

07

Приготовление полосковой структуры для квантовых каскадных лазеров

© В.В. Мамутин, Н.Д. Ильинская, Б.В. Пушный,
Р.Н. Левин, Ю.М. Шерняков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: mamutin@mail.ru

В окончательной редакции 21 мая 2013 г.

Продемонстрирован метод зарашивания лазерных полосковых структур высокоомным фосфидом индия для ограничения области протекания тока и улучшения отвода тепла. Зарашивание выполнялось с помощью метода газофазной эпитаксии из металлорганических соединений. Показано, что данный метод позволяет получать качественные эпитаксиальные слои и бездефектные границы зарашивания без специальной обработки структур после фотолитографии. Все слои InP были *n*-типа проводимости, удельное сопротивление составляло $\rho \sim 5 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$, а концентрация носителей $n \sim 5 \cdot 10^{10} \text{cm}^{-3}$. Характеристики выращенных слоев InP позволят получать высококачественные квантовые каскадные лазеры.

Квантовые каскадные лазеры (ККЛ, QCL), работающие на внутриволновых переходах, впервые были получены в системе элементов InGaAsP/InP в работе [1]. Они используются в спектроскопии молекул, химической и медицинской диагностике, а также в беспроводной связи на длинах волн 3–5 и 8–13 μm . Особенностью таких лазеров, по сравнению с обычными полупроводниковыми лазерами на межзонных переходах, является более сильный разогрев активной области. Это приводит к необходимости использования в их конструкции материалов с возможно большей теплопроводностью.

Для достижения улучшенных характеристик квантовых каскадных лазеров в системе InGaAsP/InP (снижения пороговых токов и увеличения дифференциальной эффективности) при зарашивании используется фосфид индия с повышенным сопротивлением [2,3]. Это обеспечивает теплоотвод от структуры и значительно уменьшает токи утечки.

Предыдущие наши исследования полосковых структур ККЛ, выращенных молекулярно-пучковой эпитаксией (МПЭ) без зарашивания,

продемонстрировали большие трудности в постростовой обработке (изготовление контактов и монтаж) для достижения лазерной генерации по сравнению с обычными (межзонными) полосковыми лазерами [4]. Лучшие ККЛ были получены при последующем наращивании их высокоомными слоями фосфида индия с помощью МПЭ [3] или с помощью газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОСГФЭ, МОСVD) [2]. В этих случаях была необходима специальная очистка наращиваемой поверхности после процессов изготовления полосков методами фотолитографии (окисные пленки, следы препаратов для литографии и загрязнения из воздуха).

В данной статье сообщается об исследовании возможности наращивания модельной полосковой лазерной структуры высокоомным фосфидом индия методом МОСГФЭ без специальной обработки после фотолитографии (изготовление полосков) и исследовании параметров полученных структур.

Модельные образцы изготавливались из подложек n -InP (100) с концентрацией носителей $n \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ методом стандартной фотолитографии и влажного химического травления в смеси $\text{HBr} : \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 : \text{H}_2\text{O}$. Полоски ориентировали вдоль кристаллографического направления $\langle 110 \rangle$ для получения наклонной боковой стенки. На один тип образцов предварительно наносился фоторезист, на другой — слой нитрида кремния (Si_3N_4) толщиной $0.1 \mu\text{m}$ методом низкотемпературного плазмоактивированного пиролиза (PCVD). После формирования маски из фоторезиста или нитрида кремния осуществляли травление InP на глубину $\sim 8 \mu\text{m}$, затем фоторезист удалялся в кипящем растворе диметилформамида, а нитрид кремния оставался на вершине полоска.

При травлении через маску фоторезиста угол наклона боковой стенки мезаструктуры составлял $\sim 50^\circ$, что определялось по фотографиям сколов структур в электронном сканирующем микроскопе CAMSCAN (рис. 1, *a*).

На других образцах при травлении через маску нитрида кремния угол наклона боковой стенки мезаструктуры составлял $\sim 54^\circ$, что соответствует выявлению кристаллографической плоскости (111) А (рис. 1, *b*).

Эксперименты по наращиванию структур эпитаксиальными слоями фосфида индия осуществлялись на установке AIXTRON 200 с реактором горизонтального типа. Давление в реакторе поддерживалось на уровне 100 mbar. Подложка при температуре 600°C вращалась со

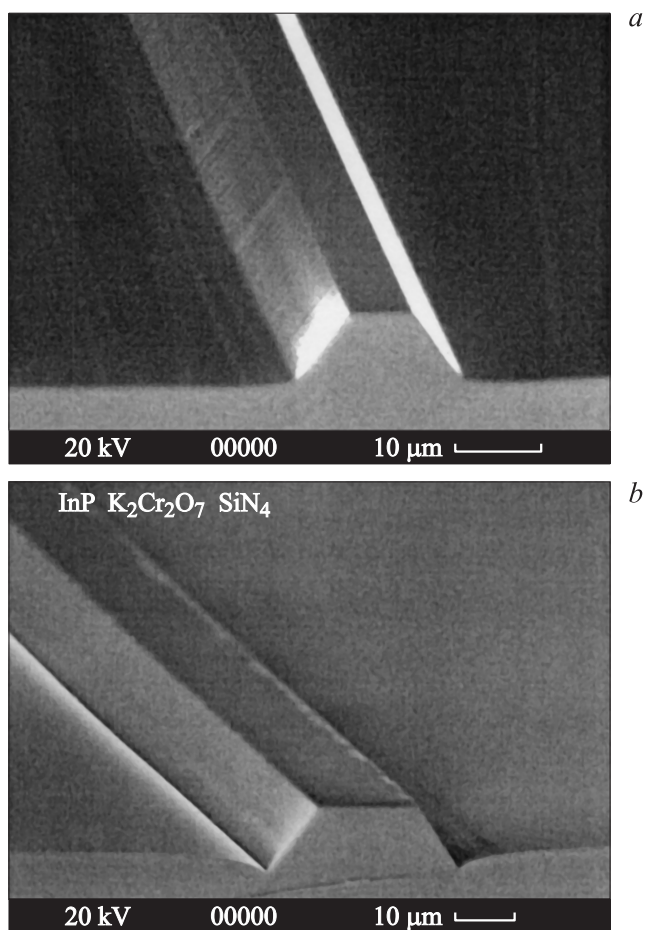


Рис. 1. Профиль меза-полоска после травления InP: *a* — через маску фоторезиста, *b* — с нитридом кремния (метка масштаба — $10\ \mu\text{m}$).

скоростью $100\ \text{rpm}$. В качестве газа-носителя применялся очищенный водород с потоком $\sim 5\ \text{sln}$. Источником индия в эксперименте являлся триметил индия (TMIIn), источником элемента пятой группы — фосфин (PH_3). Отношение компонентов пятой и третьей групп элементов

(V/III) составляло ~ 300 , при этом скорость роста — $1.5 \mu\text{m/h}$. Рост выполнялся на двух типах образцов: с полосками и с гладкой поверхностью (образец-спутник).

После нанесения высокоомного фосфида индия слой Si_3N_4 удалялся химическим травлением в буферном травителе, на обе стороны образца напылялись обычные контакты к n -типу слоев (Au/Ge), контакты вжигали в атмосфере водорода при 450°C , как при изготовлении реального лазера, затем образцы раскалывались на чипы с размерами, аналогичными реальным ККЛ.

Полученный фосфид индия, выращенный на подложке-спутнике, исследовался методом рентгеновской дифракции. Полуширина кривой качания эпитаксиального InP составляла 17 arcsec, в то время как у материала подложки она составляла 21 arcsec. Эпитаксиальный фосфид индия, несмотря на перенос по воздуху и отсутствие специальных методов очистки перед ростом, ложился сплошным слоем, давая практически идеальную границу роста (рис. 2).

Структуры без нитрида кремния зарастали сплошным слоем и сверху, и на боковой поверхности (рис. 2, *a*). На поверхности Si_3N_4 в центре полоска не происходило осаждение слоя InP, а было только латеральное зарастивание на углу полоска со скоростью роста, соответствующей скорости роста на подложке-спутнике и на боковых наклонных гранях (рис. 2, *b*). Наклонные боковые поверхности зарастали аналогично предыдущему случаю.

На полученных структурах в виде полосков, зарощенных сплошным слоем высокоомного InP, с реальными размерами для квантования каскадных лазеров [2,3], проводилось измерение сопротивления с последующим расчетом концентрации носителей по известной подвижности в слоях InP (на подложке-спутнике), составлявшей $\sim 3000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. В образцах со снятым нитридом кремния (контакт металла прямо к подложке) проводилось аналогичное измерение с учетом размеров незарощенной области.

Все слои были n -типа проводимости, а удельное сопротивление ρ образцов без нитрида кремния составляло $(4-5) \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$, что при известных подвижностях давало концентрацию носителей $n \sim 5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Такой результат соответствовал лучшим литературным данным для зарощенных ККЛ [2,3]. Это определяет перспективность нашего метода изготовления ККЛ, не требующего дорогостоящей модификации установки МПЭ (для проведения очистки после фотолитографии и зарастивания с использованием источника фосфора), на

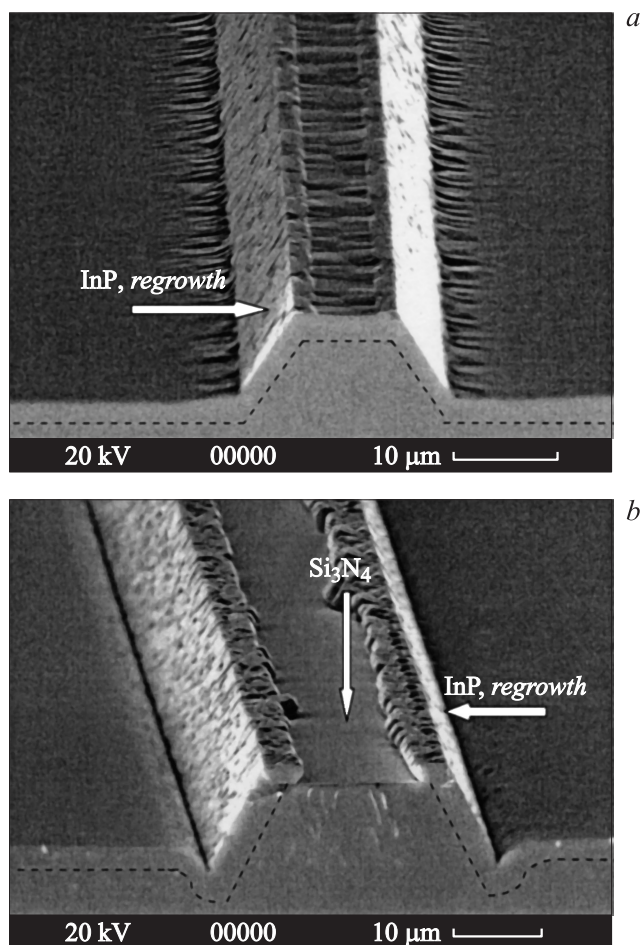


Рис. 2. Внешний вид в сканирующем электронном микроскопе зарощенных меза-полосков: *a* — без нитрида кремния, *b* — с нитридом кремния; видно, что Si_3N_4 не зарастает (штриховая линия — граница роста, метка масштаба — $10\ \mu\text{m}$).

которой проводится выращивание основной части ККЛ (QCL) — его активной области со сверхрешеткой. Проверка концентрации носителей по измерению сопротивления на незарощенной части полосков давала

значение $n \sim 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, соответствующее концентрации в подложке, измеренной вольт-емкостным методом и по эффекту Холла (при подвижности $\mu \sim 1700 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$).

Внешняя поверхность полученных слоев показана на рис. 2. Видно отсутствие роста InP на основной (центральной) части поверхности полоска на нитриде кремния (рис. 2, *b*), что позволяет формировать контакты непосредственно к проводящей части каскадного лазера. В целом слои высокоомного InP зарастивали вытравленную структуру равномерно, с одинаковой толщиной по всем направлениям, полностью повторяя профиль травления, независимо от кристаллографической ориентации поверхности.

Таким образом, в работе показана возможность качественного зарастивания лазерных полосков, предназначенных для квантовых каскадных лазеров, высокоомным фосфидом индия методом МОСГФЭ (MOCVD) с сопротивлением $\rho \sim 5 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ и концентрацией носителей $n \sim 5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ No 12-02-00504-а „Получение и исследование квантовых каскадных лазеров для среднего инфракрасного диапазона“.

Список литературы

- [1] *Faist J., Capasso F., Sivco D.L., Sirtori C., Hutchinson A.L., Cho A.Y.* // Science. 1994. V. 264. P. 553.
- [2] *Evans A., Darvish S.R., Slivken S., Nguyen J., Razeghy M.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 071 101.
- [3] *Chashnikova M., Monastyrskiy G., Aleksandrova A., Klinkmu"ller M., Semtsiv M.P., Masselink W.T.* // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 213 504.
- [4] *Мамутин В.В., Устинов В.М., Boettcher J., Kuenzel H.* // ФТП. 2010. Т. 44. С. 995.