

## Streszczenie

**Tytuł rozprawy:** Mechanizmy generacyjno-rekombinacyjne generowanych optycznie nadmiarowych nośników w heterostrukturach z tellurku kadmowo-rtęciowego

**Kluczowe słowa:** *detektory podczerwieni, heterostruktury HgCdTe, procesy generacyjno-rekombinacyjne, detektory barierowe, detektory z komplementarnymi barierami, czasy życia nośników ładunku elektrycznego, dyslokacje niedopasowania, stany powierzchniowe, rekombinacja powierzchniowa, pasywacja*

Głównym celem rozprawy była analiza, na podstawie przeglądu literatury, różnych mechanizmów generacyjno- rekombinacyjnych (G-R), oraz teoretyczne wyznaczenie czasów życia nośników generowanych optycznie w nierównowagowych warunkach pracy detektorów z tellurku kadmowo-rtęciowego (HgCdTe).

W pracy analizowano parametry nierównowagowych detektorów fotowoltaicznych optymalizowanych na zakres średniej podczerwieni (MWIR) wykazując możliwość osiągnięcia granicznej wykrywalności znormalizowanej (BLIP). Jest to możliwe dzięki zdławieniu generacji i rekombinacji termicznej spowodowanej przez zjawisko ekskluzji i ekstrakcji nośników ładunku po polaryzacji struktury w kierunku zaporowym. Analizując udział różnych mechanizmów G-R można zauważyć, że zjawisko ekskluzji i ekstrakcji nie wpływa na szybkość generacji zdeterminowanej procesami Shockley'a-Reada-Halla (SRH). Stąd motywacja do przeanalizowania tych procesów w ramach pracy doktorskiej. Drugim ważnym problemem jest poprawne, teoretyczne określenie czasów życia nośników ładunku w sytuacji, gdy parametry fizyczne struktury znacznie odbiegają od ich wartości w stanach bliskich równowadze termicznej. Problem ten został rozwiązany w niniejszej rozprawie. W pracach poświęconych analizie mechanizmów G-R w HgCdTe pomija się udział mechanizmów związanych z płytkimi stanami domieszkowymi. W pracy wyprowadzono wyrażenia na szybkość generacji i rekombinacji nośników nadmiarowych z udziałem donorów i akceptorów w HgCdTe. Przeprowadzono wyliczenia czasów życia nadmiarowych elektronów i dziur w materiałach stosowanych do detekcji długofalowej podczerwieni (LWIR) w szerokim zakresie domieszkowania i temperatur. Uzyskano bardzo dobrą zgodność z wynikami eksperymentalnymi dostępnymi w literaturze. Wykazano, że aby uzyskać dobre dopasowanie do wyników eksperymentalnych konieczne jest uwzględnienie procesów rekombinacji związanych z domieszkami. Obliczenia przeprowadzono dla materiałów typu p oraz n. Licząc czas życia pokazano udział poszczególnych mechanizmów w funkcji koncentracji domieszek oraz temperatury. Zrezygnowano z powszechnie stosowanego przybliżenia równości

koncentracji nadmiarowych elektronów i dziur, a zastosowano zasadę zachowania ładunku, co uzależniło wzajemnie od siebie zmiany koncentracji wszystkich cząstek posiadających ładunek elektryczny po oświetleniu struktury impulsem świetlnym. Korzystając z powyższego warunku przeprowadzono modyfikację stosowanych dotychczas modeli dyslokacji niedopasowania jako dodatkowego kanału G-R. Wyprowadzono wzory na współczynniki wychwytu nośników przez pasma dyslokacyjne uzyskując bardzo dobrą zgodność z danymi eksperymentalnymi. Obliczono gęstość dyslokacji niedopasowania w heterostrukturze HgCdTe osadzonej na podłożu z arsenku galu (GaAs). Największa gęstość dyslokacji występuje na granicy między GaAs, a warstwą buforową – z tellurku kadmu (CdTe). Mając obliczoną gęstość dyslokacji można określić szybkość procesów G-R z udziałem stanów pasma dyslokacyjnego. Aby to skutecznie wykonać konieczne było wyznaczenie funkcji rozkładu elektronów w paśmie dyslokacyjnym. W pracy pokazano, że o wartości funkcji rozkładu decyduje nie tylko energia elektryczna zgromadzona w polu elektrycznym wokół dyslokacji, ale również energia wzajemnego oddziaływania elektrycznego naładowanych linii dyslokacji. Równowagowe funkcje rozkładu wyliczono dla materiału o składzie molowym  $x=0,2$  oraz  $x=0,3$  w funkcji domieszkowania i w różnych temperaturach. Wyprowadzono również wyrażenia na szybkość rekombinacji powierzchniowej oraz określono przekroje czynne na wychwyt elektronu i dziury przez stany powierzchniowe. Zaproponowano numeryczną metodę obliczania prądów upływności powierzchniowej. Przeprowadzono pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych  $I(V)$  dla cylindrycznych fotodiod typu „mesa” o różnych średnicach, gdzie powierzchnia boczna nie była pasywowana oraz gdy była pasywowana poprzez anodyzację lub napyłanie CdTe techniką sputtering. Wyniki pomiarów świadczą o tym, że po procesie pasywacji mogą tworzyć się dyslokacje niedopasowania na powierzchni struktury, w wyniku czego parametry elektryczne detektorów ulegają pogorszeniu. Wszystkie teoretyczne rezultaty uzyskane w pracy zostały wykorzystane do modyfikacji oraz rozwoju autorskiego programu komputerowego rozwijanego przez promotora niniejszej rozprawy.

.....  
/podpis autora/

## Summary

**The title of the dissertation:** *Generation and recombination mechanisms of optically generated excess carriers in cadmium-mercury telluride heterostructures*

**Key words:** *infrared detectors, HgCdTe heterostructures, generation and recombination processes, barrier detectors, complementary barrier infrared detectors, carrier lifetime, mismatch dislocations, surface states, surface recombination, passivation*

The main aim of this dissertation was to review and analyse various generation-recombination (G-R) mechanisms to find expressions for the theoretical calculation of the lifetime of optically generated carriers under non-equilibrium operating conditions of cadmium-mercury telluride (HgCdTe) detectors.

This work analyses the parameters of non-equilibrium photovoltaic detectors optimized for the mid-infrared (MWIR) range, demonstrating the possibility of achieving limit normalized detection (BLIP). This is possible due to the suppression of generation and thermal recombination caused by the phenomenon of carriers' exclusion and extraction after the polarization of the structure in the reverse direction. When analysing the contribution of various G-R mechanisms, the phenomenon of exclusion and extraction does not affect the generation rate determined by Shockley-Read-Hall (SRH) processes. Hence the motivation to analyse these processes as part of a PhD dissertation. The second important problem is the correct theoretical determination of the charge lifetime in a situation where the physical parameters of the structure differ significantly from their values in states close to thermal equilibrium. This problem as well has been solved in this dissertation. In the commonly known G-R mechanisms described in the literature, the contribution of mechanisms related to shallow doping states is neglected. The work presents the expressions for the rate of generation and recombination of excess carriers with the participation of donors and acceptors in HgCdTe. Calculations were made of the lifetime of excess electrons and holes in materials used for long-wave infrared (LWIR) detection in a wide range of doping and temperatures. Very good compliance of calculation results was obtained with the experimental results available in the literature. It has been shown that to obtain a good fit with the experimental results, it is necessary to consider the recombination processes related to the dopants. The calculations were performed for p and n type materials. When counting the lifetime, the contribution of different mechanisms in the function of doping concentration and temperature was shown. The commonly used approximation of the equality of the concentration of excess carriers was abandoned, and the

principle of charge conservation was applied, which interdependent changes in the concentration of all particles with an electric charge after illuminating the structure with a light pulse. Using the above condition, the previously used models of mismatch dislocation as an additional G-R channel were modified. The formulas for the carrier uptake coefficients by dislocation bands were derived, obtaining a very good compliance with the experimental data. The mismatch dislocation density in the HgCdTe heterostructure on the gallium arsenide (GaAs) substrate was calculated. The highest dislocation density occurs at the border between GaAs and the buffer layer - cadmium telluride (CdTe). Having the dislocation density calculated, it is possible to determine the speed of G-R processes involving the states of the dislocation band. To prepare this effectively, it was necessary to determine the electron distribution function in the dislocation band. The work shows that the value of the distribution function is determined not only by the electric energy accumulated in the electric field around the dislocation, but also by the electric interaction energy of the charged dislocation lines. Equilibrium distribution functions were calculated for the material with molar composition  $x=0.2$  and  $x=0.3$  as a function of doping and at different temperatures. The expressions for the rate of surface recombination were also derived, and the cross-sections for electron and hole capture by surface states were determined. A numerical method of calculating surface leakage currents has been proposed. The current-voltage characteristics  $I(V)$  were measured for mesa-type cylindrical photodiodes of various diameters, where the side surface was not passivated and was passivated by anodization or CdTe sputtering. The results of the measurements show that after the passivation process, mismatch dislocations may form on the surface of the structure, because of which the electrical parameters of the detectors deteriorate. All the theoretical results obtained in the work were used to modify and develop the computer program created by the dissertation supervisor.

.....  
/ author's signature/