

04;07;08;12

## Акустические характеристики ХеСl-эксилампы барьерного разряда

© Э.А. Соснин,<sup>1,2</sup> В.А. Панарин,<sup>1</sup> В.Ф. Тарасенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия

<sup>2</sup> Томский государственный университет,  
634050 Томск, Россия  
e-mail: badik@li.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 18 июля 2011 г.)

Исследована динамика формирования акустического сигнала при подаче импульсов напряжения ( $f = 15 \text{ kHz}$ ) на электроды ХеСl-эксилампы барьерного разряда в смесях Хе/Сl<sub>2</sub> = (50–500)/1 и величинах парциального давления 5–500 Торг. Показано, что временной ход акустического сигнала является маркером процесса выхода эксилампы в установившийся режим работы. Определены оптимальные по мощности и эффективности условия работы эксилампы (смесь Хе/Сl<sub>2</sub> = 240/1 и  $p = 98 \text{ Торг}$ ,  $\eta \approx 9.5\%$ ). Экспериментально показано, что при низких давлениях основная доля энергии разряда расходуется на тепловой нагрев газа, что соответствует объемной форме выделения тепла и объемной форме свечения. (С ростом давления вклад этого канала расходования энергии падает, и все большая доля энергии разряда тратится на возбуждение акустических колебаний.) Переход к высоким давлениям обогащает фурье-спектр акустического сигнала, увеличивает его интенсивность и одновременно дисперсию сигнала. При очень высоких парциальных давлениях акустический сигнал падает и достигает уровня, соответствующего собственным колебаниям колбы эксилампы без разряда. (При погасании разряда фурье-спектр сигнала обедняется и содержит только гармоники, соответствующие несущей частоте импульсов напряжения источника питания.)

### Введение

В последние два десятилетия источники спонтанного ультрафиолетового (УФ) и вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучений связанно-свободных переходов эксимерных (Rg<sub>2</sub><sup>\*</sup>, X<sub>2</sub><sup>\*</sup>) или эксиплексных (RgX<sup>\*</sup>) молекул, где Rg — инертные газы (Ar, Kr, Xe) а X — галогены (F, Br, Cl, I), стали предметом многих исследований (см. ссылки в работах [1,2]).

Сегодня наибольшее распространение получили эксилампы барьерного разряда (БР) (про БР см., например, [1]). Для их изучения традиционно применяются три подхода:

- 1) оптический, с акцентом на регистрации и интерпретации спектральных и энергетических параметров излучения;
- 2) электрофизический, в котором моделью лампы служит эквивалентная схема, а объектом внимания являются величины тока и напряжения в системе;
- 3) плазмохимический, где основное внимание уделяется кинетике процессов в плазме, формирующейся в разрядном промежутке.

Эти подходы, как правило, дополняют друг друга [1–6] и позволяют получать ценную информацию о режимах работы прибора.

В работе [7] был предложен новый подход для изучения баланса энергии в эксилампах, основанный на регистрации быстрой (характерное время  $\sim 100 \text{ ms}$ ) и медленной ( $\sim 100 \text{ s}$ ) составляющих скачка давления, возникающего при включении, работе и выключении эксилампы. Газовая смесь здесь рассматривалась как термодинамическая система, повышение температуры

которой происходит при постоянном объеме (изохорный процесс). Эту методологию авторы распространили на исследование энергетических характеристик KrCl-, KrBr-, ХеBr-, Cl<sub>2</sub>-эксиламп БР [7–12] и Br<sub>2</sub>-, Cl<sub>2</sub>-, ХеBr- и ХеСl-эксиламп сверхвысокочастотного (СВЧ)-разряда [13].

В работе [12] на основе обобщения полученных данных сделан вывод, что амплитуда быстрого скачка давления характеризует часть вложенной энергии, которая термализуется в газе, а амплитуда медленного скачка давления — энергию, идущую на нагрев колбы эксилампы. В рамках такого подхода за баланс энергии в эксилампе БР отвечают четыре процесса:

- 1) непосредственный нагрев газа;
- 2) генерация акустических волн;
- 3) прямой нагрев стенок колбы за счет бомбардировки ионами и электронами;
- 4) излучение.

С помощью амплитуды быстрого скачка давления можно определить вклад процесса 1+ термализованную в газе часть энергии процесса 2. Используя медленный скачок давления, можно определить суммарный вклад процессов 1 + 2 + 3, поскольку медленная составляющая скачка давления непосредственно связана с повышением температуры колбы эксилампы.

Тем не менее, прямые измерения акустических параметров эксиламп экспериментально проведены не были, хотя в работах [7,11] была построена полумпирическая качественная модель, позволяющая, в частности, описать поведение модельных параметров  $\alpha_{ac}$ ,  $\alpha_T$  — долей мощности разряда, расходуемых на генерацию акустических волн и на непосредственный нагрев газа.

Расчеты показали, что при низких давлениях в лампе  $\alpha_T > \alpha_{ac}$ , а при высоких  $\alpha_T < \alpha_{ac}$ .

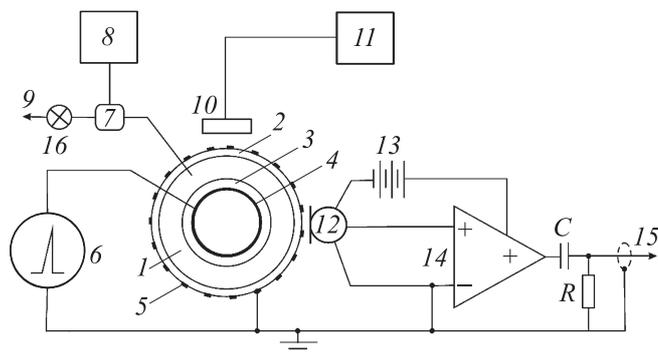
Цель данной работы — исследовать динамику формирования акустического сигнала ХеСl-эксилампы БР и оценить вклад акустической составляющей в общем балансе энергии, рассеиваемой эксилампой.

## Экспериментальная установка и методики измерений

Эксперименты проводились на установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 1. Колба эксилампы барьерного разряда имела коаксиальную геометрию и была выполнена из двух соосно установленных из кварцевых трубок 2 и 3 (марка кварца ТКг, ООО „Технокварц“), образующих разрядный промежуток 1. Разряд осуществлялся при подаче на электроды 4 и 5 импульсного напряжения от источника 6, а излучение из газоразрядного объема 1 выводилось наружу через перфорированный электрод 5 с известным оптическим пропусканием. Характеристики эксилампы сведены в таблицу. Электрод 4 был отражающим и был выполнен из Al-Mg-фольги толщиной 40 мкм. Смеси для эксилампы готовились в газовом посту 9, который отсекался от колбы вентилем 16.

Источник питания 6 создавал импульсы напряжения, имеющие форму меандра, амплитуду до 5.2 кВ и длительность импульса на полувысоте 1.5 мкс. Частота следования импульсов  $f$  была фиксирована и составляла 15 кГц.

Мощность излучения лампы в диапазоне  $\lambda = 200\text{--}350\text{ nm}$  определялась фотоприемником 10 „НАМАМАТСУ Н8025-222“ (с максимумом спектральной чувствительности на 222 nm), располагаемым вплотную к поверхности колбы, по



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — разрядный промежуток; 2, 3 — внешняя и внутренняя кварцевые трубки; 4, 5 — внутренний и внешний электроды; 6 — источник питания эксилампы; 7 — датчик давления; 8 — контроллер датчика давления; 9 — тракт откачки/напуска смесей; 10 — фотоприемник; 11 — контроллер фотоприемника; 12 — микрофон; 13 — питание микрофона и усилителя; 14 — операционный усилитель; 15 — сигнальный кабель к осциллографу; 16 — вентиль; R, C — элементы полосового фильтра.

Параметры ХеСl-эксилампы

Внешний и внутренний диаметры, mm	43/20
Длина рабочей области, cm	11.5
Смеси	Xe/Cl <sub>2</sub> = (50–500)/1
Диапазон давлений, Torr	5–500

формуле

$$P_{\text{rad}} = ES, \quad (1)$$

где  $E$  — энергетическая освещенность от лампы с учетом спектральной чувствительности,  $\text{mW/cm}^2$ ;  $S$  — площадь излучающей поверхности лампы,  $\text{cm}^2$ .

Акустический сигнал регистрировался ультразвуковым конденсаторным микрофоном РМС-2 (12) с трехконтактным выходом и частотной характеристикой от 15 до 25 кГц, близкой к линейной. Через операционный усилитель 14 и RC-цепочку (для фильтрации частот ниже 340 Hz) сигнал с микрофона подавался на осциллограф TDS 3034 (Tektronics Inc.).

Для измерения величин статического и динамического давлений между колбой эксилампы и газовым постом помещался керамический тензорезистивный датчик давления DMP 330L (7, ООО „БД Сенсорс РУС“), имеющий погрешность измерений 0.5%. Регистрируя быструю составляющую скачка давления этим датчиком можно определять мощность разряда, расходуемую на непосредственный нагрев газа в процессе 1 по следующей формуле [8]:

$$W_h = \frac{6\lambda S V_0 T_0 \Delta p}{V p_0 d}, \quad (2)$$

где  $T_0$ ,  $p_0$  — начальная температура и давление газа;  $\Delta p$  — скачок давления;  $V$  — полный объем газа, включая разрядный и буферный (т.е. объем, отсекаемый датчиком давления);  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$  [8].

Временной ход импульсов излучения и тока на эксилампе регистрировали осциллографами TDS 224 и TDS 3034 (Tektronics Inc.). Импульсы напряжения снимали посредством емкостного делителя напряжения, а импульсы тока — токовым шунтом, собранном на линейке чип-резисторов (делитель и шунт на рис. 1 не показаны). Зная величины  $I(t)$  и  $U(t)$ , полную (активную) мощность разряда  $W$ , вкладываемую в эксилампу, можно определить как интеграл [14]

$$W = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} I(t)U(t)dt, \quad (3)$$

где  $\tau$  — период повторения импульсов.

Эффективность излучения эксилампы определялась как

$$\eta = \frac{P_{\text{rad}}}{W}, \quad (4)$$

где  $P_{\text{rad}}$  — мощность УФ-излучения эксилампы.

## Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлен типичный ход развития акустических колебаний с момента подачи напряжения на электроды колбы. Отчетливо видны четыре стадии формирования акустического сигнала:

1) установление колебаний колбы (при этом разряд еще не горит) за  $\tau_1 < 2$  ms;

2) сравнительно стабильные колебания колбы в режиме без разряда ( $\tau_2 \approx 2-10$  ms);

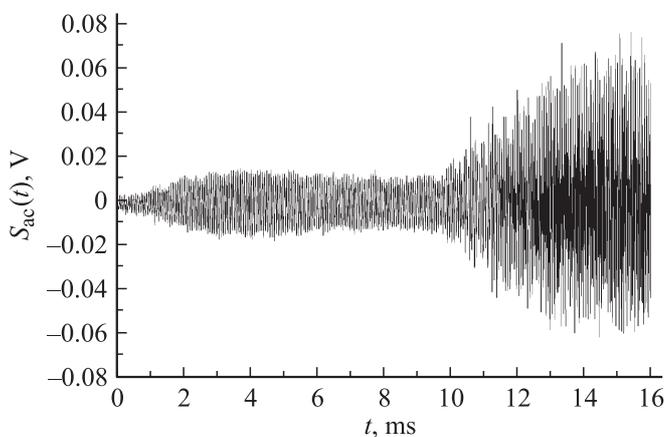
3) переходной процесс — увеличение амплитуды акустического сигнала при зажигании разряда ( $\tau_3 \approx 9-14$  ms);

4) установившийся режим ( $\tau_4 > 14$  ms). Рассмотрим каждую из них подробно.

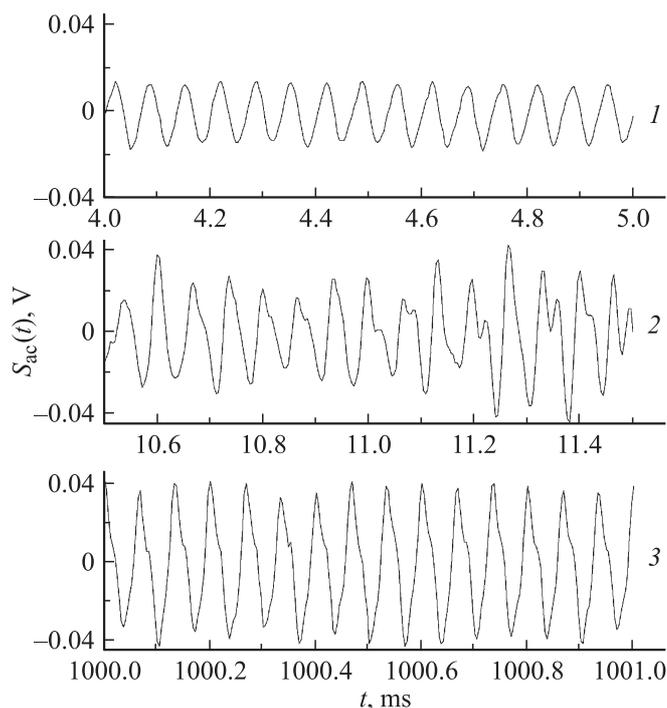
На рис. 3 показан детальный временной ход акустического сигнала  $S_{ac}(t)$  на разных стадиях. Для рис. 3 (спектры 1, 2) привязка по времени соответствует рис. 2: во 2-й и 4-й стадиях акустический сигнал близок к гармоническому, а во время переходной 3-й стадии наблюдаются нерегулярности как по амплитуде, так и по спектральному составу сигнала.

С уменьшением парциального давления смеси и увеличением доли молекулярного хлора в ней длительность 1-й и 2-й стадий сокращается вплоть до полного их исчезновения. Одновременно укорачивается 3-я стадия. Это означает, что условия в разрядном промежутке становятся облегченными для пробоя, разряд зажигается почти сразу после подачи напряжения на электроды, и энергия от источника питания не расходуется (или почти не расходуется) на акустическую „раскачку“ колбы.

Величины длительностей 1-й и 2-й стадий критически влияют на стабильность зажигания эксилампы. Чем выше давление смеси ( $p > 150-300$  Torr) и ниже содержание хлора ( $Xe/Cl_2 \approx (150-500)/1$ ), тем больше наблюдаемый на опыте разброс значений  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и, соответственно, тем меньше стабильность зажигания лампы.



**Рис. 2.** Временной ход амплитуды звукового сигнала  $S_{ac}(t)$  после включения источника питания эксилампы для смеси Хе/Сl<sub>2</sub> = 240/1 при давлении 163 Torr.

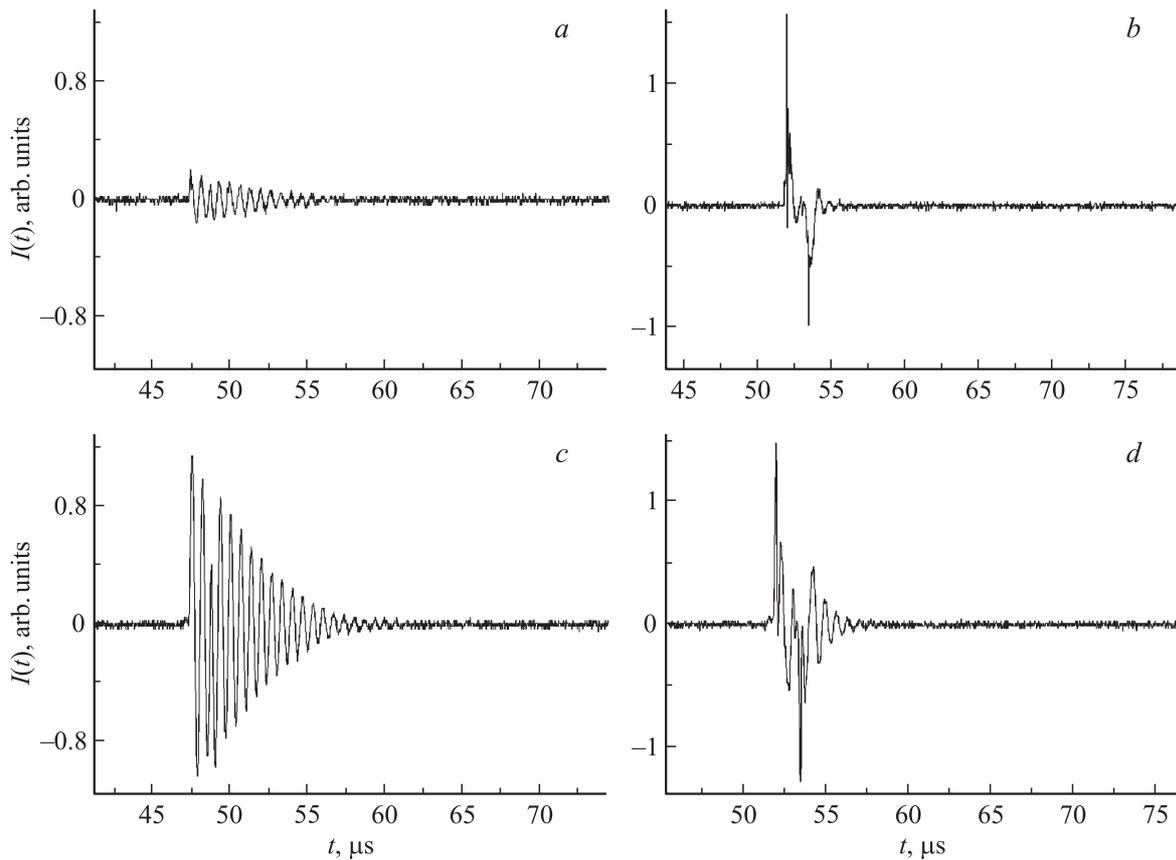


**Рис. 3.** Форма акустических сигналов в разные моменты времени после включения источника питания для смеси Хе/Сl<sub>2</sub> = 240/1 при давлении 163 Torr (1, 2) и давлении 94 Torr (3).

Помимо акустического сигнала снимался временной ход тока и напряжения на лампе в указанных стадиях с привязкой запуска к акустическому сигналу. Оказалось, что в стадии без разряда зависимости  $It$  и  $U(t)$  имеют вид затухающих колебаний (рис. 4, а, с), т.е. мощность в газ не вкладывается, а затухающий характер осциллограмм связан как с потерями энергии в выходном контуре источника питания, так и потерями на „раскачку“ стенок колбы (поскольку акустический сигнал не нулевой, рис. 3 (спектр 1)).

В промежутке времени около 1–2 ms после зажигания разряда импульсы тока и напряжения имеют форму, типичную для искрового горения разряда (рис. 4, б, д). Поэтому вкладываемая в разряд мощность  $W$  (определяемая по (3)) еще мала, хотя и постепенно увеличивается. Это согласуется с данными [15], где регистрировались электрофизические параметры эксилампы после пробоя и было показано, что для переходной стадии характерно контрагирование разряда.

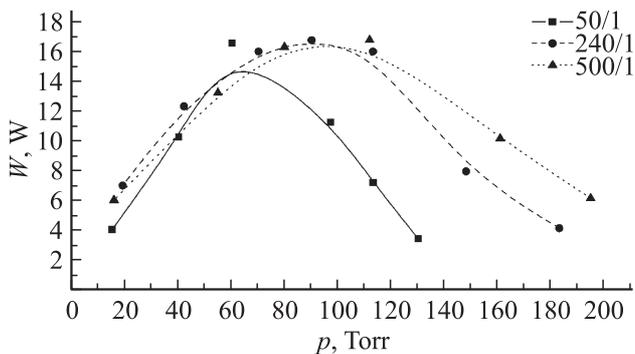
При переходе к установившемуся режиму горения разряда величина вкладываемой в газ мощности и интенсивности излучения достигают квазистационарных максимальных значений. На рис. 5, 6 представлены зависимости полной мощности разряда  $W$  в установившемся режиме горения от парциального давления смеси, рассчитанные по формуле (3) и аналогичные зависимости для величин мощности разряда, расходуемой на непосредственный нагрев газа  $W_h$ , рассчитанные по соотношению (2).



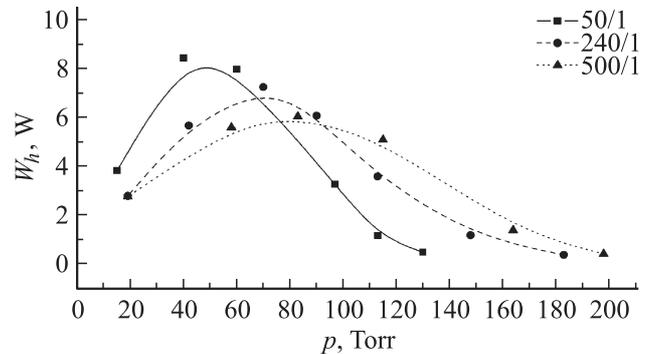
**Рис. 4.** Осциллограммы тока (*a, b*) и напряжения (*c, d*) для смеси  $\text{Xe}/\text{Cl}_2 = 220/1$  при давлении 90 Торг в фазе без разряда (*b, d*) и фазе зажигания разряда (*a, c*).

Наибольшие величины эффективности излучения, рассчитанные по формуле (4), составили 5–10% и достигнуты при величинах давления, соответствующих максимумам приведенных зависимостей. Например, для смеси  $\text{Xe}/\text{Cl}_2 = 240/1$  и  $p = 98$  Торг эффективность излучения составила 9.5%. Эту смесь будем называть оптимальной, имея в виду ее оптимальность с точки зрения эффективности и мощности излучения.

Дополнительно для разных соотношений  $\text{Xe}/\text{Cl}_2$  были сняты зависимости действующего значения акустиче-



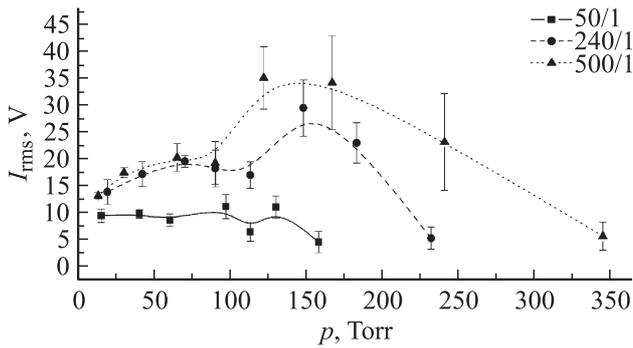
**Рис. 5.** Полная мощность, потребляемая ХеСл-эксилампой при различных давлениях смеси  $\text{Xe}/\text{Cl}_2$ .



**Рис. 6.** Тепловая мощность, рассеиваемая в ХеСл-эксилампе и рассчитанная по величине быстрой составляющей скачка давления при различных давлениях смеси.

ского сигнала  $I_{\text{rms}}$  в установившемся режиме горения эксилампы (рис. 7).

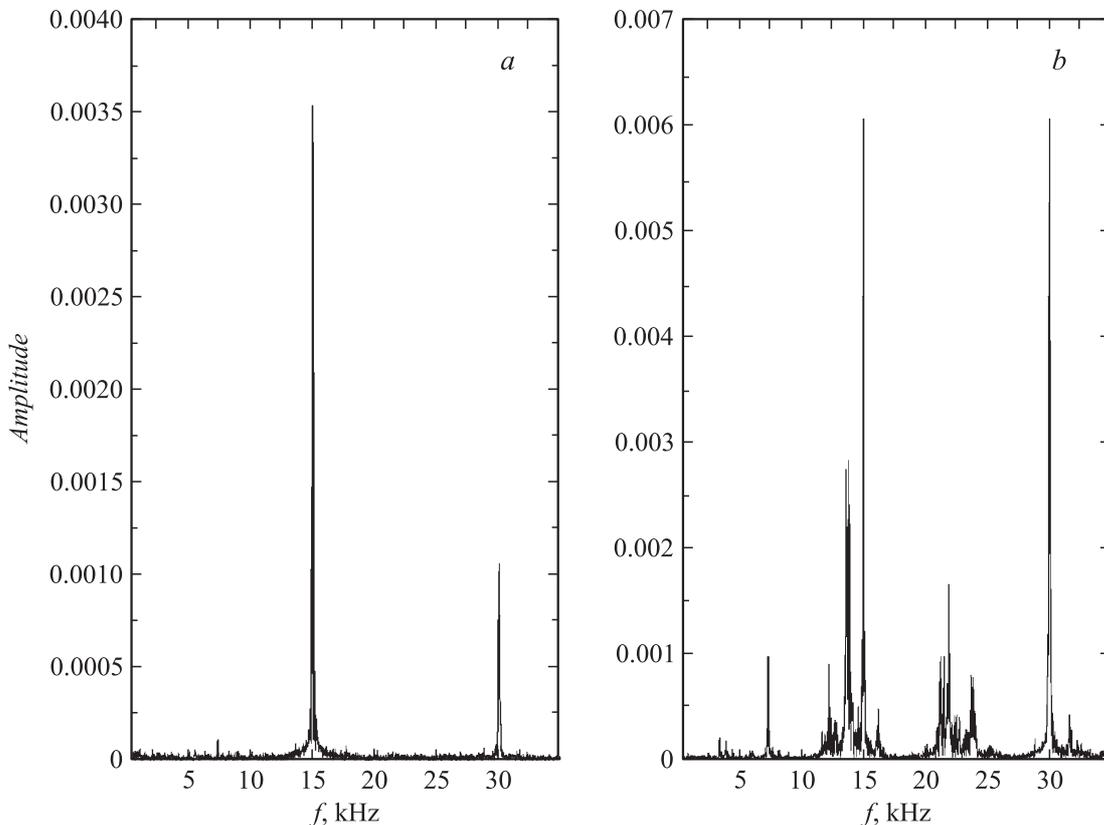
Как связаны между собой значения  $W_h$ ,  $W$  и  $I_{\text{rms}}$ ? Рассмотрим это на примере оптимальной смеси. На рис. 5–9 видно, что активная мощность, рассеиваемая лампой, заметно отличается от мощности, которая тратится на непосредственный нагрев газа. При  $p \approx 15$  Торг эти величины почти равны. В этом случае разряд в



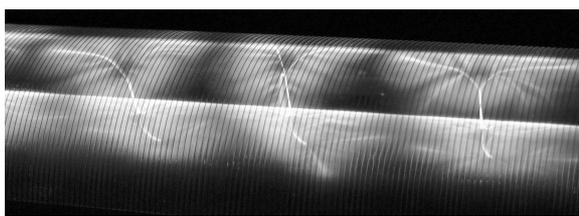
**Рис. 7.** Действующие значения акустического сигнала от ХеСl-эксилампы при различных давлениях смеси. Доверительная вероятность 0.95. Крайние правые точки на каждой кривой соответствуют режиму, когда разряд не горит.

колбе однороден, а величина акустического сигнала  $I_{rms}$  мала. Последнее связано с отсутствием в разрядном объеме выраженных микроразрядов, т.е., фактически с отсутствием зон разрядения–сжатия, возникающих с появлением микроразрядов. Соответственно фурье-спектр акустического сигнала, содержит только гармоники, соответствующие несущей частоте импульсов напряжения источника питания (рис. 8, *а*). Кстати, аналогичный спектр наблюдается и для условий, в которых на лампу уже подается напряжение, а разряд еще не горит.

С увеличением давления при  $p \rightarrow p_{opt}$  (для оптимальной смеси это величина  $\sim 90$  Torr, соответствующая максимуму величин  $W$  и  $\eta$ ) активная мощность  $W$  увеличивается, а доля мощности  $W_h$  вначале растет, а при  $p \approx p_{opt}$  уже падает. Акустический сигнал тоже не растет. С точки зрения баланса энергии в эксилампе это означает, что все большая доля энергии тратится на осуществление плазмохимических процессов, ведущих, в частности, к образованию рабочих молекул ХеСl\*, и все меньшая доля энергии тратится на непосредственный тепловой нагрев газа. Стоит отметить, что при  $p \rightarrow p_{opt}$  разряд теряет однородность и переходит в форму конических микроразрядов, существующих на фоне объемного свечения, а интенсивность объемного свечения снижается. В этих условиях микроразряд визуально представляет собой два конусообразных элемента, основания которых лежат на поверхности диэлектрика, а „вершины“ сливаются в середине разрядного промежутка (см, например, [16,17]). В этом случае энерго-вклад в газ осуществляется неоднородно: значительная часть энергии выделяется около стенок кюветы, что приводит к снижению средней температуры газа и скачка давления  $\Delta p$ , поэтому формула (2) дает несколько заниженное значение  $W_h$ . Хотя уровень акустического сигнала заметно не меняется, его фурье-спектр претерпевает изменения: появляются новые гармоники, связанные с появлением в разрядном промежутке зон сжатия-расширения микроразрядов, которых в объем-



**Рис. 8.** Фурье-спектры акустического сигнала в смеси Хе/Сl<sub>2</sub> = 240/1 при величинах парциального давления 33 (*а*) и 160 (*б*) Torr.



**Рис. 9.** Форма микроразрядов при высоких давлениях (смесь  $\text{Xe}/\text{Cl}_2 = 240/1$ ,  $p = 130$  Torr). Видны узкая перемилька (филамент) и подошвы в форме молниевидных каналов.

ной форме горения (при пониженных давлениях) не было.

Дальнейший рост давления смеси ( $p > p_{\text{opt}}$ ) ведет к образованию узких и малочисленных филаментов (нитей) (см. подробнее в [12]), т.е. источников объемного выделения тепла почти не остается. Соответственно полностью исчезает объемное свечение, которое его сопровождает, а величина  $W_h$  становится незначительной (рис. 6). Показательно, что здесь существенно увеличивается величина акустического сигнала  $I_{\text{rms}}$ , растет и ее разброс (рис. 7). Причем свой вклад в акустическое рассеяние энергии вносят не только сами филаменты, но и их подошвы, которые при высоких давлениях теряют форму однородных по свечению пятен, сами разделяются на несколько искр, распространяющихся по поверхности диэлектриков (см. рис. 9). Это закономерно обогащает фурье-спектр акустического сигнала, в который входят не только гармоники несущей частоты, но и разнообразные и случайные гармоники, связанные с искроподобной формой оснований микроразрядов (рис. 8, 2).

Таким образом, при переходе к высоким давлениям происходит уменьшение как полной, так и тепловой мощностей, снижение эффективности и мощности излучения, а акустический сигнал увеличивается. С точки зрения баланса энергий это означает, что энергия продолжает вкладываться в газ, но механизм диссипации меняется: при больших давлениях значительная доля энергии разряда тратится на возбуждение акустических колебаний, энергия которых в основном рассеивается на стенках колбы эксилампы. Это экспериментально подтверждает вывод полуэмпирических качественных расчетов, проведенных в работе [7].

Вышеперечисленные закономерности остаются в силе и для других исследованных нами смесей.

## Заключение

Исследован временной ход акустического сигнала  $S_{\text{ac}}(t)$  в процессе подачи напряжения на электроды  $\text{Xe}/\text{Cl}_2$ -эксилампы барьерного разряда и выделены четыре стадии его установления. Определена связь между  $S_{\text{ac}}(t)$  и ходом тока и напряжения  $I(t)$ ,  $U(t)$  на этих стадиях.

Экспериментально подтверждены выводы моделирования [7]. Показано, что с увеличением парциального давления смеси в  $\text{Xe}/\text{Cl}_2$ -эксилампе барьерного разряда происходит постепенная смена механизма диссипации энергии. При низких давлениях основная доля энергии разряда расходуется на тепловой нагрев газа, что соответствует объемной форме выделения тепла и объемной форме свечения. С ростом давления механизм меняется: постепенно увеличивается доля энергии, которая тратится на осуществление плазмохимических реакций с образованием рабочих молекул, что увеличивает и эффективность, и мощность УФ-излучения разряда. Одновременно формируются конические микроразряды, а интенсивность объемного свечения падает. Дальнейшее увеличение давления ведет существенному снижению доли тепловой мощности разряда, ограничению мощности и эффективности УФ-излучения, и все большая доля энергии разряда тратится на возбуждение акустических колебаний. Переход к высоким давлениям обогащает фурье-спектр акустического сигнала и увеличивает его интенсивность. При очень высоких парциальных давлениях акустический сигнал падает и достигает уровня, соответствующего собственным колебаниям колбы эксилампы без разряда. А при погасании разряда фурье-спектр сигнала обедняется и содержит только гармоники, соответствующие несущей частоте импульсов напряжения источника питания.

Авторы благодарят С.М. Авдеева за техническую поддержку.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ г/к © 02.740.11.0562.

## Список литературы

- [1] *Kogelschatz U.* // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5483. P. 272–286.
- [2] *Sosnin E.A., Oppenländer T., Tarasenko V.F.* // J. Photochem. Photobiol. C. 2006. Vol. 7. P. 145–163.
- [3] *Авдеева С.В.* Барьерный разряд. Исследование и применение. Бишкек: изд-во КРСУ, 2009. 290 с.
- [4] *Бойченко А.М., Яковленко С.И.* // В кн.: Энциклопедия низкотемпературной плазмы (гл. ред. В.Е. Фортон), 2005. Серия Б. Том XI-4. Т. 3. С. 569–508. М.: Физматлит, 2005.
- [5] *Ломаев М.И.* // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 11. С. 1091–1095.
- [6] *Авдеев С.М., Зверева Г.Н., Соснин Э.А.* // Опт. и спектр. 2007. Т. 103. № 3. С. 420–432.
- [7] *Пикулев А.А., Цветков В.М.* // Изв. Том. политех. университета. 2009. Т. 316. № 4. С. 132–135.
- [8] *Цветков В.М., Пикулев А.А., Соснин Э.А., Авдеев С.М., Тарасенко В.Ф.* // ЖТФ. 2010. Т. 80, Вып. 6. С. 53–57.
- [9] *Sosnin E.A., Tsvetkov V.M., Pikulev A.A., Avdeev S.M., Tarasenko V.F.* // Proc. of 12<sup>th</sup> Int. Symp. on Science and Technol. of Light Sources, Eindhoven, The Netherlands (July 11–16, 2010). 2010. CP150. P. 441–442.

- [10] *Tsvetkov V.M., Pikulev A.A., Sosnin E.A., Tarasenko V.F.* // Proc. of 12<sup>th</sup> Int. Symp. on Science and Technol. of Light Sources, Eindhoven, The Netherlands (July 11–16, 2010). 2010. CP126. P. 369–370.
- [11] *Pikulev A.A., Tsvetkov V.M., Sosnin E.A., Tarasenko V.F.* // Proc. of 12<sup>th</sup> Int. Symp. on Science and Technol. of Light Sources, Eindhoven, The Netherlands (July 11–16, 2010). 2010. CP102. P. 295–296.
- [12] *Sosnin E.A., Avdeev S.M., Panarin V.A., Tarasenko V.F., Pikulev A.A., Tsvetkov V.M.* // Eur. Phys. J. D. 2011. DOI: 10.1140/epjd/e2011-10665-7.
- [13] *Соснин Э.А., Пикuleв А.А., Тарасенко В.Ф.* // ЖТФ 2011. Т. 81. Вып. 4. С. 97–101.
- [14] Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Сер. Б. Т. XI-4. Газовые и плазменные лазеры. Отв. ред. С.И. Яковленко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. С. 530–531.
- [15] *Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф., Шутц Д.В.* // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 8. С. 86–92.
- [16] *Sosnin E.A., Skakun V.S., Tarasenko V.F.* // Proc. of the 8<sup>th</sup> Int. conference on Gas Discharges & Their Applications, Greifswald. 1998. P. 240–241.
- [17] *Boichenko A.M., Lomaev M.I., Tarasenko V.F.* // Laser Physics. 2008. Vol. 18. N 6. P. 738–748.