

Wpływ warunków technologicznych na morfologię powierzchni i geometrię struktur typu mesa w fotodetektorach

Marta Różycka

Streszczenie

Postęp w dziedzinie optoelektroniki, w szczególności w detekcji podczerwieni, przyczynia się do rozwoju nowoczesnych systemów obrazowania termicznego, monitorowania środowiska oraz bezpieczeństwa.

Fotodetektory podczerwieni bazujące na supersieciach II rodzaju (ang. type II superlattice, T2SL) InAs/GaSb stanowią atrakcyjną alternatywę dla konwencjonalnych detektorów na bazie HgCdTe (ang. Mercury Cadmium Telluride, MCT), oferując precyzyjne dostrajanie pasma zabronionych energii oraz większą trwałość strukturalną. Jednym z kluczowych etapów w procesie wytwarzania tych przyrządów jest formowanie struktur typu mesa, których geometria i morfologia ścian decydują o wydajności i niezawodności przyrządów.

Niniejsza rozprawa doktorska koncentruje się na zbadaniu wpływu warunków technologicznych na kształtowanie struktury typu mesa w materiałach binarnych InAs i GaSb oraz heterostrukturach supersieci II rodzaju InAs/GaSb. W badaniach wykorzystano metodę suchego trawienia jonowego (ang. Inductively Coupled Plasma - Reactive Ion Etching, ICP-RIE), analizując wpływ parametrów takich jak stosunek gazów reakcyjnych, ciśnienie w komorze reakcyjnej, temperatura podłoża oraz typ maski litograficznej (miękka/twarda) na jakość otrzymywanych struktur. Optymalizacja procesu miała na celu uzyskanie powierzchni o gładkich, niemal prostopadłych ścianach bocznych.

W ramach eksperymentu przeprowadzono charakterystykę uzyskanych struktur za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej (ang. Scanning Electron Microscope, SEM), transmisyjnej

mikroskopii elektronowej (ang. Transmission Electron Microscope, TEM), mikroskopii sił atomowych (ang. Atomic Force Microscope, AFM) oraz profilometrii optycznej.

Uzyskane wyniki pozwoliły na opracowanie i wdrożenie kompletnej, powtarzalnej technologii formowania struktur typu mesa w innowacyjnych heterostrukturach supersieci II rodzaju InAs/GaSb, co potwierdziło postawioną tezę badawczą. Po pierwsze, zoptymalizowano proces fotolitografii, wykazując, że kontakt próżniowy i prędkość wirowania 3000 obr./min dla maski miękkiej z fotorezystu pozwalają uzyskać precyzyjne odwzorowanie wzoru. Po drugie, zdefiniowano optymalne parametry trawienia dla związków binarnych, ustalając, że stosunek gazów $\text{BCl}_3:\text{Ar}$ równy 1:4 oraz ciśnienie 2 mTr zapewniają najlepszy kompromis między jakością morfologii, powtarzalnością a szybkością procesu. Finalnie, opracowano dedykowaną technologię dla heterostruktur przyrządowych, dowodząc, że zastosowanie jednoskładnikowej plazmy BCl_3 przy przepływie $7 \text{ cm}^3/\text{min}$ oraz mocy ICP/RF równej 300 W/270 W umożliwia wytworzenie struktur o gładkich i stromych ścianach bocznych, z kątem nachylenia sięgającym 81° . Potwierdzeniem skuteczności i wdrożeniowego charakteru prac było wykazanie bezpośredniego przełożenia uzyskanej morfologii na parametry użytkowe przyrządów - fotodetektory o bardziej pionowych ścianach ($\sim 81^\circ$) charakteryzowały się znacząco niższą gęstością prądu ciemnego dzięki efektywnemu ograniczeniu powierzchniowych prądów upływu.

Wyniki badań pozwoliły określić zależności między parametrami trawienia a geometrią oraz morfologią struktur typu mesa, co stanowi istotny wkład w rozwój technologii fotodetektorów opartych na supersieciach II rodzaju InAs/GaSb.

Praca ta przyczyniła się do udoskonalenia technologii wytwarzania detektorów podczerwieni nowej generacji mających zastosowanie w obszarze zarówno cywilnym jak i dla obronności kraju.

Abstract

Advances in optoelectronics, particularly in infrared detection, are contributing to the development of modern thermal imaging systems, environmental monitoring, and security applications. Infrared photodetectors based on InAs/GaSb type-II superlattices (T2SLs) present an attractive alternative to conventional Mercury Cadmium Telluride (MCT) detectors, offering precise bandgap tunability and greater structural durability. A key step in the fabrication of these devices is the formation of mesa structures, whose geometry and sidewall morphology critically determine device performance and reliability.

This doctoral dissertation focuses on investigating the influence of process parameters on the formation of mesa structures in binary InAs and GaSb materials, as well as in InAs/GaSb type-II superlattice heterostructures. The study employed the Inductively Coupled Plasma - Reactive Ion Etching (ICP-RIE) method, analyzing the impact of parameters such as the ratio of reactive gases, chamber pressure, substrate temperature, and the type of lithographic mask (soft/hard) on the quality of the resulting structures. The process optimization aimed to achieve surfaces with smooth, nearly vertical sidewalls.

The experimental work involved characterizing the obtained structures using Scanning Electron Microscopy (SEM), Transmission Electron Microscopy (TEM), Atomic Force Microscopy (AFM), and optical profilometry.

The obtained results enabled the development and implementation of a complete, reproducible technology for forming mesa structures in innovative InAs/GaSb type-II superlattice heterostructures, thereby confirming the research thesis. Firstly, the photolithography process was optimized, demonstrating that vacuum contact and a spin speed of 3000 rpm for a soft photoresist mask allow for precise pattern replication. Secondly, optimal etching parameters for the binary compounds were defined, establishing that a BCl_3 :Ar gas ratio of 1:4 and a pressure of 2 mTorr provide the best compromise between morphology quality, repeatability, and process rate. Finally, a dedicated technology for device heterostructures was developed, proving that the use of single-component BCl_3 plasma at a flow rate of 7 sccm and ICP/RF power of 300 W/270 W enables the fabrication of structures with smooth and steep sidewalls, with an inclination angle reaching 81° . The effectiveness and applicability of the work were confirmed by demonstrating a direct correlation between the achieved morphology and the devices' operational parameters - photodetectors with more vertical walls ($\sim 81^\circ$) exhibited significantly lower dark current density due to the effective suppression of surface leakage currents.

The research results established the relationships between etching parameters and the geometry/morphology of mesa structures, constituting a significant contribution to the development of photodetector technology based on InAs/GaSb type-II superlattices.

This work has contributed to the refinement of manufacturing technology for new-generation infrared detectors intended for applications in both civilian and national defense sectors.

[Recenzja prof. dr hab. Dominik Dorosz](#)

[Recenzja prof. dr hab. inż. Piotr Kisała](#)

[Recenzja prof. dr hab. inż. Janusz Mroczka](#)