

# Streszczenie rozprawy doktorskiej.

Piotr Drózd

21 maja 2019

Niniejsza dysertacja opisuje badania dynamiki i rekombinacji ekscytonów w studniach kwantowych InGa<sub>0.15</sub>N/GaN hodowanych na modyfikowanych litograficznie podłożach GaN. Pierwsza część rozprawy opisuje efekt zmiany zawartości indu w warstwach InGa<sub>0.15</sub>N w zależności od kąta pochylenia płaszczyzny podłoża względem płaszczyzny *c* azotku galu. Im większy jest ów kąt pochylenia tym mniej indu wbudowuje się w taką warstwę w czasie wzrostu MOCVD. Tego typu zachowanie jest efektem zależności zawartości indu w strukturze od prędkości wzrostu. W czasie wzrostu MOCVD, prędkość wzrostu w kierunku pionowym jest stała na całej powierzchni próbki. Wytworzenie na próbce rejonów, które różnią się między sobą kątem pochylenia płaszczyzny wzrostu względem płaszczyzny *c* skutkuje różnicą poziomej składowej prędkości wzrostu pomiędzy tymi obszarami. Różnica ta jest przyczyną różnicy w zawartości indu w warstwie na różnie pochyłonych obszarach. Pierwsza część dysertacji kończy się opisem wytworzenia monolitycznych paneli diod świecących w różnej długości fali przy użyciu wyżej opisanej technologii. Jeden z owych paneli diod zmienia kolor w zakresie od zielonego do niebieskiego. Druga część niniejszej rozprawy opisuje wyniki charakterystyki opisanych warstw. Zostały w niej omówione m. in. pomiary dyfrakcji rentgenowskiej, fotoluminescencji czasowo-rozdzielczej oraz pomiary wykonanych mikroskopem sił atomowych. Zmiana zawartości indu w studni kwantowej na różnych obszarach próbki pociąga za sobą zmianę przerwy energetycznej i wbudowanego pola elektrycznego w obszarze studni kwantowej. Zmiany te skutkują emisją światła o większej energii z obszarów o większym kącie nachylenia, w których zawartość indu jest mniejsza (co pociąga za sobą szerszą przerwę energetyczną i mniejsze pole elektryczne). W niniejszej rozprawie doktorskiej został również zaproponowany model rekombinacji promienistej w potencjale z fluktuacjami. Wyniki pomiarów fotoluminescencji czasowo-rozdzielczej w funkcji temperatury zostały omówione w kontekście tego modelu, oraz dwóch innych modeli opisujących tę samą zależność. Trzecia część rozprawy opisuje obserwację efektu transportu kwazicząstek w płaszczyźnie studni kwantowej w jednym z opisanych paneli różnokolorowych diod świecących. Obecność na próbce obszarów różniących się szerokością przerwy energetycznej pozwala rozróżnić efekt transportu kwazicząstek od efektów związanych ze światłem rozproszonym. Jest to możliwe, gdyż transport kwazicząstek wygenerowanych w obszarze o węższej przerwie energetycznej jest blokowany przez granicę z obszarem sąsiadującym, w którym przerwa energetyczna jest szersza. Opisywany efekt został zbadany poprzez pomiary w funkcji napięcia przyłożonego do złącza p - n, w funkcji temperatury oraz na obszarach o różnym pochyleniu płaszczyzny wzrostu. Pomiary czasowo - rozdzielcze wykazały istnienie dwóch typów dynamiki kwazicząstek w próbce. Pierwszy typ dynamiki wiąże się z istnieniem składowej krótko żyjącej sygnali. Czas życia ekscytów odpowiedzialnych za tę składową waha się od kilku do kilkunastu nanosekund. Przy pomiarach w skali czasowej kilku mikrosekund, widoczna była składowa długo żyjąca, której czas życia wahał się od kilkuset nanosekund do dwóch mikrosekund. Pomiary profilu luminescencji w funkcji czasu wykazały, że to właśnie dynamika długo żyjąca jest odpowiedzialna za obserwowany efekt transportu. W niniejszej dysertacji zostały przedyskutowane różne hipotezy dotyczące charakteru transportowanych kwazicząstek. Pomiary w funkcji temperatury dla dwóch obserwowanych typów dynamiki zostały zinterpretowane przy użyciu wyżej wspomnianego modelu rekombinacji. Najbardziej prawdopodobną hipotezą wyjaśniającą obserwowane zjawiska jest transport długo żyjących ekscytonów spolaryzowanych.

# Summary of the PhD Thesis.

Piotr Drózd

21 maja 2019

This thesis presents the study on exciton dynamics including recombination in InGaN/GaN epitaxial structures grown on substrates with variable surface off-cut angle. Observation of thermal and spatial effects allows to determine nature and parameters of carrier transport and light emission in InGaN/GaN quantum wells. The first part of this dissertation describes the effect of off-cut angle change on the properties of InGaN layers grown by MOCVD method (and it is worth to note that most of those layers are semiconductor quantum wells similar to that used as an active region of light emitting diodes and laser diodes). The surface off-cut angle plays very important role during the epitaxial growth of InGaN thin layers. It can even determine the growth mode (step flow, step bunching or island mode). While growing InGaN alloy layers, this angle determines horizontal growth rate and since the indium incorporation depends on this horizontal growth rate, indium content in the layer also depends on off-cut angle. The bigger this angle, the higher bandgap of the quantum well. The processing procedures that allow us to obtain many regions with different misorientation angles on one substrate are described and the preparation and structures of the samples used in this work are presented. This technological part ends with description of our technology's application in making the first monolithic multicolor InGaN/GaN LED array with tuning range of 75 nm (many diodes shining from green to blue on one substrate and made in single growth process). The second part consists of characterization of our structures. The results of atomic force microscopy, photoluminescence, X - ray diffraction and current - voltage characteristics are presented. It has been found, that the wavelength of light changes mainly due to indium content change in quantum wells with off-cut angle, causing change of the internal electric field in the structure, what affects the overlap of electron and hole and thus the photoluminescence decay time. The model of radiative recombination in quantum well with local fluctuations of indium content is presented, and the results of photoluminescence measurements in different temperatures are discussed within this model. In the third part, the first observation of quasiparticles transport in plane of InGaN/GaN quantum well is described. The technology of making many regions with different off-cut angles on one wafer allows us to distinguish between the luminescence originating from quasiparticle transport and scattered light. More precisely, since the change of this angle results in the bandgap change, there is a potential step on the border between regions with different off-cut angles. The luminescence originated from transport of quasiparticles stops at this potential step, whereas scattered light can just go through such potential barrier. The results are discussed with various hypothesis. The most probable hypothesis assumes the diffusion of dipolar excitons assisted by dipole - dipole repulsion. As far as the Author knows, this is the first observation of this effect in InGaN/GaN quantum wells. Finally, I confirmed the thesis that there is an important population of delocalized particles in GaInN. The particles, excitons and charge carriers can diffuse and play important role in transport and light emission.