

Управление световым УФ потоком ХеСl-эксилампы на диэлектрическом барьерном разряде изменением ее тока^{*,**}

Х.Пике, С.Бхосле, Р.Диз, М.Кузино, М.Джибрилла, Д.Ле Тханх, А.Н.Даганг, Г.Зиссис

Проведены исследования эффективности передачи электрической мощности в газовую смесь эксиплексной ХеСl-лампы на диэлектрическом барьерном разряде (ДБР). Рассмотрена модель ДБР в виде эквивалентной электрической схемы. Показано, что выходной мощностью лампы можно управлять посредством приложенного к лампе тока. Это крайне необходимое свойство обеспечивается специфической схемой источника питания, принципы работы и конструкция которого обсуждаются в работе. Представлен экспериментальный прототип преобразователя по току, работающего в импульсном режиме с частотой примерно 50 кГц. Показана возможность контроля количества энергии, переданной за каждый импульс тока. Продемонстрирована возможность источника питания поддерживать определенные условия работы ДБР-лампы с чрезвычайно высокой стабильностью (даже при очень низком токе, в режиме одиночного канала разряда). Представлены экспериментальные результаты совместного использования такого конвертера с ХеСl-эксилампой. Исследовано влияние параметров источника на излучение лампы на длине волны 308 нм. Экспериментально показано, что излученный лампой УФ импульс имеет большое сходство с импульсом тока, пропущенного через газовую смесь. Показано также, что мощность УФ излучения коррелирует с величиной тока, инжектированного в газовую смесь, и управляется доступными степенями свободы источника питания. Обсуждаются измеренные выходные характеристики УФ излучения и рабочих параметров системы. Для анализа механизмов, участвующих в генерации эксиплексов, использовалась временная динамика УФ изображения ДБР ХеСl-эксилампы при различных режимах работы источника питания. Показано, что в случае импульсного источника напряжения образуются короткие высокоинтенсивные УФ всплески, тогда как в случае импульсного источника тока формируются устойчивые каналы разряда. На основании результатов моделирования перечисленных выше режимов работы проведены сравнение и анализ источников питания с точки зрения мощности и управления выходной мощностью УФ излучения.

Ключевые слова: диэлектрический барьерный разряд, эксиплекс, токовый режим, источник питания, статический преобразователь, УФ.

1. Введение

Эксиплексные лампы на диэлектрическом барьерном разряде (ДБР) обычно используются с электрическими генераторами, управляемыми по напряжению: классические решения для экспериментальных лабораторных установок строятся с применением широкополосных линейных усилителей, подсоединенных к повышающим трансформаторам [1, 2]. В промышленно ориентированных лампах чаще используются импульсные источники напряжения, в которых импульсы напряжения генерируются в схемах с мощными полупроводниковыми элементами [3, 4]. При подаче таких напряжений ДБР-лампа наводит в электрической схеме очень узкий пикообразный всплеск тока. Анализ УФ отклика эксилампы обнаруживает схожую

временную зависимость для мощности УФ излучения. УФ всплески также имеют очень малую длительность по сравнению с рабочим периодом всей системы. Характеристики всплесков тока (мощность, длительность, частота) крайне сложно контролировать при использовании электрических генераторов, управляемых по напряжению [5, 6].

В настоящей работе источник питания рассматривается как средство управления УФ излучением эксилампы. Анализ причинно-следственных связей перераспределений мощности между источником питания и лампой обусловил выбор схемы с управлением по току. Описано частное решение с использованием источника питания с управлением по току, кардинально отличающееся от классического варианта (с управлением по напряжению), и рассмотрены ключевые аспекты его разработки. Представлены также рабочие характеристики электрического генератора, подключенного к ХеСl-эксилампе. Они подтверждают справедливость предположения авторов о необходимости использования источника питания с управлением по току.

2. Механизмы управления УФ излучением по току

Взаимосвязь между входным током и УФ потоком от эксилампы была продемонстрирована нами в работе [7] с использованием моделирования. В настоящем разделе проанализированы механизмы этой взаимосвязи.

* Перевод с англ. В.В.Кошечкиной.

** Доложена на конференции AMPL'09 (Томск, 2009 г.).

H.Piquet, M.Cousineau, M.Djibrillah, D. Le Thanh, A.N.Dagang, G.Zissis. Université de Toulouse, LAPLACE, UMR CNRS INPT UPS, 2 rue Camichel, 31071 Toulouse Cedex, France; e-mail: Hubert.Piquet@laplace.univ-tlse.fr
S.Bhosle. OLISCIE, 175 chemin de la Pierre, 31600 Lherm, France
R.Diez. Electronics Department, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Поступила в редакцию 1 декабря 2009 г., после доработки – 4 октября 2011 г.

2.1. Модель эксилампы в частных производных

Нами разработана модель плоской ксеноновой эксилампы со слоем двойного диэлектрика в виде уравнений в частных производных, детально рассмотренная в [8]. Плазма полагалась однородной, а боковые эффекты вокруг электродов – пренебрежимо малыми. Следовательно, проводимые вычисления являются одномерными (вдоль геометрической оси системы), как и вычисления, представленные в [9]. Толщина каждого диэлектрического слоя составляет 2 мм, зазора с газом – 4 мм, а давление наполнения ксенона равно 5.33×10^4 Па (400 Тор). В модели решаются диффузионно-дрейфовые уравнения для частиц на основе уравнения Пуассона.

ДБР, питаемый напряжением, моделируется наложением потенциала на обе внешние поверхности диэлектриков. Это дает два граничных условия Дирихле для уравнения Пуассона. Обычно одна сторона заземлена, а к другой приложено напряжение, выбранное для моделирования. ДБР, питаемый током, моделируется заземлением одной стороны внешней поверхности диэлектрика и наложением электрического поля, которое пропорционально временному интегралу тока, протекающего по внешней поверхности другого диэлектрика:

$$E(x_0, t) = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^t j(x_0, t) dt, \quad (1)$$

где $E(x_0, t)$ – электрическое поле на внешней стороне диэлектрика; ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика; $j(x_0, t)$ – плотность тока, протекающего через диэлектрик. Условие (1) соответствует граничному условию Ньюмана для уравнения Пуассона. Модель основывается на приближении заданного поля и, следовательно, коэффициенты переноса и параметры источника зависят от электрического поля. Эти величины были вычислены Больсигном [10]. Модель позволяет оценить пространственные и временные характеристики как плотности плазмы, так и электрического поля.

2.2. Получение эксимеров при различных формах сигнала

Основное влияние на развитие разряда оказывает механизм распространения фронта ионизации в направлении диэлектрика, работающего как катод. Этот фронт оказывает существенное влияние на форму импульса тока и приводит к массовой генерации зарядов, возбужденных частиц и эксимеров [11]. В результате УФ поток от эксилампы, излученный эксимерами, напрямую связан с развитием ионизационного фронта. Описанная выше модель позволяет провести анализ микроскопических взаимодействий между движением этого фронта, электрическим полем в катодной области и плотностью тока.

Сначала рассматривается стационарное состояние ДБР, образованного импульсом высокого напряжения. Электронное облако дрейфует в приложенном поле, оставляя позади положительно заряженную катодную область, где развивается сильное электрическое поле, и увеличивая число электронов, эмиттированных диэлектрическим катодом. Эти электроны образуют лавину, которая приводит к развитию ионизационного фронта и наводит заряды на диэлектриках, компенсирующие приложенное электрическое поле. Следовательно, механизм развития разряда

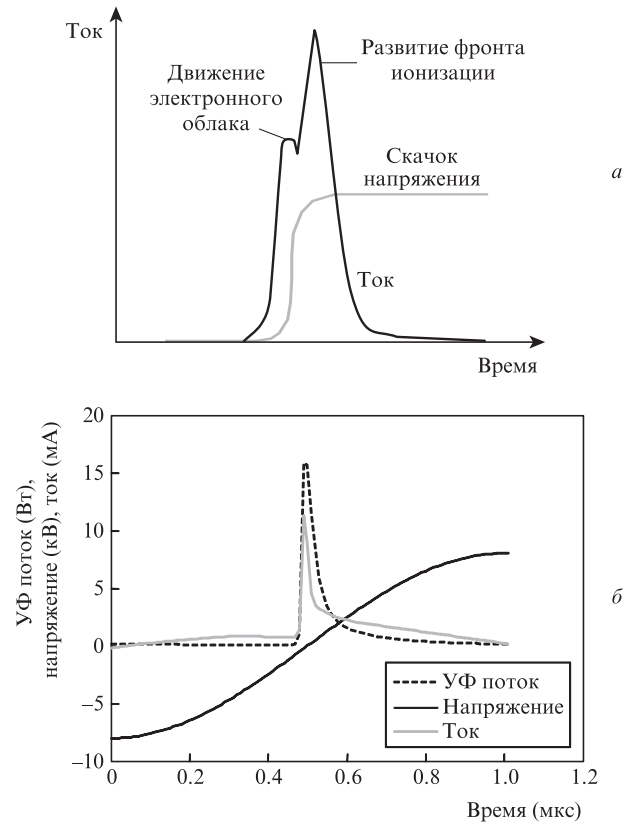


Рис.1. Форма тока для ДБР, образованного приложенным напряжением, в случае ступенчатого импульса напряжения (а) и результаты моделирования для напряжения с частотой 50 кГц и амплитудой 8 кВ (б).

блокируется. В результате ток и оптическое излучение характеризуются сильным всплеском во времени, соответствующим движению фронта ионизации. Схема описанного процесса показана на рис.1,а.

Когда характерное время изменения приложенного напряжения существенно превышает характерное время развития фронта ионизации, работает тот же механизм, что и описанный выше. Следовательно, всплески тока и оптической мощности возникают на пороге приложенного напряжения. Результаты моделирования в случае синусоидального напряжения с частотой 50 кГц и максимальной амплитудой 8 кВ представлены на рис.1,б.

Исходя из предыдущего рассуждения можно заключить, что эволюция ионизационного фронта во времени, соответствующая развитию во времени УФ потока, однозначно определяется кинетикой плазмы и величиной скачка напряжения. Можно добиться изменения характерного времени развития ионизационного фронта, если электрическое поле в катодной области изменится за более короткое время. Это можно сделать извне, изменяя приложенное напряжение. В этом случае временная форма УФ потока в общем будет повторять производную по времени от приложенного напряжения. В результате оптический контроль лампы можно осуществлять через управление наклоном (или производной) приложенного напряжения.

При использовании источника питания с управлением по току инжектируемый ток протекает в центре установившегося ДБР как ток проводимости. На первой стадии этот ток соответствует потоку электронного облака. Однако позади электронного облака, в катодной области, электрическое поле возрастает. Развивается ионизацион-

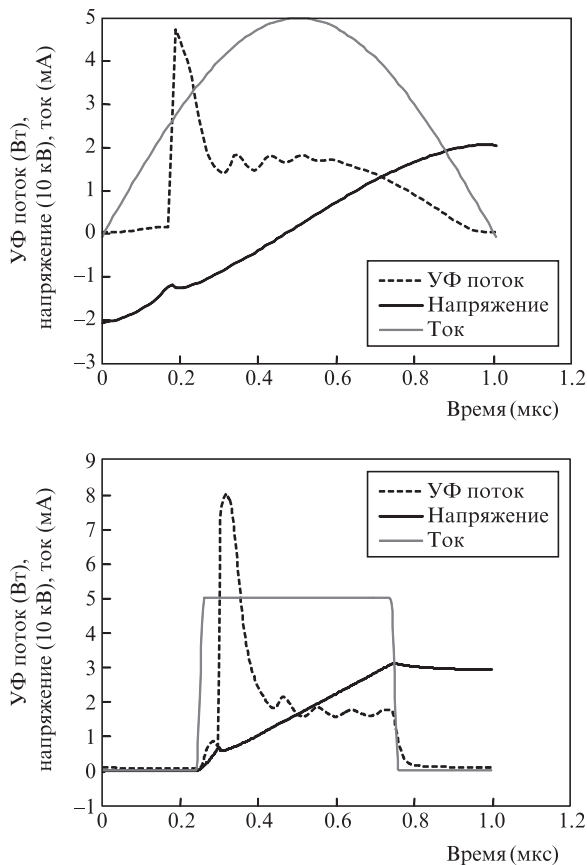


Рис.2. УФ потоки моделированной эксилампы, поддерживаемые токами различной временной формы.

ный фронт, вызывая мощную генерацию эксимеров и, следовательно, всплеск УФ потока. После этого стабильный ток поддерживает устойчивую ионизационную область рядом с диэлектриком катода, который подпитывает объем плазмы зарядами таким образом, что их поток соответствует поданному току. Следовательно, эта последняя фаза соответствует непрерывной генерации эксимеров. На рис.2 показаны УФ потоки моделируемой эксилампы, поддерживаемые токами различной временной формы.

Из приведенного выше описания механизмов разряда следует, что управление УФ излучением эксилампы можно осуществлять либо контролируя производную по времени от приложенного напряжения, либо пропуская ток. Фактически эти два случая достаточно схожи, учитывая емкостную сущность ДБР. Однако с точки зрения силовой электроники гораздо проще разработать схему на основе источника тока, нежели источник с контролем производной напряжения. Конструкция такого источника тока обобщается ниже.

3. Передача мощности

В этом разделе анализируется передача мощности ДБР-эксилампе от электрического генератора. Эквивалентная схема устройства ДБР [1, 12], доказавшая свою пригодность для эксимерных ламп, приведена на рис.3.

Конденсаторами являются емкости диэлектрических стенок (C_{diel}) и газа (C_{gas}). Пока разряд отсутствует (состояние «вкл.»), емкость газа является основной электрической характеристикой газа. Проводимость газа G_{gas} описывает его поведение в присутствии разряда (состояние

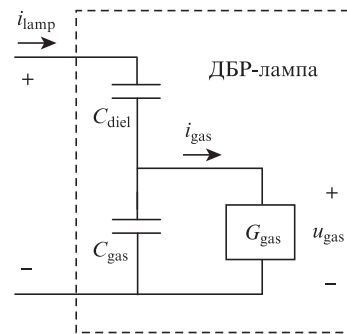


Рис.3. Эквивалентная схема модели эксилампы.

«вкл.»). Приложенное к газу напряжение u_{gas} определяет, в каком из состояний находится система. Было показано, что уравнение (2) дает хорошую аппроксимацию. Поведение величины G_{gas} разумно описывается уравнением

$$\frac{dG_{gas}}{dt} = K_{gen} \left[1 + \exp\left(\frac{U_{th} - |u_{gas}|}{\Delta U}\right) \right]^{-1} - K_{ext} G_{gas} K_{pro} |i_{gas}| \cdot (2)$$

Три слагаемых в правой части описывают соответственно три явления: пробой, который происходит, когда u_{gas} достигает порогового напряжения U_{th} ; тушение созданных частиц (K_{ext} контролирует скорость тушения); генерацию возбужденных частиц, которая, как предполагается, пропорциональна амплитуде протекающего через газ тока i_{gas} .

Параметры модели определяются автоматической итерационной подгонкой набора значений K_{gen} , U_{th} , ΔU , K_{ext} , K_{pro} и с помощью уравнения (2) итеративно корректируются до достижения хорошего согласования между экспериментальными и моделируемыми сигналами. Подробности этого подхода и его описание приведены в [13]. Параметры 60-ваттной XeCl-лампы, использованной в исследованиях, приведены в табл.1. Поведение схемы (рис.3) описывается следующими электрическими дифференциальными уравнениями:

$$u_{gas} = u_{lamp} - \frac{1}{C_{diel}} \int i_{lamp} dt, (3)$$

$$i_{gas} = G_{gas} u_{gas}. (4)$$

После того как определены параметры модели, вычисляются сигналы G_{gas} , u_{gas} и i_{gas} , которые являются неизмеримыми величинами. Входными данными для этого процесса служат измеренные сигналы u_{lamp} и i_{lamp} , а уравнения состояния (2), (3) и (4) используются для вычисле-

Табл.1. Параметры 60-ваттной Xe-Cl-лампы

Параметр	Значения параметра	
	Начальное	Окончательное
U_{th} (В)	1500	1800
ΔU (В)	20	2.9
K_{gen} (Ом·с ⁻¹)	130	2×10^4
K_{ext} (с ⁻¹)	2.7×10^6	1×10^6
K_{pro} (В ⁻¹ ·с ⁻¹)	1835	100
C_{diel} (пФ)	39.81	40.03
C_{gas} (пФ)	13.07	13.87

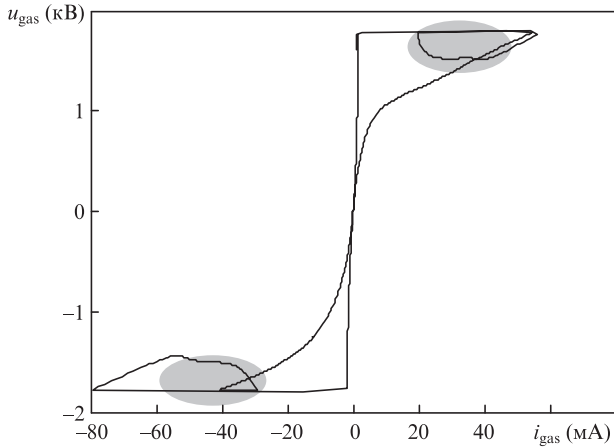


Рис.4. Вольт-амперная характеристика газа ($i_{gas}-u_{gas}$). Серым отмечены желательные области работы.

ний. Следует отметить, что в формулах этих уравнений отдается предпочтение описанию реальной цепочки связи между физическими величинами: производных избегают, и очевидно, что ток в лампе i_{lamp} определяет поведение всей системы.

Использованная в экспериментах вольт-амперная характеристика лампы ($i_{gas}-u_{gas}$) представлена на рис.4. Данные, использованные для определения параметров, были измерены во время экспериментов с классическим синусоидальным высоковольтным источником напряжения.

Гистерезисная форма характеризуется плоским участком кривой напряжения, величина которого очень близка к пороговому напряжению U_{th} . Когда газ находится во «включенном» состоянии, рабочая точка остается на этом плато: напряжение газа u_{gas} остается постоянным в достаточно большой области значений тока i_{gas} . Таким образом, переданная от источника газу мгновенная мощность, являясь произведением величин $i_{gas}u_{gas}$, напрямую управляется током i_{gas} . На рис.4 области, где это предположение верно, отмечены серым цветом. Ниже описаны способы контроля положения рабочей точки разряда, которая должна была оставаться в этой области. Несмотря на то что источник питания не в состоянии напрямую управлять током i_{gas} (см. рис.3), генератор может управлять током i_{lamp} , который, как будет показано дальше, очень близок к i_{gas} , за исключением случая, когда разряд «выключен».

4. Управляемый по току источник для эксиламп

Согласно выводам предыдущего раздела, наиболее важной характеристикой источника питания для ДБР-эксилампы является возможность управления циркулирующим в ней током. В дополнение к этому требованию из-за емкостных характеристик лампы электрический генератор должен давать ток, среднее значение которого за рабочий период равно нулю. В этой связи было предложено несколько схем [14]. На рис.5 представлена одна из них, при использовании которой сигнал тока лампы инвертируется после каждого полупериода посредством переключателей S1 и S1', связанных с первичной обмоткой трансформатора (включены навстречу), а количеством энергии, передаваемой лампе во время каждого рабочего полупериода, управляет переключатель S0.

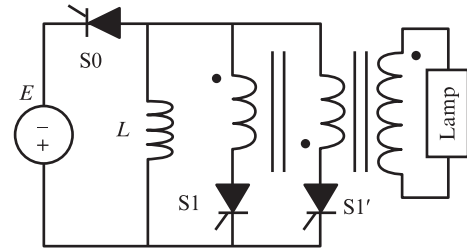


Рис.5. Источник питания с управлением по току.

4.1. Рабочий режим

На рис.6 представлены идеальные ожидаемые сигналы (ток индуктивности L – серая линия, ток лампы – черная линия) и рабочие циклы согласно состояниям переключателей преобразователя. Эти кривые получены при помощи программы схемного моделирования [15, 16]: повышающий трансформатор предполагается идеальным (коэффициент повышения n), а лампа, согласно характеристикам рис.4, состоит из источника напряжения $\pm U_{th}$, включенного последовательно с диэлектрической емкостью C_{diel} .

Крайне важная особенность конвертера видна из рис.6: длительность циклов A и C, когда энергия накоплена в индуктивности L ($\frac{1}{2}LI_{L0}^2$), определяет количество энергии, инжектируемой в лампу за каждый полупериод. Накопленная энергия передается через трансформатор в лампу во время циклов генерации B и D, в которых участвуют индуктивность L и емкость C_{diel} .

Длительность циклов B и D $t_{discharge}$ определяется величинами C_{diel} , L , n и I_{L0} [14]. Циклы заканчиваются, когда ток i_L становится равным нулю (переключатели типа тиристора спонтанно выключаются). Пустой промежуток времени Δt , добавленный между циклами B и C и между циклами D и A, введен для регулировки времени релаксации между двумя импульсами тока в лампе.

Длительности разряда и покоя вместе с длительностью циклов A и C t_{charge} определяют рабочий период конвертера

$$T = 2(t_{charge} + t_{discharge} + t_{blinking}) = 1/f_{switch}. \tag{5}$$

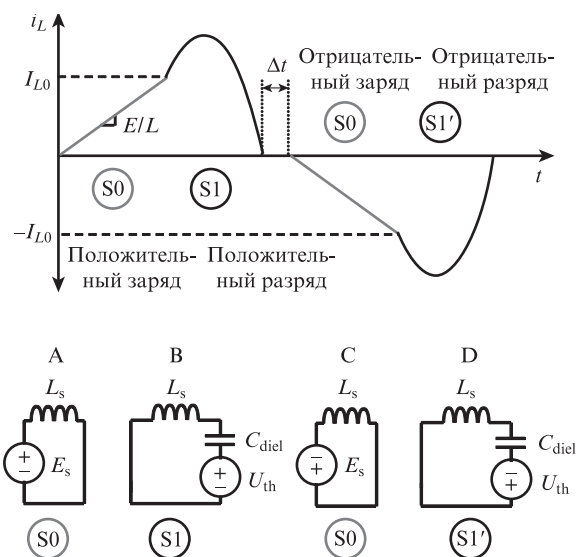


Рис.6. Рабочие циклы.

Значение тока I_{L0} в индуктивности L в конце циклов А и С, определяемое контролируемым включением переключателя S1 или S1' для запуска цикла В или D, является прямым методом управления мощностью, переданной лампе:

$$I_{L0} = Et_{\text{charge}}/L, \tag{6}$$

$$P_{\text{lamp}} = 2f_{\text{switch}}(\frac{1}{2}LI_{L0}^2). \tag{7}$$

4.2. Конструирование и методы управления

При разработке устройства такого источника требуется, чтобы у трех переключателей конвертера были такие же рабочие характеристики, как и у тиристора (однонаправленный ток во включенном состоянии, двунаправленное напряжение в выключенном состоянии с контролируемым включением и спонтанным выключением). Обычные рабочие частоты классических устройств не совместимы с частотой, необходимой в данном случае (несколько кГц). Поэтому была специально исследована и разработана схема на мощном полевом МОП-транзисторе с высоковольтным импульсным диодом и схемой электронного управления.

Важнейшим моментом при создании управляемого по току источника является разработка повышающего трансформатора. Он должен иметь весьма специфичное устройство, поскольку паразитные параметры обмоток (особенно обмотки высокого напряжения) оказывают существенное влияние на качество формы сигналов и рабочие условия. Индуктивность намагничивания должна быть достаточно большой во избежание протекания тока в лампе во время циклов А и С. Индуктивности утечки следует минимизировать, чтобы избежать высокочастотных осцилляций во время циклов В и D. Емкость второй обмотки также необходимо минимизировать, поскольку она может отводить значительный процент тока, инжектированного в лампу.

Как видно из уравнений (5)–(7), предложенный источник питания предоставляет несколько степеней свободы для контроля передачи мощности:

- t_{charge} используется для установки значения тока (I_{L0}/n), инжектированного в лампу, и определяет энергию, переданную в лампу во время следующего импульса;
- $t_{\text{discharge}}$ напрямую не контролируется и зависит от значения I_{L0} ;
- t_{blanking} регулируется и определяет длительность интервала времени релаксации (ток в лампу не инжектируется) и используется для определения рабочей частоты.

В экспериментальной установке эти степени свободы контролируются модулем на основе процессора цифровых сигналов на программируемой матрице (DSP-FPGA), который точно определяет порядок работы каждого переключателя мощности и обеспечивает временные измерения и их анализ.

5. Характеристики генерации УФ излучения

5.1. Электрические характеристики источника

Прототип предложенного источника, основные электрические характеристики которого приведены ниже, был реализован и подключен к эксилампе.

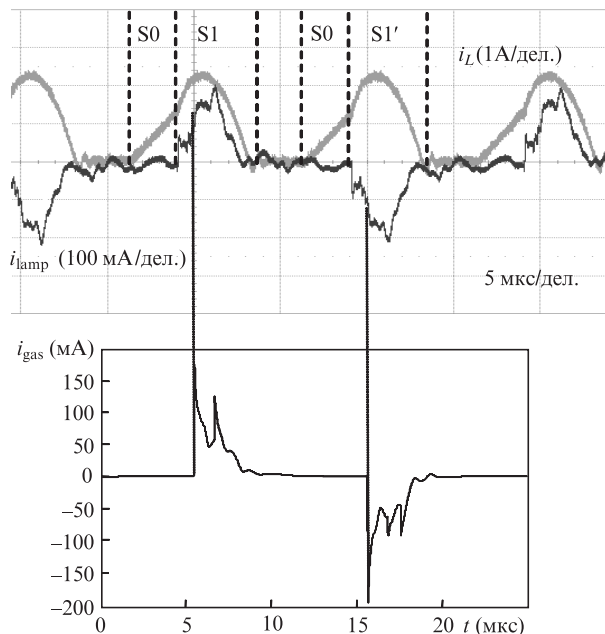


Рис.7. Основные характеристики источника: измеренные токи i_L и i_{lamp} , а также рассчитанный ток i_{gas} .

Частота переключения f_{switch} (кГц)50
Первичная индуктивность L (мкГн)	160
Коэффициент повышения трансформатора n12
Напряжение источника E (В)	150
Ток в конце цикла А или С I_{L0} (А)	≤ 1.5
Измеренный электрический КПД η (%)70

Эксилампа состоит из двух соосных кварцевых трубок с внешними диаметрами 43 и 23 мм и длиной 130 мм, которые являются двумя диэлектрическими барьерными слоями между внешним и внутренним электродами. Внутренним электродом служит алюминиевый стержень, подсоединенный к высоковольтному источнику, а внешним – заземленная проволочная сетка. В лампу закачана смесь хлора (менее 0.5%) и ксенона с общим давлением порядка 150 мбар.

На рис.7 показаны измеренные индуктивность L и ток лампы i_{lamp} , хорошо совпадающие с теоретическими данными. Колебания на более высокой частоте, проявляющиеся в сигнале i_{lamp} , вызваны упомянутым выше паразитным влиянием повышающего трансформатора. На основе описанной в разд.2 модели можно вычислить также протекающий через газ ток i_{gas} .

5.2. УФ генерация

Была также разработана оптическая система, связанная с источником питания. Она позволяет измерять усредненные параметры полученного излучения и отслеживать их динамику во времени (с синхронизацией управляющих сигналов источника питания) как в видимой, так и в УФ области (см. разд.6). На рис.8,а приведены сигналы мгновенного уровня УФ мощности и вычисленного тока i_{gas} . В [17] представлены результаты, говорящие о близкой корреляции между этими двумя сигналами, несмотря на использование источника синусоидального напряжения.

Синхронизация источника питания с оптическими измерениями позволила установить подобие сигналов. Было

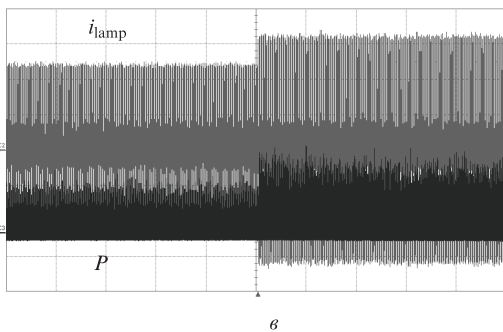
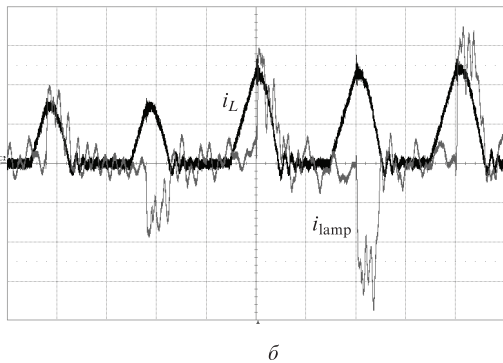
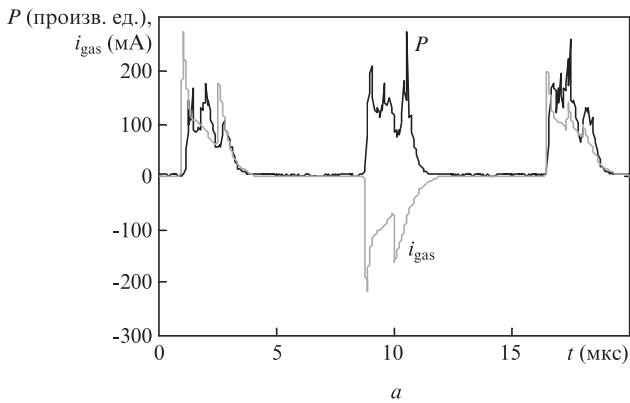


Рис.8. Форма сигнала измеренной мгновенной УФ мощности P в сравнении с рассчитанным током i_{gas} (а), пример мгновенного управления током i_{lamp} (б) и УФ генерация, управляемая источником питания (в).

проведено несколько схожих измерений с различными длительностями импульса тока i_{gas} , которые привели к одинаковым выводам: генерация УФ излучения очень сильно связана с током в газе i_{gas} , и любые его изменения (посредством одной из степеней свободы источника) немедленно сопровождаются аналогичными изменениями УФ потока. Временной масштаб, позволяющий использовать это свойство для управления УФ излучением, начинается от половины рабочего периода преобразователя.

На рис.8,б продемонстрировано изменение тока лампы на масштабе половины периода, из рис.8,в следует, что задавать мощность УФ излучения посредством изменения тока i_{lamp} можно даже в переходном состоянии.

Спектр генерируемого УФ излучения был исследован для разных инжектируемых мощностей (управляются длительностью t_{charge}): рис.9,а доказывает, что спектральный состав излучения лампы не зависит от вложенной мощности.

С учетом средней УФ мощности (измерена при помощи радиометра на длине волны 308 нм) степени свободы

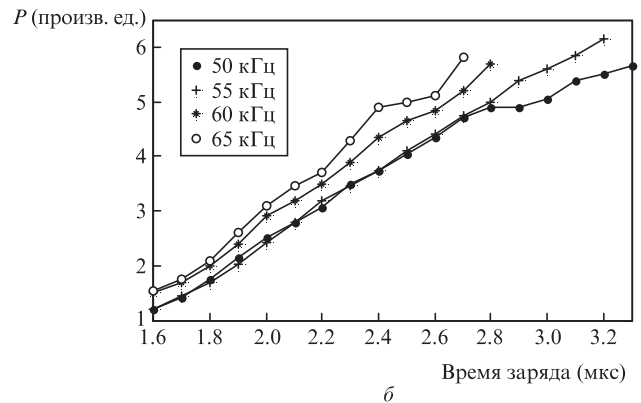
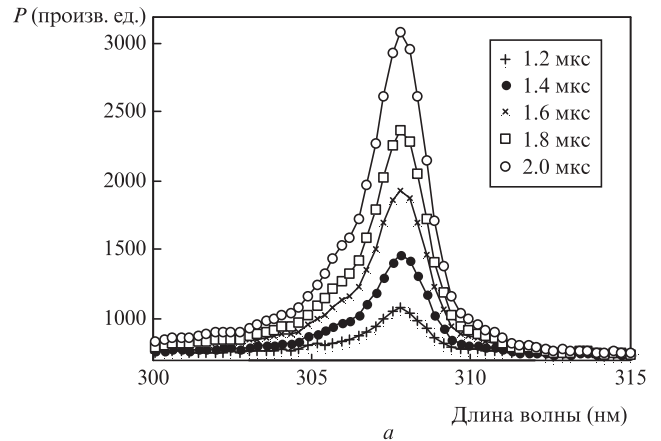


Рис.9. Распределение сгенерированной УФ мощности при различных уровнях инжектированной мощности (а) и зависимость относительного значения УФ мощности от t_{charge} для нескольких рабочих частот (б).

источника были использованы для изучения корреляции между относительной УФ мощностью и инжектированной мощностью для нескольких рабочих частот.

Из рис.9,б следует, что УФ мощность возрастает с длительностью t_{charge} , которая определяет энергию, переданную лампе (согласно уравнениям (6) и (7) – квадратично), и с частотой переключения, пропорциональной инжектированной электрической мощности (см. уравнение (7)). Видно, что кривая на рис.9,б, соответствующая 50 кГц, весьма близка кривой, соответствующей 55 кГц. Это можно интерпретировать как более хорошее преобразование из электрической мощности в оптическую для лампы при 50 кГц. Последний результат весьма интересен и позволяет предположить, что источник питания в токовом режиме может быть использован для определения оптимальной рабочей частоты лампы.

6. УФ изображение эксилампы

На рис.10 представлена схема высокоскоростного построения УФ изображения эксилампы, питаемой источником напряжения и источником тока. Кварцевая линза через УФ фильтр фокусирует ультрафиолетовую часть изображения эксилампы на фотокатод ПЗС-камеры высокой чувствительности. В работе использовалась камера Roper Scientific PI-MAX. Контроллер камеры управляет синхронизацией захвата кадров с помощью электрических стробирующих сигналов от источника питания эксилампы. Осциллограф регистрирует эти электрические из-

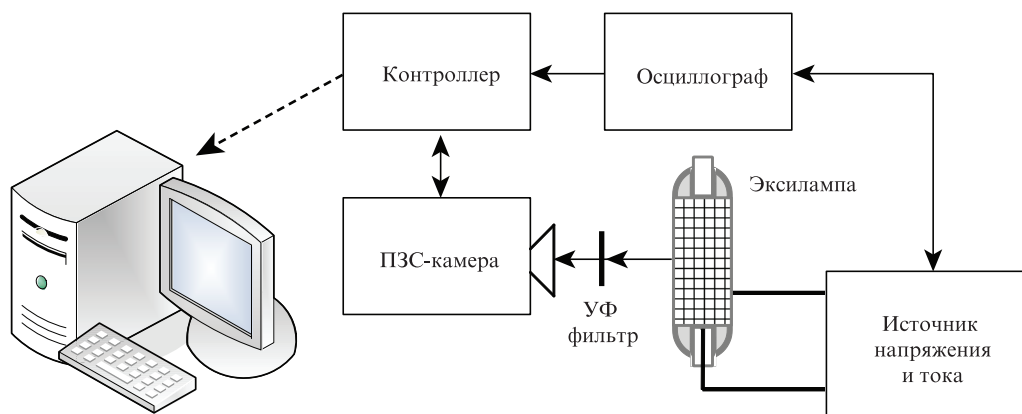


Рис.10. Схема экспериментальной высокоскоростной системы построения УФ изображения.

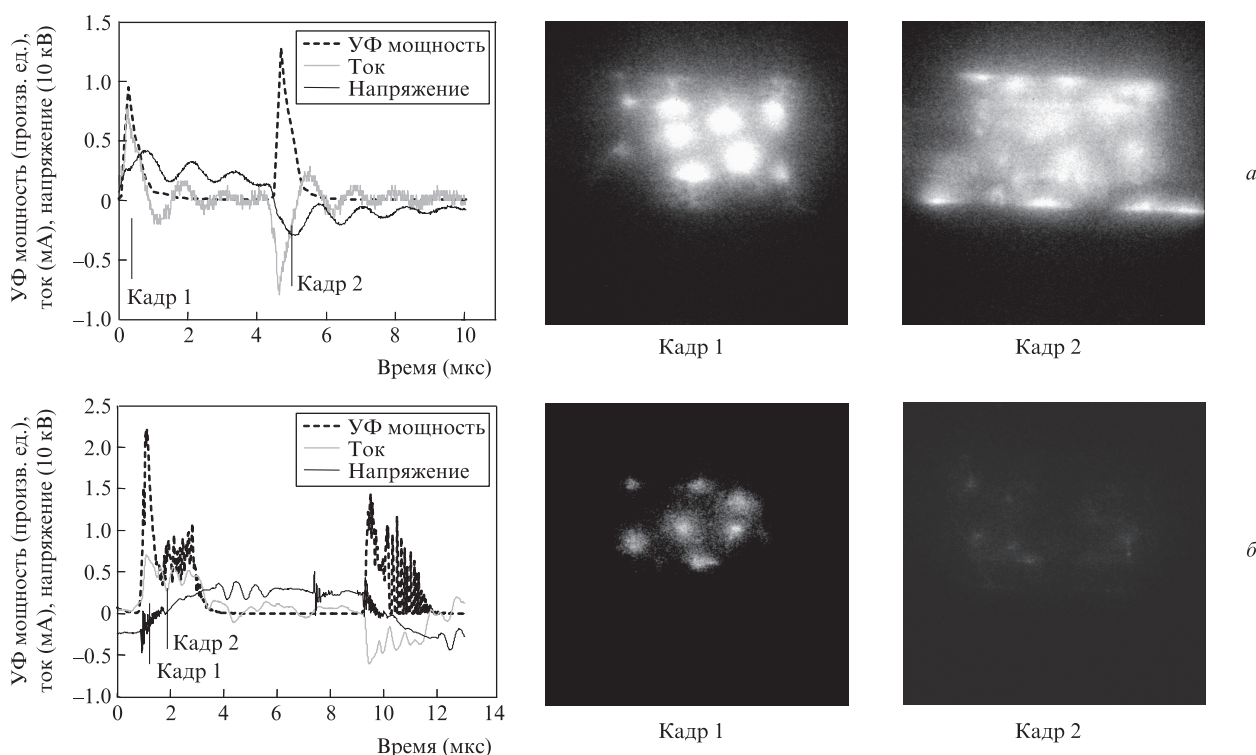


Рис.11. УФ изображение эксилампы в случае источника импульсного напряжения (а) и импульсного тока (б).

мерения во время захвата. Изображения с камеры передаются на компьютер.

Эксиллампа питалась от импульсного источника напряжения или током с частотой 60 кГц. Электрические сигналы и соответствующие УФ изображения представлены на рис.11. Видно, что в случае источника напряжения появляются два мощных УФ всплеска, соответствующих пикам тока (кадры 1 и 2 вверху). Между двумя нарастающими или спадающими фронтами напряжения УФ излучение не наблюдается. В случае токового источника питания длительность импульса тока, генерируемого источником, составляет примерно 3 мкс, и в это время УФ излучение все еще видно. На УФ изображении (кадры 1 и 2 внизу) видно, что структура разряда остается волокнистой до тех пор, пока подается ток. Это означает, что управление ДБР по току приводит к управлению механизмами разряда и что фронты ионизации в нитевидных каналах поддерживаются в течение времени подачи тока.

7. Заключение

В работе представлена концепция управляемого по току статического преобразователя для управления передачей мощности ДБР-лампе. Предложенная схема продемонстрировала возможность управления током и мощностью, инжектированной в лампу за каждый рабочий полупериод.

К экспериментальной установке было подключено устройство для УФ оптических измерений, синхронизированное с источником питания. Его использование подтвердило тот факт, что генерация УФ излучения напрямую управляется током, протекающим в газе, который в свою очередь определяется током, инжектированным в лампу.

Предложенный статический преобразователь предоставляет две основные степени свободы для задания рабочих условий системы: уровень инжектированной мощно-

сти за каждый полупериод и частота. В результате наших исследований этих степеней свободы было обнаружено, что временная зависимость мощности УФ излучения сильно коррелирует с временной зависимостью электрической мощности. Показано, что источник питания, рассмотренный в этой работе, может представлять ценность для последующих исследований с точки зрения определения оптимальных параметров работы ДБР-лампы.

Авторы благодарят Dermoptics (Quantel Group) за предоставление патентованной лампы для экспериментальной части этой работы. Часть работы проведена во франко-колумбийском сотрудничестве, поддержанном программой ECOS-Nord/COLCENCIAS/ICETEX.

1. Kogelschatz U. *Plasma Chem. Plasma Process.*, **23**, 1 (2003).
2. Bhosle S., Zissis G., Damelincourt J.J., Capdevila A., Gupta K., Dawson F.P., Tarasenko V.F. *Proc. IEEE IAS Conf.*, **4**, 1784 (2006).
3. Sosnin E.A., Erofeev M.V., Tarasenko V.F., Shitz D.V. *Instrum. Exp. Techniques*, **45** (6), 838 (2002).
4. Lomaev M.I., Sosnin E.A., Tarasenko V.F., Shits D.V., Skakun V.S., Erofeev M.V., Lisenko A.A. *Instrum. Exp. Techniques*, **49** (5), 595 (2006).
5. Oda A., Sugawara H., Sakai Y., Akashi H. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **33** (12), 1507 (2000).
6. Mildren R.P., Carman R.J. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **34** (1), L1–L6 (2001).
7. Bhosle S., Piquet H., Diez R., Tarasenko V.F., Erofeev M.V., Zissis G. *Proc. 11th Int. Symp. High Pressure, Low Temperature Plasma Chemistry (HAKONE XI)* (Oleron Island, France, 2008).
8. Bhosle S., Zissis G., Damelincourt J.J., Capdevila A. *Proc. XVI Int. Conf. Gas Discharge and Appl. (GD-2006)* (Xi'an, China, 2006).
9. Oda A., Sakai Y., Akashi H., Sugawara H. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **32**, 2726 (1999).
10. *The Siglo Database* (CPAT & Kinema Software, 1995).
11. Piquet H., Bhosle S., Diez R., Toumi A., Zissis G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6938**, 693810 (2008).
12. Vongphouthone S., Piquet H., Foch H. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, **15**, 123 (2001).
13. Diez R., Salanne J.P., Piquet H., Bhosle S., Zissis G. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, **37**, 307 (2007).
14. Diez R., Piquet H., Bhosle S., Blaquièrre J.M., Roux N. *IEEE Int. Symposium on Indus. Electronics*, **1**, 62 (2008).
15. <http://www.powersimtech.com>.
16. <http://www.synopsys.com>.
17. Борисов В.М. и др. *Квантовая электроника*, **25** (4), 308 (1998).