

В.М. Клишкин

## Металлизация кювет в импульсно-периодических лазерах. Причины и следствия

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 1.11.2000 г.

Металлизация внутренних поверхностей газоразрядных каналов приводит к контракции импульсно-периодических разрядов в лазерах на парах металлов. Контракция вызвана ослаблением скин-эффекта.

### Введение

Наибольший интерес для практических применений импульсных газоразрядных лазеров на электронных переходах химических элементов и ряда молекул представляет импульсно-периодический режим – режим, при котором регулярная частота следования лазерных импульсов составляет  $10^4 \div 10^5$  Гц.

На сегодняшний день в физике импульсно-периодических лазеров на парах химических элементов, несмотря на длительную историю их развития и многочисленные исследования процессов, протекающих в плазме разрядов, схемах питания, коммутаторах и т.д., имеется ряд нерешенных проблем. Две из них – масштабирование лазерных систем и расширение списка активных сред, способных работать в импульсно-периодическом режиме со сколь угодно значительным сроком службы – носят принципиальный характер.

Принципиальность этих проблем обусловлена, с одной стороны, потребностями практики, с другой – сложностью физических вопросов, которые должны быть решены в их рамках. К их числу можно отнести, например, следующие:

– почему продольный энергонапряженный импульсно-периодический разряд в газоразрядных каналах диаметром до 10 см не контрагирует;

– по каким причинам длительный импульсно-периодический режим генерации свойствен только двум элементам – Cu и Au, в то время как Таблица Менделеева содержит около 20 элементов, имеющих подходящую структуру уровней?

### 1. Две проблемы физики импульсно-периодических лазеров

1. Физическая сущность проблемы масштабирования импульсно-периодических лазеров изучена на примере Cu-лазера. В этой работе рассмотрим только два аспекта этой проблемы. Первый аспект – энергетический – заключается в том, что с ростом диаметра разрядного канала удельные характеристики активной среды – удельный энергосъем, плотность рабочих частиц, удельная вводимая мощность – значительно уменьшаются, в то время как существующие модели активной среды таких ее свойств не предсказывают. Экспериментально найдено [1], что для Cu-лазера с разрядным каналом  $\varnothing > 1$  см значения указанных удельных характеристик

примерно в 5 раз меньше, чем для того же лазера с диаметром разрядного канала менее 1 см. При этом зависимость указанных выше характеристик от диаметров каналов имеет особенности – при возрастании диаметров от 0,3 до 1 см удельные характеристики существенно падают, в то время как эти же свойства активной среды меняются относительно слабо для каналов, имеющих диаметры  $1 \div 10$  см. Например, на рис. 1, заимствованном из [2], хорошо видно, что удельные характеристики Cu-лазера с ростом диаметров каналов меняются скачком в области  $\varnothing \sim 1$  см. Это позволяет говорить о существовании двух режимов генерации – для узких и широких каналов. Ясно, что режимы генерации в узких и широких каналах отличаются механизмами ограничения важнейших параметров активной среды, таких, например, как плотность паров Cu. При решении задачи сохранения свойств активной среды, например плотности паров в каналах большого диаметра на уровне плотности паров в каналах  $\varnothing \leq 1$  см, можно ожидать погонного энергосъема Cu-лазера на уровне  $500 \div 1000$  Вт/м.

Второй аспект – газоразрядный – связан с отсутствием модели, описывающей поведение разряда. Для лазеров на парах металлов типичные разряды с погонными энерговкладами  $3 \div 4$  кВт/м в трубках  $\varnothing 2 \div 10$  см при давлениях газа  $300 \div 500$  торр подвержены ионизационно-перегревной неустойчивости и должны неминуемо контрагировать, что и наблюдается экспериментально для подобных разрядов в чистых инертных газах, например, на этапе разогрева кювет. Однако в присутствии паров металлов разряды с указанными выше параметрами автоматически расконтрагируются. Данное явление, основополагающее для лазеров на парах металлов, названо автором эффектом Петраша [2]. Экспериментально установлено, что явление автоматической расконтракции при поступлении в разряд паров весьма устойчиво, так как наблюдается при вариациях газоразрядных условий в широких пределах. Только в одном случае, который будет рассмотрен ниже, в смесях благородных газов и паров металлов наблюдалась контракция разряда.

2. Вторая проблема – проблема расширения перечня работоспособных сред – существенно менее исследована и, с точки зрения автора, может быть сформулирована следующим образом.

Во-первых, химические элементы, имеющие самоограниченные лазерные переходы, в том числе элементы, имеющие лазерные переходы с резонансных на метастабильные

уровни, можно объединить в 3 группы – *A*, *B* и *C* по следующим признакам. Два элемента – *Cu* и *Au*, на парах которых в их смесях с инертными газами наблюдается импульсно-периодический режим генерации со значительным сроком службы (> 1000 ч), включим в группу *A*. Большой список элементов, на парах которых до сегодняшнего дня наблюдался только краткосрочный (1 ÷ 10 ч) режим импульсно-периодической генерации, включим в группу *B*. Наконец, отнесем к группе *C* газы (*Ar*, *Ne*, *Xe*, *N<sub>2</sub>*, *H<sub>2</sub>* и т.д.) и атомы ряда элементов, на переходах которых импульсно-периодический режим генерации не наблюдался совсем. В рамках указанной систематизации проблема расширения списка активных сред связана с поиском физических и технических путей перевода элементов из группы *B* и *C* в группу *A*.

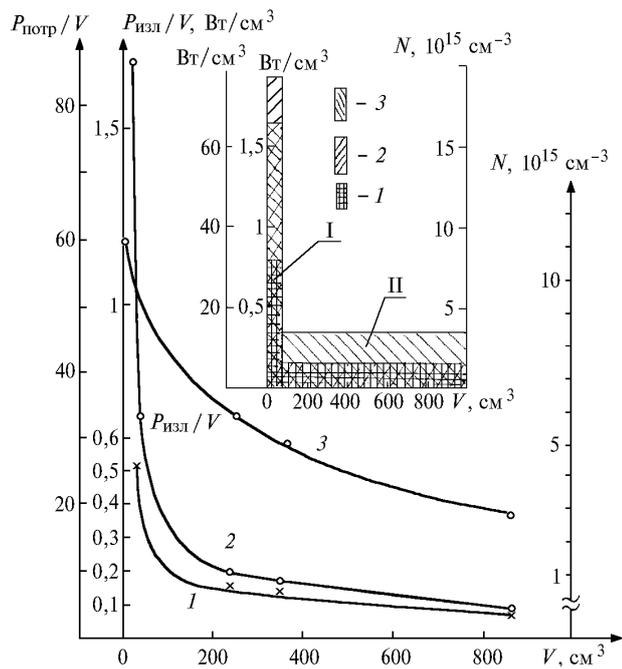


Рис. 1. Экспериментально наблюдаемые зависимости удельных характеристик лазеров на парах меди от объема  $V$  разрядного канала: 1 – потребляемая мощность  $P_{\text{потр}}$ ; 2 – удельная лазерная мощность  $P_{\text{изл}}$ ; 3 – плотность атомов *Cu* [1];  $V$  – объем газоразрядного канала;  $N$  – плотность паров. На фрагменте – интерпретация этих зависимостей в рамках гипотезы о двух режимах генерации – для узких (I) и широких (II) разрядных каналов [2]

Во-вторых, для ряда металлов из группы *B* однозначно установлено, что ограничение срока службы активных элементов, работающих в импульсно-периодическом режиме, обусловлено совершенно необычной причиной – напылением внутренней поверхности газоразрядных каналов активных элементов слоем рабочего металла.

Ниже будет показано, что малозаметное явление – металлизация стенок кювет – имеет существенное значение для понимания процессов, протекающих в импульсно-периодических лазерах, и прямое отношение к проблемам масштабирования и расширения перечня активных сред.

## 2. Экспериментальное наблюдение металлизации кювет

Типичный эксперимент по наблюдению металлизации кювет в импульсно-периодических лазерах протекал

следующим образом. После включения газоразрядной кюветы из *BeO*-керамики с разрядным каналом диаметром 1 см и длиной 40 см, заполненной *He* и содержащей свободно лежащую на внутренней поверхности канала навеску металлического *Eu*, мощность генерации на переходе  $\lambda = 1,0019$  мкм в спектре *Eu*<sup>+</sup> при частоте следования импульсов возбуждения  $f = 10$  кГц, как правило, составляла 2 ÷ 3 Вт. Однако в течение 1 ÷ 3 ч работы мощность монотонно падала до уровня ~ 0,1 Вт и менее, при этом визуально через стенку кюветы наблюдалось изменение режима разряда – разряд стягивался в шнур.

На внутренней поверхности отработавшего газоразрядного керамического канала и на аншлифах образцов керамики канала был виден практически однородный слой металла.

В результате подобных экспериментов было установлено, что для восстановления работоспособности кювет импульсно-периодических лазеров на элементах группы *B* необходимо кюветы демонтировать, удалить промывкой слой металла с внутренней поверхности разрядных каналов и собрать кюветы заново.

## 3. Причины и следствия металлизации кювет

Согласно сказанному выше пары *Eu*, как типичного представителя элементов группы *B*, образуют на внутренней поверхности разрядных каналов из окисной керамики однородный металлический слой. Однако хорошо известно, что пары *Cu* и *Au* оседают на стенках газоразрядных керамических каналов в виде капель. На этом основании можно сделать следующие выводы.

1. Разделение элементов на группы *A* и *B* имеет простой физический смысл – элементы группы *A* не смачивают *BeO*- и *Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*-керамики, а элементы группы *B* в большей или меньшей степени обладают свойством смачивания материала газоразрядных каналов. Для некоторых металлов группы *B*, например РЗЭ, смачивание стенок каналов столь эффективно, что жидкие металлы текут по вакуумно-плотной керамике, как по фитилю. Следует отметить, что внутренний металлический слой на стенках газоразрядных каналов образуется при испарении металлов как из жидкого, так и из твердого состояния (возгонкой).

2. Расширение списка элементов группы *A* за счет элементов из группы *B* возможно следующими путями:

- поиск и создание новых материалов для газоразрядных каналов;
- разработка кювет с регулируемой плотностью паров;
- разработка каналов из традиционных материалов со специальным профилем стенки.

В рассматриваемой проблеме физически наиболее интересным является вопрос о причинах срыва генерации в процессе металлизации стенок газоразрядных каналов. Естественное предположение о том, что срыв генерации обусловлен шунтированием разряда металлическими пленками, является не обоснованным, так как интегральная проводимость плазмы разряда в дальнем послесвечении составляет  $1 \div 10 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , в то время как расчетная продольная, интегральная по сечению проводимость пленки –  $10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ . Следовательно, причину срыва генерации при металлизации стенок кювет следует искать в нарушении устойчивости (контракции) разряда. В этой связи целесообразно сопоставить не интегральные, а дифференциальные проводимости пленки и плазмы. Под дифференциальной проводимостью

плазмы в данном случае понимается проводимость плазмы в слое, поперечное сечение которого равно поперечному сечению пленки. В рамках этого понятия дифференциальная проводимость плазмы будет во всех случаях меньше, чем дифференциальная проводимость металла. Отсюда совершенно очевидно, что воздействие пленки на разряд связано с шунтированием не всего объема разряда, а только наружного слоя плазмы, примыкающего к пленке. Возвращаясь к трактовке описанных выше экспериментов с He-Eu-лазером, следует сделать вывод о том, что выход из строя газоразрядных каналов обусловлен потерей устойчивости разряда (повторной контракцией) вследствие шунтирования наружных слоев плазмы импульсно-периодического разряда металлической пленкой.

Как известно, стабилизация энергонапряженных газовых разрядов требует применения систем предьонизации. Назначение систем периодизации – создание в объеме газа значительного числа свободных электронов, обеспечивающих объемный механизм ионизации газоразрядного промежутка. Одним из способов предьонизации разряда является наложение на разрядный промежуток короткого высоковольтного импульса напряжения, предшествующего основному импульсу возбуждения среды. Известно также, что эффективность предьонизации значительно возрастает, если в рабочую смесь удастся ввести легкоионизируемую добавку.

Исторически сложилось мнение, что в импульсно-периодических разрядах лазеров на парах химических элементов предьонизации газоразрядного промежутка не требуется – остаточная ионизация газа достаточно велика. Однако с учетом вышесказанного есть три аргумента в пользу существования в импульсно-периодических разрядах автоматического процесса ионизации, близкого по сути к двухимпульсным системам предьонизации. В связи с тем что начальная проводимость газоразрядного промежутка создана предыдущим импульсом тока, указанный выше процесс следует называть процессом дополнительной ионизации.

Сущность аргументов в пользу существования процесса дополнительной ионизации следующая. В о п е р ы х, остаточная ионизация не однородна по радиусу и должен существовать процесс, компенсирующий эту неоднородность. В о в т о р ы х, автоматическая расконтракция контрагированного импульсно-периодического разряда в чистых инертных газах наблюдается при поступлении в плазму легкоионизируемой добавки – паров металлов, что, как отмечено выше, является традиционным приемом усиления процесса предьонизации. В т р е т ь и х, устойчивость разряда теряется (повторная необратимая контракция) при металлизации стенок кювет, что, согласно сказанному выше, может трактоваться как следствие шунтирования процесса дополнительной ионизации и ослабления его воздействия на плазму.

Ведущая роль наружных слоев плазмы в процессе стабилизации импульсного разряда указывает на скин-эффект как процесс автоматической дополнительной ионизации.

Роль скин-эффекта обсуждалась ранее в работе [3] как физического фактора, с одной стороны, улучшающего радиальную однородность энерговклада в газ и, с другой – нарушающего одновременно возбуждения активной среды по радиусу канала. На рис. 2 [3] представлено влияние скин-эффекта на радиальное распределение вводимой мощности. Полученные кривые являлись результатом

компьютерного моделирования процессов, протекающих в газоразрядных кюветах большого диаметра. В компьютерной модели [3] не учитывалась ионизационно-перегревная неустойчивость разряда, тем не менее показанное на рис. 2 улучшение однородности энерговклада в газ при учете скин-эффекта является веским аргументом в пользу скин-эффекта как одного из компонентов механизма расконтракции импульсно-периодических разрядов.

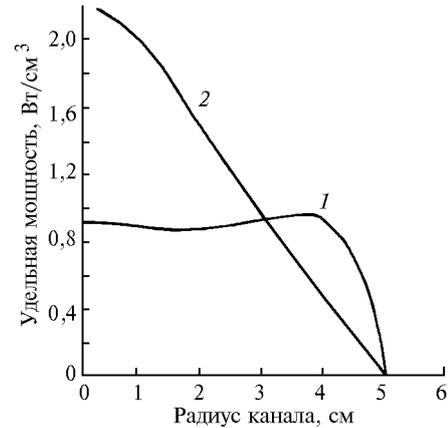


Рис. 2. Расчетное распределение энергии по радиусу разрядного канала диаметром 10 см с учетом (1) и без учета (2) скин-эффекта [3]

Оценим характерные параметры скин-слоя для предимпульсной плазмы импульсно-периодического разряда: глубину скин-слоя  $h$ :

$$h = \sqrt{2\varepsilon_0 c^2 / (p\omega)};$$

граничную частоту электромагнитной волны  $\tau^{-1}$ :

$$\tau^{-1} = pm / (n_e e^2) \cong \langle \sigma V \rangle N;$$

время проникновения скин-слоя в плазму на расстояние  $R$ :

$$T = 0,15 R^2 / (\varepsilon_0 c^2);$$

относительный энерговклад в скин-слой:

$$W = \int_0^T U(t) I(t) dt \Big/ \int_0^\infty U(t) I(t) dt ,$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость;  $\omega$  – верхняя компонента частотного спектра импульса напряжения;  $c$  – скорость света;  $n_e$  – концентрация электронов;  $e$  и  $m$  – заряд и масса электрона;  $p$  – проводимость плазмы к концу межимпульсного интервала;  $U(t)$  – напряжение на газоразрядном промежутке;  $I(t)$  – ток разряда;  $\sigma$  – транспортное сечение рассеяния;  $V$  – дрейфовая скорость электронов;  $N$  – плотность рассеивающих центров (буферного газа);  $R$  – радиус канала.

Для  $n_e = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $p = 1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ,  $\omega = 10^9 \text{ Гц}$ ,  $R = 1 \text{ см}$ ,  $\sigma = 10^{-16} \text{ см}^2$ ,  $V = 10^5 \text{ см/с}$ ,  $N = 10^{17} \text{ см}^{-3}$  имеем  $h \cong 0,4 \text{ см}$ ,  $\tau \cong 10^{-6} \text{ с}$ ,  $T \cong 2 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ ,  $W \cong 3 \div 5\%$ .

Фазу развития разряда, соответствующую интервалу времени от начала импульса до времени  $T$ , назовем

скин-разрядом. В силу зависимости  $T \sim R^2$  с ростом радиуса канала  $R$  время  $T$  быстро растет и, соответственно, нарастает энергозатраты в скин-разряд. Например, для  $R = 5$  см длительность скин-разряда составляет  $T \cong 50$  нс и относительный энергозатраты в скин-разряд достигает  $W \cong 25\%$ .

Очевидно, что перераспределение энергозатрат между основным и скин-разрядом является одним из компонентов механизма подавления ионизационно-перегревной неустойчивости плазмы импульсно-периодических разрядов в каналах большого радиуса. Если учесть результаты работы [2], то вторым компонентом механизма подавления контракции является минимум плотности на оси канала легкоионизируемой добавки – паров металла.

### Выводы

1. Импульсно-периодический режим генерации лазеров на парах металлов чувствителен к состоянию металлизации внутренних поверхностей газоразрядных каналов. Для ряда химических элементов металлизация кювет ограничивает срок службы активных элементов на уровне  $1 \div 10$  ч.

2. Влияние металлизации стенок разрядных каналов на работоспособность активных элементов связано с контракцией импульсно-периодического разряда.

3. Одним из механизмов расконтракции импульсно-периодических разрядов при поступлении паров (эффект Петраша) является скин-эффект, улучшающий радиальную однородность энергозатраты в разряд.

### Заключение

Результаты настоящей работы и работ [2, 4–6] позволяют обобщить наблюдаемые закономерности контракции и расконтракции импульсно-периодических разрядов следующим образом: разряды расконтрагируются, если они протекают в смесях инертных газов и паров металлов при наличии скин-эффекта.

Автор признателен М.В. Канаевой и А.В. Климкину за помощь в подготовке материалов для печати.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 99-02-17016.

1. *Лябин Н.Я., Чурсин А.Д., Доманов М.С.* Отпаянные промышленные активные элементы лазеров на парах металлов мощностью от 1 до 50 Вт // Изв. вузов. Физика. 1999. Т. 42. № 8. С. 68–75.
2. *Климкин В.М.* Проблемы неустойчивости продольных импульсно-периодических разрядов в лазерах на парах металлов. Томск, 1999. 24 с. (Препринт/ИОА СО РАН, № 1).
3. *Kushner M.J. and Warner B.E.* Large-bore Copper-vapor Lasers: Kinetics and Scaling Issues // J. Appl. Phys. 1983. V. 54(6). P. 2970–2982.
4. *Велихов Е.П., Ковалев А.С., Рахимов А.Г.* Физические явления в газоразрядной плазме. М.: Наука, 1987. 160 с.
5. *Букиун Л.М., Латуш Е.Л., Сэм М.Ф.* Влияние температуры активной среды на характеристики генерации рекомбинационного Si-He-лазера // Квантовая электроника. 1988. Т. 15. № 9. С. 1762–1764.
6. *Бохан П.А., Закревский Д.Э.* Исследование продольного импульсно-периодического разряда в парогазовых смесях высокого давления // ЖТФ. 1997. Т. 67. № 4. С. 25–31.

*V.M. Klimkin. Appearance of metal coating inside the cell of the recurrently pulsing laser. Cause and effect.*

Appearance of metal coating on inside surfaces of the laser's gas-discharge channels results in contraction of pulse-periodic discharges in the metal-vapor lasers. The contraction is due to the skin effect attenuation.