CEZAMAT to jedna z największych w Polsce inwestycji w obszarze badań i rozwoju wysokich technologii (high-tech). W jej wyniku powstała sieć laboratoriów wyposażonych w najnowocześniejszą infrastrukturę techniczną, urządzenia technologiczne i charakteryzacyjno-diagnostyczne. Pozwala to na prowadzenie interdyscyplinarnych badań w tych w obszarach nauki, których rozwijanie na takim poziomie było do tej pory w Polsce trudne ze względu na brak odpowiedniego zaplecza badawczego.

Celem CEZAMAT-u jest realizacja projektów badawczych z obszaru nowych, wysokich technologii, posiadających odpowiedni potencjał naukowy i komercyjny, które mają szansę przyczynić się do rozwoju gospodarczego zarówno regionu, jaki i całego kraju. Skupienie w jednym miejscu laboratoriów, wiedzy i umiejętności z różnych dziedzin ułatwia prowadzenie badań interdyscyplinarnych obejmujących takie dziedziny jak:

- *Nanotechnologia,*
- *Mikro- i nanoelektronika oraz mikrosystemy półprzewodnikowe (MEMS, MOEMS),*
- *Fotonika,*
- *Techniki kosmiczne,*
- *Zaawansowane materiały,*
- *Inżynieria bio-chemiczna i bio-medyczna.*

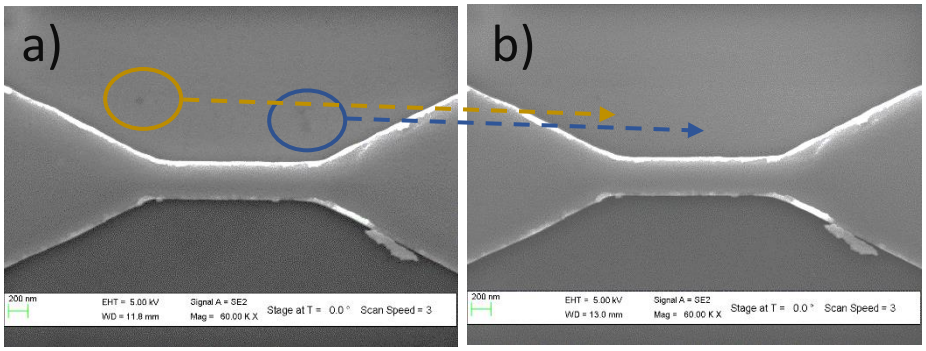
CEZAMAT dysponuje dostosowanymi do tak szerokiego spektrum charakteru prac wyspecjalizowanymi laboratoriami technologicznymi i pomiarowymi. W zależności od wymagań stawianych w danej dziedzinie zapewniają one pożądana czystość technologiczną (clean-room'y dostosowane do charakteru prowadzonych badań), stabilizację temperatury oraz wilgotności. Specjalna konstrukcja Laboratorium chroni budynek przed niepożądanymi drganiami i polem elektromagnetycznym, które mogłyby zakłócić procesy technologiczne lub prace charakteryzacyjno-diagnostyczne.

W celu zapewnienia optymalnych i spełniających najwyższe światowe standardy warunków dla prowadzonych prac istniejące w CEZAMAT laboratoria podzielone są na platformy:

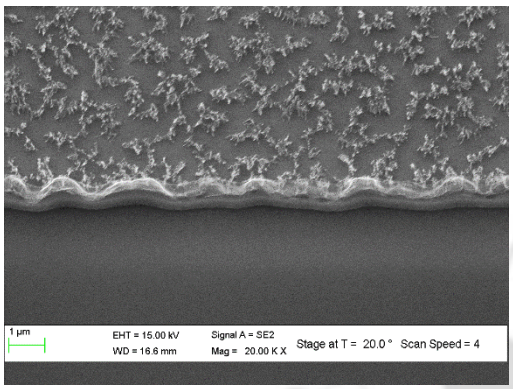
- *Platforma technologii krzemowych (i kompatybilnych z krzemem – np. SiC);*
- *Platforma technologii półprzewodników nie kompatybilnych z krzemem (półprzewdoniki szerokopasmowe, np. GaN, ZnO);*
- *Platforma inżynierii bio-chem-med;*
- *Platforma technologii cienkowarstwowych i elektroniki elastycznej;*
- *Platforma zaawansowanych materiałów;*
- *Platforma charakteryzacji i diagnostyki materiałów, elementów, układów i systemów.*

Czyszczenie powierzchni

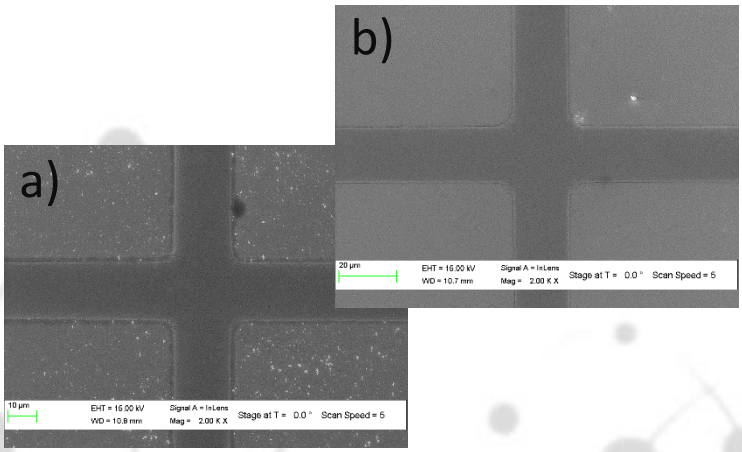
podłoży jest jednym z kluczowych etapów produkcji w technologii ciała stałego, a zatem wszelkiego rodzaju struktur i układów elektronicznych, fotonicznych oraz mikrosystemów. Zapewnia możliwość powtarzalnego osiągania oczekiwanych parametrów wykonanych elementów oraz wysoki uzysk. Jednocześnie umożliwia utrzymanie w pożądanej czystości aparatury produkcyjnej, co jest niezbędne podczas jednorazowych eksperymentów jak i produkcji małoseryjnej. Procesy czyszczenia powierzchni stosowane są na wielu etapach wytwarzania układów scalonych. Zapewniają dobre przygotowanie powierzchni przed pierwszym procesem technologicznym jak i pozwalają utrzymać pożądaną czystość podczas całego procesu produkcyjnego.



Rys. 1 Porównanie podłoża a) przed b) po procesie czyszczenia powierzchni. Podłoże krzemowe z naniesioną warstwą tytanu.



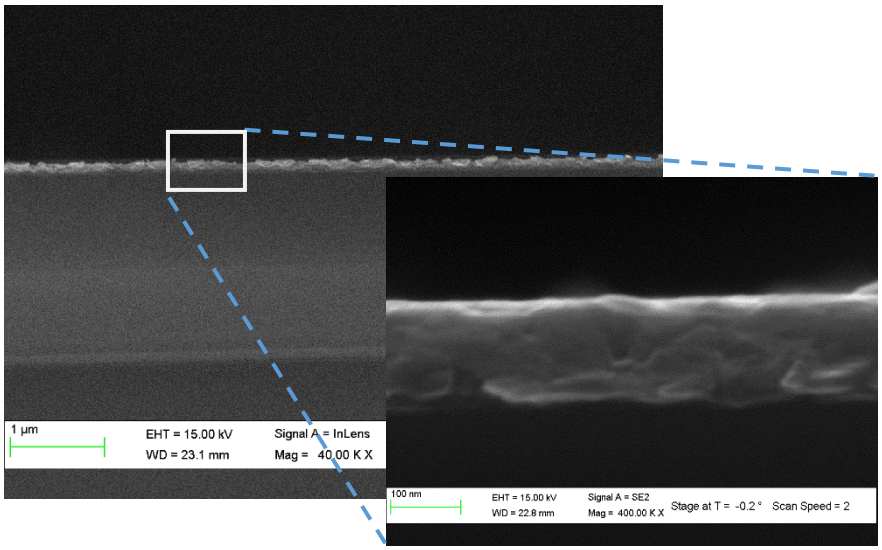
Rys. 2 Pozostałości fotorezystu po procesie trawienia plazmowego



Rys. 3 Porównanie powierzchni a) przed b) po procesie czyszczenia.

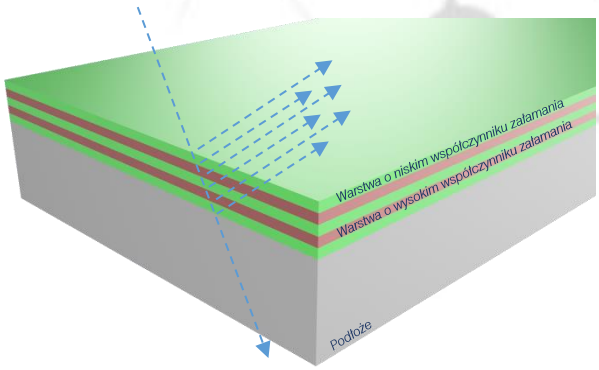
W praktyce stosowane są procesy czyszczenia wykonywane techniką zanurzeniową, jak i bardzo nowoczesne metody natryskowe. Procesy obu typów mogą być prowadzone na pojedynczych podłożach jak i na całych partiach. Takie procesy umożliwiają urządzenia technologiczne CEZAMAT-u.

Wytwarzanie warstw *jest grupą procesów których zadaniem jest syntezowanie materiałów, niezbędnych do tworzenia przyrządów na różnego rodzaju podłożach. Możliwe jest wykonanie procesów wzrostu warstw gdzie: podłoże jest jedynie nośnikiem nowo powstałej warstwy lub powierzchnia reaguje tworząc nową warstwę. Dzięki doborze odpowiednich parametrów procesów możliwe jest wytworzenie warstw o pożądanych właściwościach fizycznych: elektrycznych, optycznych, chemicznych i mechanicznych.*



Rys. 4 Zdjęcie w przełomie podłoża krzemowego. Warstwa aluminium naniesiona na powierzchnię podłoża krzemowego.

Procesy wytwarzania warstw różnią się od siebie także temperaturami, w jakich są prowadzone. CEZAMAT posiada urządzenia pozwalające na prowadzenie procesów wzrostu warstw w temperaturach od bliskich temperaturom pokojowych do bardzo wysokich - rzędu 1000 °C. Dobór odpowiedniej metody zależy od konstrukcji wykonywanego elementu oraz sekwencji poprzedzających i następujących dalej procesów technologicznych, rodzaju warstwy, jej oczekiwanej grubości oraz pełnionej funkcji (np.: warstwa maskująca, izolująca, tunelowa, przewodząca, kontakt elektryczny, światłowód, element optyczny, dyfrakcyjny).



Rys. 5 Przykład struktury wielowarstwowej do zastosowań w optyce.

Tab. 1 Możliwe zastosowania różnych metod wytwarzania warstw.

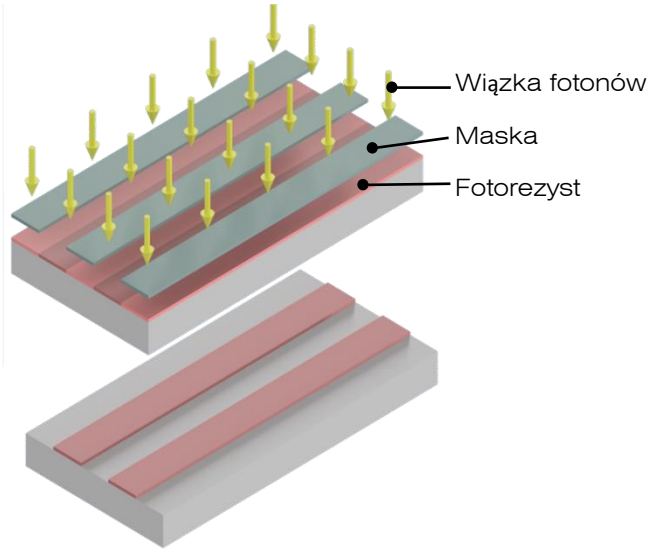
Najczęstsze zastosowanie / Metoda	Technologia półprzewodnikowa	Fotonika	Maskowanie	Pasywacja	Maskowanie w procesie trawienia lub utleniania
Utlenianie termiczne	X	X	X		X
Rozpylanie magnetronowe	X	X	X		X
PECVD (ang. Plasma-Enhanced Chemical Vapor)	X	X	X	X	
LPCVD (ang. Low Pressure Chemical Vapor Deposition)	X		X		X

Odwzorowanie kształtów

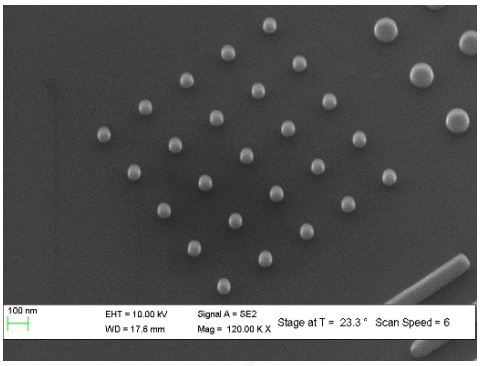
jest niezbędnym elementem praktycznie wszystkich technologii, niezależnie od przyszłego zastosowania powstałych elementów, czy układów. Istnieje kilka strategii i realizujących to zadanie technik. Ich wybór zależy od wielu parametrów i czynników.

Najbardziej powszechną metodą jest proces fotolitografii. Pozwala on na osiągnięcie rozdzielczości rzędu poniżej 1 µm. Wymagane jest jednak w pierwszej kolejności wykonanie „wzorca", czyli maski fotolitograficznej. Zaletą tego typu podejścia jest szybkość procesu oraz redukcja kosztów podczas produkcji seryjnej.

Dla pewnej grupy materiałów istnieje możliwość bezpośredniego definiowania w nich oczekiwanych kształtów za pośrednictwem wiązki wysokoenergetycznych elektronów (elektronolitografia).



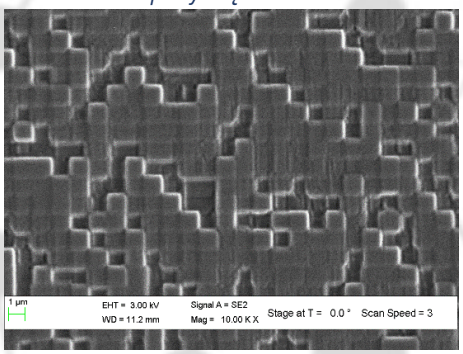
Rys. 6 Schemat poglądowy odwzorowania kształtów w fotorezyście negatywowym.



Rys. 7 Obraz obiektów okrągłych, o wymiarach od ok. 10 nm, wykonanych w rezyście ZEP 520A.

W odróżnieniu od fotolitografii, w procesie elektronolitografii nie stosuje się wzorców kształtów. Naświetlanie obrazu odbywa się za pomocą skanowania obszarów obiektów bardzo skupioną wiązką wysokoenergetycznych elektronów. Jej mała średnica pozwala na naświetlenie z ogromną precyzją niezwykle małych obszarów, rzędu pojedynczych dziesiątek nanometrów. Technika ta oprócz odwzorowania obiektów w zakresie głęboko submikrometrowym jest szczególnie przydatna na etapie testów i poszukiwania optymalnych konstrukcji struktur lub przyrządów.

Szczególnie atrakcyjne, a jednocześnie unikatowe możliwości daje „Grey scale e-beam lithography". Jest to technika, która umożliwia wykonanie w mikroskali obiektów 3D w postaci słupków o wielopoziomowej gradacji. Takie obiekty mogą znakomicie pełnić rolę odbiciowych lub transmisyjnych hologramów. CEZAMAT może projektować takie struktury na zadane długości fali generującej obrazy holograficzne, a następnie je wykonywać.

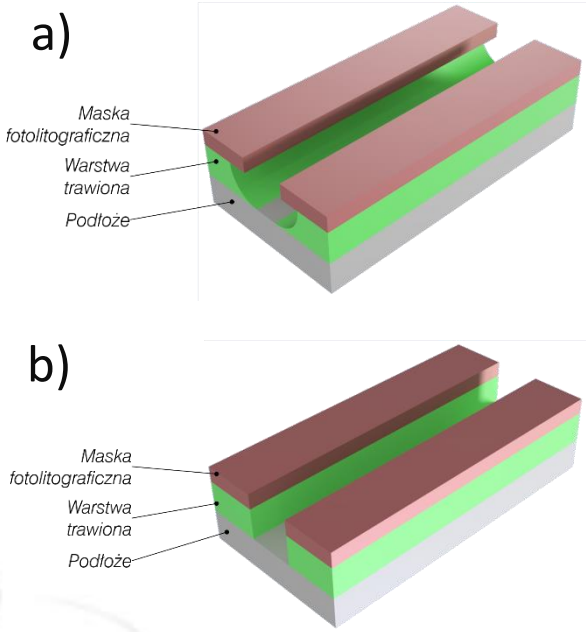


Rys. 8 Zdjęcie trójwymiarowej, zaprojektowanej na 256 poziomów, struktury holograficznej wykonanej w rezyście PMMA 950.

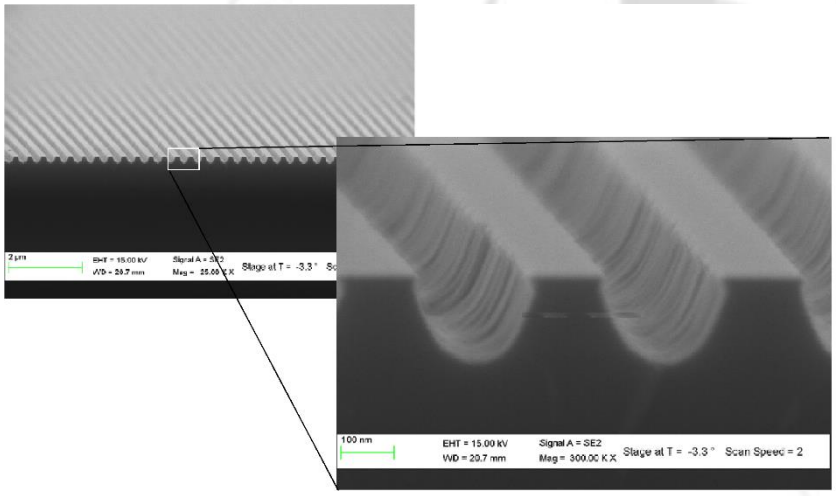
Trawienie *to proces pozwalający na usuwanie materiału z próbki w kontrolowany sposób. Jest, w większości przypadków, niezbędnym etapem definiowania kształtów w różnego rodzaju materiałach, tj.: metalach, dielektrykach i półprzewodnikach. Trawienie pozwala na usunięcie całej warstwy materiału lub tylko na pewną głębokość, przy precyzyjnej kontroli szybkości trawienia. W przypadku realizacji tego procesu na podłożach, na których wykonano w procesie litografii warstwy maskujące, możliwe jest usuwanie jedynie odsłoniętych obszarów danej warstwy, co pozwala ostatecznie nadać im oczekiwany kształt.*

Ten typ procesów może odbywać się w warunkach mokrych, czyli przez zanurzanie lub natryskiwanie chemii o odpowiednio dobranym składzie. Alternatywą mokrego trawienia są procesy przeprowadzane w reaktorach do trawienia suchego (reakcje chemiczne wspomagane wyładowaniem w plaźmie i/lub wysokoenergetycznymi jonami). Dobór odpowiedniej technik wynika z analizy efektów towarzyszących procesom, takich jak np. selektywność, czy anizotropia.

Znajomość mechanizmów trawienia pozwala na zaplanowanie procesów tak, aby odwzorować pożądany kształt. Niekiedy wiąże się to z zaplanowaniem procesów towarzyszących, takich jak domieszkowanie lub osadzanie warstw pomocniczych. Jednym z takich przykładów jest trawienie warstw niezbędnych np. przy wytwarzaniu membran, czy belek drgających o grubościach rzędu kilkudziesięciu mikrometrów.



Rys. 9 Schemat efektu procesu trawienia a) izotropowego b) aniizotropowego.

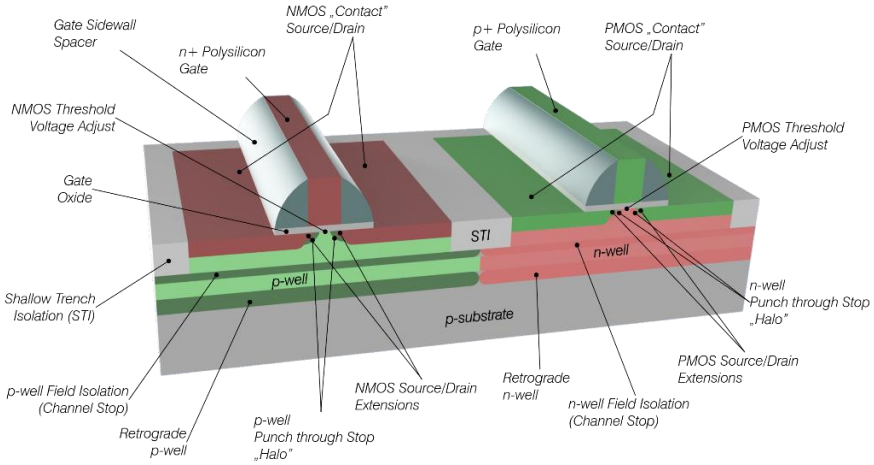


Rys. 10 Efekty reaktywnego trawienia plazmowego, submikrometrowej struktury periodycznej, w krzemie.

Modyfikacja właściwości

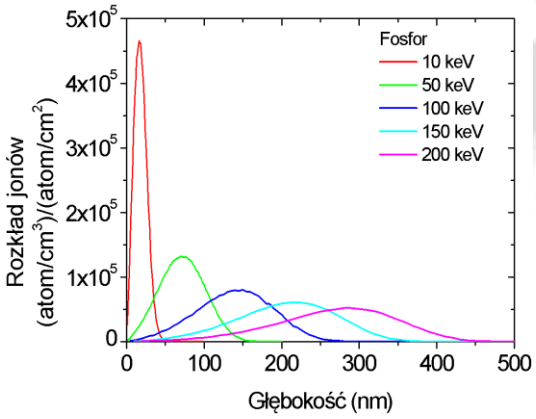
elektrycznych, optycznych, chemicznych i/lub mechanicznych warstw wytworzonych na wcześniejszym etapie jest realizowana za pomocą procesów domieszkowania, obróbki termicznej i/lub bombardowania wysokoenergetycznymi jonami. W tym zakresie istnieją możliwości zarówno porządkowania struktury krystalograficznej, poprzez jego rekrystalizację, jak i amorfizację - przez implantację jonów. Działania te można prowadzić na całej powierzchni podłoża lub jedynie lokalnie. W tym drugim przypadku konieczne jest wykorzystanie metod maskowania.

Dyfuzja wysokotemperaturowa pozwala na duży zakres zmian głębokości domieszkowania. Profile domieszek mogą sięgać w skrajnym przypadku nawet kilkudziesięciu mikrometrów. Natomiast implantacja jonów pozwala na zmianę profilu domieszek w zakresie nie przekraczającym pojedynczych mikrometrów. Domieszkowanie podłoża pozwala na zmianę rezystywności warstwy i/lub typu przewodnictwa (elektronowy lub dziurowy). Selektywne domieszkowanie pozwala m.in. na wykonanie obszarów studni, źródeł i drenów, czy modyfikację napięcia włączenia tranzystora. Dodatkowo, obszary domieszkowane charakteryzują się innymi właściwościami optycznymi np. zmienionym współczynnikiem załamania światła, mechanicznymi, czy szybkością trawienia, co znajduje liczne zastosowania praktyczne.



Rys. 11 Przykładowe zastosowania implantacji w technologii CMOS. (Dla jednoznaczności opisu – zastosowano określenia w języku angielskim.)

Implantacja jonów posiada także inne cechy szczególne: niezależną regulację głębokości maksimum rozkładu, dozy oraz kąta padania wiązki jonów na podłoże. Możliwe jest też prowadzenie implantacji do gorącego podłoża. Zakres jonów możliwych do wprowadzenia w strukturę ciała stałego podłoża jest niezwykle szeroki, od protonu - 1 AMU do 240 AMU. Odpowiednie jony można uzyskać z gazu, cieczy jak i z ciała stałego. Proces implantacji odbywa się w ultrawysokiej próżni, co zapewnia unikatowe pod względem czystości procesu warunki.



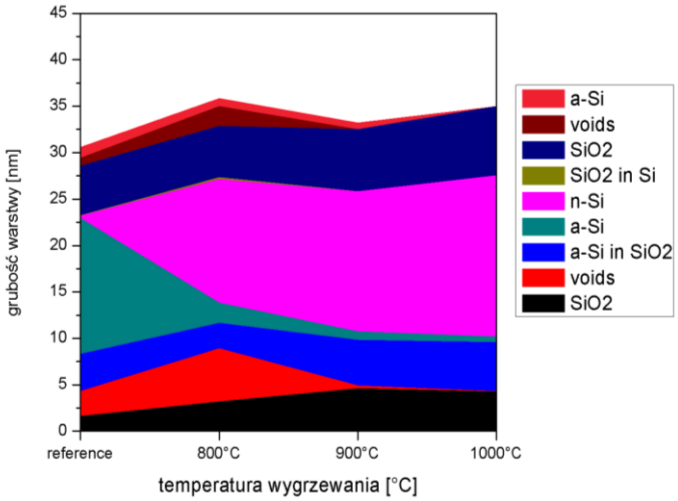
Rys. 12 Przykładowe rozkłady jonów po procesie implantacji fosforu w krzemie dla różnych energii jonów.

Bombardowanie wysokoenergetycznymi jonami może powodować amorfizację podłoża, co może być pomocne np. w realizacji izolacji struktur. Przywrócenie struktury krystalicznej podłoża jest możliwe poprzez wygrzewanie w odpowiednio wysokiej temperaturze.

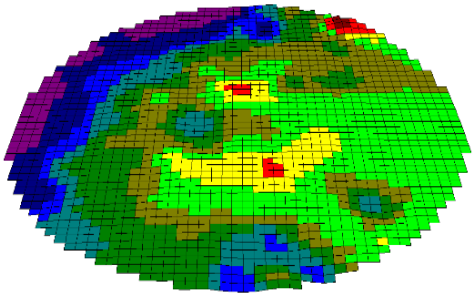
Charakteryzacja

to niezbędny w każdej technologii etap kontroli kształtu, wymiarów i właściwości wytworzonych warstw, struktur i przyrządów. Infrastruktura dostępna w CEZAMAT umożliwia precyzyjną kontrolę skutków przeprowadzonych procesów. Urządzenia dostępne w Laboratorium do tego celu, to : elipsometr spektroskopowy, mikroskop optyczny oraz skaningowe mikroskopy elektronowe.

Pomiary elipsometryczne pozwalają na wyznaczenie właściwości optycznych warstw, a dzięki temu – niezależne wyznaczenie grubości tych warstw oraz ich składu, nawet w przypadku układów wielowarstwowych. Pomiary te, z natury punktowe, mogą być przeprowadzone na dużych podłożach i zobrazowane w formie mapy rozkładu danej wielkości.

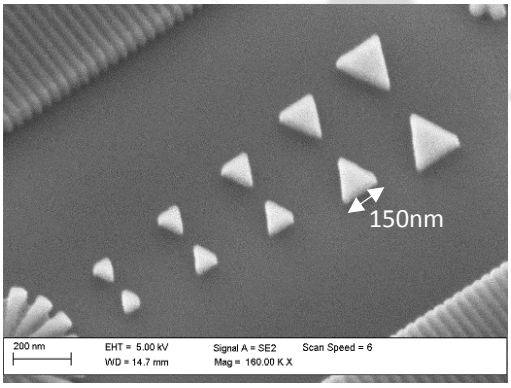


Rys. 13 Wynik analizy pomiarów elipsometrycznych przedstawiające zmiany zawartości faz w strukturze wielowarstwowej w zależności od temperatury zastosowanego wygrzewania.

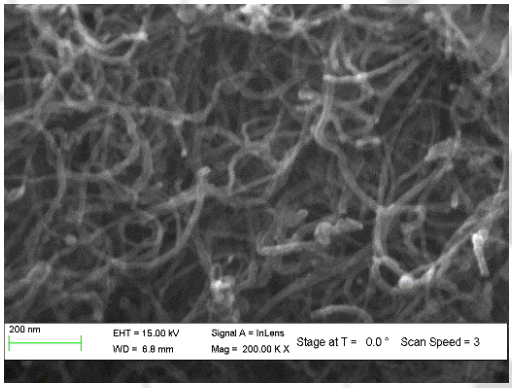


Rys. 14 Mapa grubości warstwy SiO2 na Si zmierzona przy pomocy elipsometru.

Skaningowy mikroskop elektronowy, to urządzenie które pozwala zobrazować topografię próbki w bardzo dużym powiększeniu. Dzięki maksymalnej rozdzielczości rzędu 1nm możliwe jest obrazowanie niezwykle małych struktur pod różnymi kątami i z duża dokładnością.



Rys. 15 Obraz SEM nanostruktur testowych.



Rys. 16 Obraz SEM nanorurek węglowych. Średnica nanorurek – rzędu 20nm.

CEZAMAT posiada infrastrukturę badawczą pozwalającą na prowadzenie badań na najwyższym poziomie. Dzięki unikatowej organizacji laboratoriów możliwe jest wykonanie całej serii procesów technologicznych bez konieczności opuszczania strefy czystej. Zapewnia to nie tylko optymalne i powtarzalne wyniki, ale także uwiarygadnia uzyskane rezultaty w przypadku ich dalszego wykorzystania do prac nad wdrażaniem opracowanej technologii. W przypadku prac wdrożeniowych – zapewnia to maksymalizację uzysku, który warunkuje opłacalność przyszłej produkcji.

Pracownicy CEZAMAT to wysoko wykwalifikowana kadra badaczy, którzy są specjalistami w zakresie realizacji procesów technologicznych, ale także – w ich wykorzystaniu do konstruowania różnorodnych, nawet skrajnie nietypowych elementów, przyrządów, czy układów. Niezależnie od tego, czy mają one zastosowanie w elektronice, fotonice, czy mikrosystemach.

Bezpośrednia współpraca pomiędzy naszymi pracownikami, a Klientem pozwala nam na poprawne zrozumienie badanego problemu, zdefiniowanie wynikających z tego uwarunkowań i ograniczeń oraz zrealizowanie powierzonego zadania technologicznego.

Zachęcamy do kontaktu oraz rozpoczęcia wspólnej, fascynującej drogi wdrażania Twojej unikatowej technologii we współpracy z CEZAMAT.

Centrum Zaawansowanych Materiałów i Technologii
CEZAMAT
ul. Poleczki 19
02-822 Warszawa
tel: (22) 182 12 17
e-mail: sekretariat@cezamat.eu