

Импульсный лазер с накачкой электронным пучком на основе квантово-размерной гетероструктуры AlGaN/InGaN/GaN

Н.А.Гамов, Е.В.Жданова, М.М.Зверев, Д.В.Перегудов, В.Б.Студенов, А.В.Мазалов, В.А.Курешов, Д.Р.Сабитов, А.А.Падалица, А.А.Мармалюк

Исследованы параметры импульсных сине-фиолетовых ($\lambda \approx 430$ нм при $T = 300$ К) лазеров на основе структуры AlGaN/InGaN/GaN с пятью квантовыми ямами InGaN с поперечной накачкой электронным пучком. При комнатной температуре активного элемента минимальная рабочая энергия электронов составила 9 кэВ, минимальная пороговая плотность тока пучка электронов – 8 А/см² при энергии электронов 18 кэВ.

Ключевые слова: лазер с электронно-лучевой накачкой, квантово-размерная структура, квантовая яма.

Использование для накачки полупроводниковых лазеров электронного пучка [1] позволяет реализовать специфические режимы работы, присущие только этому типу лазеров. Так, существует возможность последовательно во времени или одновременного излучения световых импульсов на разных длинах волн, углового сканирования лазерным пучком, а также возможность синхронизации импульсов света с импульсами запуска с субнаносекундной точностью [1, 2]. Использование квантово-размерных полупроводниковых структур в качестве активных элементов импульсных лазеров с электронной накачкой позволило существенно улучшить их характеристики. Так, в лазерах на основе квантово-размерных структур значения энергии и пороговой плотности тока электронного пучка накачки значительно меньше, чем у лазеров на основе монокристаллов. Это способствовало разработке миниатюрных источников света в ИК и видимом диапазонах спектра [3–5]. Рабочая энергия U электронов, требуемая для работы при комнатной температуре лазеров зеленого диапазона на основе структур, содержащих ZnSe, а также лазеров ИК диапазона на основе структур GaAs/InGaAs/AlGaAs, снижена до 3.5–10 кэВ [6, 7]. Использование лазерной сборки, состоящей из оптически изолированных друг от друга лазеров, накачиваемых общим электронным пучком, позволило достичь пиковой мощности излучения в зеленой области спектра более 600 Вт [8]. Такие лазеры могут быть востребованы в системах оптической локации, связи, в медицине, биологии и т. д. Для работы лазеров с электронно-лучевой накачкой не требуется наличия р–п-перехода, что делает возможным

применение структур на основе материалов, в которых создание р-типа проводимости является проблематичным. В первую очередь это касается структур, позволяющих получать излучение в УФ области спектра, в частности структур на основе нитридов индия, галлия и алюминия.

Соединения на основе AlGaN интенсивно исследуются в последнее время и широко используются в технике при разработке осветительных ламп и различных электронных и оптоэлектронных приборов. В то же время лазеры на основе этих соединений с накачкой электронным пучком исследованы весьма мало. Впервые о получении генерации лазера с электронно-пучковой накачкой на структуре InGaN/GaN сообщается в работе [9]. Использовалась структура InGaN/GaN с 30 квантовыми ямами (КЯ) InGaN, при ее охлаждении жидким азотом пороговая плотность J_{th} составила около 60 А/см² при энергии электронов $U = 50$ кэВ. При комнатной температуре образца $J_{th} = 200–300$ А/см² при $U = 150$ кэВ. Недавно мы сообщали [10, 11] о достижении режима генерации ($T = 300$ К) на структуре InGaN/GaN, минимальная J_{th} составила 40 А/см² при $U = 19$ кэВ. Волновод был образован слоями In_{0,02}Ga_{0,98}N (толщина внешнего слоя равна 200 нм), активная область состояла из пяти КЯ In_{0,17}Ga_{0,83}N, разделенных барьерами GaN.

В настоящем сообщении приводятся результаты исследований параметров лазера сине-фиолетового диапазона на основе структуры AlGaN/InGaN/GaN с улучшенной конструкцией – уменьшенной толщиной внешнего, обращенного к поверхности, ограничивающего волновод слоя.

Глубина проникновения электронов в образец зависит от их энергии U , и при $U < 15$ кэВ максимум распределения потерь энергии накачки в образце находится на расстоянии менее 200 нм от поверхности структуры [12]. Именно такая толщина внешнего ограничивающего волновод слоя структуры использовалась ранее в [10, 11]. В настоящей работе для уменьшения рабочей энергии электронов накачки была выращена структура с уменьшенной толщиной внешнего ограничивающего слоя. Структуры для лазеров выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках из сапфира. Волновод структуры был образован слоями Al_{0,2}Ga_{0,8}N (внешний слой толщиной 20 нм) и Al_{0,1}Ga_{0,9}N (внутренний слой

Н.А.Гамов, Е.В.Жданова, М.М.Зверев, Д.В.Перегудов, В.Б.Студенов. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (Технический университет), Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78; e-mail: mzverev@mail.ru
А.В.Мазалов, В.А.Курешов, Д.Р.Сабитов, А.А.Падалица. ОАО «НИИ «Полнос» им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп.1
А.А.Мармалюк. ОАО «НИИ «Полнос» им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп.1, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

Поступила в редакцию 9 февраля 2015 г., после доработки – 27 марта 2015 г.

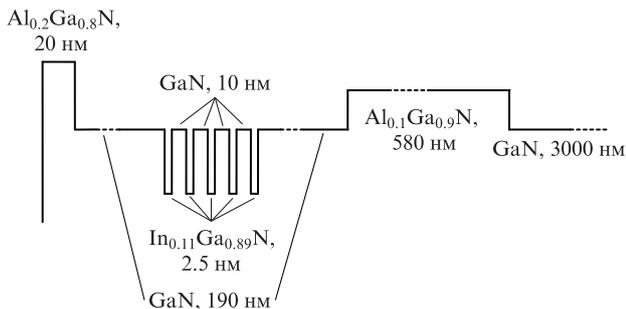


Рис.1. Схема лазерной структуры.

толщиной 580 нм). Активная область состояла из пяти КЯ $\text{In}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{N}$ (2.5 нм), разделенных барьерами GaN (10 нм). Общая толщина волноводного слоя составила около 430 нм. Схема структуры представлена на рис.1. Применялась поперечная геометрия накачки, лазерные резонаторы изготавливались скалыванием, длина резонатора была 0.5–1.2 мм. Для накачки использовался импульсный электронный пучок с энергией электронов до 18 кэВ при длительности импульса около 300 нс. Частота следования импульсов составляла 1.5 Гц. Образец закреплялся на медном держателе в герметичной камере, для получения вакуума использовался турбомолекулярный насос. Для охлаждения структуры в ряде случаев применялась микрокриогенная система МСМР-150Н-5/2. Поток электронов фокусировался магнитной линзой на щель, ограничивающую размер накачиваемой области активного элемента и расположенную в непосредственной близости от образца. Импульсы излучения исследуемого лазера регистрировались с помощью калиброванного коаксиального фотоэлемента ФЭК-22 и осциллографа Tektronix TDS 3032В, на котором измерялся также импульс тока электронов накачки. Для регистрации спектров генерации использовался спектрометр S100 с вогнутой дифракционной решеткой. Порог генерации определялся визуально по появлению яркой светящейся точки на торце лазерного образца.

При комнатной температуре образца минимальная энергия электронов U , при которой удалось получить генерацию, составила 9 кэВ. С увеличением U от 9 до 18 кэВ пороговая плотность тока J_{th} монотонно изменялась от 11 до 8 A/cm^2 при длине резонатора лазера $L = 0.6$ мм (рис.2). С понижением температуры пороговая плотность тока уменьшалась (рис.3): для лазера с $L = 0.6$ мм $J_{th} \approx 5.5 \text{ A}/\text{cm}^2$

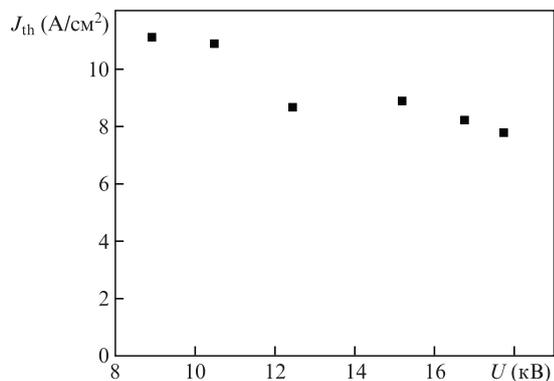


Рис.2. Зависимость пороговой плотности тока от энергии электронов накачки ($T = 300$ К, $L = 0.6$ мм).

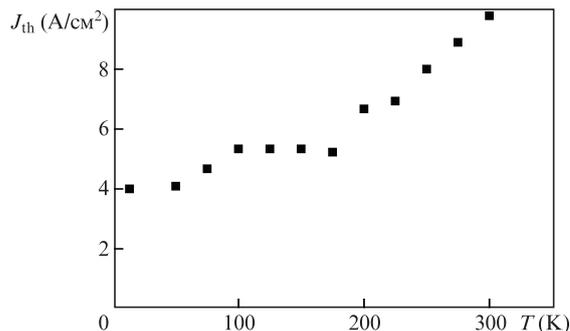


Рис.3. Зависимость пороговой плотности тока от температуры образца (энергия электронов $U = 15$ кэВ, $L = 0.6$ мм).

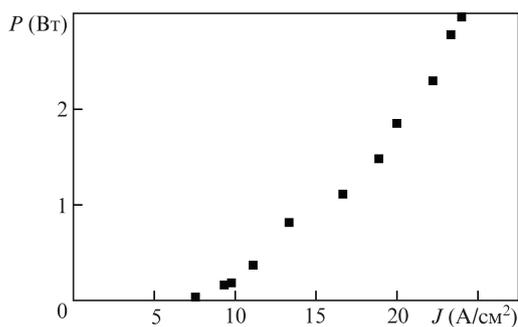


Рис.4. Зависимость импульсной мощности от плотности тока электронного пучка ($U = 17$ кэВ, $L = 0.6$ мм).

при $T=180$ К и 4 A/cm^2 при $T < 50$ К. В диапазоне $T = 300-200$ К пороговая плотность тока уменьшается линейно с понижением температуры. На рис.4 представлена зависимость пиковой мощности излучения лазера (с одной поверхности) от плотности тока электронов накачки. Максимальная пиковая мощность составила около 3 Вт при $U = 17$ кэВ и $L = 0.6$ мм.

Длина волны излучения лазера варьировалась в пределах 1–2 нм при изменении длины резонатора, энергии и плотности тока электронов накачки и при $L = 1$ мм составила 429 нм ($T = 300$ К); полуширина линии излучения равна 1.5–2 нм (рис.5). Генерация возникала на длине волны вблизи максимума линии люминесценции. Излучение лазера было поляризованным в плоскости структуры, степень поляризации составляла не менее 0.95.

Проведены расчеты пространственного распределения концентрации носителей в структуре, зависимости эффективности сбора носителей в различных КЯ, зависимости пороговой плотности тока от энергии электронов на

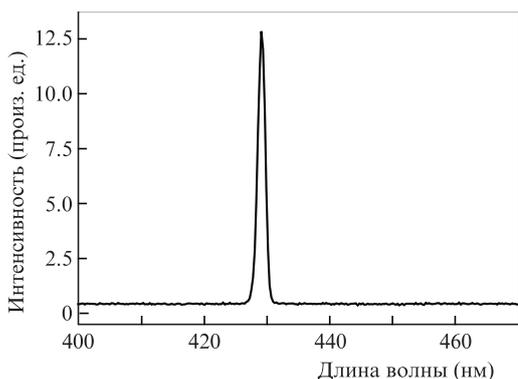


Рис.5. Спектр излучения лазера ($U = 16$ кэВ, $L = 1$ мм).

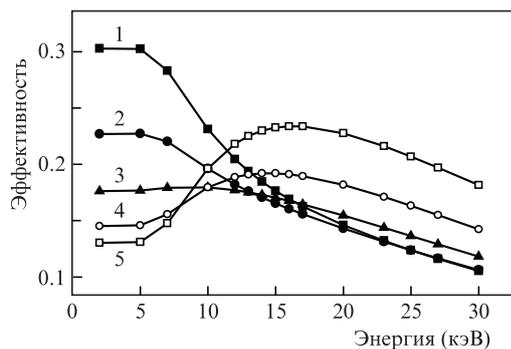


Рис.6. Расчетные зависимости эффективности сбора неравновесных носителей в различных КЯ от энергии электронов накачки. Цифрами 1–5 обозначены номера КЯ, яма № 1 – ближайшая к поверхности структуры.

качки и от места расположения активного слоя в волноводе. При расчетах учитывалась диффузия носителей и их дрейф во внутренних полях структуры, а также распределение поля электромагнитной волны поперечной моды в волноводе [13]. Значения параметров слоев (диффузионной длины, времени жизни, подвижности дырок, показателя преломления) выбирались в соответствии с данными, приведенными в [14, 15]. Коэффициенты поверхностной рекомбинации s на всех внутренних границах принимались равными 10 м/с, а на свободной границе – 10000 м/с.

На рис.6 представлены зависимости эффективности сбора носителей в КЯ и в волноводе от энергии электронов. Под эффективностью сбора носителей понималось отношение концентрации носителей в соответствующей яме к суммарной концентрации во всех слоях структуры. Из рисунка следует, что с ростом энергии электронов и, соответственно, увеличением глубины их проникновения в структуру перераспределяется эффективность сбора в различные КЯ. При малых энергиях электронов эффективность сбора для первой (ближайшей к поверхности) ямы максимальна и падает с ростом энергии пучка более 6 кэВ. При $U = 12$ кэВ эффективности сбора в первую и последнюю (пятую) ямы сравниваются, а затем, с ростом U , концентрация носителей в последней яме становится выше, чем в остальных.

На рис.7 представлена расчетная зависимость пороговой плотности тока от энергии электронов накачки, вычисленная для структуры с одной и пятью КЯ. Видно, что в интервале энергий 9–18 кэВ J_{th} монотонно уменьшается, что соответствует эксперименту (рис.2). В то же время значения пороговой плотности тока для структуры с одной КЯ значительно (в разы) ниже, чем для структуры с пятью ямами. Таким образом, для дальнейшего уменьшения пороговой плотности тока желательно использовать структуру с одиночной КЯ.

Заметим, что минимальные значения рабочей энергии электронов накачки и пороговой плотности тока для лазеров на основе структуры AlGaIn/InGaIn/GaN, достигнутые в настоящей работе, значительно превышают значения, полученные для лазеров на основе структур, содержащих ZnSe [6], а также структур на основе GaAs/InGaAs [7]. Дальнейшего улучшения параметров лазеров синеволнового диапазона с электронной накачкой на основе нитридов индия, галлия и алюминия можно достичь как за счет снижения количества структурных дефектов, так и за счет оптимизации конструкции лазерной структуры.

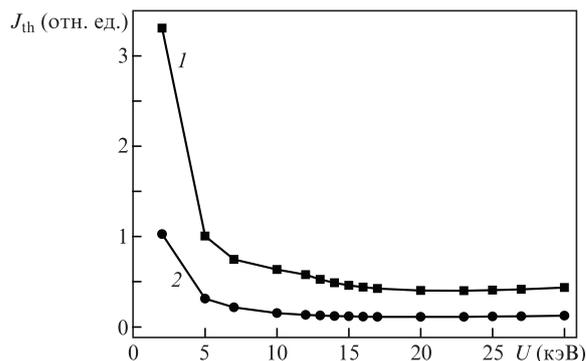


Рис.7. Расчетные зависимости пороговой плотности тока от энергии электронов накачки, вычисленные для структуры с пятью (1) и одной (2) КЯ.

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность создания импульсного лазера на основе нитридов индия, галлия и алюминия в синеволновой области спектра при комнатной температуре активного элемента с накачкой электронным пучком с относительно низкой энергией (9–18 кэВ).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 13-02-00604), а также Задания Минобрнауки № 3.611.2014/К.

1. Богданкевич О.В., Дарзнец С.А., Елисеев П.Г. *Полупроводниковые лазеры* (М.: Наука, 1976).
2. Зверев М., Иванов С., Олихов И. *Электроника: наука, технология, бизнес*, № 4, 66 (2006).
3. Molva E., Accomo R., Labrunie G., Cibert J., Bodin C., Dang L.S., Fenillet G. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 796 (1993).
4. Herve D., Molva E., Vanzetti L., Sorba L., Franciosi A. *Electron. Lett.*, **31** (6), 459 (1995).
5. Herve D., Accomo R., Molva E., Vanzetti L., Paggel J.J., Sorba L., Franciosi A. *Appl. Phys. Lett.*, **67** (15), 9, 2144 (1995).
6. Зверев М.М., Гамов Н.А., Жданова Е.В., Перегудов Д.В., Студенов В.Б., Иванов С.В., Гронин С.И., Седова И.В., Сорокин С.В., Копьев П.С. *Письма в ЖТФ*, **33** (24), 1 (2007).
7. Зверев М.М., Гамов Н.А., Жданова Е.В., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Перегудов Д.В., Студенов В.Б. *Оптика и спектроскопия*, **111** (2), 212 (2011).
8. Zverev M.M., Ivanov S.V., Gamov N.A., Zdanova E.V., Studionov V.B., Peregoudov D.V., Sedova I.V., Gronin S.V., Sorokin S.V., Kop'ev P.S., Olikhov I.M. *Phys. Stat. Sol. B*, **247** (6), 1561 (2010).
9. Kozlovsky V.I., Krysa A.B., Skysyrsky Y.K., Popov Y.M., Abare A., Mack M.P., Keller S., Mishra U. K., Coldren L., Steven DenBaars, Tiberi Michael D., George T. *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.*, **2**, 38 (1997).
10. Гамов Н.А., Жданова Е.В., Зверев М.М., Перегудов Д.В., Студенов В.Б., Мазалов А.В., Курешов В.А., Сабитов Д.Р., Падалица А.А., Мармалюк А.А. *Труды Междунар. научно-технической конф. «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC-2012)* (М., 2012, с. 19).
11. Зверев М.М., Гамов Н.А., Жданова Е.В., Перегудов Д.В., Студенов В.Б., Мазалов А.В., Курешов В.А., Сабитов Д.Р., Падалица А.А., Мармалюк А.А. *Тезисы докл. 9-й Всерос. конф. «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы»* (М., 2013, с. 13).
12. Гусев А.Л., Зверев М.М., Иванов С.В., Тарасов М.Д. *Альтернативная энергетика и экология*, № 2, 102 (2011).
13. Zverev M.M., Gamov N.A., Zdanova E.V., Studionov V.B., Peregoudov D.V., Ivanov S.V., Sorokin S.V., Sedova I.V., Gronin S.V., Kop'ev P.S. *Proc. 7th Internat. Symp. «Nanostructures: Physics and Technology»* (Minsk, Belarus, 2009, p. 35).
14. <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaN/>
15. Webb-Wood G., Ozgur U., Everitt H.O., Yun F., Morkoc H. *Phys. Stat. Sol. (a)*, **188** (2), 793 (2001).