

БЕЗЭЛЕКТРОДНЫЕ СВЧ-РАЗРЯДНЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОСМАТРИВАЮТСЯ

Э.Шлифер

Эффект инициирования и поддержания газового разряда СВЧ-электромагнитными полями без электродов и возникновения при этом оптического излучения (ОИ) известен специалистам, разрабатывающим и применяющим СВЧ-приборы в различных исследованиях и системах. Однако свечение СВЧ-газового разряда в этих, да и во многих других случаях, — лишь побочный эффект, не используемый широко в осветительных целях. А ведь потенциальные области применения безэлектродных СВЧ-разрядных источников света чрезвычайно разнообразны. Это и прожекторы, и светильники, и модули засветки оптических систем полых световодов, используемых, в частности, для освещения взрыво- и пожароопасных помещений. Можно прогнозировать применение оптического излучения безэлектродного СВЧ-разряда и в лечебно-профилактических целях. По-видимому, СВЧ-световые приборы окажут влияние не только на развитие будущих осветительных систем, но и на архитектуру зданий и сооружений, их интерьеров, коммуникационные средства.

Сегодня известны уже не единичные примеры применения светового излучения безэлектродного СВЧ-газового разряда. Так, в конце 70-х годов на предприятии "Плутон" это излучение использовалось как "полезный продукт" в лабораторных мозаичных индикаторах, предназначенных для визуализации топографии СВЧ-полей рабочих камер бытовых микроволновых печей. Но об осветительных устройствах тогда речь не шла. В те же годы в США на фирме Fusion System Corp. (FSC) были созданы и использованы при УФ-сушке излучатели на основе безэлектродных СВЧ-разрядных ламп, главным образом с аргонно-ртутным наполнением. Излучатели работали с СВЧ-накачкой на частотах 915 и 2450 МГц. Специалистам FSC пришлось преодолеть немало трудностей, связанных с обеспечением благоприятных условий для устойчивой генерации и эффективной передачи в разряд мощности СВЧ-накачки, с определением оптимального состава наполнителей лампы (горелки), температурного режима, формы кварцевой колбы и др. В частности, предпочтение было отдано колбе сферической формы. Лампа помещалась в осесимметричный (цилиндрический) СВЧ-резонатор со светопрозрачными сетчатыми стенками, практически не пропускающими СВЧ-излучение в окружающую среду. Соответствующий СВЧ-возбудитель формировал в резонаторе определенную структуру ("топографию") СВЧ-электромагнитного поля,

присущую выбранному рабочему виду колебаний. Лампа располагалась в зоне максимума напряженности электрической составляющей поля. Это обеспечивало (иногда с некоторыми ухищрениями) надежное "зажигание" безэлектродного СВЧ-разряда в стартовом газе (аргоне) и насыщенных парах рабочего вещества (ртути). Хотя по мере выхода на стационарный режим СВЧ-разряда пространственное положение максимума поля и амплитуда напряженности электрической составляющей в той или иной степени меняются, в целом удалось найти компромиссные технические решения, обеспечившие стабильное горение разряда, с одной стороны, и уверенное "перезажигание" его при повторном включении СВЧ-накачки — с другой.

В начале 90-х годов американские инженеры, исследуя составы рабочего вещества-наполнителя лампы, обнаружили, что замена ртути в колбе безэлектродной лампы серой позволяет получить весьма интенсивное квазисолнечное излучение. Это послужило отправным пунктом для создания в 1992 году первых световых СВЧ-приборов на основе серных ламп с СВЧ-накачкой на частоте 2450 МГц [1]. А в октябре 1994 года в Вашингтоне уже были продемонстрированы две мощные осветительные системы с использованием весьма выигрышного сочетания СВЧ-источника света на серной лампе и полого "призматического" световода. Суммируя данные, опубликованные в материалах фирм, представленные на международных выставках светотехнических достижений, в сети Интернет, в работах зарубежных и отечественных специалистов, можно выделить такие достоинства СВЧ-световых приборов на основе безэлектродных серных ламп, как:

- повышенная световая отдача (~100 лм/Вт), обеспечивающая возможность энергосбережения;
- сплошной квазисолнечный спектр ОИ с резко пониженным уровнем УФ- и ИК-излучения, максимум спектральной плотности которого практически совпадает с максимумом кривой "видности" человеческого глаза, т.е. естественная (неискаженная) цветопередача;
- малые габариты, высокая яркость и симметричность формы светящего тела, облегчающая оптимизацию оптических систем и, в частности, фокусировку потока ОИ;
- большая долговечность лампы — несколько десятков тысяч часов;
- экологическая "чистота" собственно излучения и материалов горелки;
- возможность регулировки силы света путем изменения уровня мощности СВЧ-накачки.

При этом важно, что указанные достоинства можно реализовать в полной совокупности, не жертвуя одним ради другого.

Главные недостатки рассматриваемых приборов:

- высокая температура колбы горелки, что вынуждает использовать высококачественное и, соответственно, дорогое кварцевое стекло и обеспечивать обеспыленную и неагрессивную воздушную среду, соприкасающуюся с горелкой;
- относительно высокая стоимость СВЧ-светового модуля — 1950–4000 долл. (по крайней мере, в условиях современного монополизованного и пока не массового производства). Высокую цену

полых призматических световодов (~250–300 долл. за погонный метр) нельзя отнести к недостаткам собственно СВЧ-светового прибора, так как она определяет стоимость системы освещения с любым источником света, в которой применяются полые световоды.

Достоинства новых источников света и осветительной системы сразу признали разработчики, потенциальные потребители, эксплуатационники, дизайнеры, экологи и др. Но "триумфального завоевания" рынка этими источниками и системами и вытеснения других осветительных устройств не произошло, и, по-видимому, произойдет еще не скоро. И этому есть вполне определенные объяснения. Во-первых, СВЧ-световые приборы еще очень "молоды" – они существуют менее 10 лет (табл.). Во-вторых, эти приборы пока не относятся к "широпотребу", поэтому их возможности и особенности еще полностью не осознаны и/или не подтверждены результатами эксплуатации.

О предпочтительных областях применения источников ОИ на серных (а возможно, с иным рабочим веществом-наполнителем) безэлектродных лампах с СВЧ-накачкой в современной рекламной, журнальной и патентной литературе сказано много. Содержание этого бурно нарастающего потока информации дает основания для многих оценок и прогнозов. Прежде всего, надо отметить, что сегодня уже реализован ряд как автономных СВЧ-световых приборов, так и осветительных систем на их основе с использованием полых световодов. Можно выделить, по меньшей мере, пять решаемых такими устройствами задач, каждая из которых в отдельных конкретных случаях может считаться приоритетной. Исторически первая целевая задача – достижение впечатляющего зрительного эффекта. При этом энергосбережение, качество цветопередачи, долговечность и безвредность излучения – сопутствующие достоинства этих приборов и систем. Вторая – обеспечение высокой экономичности осветительной системы в целом (включая энергосбережение, доступность, низкую стоимость монтажа и обслуживания, отсутствие проблем утилизации). Хорошее качество спектра излучения, возможность получения мощных четко сформированных световых потоков и другие достоинства – это, опять-таки, сопутствующие факторы, даже неполная реализация которых не препятствует решению целевой задачи. Третья задача – достижение квазисолнечной световой среды и обеспечение комфортных условий, а то и лечебно-профилактического воздействия на человека и другие объекты живой природы при указанных выше сопутствующих достоинствах. Четвертая – предотвращение деструктивных, опасных или иных вредных воздействий УФ- и ИК-излучений на освещаемые объекты и окружающую среду, особенно при высоких уровнях освещенности. И наконец, пятая задача – обеспечение оптимальных условий формирования светового потока, излучаемого квазиточечным телом и направляемого на освещаемый объект непосредственно или с помощью устройств перераспределения света (будь то система симметричных или асимметричных отражателей, оптическая система полых или волоконных световодов).

Возможность достижения многих целей при сохранении основных достоинств определяет перспективность СВЧ-световых приборов и обуславливает развитие новой "идеологии" проектирования не только осветительных устройств и систем, но и архитектуры зданий, сооружений, их интерьеров, функциональных помещений, энергетических коммуникаций и т.п. с учетом особенностей, диктуемых климатическими условиями. Можно прогнозировать и некоторое реформирование идеологии построения установок освещения улиц, площадей, тоннелей и других объектов городского хозяйства, архитектурных памятников и т.п. Среди немалого числа примеров, иллюстрирующих практическое применение новых световых приборов, кроме первых систем у головного здания Департамента энергетики США (Форрестол Билдинг) и в Национальном музее воздухоплавания и космонавтики (NASM) в

Вашингтоне, можно отметить установленную в безоконном зале сортировки почты в Сундсвале (Швеция) систему освещения, построенную на базе прибора Solar 1000™ и полых призматических световодов. Система состоит из 24 линий горизонтальной подвески, заменяющих 360 люминесцентных ламп. Главная цель установки этой системы – отнюдь не создание декоративного эффекта, а формирование квазисолнечного спектра, позволяющего создать комфортные и безопасные условия труда для персонала. Немаловажный фактор – и решение столь актуальной сегодня проблемы энергосбережения. Другой пример использования серных ламп – система освещения торгового центра Колумбус в городе Вуосаари (Финляндия) [2]. Особенность этой системы – применение 18 СВЧ-ламповых модулей (с встроенным источником питания и управления) типа Light-drive 1000™ без световодов, но с асимметричными отражателями, что обеспечивает эффективное и эффективное распределение света. Высокий уровень освещенности позволяет выигрышно представлять товар, квазисолнечный спектр обеспечивает неискаженную цветопередачу, а низкий уровень УФ-излучения гарантирует сохранность красок и других чувствительных к нему ингредиентов, входящих в состав выставленных к продаже объектов. Можно упомянуть и системы освещения с полыми световодами крупных холодильных помещений, где важно – малая доля ИК-излучения в спектре серной лампы, а также монтируемые на мачтах легкие и долговечные светильники самолетных стоянок.

В России и СНГ СВЧ-световые приборы пока не производятся. Специалисты ИЗМИРАН, НИИЯФ, ВНИСИ, ВЭИ, МЭИ, ЗАО "ЛИТ", ОАО "Плутон" провели ряд самостоятельных и совместных работ по их созданию [3]. Впервые опытный образец отечественного СВЧ-светового прибора был представлен ОАО "Плутон" на выставке "Интерсвет-98" в Москве в декабре 1998 года. На международных выставках неоднократно демонстрировался, и с успехом, отечественный образец системы "Свэтон", объединяющей СВЧ-ламповый модуль на базе вращающейся сферической горелки (с комбинированным составом рабочего вещества) и секцию полого световода. Выявились не только новые потребности в подобных устройствах, но и возможности их удовлетворения. Так, далеко не всегда нужен узконаправленный световой луч. При освещении больших площадей, декоративном освещении интерьеров, для подсветки фонтанов и т.п., а также для подсветки входных торцов множества волоконных световодов потоки ОИ должны иметь иные формы. В частности, рассматривается перспективность использования радиально расходящихся сфокусированных и нефокусированных световых потоков, позволяющих исключить применение квазиточечного плазменного светящегося тела и сферической горелки. Нежелательно (причем не только в этих случаях) ныне уже ставшее традиционным вращение горелки, необходимое при использовании в ламповом модуле СВЧ-резонатора, работающего на TE_{11p} -виде колебаний, характеризующемся азимутально несимметричной топографией электромагнитного поля, что влечет за собой неоднородный нагрев колбы и искажение формы светящегося тела.

Еще задолго до постановки задачи формирования радиально расходящихся потоков ОИ нами в 1996 году было предложено использовать в СВЧ-резонаторе вместо TE_{11p} -вида колебаний TE_{011} -вид, в распределении электромагнитного поля которого нет азимутальных вариаций. В основе этого решения лежал опыт, накопленный в ходе разработки в ОАО "Плутон" обращенно-коаксиальных магнетронов, в стабилизирующем резонаторе которых в качестве рабочего использовался именно TE_{011} - вид колебаний. Особенность, присущая этому виду колебаний, – замкнутые кольцевые формы силовых линий СВЧ-электрического поля в объеме резонатора и СВЧ-токов в его стенках. Азимутальная однородность полей и токов и отсутствие радиальных и продольных составляющих позволяют реализовать нетрадиционное пост-

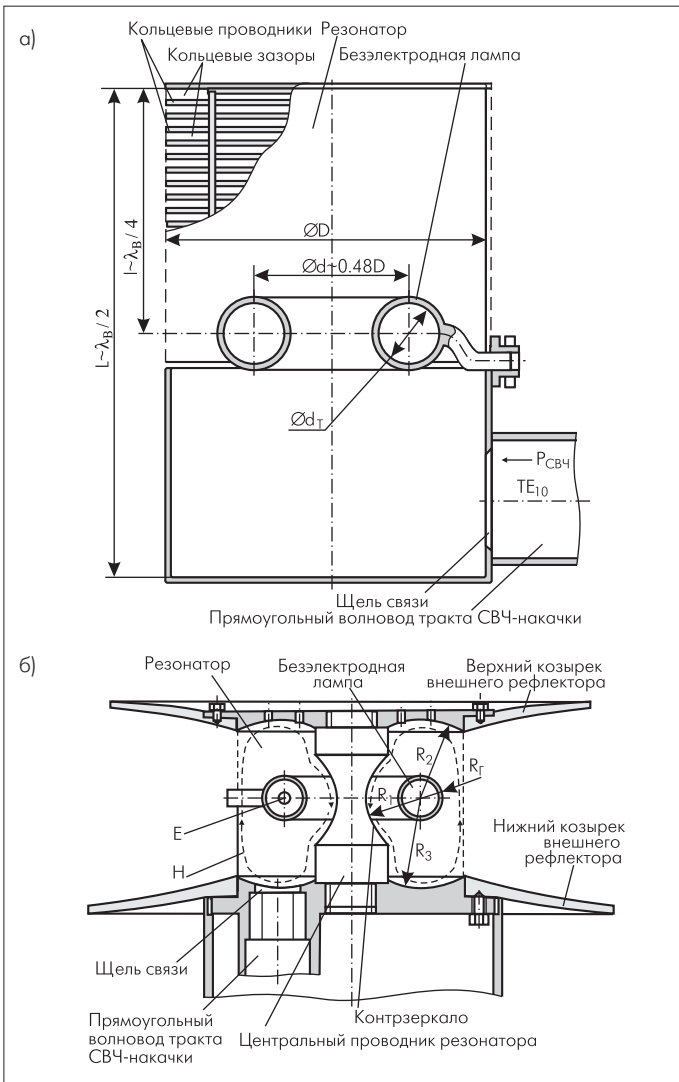


Рис. 1. СВЧ-резонаторы с рабочим видом колебаний TE_{011} :
а) цилиндрический; б) коаксиальный

роение СВЧ-резонатора и безэлектродной лампы-горелки, а кольцевая форма силовых линий электрического СВЧ-поля – использовать тороидальную безэлектродную лампу-горелку и при этом получить азимутально однородное распределение температуры по ее поверхности. Тем самым устраняется необходимость вращения лампы. Благодаря кольцевой форме СВЧ-токов в стенках резонатора их можно, как показано ниже, формировать из кольцевых проводников, разделенных зазорами (просветами), что обеспечивает повышенную светопрозрачность стенок, не приводя к росту СВЧ-излучений в окружающее пространство. Таким образом, с одной стороны, обеспечивается формирование азимутально однородного плазменного светоизлучающего тела кольцевой формы и с другой – увеличивается светопрозрачность стенок СВЧ-резонатора. В результате можно одновременно отказаться от вращения горелки и увеличить полную световую отдачу СВЧ-светового прибора. Уже первые эксперименты в 1997–1998 годах подтвердили увеличение как мощности светового потока, так и КПД СВЧ-светового прибора. Исследования в этом направлении, в частности по созданию тороидальной безэлектродной лампы, излучающей в поле колебаний TE_{011} -вида, проводятся в России и сейчас (ОАО "Плутон", ВЭИ, МИФИ и др.) [4], причем ряд оригинальных технических решений находится на разных стадиях патентования.

На рис. 1а показано одно из предложенных автором построений СВЧ-резонатора (независимо от создаваемой внешним рефлектором

формы светового потока) с невращаемой тороидальной лампой (горелкой), расположенной в зоне пучности СВЧ-электрического поля колебаний TE_{011} -вида. Боковая и торцевая стенки резонатора вместо традиционной сетки с квадратной или ромбической ячейкой выполнены в виде набора разделенных зазорами проводящих колец, благодаря чему устройство отличается повышенной светопрозрачностью. СВЧ-токи в стенках резонатора азимутально замкнуты (как и линии E), следовательно, не пересекают зазоры, и уровень мощности СВЧ-излучения резонатора не повышается. На рис. 1б схематично показано распределение СВЧ-полей на примере коаксиального резонатора на TE_{011} -вида колебаний. Колебаниям TE_{011} -вида в коаксиальном резонаторе, содержащем центральный проводник, и в цилиндрическом резонаторе, полностью или частично заполненном диэлектриком, присущи аналогичные распределения полей и токов, хотя пространственные положения "пучности" поля различны. Естественно, это приводит к перераспределению силовых линий в зависимости от формы проводящих граничных поверхностей, формы введенного в резонатор диэлектрика и значения его диэлектрической постоянной. Для существования выбранных колебаний TE_{01p} -вида именно на рабочей частоте СВЧ-накачки все это учитывается при определении размеров резонатора.

Для формирования радиально расходящихся световых потоков (в том числе для равномерной засветки входных торцов волоконных световодов) в СВЧ-резонаторе с рабочим TE_{011} -видом колебаний и тороидальной безэлектродной горелкой используется центральный проводник с тороидальной вогнутостью боковой поверхности, образующей контрзеркало (см. рис. 1б). Зеркало возвращает (фокусирует) лучи на азимутальную ось тороидальной лампы независимо от формы внешнего рефлектора, выполненного в виде двух "козырьков", форма которых определяет диаграмму направленности ОИ (кривой силы света). В цилиндрическом СВЧ-резонаторе (рис. 2) эта задача решается с помощью дихроичного диэлектрического рефлектора, светоотражающая поверхность которого является продолжением поверхности внешнего рефлектора и, в частности, поверхности, образующая которой – парабола. Тем самым обеспечивается строго радиальное светоизлучение, что, в частности, может быть использовано для засветки волоконных световодов (рис. 3). Заметим, что свет может излучаться не только перпендикулярно оси резонатора, но и наклонно вверх или вниз (рис. 1б и 2). Это лишь два примера из множества возможных построений, позволяющих решать задачу формирования радиально расходящихся световых потоков.

Статья не претендует на полноту охвата возникших [3] (и отчасти преодоленных) проблем в сфере создания и применения СВЧ-разрядных безэлектродных ламп и световых приборов на их основе, как не претендует на непогрешимость прогнозов на будущее. Тем не менее, даже из фрагментарного рассмотрения современной ситуации и некоторых направлений работ, закладывающих фундамент следующего поколения этих источников света, можно предположить, что СВЧ-световые приборы с вращающейся сферической горелкой и ква-

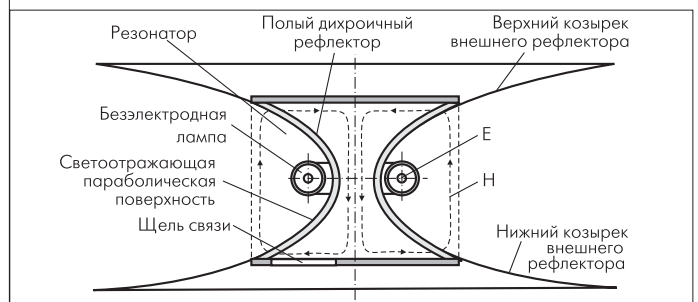


Рис. 2. Цилиндрический СВЧ-резонатор с диэлектрическим дихроичным рефлектором

Динамика развития СВЧ-световых приборов

Характеристика	Базовый образец	Образец в светосистеме NASM 1994 г.	Усовершенствованный образец 1995/96 гг.	Solar-1000™ 1996 г.	Light-Drive 1000™ 1997/98гг.	СВЕТОЧ-ПРО 1997 г.	СВЕТОЧ-СВ 1998 г.	Свэтон ^{*)} 1999/2000 гг.	
Полный световой поток, клм	410	445	480	135	135–140	135	135	135	
Мощность СВЧ-накачки, кВт	3,4	3,1	3,1	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	
Потребляемая мощность от сети, кВА	6,3	5,9	5,1	1,375–1,425	1,4	<1,325	1,325	1,325	
Полная световая отдача, лм/ВА	~65	~75	94	91,5–98	98–100	~102	102	102	
Цветовая температура, К	6500	6300	~6000	~6000	~6000	~6000	~6000	~6000	
Общий индекс цветопередачи	86	86	86	~79	78-79	78	78	78	
Время разгорания, с	5	5	5–15	15–25	15–25	10–15	10–15	10–15	
Условия охлаждения горелки	Принудительное воздушное при вращении горелки			Естественное (конвекционное) при вращении горелки					
Форма апертуры оптического рефлектора	Круглая, пригодная для работы с полым "призматическим" световодом фирмы ЗМ, диаметром 254 мм				Круглая, для работы со световодом диаметром 254 мм; круглая, диаметром ~400 мм; прямоугольная, для автономного светильника	Круглая, для работы со световодом диаметром 254 мм; круглая, диаметром 350 мм, для работы в качестве прожектора	Круглая, для работы со световодом диаметром 254 мм	Круглая, для работы со световодом диаметром 254 мм; круглая, для работы с симметричным и асимметричным перетражателями	
Основные достоинства	Сплошной спектр излучения ("квасисолнечный"); низкий уровень излучений в УФ- и ИК-диапазонах; малый размер светящего тела и его равномерность; отсутствие экологически вредных веществ								
	Высокий уровень мощности потока излучения, малое время "разгорания"	Повышенная световая отдача; применение надежных технологически отработанных "печных" магнетронов							
		Возможность управления уровнем светового потока			Повышенная стабильность работы магнетрона; пониженный уровень пятой гармоники				
Основные недостатки	Высокий уровень акустического шума; трудность обеспечения низкого уровня СВЧ-мощности, просачивающейся в окружающую среду			Длительная пауза (до 5 мин) перед повторным зажиганием					

*) Разработка ВЭИ и ОАО "Плутон"

зиточечным светящим телом наиболее перспективны для применения там, где требуется луч круглого сечения (формируемый, например, за счет геометрического совмещения центра светящего тела или горелки с оптическим фокусом рефлектора, в частности параболаида). Это – прожекторы, модули засветки полых призматических или щелевых световодов или симметричных и асимметричных светоотражателей. При этом, по-видимому, наибольшую эксплуатационную надежность, энергоэкономичность и долговечность будут иметь СВЧ-световые приборы с потребляемой мощностью менее 1,5 кВт (см. табл.), использующие в качестве СВЧ-генераторов накачки так называемые печные магнетроны (мощностью до 1 кВт) массового (и монополированного) производства. Технология их хорошо отработана и стабильна, а потому – это качественные и дешевые изделия.

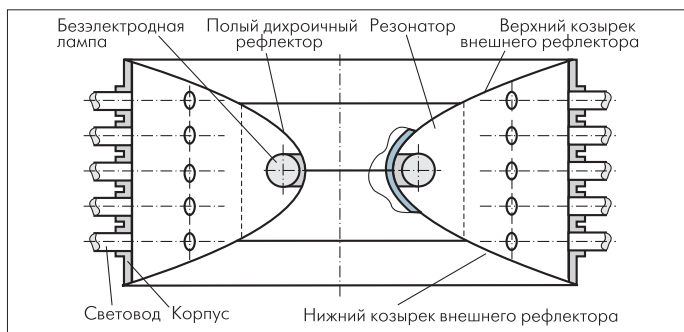


Рис.3. СВЧ-резонатор с внешним параболическим рефлектором по рис.2 и волоконными световодами

СВЧ-световые приборы в сочетании с оптической системой полых световодов наиболее целесообразно применять, что уже подтверждено, для освещения протяженных пространств и объектов, в том числе на взрыво- и пожароопасных производствах и т.п.

Автономные СВЧ-световые приборы с неточечным светящим телом (в частности, с тороидальной горелкой), по-видимому, наиболее перспективны для освещения значительных площадей и засветки волоконных световодов. Конкретизация возможных сфер применения новых источников (автономно и в сочетании со световодами) заняла бы едва ли не весь объем статьи, поэтому фантазировать на эту тему мы предлагаем заинтересованному читателю.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dolan I.T., Ury M.G., Wood C.H. A Novel High Efficacy Microwave Powered Light Source. Presented as a Land-mark. – In: Sixth International Symposium on the Science and Technology of Light Sources, 1992, Technical University of Budapest.
2. Билунд Л. Новая осветительная техника с микроволновыми серпными плазменными лампами. – Светотехника, 1998, № 3, с. 13–17.
3. Шлифер Э.Д. Некоторые особенности и проблемы создания осветительных и облучательных устройств на базе безэлектродных газоразрядных ламп с СВЧ-накачкой. – Светотехника, 1999, № 1, с. 6-9.
4. Диденко А.Н., Зверев Б.В., Прокопенко А.В., Маликова Г.Н. Расчет и конструирование СВЧ-ламп с рассеянным световыводом из рабочей камеры. – Сборник трудов Научной сессии МИФИ, 2000, т.8, с. 58059.