

Rozwój cywilizacyjny zawsze związany był z materiałem na którym bazował człowiek rozwijając technikę. Stąd nazwy epoki kamienia czy żelaza. Współczesne czasy należało by nazwać erą fotoniki, której podstawę stanowi laser. Dzięki niemu możliwy stał się rozwój elektroniki, telekomunikacji, informatyki, medycyny czy obróbki metali. Światło laserowe wykorzystywane jest w celownikach wojskowych i w układach namierzania. Coraz powszechniejsze stają się zastosowania spektroskopowe dzięki rozwojowi nowej grupy laserów pokrywających zakres spektralny podczerwieni. Daje to możliwość detekcji śladowych ilości substancji gazowych na skutek występujących linii absorpcyjnych charakterystycznych dla danego pierwiastka, z dokładnością na poziomie rozdzielczości jednej cząstki na miliard (zakres ppb). Otwiera to nowe możliwości zastosowań w medycynie, ochronie środowiska oraz aplikacjach militarnych. Z uwagi na tak fundamentalne znaczenie w technice naszych czasów staje się koniecznością bliższe poznanie tej fascynującej grupy przyrządów.

Laser jest to emiter fali elektromagnetycznej z zakresu nadfioletu, światła widzialnego lub podczerwieni. W działaniu wykorzystuje podstawowe zjawisko fizyczne zwane emisją wymuszoną. Oprócz absorpcji (pochłaniania) mogą zachodzić również zjawiska emisji spontanicznej i wymuszonej. Emisja spontaniczna polega na emitowaniu fotonów o losowym kierunku wówczas, gdy elektron przechodzi z poziomu wzbudzonego na poziom podstawowy. Emisja wymuszona natomiast polega na wyemitowaniu fotonu o takiej samej częstotliwości, energii i polaryzacji jak foton inicjujący ten proces. Dzięki temu następuje wzmocnienie i emisja fali elektromagnetycznej o ustalonej długości. Co więcej może być ona kontrolowana poprzez parametry ośrodka czynnego, w którym ma miejsce wspomniana generacja fotonów, jak również poprzez wybór rezonatora. Dzięki niemu, na skutek emisji spontanicznej, tylko pewna część fotonów, mająca wybrany kierunek tworzy falę stojącą. Następnie na skutek emisji wymuszonej są one wzmacniane, i po przekroczeniu wartości progowej następuje akcja laserowa.

Ośrodek czynny lasera może być pompowany elektrycznie lub optycznie za pomocą promieniowania o większej energii niż emitowane. Na skutek tego procesu elektrony ze stanu podstawowego przechodzą do wzbudzonego. Odległość tych dwóch poziomów determinuje długość emitowanej fali. Aby jednak było to możliwe musimy osiągnąć inwersję obsadzeń, czyli więcej elektronów musi znajdować się w stanie wzbudzonym niż podstawowym. Można to uzyskać wprowadzając dodatkowy poziom poniżej dolnego poziomu laserowego. Dzięki temu uzyskujemy trójpoziomowy schemat emisyjny lasera, gdzie inwersja obsadzeń występuje pomiędzy górnym poziomem laserowym, a metastabilnym dolnym poziomem laserowym. Jest on praktycznie cały czas pusty, gdyż znajdujące się na nim elektrony szybko termalizują na poziom podstawowy. Należy zauważyć, że w tym układzie nie ma inwersji pomiędzy górnym poziomem laserowym, a poziomem podstawowym, na którym znajduje się większość nośników. Taki schemat emisyjny jest często wykorzystywany w laserach niezależnie od fizycznego wykonania obszaru aktywnego.

Ze względu na budowę obszaru czynnego wyróżniamy lasery gazowe, lasery na ciele stałym, barwnikowe oraz półprzewodnikowe. Te ostatnie są najbardziej perspektywiczną grupą ze względu na małe rozmiary, niezawodność i łatwość modulacji przy wysokiej gęstości emitowanej mocy. Najprostszy laser półprzewodnikowy zawiera złącze p-n otoczone warstwami falowodowymi. Na skutek przepływu prądu następuje rekombinacja par elektron-dziura, a w konsekwencji emisja fotonów. Podstawową wadą takiego rozwiązania jest jednak zależność emitowanej długości fali od użytego materiału, który charakteryzuje specyficzny układ poziomów energetycznych. Rozwiązaniem staje się zastosowanie lasera bazującego na studni kwantowej. Jest to połączenie dwóch różnych półprzewodników, z których jeden charakteryzuje się wyższymi poziomami energetycznymi (bariera) a drugi niższymi (studnia). W ten sposób tworząc studnię kwantową o możliwej do manipulacji głębokości i szerokości, otrzymuje się pewien układ poziomów energetycznych w tej studni. Staje się ona obszarem, w którym generowane są fotony.

Ze względu na zastosowania spektroskopowe w średniej podczerwieni konieczne jest zastosowanie laserów unipolarnych. W tym zakresie spektralnym główną rolę emiterów promieniowania stanowią kwantowe lasery kaskadowe. Obszar czynny stanowi struktura periodyczna studni kwantowych i barier. Odpowiednie zaprojektowanie ich grubości i składów tworzy superpozycję poziomów energetycznych, i na skutek przenikania się funkcji falowych tworzy się swoisty materiał o nowym układzie poziomów, który może być zamieniany poprzez regulację grubości i składów warstw tworzących tę supersieć. Daje to duże możliwości w projektowaniu emitowanej długości fali w zakresie jednego układu materiałów. Każdy taki segment obszaru aktywnego powtórzony jest wiele razy, i po spolaryzowaniu heterostruktury tworzy swoistą kaskadę. Elektron przechodząc przez kolejne stopnie kaskady generuje kolejne fotony, których liczba w korzystnym przypadku równa jest liczbie kaskad. Taki zabieg wpływa znacząco na zwiększenie wzmocnienia ośrodka czynnego lasera.

Kwantowe lasery kaskadowe wykonywane są za pomocą epitaksji z fazy gazowej, lub epitaksji z wiązek molekularnych. Dominujące układy materiałowe to InAlAs/InGaAs/InP oraz GaAs/AlGaAs. Ten pierwszy, chociaż odznacza się większą nieciągłością pasma przewodnictwa, co pozwala na osiągnięcie lepszych parametrów samego lasera, jest znacznie trudniejszy w prowadzeniu procesu wzrostu. Ponadto obydwa związki potrójne nie są w ogólności dopasowane do podłoża InP. Niesie to za sobą konieczność precyzyjnego utrzymania warunków wzrostu podczas długotrwałego procesu epitaksjalnego. Lasery oparte o system materiałowy GaAs/AlGaAs są stosunkowo łatwe technologicznie, poprzez obecność tylko jednego związku potrójnego, który w całym zakresie składów jest dopasowany sieciowo do podłoża GaAs. Również technologia procesowa nie różni się znacząco od laserów krawędziowych na studniach kwantowych, które bazowały na tym samym układzie materiałowym. Podstawową wadą tych laserów jest jednak mała wartość nieciągłości pasma przewodnictwa pomiędzy studnią a barierą w obszarze aktywnym. Niesie to za sobą ograniczenie możliwości emisji promieniowania do zakresu średniej podczerwieni, konieczność impulsowej pracy lasera, oraz ogranicza maksymalną temperaturę pracy do 300K. Ze wszystkich wymienionych powyżej wad tylko ta ostatnia stanowi istotną przeszkodę w komercjalizacji tych przyrządów. W wielu aplikacjach nie jest bowiem wymagana praca na fali ciągłej. W obszarze średniej podczerwieni znajduje się również wiele linii absorpcyjnych, które to mogą być wykorzystane do detekcji substancji gazowych z bardzo dobrą dokładnością.

Zwiększenie nieciągłości w paśmie przewodnictwa może być zrealizowane poprzez zwiększenie zawartości glinu w barierze, lub pogłębienie studni kwantowych. Za maksymalną dopuszczalną ilość glinu uważa się 45%. Przy wyższej jego zawartości AlGaAs wykazuje przerwę skośną, co spowoduje przejścia niepromieniste. Pogłębienie studni kwantowych może natomiast zostać zrealizowane poprzez dodanie niewielkiej ilości indu. Z obliczeń wynika, że wprowadzenie 3% indu do wszystkich studni kwantowych obszaru czynnego lasera GaAs/AlGaAs spowoduje zwiększenie odstępu pomiędzy górnym poziomem laserowym, a trójwymiarowym kontinuum stanów z 80meV do 105meV. Taka struktura została wykonana na etapie badań wstępnych, a jej maksymalna temperatura pracy wynosiła 500C, znacznie więcej niż przed zaproponowaną modyfikacją. Dalsze zwiększanie

zawartości indu wpłynie korzystnie na poprawę parametrów pasmowych. Niestety powoduje powstanie silnych naprężeń spowodowanych różnicą stałych sieci. Mogą one wpłynąć niekorzystnie zarówno na parametry lasera jak i jego czas życia. Dlatego badania pozwalające na znalezienie maksymalnej zawartości indu w studniach kwantowych obszaru czynnego w funkcji jakości struktury lasera mogą przyczynić się w sposób znaczący do zwiększenia atrakcyjności tego typu przyrządów w zastosowaniach komercyjnych. Opracowanie procesu technologicznego warunkuje znalezienie optimum pomiędzy parame-
tami pasmowymi oraz jakością krystaliczną heterostruktury. Jedynie dalsze prace technologiczne mogą przyczynić się do zaprezentowania nowych przyrządów o coraz lepszych parametrach.

Dalszy rozwój fotoniki i tematyki laserowej jest kwestią czasu. Coraz lepsze i bardziej wyrafinowane konstrukcje otwierają wciąż nowe pola zastosowań, dzięki wkraczaniu w niezbadane jak dotąd zakresy spektralne. Wydaje się że najlepszy okres era fotoniki ma jeszcze przed sobą.