

УДК 546.685.004

СОЗДАНИЕ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ФОСФИДЕ ИНДИЯ ДЛЯ ТОРЦЕВЫХ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ПРИБОРОВ

© 2019 г. М. Г. Васильев^{1, *}, А. Д. Изотов¹, С. Ф. Маренкин¹, А. А. Шелякин¹¹Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук, Россия, 119991 Москва, Ленинский пр., 31

*e-mail: mgvas@igic.ras.ru

Поступила в редакцию 10.09.2018 г.

Изучено взаимодействие травителей и их смесей с подложками InP семейства плоскостей {100}. Установлено, что выступающие или углубленные меза-полоски в виде каналов, ограниченных семейством плоскостей различной полярности: {111}A, {111}B, {110}, {112}A или {221}A, могут быть получены при соответствующем подборе травителя и ориентации маскирующего покрытия. Отмечено, что огранка меза-полосков осуществлялась наиболее плотноупакованными плоскостями, причем в случае полярности свойств огранка осуществляется плоскостями с малой скоростью растворения ({111}A для решетки сфалерита). Показано, что расположение наиболее плотноупакованных плоскостей {111}A и {111}B различно относительно базовых плоскостей(110) и (110).

Ключевые слова: фосфид индия, травление, профилированные поверхности, меза-полоски

DOI: 10.1134/S0002337X19010172

ВВЕДЕНИЕ

Улучшение характеристик кварцевого волокна с минимальными потерями на $\lambda = 1.3$ и 1.5 мкм привело к интенсивным исследованиям системы In–Ga–As–P для получения полупроводниковых лазеров и фотоприемных устройств на этих длинах волн [1, 2]. Для их создания необходимо выращивание изопериодных гетероструктур на подложках InP. В связи с этим возник интерес к физико-химическим свойствам InP, а также методом химической обработки и создания профилированных поверхностей на этом материале.

В лазерных диодах особенно важен контроль модового состава спектра излучения и, в частности, контроль поперечных мод [3], который часто достигается за счет проведения процесса зарастивания на профилированных подложках в форме выступающих меза-полосков, в виде каналов или террас [4–8].

Некоторые особенности травления InP, GaAs и других соединений A^{III}B^V описаны в [9–11]. Тем не менее, нет четкого представления о создании полосковых структур методом химического травления InP и их последующего зарастивания эпитаксиальными методами.

В данной работе проведены исследования по оптимизации состава травителя, типа маскирующего покрытия и ориентации направления полосков для получения различных полосковых форм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования использовались стандартные подложки InP {100}, *n*-типа проводимости с концентрацией носителей заряда $1 \times 10^{18} - 5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Образцы механически полировались до толщины 320 ± 10 мкм. После механической полировки образцы тщательно отмывались в органических растворителях и травились в полирующем травителе Вг:СН₃СООН для снятия поверхностного нарушенного слоя материала (~10 мкм). В качестве маскирующего покрытия для последующих травлений была использована пленка SiO₂, нанесенная с использованием пиролитической реакции SiH₄ и O₂ при температуре подложки InP 450°C. Толщина оксидной пленки составляла 0.15 мкм. Полоски формировались в направлениях [110] или $\bar{[110]}$. Направление определялось с помощью травления фрагмента подложки InP ~1 мм шириной с последующим травлением в концентрированной HCl более 2 мин.

На поверхности фрагмента подложки InP образовывались характерные фигуры травления, позволяющие ориентировать полоски вдоль направления [110]. Перпендикулярное направление определялось как $\bar{[110]}$. Меза-полоски формировались с использованием стандартной техники фотолитографии. Ширина полоска составляла 10 мкм, интервал между полосками – 400 мкм. Для снятия

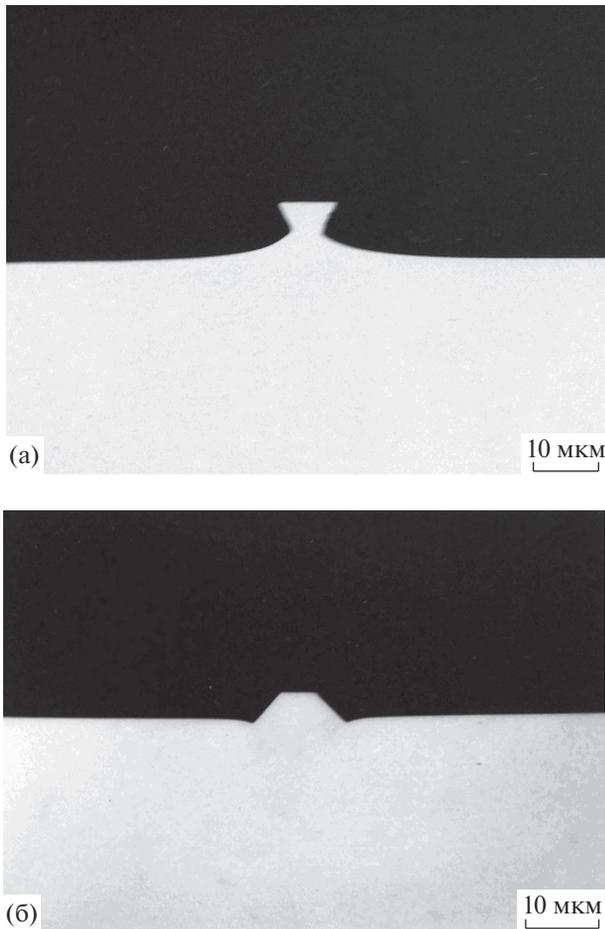


Рис. 1. Форма мезы: а – тип “ласточкин хвост” вдоль направления $[110]$; б – тип “холм” вдоль направления $[110]$.

SiO_2 использовали буферный травитель HF. Последующее травление для создания меза-полосковой структуры осуществлялось при комнатной температуре с нормальными условиями освещенности и легким перемешиванием раствора. Скалывание для определения геометрических размеров осуществлялось параллельно плоскостям $\{110\}$. Скорость травления вычислялась по глубине травления, определяемой по сколу с помощью оптического микроскопа МБИ-11. Все представленные микро-фотографии также получены с помощью оптического микроскопа МБИ-11.

В качестве травителя был использован $\text{Vg}:\text{CH}_3\text{COOH}$, который является предпочтительным для InP [11]. Его скорость травления трудно проконтролировать, но качество получаемой поверхности обычно очень хорошее. Были использованы различные объемные соотношения $\text{Vg}:\text{CH}_3\text{COOH} - 1:160, 1:80, 1:25, 1:9$. Форма меза-полосковой конструкции при различных соотношениях травителя не менялась. Наиболее удобным, на наш взгляд, оказалось соотношение $\text{Vg}:$

$\text{CH}_3\text{COOH} = 1:9$. Скорость травления данного травителя была около 2 мкм/мин на образцах без маскирующего покрытия.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование меза-полосковой структуры проводилось путем химического травления в смеси $\text{Vg}:\text{CH}_3\text{COOH} = 1:9$. В зависимости от ориентации маскирующих полосок получали два типа меза-структур (рис. 1). Никаких отклонений не обнаружено на тестовом многослойном образце, состоящем из InP, легированного оловом до концентрации $n = 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{As}_{0.63}\text{P}_{0.37}$, легированного оловом до $n = (1-4) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, толщиной 0.1–0.5 мкм и InP, легированного цинком до концентрации $p = (5-10) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, толщиной 2.5–3.0 мкм. Однако наблюдалась селективность в травлении монокристалла и его границе наиболее плотноупакованными плоскостями.

В случае полярности свойств кристаллов огранка осуществляется плоскостями с малой скоростью растворения ($\{111\}A$ для решетки сфалерита). Анализ плоскостей (110) и $(\bar{1}\bar{1}0)$ показал [12], что расположение наиболее плотноупакованных плоскостей $\{111\}A$ и $\{111\}B$ относительно них различно (рис. 2). Поэтому при травлении слоя фосфида индия с ориентацией полоска вдоль направления $[110]$ меза-полосок имеет форму “ласточкин хвост” и огранен плоскостями $(11\bar{1})$ и $(\bar{1}\bar{1}1)$, расположенными под углом $125^\circ 16'$ к (001) , и плоскостями $(11\bar{2})$ и $(\bar{1}\bar{1}2)$ (угол $35^\circ 16'$). Если травление проводилось вдоль направления $[\bar{1}\bar{1}0]$, то меза-полосок имел форму типа “холм” и был огранен плоскостями (111) и $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$, расположенными под углом $54^\circ 44'$ к (001) .

Были изучены скорости травления подложек фосфида индия с различной кристаллографической ориентацией: $(111)A$, $(111)B$, (100) , (001) . Изменение скорости травления подложек с разной ориентацией приведено на рис. 3. Видно, что $v_{(111)B} > v_{(100)} > v_{(111)A}$. Следует отметить, что медленно травящаяся плоскость $(111)A$ всегда остается матовой, в то время как плоскости $(111)B$, (100) и (001) – зеркальные. Столь значительные различия в скоростях травления по различным кристаллографическим направлениям, по-видимому, связаны с полярными свойствами решетки сфалерита [12] в направлении $[111]$.

Динамика травления комбинации граней меза-полосков в травителе $\text{Vg}:\text{CH}_3\text{COOH}$ зависит от индексов этих граней по отношению к направлению $[110]$ (рис. 4). Исследования показали, что наличие комбинации плоскостей играет важную роль в определении скорости травления меза-по-

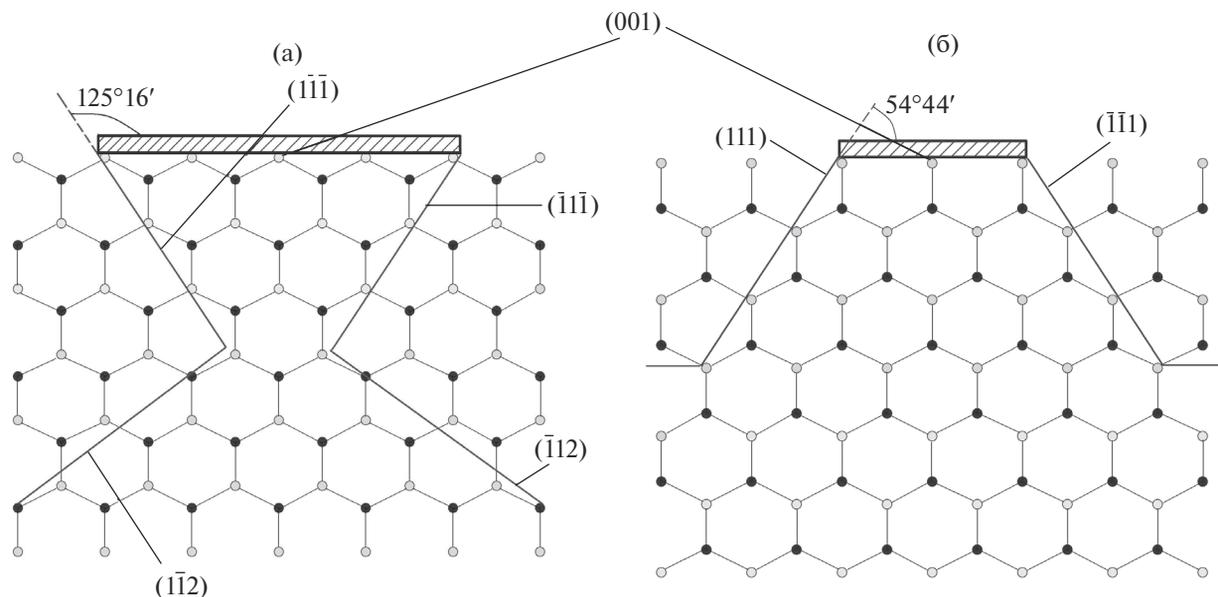


Рис. 2. Кристаллографическая ориентация меза-полосков на плоскости (001): а – вдоль направления [110], б – вдоль направления $[\bar{1}\bar{1}0]$.

лоска и может завуалировать различие скоростей травления некоторых низко-индексных плоскостей. Это происходит благодаря поверхностной диффузии адсорбированных на маске молекул травителя. В настоящей работе установлено, что эффект значительно уменьшается при перемешивании.

Рассмотрим профили меза-полосков канального типа и скорости травления граней при вскрытии полосков вдоль направлений [110] и $[\bar{1}\bar{1}0]$ на плоскости фосфида индия (001). В качестве маскирующего покрытия использовали пленки SiO_2 , полу-

ченные методом пиролиза моносилана. Температура подложки при этом составляла 450°C . Ширина вскрытого полоска составляла 10 мкм, интервал между полосками – 400 мкм. В зависимости от ориентации получали два типа меза-полосков канального типа (рис. 5). Огранка меза-полосков канального типа ничем не отличалась от огранки выступающих меза-полосков как по набору плоскостей, так и по углам их расположения.

С практической точки зрения при создании лазерных диодов особый интерес представляют меза-полоски с минимальными размерами обла-

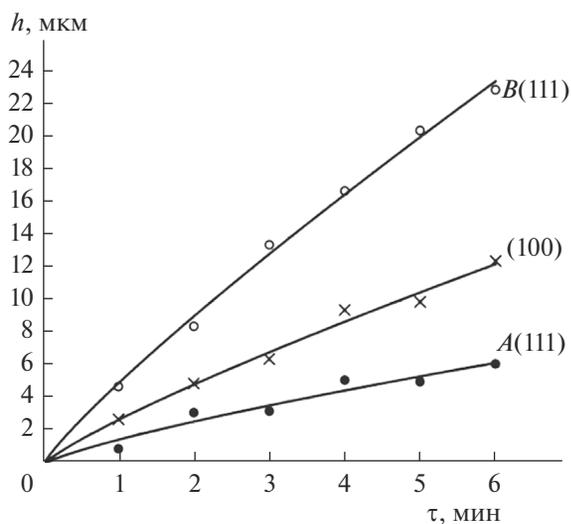


Рис. 3. Скорости травления подложек с разной ориентацией фосфида индия.

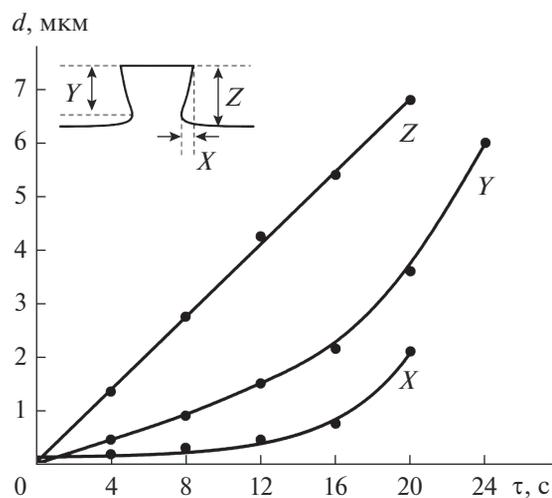


Рис. 4. Динамика травления комбинации граней меза-полосков в травителе $\text{Br}:\text{CH}_3\text{COOH}$.

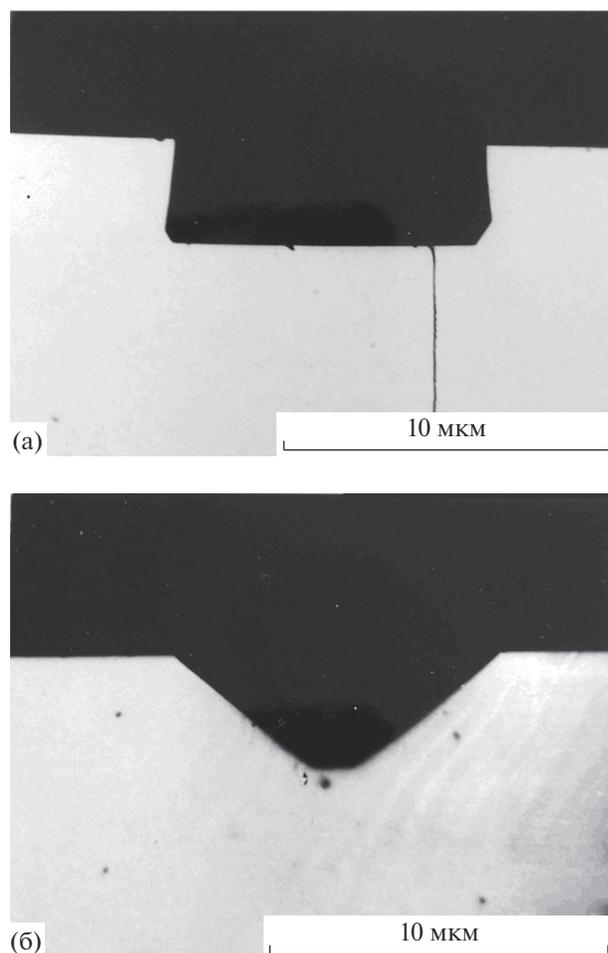


Рис. 5. Меза-полоски канального типа: а – вдоль направления [110], б – вдоль направления [110].

сти излучения, т.е. полоски типа “ласточкин хвост”, что позволяет получать низкие рабочие токи, одномодовый режим работы лазерного диода с высокой эффективностью прибора [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование различных форм травления меза-полосковых структур, сформированных на фосфиде индия. Выявлены закономерности механизма травления, связанные с ориентацией полосков на подложках фосфида индия. Установлены оптимальные режимы создания полосковых структур двух типов: “ласточкин хвост” и “холм”, что позволяет создавать лазерные диоды зарощенного типа с малыми рабочими токами и высокой квантовой эффективностью. Установлены оптимальные режимы создания меза-полосковых структур двух типов канального профиля. Выявлены условия для создания меза-полосковых

структур типа “ласточкин хвост”, которые являются оптимальными для лазерных диодов с зарощенной активной областью.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках госзадания ИОНХ РАН (тема № 0088-2014-0003) при частичной поддержке программы Президиума РАН I.35 “Научные основы создания новых функциональных материалов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gen-ei K., Tanioka A., Suhara H., Chinen K. High Coupled Power 1.3 μm Edge Emitting Light-Emitting Diode with a Rear Window and an Integrated Absorber // *Appl. Phys. Lett.* 1988. V. 53. № 13. P. 1138–1140.
2. Bowers E., Burrus C.A. Ultrawide-Band Long-Wavelength p-i-n Photodetectors // *J. Lightwave Technology.* 1987. LT-5. № 10. P. 1339–1350.
3. Голикова Е.Г., Горбылев В.А., Ильин Ю.В., Курешов В.А., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Рябоштан Ю.А., Симаков В.А., Тарасов И.С., Третьякова Е.А., Фетисова Н.В. Мезаполосковые одномодовые InGaAsP лазеры раздельного ограничения с двойной гетероструктурой, полученные методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений // *Письма в ЖТФ.* 2000. Т. 26. № 7. С. 57–63.
4. Mito I., Kitamura M., Kaede K. et al. InGaAsP Planar Buried Heterostructure Laser Diode (PBH-LD) with Very Low Threshold Current // *Electron. Lett.* 1982. V. 18. P. 2–3.
5. Mito I., Kitamura M., Kobayashi K. Double-Channel Planar Buried-Heterostructure Laser Diode with Effective Current Confinement // *Electron. Lett.* 1982. V. 18. P. 953–954.
6. Ishikawa H., Imai H., Tanahashi T. et al. V-Grooved Substrate Buried Heterostructure InGaAsP/InP Laser Emitting at 1.3 μm Wavelength // *IEEE J. Quantum Electron.* 1982. V. QE-18. P. 1704–1711.
7. Васильев М.Г., Васильев А.М., Изотов А.Д., Шелякин А.А. Создание и исследование высокотемпературного лазерного диода с длиной волны излучения 1310 нм на основе зарощенных гетероструктур InP/GaInAsP // *Неорган. материалы.* 2014. Т. 50. № 9. С. 963–967. doi 10.7868/S0002337X14090176
8. Васильев М.Г., Васильев А.М., Шелякин А.А. Разработка мощного полупроводникового лазера на основе зарощенных гетероструктур InP/GaInAsP с полосой модуляции до 10 ГГц // *Неорган. материалы.* 2010. Т. 46. № 9. С. 1128–1133.
9. Бахадирханов М.К., Ибрагимов Ш.Б., Камолов И.Р. Влияние химической обработки на поверхностные состояния и электрофизические характеристики Au-n-InP структур // *Электронная обработка материалов.* 2004. № 2. С. 92–95.

10. Сычикова Я.А., Кидалов В.В., Сукач Г.А. Влияние кристаллографической ориентации на формирование пористой поверхности фосфида индия // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии/ Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies. 2010. Т. 8. № 1. С. 91–99.
11. Безрядин Н.Н., Котов Г.И., Арсентьев И.Н., Власов Ю.Н., Стародубцев А.А. Влияние финишной подготовки поверхности арсенида галлия на спектр электронных состояний n -GaAs(100) // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46. № 6. С. 756–760.
12. Васильев М.Г., Родченкова Л.А., Селин А.А., Шелякин А.А. Особенности локальной эпитаксии фосфида индия из жидкой фазы // Изд. АН СССР Неорган. материалы. 1984. Т. 20. № 5. С. 841–843.
13. Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Фетисова Н.В., Голикова Е.Г., Рябоштан Ю.А., Тарасов И.С. Мощные одномодовые лазерные диоды на основе квантово-размерных гетероструктур ($\lambda = 1.3$ – 1.6 мкм) // Физика и техника полупроводников. 2002. Т. 36. № 11. С. 1393–1399.