

## Исследование постростового процесса изготовления квантовых каскадных лазеров

© В.В. Мамутин<sup>¶</sup>, Н.Д. Ильинская, Д.А. Бедарев, Р.В. Левин, Б.В. Пушный

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 4 декабря 2013 г. Принята к печати 23 декабря 2013 г.)

Исследован процесс специальной постростовой обработки структур для квантовых каскадных лазеров, включающий в себя зарращивание высокоомным материалом — фосфидом индия с концентрацией носителей  $n \approx 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , фотолитографию с применением различных химических жидкостных травителей и создание специальных контактов для обеспечения повышенного теплоотвода. Использование модифицированного процесса постростовой обработки позволяет достичь необходимых параметров, удовлетворяющих требования к высококачественным приборам.

### 1. Введение

Квантовые каскадные лазеры основаны на внутризонных оптических переходах, в отличие от обычных полупроводниковых лазеров с межзонными переходами и рекомбинацией носителей. Это дает несколько преимуществ. Во-первых, длина волны излучения есть функция толщин слоев квантовых ям в активных (излучающих) областях сверхрешеток. Это дает возможность использовать хорошо изученные и реализуемые полупроводники для получения излучения на длинах волн, не связанных с запрещенной зоной конкретного материала. Во-вторых, становится возможным процесс генерации нескольких фотонов одним электроном, так как отсутствует рекомбинация и электрон остается в зоне проводимости во время его прохождения через активную область структуры. Этот каскадный процесс может приводить при определенных условиях к размножению фотонов и к усилению, большому единичности. В-третьих, межзонные переходы характеризуются сверхбыстрой динамикой носителей и отсутствием факторов уширения линии, что вместе дает значительные возможности для улучшения качества лазеров. Со времени предсказания в 1971 г. возможности использования туннелирования между связанными квантовыми ямами для создания лазеров с внутризонными переходами [1] прошло много лет до получения первого такого лазера [2], названного квантовым каскадным лазером (ККЛ, QCL). Необходимо было достичь понимания того, как влияет конструкция активной области лазера на лазерные характеристики, и разработать конструкцию со сверхрешеткой, дающую инверсную заселенность, уменьшающую потери и позволяющую в принципе достичь лазерной генерации [3–5]. Если первые ККЛ работали только при температуре жидкого азота, то дальнейшее их совершенствование привело к достижению генерации при температурах выше 400 К [6] и характеристической температуры  $T_0 > 200 \text{ К}$  [7]. Длина волны излучения есть функция применения для различных каскадных лазеров, одно из которых — использование

атмосферных окон прозрачности среднего инфракрасного (ИК) диапазона, 3–5 и 8–13 мкм, для высокоскоростных систем связи, в том числе и со спутниками, когда влияние поглощения и турбулентности атмосферы существенно уменьшено по сравнению с видимым и ближним инфракрасным диапазонами. В лазерах для диапазона длин волн 3–5 мкм со слоями InGaAs/AlInAs в основном из-за коэффициента преломления, технологичности и подходящего теплоотвода используются структуры, выращенные на подложках InP [8–10].

Критическим, если не основным, моментом в получении ККЛ, кроме роста активной области из сверхрешеток, оказалась постростовая обработка — изготовление мезаполосков, контактов и теплоотводов после выращивания лазерной структуры [8], чему и посвящена данная статья. Для ККЛ возникают специальные требования к контактам и теплоотводу из-за высоких рабочих токов по сравнению с „обычными“ полупроводниковыми лазерами [9]. Для достижения улучшенных характеристик квантовых каскадных лазеров (снижения порогов и увеличения дифференциальной эффективности) оказалось важным использование зарращивающего структуру материала с эффективным теплоотводом и повышенным сопротивлением. Таким материалом оказался технологически совместимый со слоями структур (что позволяет выращивать весь лазер в одном технологическом цикле) фосфид индия [10]. Зарращивание позволяло одновременно улучшать как теплоотвод от структуры, что особенно важно в ККЛ, так и электрическую изоляцию стенок полоска, лимитирующую токи утечки, что важно для любых полупроводниковых лазеров.

Нами предварительно было показано, что с использованием технологии металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ) возможно качественное бездефектное зарращивание лазерной структуры ККЛ высокоомным фосфидом индия (InP) даже без специальной обработки после переноса из установки молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) и контакта с атмосферой [11], что значительно упростило весь цикл получения ККЛ.

<sup>¶</sup> E-mail: mamutin@mail.ru

В данной работе проводилось исследование постростового процесса (фотолитография с жидкостным химическим травлением и нанесением специальных контактов) изготовления лазерной структуры, выращенной методом МПЭ, аналогично [12], с целью отработки на имеющемся оборудовании всех необходимых операций для достижения характеристик, обеспечивающих получение высококачественных приборов (ККЛ). Все постростовые операции выполнялись на отечественном оборудовании и доступных нам установках иностранных фирм. До этого такой постростовой процесс мы проводили на оборудовании Германии [13].

На сегодня квантово-каскадные лазеры на подложках фосфида индия, работающие в диапазоне длин волн 3–5 мкм, конструктивно представляют собой в основном полосковую структуру шириной от 5 до 30 мкм, протравленную до подложки InP, с диэлектрической изоляцией на боковых стенках и сплошными омическими контактами на лицевой и тыльной сторонах структуры [14].

## 2. Эксперимент

Формирование лазерных полосков в данной работе осуществлялось методом стандартной фотолитографии и жидкостного химического травления. Профили полученных структур исследовались с помощью электронного микроскопа CamScan фирмы CAMECA. При разработке технологии изготовления ККЛ были детально рассмотрены следующие операции: химическое травление полосковой структуры; заравнивание высокоомным фосфидом индия; нанесение изолирующего покрытия и омических контактов.

### 2.1. Химическое травление структуры

Жидкостное химическое травление полупроводниковых материалов, как правило, осуществляется в химических растворах, содержащих окислитель и комплексообразователь. Геометрия, наклон и качество боковой стенки во многом зависят от выбора состава и концентрации растворов. Травление многослойных структур, состоящих из набора слоев с различными физико-химическими свойствами, предъявляет дополнительные требования к составу, гладкая боковая стенка вытравленного рельефа может быть получена, только если скорости травления различных слоев близки по величине. Нами были исследованы селективные (скорость травления структуры значительно больше, чем скорость травления подложки) и неселективные (скорости травления структуры и подложки близки по величине) растворы травителей.

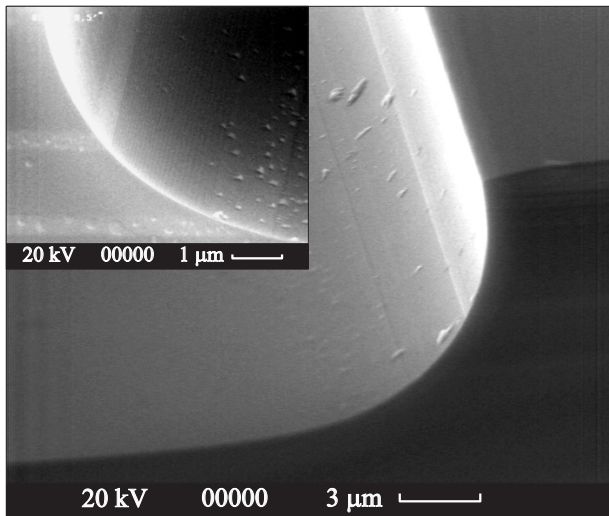
Главным преимуществом селективных травителей является то, что глубина меза-полоска определяется только толщиной структуры, поэтому глубина рельефа меньше, чем при неселективном травлении, и получается абсолютно плоское дно. Эта особенность существенно облегчает проведение дальнейших технологических операций по изготовлению лазеров.

Нами были исследованы два состава на основе перекиси водорода и ортофосфорной кислоты. Было обнаружено, что при травлении в этих травителях наклон боковой стенки рельефа зависит от кристаллографического направления, вдоль которого расположен мезаполосок, т.е. происходит выявление кристаллографических плоскостей [11]. На основании этого при проведении эксперимента предварительно выявлялась кристаллографическая ориентация химическим травлением подложки в ортофосфорной кислоте при температуре 85°C. Нанесение защитной маски из фоторезиста для травления осуществляли таким образом, чтобы после травления мезаполосок имел профиль типа „холм“. Вытравленный рельеф имел схожую форму для обоих травителей, кроме того, наблюдались изгиб профиля в месте изменения состава слоев и вертикальная шероховатость, линейный размер которой составил 0.3–1.0 мкм для травителя с соотношением компонентов (здесь и далее — объемные части)  $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$  (2 : 1 : 2) и 0.25–0.49 мкм для травителя  $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$  (3 : 4 : 1), который и был выбран для дальнейшей работы. С использованием травителя  $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$  (3 : 4 : 1) были изготовлены мезаполоски ККЛ с изоляцией боковой стенки низкотемпературным нитридом кремния.

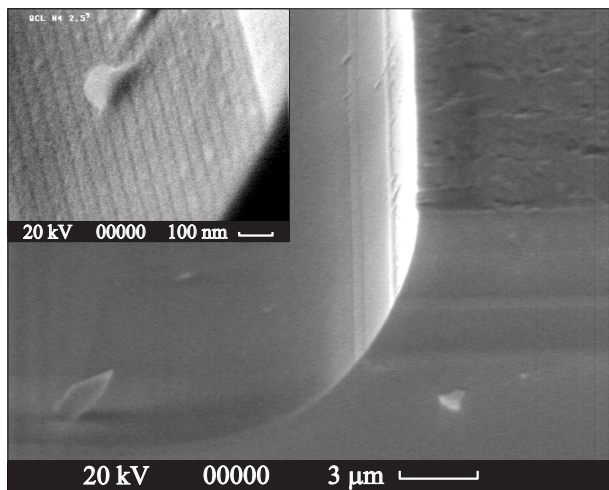
Основным свойством неселективных травителей является равенство скоростей травления различных материалов, входящих в состав структуры и подложки, на которой они выращены. В литературе в основном упоминается о неселективном травлении мезаполосков ККЛ [1–9]. Нами в качестве неселективных были исследованы травители разного состава на основе перекиси водорода и бромистоводородной кислоты и травители, содержащие ортофосфорную кислоту, уксусную кислоту, а в качестве окислителя — калий бромноватокислый. Основное внимание уделялось анализу скорости травления для выбора оптимальных режимов процесса, а также гладкости боковой стенки вытравленного рельефа. Наиболее подходящими для формирования мезаполосков ККЛ оказались следующие составы.

— Травитель  $\text{KBrO}_3$  (6.5%-й водный раствор):  $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{CH}_3\text{COOH}$  (1 : 1 : 1) обеспечивает скорость травления  $V_e \approx 0.64$  мкм/мин и достаточно гладкую боковую стенку вытравленного рельефа, как показано на фотографиях, сделанных в электронном микроскопе CamScan (CAMECA) (рис. 1). Скорость травления является оптимальной для контролируемого травления на глубину 5–10 мкм и обеспечивает достаточно плоское дно вблизи полоска.

— Травитель  $\text{HBr} : \text{H}_2\text{O}_2$  (8 : 1) имеет скорость травления слоев структуры  $V_e \approx 3.2$  мкм/мин. На фотографиях (рис. 2) видно, что боковая стенка также является гладкой без выраженных уступов в месте выхода слоев и является более чистой, чем при использовании предыдущего травителя — это видно при большем увеличении (в масштабе 100 нм видны даже отдельные слои сверхрешетки активной области ККЛ). С использованием неселективного травителя на основе бромистоводородной



**Рис. 1.** Профиль вытравленного мезаполоска на фотографиях, полученных в электронном микроскопе CamScan, в двух масштабах. Травитель:  $\text{KBrO}_3$  (6.5%-й водный раствор):  $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{CH}_3\text{COOH}$  (1 : 1 : 1) об/части (без фоторезиста).



**Рис. 2.** Профиль вытравленного мезаполоска в двух масштабах. Травитель  $\text{HBr} : \text{H}_2\text{O}_2$  (8 : 1) об/части (без фоторезиста).

кислоты и перекиси водорода были изготовлены ККЛ, заращённые высокоомным фосфидом индия.

## 2.2. Заращивание высокоомным фосфидом индия

Высокоомный фосфид индия выращивался на структуре после вытравливания мезаполосков, как и ранее, методом МОГФЭ, аналогично работе [11]. Эксперименты по заращиванию структур эпитаксиальными слоями фосфида индия осуществлялись на установке AIXTRON 200 с реактором горизонтального типа. Давление в реакторе поддерживалось на уровне 100 мбар. Подложка при

температуре  $600^\circ\text{C}$  вращалась со скоростью 100 об/мин. В качестве газа-носителя применялся очищенный водород с потоком 5 SLM (standard liters per minute). Источником индия в эксперименте являлся триметилиндий ( $\text{TMIIn}$ ), источником элемента V группы — фосфин ( $\text{PH}_3$ ) с потоком 175 sccm (standard cubic cm per minute). При этом скорость роста составляла 1.5 мкм/ч. Толщины слоев латерального роста были близки к толщинам плоских и наклонных слоев структуры. В целом слой высокоомного InP заращивали вытравленную структуру равномерно, с одинаковой толщиной по всем направлениям, полностью повторяя профиль независимо от кристаллографической ориентации поверхности травления.

Все полученные слои были *n*-типа проводимости, а удельное сопротивление образцов составляло до  $\rho = 5 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , что при известных подвижностях давало концентрацию носителей  $n \approx 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Такая концентрация носителей в высокоомном InP соответствовала характеристикам лучших заращённых ККЛ, известным из мировой литературы [10]. Получение слоев фосфида индия с высоким сопротивлением обусловлено чистотой исходных материалов и, главное, выбором соотношения элементов V и III групп в газовой фазе. При изменении соотношения изменяется концентрация глубоких центров, обусловленных вакансиями элементов, в основном элементов V группы, и, следовательно, концентрация носителей тока. Оптимальным для целей заращивания было соотношение V/III = 300.

## 2.3. Нанесение изолирующего покрытия и омических контактов

Последовательность постростовых технологических операций изготовления заращённых фосфидом индия квантовых каскадных лазеров такова.

— Нанесение на поверхность сплошным слоем нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) толщиной 1000 Å методом низкотемпературного плазмоактивированного пиролиза на установке Rokappa Plasma Machin 2.

— Формирование лазерного полоска методом прямой фотолитографии и химического травления, для чего а) методом фотолитографии получали полосок из фоторезиста AZ1518 шириной 18 мкм, б) проводили химическое травление слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в буферном травителе, состоящем из водного раствора плавиковой кислоты и фтористого аммония, в) затем, не удаляя фоторезист, проводили химическое травление рабочих слоев и части подложки InP, используя в качестве маски слои  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и фоторезиста, г) проводили отмывку от фоторезиста в кипящем диметилформамиде с последующей промывкой в проточной деионизованной воде с сопротивлением 16–18 МОм (профиль вытравленного полоска после удаления фоторезиста приведен на рис. 3, а). Следует отметить, что никакой дополнительной обработки структуры после контакта с атмосферой перед заращиванием не проводилось.

— Заращивание высокоомным фосфидом индия. Оставшийся наверху мезаполоска слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  является маской, на которой не происходит рост  $\text{InP}$  (рис. 3, *b*).

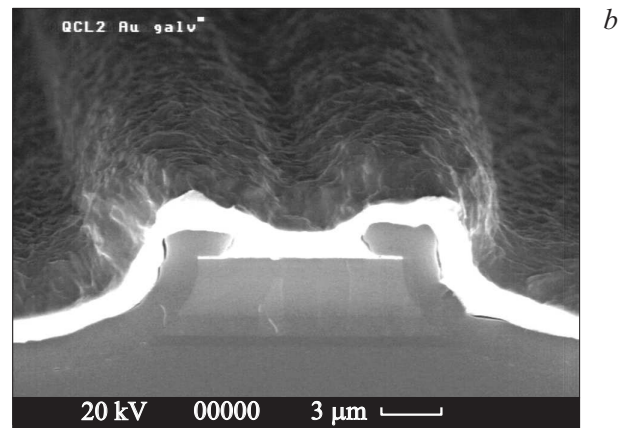
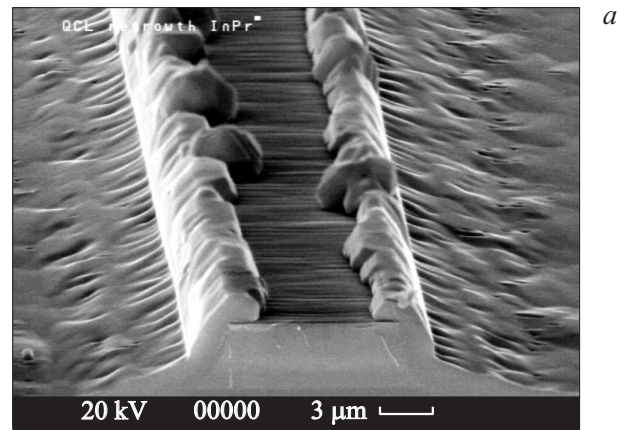
— Утончение подложки до 130 мкм (необходимое для раскалывания на лазерные чипы) химическим травлением в концентрированной соляной кислоте.

— Напыление омического контакта осаждением многослойного покрытия  $\text{AuGe-Ni-Au}$ , его вжигание в атмосфере водорода при температуре 370°C.

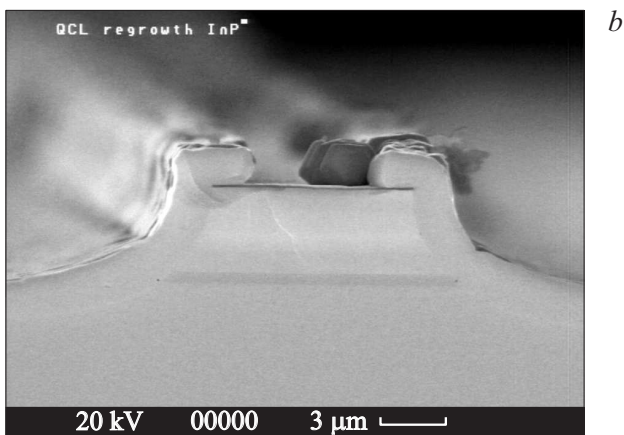
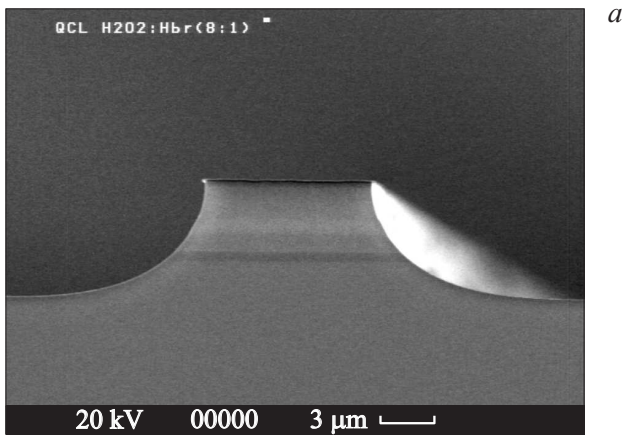
— Удаление маскирующего слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4$  со стороны структуры химическим травлением в концентрированной плавиковой кислоте с последующей промывкой в проточной деионизованной воде с сопротивлением 16–18 МОм.

— Сразу же после отмытки нанесение омического контакта к слоям структуры, 200 Å  $\text{Ti}$  и 1000 Å  $\text{Au}$ , в высоковакуумной установке UMS 500P, Balzers (рис. 4, *a*).

— Электрохимическое осаждение толстого механически прочного слоя золота толщиной 3–5 мкм на лицевую сторону пластины (рис. 4, *b*). Последнее является характерным отличием изготовления ККЛ от „обычных“ полупроводниковых лазеров [10].



**Рис. 4.** Профиль зарощенного мезаполоска: *a* — после нанесения тонкого омического контакта; *b* — после электрохимического осаждения толстого слоя золота.



**Рис. 3.** Профиль вытравленного лазерного мезаполоска в травителе с нитридом кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) на вершине: *a* — после удаления фоторезиста; *b* — после заращивания фосфидом индия. Травитель  $\text{HBr} : \text{H}_2\text{O}_2$  (8 : 1) об/части.

### 3. Обсуждение

Необходимым условием создания полосковой конструкции квантового каскадного лазера является надежная электрическая изоляция боковой поверхности мезаполоска, обеспечивающая минимальные поверхностные токи утечки и обладающая высокой теплопроводностью. Существует несколько возможных вариантов формирования таких покрытий для ККЛ.

Одним из способов является нанесение диэлектрических покрытий  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [15] или  $\text{SiO}_2$  [16–18]. Эти покрытия, как правило, наносят на вытравленную поверхность полоска низкотемпературными методами — плазмоактивированным пиролизом (PCVD) или магнетронным распылением.

Недостатком такого способа пассивации является возможность возникновения на поверхности дополнительных уровней из-за обработки в плазме и низкая теплопроводность слоев. Мы использовали пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , полученные методом плазмоактивированного пиролиза силана в установке Rokappa Plasma Machin 2. Слои нитрида кремния являются более плотными по сравнению со слоями двуокиси кремния, поэтому необходи-

мая толщина защитного покрытия может быть меньше (0.1 мкм), чем слоев SiO<sub>2</sub> (~ 0.3 мкм), что обеспечивает более высокую теплопроводность. Кроме того, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> имеет величину коэффициента термического расширения (КТР), более близкую к КТР полупроводниковых материалов, из которых состоит структура, и составляет  $3.3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , в то время как КТР пленки SiO<sub>2</sub> равен  $1.3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [19].

Следующим отрицательным моментом является необходимость проведения дополнительной фотолитографии для создания окон для напыления омического контакта к слоям структуры, требующего точного совмещения рисунков.

Также возможным способом для изоляции лазерных мезаполосков структур является использование полимерных покрытий. В работе [20] в качестве изолирующего покрытия применяли бензоциклобутен (bisbenzocyclobutene, ВСВ). Данное покрытие обладает хорошими изолирующими и планаризирующими характеристиками, наносится методом центрифугирования, однако работа с ним требует специальных условий из-за высокой токсичности компонентов и проведения литографических операций с целью открытия окон для нанесения контакта к верхнему слою структуры. Нами разрабатывалась технология создания защитного слоя на боковой поверхности лазерного полоска полиимидом марки ФТП-1. Последний наносился из 13%-го раствора методом центрифугирования, затем подвергался формированию при плавном нагреве до 250°C и плавном охлаждении. Полученные пленки данного материала обладают очень хорошими планаризирующими свойствами, при нанесении на полосковую структуру толщина полиимида на вершине и у основания полоска различается больше, чем на порядок.

Это позволяет исключить из технологического процесса дополнительную фотолитографию с целью открывания окна для напыления омического контакта к верхнему слою структуры, заменив его сплошным травлением полиимида в кислородной плазме. Однако недостатком метода остается низкая теплопроводность [19].

Наилучшим способом изоляции мезаполосков ККЛ является зарачивание боковой стенки полуизолирующим фосфидом индия, его КТР равен  $4.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , а теплопроводность составляет 70 Вт/мК [9]. В литературе описано изготовление лазеров, зараченных фосфидом индия, с дополнительным слоем изоляции SiO<sub>2</sub> на поверхности [20–22], что требует проведения дополнительной фотолитографии для вскрытия контактного окна. Нами методом металлоорганической газофазной эпитаксии были получены слои высокоомного InP, для которого не нужен слой дополнительной электрической изоляции [11]. Кроме этого, в данном процессе не происходит осаждение фосфида индия на поверхность маскирующей пленки Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, поэтому вторую фотолитографию нам удалось заменить простым стравливанием маски в плавиковой кислоте с последующим нанесением омического контакта к верхнему слою структуры.

Весь технологический процесс описан выше. Следует только отметить, что разработанная нами технология постростовой обработки включает в себя нанесение Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, только одну фотолитографию для формирования лазерного мезаполоска, жидкостное травление структуры через комбинированную маску Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и фоторезиста, удаление фоторезиста, зарачивание фосфидом индия в присутствии маски Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, химическое удаление маскирующего слоя Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с последующим напылением омического контакта, осаждение толстого гальванического золота и вторую фотолитографию для создания разделительной сетки для раскалывания.

Результаты исследования характеристик полученных лазерных структур будут опубликованы в отдельной работе.

#### 4. Заключение

В статье проведено исследование постростового процесса с полным набором операций для достижения необходимого качества обработки лазерной структуры (ККЛ) после выращивания методом МПЭ, при последующем зарачивании ее высокоомным материалом (InP) методом МОГФЭ и формировании диэлектриков и омических контактов с помощью фотолитографии и жидкостного химического травления. Исследовано воздействие на качество структуры (профиль, чистоту и гладкость поверхности) различных химических травителей. Показана возможность достижения на имеющемся оборудовании всех необходимых для ККЛ геометрических, физических и технологических параметров структур в одном цикле постростовой обработки с упрощением процесса по сравнению с известными из литературы.

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

Авторы выражают благодарность М.М. Кулагиной за помощь в выборе травителей и С.И. Трошкову за исследование образцов на электронном микроскопе.

#### Список литературы

- [1] Р.Ф. Казаринов, Р.А. Сурис. ФТП, **5**, 797 (1971).
- [2] J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco, C. Sirtori, A.L. Hutchinson, A.Y. Cho. Science, **264**, 553 (1994).
- [3] C. Gmachl, F. Capasso, D.L. Sivco, A.Y. Cho. Rep. Progr. Phys., **64**, 1533 (2001).
- [4] A. Tahaoui, A. Matlis, S. Slivken, J. Diaz, M. Razeghi. Appl. Phys. Lett., **78**, 416 (2001).
- [5] L. Ajili, G. Scalari, J. Faist, H. Beer, E. Linfield, D. Ritchie, G. Davies. Appl. Phys. Lett., **85**, 3986 (2004).
- [6] J. Faist, V. Beck, T. Aellen. Appl. Phys. Lett., **78**, 147 (2001).
- [7] D. Hofstetter, M. Beck, T. Aellen, J. Faist, U. Oesterle, M. Ilegems, E. Gini, H. Melchior. Appl. Phys. Lett., **78**, 1964 (2001).



- [8] В.В. Мамутин, В.М. Устинов, J. Boettcher, H. Kuenzel. ФТП, **44**, 995 (2010).
- [9] A. Tsekoun, R. Go, M. Pushkarsky, M. Razeghi, C.K.N. Patel. PNAS (Proc. Nat. Acad. Sci. USA), **103**, 4831 (2006).
- [10] A. Evans, S.R. Darvish, S. Slivken, J. Nguyen, Y. Bai, M. Razeghi. Appl. Phys. Lett., **91**, 071 101 (2007); M. Chashnikova, G. Monastyrskiy, A. Aleksandrova, M. Klinkmüller, M.P. Semtsiv, W.T. Masselink. Appl. Phys. Lett., **100**, 213 504 (2012).
- [11] В.В. Мамутин, Н.Д. Ильинская, Б.В. Пушный, Р.В. Левин, Ю.М. Шерняков. Письма ЖТФ, **39**, 32 (2013).
- [12] V.V. Mamutin, V.M. Ustinov, N.D. Ilyinskaya, M.V. Baydakova, B.Y. Ver, D.Y. Kasantsev. J. Phys.: Conf. Ser., **291**, 012008 (2011).
- [13] В.В. Мамутин, В.М. Устинов, J. Boettcher, H. Kuenzel. Письма ЖТФ, **36** (9), 34 (2010).
- [14] A. Bismuto, S. Riedi, B. Hinkov, M. Beck, J. Faist. Semicond. Sci. Technol., **27**, 045 013 (2012).
- [15] R. Blanchard, C. Grezes, S. Menzel, C. Pflu, L. Diehl, Y. Huang, Jae-Hyun Ryou, Russell D. Dupuis, Federico Capasso. Appl. Phys. Lett., **100**, 033502 (2012).
- [16] A. Bismuto, M. Beck, J. Faist. Appl. Phys. Lett., **98**, 191 104 (2011).
- [17] P. Fuchs, J. Semmel, J. Friedl, S. Höfling, J. Koeth. Appl. Phys. Lett., **98**, 211 118 (2011).
- [18] J.S. Yu, S. Slivken, S.R. Darvish, A. Evans, B. Gokden, M. Razeghi. Appl. Phys. Lett., **87**, 041 104 (2005).
- [19] M.P. Semtsiv, M. Ziegler, S. Dressler, W.T. Masselink, N. Georgiev, T. Dekorsy, M. Helm. Appl. Phys. Lett., **85**, 1478 (2004).
- [20] A. Evans, J.S. Yu, J. David, L. Doris, K. Mi, S. Slivken, M. Razeghi. Appl. Phys. Lett., **84**, 314 (2004).
- [21] A. Evans, S.R. Darvish, S. Slivken, J. Nguyen, Y. Bai, M. Razeghi. Appl. Phys. Lett., **91**, 071 101 (2007).
- [22] Y. Bai, N. Bandyopadhyay, S. Tsao, E. Selcuk, S. Slivken, M. Razeghi. Appl. Phys. Lett., **97**, 251 104 (2010).

Редактор Л.В. Шаронова

## Postgrowth processing investigation for quantum cascade lasers

V.V. Mamutin, N.D. Ilyinskaya, D.A. Bedarev,  
R.V. Levin, B.V. Pushnyi

Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** We demonstrate postgrowth investigation of structures for quantum cascade lasers with overgrowth of high-resistance material (InP with carrier concentration  $n \approx 5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ), special wet photolithographic process of specific contact preparation for high heat sink. Using a modifying processing sequence adjusted for quantum cascade lasers allows to achieve parameters satisfying to requirements for state of the art devices.