

Влияние ионной очистки поверхности излучающего скола 9xx нм лазерных диодов на основе InGaAs/AlGaAs/GaAs на их предельную мощность излучения

© А.С. Токарев¹, О.А. Лапшина^{1,¶}, А.А. Козырев^{1,2,3}

¹ ООО „НПП „Инжект“,
410033 Саратов, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
115409 Москва, Россия

³ Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410012 Саратов, Россия

¶ E-mail: oksana.sh63@mail.ru

Поступила в Редакцию 22 июля 2022 г.

В окончательной редакции 7 декабря 2022 г.

Принята к публикации 16 января 2023 г.

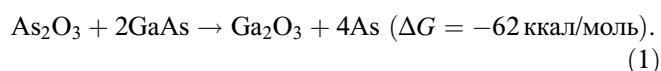
Сообщается об исследовании влияния ионной очистки поверхности излучающего скола 9xx нм лазерных диодов на основе InGaAs/AlGaAs/GaAs на их предельную мощность излучения. Был проведен анализ измерений предельной мощности и процент лазерных диодов, имеющих визуальные проявления оптической катастрофической деградации в активной области. Обнаружено, что кратковременная (1 мин) низкоэнергетичная обработка ионами аргона и водорода не приводит к изменению параметров лазерных диодов, в то время как обработка ионами азота приводит к снижению предельной мощности и увеличению вероятности появления оптической катастрофической деградации. Также показано, что использование ионного источника на основе электронно-циклотронного резонанса приводит к лучшим результатам, по сравнению с источником холлового типа или радиочастотным источником с индуктивно-связанной плазмой, за счет меньшей энергии ионов.

Ключевые слова: ионная очистка, лазерный диод, катастрофическая оптическая деградация, предельная мощность, пассивация, нитридизация.

DOI: 10.21883/FTP.2023.01.54931.3952

1. Введение

В настоящее время активно развиваются методы, позволяющие увеличить предельную мощность лазерных диодов и их срок службы [1–3]. Одним из таких методов является пассивация поверхности излучающей грани полупроводниковых лазеров. Термин „пассивация“ означает, что снижается химическая активность поверхности полупроводника, снижается количество безызлучательных центров рекомбинации, удаляются оксиды, присутствующие на поверхности [4]. Одной из задач пассивации является удаление оксидов галлия и мышьяка с поверхности. Сами оксиды не оказывают отрицательного воздействия на характеристики лазерных диодов, однако, как было показано при расчете фазовых диаграмм системы Ga-As-O, (Thurmond и др. [5]), As₂O₃ не может существовать в термодинамическом равновесии с GaAs. Оксид мышьяка, образующийся на поверхности скола арсенида галлия в атмосфере, медленно взаимодействует с GaAs даже при комнатной температуре [6]:



В результате образуется подповерхностный сегрегированный слой атомов мышьяка, являющихся безызлу-

чательными центрами рекомбинации. Соответственно, цель пассивации излучающего скола сводится к обеспечению отсутствия кислорода на поверхности арсенида галлия. Эта задача может решаться несколькими способами. Первый подход к решению этой задачи заключается в создании таких условий скальвания, при которых образованный скол не имеет доступа к кислороду. Это можно обеспечить скальванием в сверхвысоком вакууме [7–9].

Второй подход заключается в том, что во время скальвания не принимаются меры по предотвращению окисления, но перед осаждением защитного покрытия проводится ионная очистка поверхности низкоэнергетичными ионами водорода [10–13], азота [13,14] либо аргона [15,16] с целью удаления образовавшихся во время выдержки в атмосфере оксидов. Второй подход более прост в реализации, так как не требует манипуляций с хрупкой полупроводниковой пластиной в вакууме или в инертной среде, однако из-за возможности образования радиационных дефектов ряд авторов отмечают, что обработка низкоэнергетичными ионами может привести к снижению предельной мощности и сроку службы лазерных диодов [4,17]. В связи с этим в данной работе было проведено исследование влияния ионной очистки поверхности излучающего скола 9xx нм

лазерных диодов на основе InGaAs/AlGaAs/GaAs на их предельную мощность излучения.

2. Методика эксперимента

Для исследования влияния ионной очистки излучающей грани лазерных диодов на их предельную мощность использовалась полупроводниковая структура с длиной волны 965 нм, содержащая Al в волноводных и эмиттерных слоях (мольная доля алюминия (x), составляет до 0.3 и до 0.5 соответственно), и квантовой ямой InGaAs [18].

Для того чтобы исключить влияние типа ионного источника на результаты эксперимента, в работе ионная очистка поверхности осуществлялась на трех различных типах ионных источников. Первый тип — ионный источник холловского типа (End Hall) производства ООО „Изовак“, второй — ионный источник на основе электронно-циклотронного резонанса (PCS-ECR) производства SPECS GmbH, третий — ионный радиочастотный источник с индуктивно-связанной плазмой (RF-ICP) Сорга производства CCR GmbH. Для очистки использовались азот, водород и аргон.

Для минимизации внесения радиационных дефектов время обработки во всех случаях было минимальным и составило 1 мин. Режим работы всех источников был также выбран таким, чтобы энергия ионов была минимальной. ECR источник работал в режиме атомного пучка (Atom Beam Mode), при котором генерация плазмы происходила только за счет питания магнетрона током 50 мА без дальнейшего ускорения образованных в плазме ионов, с энергиями ≤ 10 эВ. Таким образом, поток на выходе из источника состоял преимущественно из атомов и молекул. RF-ICP источник работал при мощности 1000 Вт, при которой обеспечивается наиболее высокая плотность ионного тока и энергия ионов от 15 эВ. Источник холловского типа работал на минимально возможном напряжении, обеспечивающем генерацию плазмы и составившем 50 В, при котором происходила ионизация подаваемого в источник газа. Энергия ионов при этом составила 30 эВ. Необходимо отметить, что на источнике холловского типа не удалось добиться появления ионного тока при подаче в него водорода, однако результаты этого эксперимента все же представлены в данной работе, поскольку часть подаваемого газа могла ионизироваться на раскаленной вольфрамовой спирали, а часть — в промежутке между анодом и катодом.

После проведения процесса ионной очистки кассеты с линейками лазерных чипов извлекались из вакуумной камеры с ионным источником и переносились в вакуумную установку „Ортус“ (ООО „Изовак“) с электронно-лучевым испарителем и ионным источником ассистирования холловского типа для нанесения защитного покрытия на излучающую грань. Давление в камере перед началом процесса пассивации составило 10^{-4} Па,

температура 150°C . На выходную грань лазерных диодов было нанесено четвертьволновое ($\lambda/4$) покрытие Al_2O_3 методом электронно-лучевого испарения с ионным ассистированием кислородом. На заднюю грань наносилось четвертьволновое интерференционное покрытие $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ из 16 слоев, обеспечивающее коэффициент отражения $> 99\%$.

Аналогичный процесс напыления переднего и заднего зеркала был осуществлен на кассету с референсными линейками лазерных чипов, которые не подвергались предварительной ионной очистке и загружались в вакуумную установку сразу после скрайбирования полупроводниковой пластины.

Измерение предельной мощности смонтированных лазерных диодов осуществлялось в импульсном режиме, при частоте следования импульсов 50 Гц и длительности 1.15 мкс. Контроль заданного тока осуществлялся на осциллографе Tektronix TDS 2012C, измерение мощности излучателя выполнялось сферой фотометрической СФ-007/2 с измерителем ИМИ-03Т.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Перечень экспериментов приведен в таблице.

По результатам каждого эксперимента на подложки из AlN было смонтировано по 10 лазерных диодов с длиной резонатора 4 мм и шириной излучающей области 90 мкм. Ультразвуковая микросварка контактов к n -стороне кристалла осуществлялась золотой проволокой методом „шарик-клин“. Внешний вид смонтированного лазерного диода представлен на рис. 1.

Для каждого чипа была измерена ватт-амперная характеристика. Ток накачки увеличивался до тех пор, пока не наблюдалось скачкообразное падение мощности. Среднее значение предельной мощности с доверительным интервалом 3σ приведено на рис. 2.

Как следует из рис. 2, воздействие ионов азота на поверхность излучающего скола приводит к снижению предельной мощности лазерных диодов. В то время как

Перечень экспериментов по исследованию влияния ионной очистки на предельную мощность лазерных диодов

| № эксперимента | Тип источника | Газ |
|----------------|---------------|--------------|
| 1 | — | — |
| 2 | RF-ICP | N_2 |
| 3 | RF-ICP | Ar |
| 4 | RF-ICP | H_2 |
| 5 | PCS-ECR | N_2 |
| 6 | PCS-ECR | Ar |
| 7 | PCS-ECR | H_2 |
| 8 | End Hall | N_2 |
| 9 | End Hall | Ar |
| 10 | End Hall | H_2 |

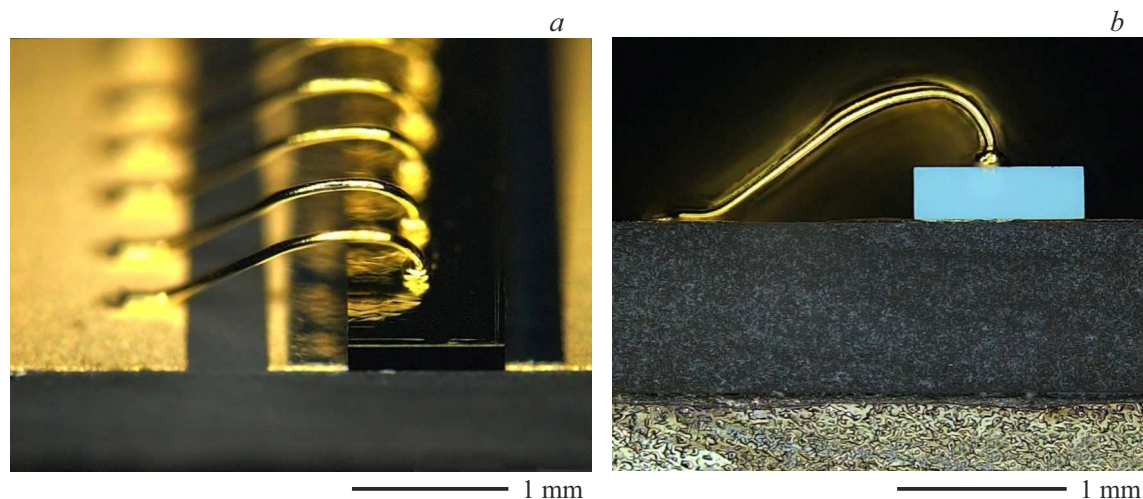


Рис. 1. Смонтированный лазерный диод на контактной пластине: *a* — вид сверху, *b* — вид спереди.

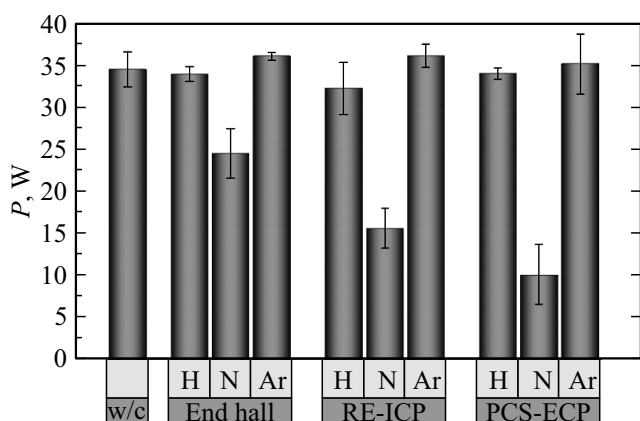
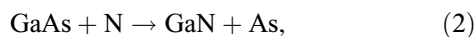


Рис. 2. Диаграмма зависимости средней предельной мощности лазерных диодов в зависимости от типа ионной очистки.

воздействие ионов водорода и аргона не приводит к изменению предельной мощности. Полученный результат согласуется с работами [19,20], в которых было показано, что нитризация поверхности скола лазерного диода может приводить к отрицательным результатам из-за протекающей реакции:



в результате которой, так же, как и в случае реакции с кислородом, образуются атомы мышьяка, являющиеся безызлучательными центрами рекомбинации. В то же время, как следует из рис. 2, кратковременное (1 мин) воздействие низкоэнергетичных ионов не приводит к возникновению радиационных дефектов в количестве, достаточном для снижения предельной мощности, что согласуется с данными авторов работы [17], в которой негативное влияние ионной очистки с помощью аргона начало проявляться после 2 ч ионной очистки.

Дополнительно каждый лазерный диод был исследован на наличие признаков катастрофической оптической деградации (КОД) в активной области со стороны излучающей грани с помощью светлопольной микроскопии. Пример оптической деградации после достижения лазерным диодом предельной мощности представлен на рис. 3.

Необходимо отметить, что визуально деградация наблюдалась только на части лазерных диодов, другая же часть не имела признаков разрушения, несмотря на необратимое падение мощности. На основании полученных данных была построена статистическая диаграмма, приведенная на рис. 4, показывающая, какой процент лазерных диодов после достижения предельной мощности имел видимые разрушения активной области и волновода.

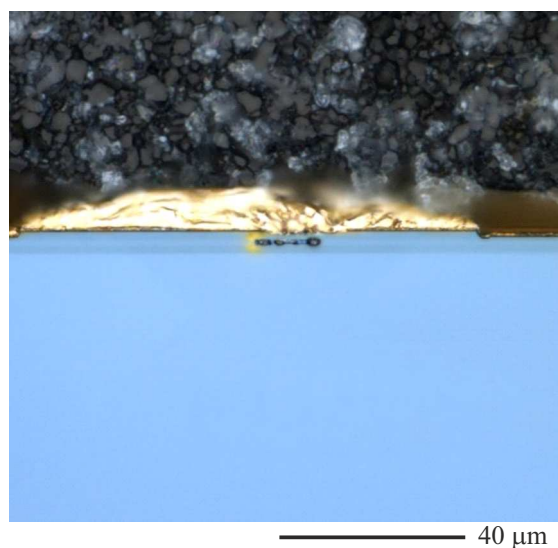


Рис. 3. Оптическая катастрофическая деградация в активной области лазерного диода.

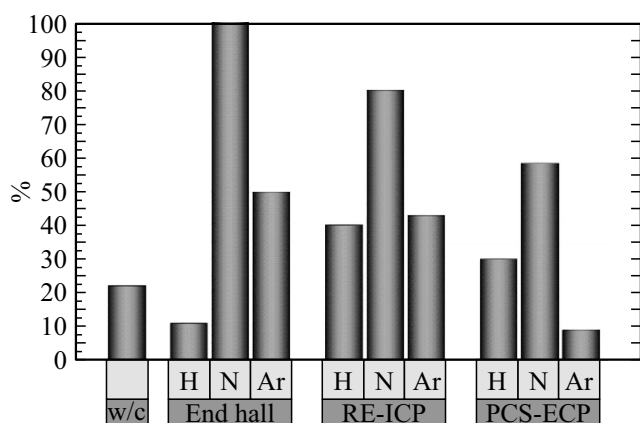


Рис. 4. Диаграмма зависимости процента лазерных диодов, на которых имелись визуальные признаки оптической деградации, от режима ионной очистки.

Как следует из рис. 4, наибольший процент визуально наблюдаемой оптической деградации принадлежит диодам, обработанным ионами азота, что согласуется с данными измерений средней предельной мощности (рис. 2). Кроме этого, можно заметить, что лазерные диоды, которые обрабатывались с помощью ECR источника, имеют наименьший процент визуально наблюдаемой КОД, что может быть связано с тем, что этот тип источника обеспечивает наименьшую энергию ионов в плазме. При этом у лазерных диодов, обработанных водородом с помощью холловского источника, процент наблюдаемой деградации незначительно (на 10%) отличается от таковой для диодов без обработки. Также предельная мощность этих лазерных диодов и лазерных диодов без ионной обработки совпадает в пределах доверительного интервала. Оба этих обстоятельства свидетельствуют о том, что в отсутствие ионного тока ионизацией водорода в анодном промежутке и на раскалённой вольфрамовой спирали можно пренебречь. У лазерных диодов, обработанных аргоном и водородом с помощью ECR источника, процент наблюдаемой деградации также незначительно ($\leq 10\%$) отличается от таковой для диодов без обработки. При этом, в случае обработки этими газами с помощью источника RF-ICP, наблюдается увеличение процента диодов с катастрофической деградацией. Это может быть связано с тем, что при работе RF-ICP сеточного источника происходит незначительное распыление его вольфрамовой сетки, что приводит к загрязнению обрабатываемой поверхности.

4. Заключение

В результате проведенных экспериментов было показано, что кратковременная (1 мин) низкоэнергетичная обработка ионами аргона и водорода с помощью источников ионов End Hall, PCS-ECR и RF-ICP излучающего скола 9xx нм лазерных диодов на основе

InGaAs/AlGaAs/GaAs не приводит к снижению предельной мощности. При этом вероятность возникновения визуально наблюдаемой катастрофической оптической деградации не увеличивается в случае обработки ионами аргона с помощью PCS-ECR источника. Низкоэнергетичная обработка ионами азота, независимо от типа используемого ионного источника, приводит к снижению предельной мощности и увеличению вероятности возникновения визуально наблюдаемой катастрофической оптической деградации. Кроме этого, использование источника типа PCS-ECR приводит к лучшим результатам по сравнению с источником End Hall и RF-ICP за счет меньшей энергии ионов.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (договор № 02.а03.21.0005).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Y. Liu, K. Ebadi, A.K. Sunnetcioglu, S. Gundogdu, S. Sengul, Y. Zhao, Y. Lan, Y. Zhao, G. Yang, A. Demir. *Opt. Express*, **30** (18), 31539 (2022).
- [2] H. Xu, X. Li, L. Yan. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci.*, **772**, 012050 (2021).
- [3] H.-W. Xu, X.-J. Li, L.-H. Yan, J.-L. Niu, J.-F. Ning, H.-T. Peng, Y. Zhang. *IOP Conf. Series: J. Phys.: Conf. Ser.*, **1176**, 042033 (2019).
- [4] R.W. Lambert, T. Ayling, A.F. Hendry, J.M. Carson, D.A. Barrow, S. McHendry, C.J. Scott, A. McKee, W. Meredith. *J. Light. Technol.*, **24** (2), 956 (2006).
- [5] C.D. Thurmond, G. Schwartz, G.W. Kammlott, B. Schwartz. *J. Electrochem. Soc.*, **127** (6), 1366 (1980).
- [6] F. Capasso, G. Williams. *J. Electrochem. Soc.*, **129** (4), 821 (1982).
- [7] L. Tu, E. Schubert, M. Hong, G. Zyzdik. *J. Appl. Phys.*, **80** (11), 6448 (1996).
- [8] T. Muro, Y. Kato, T. Kinoshita, Y. Watanabe. *Rev. Sci. Instrum.*, **81** (4), 1 (2010).
- [9] X. Wang, L. Zhu, Y. Zhao, J. Kong, C. Wang, C. Xiong, X. Ma, S. Liu. *Infr. and Laser Eng.*, **48** (1), 0105002 (2019).
- [10] P. Ressel, G. Erbert, U. Zeimer, K. Hausler, G. Beister, B. Sumpf, A. Klehr, G. Trankle. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **17** (5), 962 (2005).
- [11] O. Richarda, S. Blaisb, R. Arésa, V. Aimeza, A. Jaouad. *Microelectron. Eng.*, **233**, 11139 (2020).
- [12] J.E. Boschker, U. Spengler, P. Ressel, M. Schmidbauer, A. Mogilatenko, A. Knigge. *IEEE Photon. J.*, **14** (3), 1531606 (2022).
- [13] Y. Wang, H. Qu, Y. Wang, F. Dong, Z. Chen, W. Zheng. *ACS Omega*, **4** (23), 20205 (2019).
- [14] C. Silfvenius, Y. Sun, P. Blixt, C. Lindstroem, A. Feitisch. *SPIE*, **5711**, 189 (2005).

- [15] S. Xiongwen, X. Chen, T. Zeng-xia, S. Guang-di. Chinese Phys. Lett., **23** (1), 124 (2006).
- [16] Y. Lan, G. Yang, Y. Zhao, Y. Liu, A. Demir. Appl. Surf. Sci., **596**, 15350 (2022).
- [17] J. Hashimoto, N. Ikoma, M. Murata, J. Fukui, T. Nomaguchi, T. Katsuyama. Japanese J. Appl. Phys., **39** (5), 2761 (2000).
- [18] Н.А. Волков, К.Ю. Телегин, Н.В. Гультиков, Д.Р. Сабитов, А.Ю. Андреев, И.В. Яроцкая, А.А. Падалица, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, Л.И. Шестак, А.А. Козырев, В.А. Парнин. Квант. электрон., **52** (2), 1 (2022).
- [19] S.S. Anantathanasarn, S. Ootomo, T. Hashizume, H. Hasegawa. Appl. Surf. Sci., **159**, 456 (2000).
- [20] V. Augelli, T. Ligonzo, A. Minafra, L. Schiavulli, V. Capozzi, G. Perna, M. Ambrico, M. Losurdo. J. Luminesc., **102–103**, 519 (2003).

Редактор Г.А. Оганесян

Influence of ion cleaning of front facet of 9xx nm InGaAs/AlGaAs/GaAs diode lasers on their maximal output power

A.S. Tokarev¹, O.A. Lapshina¹, A.A. Kozyrev^{1,2,3}

¹ ООО „NPP „Inject“,
410033 Saratov, Russia

² National Research Nuclear University МЕРФИ,
115409 Moscow, Russia

³ Saratov State University,
410012 Saratov, Russia

Abstract This paper reports on the study of the effect of ion cleaning of emitting cleaved facet of 9xx nm laser diodes based on InGaAs/AlGaAs/GaAs on their limiting radiation power. Measured maximal power and the percentage of laser diodes with a visual manifestation of catastrophic optical damage in the active region were analyzed. It was found that short-term (1 min) low-energy treatment with argon and hydrogen ions does not lead to changes in the parameters of laser diodes, while treatment with nitrogen ions results in a decrease in the maximal output power and an increase in the probability of catastrophic optical damage. It is also shown that the use of an ion source based on electron cyclotron resonance leads to better results compared to a End Hall source or radiofrequency source with inductively coupled plasma, due to the lower energy of the ions.