

# Влияния синусоидальной и прямоугольной форм тока повышенной частоты на резонансное излучение ртутного разряда НД

Л.М. ВАСИЛЯК, А.М. ВОРОНОВ, С.В. КОСТЮЧЕНКО, Н.Н. КУДРЯВЦЕВ,  
В.А. ЛЕВЧЕНКО, Д.А. СОБУР<sup>1</sup>, Д.В. СОКОЛОВ, Ю.Е. ШУНКОВ

ОИВТ РАН, ЗАО «ПК «ЛИТ», НИУ «МЭИ», Москва; МФТИ (государственный университет),  
Московская обл.; LIT UV Elektro, Иссерода, Германия

## Аннотация

Экспериментально показано, что эффективность генерации излучения дугового ртутного разряда НД в резонансных линиях ртути 185 и 254 нм слабо зависит от формы ВЧ разрядного тока (судя по двум рассмотренным формам) при удельной мощности разряда порядка 2 Вт/см.

**Ключевые слова:** УФ излучение, ртутный разряд, НД, 254 нм, 185 нм, амальгамная лампа, ЭПРА, форма тока, форма напряжения.

Дуговой разряд НД в парах ртути с инертным газом как источник резонансного УФ излучения на длинах волн 254 и 185 нм широко используется в промышленных масштабах для обеззараживания и очистки от вредных веществ воды и воздуха. При этом для генерации УФ излучения большой мощности используются амальгамные лампы (АЛ) мощностью 200–800 Вт с током 2–5 А [1]. Промышленные УФ облучательные системы для водо- и воздухоподготовки могут содержать десятки, сотни и даже тысячи АЛ с общей потребляемой мощностью от десятков кВт до нескольких МВт [1]. Такие системы, обычно, работают непрерывно и часто размещаются на ограниченной площади, поэтому ключевое значение для них имеет эффективность генерации УФ излучения. Это обуславливает непрерывное проведение исследований по оптимизации АЛ, а именно – по повышению энергетического КПД ртутного разряда НД в резонансных линиях ртути (далее –  $\eta_e$ ) и полезного срока службы АЛ. Для этого проводят исследования по выбору конструкции АЛ (геометрии, состава и дозировок инертногазового

наполнения и амальгамы), значения и формы разрядного тока и др.

Одним из возможных путей оптимизации является подбор частоты и формы тока лампы. Для бактерицидных АЛ НД мощностью более 100 Вт были созданы специальные ЭПРА. Исследования влияния частоты тока на эффективность генерации резонансного УФ излучения ртути [1–7] показали, что оптимальная частота лежит в интервале 10–100 кГц.

При изменении частоты тока разряда меняется влияние разных физических процессов в ртутном разряде НД [2, 3, 5]:

- Область низких частот, в которой круговая частота тока  $\omega \ll 1/t_D$ , где  $t_D$  – характерное время амбиполярной диффузии ( $t_D \approx 5$  мс). В этой области частот разряд полностью эквивалентен разряду постоянного тока с постоянной температурой электронов (кроме короткого интервала времени, когда ток близок к нулю) и не обладает повышенным  $\eta_e$  по сравнению с разрядом постоянного тока.

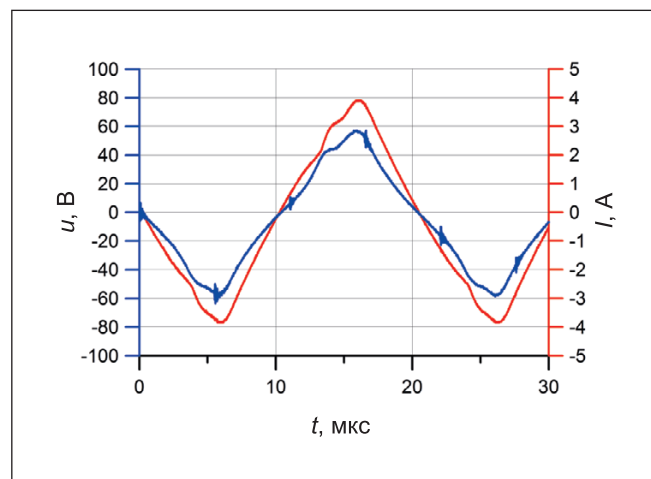
- В области высоких частот: 1) при  $\omega \gg 1/t_e$ , где  $t_e$  – время релаксации энергии электронов ( $t_e \approx 2$  мкс), температура электронов и концентра-

ции электронов и возбуждённых атомов со временем не меняются, и генерация УФ излучения аналогична наблюдаемой в режиме постоянного тока; 2) при  $1/t_e \gg \omega \gg 1/t_D$  концентрация электронов в течение периода тока меняется мало, а электронная температура колеблется с удвоенной частотой. Если при этом  $\omega \ll 1/t_a$ , где  $t_a$  – характерное время жизни возбуждённых метастабильных атомов ( $t_a \approx 25$  мкс), то концентрации возбуждённых атомов также колеблются в течение периода тока, из-за чего уменьшается возбуждение атомов ртути, обуславливая уменьшение  $\eta_e$ . Минимальный  $\eta_e$  по сравнению с режимом постоянного тока наблюдается при частоте около 500 Гц.

- В области промежуточных частот,  $1/t_e \gg \omega \gg 1/t_a$ , концентрация возбуждённых атомов ртути во времени не меняется и (благодаря нелинейной зависимости скорости возбуждения их от температуры электронов) оказывается соответствующей максимуму температуры электронов за период. Кроме того, из-за сохранения средней электронной температуры ниже уровня, соответствующего постоянному току, потери энергии на упругие становятся меньше. Совместное влияние этих факторов приводит к повышению  $\eta_e$  по сравнению с разрядом постоянного тока. По расчётам [2, 5], максимум  $\eta_e$  достигается при частоте разрядного тока около 60 кГц, причём эта частота зависит от диаметра разрядной трубки, силы тока давления и рода газа.

В ряде мощных АЛ в настоящее время используется ток синусообразной формы с частотой около 50 кГц. На практике частоту следует подбирать для каждого типа ламп.

Рис. 1. Формы тока разряда и напряжения на разряде (источник тока с формой сигнала, близкой к синусоидальной)



<sup>1</sup> E-mail: soburda@gmail.com

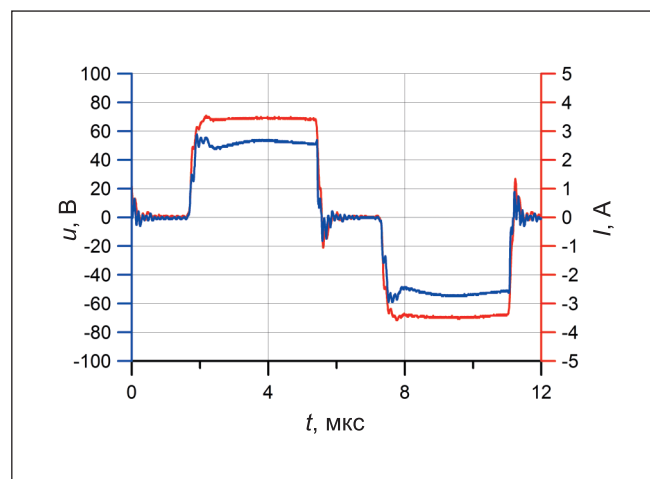
Форма тока	Скважность	Частота, кГц	$I$ , А	$U$ , В	$P$ , Вт	$\eta_e$ , отн. ед.	
						УФ-С, 254 нм	ВУФ, 185 нм
Синусо-подобная	-	50	2,5	37	92,5	1,02	1,53
Прямо-угольная	1,5	90		41	102,5	1,04	1,60

Современная электроника позволяет создавать компактные и экономичные источники питания для разрядных ламп не только с разной частотой, но и – формой тока. Однако влияние последней на  $\eta_e$  исследовано мало.

В монографии [5] собраны и проанализированы соответствующие данные по использованию для питания ртутного разряда НД прямоугольных импульсов напряжения разной скважности. Известны также аналогичные экспериментальные данные по использованию прямоугольных импульсов тока с крутыми фронтами разной скважности на частоте 10 кГц при средней удельной мощности разряда около 0,2 Вт/см [6]. Было показано, что влияние скважности на  $\eta_e$  наблюдается только для ВУФ излучения (на длине волны 185 нм): при увеличении скважности от 1 до 4 прирост здесь доходит до 30%.

Несмотря на полученные положительные результаты, данный способ питания разряда пока не получил масштабного развития. Во-первых, отсутствуют систематические экспериментальные исследования по используемым токам и дозировкам наполнения ламп, что не позволяет предъявлять должные требования к ЭПРА. Во-вторых, в крупных промышленных установках источник УФ излучения бывает удалён от источника питания на несколько и даже несколько десятков метров. При этом ёмкость и индуктивность соединительных кабелей и активное сопротивление подавляют ВЧ составляющие прямоугольных импульсов, превращая их в синусоподобные. Следовательно, передающая система должна иметь соответствующую компенсацию. Для снижения резистивных потерь, которые растут с повышением частоты, следует применять специальный дорогостоящий кабель. Возможно также возникновение и радиоизлучения от высокочастотных составляющих прямоугольных импульсов, для подавления которого станут необходимы специальные

Рис. 2. Формы тока разряда и напряжения на разряде (источник прямоугольных импульсов)



кабели и фильтры.

Экспериментальные данные по зависимости  $\eta_e$  от формы разрядного тока при большей удельной мощности, порядка 2 Вт/см, в литературе отсутствуют. Это и явилось причиной проведения нами данного экспериментального исследования. Были использованы источник тока с формой ВЧ сигнала (50 кГц), близкой к синусоидальной (рис. 1), и источник разнополярных прямоугольных ВЧ импульсов (90 кГц) с длительностью переднего фронта около 300 нс и скважностью 1,5 (рис. 2). В обоих случаях действующее значение тока  $I$  составляло  $(2,5 \pm 0,1)$  А, что (при примерно равных действующих значениях напряжения на разрядном промежутке  $U$ ) обеспечивало примерно равный энергозатрат в ртутный разряд, осуществляемый при оптимальном давлении паров ртути в кварцевой трубке с внутренним диаметром 16,6 мм, внешним диаметром 19 мм и межэлектродным расстоянием 410 мм. Данные параметры – наиболее характерны для широко распространённых АМ в промышленных УФ установках.

Проводились относительные измерения  $\eta_e$  с учётом опыта ведущих производителей бактерицидных УФ ламп (см., напр., [8, 9]). В качестве приёмника излучения в УФ-С диапазоне использовался радиометр *RM 22*

компании *Dr. Gröbel GmbH*, а в ВУФ диапазоне – специальный детектор компании *Hamamatsu*. При этом (для предотвращения поглощения УФ излучения «наработанным» озоном) приёмники располагались в непосредственной близости от кварцевого стекла (окно приёмника находилось в физическом контакте со стенкой разрядной трубки). Данные измерения позволяют сравнивать получаемые  $\eta_e$  при использовании разных видов источников питания.

Результаты измерений эффективных электрических параметров и соответствующих значений  $\eta_e$  приведены в таблице. Из неё видно, что при удельной мощности около 2 Вт/см отсутствует сколько-нибудь значительное повышение  $\eta_e$  ртутного разряда НД в УФ-С (254 нм) и в ВУФ (185 нм) диапазонах при замене синусообразной формы разрядного тока на прямоугольную.

Итак, при сохранении действующего значения тока 2,5 А форма импульса тока не оказывает существенного влияния на указанные  $\eta_e$ . Причём переход к прямоугольным импульсам тока повышает резистивные потери на высоких частотах в передающих проводах, что ведёт к ухудшению общей энергоэффективности соответствующих УФ облучательных установок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ультрафиолетовые технологии в современном мире: Коллективная монография/ Ф.В. Кармазинов, С.В. Костюченко, Н.Н. Кудрявцев, С.В. Храменков. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012.– 392 с.

2. Drop P.C., Polman J. Calculation on the effect of supply frequency on the positive column of a low pressure Hg-Ar AC discharge // J. Phys. D: Appl. Phys.– 1972. – Vol. 5. – P. 562–568.

3. Polman J., Werf J.E., Drop P.C. Nonlinear effects in the positive column of a strongly modulated mercury gas discharge // J. Phys. D: Appl. Phys.—1972. – Vol. 5. – P. 266–279.

4. Campbell J.H. New parameters for high frequency lighting systems // Illuminating Engineering.– 1960. – Vol. 55. – P. 247–256.

5. Миленин В.М., Тимофеев Н.А. Плазма газоразрядных источников света низкого давления. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1991.– 240 с.

6. Hardt P., Lange H., Leipold F. Entwicklung geeigneter UV-Strahler. Schlußbericht zum Teilprojekt [Verbundprojekt: Weitergehende Reinigung von Deponiesickerwässer durch chemische Oxidation/UV-Strahlung mit biologischer Vor und Nachbehandlung], Institut für Niedertemperatur-Plasmaphysik, Greifswald, 1997.

7. Клыков М.Е., Меркулова А.П., Медведь В.Р., Тарасенко Н.Г. Исследование параметров стандартных люминесцентных ламп в диапазоне частот до 150 кГц // Светотехника.– 1989.– № 10. – С. 9–11.

8. Lawal O., Dussert B., Howarth C., et al. Proposed method for measurement of the output of monochromatic (254 nm) low pressure UV lamps// IUVA News.– 2008. – Vol. 10, No. 1. – P. 14–17.

9. Василяк Л.М., Дроздов Л.А., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Собур Д.А., Соколов Д.В., Шунков Ю.Е. Методика измерения потока УФ излучения трубчатых бактерицидных ламп НД // Светотехника.– 2011.– № 1. – С. 29–32.

## ПИСЬМА ЧИТАТЕЛЕЙ

### Глубокоуважаемая редакция!

Искренне рад каждому номеру вашего журнала и желаю в наступающем году новых подписчиков, множество рекламодателей и, что наверное самое главное, талантливых и интересных авторов!

Всему коллективу редакции от НП ПСС и от меня лично самые искренние пожелания здоровья, счастья и успехов!

С уважением,

**Е.В. Долин, член-правления – генеральный директор Некоммерческого партнёрства производителей светодиодов и систем на их основе (НП ПСС), Москва**

### Дорогая редакция!

Здоровья, счастья, большого тиража в новом году!

С уважением,

**Д.Д. Юшков, кандидат техн. наук, учёный секретарь ООО «ВНИСИ», Москва**

### Глубокоуважаемые Юлиан Борисович и члены редакции журнала «Светотехника»!

Разрешите поздравить вас с прошедшими праздниками и пожелать вам здоровья, творческой энергии и сил! А журналу долгих лет жизни, увеличения числа подписчиков и спонсоров!

Вы делаете великое дело, «Светотехника» – один из достойнейших журналов России. Спасибо вам огромное!!!

**Н.В. Быстрянцева, руководитель Творческого объединения светодизайнеров «RULD», преподаватель кафедры ТПОЭ Университета ИТМО, С. – Петербург**



**Василяк Леонид Михайлович**, доктор физ.-мат. наук, профессор. Окончил МФТИ. Главный научный сотрудник ОИВТ РАН



**Левченко Владимир Александрович**, физик. Окончил МФТИ. Аспирант МФТИ (ГУ)



**Воронov Алексей Михайлович**, кандидат физ.-мат. наук Окончил физический факультет ЛГУ им. А.А. Жданова. Руководитель отдела разработок компании LIT UV Elektro GmbH



**Собур Денис Анатольевич**, кандидат физ.-мат. наук. Окончил МФТИ. Заведующий светотехнической лабораторией ЗАО «ПК «ЛИТ»



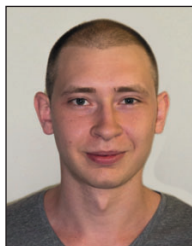
**Костюченко Сергей Владимирович**, кандидат физ.-мат. наук. Окончил МФТИ. Генеральный директор ЗАО «ПК «ЛИТ»



**Соколов Дмитрий Владимирович**, кандидат техн. наук. Окончил МЭИ. Начальник службы разработки ЗАО «ПК «ЛИТ»



**Кудрявцев Николай Николаевич**, доктор физ.-мат. наук, профессор. Окончил МФТИ. Ректор МФТИ (ГУ)



**Шунков Юрий Евгеньевич**, МЭИ (ГУ), инженер. Окончил МЭИ (ГУ). Аспирант НИУ «МЭИ»