

**Piotr Gutowski, MSc, Eng.**

## **Molecular beam epitaxy of quantum cascade lasers based on InAlAs/InGaAs/InP material system**

### **Abstract**

The presented thesis describes the Molecular Beam Epitaxy (MBE) technology of quantum cascade lasers (QCLs) based on InAlAs/InGaAs/InP material system. Two main types of lasers were investigated. First, was based on lattice matched active region designed for wavelength of  $\lambda=9.4 \mu\text{m}$ . The second, was based on strain-compensated active region designed for wavelength of  $\lambda=4.7 \mu\text{m}$ . Four different waveguide constructions were used. Two of them utilized low doped InP substrate as a lower waveguide and single  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  or InP layer as a top one. Two symmetrical type waveguides with  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  or InP layers on both sides of active region were also grown. All InP layers were grown by Metallo-Organics Vapor Phase Epitaxy (MOVPE). The development of MBE growth process of laser active region for InP regrowth and full QCL structures was presented. Detailed description of calibration procedure and growth process preparation was provided, which has especially significant meaning in the case of strain-compensated lasers. Epitaxial processes were controlled by *in-situ* equipment installed in the growth chamber, such as optical pyrometer, Reflection High Energy Electrons Diffractometer (RHEED) and LayTec reflectometer. After the growth process High Resolution X-Ray Diffraction (HRXRD), Atomic Force Microscopy (AFM) and Transmission Electron Microscopy (TEM) was employed. The reproducible technology of quantum cascade laser structures on 2-inch substrates has been developed. The high uniformity and over 80% yield of wafer area satisfying device requirement has been achieved. For all types of the structures the above-room temperature, up to 100 °C, pulsed mode operation of the lasers was demonstrated. The lowest threshold current density  $\sim 3 \text{ kA/cm}^2$  has been achieved.

The extra effect of this work was development of the strained  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$ -based lasers growth process. It was made possible by the experience gained during the growth of InGaAs layers on InP substrate. The idea of replacing all GaAs wells in  $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$  QCLs by  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  with small indium content resulted in the

improvement of laser parameters and yielded above-room temperature operation, up to 50 °C with simultaneous threshold current reduction. Such operating conditions were not achievable before for conventional  $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$ -based QCLs.

## Streszczenie

Prezentowana rozprawa doktorska opisuje technologię epitaksji z wiązek molekularnych MBE struktur kwantowych laserów kaskadowych, bazujących na układzie materiałowym  $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}/\text{InP}$ . Prowadzone badania dotyczyły dwóch głównych typów laserów wykonanych z wykorzystaniem tego systemu materiałowego. Pierwszy z nich bazował na dopasowanym sieciowo do podłoża obszarze aktywnym o projektowanej długości fali  $\lambda=9.4 \mu\text{m}$ . Drugi, niedopasowany sieciowo, posiadał obszar aktywny z kompensacją naprężeń, projektowany na długość fali  $\lambda=4.7 \mu\text{m}$ . W konstrukcji laserów wykorzystane zostały cztery różne typy falowodów. Dwa z nich wykorzystywały niskodomieszkowane podłoże  $\text{InP}$ , jako dolny falowód oraz pojedynczą warstwę  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  lub  $\text{InP}$ , jako górny falowód. Wykonane zostały również dwie symetryczne konstrukcje falowodu z warstwami  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  lub  $\text{InP}$  po obu stronach obszaru aktywnego. Warstwy  $\text{InP}$  krystalizowane były z wykorzystaniem technologii MOVPE. Opracowana została technologia MBE wzrostu obszarów aktywnych laserów pod późniejszy wzrost falowodów  $\text{InP}$  oraz kompletnych struktur kwantowych laserów kaskadowych dla obydwu długości fal;  $9.5 \mu\text{m}$  oraz  $4.7 \mu\text{m}$ . W rozprawie omówione zostały procedury kalibracji i procesy wzrostu struktur laserowych. Przedstawiona została szczegółowa metodologia wyznaczania warunków wzrostu laserów z kompensacją naprężeń w obszarze aktywnym. Procesy epitaksjalne kontrolowane były *in-situ* przez sprzęt diagnostyczny zainstalowany w komorze wzrostu reaktora MBE; m.in. pirometr optyczny, spektrometr do odbiciowej dyfrakcji elektronów wysokoenergetycznych RHEED i reflektometr LayTec. Po procesie wzrostu próbki były charakteryzowane przy użyciu wysokorozdzielczej dyfrakcji rentgenowskiej HXRD, mikroskopii sił atomowych AFM i transmisyjnej mikroskopii elektronowej TEM. Opracowano powtarzalną technologię epitaksji MBE struktur laserowych na podłożach dwucalowych. Uzyskano wysoką jednorodność grubości warstw i ponad 80% uzysk powierzchni płytek spełniających wymagania przyrządów. Dla przyrządów na bazie wszystkich typów struktur uzyskano pracę powyżej temperatury pokojowej (do 100 °C) w impulsowym modzie zasilania. Najniższe gęstości prądów progowych wynosiły  $\sim 3 \text{ kA}/\text{cm}^2$  w temperaturze pokojowej.

Dodatkowym efektem prezentowanej rozprawy było opracowanie technologii struktur laserów z naprężonym obszarem aktywnym, wykonanych w oparciu o układ materiałowy  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$ . Było to możliwe dzięki doświadczeniu zgromadzonemu

podczas wzrostu kalibracyjnych warstw InGaAs, które były niedopasowane do podłoża InP. Analiza ich właściwości, w połączeniu z dążeniem autora do poprawy parametrów pracy laserów kaskadowych z  $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$ , doprowadziła do idei zastąpienia wszystkich studni GaAs studniami z  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  z małą, kilkuprocentową zawartością indu. Umożliwiło to znaczącą poprawę parametrów lasera i pozwoliło na uzyskanie pracy impulsowej w temperaturach powyżej pokojowej (do  $\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ ) oraz skutkowało redukcją prądu progowego. Uzyskane parametry pracy były wcześniej nieosiągalne dla laserów kaskadowych wykonanych z  $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$ .