

Kamil PIERŚCIŃSKI¹, Dorota PIERŚCIŃSKA¹, Grzegorz SOBCZAK¹, Janusz MIKOŁAJCZYK¹,
Kamil JANUS², Piotr GUTOWSKI², Zbigniew BIELECKI², Maciej BUGAJSKI²

Instytut Technologii Elektronowej, Zakład Fotoniki (1), Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki (2)

doi:10.15199/48.2018.09.01

Analiza właściwości laserów kaskadowych pod kątem zastosowań w systemach łączności w otwartej przestrzeni

Streszczenie. Celem pracy jest identyfikacja praktycznych możliwości zastosowania laserów kaskadowych na potrzeby laserowego systemu łączności w wolnej przestrzeni. Dodatkowo wskazane zostaną kierunki rozwoju technologii laserów kaskadowych pod kątem ich zastosowania w systemie łączności bezprzewodowej.

Abstract. The aim of the work is to discuss possibility of application of Quantum Cascade Lasers in practical realization of laser based free space communication system. Additionally, some aspects of development of technology of QC lasers will be indicated with respect to FSO systems. **Analysis of mid-IR InP-based QCLs for application in FSO system**

Słowa kluczowe: kwantowe lasery kaskadowe, laserowa łączność bezprzewodowa.

Keyword: quantum cascade lasers, laser free space communication (FSO)

Wprowadzenie

Zasadniczym celem pracy jest identyfikacja praktycznych możliwości zastosowania laserów kaskadowych na potrzeby hybrydowego systemu łączności w otwartej przestrzeni (FSO, z ang. free space optical communication), bazującego na dwóch kanałach transmisji: optycznym oraz radiowym. Dodatkowo wskazane zostaną kierunki rozwoju technologii pod kątem ich zastosowania w laserowej łączności bezprzewodowej.

Rysunek 1 pokazuje transmisję atmosfery. Widoczne są okna transmisyjne, czyli zakresy widma, w których występuje niska tłumienność promieniowania.

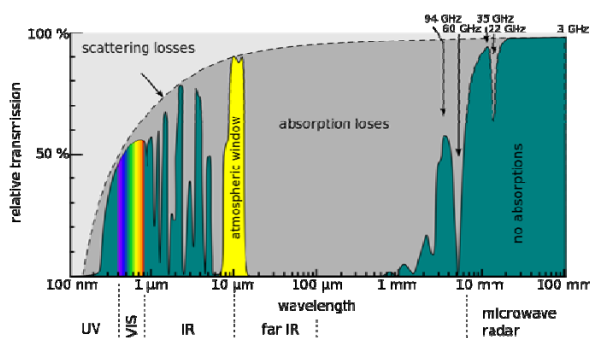
gdzie tłumienność atmosfery jest niższa. W trudnych warunkach pogodowych transmisja w tym zakresie widma będzie mniej narażona na ograniczenie przepustowości bądź dostępności w porównaniu z transmisją w innych oknach.

Stan wiedzy w dziedzinie kwantowych laserów kaskadowych jako źródeł promieniowania w zakresie średniej podczerwieni.

Koncepcja lasera kaskadowego bazuje na teoretycznym artykule opublikowanym w 1971r. przez Kazarinova i Surisa [2], gdzie zaproponowano możliwość uzyskania wzmocnienia dla przejść wewnątrzpasmowych w strukturze supersieci. Pierwszy działający laser kaskadowy pracujący impulsowo w temperaturze został zademonstrowany w 1994r. przez grupę Federico Capasso [3] z Bell Labs (USA). W następnych latach w kilku znakomitych ośrodkach badawczych rozwijano ideę laserów kaskadowych. Obecnie stały się one obiecującym i wszechstronnym źródłem laserowym w zakresie podczerwieni o licznych zastosowaniach.

Fizyka przejść optycznych w laserach kaskadowych jest zupełnie inna niż w diodach laserowych. W kwantowych laserach kaskadowych, przejście laserowe następuje pomiędzy stanami w paśmie przewodnictwa układu sprzężonych studni kwantowych. W przypadku diody laserowej, przejście laserowe zachodzi pomiędzy pasmem przewodnictwa i pasmem walencyjnym w materiale półprzewodnikowym (rys. 2).

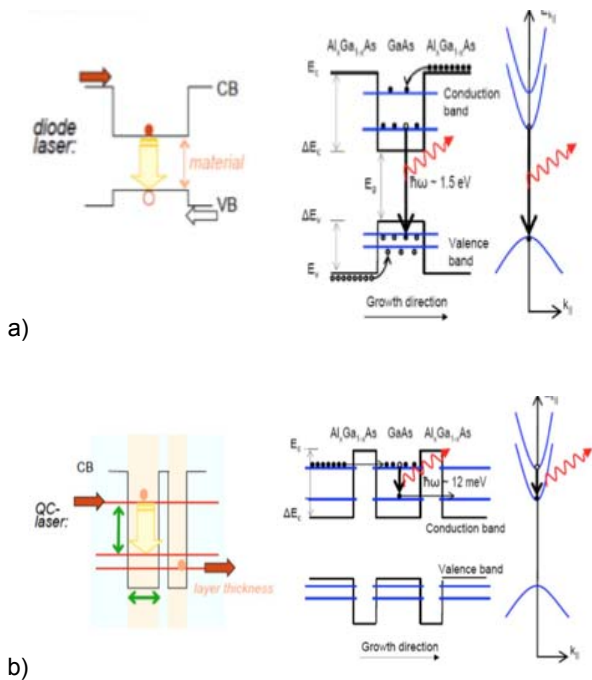
Obszar aktywny laser kaskadowego składa się z wielu powtórzeń identycznych segmentów połączonych sekcjami supersieci (iniektory). Jedną z zalet takiej konstrukcji jest fakt, iż we właściwie spolaryzowanej strukturze elektron po rozproszeniu z emisją fotonu tuneluje do następnego segmentu, gdzie po raz kolejny rozprasza się z emisją fotonu. W rezultacie jeden elektron może wygenerować kilka fotonów, znacząco zwiększając sprawność przyrządu.



Rys.1. Transmisja atmosfery w szerokim zakresie długości fal. Widoczne okna transmisyjne w zakresie widzialnym jak i w zakresie podczerwieni ok. 10 mikrometrów. Kolejne okna transmisyjne znajdują się w zakresie pokrywanym przez radary (mikrofalę). [1]

Wykorzystywane są okna w zakresie widzialnym i w bliskiej podczerwieni. Niniejsza praca dotyczy wykorzystania okna transmisyjnego znajdującego się w górnym zakresie średniej podczerwieni: ok 10 mikrometrów,

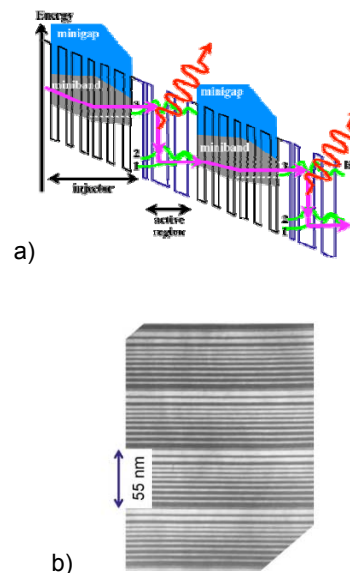
Nazwa kwantowe lasery kaskadowe pochodzi od mechanizmu tunelowania pomiędzy segmentami. Co więcej, głębokość studni i wysokość barier mogą być kontrolowane w trakcie wzrostu struktury, co umożliwia zaprojektowanie długości fali emitowanej poprzez geometrię przyrządu, i jest w niewielkim stopniu ograniczone przerwą energetyczną materiałów składowych. Dzięki precyzyjnemu projektowaniu studni kwantowych, otrzymano emisję o długości fali tak krótkiej jak 2.75 μm [4,5] jak i tak długiej jak 161 μm [6] (1.9 THz). Przyrządy emitujące długie fale wciąż wymagają chłodzenia kriogenicznego, ale uzyskano pracę w temperaturze pokojowej do długości fali rzędu 16 μm [7]. Szczególne zainteresowanie budzi zakres średniej podczerwieni (3.5-13 μm) i zakres terahercowy (2-5 THz ~ 60-150 μm).



Rys.2. Porównanie zasady działania standardowych laserów półprzewodnikowych a) oraz kwantowych laserów kaskadowych b)

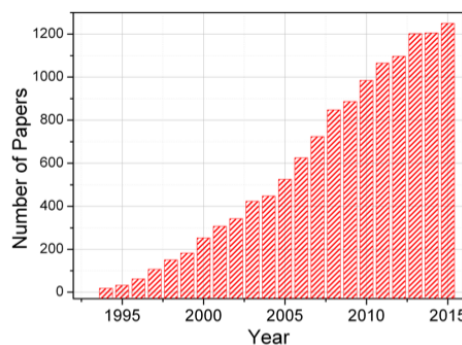
Rysunek 3a pozwala lepiej zobrazować ideę, na której oparte jest działanie lasera kaskadowego. Na rysunku przedstawiony jest typowy układ energetyczny pasma przewodnictwa dwóch segmentów lasera. Nachylenie pasma wywołane jest przez przyłożone pole elektryczne (polaryzacja struktury). Obszar aktywny, czyli układ sprzężonych studni kwantowych, charakteryzuje się trzema stanami kwantowymi, a przejście laserowe zachodzi ze stanu 3 do 2. Różnica energii pomiędzy tymi stanami jest określona przez wybór grubości dwóch szerszych studni kwantowych.

Osiągnięcie akcji laserowej, wymaga ograniczenia niepożądanego ucieczki elektronów ze stanu 3 do stanów formujących szerokie quasi-kontinuum. Można to osiągnąć poprzez wprowadzenie obszaru iniektora łączącego kolejne obszary aktywne. Iniektor jest krótką supersiecią o strukturze elektronicznej zaprojektowanej w ten sposób, aby przy energii odpowiadającej stanowi 3 nie było stanu znajdującego się w rezonansie. To zapobiega niepożądanym rozproszonym z górnego poziomu laserowego. Na rysunku 3b znajduje się również obraz struktury lasera kaskadowego uzyskany przez transmisyjną mikroskopię elektronową. Ciemne warstwy odpowiadają barierom AlInAs, a jasne – studniom kwantowym z GaInAs.



Rys.3. a) Schemat pasma przewodnictwa dwóch okresów struktury lasera kaskadowego. Każdy z okresów składa się z obszaru aktywnego (active region) i iniektora (injector). Minipasma i miniprzerywy oznaczono odpowiednio, jako miniband i minigap. Przejście laserowe odbywa się pomiędzy poziomami 3 i 2 w obszarze aktywnym. Następnie zachodzi szybka depopulacja dolnego poziomu 2 na poziom 1, który jest silnie sprzężony z minipasmami tworzącymi się w obszarze iniektora. Te minipasma transportują dalej ładunki na poziom 3 w następnym okresie. Zilustrowano również kwadrat amplitudy funkcji falowej dla trzech wspomnianych podpasem w obszarze aktywnym (kolor zielony). b) Obraz struktury lasera kaskadowego uzyskany przez transmisyjną mikroskopię elektronową. [8]

Zagadnienie laserów kaskadowych cieszy się rosnącym zainteresowaniem. Corocznie liczba prac publikowanych w temacie laserów i ich zastosowań zwiększa się. Rysunek 4 przedstawia diagram liczby prac dotyczących laserów kaskadowych opublikowanych w kolejnych latach.

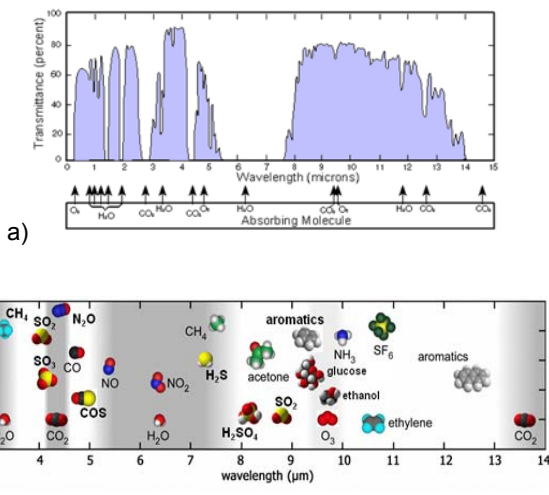


Rys.4. Liczba prac publikowanych co roku dotyczących kwantowych laserów kaskadowych. [9]

Lasery kaskadowe rozwijają się w bardzo szybkim tempie, większym od konwencjonalnych źródeł półprzewodnikowych. Tylko dwa lata trwało przejście od impulsowego lasera działającego w temperaturach kriogenicznych [10] do pracy w temperaturze pokojowej [11]. W 2001 roku zademonstrowano emisję na fali ciągłej w temperaturze pokojowej na 9.1 μm z lasera wielomodowego (Fabry-Perot) [12]. W roku 2003 zademonstrowano po raz pierwszy emisję jednomodową na fali ciągłej w temperaturze pokojowej z lasera typu DFB (distributed feedback laser) [13].

W przypadku laserów opartych na systemie materiałowym AlGaAs/GaAs obserwowano porównywalny rozwój, w którego wkład miały grupy Carlo Sirtorio z Thales [14,15] i Gottfrieda Strassera z Politechniki Wiedeńskiej [16]. Inne laboratoria europejskie rozpoczęły badania innych aspektów laserów kaskadowych. Zakres spektralny został rozszerzony do teraherców w Neuchatel, Cambridge i Pizie [17-19]. Francuscy i angielscy badacze zbadali możliwość wykorzystania systemu materiałowego bazującego na związkach antymonu, demonstrując emisję impulsową na 4.5 μm do temperatury 300K [20]. Komerjalizacja technologii rozpoczęła się w 1998 roku w Szwajcarii z chwilą założenia przez Jerome'a Faista pierwszej firmy - *Alpes Lasers*. Firma szybko stała się najważniejszym producentem laserów kaskadowych opartych na InP.

Lasery kaskadowe znalazły bardzo szybko zastosowanie w kilku dziedzinach. Zakres średniej podczerwieni jest interesujący ze względu to, że atmosfera jest częściowo przezroczysta w tym zakresie widmowym jak również wiele związków chemicznych ma tam silne linie absorpcyjne co umożliwia ich detekcję i identyfikację. Rysunek 5 przedstawia transmisję atmosfery w zakresie od światła widzialnego do średniej podczerwieni wraz z zaznaczonymi pasmami absorpcji związków chemicznych.



Rys.5. a) Transmisja atmosfery w zakresie od światła widzialnego do średniej podczerwieni wraz z zaznaczonymi głównymi pasmami absorpcji związków chemicznych. b) Graficzne przedstawienie pasm absorpcji głównych związków chemicznych

W zakresie średniej podczerwieni znajduje się kilka zakresów o znaczącej transmisji, które mogą być wykorzystane do różnych zastosowań. Lasery QC emitujące na określonych długościach fal umożliwiają komunikację w wolnej przestrzeni, zdalne obrazowanie, oświetlenie i zastosowania wojskowe (infrared countermeasures).

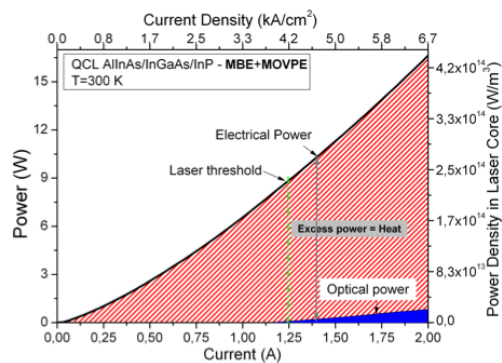
Lasery kaskadowe są bardzo pożądanymi źródłami dla wielu aplikacji, posiadając przewagę nad innymi rozwiązaniami w kwestii zakresu dostępnych długości fal, szerokiej przestrajalności [21], emisji jednomodowej [22], wysokiej mocy optycznej w temperaturze pokojowej [23,24]. Ostatnio lasery kaskadowe osiągnęły parametry pracy przekraczające wymogi nakładane przez zastosowania wojskowe i telekomunikacyjne [25]. Badania [26,27] pokazują, że lasery kaskadowe mogą być produkowane powtarzalnie z dużą jednorodnością.

Ograniczenia źródła QCL w pracy w podwyższonej temperaturze. Niezawodność.

Lasery kaskadowe, jak wszystkie źródła półprzewodnikowe, charakteryzują się silną zależnością

parametrów pracy od temperatury. Wraz ze wzrostem temperatury następuje silne ograniczenie sprawności przyrządów. Wynika ono z mechanizmów fizycznych generacji promieniowania.

Rysunek 6 prezentuje przykładowy bilans ciepła lasera kaskadowego. Jak widać, w obszarze aktywnym przyrządu występuje bardzo wysoka gęstość mocy elektrycznej, wynikająca z zasilania lasera (iloczyn prądu dostarczonego do przyrządu i spadku napięcia na przyrządzie). Z powodu stosunkowo niskiej sprawności konwersji energii znaczna część dostarczonej energii elektrycznej zamieniona zostaje w niepożądane ciepło, prowadzące do znacznego podwyższenia wewnętrznej temperatury przyrządu.



Rys.6. Bilans ciepła kwantowego lasera kaskadowego na bazie AlInAs/InGaAs/InP

Efekty temperaturowe są szczególnie wyraźne w przypadku laserów kaskadowych, których zasada działania jest fundamentalnie inna niż konwencjonalnych emiterów opartych na międzypasmowych przejściach optycznych w studniach kwantowych. Generacja promieniowania w laserze QC następuje w układzie sprzężonych studni kwantowych. W generacji promieniowania biorą udział jedynie nośniki jednego rodzaju: elektrony pasma przewodnictwa. Inwersja obsadzeń, od której zależy możliwość zajęcia akcji laserowej zależy od wypełnienia poziomów laserowych w pasmie przewodnictwa. Do pracy lasera kaskadowego niezbędne jest bardzo szybkie opróżnianie dolnego poziomu laserowego: musi ono następować w czasie krótszym niż relaksacja nośnika z górnego poziomu laserowego z emisją fotonu. Sprawność emisji zależy od inwersji populacji nośników. W podwyższonych temperaturach nośniki z łatwością zostają rozproszony do stanów pasożytniczych, gwarantujących transport w strukturze, ale nie przyczyniających się do uzyskania inwersji obsadzeń. Z powyższego rozumowania wynikają następujące implikacje dotyczące pracy w podwyższonej temperaturze:

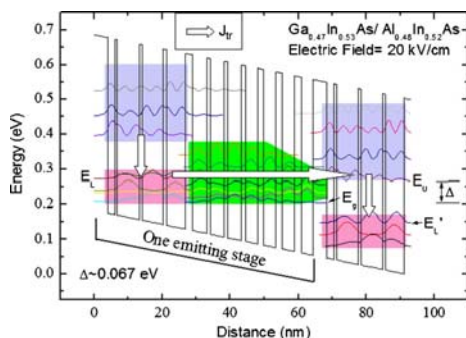
- spadek mocy emitowanej
- obniżenie sprawności konwersji energii elektrycznej na użyteczne promieniowanie (WPE – wall plug efficiency)
- podniesienie wartości prądu potrzebnego do uzyskania określonej mocy wyjściowej
- większe ryzyko uszkodzenia i awarii podzespołów

Podwyższona temperatura oznacza nie tylko podwyższoną temperaturę użytkowania lasera. Termin ten należy rozumieć jako wzrost temperatury następujący wewnątrz przyrządu w wyniku zasilania go prądem. Temperatura warstw generujących promieniowanie znacznie przekracza temperaturę stabilizacji obudowy przyrządu – mogą to być różnice dochodzące do kilkuset stopni. Zasadniczo, w pracy impulsowej, z jaką mamy do czynienia w FSO, czas trwania impulsów jest bardzo krótki,

rzędu kilkudziesięciu nanosekund. Impulsy o takim czasie trwania nie stanowią zagrożenia dla lasera, dopóki współczynnik wypełnienia (ang. duty cycle- dc) nie dąży do 100%. Dla bardzo wysokiego obciążenia (wysoki dc) mamy do czynienia ze wszystkimi wyżej opisanymi problemami. Dla długotrwałej pracy przyrządu w podwyższonej temperaturze następuje ryzyko awarii przyrządu, zwłaszcza w przypadku niedostatecznego chłodzenia systemu. Pierwszym symptomem problemów będzie stopniowe zmniejszenie emitowanej mocy dla danego prądu zasilania.

Metody zwiększenia wydajności lasera QC w podwyższonej temperaturze.

Kluczowym problemem do rozwiązania w laserach półprzewodnikowych jest zmniejszenie generacji ciepła w przyrządzie i zapewnienie właściwego chłodzenia przyrządu w trakcie pracy. Zwiększanie wydajności przyrządu jest uzyskiwane w wyniku poprawy projektu przyrządu. Optymalizacja przyrządu obejmuje zarówno konstrukcję obszaru aktywnego, jak i ilość zastosowanych periodów czy warstwy tworzące falowod (domieszkowanie i grubość). Ważne jest również zapewnienie skutecznego odprowadzania ciepła, a zatem optymalizacja montażu i wybór odpowiedniej obudowy dla lasera.



Rys.7. Schemat poziomów laserowych biorących udział w transporcie nośników i generacji światła w kwantowym laserze kaskadowym

Rysunek 7 przedstawia schemat poziomów laserowych w laserze kaskadowym. Zaznaczone zostały poziomy związane z uzyskaniem akcji laserowej. Strzałki blokowe pokazują przepływ nośników. Emisja fotonu następuje w miejscu strzałek wskazujących na dół. Dla optymalizacji lasera kaskadowego ważne jest uzyskanie w projekcie układu poziomów laserowych zapewniającego jak największą wartość parametru oznaczonego na rysunku jako Δ . Parametr ten oznacza odległość między dolnym poziomem iniektora i dolnym poziomem laserowym. Dla zbyt małej wartości Δ następuje termiczne wzbudzenie nośników z dolnego poziomu laserowego i przenoszenie ich na dolny poziom laserowy w poprzednim okresie. Powoduje to bardzo niekorzystne zjawisko zmniejszenia inwersji obsadzeni na skutek wypełnienia dolnego poziomu laserowego. Poprawę wydajności przyrządu można uzyskać projektując strukturę z uwzględnieniem jak najwyższej wartości Δ . Skutkować to będzie podniesieniem charakterystycznej temperatury T_0 określającej zależność gęstości prądu progowego od temperatury. Im wyższa wartość T_0 tym słabsza zależność gęstości prądu progowego od temperatury, oraz niższa temperatura obszaru aktywnego przy zasilaniu wysokim prądem.

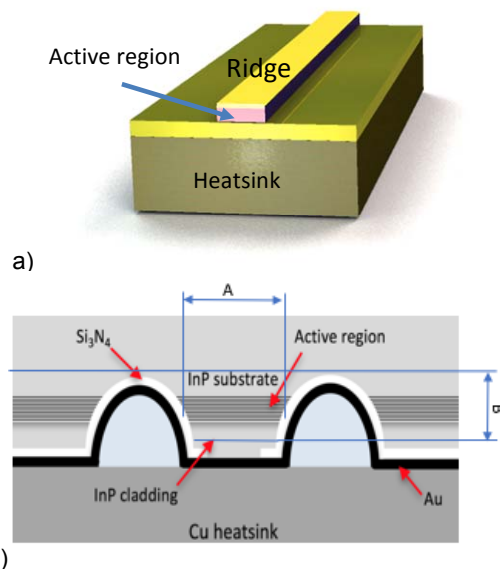
W celu zapewnienia maksymalnej wydajności przyrządu należy odpowiednio zminimalizować optyczne straty wewnętrzne, związane z wysokim poziomem domieszkowania struktury. W zakresie średniej

podczerwieni, straty związane z absorpcją fotonów przez domieszki mają decydujący wpływ na całkowity poziom strat i wartość prądu progowego w laserze. Minimalizacja strat skutkuje niższymi prądami potrzebnymi do uzyskania wysokiej mocy optycznej dzięki skutecznemu wykorzystaniu wzmocnienia.

Szybkość modulacji kwantowych laserów kaskadowych.

Unikalna konstrukcja laserów kaskadowych powoduje niespotykane własności modulacyjne. Maksymalna częstotliwość modulacji zależy od czasu życia fotonów jak również stanów laserowych. W konwencjonalnym laserze bazującym na przejściu międzypasmowym w studni kwantowej czas życia fotonu wynosi ok. 1 ns. Ponieważ transport nośników następuje w procesach tunelowych, czasy życia nośników w stanach laserowych są rzędu pikosekund. Ta własność laserów QC gwarantuje im możliwość niebywale wysokiej częstości modulacji. Zademonstrowano możliwość uzyskania modulacji na poziomie kilkudziesięciu gigahertzów. Ograniczenia prędkości modulacji leżą po stronie sterowania lasera i systemu detekcji. Jedynymi detektorami zdolnymi pracować w pasmie kilkudziesięciu gigahertzów są detektory typu Quantum Well Infrared Photodetector (QWIP) bądź Quantum Cascade Detector (QCD). Oba typy przyrządów wymagają do pracy chłodzenia kriogenicznego i z tego powodu nie mogą zostać zastosowane w systemie transmisji optycznej w wolnej przestrzeni. Niemniej jednak, zostały zaprezentowane systemy laboratoryjne zdolne do pracy w pasmie 40 GHz. [28]

Typowy laser kaskadowy zasilany przez sterownik o odpowiedniej wydajności pozwalający osiągnąć wysokie częstości powtarzania impulsów może pracować w pasmie kilkunastu MHz, wykorzystując standardowe bądź zoptymalizowane, niechłodzone (bądź chłodzone termoelektrycznie) detektory podczerwieni.



Rys.8. Schemat najczęściej wykorzystywanej geometrii lasera kaskadowego.

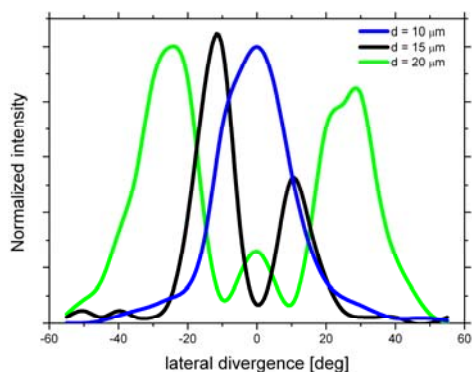
Geometria źródła promieniowania.

Rysunek 8 przedstawia schematycznie najczęściej wykorzystywaną geometrię lasera kaskadowego. Struktura laserowa umieszczona jest na podstawie (heatsink) umożliwiającej odprowadzenie ciepła, bezpieczne przeniesienie struktury i zamontowanie jej w układzie pomiarowym bądź systemie FSO. Schemat geometrii struktury laserowej pokazany jest na rysunku 8b. Rozmiary

A i B zaznaczone na rysunku 8b definiują w przybliżeniu obszar, z którego jest generowane promieniowanie. Parametr A oznacza szerokość rezonatora, która wynosi od 8 do 35 mikrometrów. Odpowiednio dobrana wartość parametru A umożliwi prowadzenie modu podstawowego TEM₀₀ w rezonatorze. Szerokości większe niż 15 mikronów nie umożliwią pracy w modzie TEM₀₀ zwłaszcza dla wyższej mocy emitowanej. W naszym przypadku zakres wartości parametru A będzie znajdował się przedziale od 8 do 12 mikrometrów. Parametr B oznacza grubość falowodu i jest zdefiniowana w czasie wzrostu struktury. Wynosi ~8-9 mikrometrów, włączając w to grubość warstw generujących promieniowanie (ok. 2 mikrometry). Parametry A i B determinują własności przestrzenne emitowanego promieniowania.

Parametry wiązki emitowanej.

Z geometrii przyrządu przedstawionej schematycznie na rysunku 8 wynikają parametry wiązki emitowanej. Lasery kaskadowe, tak jak inne lasery półprzewodnikowe, charakteryzują się dużą rozbieżnością wiązki emitowanego promieniowania. Wynika to z faktu, iż na szczeliny wyjściowej definiowanej przez parametry A i B, następuje dyfrakcja promieniowania opuszczającego wnękę laserową. Rysunek 9 pokazuje zmierzone rozkłady promieniowania w polu dalekim laserów kaskadowych o różnych szerokościach paska (na rysunku oznaczone jako d).



Rys.9. Przykładowe, zmierzone rozkłady promieniowania w polu dalekim promieniowania generowanego przez laser kaskadowy – przekrój w płaszczyźnie złącza

Parametr A wpływa znacząco na rozkład pola optycznego w płaszczyźnie złącza. Dla dużych wartości A następuje znaczne poszerzenie przekroju emitowanego pola optycznego. Skutkuje to znaczną komplikacją w uzyskaniu wiązki o dobrych parametrach, a co za tym idzie trudną do kolimacji i prowadzenia na duże odległości. Optymalny zakres szerokości leży w granicach 8-12 mikrometrów (dla laserów emitujących promieniowanie o długości fali ~9 mikrometrów). W tym zakresie rozkład wiązki emitowana nie wykazuje wielokrotnych maksimów w polu dalekim.

Wytwarzanie kwantowych laserów kaskadowych.

Struktury laserowe wytwarzane są z zastosowaniem technologii epitaksji z wiązek molekularnych (Molecular Beam Epitaxy, MBE) w urządzeniu Riber Compact 21T (Rys.10), używając stałych źródeł pierwiastkowych (Solid Sources, SS). Wiązki molekularne pierwiastków grupy III generowane będą ze standardowych komórek efuzyjnych ABN 80 DF (Double Filament), z zastosowaniem ultraczystych metali. Heterostruktury osadzone są na podłożach InP. Procesy epitaksji wykonywane są automatycznie, z zastosowaniem procedur komputerowych, w ramach których profile temperatur komórek efuzyjnych oraz podłoża realizowane będą za pomocą systemu

termopar i kontrolerów Eurotherm. Czystość środowiska epitaksji kontrolowana jest za pomocą spektrometru masowego oraz próżniomierza jonizacyjnego Bayarda-Alperta.



Rys.10. Reaktor epitaksyjny MBE, Riber Compact 21T oraz clean-room klasy 100, specjalizujący się w procesingu struktur półprzewodnikowych związków A^{III}B^V

Zasada działania lasera kaskadowego nakłada na heterostruktury epitaksjalne oraz na technologię ich wykonania ściśle wymogi precyzji. Odnoszą się one zarówno do dokładności realizacji założonej konstrukcji i co za tym idzie jednorodności struktury w obszarze płytki epitaksjalnej, jak również do powtarzalności technologii osadzania za proces na proces. Krytyczna dla działania lasera, ze względu na konieczność uzyskania wymaganych czasów życia i prawdopodobieństwa przejść, jest wysoka zgodność geometrii obszaru aktywnego z teoretycznymi założeniami konstrukcyjnymi. Geometrię tę determinują grubości i składy warstw. To zagadnienie technologiczne jest dodatkowo komplikowane przez fakt, iż liczba docelowo identycznych periodów (modułów) tworzących obszar aktywny jest znaczna, zazwyczaj rzędu 10-100. Wszystkie te czynniki czynią technologię wytwarzania laserów QCL bardzo skomplikowaną.

Proces wytworzenia struktury laserowej z gotowego materiału półprzewodnikowego (heterostruktury) polega na zdefiniowaniu fotolitograficznym wzorów odpowiadających geometrii przyrządu i kolejnym procesem trawienia i osadzania. Do wykonania izolacji elektrycznej stosuje się Si₃N₄ (bądź SiO₂), w którego warstwie otwierane są następnie „okna” dla metalizacji. Ostatnim etapem wykonania przyrządu jest nałożenie metalizacji i galwaniczne osadzenie pogrubionej warstwy złota. Całość procesu jest bardzo skomplikowana i pracochłonna: w sumie należy wykonać ponad 30 operacji technologicznych. Jednak wieloletnie doświadczenie technologiczne i pomiarowe jakie posiada zespół Zakładu Fotoniki Instytutu Technologii Elektronowej w pracy nad laserami półprzewodnikowymi, pozwala skutecznie pokonywać trudności jakie niesie za sobą technologia, wytwarzanie, charakteryzacja i optymalizacja laserów kaskadowych.

Architektura kwantowych laserów kaskadowych przeznaczonych do zastosowania w łączy optycznym.

Technologia wytwarzania laserów kaskadowych przewyższa swoją złożonością wszystkie dotychczasowe technologie laserów półprzewodnikowych. Wymagania na konkretne parametry pracy związane z zastosowaniem laserów w hybrydowym łączy otwartej przestrzeni, dodatkowo komplikuje wytwarzanie tych laserów (technologią wytwarzania MBE i processing), dlatego niezbędna jest optymalizacja parametrów laserów kaskadowych na szczególne potrzeby aplikacyjne-zastosowanie w hybrydowym łączy otwartej przestrzeni.

Realizowane prace poświęcone były analizie technologii wytwarzania i charakterystyce laserów QCL przeznaczonych do zastosowania w komunikacji na otwartej przestrzeni.

Zastosowanie to nakłada na wytwarzane lasery określone parametry:

- pasmo emisji 9-10 μm , ze względu na tzw. okno atmosferyczne umożliwiające zdalną obserwację i wykrywanie sygnałów
- stabilna praca na zadanej mocy średniej i współczynniku wypełnienia
- niezawodność, długi czas życia przyrządu.

Uzyskane lasery będą charakteryzowały się wysokim potencjałem aplikacyjnym w łączy optycznym.

Zastosowano w łączy optycznym lasery emitujące w zakresie 9-10 μm wytworzone w Instytucie Technologii Elektronowej. Konstrukcja i zasada działania laserów kaskadowych, których wykorzystanie jest przewidziane w łączy optycznym, omówione zostaną na przykładzie laserów $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ ($\lambda = 9.4\mu\text{m}$), wytwarzanych w ITE. Obszar aktywny tych laserów składa się z 30 modułów, a każdy z nich zbudowany jest z 4 sprzężonych kwantowych studni potencjału $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlInAs}$.

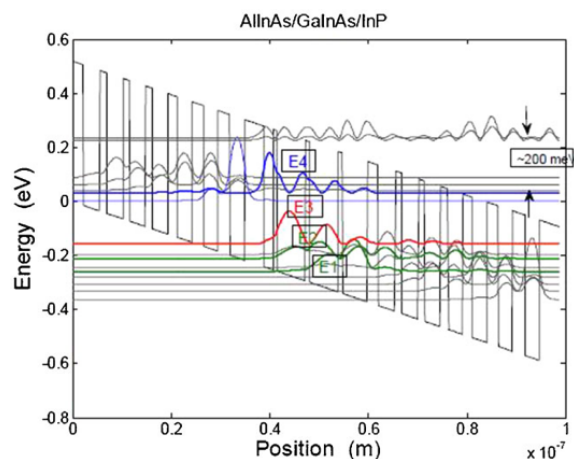
Tabela 1. Schematyczny układ warstw kwantowego lasera kaskadowego z $\text{AlInAs}/\text{InGaAs}/\text{InP}$

	Thickness	Material	Doping
Upper Waveguide	500nm	InP	$n=8e18\text{cm}^{-3}$
	1.5 μm	InP	$n=1e17\text{cm}^{-3}$
	1.5 μm	InP	$n=4e16\text{cm}^{-3}$
Active Region	500nm	InGaAs	$n=4e16\text{cm}^{-3}$
	30 x $\text{AlInAs}/\text{InGaAs}$		
	500 nm	InGaAs	$n=4e16\text{cm}^{-3}$
Lower Waveguide	1.5 μm	InP	$n=4e16\text{cm}^{-3}$
	1.5 μm	InP	$n=1e17\text{cm}^{-3}$
	500 μm substrate	InP	$n=2e17\text{cm}^{-3}$

Schematyczny układ warstw kwantowego lasera kaskadowego z $\text{AlInAs}/\text{InGaAs}/\text{InP}$ przedstawiony jest w Tabeli 1. Struktura przedstawiona w tabeli jest jedną z konstrukcji opracowanych w ITE i została wykonana we współpracy z Wydziałem Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej. Warstwy aktywne lasera zostały wykonane w ITE przy użyciu techniki MBE, warstwy falowodowe InP zostały wykonane metodą LP-MOVPE w WEMiF).

Struktura pasmowa modułu lasera przedstawiona jest na rysunku 11. Przejścia laserowe zachodzą pomiędzy stanem E_3 i stanem E_2 i mają charakter diagonalny (tzn. prócz relaksacji w skali energii ma miejsce przemieszczenie gęstości ładunku elektronowego w przestrzeni rzeczywistej). Elektrony z dolnego poziomu laserowego usuwane są w wyniku rozproszenia z udziałem podłużnego fononu optycznego LO^+ na poziom E_1 . Inwersja obsadzeń zachodzi pomiędzy poziomami E_3 i E_2 . Warunkiem

uzyskania inwersji obsadzeń jest odpowiednio długi czas życia nośników na poziomie E_3 i efektywna depopulacja poziomu E_2 .



Rys.11. Krawędź pasma przewodnictwa i funkcje falowe w segmencie injektor/obszar aktywny/injektor dla lasera typu $\text{AlInAs}/\text{InGaAs}/\text{InP}$ dla pola elektrycznego 50 kV/cm. Przejście laserowe zachodzi pomiędzy poziomami oznaczonymi E_4 i E_3

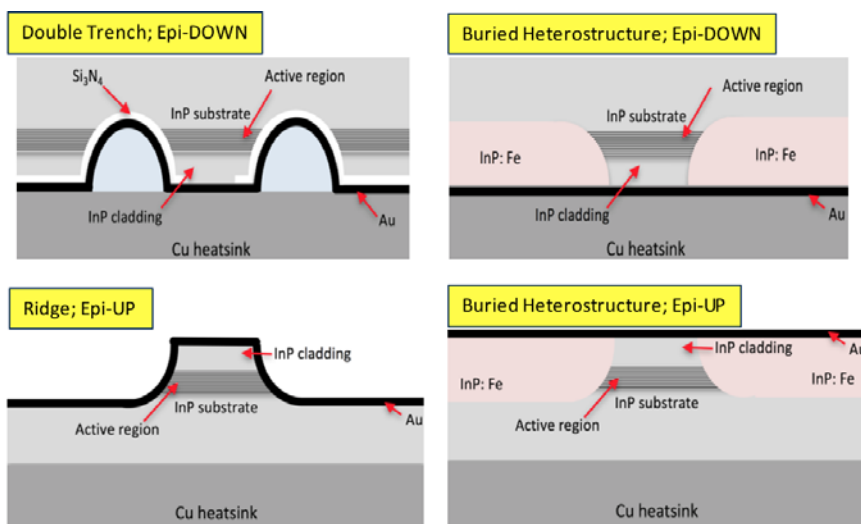
Zasada działania lasera kaskadowego nakłada na heterostruktury epitaksjalne oraz na technologię ich wykonania ściśle wymogi precyzji. Dodatkowo każdy uzyskany przyrząd charakteryzuje się unikalnymi parametrami, innymi słowy powtarzalność w technologii wytwarzania laserów QCL jest bardzo trudna bowiem wpływa na nią wiele czynników, technologia wzrostu MBE, technologia poszczególnych etapów processingu – montażu. Uzyskanie lasera (zakup z jednej z zagranicznych firm komercyjnych) o konkretnych parametrach aplikacyjnych jest procesem czasochłonnym i wymagającym dużych nakładów finansowych.

Istnieje kilka rodzajów geometrii laserów, które mogą być wykorzystane w konstrukcji systemu FSO. Są one przedstawione na rysunku 12. Różnią się one od siebie skutecznością odprowadzenia ciepła jak również stopniem skomplikowania etapu wzrostu i wytwarzania struktury. Rozważa się wykorzystanie konstrukcji typu „double trench” w wersji „epi-layer down”. Oznacza to strukturę o geometrii opartej o dwa kanały, zmontowaną warstwami epitaksjalnymi do dołu. Tego typu montaż zapewnia efektywne odprowadzenie ciepła ze struktury laserowej.

W niektórych przypadkach dla poprawy odprowadzenia ciepła ze struktury, pomiędzy chipem laserowym a chłodnicą stosuje się przekładkę diamentową.

Celem prowadzonych prac była analiza wytworzenia zoptymalizowanego lasera dedykowanego pod konkretne zastosowanie w łączy optycznym. Dzięki silnemu sprzężeniu posiadanej w ITE technologii wytwarzania (technologia epitaksji MBE i technologii processingu) z wielopłaszczyznową charakterystyką (elektryczną, optyczną, spektralną, termiczną), popartą analizą numeryczną wytwarzane są lasery QCL spełniające konkretne wymogi zastosowania w łączy optycznym. Fakt posiadania opracowanej technologii w kraju wpłynie dodatkowo na skrócenie czasu dostarczenia – wytworzenia lasera QCL i znacznie obniży jego koszty.

Prowadzona analiza zjawisk fizycznych zachodzących w laserach QCL (zarówno teoretyczna jak i eksperymentalna) pozwala na ich bardzo dokładną, nie tylko jakościową, ale przede wszystkim ilościową analizę, której wyniki będą mogły być bezpośrednio stosowane w optymalizacji łączy optycznych.



Rys.12. Możliwe geometrie montażu struktury laserowej

Opracowane w ITE lasery kaskadowe są w pełni porównywalne z przyrządami wytwarzanymi w wiodących laboratoriach światowych. [4]

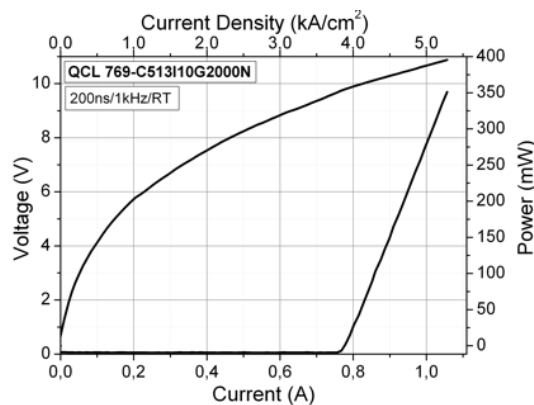
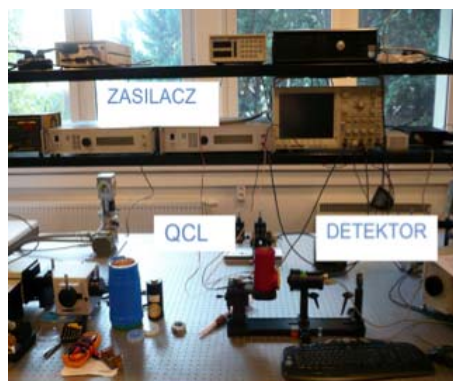
Przykładowe charakterystyki kwantowych laserów kaskadowych ITE

Charakteryzacja wytwarzanych laserów kaskadowych (QCL) ma podstawowe znaczenie dla optymalizacji technologii MBE wytwarzania i processingu struktur. Wykonane zostały pomiary charakterystyk moc optyczna w funkcji prądu ($P - I$) oraz charakterystyk prądowo-napięciowych ($I-V$). Pomiary charakterystyk spektralnych wykonywane będą przy wykorzystaniu spektrometru Fourierskiego NICOLET 8700, wyposażonego w beamsplitter KBr i detektor MCT chłodzony ciekłym azotem.

Charakteryzacja elektrooptyczna zmontowanych laserów kaskadowych obejmuje, w pierwszym rzędzie pomiary charakterystyk L-I-V w funkcji temperatury. Pomiary te pozwalają wyznaczyć prąd progowy lasera QCL, temperaturę charakterystyczną T_0 , maksymalną temperaturę pracy, zakres emitowanych mocy i określić warunki krytyczne zasilania lasera. Rysunek 13 przedstawia, zdjęcie układu do pomiaru charakterystyk L-I-V.

Charakterystyki przedstawione na rysunku 13 były zmierzone dla laserów pracujących w trybie impulsowym: długość impulsu $\tau=200\text{ns}$, częstotliwość repetycji PRF=1kHz, współczynnik wypełnienia dc=0.02%. Uzyskane wyniki pozwoliły wyznaczyć kluczowe parametry pracy laserów. Tabela 2 przedstawia parametry laserów kaskadowych wytwarzanych obecnie w ITE.

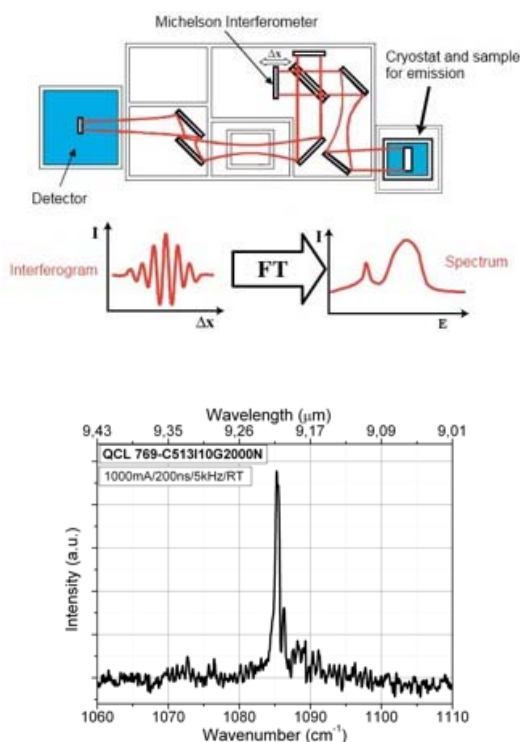
Kolejnym etapem charakteryzacji elektrooptycznej są pomiary charakterystyk spektralnych, wykonywane przy wykorzystaniu spektrometru Fourierskiego. Rysunek 14 przedstawia zdjęcie spektrometru wraz z przykładowymi charakterystykami spektralnymi lasera QCL, zmierzonymi dla lasera pracującego w trybie impulsowym (długości impulsu $\lambda =50\text{ns}-250\text{ns}$) dla prądu $I=2.4\text{ A}$, i częstotliwości $f =5\text{kHz}$.



Rys.13. Zdjęcie układu do pomiaru charakterystyk L-I-V, oraz przykładowe charakterystyki: moc optyczna w funkcji prądu ($L - I$) oraz przykładowe charakterystyki prądowo-napięciowe ($I-V$) zmierzone temperaturze pokojowej

Tabela 2. Parametry laserów kaskadowych wytwarzanych obecnie w ITE

Parametr	Symbol	Jednostka	Min.	Typowa	Max.
Temperatura pracy	T	$^{\circ}\text{C}$		20	40
Długość emitowanej fali	λ	nm		$\sim 9200\text{nm}$	
Prąd zasilania	I	mA	800	1000	1200
Napięcie	V	V	9	10	11
Moc optyczna	P	mW		$\sim 280\text{mW (1A)}$	



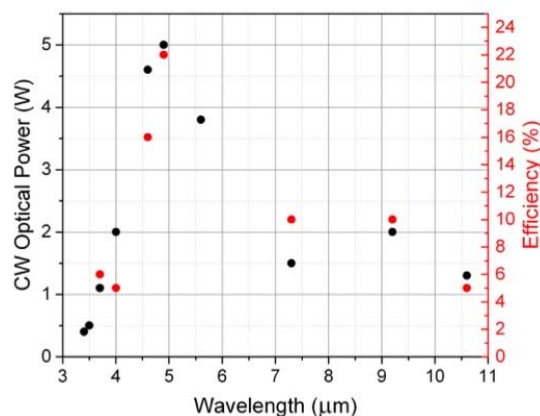
Rys.14. Zdjęcie oraz schemat spektrometru Fourierowskiego NICOLET 8700, przykładowa charakterystyka spektralne lasera QCL

Kompleksowa elektrooptyczna charakteryzacja laserów QCL rozszerzona o analizę termiczną i pomiar czasu życia, jest niezmiernie istotna w procesie optymalizacji technologii wzrostu, procesingu jak i projektowania termicznego struktur w kierunku uzyskania przyrządów charakteryzujących się stabilną pracą o zadanej mocy średniej, współczynnikiem wypełnienia i długości fali. Uzyskane w wyniku pomiarów parametry są kluczowe i niezbędne w procesie optymalizacji laserów QCL przeznaczonych do aplikacji w łączy optycznym.

Kwantowe lasery kaskadowe na zakres MID-IR

Lasery kaskadowe emitujące w zakresie średniej podczerwieni osiągnęły wysoki stopień rozwoju i przydatności do zastosowania w układach transmisji. Rekordowe przyrządy, uzyskują sprawności rzędu 20% dla pracy w trybie CW i prawie 30% dla pracy w trybie impulsowym. Zakres mid-IR zwyczajowo dzieli się na dwa pasma: pierwsze z nich obejmuje 4-6 mikronów, drugie zaś 8-12 mikronów. Uzyskiwane wydajności jak i maksymalne moce optyczne różnią się w zależności od długości fali. Najlepsze rezultaty osiągnięte są dla zakresu obejmującego krótsze fale. Rysunek 17 przedstawia zestawienie opublikowanych najwyższych mocy optycznych w funkcji

długości fali, dla pracy na fali ciągłej w temperaturze pokojowej. Rekordowo wysoka moc 5 W została zaprezentowana dla długości fali 4.9 mikrona [35], przy jednocześnie najwyższej sprawności 21%. W zakresie znajdującym zastosowanie w konstrukcji łączy optycznego, a zatem pomiędzy 8 a 12 mikronów, osiągnięte moce optyczne nie są już tak wysokie. Rekordowy wynik wynosi nieco powyżej 1 W (CW, RT) dla 10.7 mikrona, przy sprawności ~5%. Pogorszenie wyników dla dłuższych długości fali wynika z zasady działania lasera, jak również własności materiałowych. Główną przeszkodą w osiągnięciu wysokiej wydajności jest obniżenie poziomu strat falowodowych w przyrządzie. Absorpcja na swobodnych nośnikach, będąca głównym mechanizmem strat w laserze kaskadowym, rośnie w przybliżeniu z kwadratem długości fali.



Rys.17. Najwyższe opublikowane moce optyczne laserów kaskadowych dla pracy CW w temperaturze pokojowej w funkcji długości fali emisji. Czerwone punkty oznaczają sprawność przyrządów. [35]

Możliwe jest osiągnięcie bardzo wysokich mocy optycznych z laserów o szerokim pasce. W takim przypadku, szerokość paska wynosi np. 400 mikronów [36]. Jest to ~50 razy szerszy pasek niż w przypadku przyrządów prezentowanych na rysunku 17. Zwiększenie objętości czynnej lasera, pociąga za sobą liniowy wzrost gęstości prądu progowego. Dla omawianego przyrządu uzyskano moc optyczną w impulsie w temperaturze pokojowej wynoszącą 116 W (4.5 mikrona). Prąd progowy wynosił ok 23 A. Niestety, taka konstrukcja przyrządu uniemożliwia zastosowanie go w FSO. Laser emitował promieniowanie o rozkładzie w polu dalekim, znacznie odbiegające od modu TEM₀₀. Dwa piki pojawiające się w polu dalekim były oddzielone o prawie 80 stopni (w płaszczyźnie złącza).

Przydatność laserów kaskadowych do zastosowania w łączy optycznym jest potwierdzona aktywnym rozwojem tej tematyki w kilku ośrodkach badawczych na świecie. Ostatnio zaprezentowany został laboratoryjny system typu FSO, bazujący na laserze kaskadowym emitującym w zakresie 4.65 mikrona. Osiągnięto przepustowość systemu na poziomie 3 Gbit/s. [37]

Autorzy: dr inż. Kamil Pierściński, Instytut Technologii Elektronowej, Zakład Fotoniki, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa; dr inż. Dorota Pierścińska, Instytut Technologii Elektronowej, Zakład Fotoniki, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa; dr inż. Grzegorz Sobczak, Instytut Technologii Elektronowej, Zakład Fotoniki, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa; dr inż. Janusz Mikołajczyk, Instytut Technologii Elektronowej, Zakład Fotoniki, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa; mgr inż. Kamil Janus, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki, ul. Gen. Witolda Urbanowicza 2 00-908 Warszawa; dr inż. Piotr Gutowski, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki, ul. Gen. Witolda Urbanowicza

LITERATURA

- [1] <https://commons.wikimedia.org>
- [2] R.F. Kazarinov und R.A. Suris: Possibility of the Amplification of Electromagnetic Waves in a Semiconductor with a Superlattice, *Sov.Phys. Semicond* 5(4), 707 (1971)
- [3] J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, and A. Y. Cho, Quantum cascade laser, *Science* 264, 553 (1994)
- [4] J. Devenson, O. Cathabard, A.N.Baranov, InAs/AlSb quantum cascade lasers emitting at 2.75-2.95 μm , *Appl. Phys. Lett.*, 91, 251102 (2007)
- [5] J. Devenson, R. Teissier, A.N. Baranov, InAs/AlSb quantum cascade lasers emitting below 3 μm , *Appl. Phys. Lett.*, 90, 111118 (2009)
- [6] S. Kumar, B.S.Williams, Q.Hu, J.L. Reno, 1.9 THz quantum-cascade lasers with one-well injector, *Appl. Phys. Lett.*, 88, 121123 (2006)
- [7] M. Rochat, D. Hofstetter, M. Beck, and J. Faist, Long-wavelength ($\lambda \approx 16 \mu\text{m}$), room-temperature, single frequency quantum-cascade lasers based on a bound-to-continuum transition, *Appl. Phys. Lett.*, 79, 142548 (2001)
- [8] Federico Capasso: High-performance midinfrared quantum cascade lasers, *Optical Engineering* 49(11), 111102, (2010)
- [9] <https://webofknowledge.com/>
- [10] S. Forget, C. Faugeras, J.Y. Bengloan, M. Calligaro, O. Parillaud, M. Giovannini, J. Faist and C. Sirtori High-power spatial single mode quantum cascade lasers at 8.9 mm, *Electron. Lett.* 41(7), 432(2005)
- [11] J. Faist, F. Capasso, C. Sirtori, D.L. Sivco, J.N. Baillargeon, A.L. Hutchinson, S.N.G. Chu, A.Y. Cho, High power mid-infrared ($\lambda \approx 5 \mu\text{m}$) quantum cascade lasers operating above room temperature, *Appl. Phys. Lett.* 68, 3680 (1996)
- [12] M. Beck, D. Hofstetter, T. Aellen, J. Faist, U. Oesterle, M. Ilgms, E. Gini, and H. Melchior, Continuous-wave operation of a mid-infrared semiconductor laser at room temperature, *Science*, 295, 301 (2002)
- [13] T. Aellen, S. Blaser, M. Beck, D. Hofstetter, J. Faist, E. Gini, Continuous-wave distributed feedback quantum cascade lasers on a Peltier cooler, *Appl. Phys. Lett.*, 83, 1929 (2003)
- [14] C. Sirtori, P. Kruck, S. Barbieri, P. Collot, J. Nagle, M. Beck, J. Faist und U. Oesterle, GaAs/Alx Ga1-x As quantum cascade lasers, *Appl. Phys. Lett.* 73, 3486 (1998)
- [15] H. Page, C. Becker, A. Robertson, G. Glastre, V. Ortiz und C. Sirtori, 300 K operation of a GaAs-based quantum cascade laser at $\lambda \approx 9 \mu\text{m}$, *Appl. Phys. Lett.* 78 (22), 3529 (2001)
- [16] S. Anders, W. Schrenk, E. Gornik, G. Strasser Room-temperature emission of GaAs/AlGaAs superlattice quantum cascade lasers at 12.6 μm , *Appl. Phys. Lett.* 80, 1864 (2002)
- [17] G. Scalari, L. Ajili, J. Faist, H. Beere, E. Linfield, D. Ritchie, G. Davies, Far-infrared ($\lambda \approx 87 \mu\text{m}$) bound-to continuum quantum-cascade lasers operating up to 90 K, *Appl. Phys. Lett.* 82, 3165 (2003)
- [18] L. Ajili, G. Scalari, J. Faist, H. Beere, E. Linfield, D. Ritchie, G. Davies, High power quantum cascade lasers operating at $\lambda \approx 8.7$ and 130 μm , *Appl. Phys. Lett.* 85, 3986 (2004)
- [19] R. Khler, A. Tredicucci, F. Beltram, H. Beere, E.H. Linfield, A. G. Davies, D.A. Ritchie, Low threshold quantum cascade lasers at 3.5 THz ($\lambda \approx 87 \mu\text{m}$), *Optics Lett.* 28, 810 (2003)
- [20] R. Teissier, D. Barate, A. Vicet, C. Alibert, A. N. Baranov, X. Marcadet, C. Renard, M. Garcia, C. Sirtori, D. Revinund, J. Cockburn, Room temperature operation of InAs/AlSb quantum cascade lasers, *Appl. Phys. Lett.*, 85, 167 (2004)
- [21] Benjamin G. Lee, Mikhail A. Belkin, Ross Audet, Jim MacArthur, Laurent Diehl, Christian Pflügl, and Federico Capasso, Widely tunable single-mode quantum cascade laser source for mid-infrared spectroscopy *Appl. Phys. Lett.*, 91, 231101(2007)
- [22] S. Forget, C. Faugeras, J.Y. Bengloan, M. Calligaro, O. Parillaud, M. Giovannini, J. Faist and C. Sirtori High-power spatial single mode quantum cascade lasers at 8.9 mm, *Electron. Lett.* 41(7), 432(2005)
- [23] Y. Bai, N. Bandyopadhyay, S. Tsao, E. Selcuk, S. Slivken and M. Razeghi, Highly temperature insensitive quantum cascade lasers, *Appl. Phys. Lett.*, 97, 25 (2010)
- [24] M. Razeghi, B. Gokden, S. Tsao, A. Haddadi, N. Bandyopadhyay, S. Slivken, Widely Tunable, Single-Mode, High-Power Quantum Cascade Lasers SPIE Proceedings, Integreated Photonics: Materials, Devices and Applications, *SPIE Micr. Symposium*, 8069, 806905 (2011)
- [25] N. Bandyopadhyay, S. Slivken, Y. Bai and M. Razeghi, High power, continuous wave, room temperature operation of $\lambda \sim 3.4 \mu\text{m}$ and $\lambda \sim 3.55 \mu\text{m}$ InP-based quantum cascade lasers *Appl. Phys. Lett.*, 100, 212104 (2012)
- [26] M. Razeghi, A. Evans, J. Nguyen, Y. Bai; S. Slivken, S. R. Darvish, K. Mi, High-power mid- and far- wavelength infrared lasers for free space communication Proc. SPIE 6593, *Photonic Materials, Devices, and Applications II*, 65931V (June 12, 2007)
- [27] Claire Gmachl et al., Recent progress in quantum cascade lasers and applications, *Rep. Prog. Phys.* 64, 1533 (2001)
- [28] R. Martini, C.F. Gmachl, R. Paiella, F. Capasso, Ch. Glazowski, R. K. Murawski, E. A. Whittaker, C. G. Bethea, H.Y. Hwang, D. L. Sivco, J. N. Baillargeon, A. Y. Cho, H. C. Liu, Analog and digital high-speed modulation of quantum cascade laser, Proc. SPIE 4995, *Novel In-Plane Semiconductor Lasers II* (2003)
- [29] S. Fathololoumi et al., Terahertz quantum cascade lasers operating up to ~ 200 K with optimized oscillator strength and improved injection tunneling, *Opt. Express*, vol. 20, no. 4, pp. 3331–3339, 2012.
- [30] L. Li et al., Terahertz quantum cascade lasers with >1 W output pow- ers, *Electron. Lett.*, vol. 50, no. 4, pp. 309–311, Feb. 2014
- [31] B. Williams, S. Kumar, Q. Hu, and J. Reno, High-power terahertz quantum-cascade lasers, *Electron. Lett.*, vol. 42, no. 2, pp. 18–19, 2006
- [32] S. Kumar, C. W. I. Chan, Q. Hu, and J. L. Reno, A 1.8-THz quantum cascade laser operating significantly above the temperature of [planck] $\omega/k\text{B}$, *Nature Phys.*, vol. 7, no. 2, pp. 166–171, Dec. 2010
- [33] C. Walther et al., Quantum cascade lasers operating from 1.2 to 1.6 THz, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, 2007, Art. no. 131122
- [34] B. S. Williams, *Nat. Photonics* 1, 517 2007
- [35] Y. Bai et al., *Appl. Phys Lett.* 98, 181102 (2011)
- [36] M. Razeghi, *Applied Optics*, 56, H30, 2017
- [37] Xiaodan Pang, *Optic Letters*, 42, 3646, 2017