

Streszczenie rozprawy doktorskiej

Autor: **Paweł Holewa**

Promotorzy: **Marcin Syperek, Elizaveta Semenova**

Tytuł rozprawy: **InAs/InP quantum dots for telecom quantum photonics**

Tytuł rozprawy w j. polskim: **Kropki kwantowe InAs/InP dla fotoniki kwantowej w zakresie telekomunikacyjnym**

Nanotechnologia półprzewodnikowa jest szybko rozwijającą się gałęzią nauki i przemysłu, korzystającą z unikalnych właściwości struktur o zmniejszonej wymiarowości, takich jak kropki kwantowe. Mają one dyskretne widmo energetyczne i właściwości podobne do atomów, co jest niezbędne do stworzenia nieklasycznych źródeł światła, emitujących pojedyncze fotony na żądanie lub pary splątanych fotonów. Takie źródła światła są kluczowe dla kwantowego przetwarzania informacji opartego na fotonach, a konkretnie dla protokołów komunikacji kwantowej, które bazując na zasadach mechaniki kwantowej, zapewniają wysoce bezpieczny optyczny transfer danych, spełniający wymagania nowoczesnego społeczeństwa informacyjnego.

Sieci światłowodowe z krzemionki są kluczowe dla zapewnienia medium transmisyjnego dla sygnałów optycznych dystrybuowanych pomiędzy węzłami sieci w przemyśle telekomunikacyjnym. Pokonanie strat optycznych w światłowodzie jest konieczne do działania na poziomie pojedynczego fotonu, tak aby informacja kwantowa zakodowana w fotonie mogła być przesyłana na duże odległości przy minimalnych błędach transferu danych. Ponieważ światłowody krzemionkowe mają najniższe straty transmisyjne w zakresie trzeciego okna telekomunikacyjnego ($\sim 1.46\text{-}1.62\ \mu\text{m}$), korzystne jest dostarczenie nieklasycznych źródeł światła bazujących na kropkach kwantowych, działających w tym zakresie spektralnym.

Samorosnące kropki z InAs wzrastane epitaksjalnie na podłożu InP są jednymi z najbardziej obiecujących kandydatów na takie emitery kwantowe. Jednakże istotną wadą obecnie dostępnych nanostruktur działających w zakresie trzeciego okna telekomunikacyjnego jest brak wysokowydajnych urządzeń fonicznych, które mogłyby być wytwarzane w sposób deterministyczny. Po pierwsze, niska wydajność ekstrakcji fotonów, typowo $< 1\%$, ogranicza wydajność takich urządzeń. Po drugie, proces samoorganizacji kropek poważnie pogarsza wydajność fabrykacji, skoro miejsce nukleacji kropki jest probabilistyczne. Niniejsza praca doktorska ma na celu rozwiązanie tych problemów i zaproponowanie rozwiązań, które wyznaczą drogę do produkcji jasnych i skalowalnych urządzeń fonicznych opartych o kropki InAs/InP, które mogą spełniać standardy przemysłowe.

W pierwszej kolejności opisane zostały różne wytworzone i zbadane optycznie struktury z kropkami InAs/InP, ze szczególnym uwzględnieniem ich potencjału dla schematów kwantowego przetwarzania informacji. Następnie, opracowano i wykonano nowe hybrydowe heterostrukтуры z kropkami InAs/InP na platformie krzemowej. Struktury te są wytwarzane w technice *flip-chip* i zapewniają zwiększoną wydajność ekstrakcji fotonów dzięki obecności metalicznego lustra. Jasność kropek jest wystarczająca do obrazowania ich emisji, dostarczając informacji o ich położeniu przestrzennym. W ostatniej części skupiono się na zaprezentowaniu deterministycznego wytwarzania nanostruktur dzięki wykorzystaniu obrazowania fotoluminescencji. Za przykład posłużyły kołowe siatki Bragga, wytworzone w miejscach

nukleacji kropek. Osiągnięto rekordowe właściwości emisji kwantowej z kropek w trzecim oknie telekomunikacyjnym, a także pokazano oddziaływanie światło-materia. Zaprezentowane badania umożliwiły w szczególności:

1. otrzymanie kropek InAs/InP o dobrej jakości optycznej i niskiej gęstości powierzchniowej,
2. maksymalizację wydajności ekstrakcji emisji,
3. wprowadzenie determinizmu do technologii opartych o kropki kwantowe w trzecim oknie telekomunikacyjnym.

Wyniki badań naukowych zostały opublikowane w międzynarodowych recenzowanych czasopismach naukowych, ze szczególnym uwzględnieniem następujących zagadnień:

- Zbiory kropek o niskiej gęstości jako potencjalne źródła pojedynczych fotonów w zakresie trzeciego okna telekomunikacyjnego: P. HOLEWA *et al.*, **Physical Review B**, 101, 19 (2020), P. HOLEWA *et al.*, **Physical Review Applied**, 14, 6 (2020), P. HOLEWA *et al.*, **Nanophotonics**, 11, 8 (2022),
- Heterostruktura oparta o kropki kwantowe, z jasnymi źródłami pojedynczych fotonów: P. HOLEWA *et al.*, **ACS Photonics**, 9, 7 (2022).

Dodatkowo, jeden preprint stanowi uzupełnienie pracy doktorskiej:

- Lokalizacja optyczna kropek, deterministyczna produkcja nano-wnęk i sprzężenie kropki z wnęką: P. HOLEWA *et al.*, *Scalable quantum photonic devices emitting indistinguishable photons in the telecom C-band*, arXiv:2304.02515 (2023).

Wszystkie artykuły są podsumowane we wstępie do rozprawy, a pełne teksty artykułów są przedrukowane. Materiały uzupełniające artykuły są załączone w zależności od wkładu autora rozprawy.