

---

## Rozdział 11

### Podsumowanie

W ramach realizacji rozprawy doktorskiej opracowano elementy technologii wytwarzania wysokonapięciowej diody pin na podłożach *SiC* z uwzględnieniem możliwości zastosowania rozwiązań konstrukcyjnych poszerzających tolerancję na niedokładność określenia dozy domieszki implantowanej w obszar zakończenia złącza (JTE) oraz rozwinęto metodykę międzyoperacyjnej charakteryzacji technologicznej w tym:

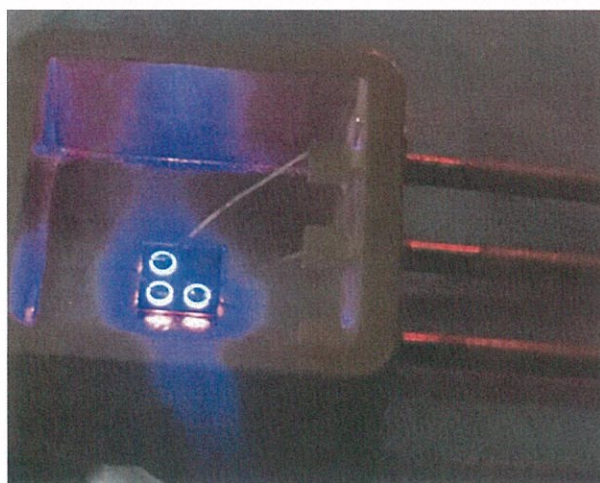
- Zamodelowano różne konstrukcje zakończenia złącza (JTE) i wykazano ich silny wpływ na zmianę szerokości okna technologicznego procesu implantacji jonów, a w efekcie na zwiększenie wartości oczekiwanego napięcia przebicia wytwarzanych diod mocy z odpowiednio wysokim uzyskiem.
- Na podstawie wykonanych symulacji procesów implantacji jonów przygotowano przewodnik do opracowania technologii procesów implantacji oraz wytwarzania masek służących selektywnej definicji obszarów JTE.
- Wykonano eksperymenty polegające na implantacji jonów i wygrzewaniu poimplantacyjnym oraz przeanalizowano dostępne metody pomiarowe służące ocenie koncentracji wprowadzonej domieszki, stopnia jej aktywacji elektrycznej oraz poddano je ocenie pod kątem tego, czy ich dokładność jest wystarczająca do prawidłowego wykonania zamierzonych procesów wytwarzania diod mocy.
- Opracowano technologię wytwarzania masek do selektywnej definicji obszarów implantowanych za pomocą jonów glinu o energii do 1000 keV.
- Oceniono wpływ technologii wytwarzania tlenków pasywnujących na skuteczność działania obszaru JTE oraz na zmianę optymalnej dozy JTE pod wpływem ładunku powierzchniowego zgromadzonego w interfejsie półprzewodnik - dielektryk.
- Zweryfikowano eksperymentalnie skuteczność opracowanej technologii wytwarzając testowe struktury diodowe o różnych konstrukcjach zakończenia złącza i różnej koncentracji domieszki w obszarze JTE.
- Wykonano demonstratory wysokonapięciowej diody mocy potwierdzające skuteczność opracowanej technologii dla klasy napięciowej 1.7 kV.

Wszystkie hipotezy badawcze postawione dla udowodnienia tezy niniejszej pracy zostały potwierdzone. Projekt trzystrefowego obszaru JTE wraz z towarzyszącymi ringami o rozmiarze krytycznym  $2 \mu\text{m}$  pozwolił wytworzyć, przy wykorzystaniu wysokoenergetycznych jonów, obszar zakończenia złącza zbliżający wytrzymałość napięciową struktur do teoretycznej wartości napięcia przebicia złącza nieograniczonego przestrzennie. Wprowadzone jony zostały z powodzeniem zaaktywowane chemicznie w procesie wygrzewania poimplantacyjnego z warstwą grafitową zapobiegającą dekompozycji *SiC*. Według opracowanej technologii wytworzono struktury o napięciu przebicia powyżej 2 kV. Maksymalna wydajność prądowa wyniosła blisko  $7 \text{ kAcm}^{-2}$ . Napięcie włączenia diod PiN 1.7 kV definiowane jako spadek napięcia przy gęstości prądu  $I_d = 100 \text{ Acm}^{-2}$  wynosiło typowo  $V_F = 3.15 \text{ V}$  i było zgodne z oczekiwaną wartością teoretyczną. Uzyskana gęstość prądu  $I_d = 1 \text{ kAcm}^{-2}$  przy typowym napięciu  $U_d = 4.15 \text{ V}$  gwarantuje wysoką wydajność prądową wytworzonych diod PiN, co pozwoliło uzyskać prąd nominalny  $I_d = 1.5 \text{ A}$  dla diod o średnicy  $d = 400 \mu\text{m}$  oraz  $I_d = 6 \text{ A}$  dla diod o średnicy  $d = 800 \mu\text{m}$ . Wyższe wartości natężenia prądu przewodzenia diody PiN w opracowanej technologii najlepiej realizować przez równoległe łączenie wytworzonych przyrządów ze względu na znaczny spadek uzysku produkcyjnego w przypadku diod o średnicy powyżej  $d = 800 \mu\text{m}$ . Statystyczny uzysk w przypadku diod PiN 1.7 kV o średnicy  $d = 800 \mu\text{m}$  wynosi około 65%, co jest wartością w pełni zadowalającą, biorąc pod uwagę fakt, że w przemyśle

przrzędów mocy SiC koszty związane z uzyskiem szacuje się na ok. 32% [156]. Uzyskiwane napięcie przebicia przekracza wartość  $V_{bd} = 2$  kV, podczas gdy typowa wartość natężenia prądu zaporowego przy napięciu  $V_d = -1.7$  kV wynosi  $I_d = -24$  nA. Uzyskana wartość prądu zaporowego jest o 2-3 rzędy wielkości niższa w porównaniu z dostępnymi na rynku diodami Schottky'ego w klasie napięciowej 1.7 kV. Pojemność diody została określona przy sygnale zmiennym o częstotliwości  $f = 1$  MHz. Dla diod o średnicy  $400 \mu\text{m}$  (typowy prąd  $I_d = 1.5$  A) przy napięciach  $U_d = 0$  oraz  $U_d = -6$  V uzyskano odpowiednio typową wartość  $C = 27$  pF i  $C = 16$  pF. W przypadku diod o średnicy  $800 \mu\text{m}$  (typowy prąd  $I_d = 6$  A) wartości te wynosiły odpowiednio  $C = 116$  pF oraz  $C = 69$  pF. W trakcie badań w ramach niniejszej pracy zostały opracowane rozwiązania, które zostały zgłoszone do Urzędu Patentowego RP w celu zastrzeżenia koncepcji, w tym: zgłoszenie wzoru użytkowego W.129339 „Uchwyt do obróbki galwanicznej”, (udział autora 100%), 2020, przyznane zastrzeżenie Ru.072613, oraz zgłoszenie patentowe P.434381, „Fotolitograficzny sposób wytwarzania kanałów w strukturach mikrofluidycznych” (udział autora 80%), 2020, przyznany patent Pat.244083.

Wyniki były prezentowane na krajowych i zagranicznych konferencjach naukowych, a część z nich została opublikowana w recenzowanych czasopismach w pracach wymienionych w dorobku autora. Wyniki prac projektu WidePower obejmujące elementy technologii opracowane w ramach niniejszej pracy zostały również docenione nagrodą zespołową JM Rektora PW w roku 2022.

W ostatnich latach następuje znaczący rozwój innych technologii bazujących na półprzewodnikach



**Rysunek 11.1** Zjawisko elektroluminescencji obserwowane w trakcie pracy diody.

szerokoprzerwowych, takich jak azotek galu (GaN), czy tlenek galu ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ). W przypadku przrzędów mocy pracujących przy relatywnie niskich napięciach do 650 V i wysokich częstotliwościach rzędu 1 MHz pierwszym wyborem stały się normalnie wyłączone tranzystory GaN/Si HEMT, również w postaci układów scalony mocy. Przy obecnym poziomie rozwoju metod wzrostu podłoży GaN, ograniczonych do średnicy 2 cali i trudnościach z uzyskaniem warstw niskodomieszkowanych oraz nieopanowanej technologii wytwarzania przrzędów, wertykalne przrzędy GaN, takie jak diody Schottky'ego, diody p-i-n oraz tranzystory mocy typu MOSFET, nie są dostępne komercyjnie. Jedyną dostępną aktualnie technologią półprzewodników szerokoprzerwowych, stanowiącą alternatywę dla klasycznych przrzędów na bazie krzemu, są i nadal będą przrzędy na bazie węglika krzemu, zwłaszcza w klasach napięciowych 1.7 kV, 3.3 kV i wyższych. Wraz z pojawieniem się wysokiej jakości płytek podłożowych SiC o średnicy 8 cali oraz powstaniem fabryk półprzewodnikowych oferujących przrzędy w technologii SiC, udział przrzędów na bazie tego materiału w całkowitym rynku przrzędów mocy będzie wzrastał dynamicznie z roku na rok. Co więcej, w związku z wdrażaniem założeń "europejskiego zielonego ładu", przewiduje się, że znacząco wzrośnie w najbliższych latach zapotrzebowanie na nowe konstrukcje energooszczędnych układów energoelektronicznych w wielu gałęziach przemysłu m.in. w przemyśle samochodowym (samochody elektryczne i stacje ładowania), ICT (komunikacja bezprzewodowa), lotniczym, odnawialnych źródeł energii (instalacje fotowoltaiczne, banki energii), kolejnictwie (przebiegacze trakcyjne), czy w

nowoczesnych sieciach typu smart-grid (transformatory półprzewodnikowe), w których znaczącą rolę pełnić będą nowe konstrukcje przyrządów półprzewodnikowych mocy, w tym przeznaczone na wysokie i ultrawysokie napięcia, do których niewątpliwie należą diody p-i-n z węgla krzemu będące przedmiotem niniejszej rozprawy. W tym kontekście naturalnym kierunkiem dalszych badań jest adaptacja opracowanej technologii do wytwarzania przyrządów na podłożach z układem warstw epitaksjalnych o większej grubości i niższej koncentracji domieszki warstwy dryftowej. Pozwoliło by to zweryfikować możliwość zastosowania opracowanej technologii do wytwarzania przyrządów w wyższej klasie napięciowej, np. 3.3 kV. Zdaniem autora jest to możliwe po niewielkich modyfikacjach i prace te powinny być rozpoczęte w najbliższej przyszłości.

