

# Квантовый каскадный лазер ( $\lambda \sim 8$ мкм), получаемый методом МОС-гидридной эпитаксии

И.И.Засавицкий, Д.А.Пашкеев, А.А.Мармалюк, Ю.Л.Рябоштан, Г.Т.Микаелян

*Методом МОС-гидридной эпитаксии создан квантовый каскадный лазер ( $\lambda \sim 8$  мкм). Использована схема вертикальных переходов в структуре из трех квантовых ям. Лазер работает в импульсном режиме при температурах до 250 К. Пороговая плотность тока составляла около  $3 \text{ кА/см}^2$  при 77 К и возросла до  $6 \text{ кА/см}^2$  при 250 К. Мощность излучения в импульсе (1 мкс) в многомодовом режиме равнялась 45 мВт при 77 К.*

**Ключевые слова:** квантовый каскадный лазер, МОС-гидридная эпитаксия, квантовая яма.

С момента создания квантового каскадного лазера (ККЛ) [1] гетероструктуры для него выращивались, в основном, с использованием метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). В последние годы для этой цели стал активно применяться метод МОС-гидридной эпитаксии (МОСГЭ) [2, 3], причем достигались характеристики, сравнимые с получаемыми методом МЛЭ. Метод МОСГЭ по сравнению с методом МЛЭ характеризуется относительно высокими скоростями роста (до 5 мкм/ч), низкой ( $10\text{--}20 \text{ см}^{-2}$ ) плотностью дефектов и возможностью выращивания высококачественных фосфидных слоев, в том числе второго обкладочного слоя InP. Кроме того, МОСГЭ является технологией для полупромышленного производства, использование которой в перспективе приведет к снижению стоимости ККЛ. Существенной проблемой метода МОСГЭ является получение резких гетерограниц.

В настоящей работе сообщается о ККЛ ( $\lambda \sim 8$  мкм) на основе полученной методом МОСГЭ гетероструктуры GaInAs/AlInAs/InP, согласованной по постоянной решетки. Выбрана рабочая схема с вертикальными излучательными переходами, происходящими внутри одной квантовой ямы. В этом случае влияние гетерограницы на полуширину линии спонтанного излучения минимально, тогда как при диагональном переходе (через гетерограницу) ширина линии вдвое больше. Это важно, поскольку ожидается, что размытие гетерограницы при МОСГЭ будет выше, чем при МЛЭ. Для получения заданной длины волны излучения около 8 мкм ( $E_3 - E_2 = 0.155$  эВ, рис.1) была выбрана следующая структура активной области [4]:  $3.8/2.1/1.2/6.5/1.2/5.3/2.3/4.0/1.1/3.6/1.2/3.2/1.2/3.0/1.6/3.0$ , где толщины слоев указаны в нанометрах, начиная с инжекционного барьера. Здесь жирным шрифтом даны толщины барьеров  $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ , обычным шрифтом – толщины ям  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ . Рабо-

чими являются квантовые ямы толщиной  $L_z = 2.1, 6.5$  и  $5.3$  нм. Правая часть структуры представляет собой инжектор с тремя легированными Si до концентрации  $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  слоями (подчеркнуты).

Первая (узкая) яма ( $L_z = 2.1$  нм) содержит уровень, находящийся в резонансе с уровнем Ферми  $F_n$  в инжекторе и с верхним лазерным уровнем  $E_3$  во второй, относительно широкой ( $L_z = 6.5$  нм) квантовой яме. Это позволяет увеличить перекрытие волновых функций для верхнего лазерного уровня и основного состояния инжектора и одновременно уменьшить перекрытие волновых функций основного состояния инжектора и нижних состояний  $E_2$  во второй яме и  $E_1$  – в третьей. В конечном итоге растет эффективность инжекции, снижается упругое и неупругое рассеяние электронов непосредственно на нижние состояния и возрастает матричный элемент для вертикальных переходов во второй яме.

То обстоятельство, что в кристаллически совершенной квантовой яме времена жизни неравновесных электронов определяются их рассеянием с участием продольного оптического фоновина, используется при конструировании лазерных уровней [5], а именно расстояние между первым и вторым уровнями  $E_2 - E_1$  выбирается равным или превышает  $h\nu_{LO} \approx 35$  мэВ, что приводит к субпикосекундным временам рассеяния электрона ( $\tau_{21} = 0.2\text{--}0.4$

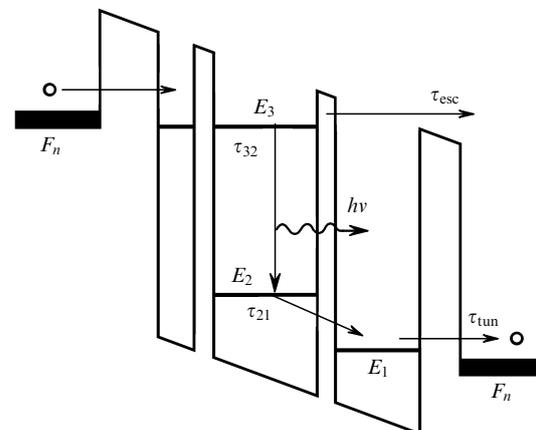


Рис.1. Схема электронных переходов в трех туннельно-связанных ямах при электрическом смещении.

И.И.Засавицкий, Д.А.Пашкеев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119999 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: zasavit@sci.lebedev.ru

А.А.Мармалюк, Ю.Л.Рябоштан. ФГУП «НИИ "Полнос" им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3

Г.Т.Микаелян. Научно-производственное предприятие «Инжект», Россия, 410052 Саратов, просп. 50 лет Октября, 101

Поступила в редакцию 24 января 2010 г.

пс). Поскольку энергия перехода  $E_3 - E_2$  составляет около 160 мэВ, требуется большой волновой вектор для рассеяния. В связи с этим время жизни электрона на верхнем лазерном уровне  $\tau_{32}$  достигает 2 – 5 пс, что обеспечивает инверсию населенностей. Для достижения инверсии имеет значение также то, что верхний лазерный уровень попадает в миниэп инжектора при заданном напряжении электрического поля, т.е. время рассеяния электрона с этого уровня непосредственно в инжектор относительно велико,  $\tau_{esc}$  составляет  $\sim 15$  пс. Однако внутренний выход излучения между уровнями получается небольшим:  $\eta_i \sim \tau_{32}/\tau_r \sim 3 \times 10^{-4}$ , поскольку излучательное время жизни  $\tau_r$  находится в наносекундной области. В связи с этим активная область каскадируется много раз (в нашем случае – 30) и разделяется легированным инжектором.

Лазерные структуры выращивались на модернизированной установке МОСГЭ с горизонтальным кварцевым реактором и вращающимся графитовым подложодержателем. Рост осуществлялся на подложках n-InP (100) диаметром 50.8 мм при температуре 620–690 °С и давлении в реакторе 40–150 мбар. Типичная скорость роста составляла 11 нм/мин. В качестве источников элементов третьей группы использовались триэтилгаллий, триметилиндий и триметилалюминий, пятой группы – фосфин и арсин. Для легирования слоев n-типа в инжекторе применялся моносилан в смеси с водородом.

На первых образцах, как показали изображения в просвечивающем электронном микроскопе, гетерограницы между слоями получались нерезкими, хотя сателлиты в рентгенодифракционной картине присутствовали. Для улучшения качества активной области ККЛ потребовалась оптимизация режимов роста, в связи с чем с целью минимизации паразитных непродуваемых объемов была проведена дополнительная модернизация газовой схемы ростовой установки. Уменьшение скорости роста активной области и расхода реагентов позволило получить рабочую гетероструктуру, для которой на рис.2 показана кривая качания. Наблюдается периодическая структура из множества сателлитов, хотя общая картина несколько несимметрична. Размер активной области (44.3 нм), полученный из расстояния между сателлитами, хорошо согласуется с его технологически заданным значением. Таким образом, рентгеновские измерения позволяют уже на первом этапе тестирования гетероструктуры для ККЛ оценивать их качество. Это важно, поско-

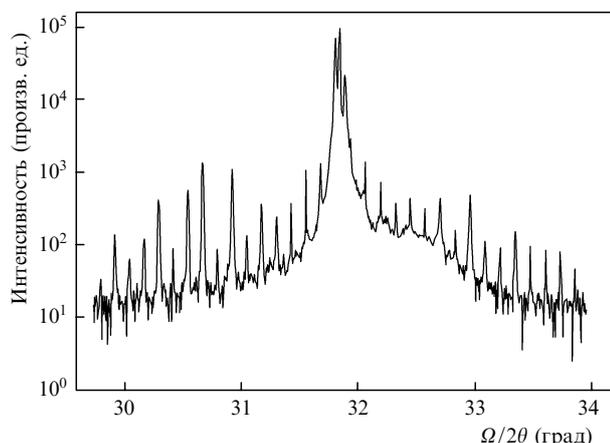


Рис.2. Кривая качания для дифракционного отражения InP (004). Верхний эмиттер и волновод удалены.

льку метод непосредственного наблюдения с помощью просвечивающего электронного микроскопа является очень длительным и дорогостоящим.

Обкладочные слои InP были легированы до концентрации  $3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , при этом толщина буферного слоя составляла 0.2 мкм, а верхнего слоя – 2.9 мкм. На гетероструктуру методом вакуумного напыления наносились контакты Сг ( $\sim 50$  нм) и Au ( $\sim 0.5$  мкм). Затем электролитически наносился слой золота толщиной 1.5–2 мкм. Полосковая (ширина 50 мкм) структура лазеров изготавливалась с помощью фотолитографии путем вскрытия полосок в изолирующем слое  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , нанесенном электронно-лучевым распылением. Длина резонатора лазера составляла  $L$  3 мм. Лазерный кристалл припаивался со стороны гетероструктуры к контактной пластине из материала МД-50, согласованного по коэффициенту линейного термического расширения с лазерным кристаллом. Верхний контакт к лазерному кристаллу обеспечивался медной полоской, соединенной с коваровым электроводом.

Из-за наличия каскадов вольт-амперная характеристика ККЛ отличается от характеристики обычного биполярного лазера. На рис.3 показана вольт-амперная характеристика лазера при температуре 77 К. Видно, что напряжение отсечки составляет около 6 В. Расчет напряжений отсечки  $V_c = (hv + hv_{LO})N_p/e$ , где  $N_p$  – число каскадов, дает  $(0.16 + 0.04) \times 30 = 6$  В, что близко к наблюдаемому значению. Из наклона прямой ветви характеристики определено сопротивление лазера, равное 0.4 Ом при 77 К, что является относительно большим значением, которое надо уменьшать. Следует отметить, что вольт-амперная характеристика лазера демонстрирует значительный начальный (сквозной) ток и наличие нескольких слабых изломов. Наличие сквозного тока объясняется тем, что тонкие (1–2 нм) барьеры в гетероструктуре имеют дефекты или размытые гетерограницы, в результате чего нарушается резонанс в расположении уровней при заданном электрическом поле.

Лазеры работали в импульсном режиме при температуре до 250 К. Их пороговая плотность тока возрастала от 3 кА/см<sup>2</sup> (77 К) до 6 кА/см<sup>2</sup> (250 К). Ее зависимость от температуры обычно описывается экспериментальной зависимостью типа  $J_{th}(T) = J_0 \exp(T/T_0)$ . Характеристическая температура  $T_0 = 110$  К, что свидетельствует о заметном подавлении оже-рекомбинации при высоких температурах.

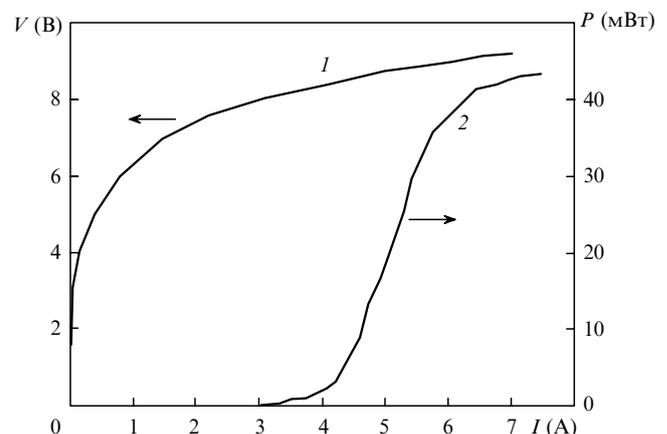


Рис.3. Вольт-амперная (1) и ватт-амперная (2) характеристики лазера при  $T = 77$  К.

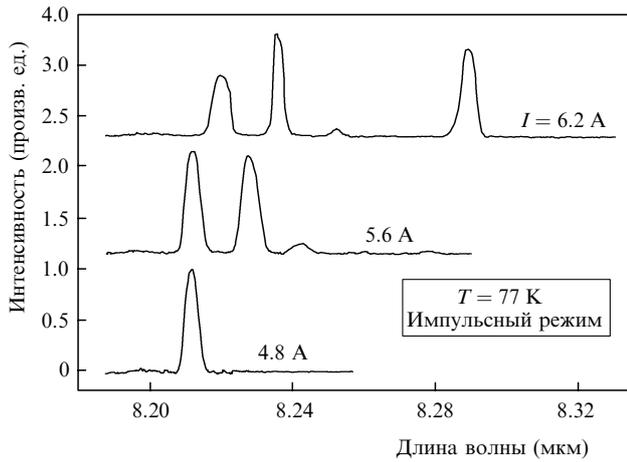


Рис.4. Спектры генерации лазера при различных токах и температуре 77 К.

Спектры излучения лазеров измерялись в импульсном режиме ( $\tau = 1$  мкс,  $f = 170$  Гц). Из приведенного на рис.4 спектра излучения видно, что вблизи порога он является одномодовым. При увеличении тока спектр смещается, и с длинноволновой стороны появляются новые

пики излучения, из расстояний между которыми следует, что это доминирующие моды с расстоянием между ними  $\sim 2$  см $^{-1}$ , тогда как расстояние между продольными модами  $\Delta k$  должно составлять  $1/(2Ln) \sim 0.5$  см $^{-1}$  ( $n$  – показатель преломления). Импульсная мощность излучения ККЛ в многомодовом режиме достигала 45 мВт при 77 К (рис.3).

Таким образом, с помощью метода МОС-гидридной эпитаксии на основе гетеропары GaInAs/AlInAs разработан ККЛ, который работает при температуре до 250 К и имеет импульсную мощность излучения до 45 мВт при 77 К.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 08-02-01252-а).

1. Faist J., Capasso F., Sivco D.L., Sirtori C., Hutchinson A.L., Cho A.Y. *Science*, **264**, 553 (1994).
2. Krysa A.B., Roberts J.S., Green R.P., Wilson L.R., Page H., Garcia M., Cockburn J.W. *J. Crystal Growth*, **272**, 682 (2004).
3. Troccoli M., Bour D., Corzine S., Hoffer G., Tandon A., Mars D., Smith D.J., Diehl L., Capasso F. *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 5842 (2004).
4. Gmachl C., Tredicucci A., Capasso F., Hutchinson A.L., Sivco D.L., Baillargeon J.N., Cho A.Y. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 3130 (1998).
5. Gmachl C., Capasso F., Sivco D.L., Cho A.Y. *Rep. Prog. Phys.*, **64**, 1533 (2001).