klasycznej technologii krzemowej. Z tego względu w prowadzone prace muszą być zaangażowani naukowcy, inżynierowie oraz technicy mający kompetencje w zakresie mikroelektroniki, fizyki i chemii, mechatroniki, a nawet biologii. Tak kompleksowe podejście do technologii wytwarzania mikro i nanoprzyrządów umożliwia gromadzenie wiedzy niezbędnej dla inicjowania nowych projektów badawczych i aplikacyjnych, w tym realizację zleceń dla partnerów przemysłowych.

Szerokie spektrum działalności Zakładu ilustruje dobrze zestawienie realizowanych obecnie w ramach projektu statutowego zadań badawczych, które podzielone są na trzy główne bloki tematyczne:

1. Przyrządy oparte o zjawiska rezonansu mechanicznego w skali mikro:
 - Opracowanie techniki formowania termicznych nanoostrzy pomiarowych przy użyciu zogniskowanej wiązki jonowej (FIB) na bazie wytwarzanych w Zakładzie Technologii Mikrosystemów i Nanostruktur Krzemowych struktur MEMS/NEMS;
 - Opracowanie, wykonanie i charakteryzacja próbek kalibracyjnych do ilościowego opisu parametrów metrologicznych opracowywanych w ITE nanosond AFM z przewodzącymi ostrzami, a także przyrządów komercyjnie dostępnych; prace stanowią rozwinięcie badań i eksperymentów prowadzonych w ramach zakończonego projektu FP7 NANOHEAT;
 - Wykorzystanie techniki plazmowej (immersyjnej) implantacji jonów, a następnie wdrożenie jej do technologii mikrosystemów stosowanej w Zakładzie Technologii Mikrosystemów i Nanostruktur Krzemowych; w szczególności prace dotyczą opracowania metody domieszkowania alternatywnej dla obecnie stosowanej dyfuzji z warstwy BDS oraz AsDS, a także możliwości wytwarzania planarnych piezorezystorów o grubości w przedziale od 50 do 300 nm na powierzchni mikrodźwigni AFM; równolegle implantacja plazmowa będzie badana jako narzędzie do jednorodnego domieszkowania powierzchni o złożonej topografii (3D);
 - Opracowanie konstrukcji i technologii wytwarzania czujników dla zastosowań przemysłowych (SHM); opracowywany jest nowy detektor ciśnienia akustycznego, w którym jako sensor wykorzystany zostanie mikrofon wykonany w technologii mikrostruktur krzemowych MEMS, o detekcji szczytowej wartości ciśnienia akustycznego na poziomie 140 dB; ponadto opracowywane są również metody charakteryzacji i procedury optymalizacji konstrukcji mikrofonu MEMS.

2. Detektory promieniowania i fotodetektory:

- Opracowanie konstrukcji i technologii wytwarzania fotodetektorów na potrzeby obronności kraju, detektorów naładowanych cząstek dla badań nad transaktywnościami oraz dla dozymetrii promieniowania jonizującego; w ramach zadania prowadzone są między innymi nowatorskie prace nad integracją detektora przepływowego cząstek a z dwoma detektorami cząstek b;
- Opracowanie systemu odczytowego współpracującego z tranzystorowymi detektorami THz umożliwiające detekcję słabych sygnałów w obecności znacznych szumów tła; system będzie scalonym układem wielokanałowym, umożliwiającym pracę z niezmodulowaną wiązką promieniowania THz oraz będzie współpracował z określonym typem detektorów THz – strukturami opartymi o tranzystory FET (Field Effect Transistor);
- Opracowanie systemu transmisji danych w pasmie THz bazującego na źródle VDI; system ma współpracować z tranzystorami HEMT oraz z przyrządami JLFET wytworzonymi w ITE, które pełnić będą rolę detektorów promieniowania THz;
- Poznanie zasad funkcjonowania sensorów pola elektromagnetycznego opartych na tranzystorach JLFET; w ramach zadania opracowywana jest struktura próbna, w której wytworzone będą różne wersje tranzystorów JLFET; pomiary przy zastosowaniu źródła fali subTHz umożliwią wybór optymalnej konstrukcji i technologii wytwarzania przyrządu.

3. Integracja konstrukcyjno-technologiczna:

- Optymalizacja technologii obróbki przewodzących materiałów polimerowych wykorzystywanych w technologii wytwarzania układów MEMS; obecnie badania obejmują opracowanie sposobu modyfikacji elektrod polianilinowych i metody pomiarów elektrochemicznych, a w dłuższej perspektywie planuje się również wytwarzanie polimerowych warstw receptorowych na ruchomych elementach mikromechanicznych (mikrodźwignie, membrany);
- Integracja w obszarze konstrukcji oraz technologicznych procesów wytwarzania mikrosystemów MOEMS zawierających układy elektroniki odczytowej i sterowania dla potrzeb inteligentnych sieci sensorowych; w ramach zadania doskonalone są techniki projektowania i integracji części składowych (elementy MEMS/MOEMS, układy sterowania, układy odczytowe) mikrosystemów;
- Opracowanie metody czasowego łączenia (temporary bonding) i rozłączania całych podłoży i/lub pojedynczych struktur z podłożami nośnymi w celu pocienienia ich do grubości rzędu 50 μm , a następnie przeprowadzenie na tyłach pocienionych płytek lub struktur kolejnych procesów technologicznych np. wykonanie kontaktów elektrycznych i montaż pojedynczych pocienionych struktur metodą „flip-chip”.

Analiza trendów rozwoju technologii mikrosystemów wyraźnie wskazuje rosnące zapotrzebowanie na tworzenie systemów inteligentnych (Smart Systems), sieci sensorowych i systemów cyberfizycznych (Cyber Physical Systems), które będą podstawą Internetu Rzeczy, a w szczególności - czwartej rewolucji przemysłowej (Industry 4.0). Wymaga to łączenia funkcji mikrosystemowych i sensorowych z układami mikroelektronicznymi – układami odczytowymi i interfejsami mikrosystemów i sensorów, a także zwłaszcza w obszarze aplikacyjnym dla IoT (Internet Rzeczy) układami obróbki sygnału, komunikacji bezprzewodowej, mikrokontrolerami i układami zasilania. Realizacja powyższych zadań możliwa jest tylko wtedy jeśli dysponuje się bardzo szerokim zakresem technologii, począwszy od wysoce zróżnicowanych technologii przyrządów MEMS i sensorów, aż po niesłychanie kosztowne technologie zaawansowanych układów scalonych, co jest poza zasięgiem instytucji badawczych takich jak ITE. Aktualny potencjał technologiczny Zakładu obejmuje technologie wytwarzania struktur MEMS, sensorów i detektorów, natomiast poziom opanowanej technologii układów mikroelektronicznych CMOS daleko odbiega od współczesnych potrzeb. Sytuacja ta sprawia, iż Zakład opiera swoją koncepcję rozwoju i plany na przyszłość na opracowywaniu technologii oraz konstrukcji przyrządów i systemów dla potrzeb gospodarki wykorzystując własny potencjał w obszarze technologii MEMS, sensorów i detektorów oraz opracowywaniu technik ich integracji (łączenia) z chipami układów scalonych dostępnymi na rynku lub projektowanymi w ITE, ale wykonanymi w tzw. trybie fabless. W ten sposób, bez konieczności posiadania niezwykle kosztownej linii technologicznej zaawansowanych układów scalonych, zaprojektowane i wytwarzane w ITE przyrządy MEMS będą mogły być wyposażane w nowoczesne układy elektroniczne, które nadadzą im nową funkcjonalność. Realizacja tej idei wymaga prowadzenia w ITE intensywnych prac w obszarze integracji (łączenia mechanicznego i elektrycznego) zakupionych chipów z podłożami, na których wytworzono mikrosystemy. Techniki integracji będą też przedmiotem badań pod kątem możliwości ich wykorzystania przy wytwarzaniu struktur na podłożach elastycznych (np. polimerowych, tkaninach) przeznaczonych dla zastosowań biomedycznych, co również mieści się w obszarze zainteresowań zespołu Zakładu Technologii Mikrosystemów i Nanostruktur Krzemowych ITE.

Mikro i nanotechnologie półprzewodników szerokoprzerwowych

M.A. Borysiewicz, Zakład Mikro- i Nanotechnologii Półprzewodników Szerokoprzerwowych

Półprzewodniki szerokoprzerwowe, w szczególności azotek galu (GaN) i tlenek cynku (ZnO) wraz z materiałami pokrewnymi, charakteryzują się unikalnymi własnościami. Dzięki szerokiej i prostej przerwie, mogą pracować w wysokich polach elektrycznych bez przebicia. Inżynieria przerwy umożliwia przesunięcie odpowiadającej jej krawędzi absorpcji od głębokiego ultrafioletu do światła zielonego, co umożliwia tworzenie struktur z barierą potencjału. Obecność na odpowiednio przygotowanych międzypowierzchniach dwuwymiarowego gazu elektronowego o wysokiej ruchliwości predestynuje je do zastosowań w elektronice wysokiej częstotliwości, a wysokie energie wiązań ekscytonów powodują, że są one wydajnymi emiterami światła. Możliwość wytwarzania nanostruktur z materiałów szerokoprzerwowych czyni je interesującymi do zastosowań w przyrządach czujnikowych czy do magazynowania energii. Szeroka przerwa energetyczna związana jest także z przezroczystością tych materiałów, co jest przedmiotem zainteresowania zwłaszcza w przypadku półprzewodników tlenkowych. Dodatkowo, opracowaniem materiałów tlenkowych o amorficznych mikrostrukturach charakteryzujących się wysoką ruchliwością elektronów, rozpoczęło wypieranie amorficznego krzemu z produkcji cienkowarstwowych tranzystorów sterujących dla wyświetlaczy jak również otworzyło pole badań nad cienkowarstwową elektroniką elastyczną zwłaszcza dla zastosowań związanych z Internetem Przedmiotów.

Prowadzenie wysokiej jakości prac badawczo-rozwojowych w opisanym powyżej szerokim obszarze zastosowań półprzewodników szerokoprzerwowych wymaga posiadania wysokiego poziomu kultury technologicznej i doświadczenia jak również dedykowanych urządzeń i odpowiednich warunków laboratoryjnych. Zakład Mikro- i Nanotechnologii Półprzewodników Szerokoprzerwowych dzięki konsekwentnej polityce rozwoju ma takie możliwości i w swoich pracach koncentruje się na rozwiązaniach o różnych poziomach gotowości technologicznej, które zostaną omówione w wystąpieniu. Są nimi:

1. Technologia tranzystorów GaN HEMT dla radiolokacji i dla energoelektroniki
2. Technologia amorficznych materiałów tlenkowych dla elektroniki elastycznej i przezroczystej
3. Technologia nanostruktur ZnO dla magazynowania energii
4. Badania podstawowe nad własnościami półprzewodników szerokoprzerwowych i ich struktur

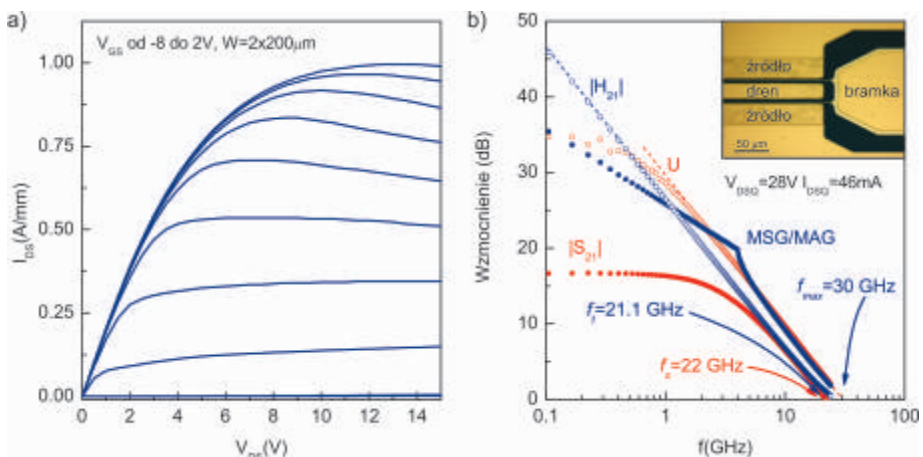
Tranzystory GaN HEMT dla radiolokacji i energoelektroniki

Prace nad opracowaniem technologii tranzystorów GaN HEMT prowadzone są dwutorowo. Dla zastosowań radiolokacyjnych rozwijana jest unikalna polska technologia tranzystorów GaN HEMT na podłożach GaN. Zastosowanie homoepitaksji struktur tranzystorowych umożliwia osiągnięcie nadzwyczaj wysokiej jakości obszaru aktywnego, przekładającego się na bardzo dobre parametry pracy, natomiast dzięki wysokiej

przewodności cieplnej podłoży GaN, odprowadzanie ciepła z przyrządu jest wydajne co powoduje stabilną pracę także przy wysokich prądach i polaryzacjach. Do celów energoelektronicznych zastosowano podłoża krzemowe ze względu na ich niską cenę i dostępność w dużych rozmiarach, co jest kwestią kluczową dla powszechnie wykorzystywanych układów energoelektronicznych.

Opracowanie technologii tranzystorów mikrofalowych na podłożach z azotku galu rozpoczęto w ramach projektu Pol-HEMT (NCBiR PBS „Tranzystory mikrofalowe HEMT AlGaIn/GaN na monokrystalicznych podłożach GaNTM) we współpracy z firmami Ammono S.A. i TopGaNsp.z. o. o, Instytutem Wysokich Ciśnień PAN, Instytutem Fizyki PAN oraz Instytutem Radioelektroniki i Technik Multimedialnych Politechniki Warszawskiej. W ramach prac wykorzystano opracowane przez firmę Ammono wysokorezystywne monokrystaliczne podłoża z azotku galu wytwarzane metodą ammotermalną. Podłoża te o bardzo wysokiej jakości krystalograficznej i małej gęstości defektów cechują się bardzo wysoką rezystywnością ($>1 \times 10^{11} \Omega \text{cm}$) wymaganą do zastosowań w radiolokacji oraz wysoką przewodnością cieplną (2.3 W/cmK), większą niż warstwy i krysztaly GaN wykonywane innymi technikami. Warstwy epitaksjalne heterostruktur AlGaIn/GaN zostały osadzone na podłożach Ammono-GaN techniką MOCVD w IWC PAN.

W Zakładzie Mikro i Nanotechnologii Półprzewodników Szerokoprzerwowych opracowano technologię wytwarzania tranzystorów mikrofalowych na bazie heterostruktury AlGaIn/GaN na podłożach Ammono-GaN, która obejmowała cykl operacji m.in. izolację przyrządów za pomocą implantacji jonów, wytwarzanie niskorezystywnych kontaktów omowych z wykorzystaniem techniki rewzrostu silnie domieszkowanych warstw azotku w obszarze podkontaktowym, formowanie metalizacji bramki o submikrometrowej długości z wykorzystaniem fotolitografii w głębokim ultrafiolecie, pasywację warstwą dielektryka oraz wykonywanie połączeń w strukturach wielobramkowych.



Rys.1 Rodzina charakterystyk wyjściowych (a) oraz charakterystyki wysokoczęstotliwościowe (b) tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN na podłożu Ammono-GaN.

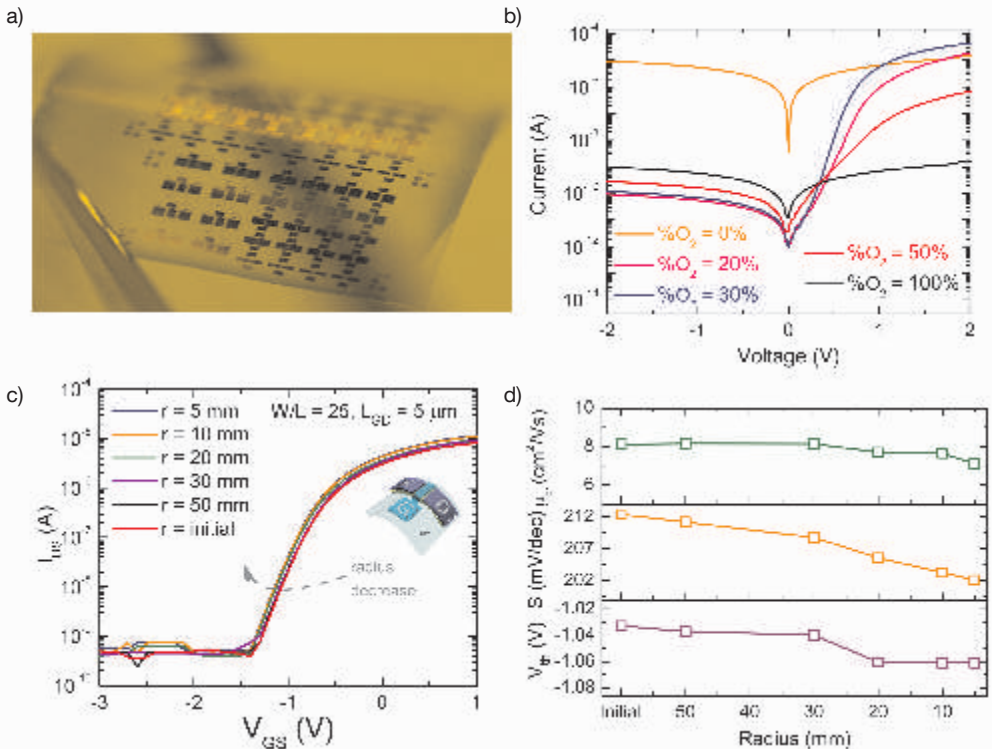
Dla opracowanych przyrządów maksymalny prąd wyjściowy wynosił ok. 1 A/mm (rys. 1a). Natomiast częstotliwość fs wynosiła 22 GHz zaś maksymalna częstotliwość f_{max} wynosiła 31.3 GHz (rys. 1b). Otrzymane parametry tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN na podłożach Ammono-GaN pozwalają na zastosowanie tych przyrządów w układach nadawo-odbiorczych dla radarów pracujących na pasmo S (2-4 GHz). Opracowany w ramach projektu PolHEMT tranzystor spełnia wymagania postawione przez partnerów z polskiego przemysłu radiolokacyjnego (PIT-RADWAR S.A).

Prowadzone dotychczas prace nad technologią tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN na podłożach krzemowych dla energoelektroniki prowadzone w ramach projektu Ventures FNP (Tranzystory HEMT AlGaIn/GaN na podłożu krzemowym do zastosowań w elektronice mocy- modelowanie konstrukcja i demonstrator, 2013-2015) skupiały się nad uzyskaniem wysokiego napięcia przebicia (powyżej 600V) poprzez odpowiednie wykonywanie lub kształtowanie elektrod przyrządu. W szczególności badano wpływ zastosowania elektrody polowej (field plate) w obszarze pojedynczego źródła, pojedynczej bramki, pojedynczego drenu lub podwójnych struktur ograniczających pole elektryczne jednocześnie w obszarze źródła i bramki lub jednocześnie w obszarze bramki i drenu czy zastosowaniu kontaktów Schottky'ego elektrody drenu zamiast konwencjonalnej metalizacji omowej.

Technologia amorficznych materiałów tlenkowych dla elektroniki elastycznej i przezroczystej

Opracowano technologię wytwarzania cienkich warstw amorficznego tlenku indowogalowo-cynkowego (IGZO) na drodze magnetronowego rozpylania katodowego. Własności elektryczne tego materiału są kontrolowane w szerokim zakresie dzięki precyzyjnej kontroli warunków osadzania, zwłaszcza przepływu tlenu co umożliwia wytwarzanie IGZO o parametrach odpowiednich zarówno do zastosowania w kanale tranzystora cienkowarstwowego jak i w elektrodach przewodzących. Własności tego materiału zweryfikowano pozytywnie w konstrukcjach cienkowarstwowych tranzystorów polowych typu MOSFET i MESFET wytworzonych na elastycznych podłożach, uzyskując w strukturach przyrządów MESFET parametry użytkowe porównywalne z parametrami własnymi materiału.

Jednym z głównych wyzwań technologii amorficznych półprzewodników tlenkowych jest wytworzenie niezawodnych przezroczystych kontaktów Schottky'ego. Dotychczas stosowane metaliczne złącza Schottky'ego wymagają wygrzewania w atmosferze tlenowej, co jest krokiem technologicznym ograniczającym możliwości stosowania podłoży o niskiej odporności termicznej. Wobec tego opracowano złącze z Ru-Si-O, materiału o wysokiej pracy wyjścia tworzącego barierę z IGZO, a jednocześnie będącego wysokoprzewodzącym materiałem tlenkowym. Dzięki temu, inaczej niż w przypadku złącza z metalem, na międzypowierzchni z IGZO nie dochodzi do dyfuzji tlenu z kanału do metalizacji a tym samym do pogarszania parametrów tranzystora i nie jest konieczne prowadzenie wygrzewania w tlenie mającego skompensować ten efekt.



Rys.2. Przyrządy półprzewodnikowe i układy elektroniczne na bazie IGZO wytworzone na elastycznym podłożu polimerowym (a), charakterystyki I-V złącza Schottky'ego (b), rodzina charakterystyk przejściowych (c) oraz parametry elektryczne (d) elastycznych tranzystorów MESFET w funkcji wygięcia.

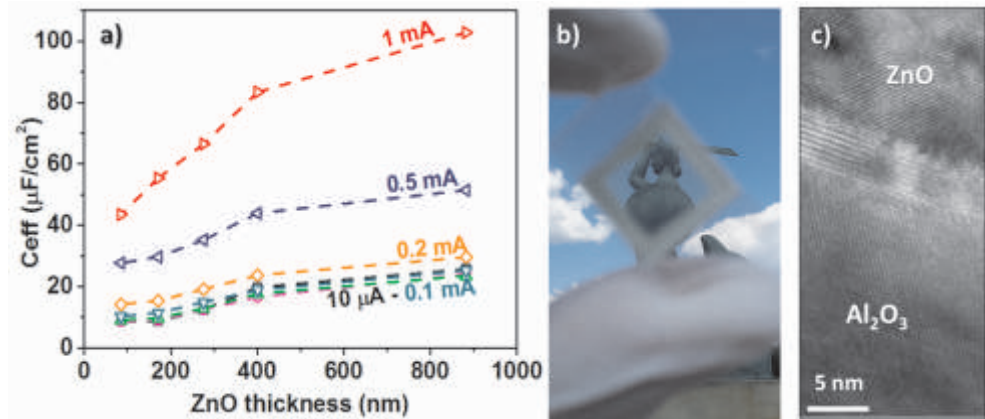
Dostrzegając potencjał urządzeń elektroniki elastycznej, w szczególności urządzeń ubieranych na ciało (ang. wearables/electronics), takich jak systemy diagnostyki osobistej w formie plastrów konformalnie pokrywających skórę, zaprojektowano i wytworzono złącza Schottky'ego, struktury MESFET oraz bramki logiczne NOT na bazie IGZO na elastycznych podłożach polimerowych (rys. 2a). Charakterystyki prądowo-napięciowe wytworzonych przyrządów przedstawiono na rysunkach 2b oraz 2c. Ruchliwość nośników w kanale tranzystora osiąga $8,1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, a stosunek prądu włączenia do wyłączenia przekracza 10^4 A/A . Nachylenie charakterystyki przejściowej w obszarze podprogowym nie przekracza 240 mV/dek , dzięki czemu zakres napięć przełączających tranzystory w układzie wynosi od -1 do 1 V (rys. 2d). Parametry te nie są wrażliwe na promień wygięcia w zakresie od 50 do 30 mm . Obecnie prowadzone są prace nad wytwarzaniem tego typu tranzystorów na podłożach papierowych.

Technologia nanostruktur ZnO dla magazynowania energii

Opracowana w Zakładzie Mikro- i Nanotechnologii Półprzewodników Szerokoprzerwowych opatentowana technologia wytwarzania nanostruktur tlenku cynku techniką magnetronowego rozpylania katodowego umożliwia uzyskanie na dużych powierzchniach nanostruktur o kontrolowanych własnościach morfologicznych i elektrycznych. Stosując odpowiednie parametry procesu możliwa jest zmiana morfologii nanostruktur z przypominającej nanokwiaty poprzez nanokorale po nanodruły czy nanokulki. Materiały te charakteryzują się silnie rozwiniętą powierzchnią i wysoką aktywnością chemiczną, z tego powodu badane jest ich zachowanie jako elektrod w przyrządach do magazynowania i przekształcania energii. W ramach projektów badane jest zastosowanie tej technologii do wytwarzania superkondensatorów (projekt NCBiR Lider „Superkondensatory dla przezroczystej elektroniki oparte na nanokoralowym ZnO”) oraz ogniw fotoelektrochemicznych (projekt MNiSWIuventus Plus „Badania wpływu agregacji barwników i kropek kwantowych na wydajność ogniw fotoelektrochemicznych opartych na nanokoralowym ZnO”).

Opracowanie przezroczystych superkondensatorów stanowi odpowiedź na brak przezroczystych źródeł energii dla elektroniki przezroczystej. W przyjętym podejściu elektrody są wytwarzane z zastosowaniem przezroczystego ZnO o nanostrukturalnej morfologii dla zwiększenia powierzchni, a tym samym pojemności przyrządu. W celu dalszego zwiększenia pojemności elektrody są dekorowane nanostrukturami MnO_2 wykazującego dużą reaktywność redoks i w niektórych fazach wysoki potencjał interkalacji jonów elektrolitu. MnO_2 wytwarzane jest zarówno na drodze magnetronowego rozpylania katodowego jak i syntezy nanocząstek z roztworów wodnych. Aktualnie opracowane kondensatory charakteryzują się pojemnością właściwą $85 \mu F/cm^2$ przy prądzie ładowania 1 mA i transmisji optycznej na poziomie 78% dla 550 nm (rys. 3.a i 3.b).

Badania nad ogniwami fotoelektrochemicznymi (ang. Dye-Sensitized Solar Cells, DSSC) opartymi na ZnO związane są z chęcią zintegrowania ich z superkondensatorami w autonomicznych tlenkowych układach dla celów Internetu Przedmiotów czy diagnostyki osobistej. Badana jest agregacja materiałów absorbujących światło i jej wpływ na parametry użytkowe przyrządu. Badania dotyczą również zmieszania różnych rodzajów materiałów absorbcyjnych w celu wytworzenia nowych kompleksów absorbujących.



Rys. 3. a) Pojemność efektywna dla superkondensatorów opartych na nanokoralowym ZnO w funkcji grubości elektrody ZnO dla prądów ładowania w zakresie $10 \mu A - 1 mA$. b) Zdjęcie przezroczystego superkondensatora o elektrodach grubości 400 nm. c) Wysokorozdzielczy obraz TEM warstwy monokrystalicznego ZnO na podłożu Al_2O_3 . Widoczna warstwa przejściowa redukująca niedopasowanie sieciowe między podłożem a ZnO.

Badania podstawowe nad własnościami półprzewodników szerokoprzerwowych i ich struktur

Badania podstawowe prowadzone w Zakładzie Mikro- i Nanotechnologii Półprzewodników Szerokoprzerwowych dotyczą fundamentalnych oraz aplikacyjnych aspektów technologii materiałów i struktur z półprzewodników szerokoprzerwowych i stanowią istotną część działalności Zespołu. Służą one zarówno przesunięciu granic poznania jak i wsparciu prac rozwojowych w celu zwiększenia wydajności stosowanych rozwiązań. W szczególności przedmiotem badań są złącza metal-półprzewodnik, zwłaszcza charakteryzujące się wysoką stabilnością termiczną zarówno dla kontaktów omowych jak i barier Schottky'ego, z zastosowaniem nowych rodzajów materiałów jak fazy MAX czy nanokrystaliczne tlenki krzemków metali. Istotne miejsce zajmują prace nad wzrostem monokrystalicznych cienkich warstw ZnO (rys. 3.c), domieszkowaniem ich na typ p oraz zbadaniem roli wodoru jako domieszki kompensującej akceptory w ZnO. Relatywnie nowym zagadnieniem są kwestie związane ze wzrostem oraz domieszkowaniem nanostruktur techniką magnetronowego rozpylania katodowego, zwłaszcza ZnO. Dodatkowo, bardzo szeroki zakres badań podstawowych dotyczy tlenkowych materiałów amorficznych, w szczególności w zakresie ich składu chemicznego czy gęstości dla precyzyjnej kontroli własności transportowych.

Technologia wielowarstwowych struktur elektronicznych

dr Agata Skwarek

Struktury warstwowe w elektronice i mikroelektronice, wytwarzane z funkcjonalnych materiałów technologiami cienkowarstwowymi oraz grubowarstwowymi, są podstawowym elementem składowym współczesnych mikroukładów i systemów elektronicznych. Jakość warstw oraz ich parametry funkcjonalne (geometryczne, elektryczne, mechaniczne, chemiczne, optyczne) decydują o parametrach finalnych struktur wytworzonych w oparciu o tę technologię oraz o ich niezawodności w eksploatacji. Zaawansowane technologie warstwowe są więc podstawą i warunkiem tworzenia innowacyjnych produktów nowych generacji, wyróżniających się konkurencyjnymi parametrami użytkowymi na rynkach międzynarodowych.

Nowoczesna technologia LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics) jest rozszerzeniem technologii grubowarstwowej, która łączy w sobie właściwości drukowanych warstw i podłoży dielektrycznych o różnych właściwościach. Technologia LTCC jest zaawansowaną i stosunkowo taną technologią umożliwiającą wytwarzanie układów i systemów mikroelektronicznych o wysokim stopniu złożoności, wysokiej gęstości upakowania i wysokim wskaźniku niezawodności. Technologia ta, wykorzystująca przewodzące polimery i nadruk bezpośredni, zapewnia także montaż tanich układów elektronicznych, w szczególności dla systemów identyfikacji bezprzewodowej RFID, a także nowych generacji układów mikrofalowych i optoelektronicznych.

Technologia LTCC znajduje głównie zastosowanie w produkcji układów mocy wysokiej częstotliwości, sensorów i aktuatorów, podzespołów samochodowych (ABS, poduszki powietrzne, układ zapłonowy), systemów medycznych oraz dla potrzeb biotechnologii, w szczególności mikroreaktorów, przyszłościowych systemów zintegrowanych (SIP – System in Package), integrujących w pojedynczej obudowie niewielkich rozmiarów czujniki, aktulatory oraz elektroniczne układy sterujące obudów układów MEMS i wielowarstwowych elementów biernych (kondensatory, warystory, termistory).

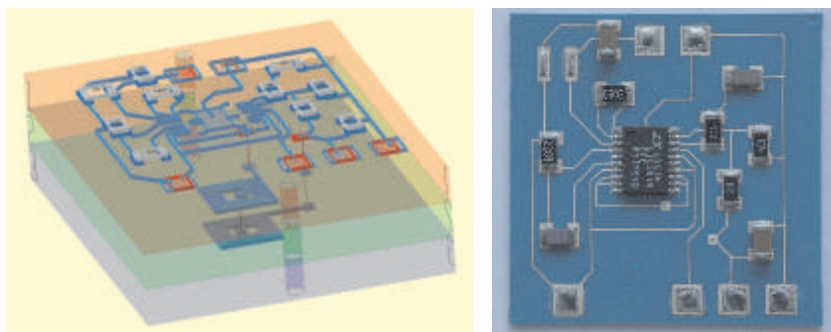
Technologię LTCC charakteryzują następujące cechy:

- duża gęstość upakowania i stopień integracji elementów dzięki stosowaniu wielu warstw i połączeń między warstwami;
- elastyczność w projektowaniu różnorodnych struktur przestrzennych;
- stosunkowo niski koszt dzięki możliwości wykonania układów elektronicznych, zintegrowanych czujników i przetworników oraz obudowy w jednym procesie technologicznym;
- niezawodność, szczelność układu i odporność na wysokie temperatury;
- obojętność wobec środowiska.

Podstawą technologii LTCC jest wytworzenie surowych folii ceramicznych o odpowiedniej grubości, składzie i parametrach obróbki. Surowa folia musi być elastyczna, mieć gładką powierzchnię bez pęcherzy i pęknięć oraz odpowiednią wytrzymałość mechaniczną. Na folię nanoszone są metodą sitodruku ścieżki przewodzące, rezystory,

kondensatory i elementy indukcyjne. Następnie kolejne warstwy są precyzyjnie układane w stos, laminowane i wypalane. Umożliwia to uzyskanie trójwymiarowych struktur złożonych z kilku do kilkudziesięciu warstw, o grubości pojedynczej warstwy 3 – 200 μm . We wspólnym procesie w temperaturze ok. 850°C, po wcześniejszym wypaleniu składników organicznych, spieka się ceramikę i jednocześnie wypala wszystkie elementy grubowarstwowe. W końcowej fazie do spieczonego układu dołączane są elementy, które nie wytrzymują tak wysokich temperatur lub mają większą objętość.

Rys. 1 przedstawia przetwornicę DC-DC wykonaną technologii LTCC.

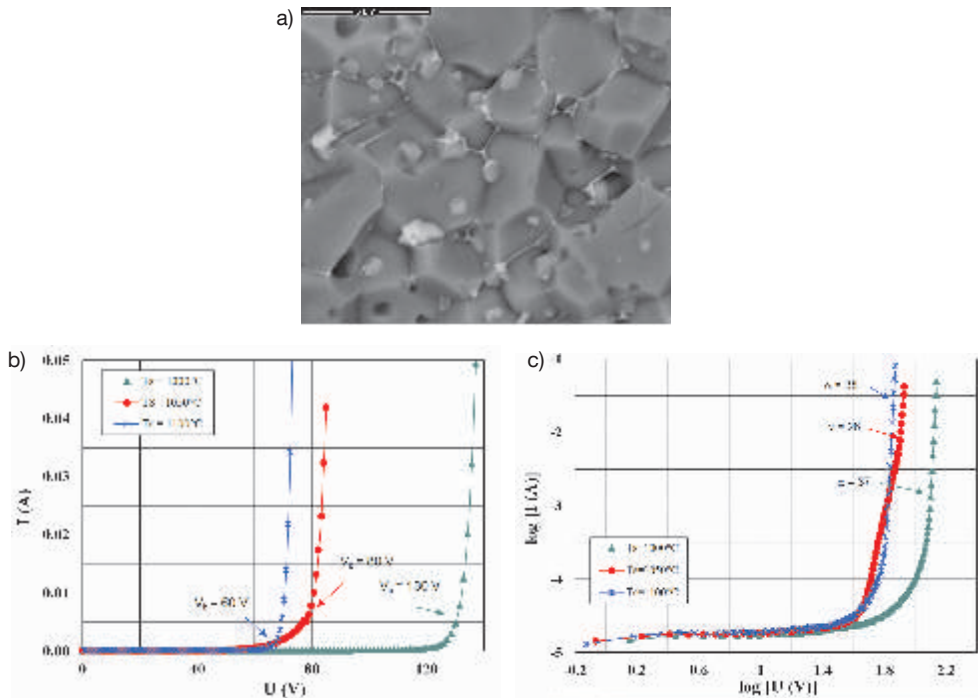


Rys. 1. Przetwornica DC- DC wykonana w technologii LTCC

Przykładem szczególnego zastosowania technologii LTCC jest wytwarzanie wielowarstwowych warystorów. Warystor (varistor-variable resistor) jest ceramicznym rezystorem zmiennym, którego rezystancja silnie zależy od napięcia. Jego charakterystyka prądowo-napięciowa jest nieliniowa. Warystor stanowi zabezpieczenie typu ograniczającego, polegające na redukcji doprowadzonego przepięcia do wartości dopuszczalnej. W wyniku pojawienia się dużej chwilowej wartości napięcia jego rezystancja wewnętrzna gwałtownie maleje (o kilka rzędów).

Technologia LTCC umożliwia otrzymanie testowych wielowarstwowych warystorów na bazie ZnO domieszkowanego tlenkami Bi_2O_3 , Sb_2O_3 , CoO , MnO , Cr_2O_3 , B_2O_3 , SiO_2 i Pr_2O_3 . Analiza rentgenograficzna, badania przy użyciu mikroskopu skaningowego (rys. 2a) oraz mikroanaliza metodą EDS wykazują obecność w warstwie ceramicznej ziaren ZnO o wielkości ok. 4 nm, submikronowych ziaren spinelu $\text{Zn,Sb}_2\text{O}_{12}$ na granicach ziaren ZnO oraz w przypadku kompozycji domieszkowanej prazeodymem krystalitów w kształcie igieł zawierających prazeodym. Ziarna ZnO są otoczone cienkimi warstwami nanometrowej grubości, bogatymi w tlenek bizmutu, które decydują o tworzeniu się izolacyjnej bariery na granicach ziaren tlenku cynku i są odpowiedzialne na występowanie właściwości warystorowych.

Ziarna spinelu pełnią istotną rolę w ograniczaniu niekorzystnego rozrostu ziaren oraz w uzyskaniu drobnoziarnistej i jednolitej mikrostruktury o małym rozrzucie wielkości ziaren pożądanej w przypadku wielowarstwowych warystorów. Stwierdza się również silny wpływ dodatku tlenku prazeodymu na zahamowanie rozrostu ziaren w trakcie wypalania warystorów. Wykonane warystory wielowarstwowe wykazują nieliniową charakterystykę prądowo-napięciową o współczynniku nieliniowości 20 - 40 (rys. 2b,c).



Rys. 2. Obraz SEM (a) i charakterystyki prądowo-napięciowe wielowarstwowych warystorów na bazie ZnO (b, c)

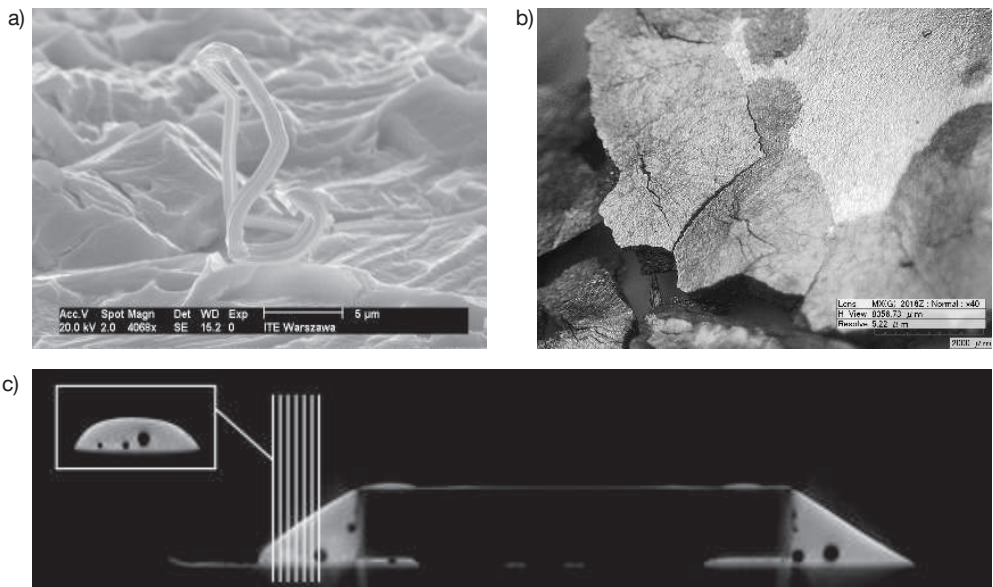
Oprócz konwencjonalnych materiałów z domieszkowanego tlenku cynku, istnieje grupa innowacyjnych materiałów opartych na obszernej grupie nowych, jednoskładnikowych związków i kompozytów na bazie perowskitów typu $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$, z których również możliwe jest wytworzenie warystorów w technologii LTCC.

Istotny wpływ na jakość wytwarzanych struktur wielowarstwowych mają defekty struktur podczas montażu. Defekty powstające w procesie wytwarzania struktury LTCC można ogólnie podzielić na następujące kategorie: defekty ścieżek przewodzących, defekty viasów, defekty związane z odlewaniem folii i składaniem, laminacją i współspiekaniem warstw oraz defekty montażu SMD.

Zdefiniowanie defektów montażu SMD jest ważne z uwagi na fakt, iż ich obecność ma wpływ na jakość i niezawodność również innych układów elektronicznych (w tym na podłożach PCB, DBC i innych). Do typowych wad montażu SMD należą: złe ustawienie

elementu wobec pól kontaktowych, nadmierna ilość pasty lutowniczej skutkująca powstaniem zwarc, niedostateczna ilość pasty lutowniczej skutkująca brakiem ciągłości lutownicy. Możliwe jest również powstawanie różnego rodzaju wad podczas późniejszej pracy lutownicy w warunkach środowiskowych, gdzie istnieje możliwość wzrostu wiskerów Sn – wydłużonych struktur monokrystalicznych wyrastających samoczynnie i spontanicznie z powierzchni lutownicy (rys. 2a) czy alotropowej przemiany (zarazy cynowej) metalicznej b-Sn w półprzewodnikowy proszek a-Sn, przy temperaturze przemiany poniżej 13°C (rys. 3b). Szczególnym przykładem wad montażu SMD są wady lutowin powstające zaraz po ich wytworzeniu, do których można zaliczyć pustki lutownicze (rys. 3c).

Wady lutowin silnie zależą od parametrów procesu technologicznego oraz od warunków późniejszej pracy podzespołów elektronicznych. Ich występowanie powoduje pogorszenie jakości i zmniejszenie niezawodności lutowin. Pustki lutownicze mają wpływ na wytrzymałość mechaniczną oraz rezystancję lutowin, co może przynieść niekorzystne efekty przy długotrwałej pracy przy większych obciążeniach prądowych. Wiskery są nie tylko przyczyną zwarc w układach, ale także wzrostu promieniowania elektromagnetycznego czy zaśmieciania układów optycznych. Alotropowa przemiana cyny, występująca w lutowinach urządzeń pracujących w ujemnej temperaturze, przyczynia się do obniżenia wytrzymałości mechanicznej lutownicy oraz wzrostu jej rezystancji.



Rys. 3. Przykładowe wady lutowin: a) wisker, b) transformacja Sn (zaraza cynowa), c) pustki lutownicze