

С.А. ГЕВОРКЯН, А.Л. МАИЛЯН

ПУТИ УВЕЛИЧЕНИЯ СВЕТООТДАЧИ КОМПАКТНЫХ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

Обобщен десятилетний опыт исследования компактных флуоресцентных ламп, которые заменяют традиционные лампы накаливания. Показано, что для получения высокой светоотдачи необходимо использовать акустоплазменное взаимодействие, люминофоры с малой долей излучения в ИК области и электронные драйверы с малым потреблением.

Ключевые слова: флуоресцентные лампы, акустоплазменное взаимодействие, светоотдача, люминофоры, электронные драйверы.

Как известно, светоотдача компактной флуоресцентной лампы (КФЛ) зависит от КПД преобразования электрической энергии в ультрафиолетовое (УФ) излучение разряда, поглощаемого люминофором, и эффективности преобразования люминофором УФ излучения в излучение видимого диапазона - свет, излучаемый люминесцентной лампой [1,2].

Вопрос эффективности преобразования электрической энергии в разряд был рассмотрен в [3-6]. К сказанному в этих статьях можно добавить, что простые транзисторные схемы электронной пускорегулирующей аппаратуры (ЭПРА) имеют потребление электроники в несколько раз меньше, чем лучшие из разработанных сложных микросхемных реализаций ЭПРА. Например, широко распространенная микросхема полумостового драйвера IR-2153 при стандартной схеме включения [7] потребляет от сети не менее 3 Вт при использовании МОП-транзисторов IRF-720 и более 6 Вт при использовании IRF-840. Это связано с потреблением по цепи бутстрепного конденсатора (термин введен фирмой-разработчиком драйвера - "International Rectifier"), управляющего открыванием "верхнего ключа" - транзистора высокого потенциала [7]. Используемая нами транзисторная схема [3,6] имела собственное потребление менее 0,5 Вт. Если предположить, что в КФЛ коэффициент преобразования высокочастотной (ВЧ) электрической мощности в видимое излучение составляет 80 Лм/Вт, то для лампы с потреблением от сети электрической мощности 15 Вт с транзисторной схемой ЭПРА [3,6] светоотдача будет составлять 77 Лм/Вт и световой поток - 1160 Лм, а для драйвера на МС IR-2153 с ключами на транзисторах IRF-840 - соответственно 48 Лм/Вт и 720 Лм. Таким образом, для маломощных КФЛ использование сложной микросхемной реализации не всегда целесообразно.

В КФЛ используется дуговой ртутный разряд низкого давления с самокалящимися катодами. Давление ртути - порядка 10 Па , давление буферного газа (обычно аргон) - $100 \dots 500 \text{ Па}$.

Если принять максимальный поток излучения спектральных линий ртутного разряда равным 100%, то для отдельных спектральных линий он составляет: для УФ линии ($\lambda=184,9 \text{ нм}$) - 13%; для УФ линии ($\lambda=253,7 \text{ нм}$) - 78%; для синей линии ($\lambda=435,8 \text{ нм}$) - 3%; для всех остальных линий вместе взятых (зеленая, желтая, фиолетовая) - 6%.

Если не рассматривать потери на накал электродов, то вклад различных механизмов потерь мощности в положительном столбе ртутного разряда в зависимости от давления буферного газа в разрядной трубке можно представить в графической форме. Для ртутного разряда при буферном газе аргоне и токе разряда 1 А это представлено на рис.1, взятом из [8]. По оси абсцисс отложено давление газа в трубке. Линия 5 соответствует чисто ртутному разряду при давлении ртути $P_{\text{Hg}}=10 \text{ Па}$. По оси ординат отложены доли каждого типа потерь.

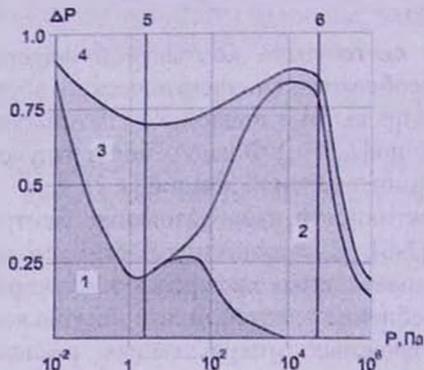


Рис. 1. Относительный вклад различных механизмов потерь мощности в положительном столбе ртутного разряда в зависимости от давления буферного газа при токе разряда 1 А : 1 - потери на стенках; 2 - потери на нагрев газа и электродов; 3 - потери на выход резонансного излучения; 4 - потери на выход нерезонансного излучения; 5 - сплошная линия соответствует $P_{\text{Hg}}=10 \text{ Па}$; 6 - линия соответствует лампе типа дуговая ртутная люминесцентная (ДРЛ)

Из рис.1 видно, что потери на стенках (область 1) велики только при малых давлениях газа, когда концентрация нейтральных атомов мала и возбужденные атомы достигают стенок.

Обычно введение инертного газа объясняют уменьшением распыления электродов и облегчением зажигания. Но при введении инертного газа уменьшается также длина свободного пробега электронов и резко снижается температура электронов T_e . Об этом будет сказано ниже. Пока же отметим, что при увеличении давления газа потери на стенках уменьшаются.

Потери на нагрев газа (область 2, рис.1) с увеличением давления буферного газа возрастают и при давлении 10^4 Па составляют 75...80%, а при давлении буферного газа $\sim 10^2 \text{ Па}$ - 35%. Доля резонансного излучения (область

3) уменьшается с 40 до 25% (но это расчетное уменьшение, связанное только с уменьшением T_e). Ниже показано, что существуют и другие механизмы, повышающие долю резонансного излучения при увеличении давления. Доля нерезонансного излучения (область 4) уменьшается с 30 до 20%.

Таким образом, для увеличения эффективности люминесцентных ламп, в том числе и КФЛ, надо уменьшить области 1 и 2 и увеличить область 3.

Как уже отмечалось выше, введение инертного газа уменьшает длину свободного пробега и резко снижает температуру электронов T_e . Поэтому для поддержания того же тока необходимо увеличить концентрацию электронов n_e и градиент потенциала E . При этом чем больше n_e и E , тем больше n_m , т.е. концентрация возбужденных атомов ртути, способных излучать.

Чем меньше длина свободного пробега, тем больше вероятность соударения метастабильного атома ртути с электроном по сравнению с вероятностью диффузии к стенкам трубки и тем меньше уход энергии из разряда к стенкам, т.е. тем больше возбужденных атомов остается в разряде.

С ростом тока начинает возрастать роль ступенчатых процессов $6^3P_{0,1,2} \rightarrow 6^1P_1$, что приводит к росту УФ светового потока; для КФЛ это экспериментально подтверждено в [5]. Одновременно растет отношение световых потоков $\Phi(185)/\Phi(254)$, где $\Phi(185)$ – удельный световой поток излучения положительного столба на длине волны 185 нм, $\Phi(254)$ – для 254 нм.

В положительном столбе ионизируются и излучают только атомы ртути, исключение составляют прикатодные области, где за счет быстрых электронов ионизируется также инертный газ. Таким образом, добавление инертного газа влияет также на прикатодные явления. Расчеты [9] показали, что для 40-ваттной люминесцентной лампы в положительном столбе 2/3 излучения $\Phi(254)$, 2/3 излучения видимого зеленого триплета и 3/4 излучения группы УФ линий 365 нм обусловлены ступенчатыми переходами через уровни 6^3P . Переизлучение приводит к 70-кратному увеличению продолжительности жизни на метастабильном уровне 6^3P_1 (превышает 10^{-3} с).

Из [10] следует, что на частоте модуляции разрядного тока 1 кГц - $n_e < 10\%$, а на более высоких частотах модуляции $n_e \approx \text{const}$. При этом усредненная за период колебаний величина n_e приблизительно в 1,5 раза больше, а T_e незначительно меньше, чем на постоянном токе [10].

Дальнейшего увеличения вероятности соударений, а значит, и уменьшения нагрева стенок можно добиться, используя акустоплазменное взаимодействие (АПВ) [3,4,6].

На рис. 2 [6] приведены температурные характеристики российской лампы СКЛЭН мощностью 15 Вт и изготовленной на базе ее стеклянной колбы в ИППФ НАН лампы с акустоплазменным взаимодействием СКЛ-АРМ.

Из рисунка видно, что при одной и той же подводимой мощности лампа с АПВ имеет меньший нагрев стеклянного баллона во всех частях.

Разрядную трубку можно рассматривать также как акустический резонатор. При питании разрядной трубки переменным током в ней

возбуждаются акустические моды [6,11]. Эти моды приводят к созданию акустической решетки внутри разрядной трубки. Акустические колебания, в свою очередь, воздействуют на разряд, который их создал. Это приводит к тому что плазма в разрядной трубке переходит в новое – акустоплазменное состояние

Изменения в акустоплазме могут быть настолько значительными, что возможны акустоплазменные фазовые переходы по аналогии с термодинамическим фазовым переходом газ-жидкость [12].

При определенных условиях АПВ приводит к уменьшению градиента T_r по радиальному сечению трубки. Из-за уменьшения поглощения в газе увеличивается доля УФ излучения, которое достигает люминофора.

АПВ приводит к увеличению излучения интеркомбинационной линии 254 нм. При уширении на акустической решетке высвечивание из интеркомбинационной линии увеличивается, т.е. увеличивается доля резонансного излучения (область 3, рис.1).

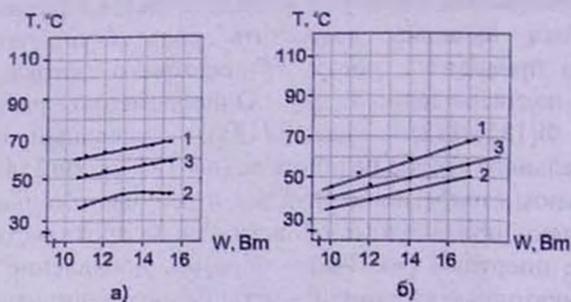


Рис.2. Температурные характеристики ламп в зависимости от потребляемой мощности: а - российская лампа СКЛЖН, 15 Вт; б - СКЛ-АР; 1 - T катода; 2 - T холодной зоны; 3 - T середины лампы

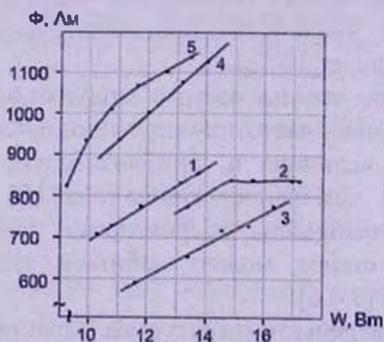


Рис.3. Зависимость интегрального светового потока от потребляемой мощности для КФЛ различных производителей [6]: 1 - PhilipsEcoTon (Hol.), 15 Вт; 2- Sylvania (USA), 11 Вт; 3 - Silverstar (China), 23 Вт; 4 - СКЛЖН (Россия), 15 Вт; 5 - СКЛ-АРМ, 15 Вт

В [6,13] показано, что в результате АПВ КФЛ может значительно повысить светоотдачу.

Из рис. 3 следует, что для обеспечения интегрального светового потока 900 Лм, соответствующего стандарту потребляемой КФЛ мощности 15 Вт, для лампы Philips надо затратить 15 Вт, для российской лампы СКЛЭН – 10,5 Вт, для разработанной СКЛ-АРМ – 9,6 Вт.

Таким образом, лампа СКЛ-АРМ обеспечивает тот же стандартный световой поток, потребляя в 1,5 раза меньшую мощность, чем лампа Philips.

Следует отметить, что лампа СКЛЭН, используемая в этих измерениях, имела параметры, превосходящие среднестатистические, поскольку была отобрана в качестве примера лучших российских ламп.

Рассмотрим преобразование люминофором УФ излучения в видимый свет.

Разработка в 80-е годы КФЛ стала возможной только в результате создания в конце 70-х годов высокостабильных узкополосных люминофоров (УПЛ), легированных редкоземельными металлами. Они могут работать при более высоких плотностях облучения, чем в стандартных люминесцентных лампах, без старения люминофора. Это позволило значительно уменьшить диаметр разрядной трубки.

УПЛ дают излучение, сосредоточенное в узких полосах спектра: синей (450 нм), зеленой (540 нм) и красной (610 нм).

Из-за малого диаметра разрядной трубки увеличивается плотность облучения линией 185 нм, а излучение синей линии ртути настолько увеличивается, что очень часто синий люминофор излишен, и необходимый цветовой тон получается при использовании только двух УПЛ: зеленого (543 нм) и оранжево-красного (612 нм).

Разные фирмы используют различные по составу люминофоры.

В [14] отмечено, что лампы со стандартным галофосфатным люминофором имеют плохое или удовлетворительное качество цветопередачи, независимо от цветовой температуры, лампы с трехполосным люминофором - хорошее качество цветопередачи при любых цветовых температурах (в области 2700...6500 К), а лампы с пятиполосными люминофорами - отличную цветопередачу даже при цветовой температуре 3000...4000 К.

Ниже приведены исследованные нами спектры излучения видимого света люминофорами в КФЛ нескольких фирм.

КФЛ СКЛЭН-15Вт (Россия), теплого света (цветовая температура $T_{\text{цв}}=3000$ К) – небольшой пик в синей области с $\Delta\lambda\approx 5\cdot 10^{-10}$ м; полоса в синезеленой области с $\Delta\lambda\approx 60\cdot 10^{-10}$ м; сильная полоса в зеленой области с $\Delta\lambda\approx 60\cdot 10^{-10}$ м; сильная линия в оранжево-красной области с $\Delta\lambda\approx 100\cdot 10^{-10}$ м; красная линия с $\Delta\lambda\approx 30\cdot 10^{-10}$ м; в ИК области излучение люминофора очень малое.

КФЛ PHILIPS Ecoton-15W (Hol.), теплого света ($T_{\text{цв}}=3000$ К) – полоса в зеленой области $\Delta\lambda\approx 100\cdot 10^{-10}$ м; сильная полоса в желто-зеленой области ($\lambda\sim 550$ нм) $\Delta\lambda\approx 100\cdot 10^{-10}$ м; сильная полоса в красной области $\Delta\lambda\approx 200\cdot 10^{-10}$ м; в ИК области (800...1000 нм) излучение люминофора существенно.

КФЛ фирм Юго-Восточной Азии 9...23 Вт, дневного света ($T_{\text{ш}}=6300 \text{ К}$) – имеют различные полосы в видимой области, но для всех ламп характерна большая доля излучения в ИК области.

Исследование светоотдачи ламп показало, что она связана с величиной ИК компоненты спектра: чем меньше ИК компонента, тем выше светоотдача. Именно этим объясняется, что лампы фирм Юго-Восточной Азии имеют светоотдачу значительно меньше, чем лампы фирм Европы и Америки [13].

Наш мониторинг показал, что за последнее десятилетие ситуация не изменилась, за исключением случаев, когда страны Юго-Восточной Азии используют российские и европейские люминофоры (например, КФЛ "Космос").

Таким образом, в статье обобщен десятилетний опыт исследования КФЛ. Показано, что для получения высокой светоотдачи необходимо: иметь в виду, что не все электронные компоненты и их сочетания, рекомендуемые в литературе, могут обеспечить минимум потребляемой мощности; учитывать и использовать акустоплазменное взаимодействие в ртутном разряде; использовать оптимальные люминофоры с минимумом излучения в ИК области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. 2-е издание. - М.: Энергоатомиздат, 1991. – 720 с.
2. Lister G.G., Lawler J.E., Lapatovich W.P., Godyak V.A. The Physics of discharge lamps // *Rev. of Modern Phys.* – April, 2004. - Vol.76. - P.541-598.
3. Манляян А.Л., Геворкян С.А., Саркисян С.К. Особенности высокочастотных источников питания люминесцентных ламп // *Вестник-76 ГИУА.* – 2009. - Т. 1, №1. - С.253-257.
4. Геворкян С.А., Есаян А.М., Манляян А.Л., Саркисян С.К. Управление параметрами разряда в компактных флуоресцентных лампах // *Вестник ГИУА(П). Сер.Моделирование, оптим., управ.* - Ереван, 2009. - Вып.12, том 1. - С.131-137.
5. Геворкян С.А. Исследование ультрафиолетовой компоненты излучения разряда в компактных флуоресцентных лампах // *Вестник ГИУА(П): Сборник научных и методич. статей.* – Ереван, 2010. – Т.2, N 1. - С.147-151.
6. CONTROL of PLASMA PARAMETERS by ACOUSTIC WAVES. ISTC Project A-196.2. - Yerevan, 2003.
7. Каталоги фирмы International Rectifier, USA.
8. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. - М.: Наука, 1971. – 543 с.
9. Kenty C. Radiation from the discharge of mercury // *J.Appl.Phys.* -1950. - Vol.21. - P.1809-1815.
10. Федоренко А.С. Экспериментально-расчетные исследования характеристик положительного столба разряда и совершенствование люминесцентных ламп: Дис. ... к.т.н. - М., 1980. – 301 с.
11. Галечян Г.А., Мкртчян А.Р. Акустоплазма. - Ереван: Апага, 2005. – 350 с.
12. Мкртчян К.С. Об управлении свойствами низкотемпературной газоразрядной плазмы акустическими колебаниями: Дис. ... к.ф. - м.н. - Ереван, 2005. – 105 с.
13. Plasma Fluorophor Energy-Saving Lamps / A.R. Mkrtychyan, A.S. Abrahamyan, K.A. Abrahamyan, S.A. Gevorgyan et al // XIII Int. Conf. on Gas Disch. Applications. - Glasgow, 3-8 September, 2000. - Vol.2. - P.855-859.
14. Spectrum – Каталог ламп GE Lighting.

ГИУА (П). Материал поступил в редакцию 10.04.2010.

Ս.Ա. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ, Ա.Լ. ՄԱՅԻԼՅԱՆ

ԿՈՄՊԱԿՏ ՖԼՅՈՒՐԵՆՑԵՆՏԱՅԻՆ ԼԱՄՊԵՐԻ ԼՈՒՍԱՏՎՈՒԹՅԱՆ ՄԵԾԱՑՄԱՆ ՈՒՂԻՆԵՐԸ

Ընդհանրացված է ավանդական շիկացման լամպերին փոխարինող տասնամյա կոմպակտ ֆլուորեսցենտային լամպերի հետազոտման փորձը: Ցույց է տրված, որ բարձր լուսատվություն ստանալու համար անհրաժեշտ է օգտագործել ակուստապլազմային փոխազդեցությունը, ինֆրակարմիր տիրույթում ճառագայթման փոքր մասով յունիմաֆորներ և էլեկտրաէներգիայի քիչ սպառումով էլեկտրոնային դրայվերներ:

Առանցքային բառեր. ֆլուորեսցենտային լամպեր, ակուստապլազմային փոխազդեցություն, լուսատվություն, յունիմաֆորներ, էլեկտրոնային դրայվերներ:

S.A. GEVORGYAN, A.L. MAYILYAN

WAYS OF INCREASING THE FLUORESCENT LAMP LUMINOUS EMITTANCE

The ten-year experience of investigating the compact fluorescent lamps substituting the traditional incandescent lamps is generalized. It is shown that to receive a high luminous emittance, it is necessary to use the acoustic and plasma interaction in the infrared range, luminophors with small radiation and electronic drivers with small power consumption.

Keywords: fluorescent lamp, acoustic and plasma interaction, luminophors, electronic drivers, emittance.