

# Оптические характеристики HgBr-эксилампы

А.А.Малинина, А.Н.Малинин, А.К.Шуаибов

*Экспериментально исследованы оптические характеристики коаксиальной HgBr-эксилампы на многокомпонентных смесях паров дибромид ртуты с гелием, азотом и элегазом. Накачка рабочих смесей осуществлялась импульсно-периодическим барьерным разрядом. Продемонстрирована устойчивая работа эксилампы при частотах следования импульсов накачки 3–9 кГц. Определен компонентный состав рабочей смеси, при котором достигаются максимальные средняя и импульсная удельные мощности излучения 48.8 мВт/см<sup>3</sup> и 40.6 Вт/см<sup>3</sup> соответственно при КПД 7.3% в сине-зеленом спектральном диапазоне с длиной волны в максимуме излучения 502 нм. Снижение мощности излучения составляет 5% после 2.5×10<sup>6</sup> импульсов. Дана интерпретация результатов оптимизации характеристик эксилампы.*

**Ключевые слова:** эксилампа, барьерный разряд, газоразрядная плазма, компоненты смеси, дибромид ртуты, азот, элегаз, гелий.

## 1. Введение

Интерес к эксиплексным источникам спонтанного излучения видимого, УФ и ВУФ спектральных диапазонов обусловлен рядом обстоятельств, связанных с возможностью их практического применения. Для многих приложений достаточно иметь некогерентный с большой площадью светящейся поверхности (больше 100 см<sup>2</sup>) мощный источник, излучающий в относительно широком интервале длин волн. Эксилампы просты в изготовлении и не критичны к масштабированию их размеров, мощности накачки и геометрии активной области. Это позволяет говорить о перспективности их использования в различных технологиях, а также в медицине и биотехнологии [1–14]. Кроме того, эксилампы сине-зеленого спектрального диапазона, излучение которых попадает в область фотоактивности растений, могут применяться для решения задач агрофизики по повышению эффективности возбуждения молекул хлорофилла и тем самым увеличению скорости роста растений в условиях тепличных предприятий [15–17].

К настоящему времени создано и исследовано несколько типов эксиплексных источников спонтанного видимого излучения, в которых для возбуждения рабочей смеси используется барьерный разряд или разряды других типов [6, 8–12, 18, 19].

В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния компонентного состава рабочей смеси, энергии, запасаемой в емкости диэлектрика, и частоты следования импульсов на спектральные, энергетические и временные характеристики излучения коаксиальной HgBr-эксилампы.

## 2. Техника и методика исследований

Исследование характеристик излучения эксилампы проводилось при использовании в качестве рабочих смесей паров дибромид ртуты с гелием, азотом и элегазом. Накачка рабочих смесей осуществлялась барьерным импульсно-периодическим разрядом.

На рис. 1 представлена схема коаксиальной эксилампы. Лампа изготавливалась из кварцевой трубки. Внешний диаметр трубки и ее длина составляли 8.8 мм и 7 см соответственно, а толщина стенки была равна 1 мм. Внутри трубки по оси располагался молибденовый электрод диаметром 2 мм. Разрядный промежуток имел ширину 2.4 мм. Внешний электрод длиной 3 см был перфорированным (коэффициент пропускания излучения ~0.7). Рабочий объем составлял ~1 см<sup>3</sup>. В торце кварцевой трубки располагался капилляр диаметром 1.5 мм, который служил для уменьшения выноса паров дибромид ртуты из лампы в вакуумную газосмесительную систему.

Возбуждение эксилампы осуществлялось от генератора наносекундных импульсов (рис. 2). В качестве коммутатора использовался тиратрон ТГИ 1-35/3, накопительная емкость набиралась из малоиндуктивных конденсаторов КВИ-3. Перезарядка этой емкости осуществлялась через первичную обмотку повышающего трансформатора с коэффициентом трансформации 1:4. Ее величина составляла 1.36 нФ. Генератор позволял получать импульсы напряжения с амплитудой 1–10 кВ, длительностью 400–600 нс и частотой их следования 1–9 кГц.

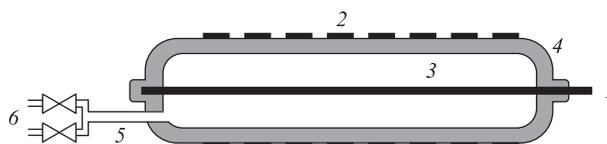


Рис. 1. Схема коаксиальной эксилампы: 1 – внутренний электрод; 2 – внешний перфорированный электрод; 3 – зона разряда; 4 – кварцевое стекло; 5 – капилляр; 6 – вентили системы откачки и напуска газов.

А.А.Малинина, А.Н.Малинин, А.К.Шуаибов. Ужгородский национальный университет, Украина, 88000 Ужгород, ул. Пидгирна, 46; e-mail: mal@univ.uzhgorod.ua

Поступила в редакцию 16 декабря 2012 г., после доработки – 7 февраля 2013 г.

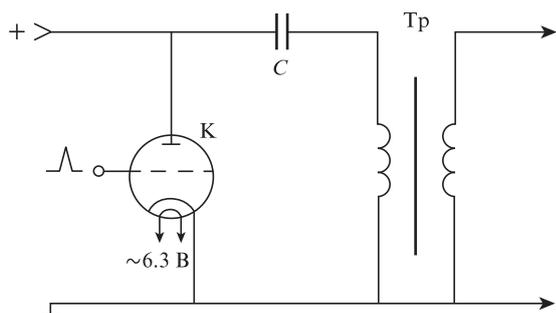


Рис.2. Электрическая схема генератора накачки: К – коммутатор; С – накопительная емкость; Тр – повышающий трансформатор.

Рабочие смеси приготавливались непосредственно в объеме излучателя. Порошок дибромид ртуты ( $\text{HgBr}_2$ ) в количестве 60 мг равномерно насыпался в колбу эксилампы. При исследовании излучения эксилампы парциальное давление насыщенных паров дибромид ртуты создавалось путем саморазогрева рабочей смеси за счет диссипации энергии разряда, а также путем нагрева колбы внешним электронагревателем (при необходимости получения парциального давления паров дибромид ртуты, превышающего 0.1 кПа). После загрузки соли проводилось обезвоживание источника излучения путем его прогрева при температуре  $70^\circ\text{C}$  и откачки в течение двух часов через капилляр 5 (рис.1).

Парциальные давления насыщенных паров дибромид ртуты определялись по температуре наиболее холодной точки поверхности лампы на основе интерполяции справочных данных работы [20]. В условиях нашего эксперимента они изменялись в пределах 0.1–2 кПа. Парциальные давления гелия, азота и азота измерялись образцовым мембранным манометром и вакуумметром.

Излучение эксилампы регистрировалось в направлении, перпендикулярном боковой поверхности кварцевой трубки, и анализировалось в спектральном диапазоне 380–600 нм. Спектры излучения регистрировались с помощью дифракционного монохроматора (решетка 600 штрих./мм). Спектральное разрешение системы регистрации составляло 2.4 нм. Ее калибровка проводилась с использованием эталонной вольфрамовой лампы СИ 8-200 при температуре нити накала  $T = 2173\text{ K}$ .

Импульсы напряжения и тока излучателя регистрировались с помощью осциллографа С1-72, сигнал на который подавался с делителя напряжения и интегрирующей цепи калиброванного пояса Роговского.

Средняя мощность излучения эксилампы измерялась прибором «Кварц-01». Оптический сигнал после прохождения через диафрагму площадью  $0.25\text{ cm}^2$  попадал на светофильтр СЗС-16 с максимумом пропускания на длине волны 500 нм, а затем на измерительную головку прибора. Мощность излучения всей поверхности источника излучения определялась по методике, приведенной в работе [21].

### 3. Результаты исследований и их обсуждение

#### 3.1. Осциллограммы импульсов накачки

Сразу после приложения к электродам эксилампы импульсов напряжения в ее рабочем объеме наблюдался набор конусообразных микрозарядов с вершиной на металлическом электроде и основанием на внутренней по-

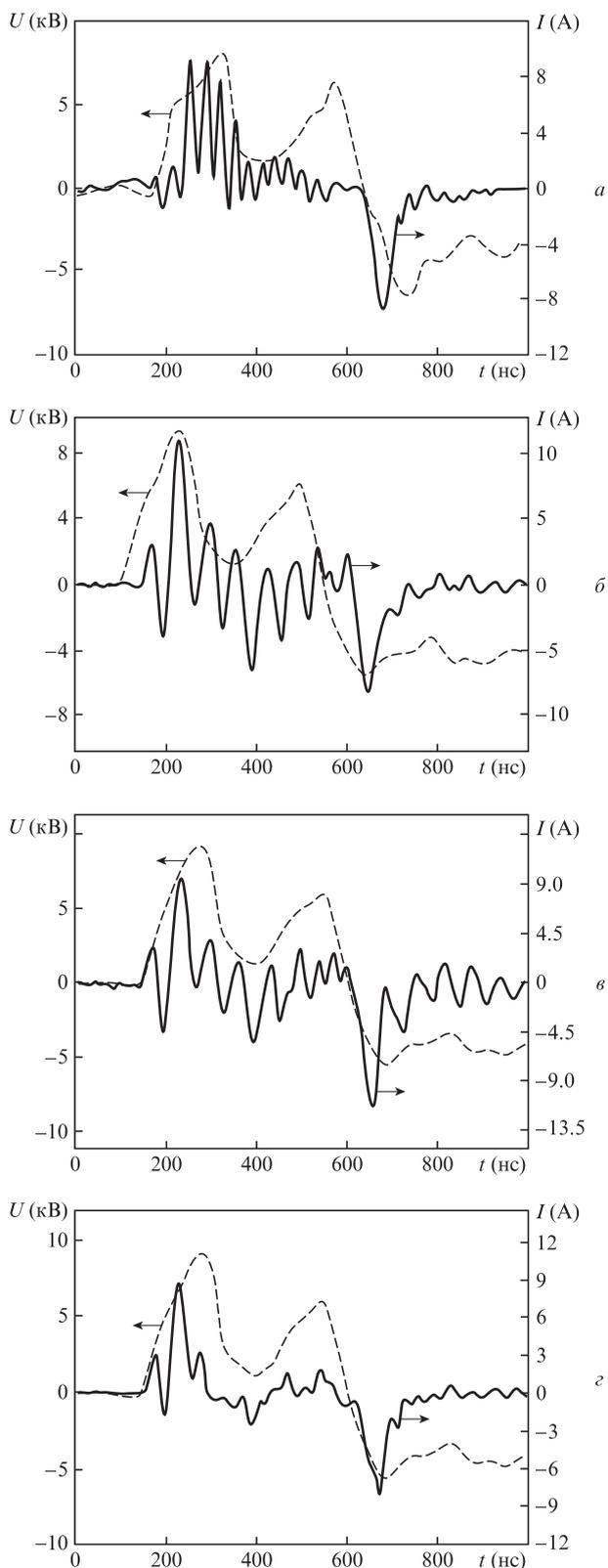


Рис.3. Осциллограммы импульсов напряжения на электродах эксилампы  $U$  и тока разряда  $I$  в смесях  $\text{HgBr}_2 : \text{He} = 0.1 : 117$  при общем давлении смеси  $p = 117.1\text{ кПа}$  (а),  $\text{HgBr}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 0.1 : 4 : 120$  при  $p = 124.1\text{ кПа}$  (б),  $\text{HgBr}_2 : \text{SF}_6 : \text{He} = 0.1 : 0.07 : 117$  при  $p = 117.17\text{ кПа}$  (в) и  $\text{HgBr}_2 : \text{SF}_6 : \text{N}_2 : \text{He} = 0.1 : 0.07 : 4 : 117.2$  при  $p = 121.37\text{ кПа}$  (г). Частота следования импульсов  $f = 6\text{ кГц}$ .

верхности кварцевой трубки излучателя. Цвет разряда (розовый) в начальной стадии (первые 30 с) определялся буферным газом гелием. Затем в течение 30–60 с раз-

ряд светился сине-зеленым цветом. По мере саморазогрева смеси цвет разряда становился все более насыщенным. При этом разряд имел диффузный и однородный характер и заметно сглаживался контраст яркости в объемном разряде и микроарядах.

На рис.3 представлены характерные осциллограммы импульсов накачки (напряжения и тока). Колебательная структура импульса тока обусловлена многократной разрядкой емкости диэлектрика за время действия импульса напряжения с амплитудой, достаточной для пробоя разрядного промежутка [22]. Различие в колебательной структуре импульсов тока на переднем и заднем фронтах импульса накачки (напряжения) связано с противоположными направлениями протекания тока через газоразрядный промежуток (2.4 мм) и вследствие этого с неодинаковыми условиями рассасывания заряда на внутренней поверхности диэлектрика в условиях однобарьерного разряда, который используется в нашем эксперименте.

Наблюдалось также различие в импульсах тока для смеси, содержащей азот (рис.3,б), и смеси без него (рис.3,а). На переднем фронте импульса накачки для смеси, содержащей азот, имеет место характерный импульс с большей амплитудой и длительностью, чем для смеси без азота. Кроме того, при  $t \approx 400$  нс его амплитуда также больше амплитуды импульса для смеси без азота, что может быть связано с большим зарядом на поверхности диэлектрика по сравнению с таковым для смеси HgBr<sub>2</sub>-He. Добавление в смесь элегаза (рис.3,в) приводило к перераспределению импульсов в структуре отрицательного полупериода в пользу одного из них, а в положительном полупериоде – к увеличению амплитуды импульсов, следующих за первым. Отличительной чертой осциллограмм для смеси, содержащей элегаз и азот (рис.3,г), являлась менее развитая, чем для смеси без азота и элегаза, колебательная структура импульса тока.

### 3.2. Спектральные и интегральные характеристики излучения

Спектральные и интегральные характеристики излучения HgBr-эксилампы исследовались для разных по компонентному составу рабочих смесей HgBr<sub>2</sub>-He, HgBr<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>(SF<sub>6</sub>)-He и HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>-He при парциальных давлениях гелия 80–160 кПа, азота – 1–10 кПа, элегаза – до 200 Па и дибромиды ртути – до 2 кПа. Максимальные амплитуды импульсов напряжения и тока, а также частоты их следования составляли 9–10 кВ, 9–11 А и 3–9 кГц соответственно.

На рис.4 представлены характерные спектры излучения эксилампы в видимом спектральном диапазоне при использовании рабочих смесей HgBr<sub>2</sub>-He и HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-He. Для этих смесей наблюдалась спектральная полоса с максимумом интенсивности излучения на длине волны 502 нм. Она имела слаборазреженную колебательную структуру и соответствовала электронно-колебательному переходу  $B^2\Sigma_{1/2}^+ \rightarrow X^2\Sigma_{1/2}^+$  монобромиды ртути (HgBr\*) [23]. Основная часть интенсивности излучения была сконцентрирована в диапазоне длин волн 450–512 нм. Наблюдалось резкое уменьшение интенсивности в спектре в области больших длин волн и плавное уменьшение в области меньших длин волн. Форма спектральной полосы и ее ширина на полувысоте (15–16 нм) примерно такие же, как и для спектральных полос, соответствующих переходу  $B \rightarrow X$  в моногалогенидах ртути [6, 8, 11, 18].

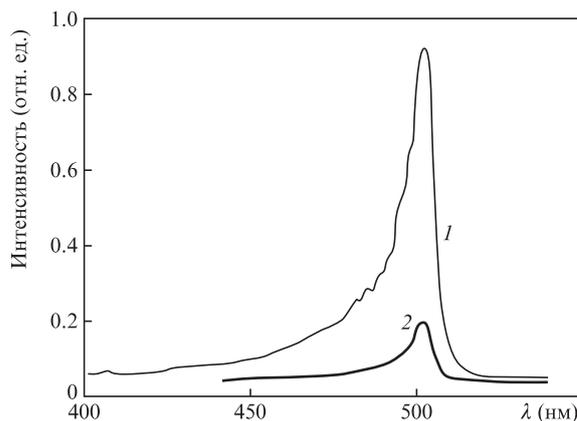
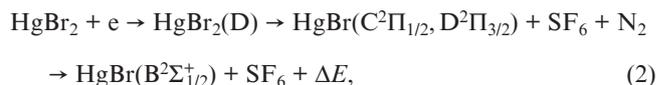
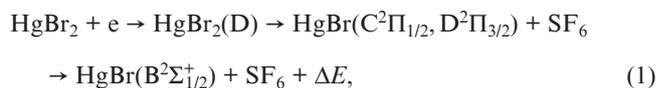


Рис.4. Спектры излучения эксилампы на смесях HgBr<sub>2</sub>:SF<sub>6</sub>:He = 0.1:0.07:117 при  $p = 117.17$  кПа (1) и HgBr<sub>2</sub>:He = 0.1:117 при  $p = 117.1$  кПа (2). Частота следования импульсов накачки  $f = 6$  кГц, их амплитуда  $U_a = 9$  кВ.

Результаты исследований интегральных характеристик излучения эксилампы представлены на рис.5. Для всех смесей при увеличении давления их компонентов мощность излучения возрастала до максимального значения, а затем уменьшалась. Необходимо отметить, что во всех исследуемых смесях присутствует гелий. Его парциальное давление выбрано равным давлению 118–120 кПа, при котором наблюдалась максимальная мощность излучения для смеси HgBr<sub>2</sub>-He (рис.5,а).

Вид зависимостей мощности излучения эксилампы от давлений гелия, азота, элегаза и паров дибромиды ртути (рис.5) связан с увеличением концентрации электронов при повышении давлений He, N<sub>2</sub> и SF<sub>6</sub> в смеси, с изменением доли энергии разряда, которая расходуется на нагрев смеси, с изменениями средней энергии электронов и константы скорости возбуждения молекулы HgBr\* в зависимости от параметра  $E/N$  ( $E$  – напряженность поля, приложенного к межэлектродному промежутку,  $N$  – общая концентрация атомов и молекул рабочей смеси), а также с процессом тушения  $B^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояния молекул HgBr\* при их столкновениях с атомами гелия, молекулами азота, элегаза и дибромиды ртути [24, 25]. Значительное увеличение мощности излучения лампы на смесях паров дибромиды ртути с элегазом и гелием (рис.5,б), а также при добавке азота (рис.5,г) связано с процессами тушения выше лежащих энергетических состояний монобромиды ртути, приводящими к дополнительному заселению его  $B^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояния [26]:



где  $\Delta E$  – разность энергий возбуждения C, D и B-состояний молекулы монобромиды ртути [27, 28].

На рис.6 приведена временная зависимость импульсной мощности излучения HgBr-эксилампы для наиболее оптимальной по средней мощности рабочей смеси HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>-He. Максимумы мощности излучения по времени появления совпадают (в пределах ошибки изме-

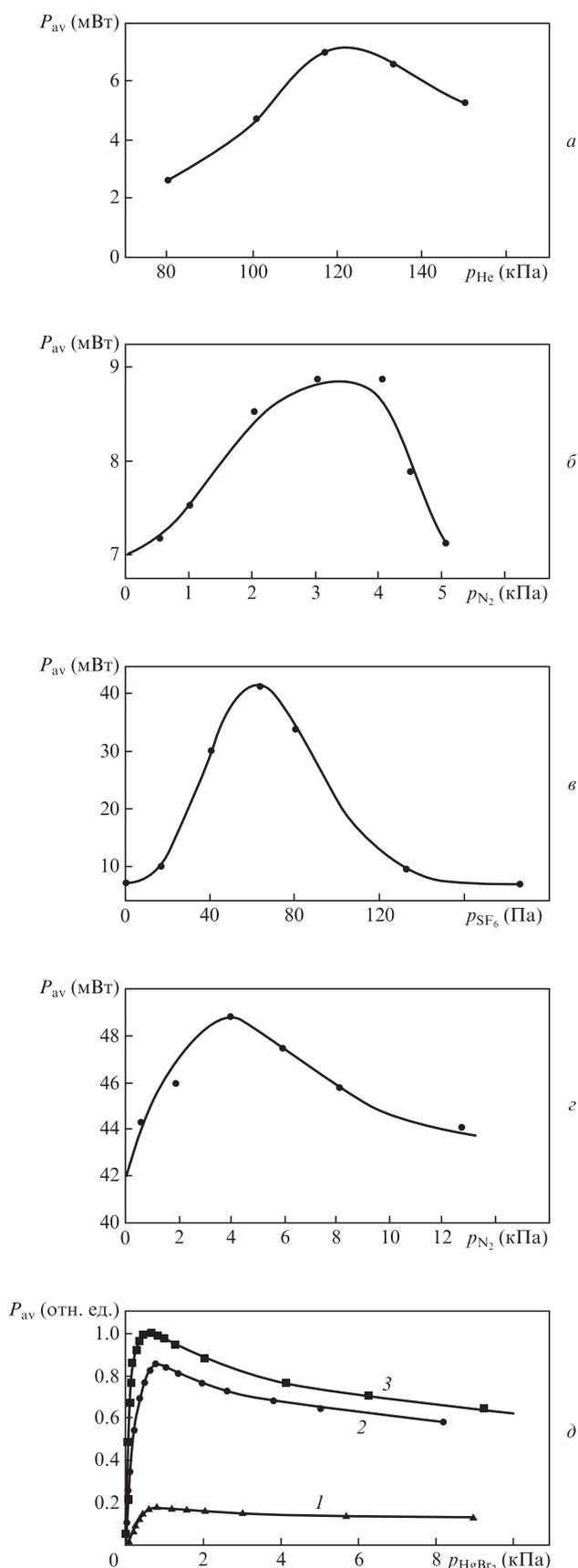


Рис.5. Зависимости средней мощности  $P_{av}$  излучения HgBr-эксилампы от парциальных давлений гелия в смеси HgBr<sub>2</sub>-He (а), азота в смеси HgBr<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He (б), элегаза в смеси HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-He (в), азота в смеси HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>-He (г), паров дибромид ртуты в смесях HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>-He (1), HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-He (2) и HgBr<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He (3) (д).

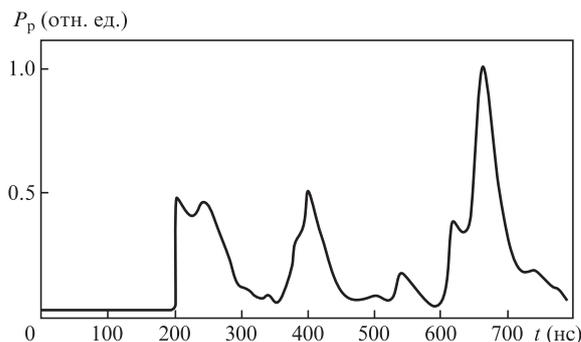


Рис.6. Временная зависимость импульсной мощности  $P_p$  излучения HgBr-эксилампы на смеси HgBr<sub>2</sub>:SF<sub>6</sub>:N<sub>2</sub>:He = 0.1:0.07:4:117.2 при  $p = 191.3$  кПа.

рений  $\sim 10\%$ ) с максимумами тока (рис.3,г), а амплитуда третьего импульса превышает амплитуды первого и второго импульсов.

Для смеси HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>-He в режиме саморазогрева была достигнута наибольшая средняя мощность излучения в сине-зеленом спектральном диапазоне 48.8 мВт. Импульсная мощность  $P_p$  составила 40.6 Вт и определялась на основе известных средней мощности  $P_{av}$ , длительности импульсов  $\Delta t$  и частоты их следования  $f$  из выражения

$$P_{av} = P_p f \Delta t.$$

КПД при этом равнялся 7.3%. При использовании внешнего подогрева этой смеси средняя мощность достигает максимального значения 480 мВт при парциальном давлении паров дибромид ртуты  $\sim 0.7$  кПа.

Результаты исследования зависимостей мощности излучения эксилампы от энергии, запасаемой в емкости диэлектрика (7 пФ, кварцевое стекло), частоты следования импульсов накачки и времени работы смеси представлены на рис.7. При увеличении удельной энергии от 0.1 до 0.8 мДж/см<sup>3</sup> увеличивалась и средняя мощность излучения (рис.7,а). Скорость ее роста для каждой смеси была разной, что связано с неодинаковыми потерями мощности разряда на упругие и неупругие процессы, протекающие в плазме смесей разного состава [24]. Наибольшая средняя мощность достигалась для четырехкомпонентной смеси HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>-He. При увеличении частоты следования импульсов тока от 3 до 9 кГц наблюдалось линейное увеличение средней мощности излучения (рис.7,б). Подобная зависимость обусловлена линейным увеличением числа фотонов, которые попадают на фотоприемник при увеличении частоты следования импульсов накачки. Рост средней мощности излучения (рис.7,в) при увеличении числа импульсов был более интенсивным для смесей HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-He и HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>-He (кривые 1, 2), чем для смеси HgBr<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He (кривая 3). Такая закономерность вызвана неодинаковой скоростью роста концентрации паров дибромид ртуты для смесей разного компонентного состава, которая, в свою очередь, зависит от доли мощности, вкладываемой в упругие процессы столкновений электронов плазмы, относительно мощности, вкладываемой в процессы неупругого рассеяния электронов на компонентах плазмы [24]. Для четырехкомпонентной смеси HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>-He скорость роста концентрации паров дибромид ртуты была наименьшей, что связано с увеличенными потерями мощности разряда на неупру-

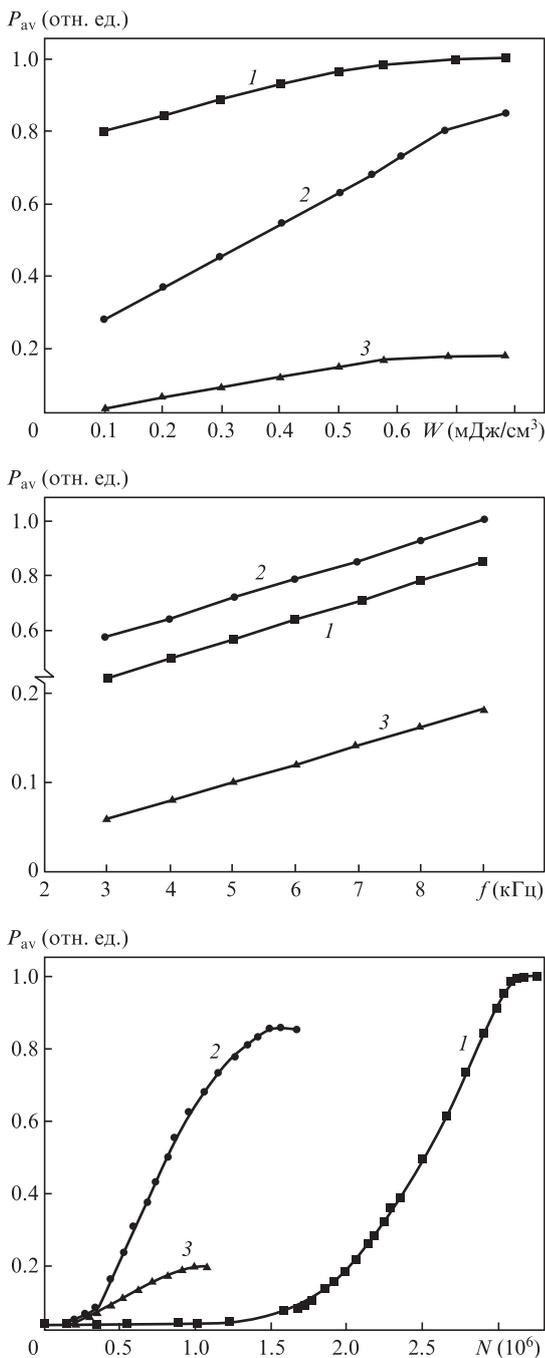


Рис.7. Зависимости средней мощности  $P_{av}$  излучения HgBr-эксилампы от энергии  $W$ , запасаемой в емкости диэлектрика (а), частоты следования импульсов накачки  $f$  (б) и числа импульсов  $N$  (в) для смесей HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>-He (1), HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-He (2) и HgBr<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He (3).

гие процессы с участием молекул элегаза и азота. Это приводило к более медленному росту температуры смеси, а следовательно, к более медленному повышению парциального давления паров дибромида ртути и в конечном счете к более медленному росту мощности излучения с увеличением числа импульсов  $N$  вплоть до  $1.5 \times 10^6$ . Начиная с этого значения  $N$ , наблюдалось резкое увеличение скорости роста мощности излучения, которое было вызвано конкуренцией процессов увеличения концентрации паров дибромида ртути и теплопередачи на внутреннюю поверхность эксилампы. Концентрация паров дибромида ртути при увеличении числа импульсов росла

быстрее, чем потери тепла через диэлектрик (корпус эксилампы). При  $N = 1 \times 10^6, 1.5 \times 10^6$  и  $3 \times 10^6$  (рис.7,в) наступало равновесие скоростей увеличения концентрации молекул дибромида ртути и потерь тепла, что приводило к насыщению зависимости мощности излучения от числа импульсов.

а

#### 4. Заключение

Исследование спектральных, интегральных и временных характеристик излучения HgBr-эксилампы, накачиваемой барьерным наносекундным разрядом, показало, что ее поверхность излучает равномерное по интенсивности свечение в сине-зеленом спектральном диапазоне с максимумом излучения на длине волны 502 нм. Наибольшие значения средней и импульсной мощностей достигаются для четырехкомпонентной смеси HgBr<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>-He при общем давлении 121.4 кПа и составляют в режиме саморазогрева смеси 48.8 мВт/см<sup>3</sup> и 40.6 Вт/см<sup>3</sup> соответственно при КПД 7.3%. Использование внешнего подогрева для лампы на этой смеси позволило достичь средней мощности излучения ~480 мВт. Продемонстрирована устойчивая работа HgBr-эксилампы при частотах следования импульсов накачки до 9 кГц.

б

в

1. Kumagai H., Obara M. *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 2619 (1989).
2. Kumagai H., Obara M. *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 1583 (1989).
3. Kumagai H., Toyoda K. *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 2811 (1991).
4. Визирь В.А., Скакун В.С., Смородов Г.В., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А., Червяков В.В. *Квантовая электроника*, **22**, 519 (1995).
5. Furusawa H., Okada S., Obara M. *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 1877 (1995).
6. Malinin A.N. *Laser Phys.*, **7**, 1032 (1997).
7. Борисов В.М., Водчиц В.А., Ельцов А.В., Христофоров О.В. *Квантовая электроника*, **25**, 308 (1998).
8. Малинин А.Н., Шимон Л.Л., Гуйван Н.Н., Поляк А.В. *Оптика атмосферы и океана*, **12**, 1024 (1999).
9. Малинин А.Н., Поляк А.В., Гуйван Н.Н., Зубрилин Н.Г., Шимон Л.Л. *Квантовая электроника*, **32**, 155 (2002).
10. Kogelschatz U. *Plasma Chem. Plasma Process.*, **23**, 1 (2003).
11. Малинин А.Н. *Квантовая электроника*, **35**, 243 (2005).
12. Малинин А.Н., Шуанбов А.К., Шимон Л.Л., Грабовая И.А., Поляк А.В. *Прикладная физика*, №1, 27 (2006).
13. Гуйван Н.Н., Малинин А.Н. *Оптика и спектроскопия*, **101**, 399 (2006).
14. Гуйван Н.Н., Малинин А.Н. *ТВТ*, **44**, 362 (2006).
15. Посудин Ю.И. *Лазерная фотобиология* (Киев: Высшая школа, 1989, с. 248).
16. Романенко В.Д. *Биотехнология культивирования гидробионтов* (Киев: изд-е Ин-та гидробиологии НАН Украины, 1999, с.264).
17. Sosnin E.A., Oppenlander T., Tarasenko V.F. *J. Photochem. Photobiol. C*, **7**, 145 (2006).
18. Guivan M.M., Malinina A.A., Vrablec A. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44**, 1 (2011).
19. Бойченко А.М., Ломаев М.И., Панченко А.Н. и др. *Ультрафиолетовые и вакуумно-ультрафиолетовые эксилампы: физика, техника и применение* (Томск: STT, 2011, с. 512).
20. Ефимов А.И., Белорукова Л.П., Василькова И.В., Чечев В.П. *Свойства неорганических соединений (справочник)* (Л.: Химия, 1983, с. 392).
21. Сапожников Р.А. *Теоретическая фотометрия* (М.: Энергия, 1977, с.264).
22. Акишев Ю.С., Демьянов А.В., Каральник В.Б. и др. *Физика плазмы*, **27**, 176 (2001).
23. Pearse R.W., Gaydon A.G. *The Identification of Molecular Spectra* (London: Chapman & Hall, 1963, p. 347).
24. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда* (М.: Наука, 1987, с. 592).
25. Мак-Даниель И., Нигэн У. *Газовые лазеры* (М.: Мир, 1986, с.550).
26. Nighan W.L., Brown R.T. *J. Appl. Phys.*, **53**, 7201 (1982).
27. Chang R.S.T., Burnham R. *Appl. Phys. Lett.*, **36**, 397 (1980).
28. Wadt W.R. *Appl. Phys. Lett.*, **34**, 658 (1979).