

УДК 621.373.826.038

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ СТРУКТУР AlGaIn/InGaIn/GaN В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ ЛАЗЕРОВ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ НА ИХ ОСНОВЕ С ЭЛЕКТРОННОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ

© 2019 г. М. М. Зверев¹*, Н. А. Гамов¹, Н. И. Гладышев¹, Е. В. Жданова¹, Д. Е. Локтионов¹, В. Б. Студенов¹, В. А. Курешов², А. В. Мазалов², Д. Р. Сабитов², А. А. Падалица², А. А. Мармалюк², В. И. Козловский³, В. Б. Митюхляев⁴

¹Московский технологический университет МИРЭА, 119454 Москва, Россия

²ОАО НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха, 117342 Москва, Россия

³Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

⁴АО НИЦПВ, 119421 Москва, Россия

*E-mail: mzverev@mail.ru

Поступила в редакцию 10.04.2018 г.

После доработки 10.04.2018 г.

Принята к публикации 10.04.2018 г.

В процессе работы лазеров с оптической и электронной накачкой импульсно-периодического действия на основе структур AlGaIn/InGaIn/GaN наблюдается постепенное уменьшение выходной мощности. В первые минуты работы лазеров с оптической накачкой может наблюдаться некоторое увеличение (на 5–10%) выходной мощности, сменяющееся ее постепенным спадом. Скорость деградации выходной мощности уменьшается при охлаждении образцов. Наряду с уменьшением выходной мощности в процессе работы происходят изменения в спектре излучения лазера – максимум линии смещается в коротковолновую область, и появляются дополнительные максимумы. Наблюдаемые эффекты могут быть объяснены как пассивацией исходных дефектов, так и диффузией атомов структуры в процессе работы лазера. Изменения в спектрах излучения связаны, по-видимому, с конкуренцией двух различных каналов генерации.

Ключевые слова: полупроводниковый лазер с электронной и оптической накачкой, квантоворазмерная структура, деградация.

DOI: 10.1134/S0207352819020185

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые лазеры с накачкой электронным пучком обладают некоторыми характеристиками, присущими лазерам только этого типа. Так, используя лазерные сборки, можно получать одновременные либо последовательные импульсы излучения высокой мощности на различных длинах волн. Можно реализовать режим углового сканирования лазерным лучом. Использование квантоворазмерных структур в качестве активных элементов лазеров позволило реализовать режимы генерации при низких (менее 3.5 кэВ) значениях энергии электронов накачки [1, 2], что делает возможным разработку миниатюрных приборов [3]. Лазерные сборки с электронной накачкой на основе таких структур [4, 5] могут быть использованы в интерферометрии, в системах оптической локации, связи, медицине, биологии и других областях. Для работы лазеров с электронной накачкой не требуется наличие p – n –

рехода и контактов, что позволяет значительно расширить (по сравнению с инжекционными лазерами) диапазон используемых полупроводниковых материалов и структур. В процессе работы лазера могут изменяться свойства полупроводниковой структуры – активного элемента лазера, и, как следствие, может уменьшиться выходная мощность излучения. Эти процессы для лазеров данного типа мало изучены. Механизмы деградации могут быть различными для разных полупроводниковых материалов и структур. В [6, 7] показано, что при использовании электронного пучка для накачки лазеров на основе структур ZnCdSe возможна работа в импульсно-периодическом режиме в течение нескольких часов. В [7] уменьшение выходной мощности излучения импульсных лазеров связывали с прорастанием дефектов в активную область лазера. В [8] показано влияние собственного излучения импульсных лазеров с электронной накачкой на основе содержащих ZnSe квантоворазмерных структур, на процессы

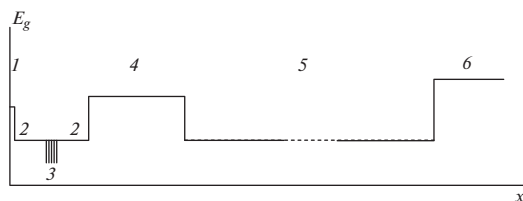


Рис. 1. Пространственная зависимость ширины запрещенной зоны слоев структуры AlGaIn/InGaIn/GaN: 1 – верхний слой $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ (20 нм); 2 – GaN (190 нм); 3 – активная область, состоящая из пяти квантовых ям $\text{In}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{N}$ (2.5 нм), разделенных барьерами GaN (10 нм); 4 – $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ (580 нм); 5 – GaN толщиной 3000 нм; 6 – сапфировая подложка.

их постепенной деградации. Недавно была продемонстрирована возможность получения импульсной генерации в сине-фиолетовом диапазоне при комнатной температуре активного элемента на основе структур AlGaIn/InGaIn/GaN с накачкой электронами с относительно невысокой энергией (9–18 кэВ) [9]. В настоящей работе приводятся результаты исследований постепенной деградации импульсных лазеров на основе структур AlGaIn/InGaIn/GaN с электронно-лучевой и оптической накачкой.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В работе были использованы структуры AlGaIn/InGaIn/GaN, на основе которых ранее был получен и исследован режим генерации [9]. Методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках из сапфира были выращены слои: GaN толщиной 3000 нм; $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ (580 нм); GaN (190 нм); активная область – пять квантовых ям $\text{In}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{N}$ (2.5 нм), разделенных барьерами GaN (10 нм); GaN (190 нм); верхний слой $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ (20 нм). Использовали поперечную геометрию накачки. Активный волновод имел толщину 432.5 нм. На такой структуре ранее был получен режим генерации на “вытекающих модах” резонатора [10]. Схема структуры представлена на рис. 1.

Лазерные резонаторы изготавливали скалыванием, длина резонатора составляла 0.5–1.2 мм. Для накачки использовали либо импульсный электронный пучок с энергией электронов до 19 кэВ при длительности около 300 нс, либо излучение азотного лазера с длительностью импульса по основанию 10 нс. Частота следования импульсов составляла 50 Гц. При электронной накачке образец закрепляли на медном держателе в вакуумной камере с безмасляной системой откачки. Для охлаждения структуры в ряде случаев применяли микрокриогенную систему МСМР-150Н-5/2. Поток электронов фокусировался магнитными линзами на щель, ограничивающую размер накачиваемой области на поверхности активного эле-

мента и расположенную в непосредственной близости от образца. Перемещая щель относительно образца, можно было исследовать параметры излучения лазера на различных участках структуры. Импульсы излучения исследуемого лазера регистрировали с помощью калиброванного коаксиального фотоэлемента ФЭК-22 и осциллографов Tektronix TDS 3032B и Tektronix MSO 4104, на которых измеряли также импульсы накачки. При исследовании постепенной деградации измеряли выходную импульсную мощность излучения лазера через каждые 2–5 мин в течение нескольких часов работы устройства. Каждую серию измерений проводили на новом, не облученном ранее месте структуры. Одновременно контролировали амплитуду и форму импульсов накачки (тока электронного луча при неизменной энергии электронов, или мощности попадающего на образец излучения азотного лазера). Для регистрации спектров генерации использовали спектрометр S100 с вогнутой дифракционной решеткой. Поверхность структуры исследовали с помощью растрового электронного микроскопа S-4800 (Hitachi).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С течением времени при частоте следования импульсов 50 Гц выходная мощность излучения лазера уменьшается как при электронной, так и при оптической накачке. Скорость деградации уменьшается при охлаждении образцов и увеличивается с ростом излучаемой лазером мощности. При электронной накачке наблюдаются два участка – с быстрой и медленной деградацией (рис. 2), что особенно заметно при низких температурах образцов.

При оптической накачке скорость изменения выходной мощности значительно меньше, чем при электронной накачке. Заметим, что измеренные скорости деградации на этих образцах значительно осложняются в связи с их пространственной неоднородностью: на некоторых образцах в течение первых 30–60 мин работы наблюдалось возрастание мощности на 5–10%, сменяющееся ее постепенным уменьшением (рис. 3). Скорость изменения выходной мощности со временем работы несколько изменялась на различных участках структуры. На одном из образцов в течение 6.5 ч работы при $T = 300$ К и частоте $f = 100$ Гц выходная мощность уменьшилась на ~15% при начальной мощности около 1 Вт. Наряду с изменением выходной мощности в процессе работы наблюдалась трансформация спектров излучения: после работы лазера с электронной накачкой в течение 30 мин максимум спектра смещался в сторону коротких длин волн, и появлялись дополнительные максимумы (рис. 4). Были получены спектры излучения лазеров с оптической накач-

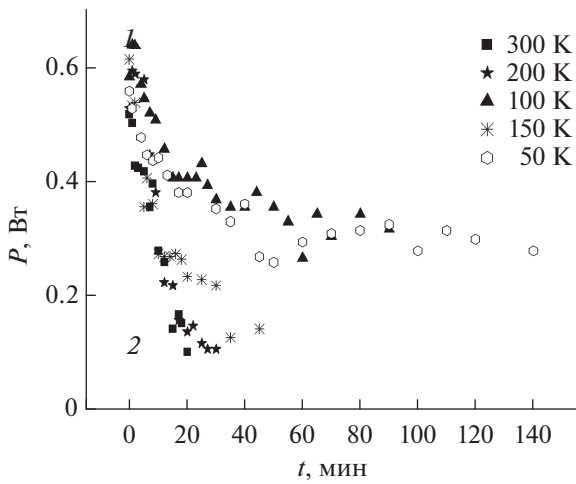


Рис. 2. Зависимость выходной мощности от времени работы лазера с электронно-лучевой накачкой на основе структуры AlGaIn/InGaIn/GaN при разных температурах. Частота следования импульсов 50 Гц. Энергия электронов накачки 17 кэВ.

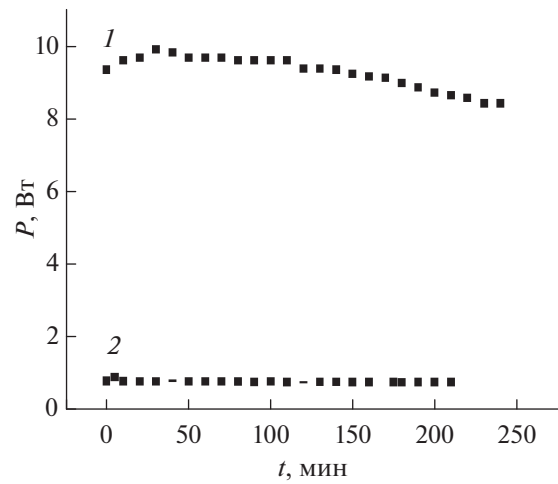


Рис. 3. Зависимость выходной мощности излучения от времени работы лазеров с оптической накачкой при начальной импульсной мощности излучения около 9 (1) и 1 Вт (2). Частота следования импульсов $f=50$ Гц.

кой на различных участках образца, для которого ранее проводили ресурсные испытания при электронной накачке. Установлено, что спектр излучения лазера на участках, ранее облученных электронным пучком, изрезан и смещен в коротковолновую область относительно спектра излучения участков, которые не были подвержены воздействию электронного пучка, что соответствует результатам, полученным при электронной накачке (рис. 4).

Наблюдение структуры в растровом электронном микроскопе (РЭМ) S-4800 (Hitachi) в режиме вторичной эмиссии показало, что поверхность облученной электронами части структуры (после 30 мин работы и деградации лазерных параметров) стала более однородной (рис. 5).

Таким образом, в процессе работы лазеров с электронной или оптической накачкой наблюдаются следующие явления: некоторое увеличение выходной мощности излучения в первые минуты работы, сменяющееся ее постепенным уменьшением. При электронной накачке наблюдаются два различных участка с разными скоростями деградации. В процессе деградации изменяются спектр излучения лазера и морфология поверхности структуры.

Заметим, что исследованию дефектов – дислокаций в GaN и структурах InGaIn/GaN – уделяется большое внимание, поскольку они определяют срок службы приборов на основе этих соединений [11–14]. Показано, что не только количество, но и распределение дислокаций в материале может влиять на устойчивость устройств на основе InGaIn [15]. Для изучения природы наблюдаемых явлений необходимо проведение дополнитель-

ных исследований. Можно дать лишь качественное объяснение результатов экспериментов.

Некоторое увеличение выходной мощности излучения в первые минуты работы (рис. 2), по-видимому, может быть связано как с пассивацией исходных дефектов структуры, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации, так и с заполнением носителями ловушек – глубоких центров с большими временами жизни.

Медленная деградация, характеризующаяся двумя различными скоростями (при электронной накачке (рис. 2)), при которой трансформируются спектры генерации (рис. 4), качественно мо-

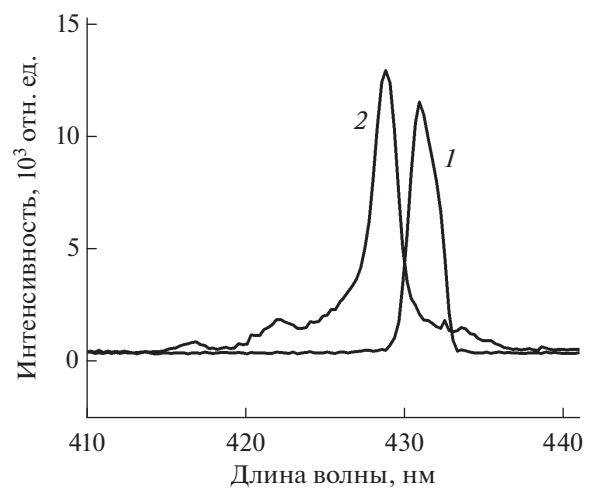


Рис. 4. Спектры излучения лазера до ресурсных испытаний (1) и после 30 мин работы (2). Лазер с электронной накачкой, $E = 18.5$ кэВ, $T = 300$ К, $f = 50$ Гц. Масштабы по оси ординат на кривых разные.

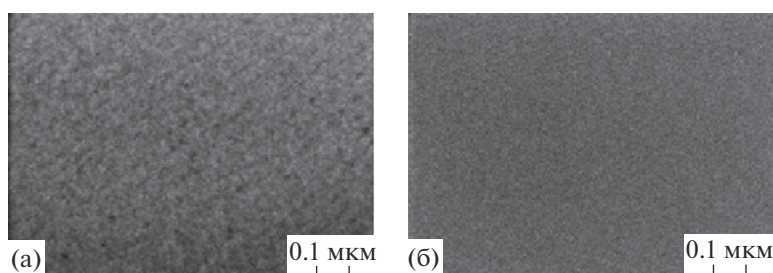


Рис. 5. РЭМ-изображение поверхности структуры, полученное в режиме вторичной эмиссии, в необлученной электронами области (а) и облученной в течение 30 мин (после деградации) (б).

жет быть объяснена следующим образом. Под действием собственного излучения лазера (это, по-видимому, реализуется и в лазерах с электронной накачкой на основе ZnSe-содержащих структур [8]) или излучения накачки может происходить радиационно-стимулированная и/или тепловая (за счет локального разогрева около структурных дефектов по механизму теплового взрыва) диффузия атомов. Эти процессы могут способствовать размыванию квантовых ям и кластеров, обогащенных In, прежде всего, с выходом In в барьерные слои, что может приводить к коротковолновому сдвигу линии оптического усиления. Заметим, что в рассматриваемой конструкции структуры реализованы два связанных оптических резонатора: основной, в центре которого расположены квантовые ямы, и вспомогательный, толщиной 3 мкм, отделенный от основного слоем $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$ толщиной 580 нм (рис. 1). Наличие двух связанных резонаторов приводит к возможности возникновения генерации на “вытекающих модах”, что проявляется в появлении узких пиков в дальней зоне излучения лазера [10]. В процессе деградации линия усиления смещается. При приближении максимума спектра усиления к собственной частоте пассивного резонатора порог генерации на “вытекающих модах” может стать меньше порога излучения на модах основного резонатора, что, в свою очередь, может привести к появлению в спектре излучения дополнительных максимумов, связанных с модами пассивного резонатора (рис. 4). Заметим, что в структурах на основе AlGaIn, легированных кремнием, ранее наблюдались спектры люминесценции с несколькими максимумами, обусловленными наличием относительно толстого (1.2 мкм) резонатора [16]. При переходе к режиму генерации с участием пассивного резонатора интенсивность излучения внутри образца резко уменьшается (за счет увеличения суммарного объема, занимаемого электромагнитным полем), что приводит к уменьшению локального разогрева и, соответственно, механических напряжений за счет поглощения света вблизи дефектов. Это, по-

видимому, объясняет наличие двух участков с разными скоростями деградации (рис. 2).

Существенное влияние диффузионных процессов в исследуемой структуре на выходные характеристики лазера подтверждается и результатами исследования морфологии поверхности образцов до и после облучения (рис. 5).

ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе изучена постепенная деградация параметров лазеров импульсно-периодического действия на основе структур AlGaIn/InGaIn/GaN с электронно-лучевой и оптической накачкой. Показана возможность работы лазеров с оптической накачкой при частоте следования 50 Гц в течение нескольких часов без уменьшения выходной мощности. Установлено, что в процессе работы лазеров с электронной накачкой уменьшается выходная мощность излучения и наблюдается коротковолновый сдвиг спектра генерации, появляются дополнительные максимумы, сглаживаются неоднородности поверхности структуры. В первые минуты работы лазера с оптической накачкой в ряде структур отмечается некоторое увеличение выходной мощности. Наблюдаемые эффекты могут быть объяснены как пассивацией исходных дефектов, так и диффузией атомов структуры в процессе работы лазера, размывающей квантовые ямы и кластеры, обогащенные In.

Увеличения срока службы сине-фиолетовых лазеров с электронной накачкой, по-видимому, можно достичь сокращением длительности импульса и уменьшением количества структурных дефектов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (задание № 3.5160.2017/БЧ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zverev M.M., Gamov N.A., Zhdanova E.V. и др. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. № 24. С. 1.*
2. *Zverev M.M., Gamov N.A., Zhdanova E.V. // Proceed. 18th Intern. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology". Ekaterinburg, 2011. P. 35.*
3. *Molva E., Accomo R., Labrunie G. et al. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. P. 796.*
4. *Zverev M.M., Ivanov S.V., Gamov N.A. et al. // Phys. Stat. Sol. B. 2010. 247. Iss. 6. P. 1561.*
5. *Zverev M.M., Sorokin S.V., Gamov N.A. et al. // Phys. Stat. Sol. C. 2016. V. 13. Iss. 7–9. P. 661. doi 10.1002/pssc.201510251*
6. *Herve D., Accomo R., Molva E. et al. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. P. 2144.*
7. *Herve D., Bonard J.M., Vanzetti L. et al. // J. Cryst. Growth. 1996. V. 159. P. 600.*
8. *Zverev M.M., Gamov N.A., Zhdanova E.V. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2013. № 1. С. 27.*
9. *Zverev M.M., Gamov N.A., Zhdanova E.V. и др. // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 7. С. 601.*
10. *Mazalov A.V., Zverev M.M., Marmalyuk A.A. и др. // Тез. докл. 10-й Всерос. конф. "Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы". Санкт-Петербург, 2015. С. 21.*
11. *Sugahara T., Sato H., Hao M. et al. // Jpn. J. Appl. Phys. 1998. V. 37. P. L398.*
12. *Rosner S., Carr E., Ludowise M. et al. // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 70. P. 420.*
13. *Cherns D., Henley S, Ponce F. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. P. 2691.*
14. *Dai Q., Schubert M., Kim M. et al. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 94. P. 111109.*
15. *Massabuau F.C.-P., Chen P., Horton M.K. et al. // J. Appl. Phys. 2017. V. 121. P. 013104.*
16. *Бохан П.А., Журавлев К.С., Закревский Д.Э. и др. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 1. С. 5.*

Change in the Properties of AlGaN/InGaN/GaN Structures during the Operation of Pulsed-Periodic Lasers on Their Basis with Electron-Beam and Optical Pumping

M. M. Zverev, N. A. Gamov, N. I. Gladyshev, E. V. Zhdanova, D. E. Loktionov, V. B. Studionov, V. A. Kureshov, A. V. Mazalov, D. R. Sabitov, A. A. Padalitsa, A. A. Marmalyuk, V. I. Kozlovsky, V. B. Mituhliaev

During operation of electron-beam and optical pumping lasers based on AlGaN/InGaN/GaN structure a gradual decrease in the output power is observed. In the first minutes of operation of optical pumping lasers a certain increase (by 5–10%) in output power can be observed, followed by a gradual decay. The rate of the output power degradation decreases with cooling of the samples. Decrease in the output power during laser operation is accompanied by changes in the emission spectrum: the maximum of the line shifts to the short-wave region and additional maxima appear. The observed effects can be explained both by the passivation of the original defects and by the diffusion of structure atoms during the laser operation. Changes in the emission spectra are apparently associated with competition between two different channels of generation.

Keywords: semiconductor electron-beam and optical pumping laser, quantum-size structure, degradation.