

Олег Зотин | zotin@niitm.spb.ru

Начало в № 1'2014

# Управление освещением открытых пространств

## Часть 2

**Продолжая анализ эволюции искусственного освещения открытых пространств с позиции практической системологии, переходим к эпохе электрического освещения.**

### Дополупроводниковое электрическое освещение

*Грех не в темноте,  
а в нежелании света,  
не в непонимании,  
а в сопротивлении пониманию,  
в намеренной слепоте  
и злостной предвзятости.  
Марина Цветаева [1]*

#### Предисловие

Всем нам неоднократно приходилось наблюдать яркие вспышки молний. Идея покорения этого природного явления издревле владела человеческими умами. Тем, не менее после открытия сущности электрических явлений собственно электрическое освещение в своем развитии повторило, в определенном смысле, ряд этапов, через которые до этого прошло углеводородное освещение. Так первые серийно выпускаемые электрические источники света — дуговые лампы (их называли свечами Яблочкова) использовали то же свечение наночастиц углерода, что и в углеводородных светильниках (часть 1), только под воздействием электрической дуги. Кстати, и первые промышленные установки получения сферобразных молекул углерода — фуллеренов  $C_{60}$  и  $C_{70}$  (за открытие которых была присуждена Нобелевская премия по физике 1996 года) использовали дуговой разряд между графитовыми электродами в атмосфере гелия при низком давлении [2]. Следующим этапом в развитии электрического освещения стал нагрев электрическим током до высоких температур тугоплавких нитей в лампах накаливания — тут прослеживается явная аналогия с газонакаливаемыми лампами. Только на третьем этапе развития произошел в каком-то смысле возврат к идеям освещения, проработавшимся еще на заре развития электричества (известны опыты Михайло Ломоносова и Фрэнсиса Гауксби с тлеющим разрядом). В результате в начале XX века появились газоразрядные лампы тлеющего разряда, в которых источником света, как и в углеводородных светильниках, стала

плазма, однако с той существенной разницей, что ее возбуждение достигалось не сжиганием углеводородов, а протеканием электрического тока через инертные газы [3]. В дальнейшем были изобретены люминесцентные лампы и газоразрядные лампы высокого давления, в которых удалось повысить эффективность светоотдачи за счет излучения более активной плазмы, содержащей пары металлов, галогениды и серу, а также за счет применения эффекта люминесценции.

Многие исследователи примерно так и описывают перипетии эволюционно-революционного развития электрического освещения. Часть из них вообще ограничиваются описанием прогресса электрических источников света, разновидностей (типов) которых в настоящее время насчитывается уже несколько сотен. С такой упрощенной трактовкой истории освещения, на взгляд автора, можно согласиться лишь отчасти. Ведь уже с созданием сетей газового освещения, вытеснивших масляное (керосиновое) и спирто-скипидарное освещение, следовало бы говорить о системах (или технологиях) освещения и подвергать сравнению именно системы в целом. На следующем этапе жесткой конкурентной борьбы первых сетей электрического освещения с газовыми сетями на границе XIX и XX веков основной характеристикой сравнения признавался чисто системный параметр — удельная стоимость производства света [4].

Как известно, первыми сетями электрического освещения, вступившими в борьбу с системами газового освещения, стали сети с дуговыми лампами П. Н. Яблочкова («La lumière gusse» — «Русский свет»). Произведя фурор в 1876 году на выставке в Лондоне, они получили возможность внедрения в разных городах в десятках крупных проектов, однако не смогли выйти на уровень массового применения из-за того, что малое время жизни ламп приводило к большим эксплуатационным расходам. А вот сети электрического освещения с лампами накаливания показали свое преимущество в эксплуатации, причем это стало очевидным еще до появления долгоживущих вольфрамовых нитей накаливания

и до создания эффективных трехфазных сетей электроснабжения. С того времени успехи и провалы каждой инновационной технологии определялись исключительно интегральными экономическими критериями, как это произошло, к примеру, в известном конфликте, связанном с прорывом в эффективности электроснабжения, который назвали «война токов» [5].

Попытаемся же посмотреть на развитие освещения именно с таких системологических позиций. Это поможет нам объективно взглянуть и на следующий этап светотехнической [р]эволюции, разворачивающийся на наших глазах, — этап интеллектуальных сетей освещения.

#### Дуговое и накаливание

*Мы земле дадим освещение лучом  
космографий и алгебр...  
Владимир Маяковский [6]*

В нулевых годах XIX века исследованиями искусственного электрического освещения занялся русский физик-экспериментатор Василий Владимирович Петров (рис. 1). Он первым по-



Рис. 1. Василий Владимирович Петров

лучил и начал изучать свечение электрической дуги между двух угольных электродов, запитав их от созданной им уникальной электрической батареи (так называемого вольтва столба) напряжением около 2 кВ [7]. Впоследствии выдающийся английский физик Хамфри Дэйви (рис. 2) назвал этот тип электрического разряда вольтовой дугой.

Однако, поскольку основным источником получения электричества многие десятилетия были громоздкие первичные и вторичные химические источники постоянного тока — электрические батареи и аккумуляторы, то эксперименты с электрическим освещением практически не выходили за стены лабораторий.

Лишь создание электромеханических генераторов тока открыло дорогу широкому применению электроэнергии.

Долгое время не удавалось создать практичную и долговечную лампу дугового разряда из-за необходимости поддержания точного расстояния (3–5 мм) между сгорающими угольными электродами, что требовало ручного или автоматического регулирования (лампы Сименса и Гальске, Кертинга, Шуккерта, Яндуса и др.).

Решить проблему поддержания постоянного расстояния между электродами дуговой лампы, не используя сложные и мало надежные регуляторы, удалось П. Н. Яблочкову (рис. 3). В середине 1870-х годов он создал первую в мире систему электрического освещения, решив несколько проблем и предложив ряд инноваций, среди которых необходимо отметить следующие:

- собственно дуговая лампа, состоящая из двух параллельно расположенных угольных электродов с каолиновым изолятором, ограничивающим зону горения [8];
- система переменного напряжения вместо общепринятого в то время постоянного напряжения, обеспечивающая одинаковое обгорание обоих электродов [9];
- генераторы переменного напряжения повышенной эффективности;
- обеспечение питания большого количества ламп от одного источника напряжения (решение так называемой проблемы дробления света), поскольку дуговые лампы не допускали простого параллельного подсоединения к одному генератору;
- создание прототипа трансформатора как одного из элементов первого варианта схемы «дробления света»;
- обеспечение автоматического зажигания дуговых ламп без принудительного замыкания и разогрева электродов (за счет сгорания специальной перемычки);
- обеспечение повторного автоматического зажигания дуговых ламп после гашения за счет добавления в угольные электроды специальных примесей для формирования этой спецперемычки после гашения лампы;
- увеличение светоотдачи лампы за счет добавления в угольные электроды солей металлов (фторидов магния, стронция, бария, кальция), а также получение с помощью добавок различных цветовых эффектов.

Кроме этого, считается, что принятая Яблочковым величина напряжения 110 В для



Рис. 2. Хамфри Дэйви

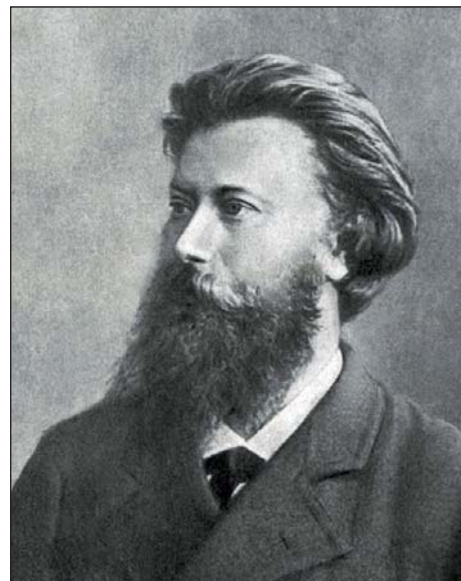


Рис. 3. Петр Николаевич Яблочков

питания второго варианта схемы «дробления света» стала, в конце концов, стандартом де-факто как для сетей освещения, так и для сетей электроснабжения. В этой схеме обеспечивалась надежная работа параллельных цепей, в каждой из которых были последовательно включены две дуговые лампы номинального напряжения 45 В и балластный резистор с падением напряжения 20 В.

Единственное, чего не удалось реализовать в технологии дугового освещения, — существенно увеличить срок жизни дуговой лампы. В результате стоимость эксплуатации внедренных проектов «Русского света» (в том числе систем освещения Литейного и Дворцового

мостов в Санкт-Петербурге) невозможно было снизить до конкурентного уровня.

Системой дугового освещения, рекордной по длительности существования, по всей видимости, была система освещения г. Остин (США) с тремя десятками 60-метровых мачт. Первоначально с 1893 года они эксплуатировались в Детройте, а затем в 1895-м были перевезены и установлены в Остине [10]. На каждой мачте находилось шесть мощных дуговых ламп. Половина мачт сохранилась до настоящего времени (рис. 4), и в 1993 году они даже были сняты в культовом фильме Ричарда Линклейтера [11]. Дуговые лампы на мачтах уже давно заменены мощными металлогалогенными, а сами



Рис. 4. Обслуживание одной из мачт освещения г. Остин



мачты послужили прототипами боевых треножников марсиан в романе Герберта Уэллса «Война миров» (1897 г.) и современных опор освещения, предназначенных для больших площадей, автострад, автомобильных развязок и стоянок. Дуговое освещение еще некоторое время оставалось актуальным в сфере применения ярких точечных источников света, не требующих большой продолжительности свечения (например, в мощных кинопроекторах и в специальных прожекторах), и только появление ксеноновых ламп в конце XX века окончательно вытеснило дуговые лампы.

В конце же XIX века, в разгар Второй промышленной революции, выявилась большая потребность в ярких и надежных источниках света с продолжительным сроком службы, не нуждающихся в каком-либо существенном обслуживании.

Первой системой электрического освещения, потеснившей господствовавшее в то время газовое освещение, стала система с лампами накаливания Томаса Эдисона, пилотный проект которой он смог внедрить в Нью-Йорке

в 1882 году. Отличительными чертами проекта Эдисона были:

- применение вакуумированных ламп накаливания с угольными нитями (обугленный бамбук);
- использование запатентованной биполярной сети постоянного напряжения;
- применение ряда запатентованных составных частей, в том числе выключателей, винтовых ламповых цоколей и патронов, предохранителей, счетчиков электроэнергии и пр.;
- повышение эффективности электрогенераторов постоянного напряжения.

За счет конвейерной сборки вакуумированных ламп их стоимость значительно понизилась, а доведение срока службы до нескольких сотен часов существенно сократило эксплуатационные расходы, что и позволило системе с лампами накаливания успешно конкурировать с газовым освещением.

Вообще говоря, электрическое освещение стало таким же символом Второй промышленной революции, как двигатель внутреннего сгорания.

Дальнейший прогресс электрического освещения был связан с отработкой составляющих технологии и прежде всего ламп. Эффективность ламп с угольными нитями не превышала нескольких единиц лм/Вт, кроме этого, с увеличением температуры сопротивление таких нитей падало, что могло вызывать неустойчивость. Необходимость повышения эффективности требовала увеличения рабочей температуры выше 2000 °С, что обеспечивалось только на металлических нитях, а получение таких нитей было сопряжено с серьезными трудностями. Проблема заключалась в том, что из-за малого электрического сопротивления металлов диаметр нити должен составлять 30–50 мкм и быть одинаковым по всей длине, которая, к примеру, для лампы мощностью 60 Вт достигает примерно полуметра. При этом особо важным является отсутствие местных утончений нити, которые приводят к локальному перегреву и перегоранию. Тугоплавкие металлы не обладают необходимой пластичностью и малым сопротивлением деформации, что не позволяло использовать давно известные технологии вытягивания тонких нитей (как, например, изготавливалась канитель из золота и серебра).

Общепризнано, что первый патент на металлическую нить лампы накаливания получил А. Н. Лодыгин [12] в 1893 году, через 20 лет после того, как он впервые в мире публично продемонстрировал опытный участок уличного освещения с лампами накаливания на угольных стерженьках (рис. 5). В патенте же Лодыгин первым предложил технологию изготовления металлической нити из тугоплавких металлов за счет электрохимического осаждения осмия, хрома, вольфрама и любого тугоплавкого металла на тончайшую платиновую проволочку. Отметим, что ему же принадлежали патенты на первые вилки и розетки.

В дальнейшем лампы накаливания были значительно модернизированы, и в начале XX века созданы эффективные и дешевые технологии получения осмиевых и вольфрамовых нитей в Северной Америке (В. Кулидж) и Европе (В. Нернст, Ф. Блау, Г. Ремане, Ш. Юст и Ф. Ханаман). Вскоре был совершен переход к газонаполненным (азотом, аргоном, криптоном) лампам от чисто вакуумных (И. Ленгмюр). Все это обеспечило массовое производство надежных и эффективных ламп накаливания.

В нашей стране до Первой мировой войны существовало несколько фабрик по выпуску электроламп, однако они работали на импортном вольфраме. После Гражданской войны и интервенции производство ламп накаливания восстановилось в условиях преодоления разрухи. В рамках плана ГОЭЛРО в 1921 году было создано Московское объединение фабрик электроламп — МОФЭЛ. Впервые в России появилось импортозамещающее производство вольфрамовой нити. Это позволило полностью отказаться от импорта вольфрама, объем которого перед Первой мировой войной составлял до 300 тыс. рублей золотом в год [13].

Наивысшим мировым достижением в технологии освещения лампами накаливания



Рис. 5. Памятник последнему фонарщику возле лаборатории А. Н. Лодыгина, скульпторы Б. Сергеев и О. Панкратова, Одесская улица, Санкт-Петербург

следует признать открытие галогенного цикла, сделанное в 1958 году, в котором атомы вольфрама, испарившиеся с нити накаливания, взаимодействуют с атомами галогена (например, брома) и возвращаются на раскаленную спираль лампы. Таким образом удалось дополнительно повысить не только срок службы, но и эффективность ламп накаливания за счет увеличения температуры нити.

Необходимо отметить, что лампы накаливания чрезвычайно чувствительны к изменению напряжения питания. Это имеет важнейшее практическое, экономическое и системологическое значение. Вблизи номинального напряжения световой поток вольфрамовой нити накаливания пропорционален значению напряжения в степени 3,4 ( $U^{3,4}$ ), потребляемая мощность — пропорциональна  $U^{1,6}$ , срок службы пропорционален  $U^{-16}$  (!), а цветовая температура приблизительно пропорциональна  $U^{0,42}$  [14]. Это означает, что повышение рабочего напряжения всего на 5% приводит к снижению срока службы лампы в 2 раза при увеличении ее светового потока лишь на  $\approx 16\%$  (рис. 6). То есть в системах с лампами накаливания необходимо иметь весьма высокую стабильность напряжения питания.

Весьма важно, что малое сопротивление металлических нитей накаливания в холодном состоянии приводит к большим пусковым токам, которые создают просадки в электросети, требуют увеличенных сечений питающих проводов, а при частых включениях значительно снижают срок службы электрических ламп.

Возможность управления световым потоком ламп накаливания с целью энергосбережения также весьма ограничена. Так, модное одно время управление лампами накаливания путем простейшего фазового диммирования значимо для повышения срока службы ламп, но одновременно приводит к изменению цветовой температуры и ухудшению эффективности, которая пропорциональна  $U^{1,8}$ . Кроме того, фазовое управление вызывает существенное падение коэффициента мощности. Поэтому очевидно, что лучшим методом энергосбережения при использовании ламп накаливания является не диммирование, а переключение их числа в многоламповых светильниках, что мы и наблюдаем на практике.

Весьма характерно, что образовавшийся в 1924 году картель производителей, владевший до 90% мирового рынка ламп накаливания, конфиденциальным соглашением установил срок жизни ламп общего применения на уровне 1000 ч. Ограничение было снято только в 1953-м [15] после придания этого соглашения гласности. Очевидно, что основной причиной огласки было решение одного из ведущих производителей выйти на рынок с набором ламп различного назначения, для которых рационально иметь и различные нити накаливания. Так, лампы с повышенными требованиями по надежности или требующие больших затрат для их замены необходимо делать с большим сроком службы, но при этом они могут быть относительно менее эффективными.

Известно также, что низковольтные лампы накаливания имеют повышенный ресурс

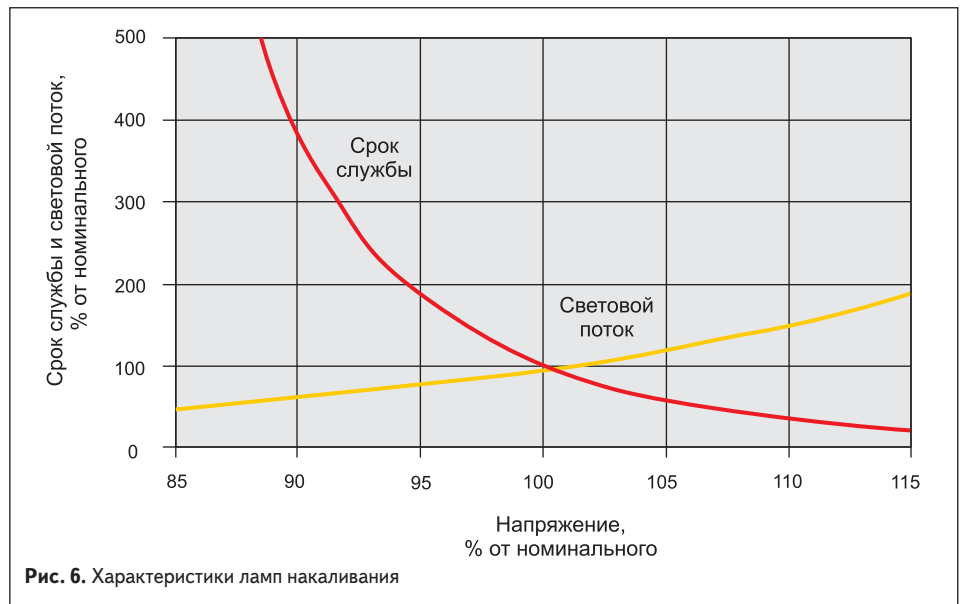


Рис. 6. Характеристики ламп накаливания

и светоотдачу из-за увеличенного сечения нити накаливания, что позволяет повысить температуру нити. И если современные лампы накаливания номинального напряжения 230 В имеют светоотдачу в среднем около 10 лм/Вт, то лампы с напряжением 120 В — около 15 лм/Вт. В последних разработках низковольтных (12 В) высокотемпературных галогенных ламп с кварцевым баллоном и инфракрасным покрытием, уменьшающим тепловое излучение, максимальная светоотдача получена на уровне 35 лм/Вт.

Как уже отмечалось, важнейшей системной инновацией для электрического освещения в начале XX века был переход на трехфазные сети энергоснабжения, основной вклад в который принадлежит М. О. Доливо-Добровольскому. Этот переход происходил в жесткой конкурентной борьбе в ходе так называемой войны токов [5]. Технология трехфазных сетей позволила, используя трансформаторное преобразование, передавать электроэнергию на большие расстояния с малыми потерями, отказаться от маломощных и малоэффективных тепловых электростанций, улучшить экологию и удешевить электроэнергию за счет ее производства на крупных гидро-, тепловых, а в дальнейшем и на атомных электростанциях.

Таким образом, уже в 20-х годах прошлого века системы освещения кардинально отличались от систем, внедряемых Т. Эдисоном. На смену угольным нитям пришли вольфрамовые, постоянное напряжение было заменено переменным с генерацией на крупных электростанциях, произошла существенная модернизация всех составных частей систем освещения, включая электросчетчики. До настоящего времени жили и остались наиболее распространенными единственными элементами эдисоновских сетей — лампы цоколи (Edison Screw — ES). В сетях с напряжением 220 В используются цоколи E14 и E27 (Ø14 и 27 мм), в сети 110 В — E12 и E26 (Ø12 и 26 мм), в сетях наружного освещения применяется цоколь E40 (Ø40 мм). Правда, у ряда исследователей авторство Эдисона вызывает определенные сомнения.

В первой части статьи речь шла о том, что наивысшие достижения технологий в процессе перманентной технологической революции закономерно совпадают с началом наступления следующей, еще более эффективной технологии. В данном случае на смену технологии накального освещения пришла технология газоразрядного освещения.

#### Газоразрядное освещение

*А внутри у нее неонка [16]*

С точки зрения системологии освещения открытых пространств первый этап развития газоразрядного освещения не должен был бы нас интересовать, поскольку он заключался в создании в первой половине XX века ламп тлеющего разряда. Это были неоновые лампы красно-оранжевого света, гелиевые (синие), аргоновые (сиреневые), криптоновые (сине-белые) и ртутные лампы голубовато-зеленого света с большой долей ультрафиолета. Все они были достаточно далеки по эффективности и спектральным характеристикам от потребностей утилитарного освещения. Лампы тлеющего разряда применялись и применяются в основном для индикаторного и рекламного освещения. Впрочем, заметим, что из индикаторного освещения они начали вытесняться светодиодами еще с начала 1970-х годов.

В действительности же дальнейший прогресс газоразрядного освещения связан с освоением явления люминесценции, использование которого в ртутных лампах тлеющего разряда обеспечило преобразование эффективного ультрафиолетового излучения паров ртути в видимое излучение. Это дало существенный прирост светоотдачи и повышение энергоэффективности осветительных систем в целом. В 1951 году за разработку в СССР люминесцентных ламп группа ученых в составе С. И. Вавилова, В. А. Фабриканта, В. Л. Левшина, Ф. А. Бугаевой, М. А. Константиновой-Шлезингер и В. И. Долгополова были удостоены званий лауреатов Сталинской премии второй степени.



В уличном освещении ряда стран люминесцентные лампы применялись довольно широко. В нашей стране они не вышли за рамки малочисленных пилотных проектов, поскольку при отрицательных температурах невозможно обеспечить их надежное зажигание и высокую энергоэффективность. Кроме этого, из-за большой площади тела свечения и при редко расположенных опорах они не нашли применения для равномерного освещения улиц. На языке светотехники это означает, что получение кривой силы света (КСС) типа Ш (широкой) было довольно затруднительно. В связи с этим в нашем исследовании можно было бы на них и не останавливаться, если бы не два обстоятельства. Первое — эффект люминесценции в дальнейшем широко использовался в еще более эффективных ртутных лампах высокого давления, а также в светодиодах. Второе — именно с люминесцентных ламп в начале 1980-х годов началось широкое распространение полупроводниковой электроники (электронной пускорегулирующей аппаратуры — ЭПРА). Использование ЭПРА можно считать первым успешным примером применения электроники в освещении, что стало предвестником эры полупроводниковой светотехники.

ЭПРА, или так называемые электронные балласты, заменили в люминесцентных светильниках электромагнитные балласты (ЭБ), которые содержали балластный дроссель, стартер (обеспечивающий предварительный нагрев электродов лампы и зажигание) и конденсатор, уменьшающий помехи и улучшающий коэффициент мощности. ЭБ обеспечивают зажигание разряда и стабилизацию тока через люминесцентную лампу. Применение ЭПРА улучшает ряд эксплуатационных характеристик люминесцентных светильников и, несмотря на увеличение стоимости, сроки окупаемости вполне приемлемы. Среди эксплуатационных характеристик люминесцентных светильников с ЭПРА нужно выделить следующие:

- увеличенная световая отдача лампы на повышенной частоте электропитания и более высокий КПД ЭПРА в сравнении с ЭБ, что повышает энергоэффективность на  $\approx 20\%$ ;
- увеличение срока службы лампы вдвое благодаря щадящему режиму работы и пуска;
- существенное снижение эксплуатационных расходов за счет сокращения числа заменяемых ламп и отсутствия необходимости замены мало надежных стартеров;
- отсутствие шумов и пульсаций яркости;
- увеличение коэффициента мощности до  $\approx 0,85$ , что особенно важно для энергосбережения в больших системах освещения;
- стабилизация светового потока при изменении питающего напряжения в широких пределах;
- снижение пусковых токов;
- возможность диммирования (управления яркостью) с дополнительным энергосбережением;
- обеспечение отключения при неисправности лампы.

Современные тонкие (диаметром 5/8 дюйма) люминесцентные лампы Т5 с повышенной световой отдачей (более 100 лм/Вт) используются только с ЭПРА. Миниатюризация ЭПРА позволила встроить их в компактные лю-

минесцентные лампы, получившие титул «энергосберегающие».

Возвращаясь к наружному освещению, отметим, что в первой половине XX века исследования свечения паров ртути под действием электрического тока проводились в ряде лабораторий в направлении повышения светоотдачи при повышении давления паров. Однако только к 1948 году удалось создать работоспособную конструкцию ртутной лампы высокого давления (РЛВД) с малогабаритной кварцевой горелкой, которая выдерживала бы высокую температуру возбужденной ртутной плазмы. РЛВД и все позже разработанные лампы высокого давления (ЛВД) так же, как люминесцентные лампы, требовали применения балластов (вначале это были ЭБ, а затем и более эффективные ЭПРА) ввиду необходимости стабилизации тока.

Свет первых РЛВД производил неприятное впечатление, поскольку под их сине-зелеными лучами цвет кожи у людей приобретал синюшный оттенок, и казалось, будто у них была выпущена кровь. Недаром философ А. Ф. Лосев отмечал: «Свет электрических лампочек есть мертвый, механический свет. Он не гипнотизирует, а только притупляет, огрубляет чувства. В нем есть ограниченность и пустота американизма, машинное и матерое производство жизни и тепла. Его создала торгашеская душа новоевропейского дельца, у которого бедны и нетонки чувства, тяжелы и оземлянены мысли. В нем есть какой-то пафос количества наперекор незаменимой и ни на что не сводимой стихии качества, какая-то принципиальная серединность, умеренность, скованность, отсутствие порывов, душевная одеревенелость и неблагоуханность. В нем нет благодати, а есть хамское самодовольство полужизни; ...нет теплоты и жизни, а есть канцелярская смета на производство тепла и жизни; не соборность и организм, но кооперация и буржуазный по природе социализм» [17].

В 1960-х годах с созданием устойчивых к высокой температуре люминофоров появились РЛВД с улучшенным спектром в красно-желтой области. Они стали известны как РЛВД с улучшенной цветопередачей («color corrected»). Световая отдача лучших РЛВД достигла 40 лм/Вт. Однако, поскольку люминофор наносится на внутреннюю сторону внешней колбы, то увеличенная поверхность свечения вызывала сложности с созданием светильника с КСС типа Ш. Так что этим лампам не было суждено качественно изменить ситуацию в наружном освещении городов. А вот на отечественных железных дорогах РЛВД до последнего времени применялись довольно широко из-за необходимости использования «белого» освещения ввиду повышенных требований по безопасности.

Дальнейшей модернизацией РЛВД стали металлогалогенные лампы (МГЛ), в которых энергоэффективность удалось увеличить до  $\approx 90$  лм/Вт за счет добавки в состав плазмы галогенидов металлов. Улучшился и спектр света лампы, он стал ближе к непрерывному спектру солнечного света из всех широко распространенных ЛВД.

В настоящее время в ряде стран производство светильников с РЛВД прекращено, а старые светильники переводят на более совершенные

металлогалогенные лампы (МГЛ) с одновременной заменой ЭБ, поскольку для МГЛ дополнительно требуется импульсное зажигание.

Важнейшим технологическим улучшением ЛВД стало использование энергоэффективного излучения паров натрия. Сложность его применения была в том, что при высоком давлении и температуре натрия химически весьма активен. Прозрачную горелку для удержания агрессивных паров натрия удалось создать из оксида алюминия только в конце 1960-х годов. С того времени началось широкое распространение натриевых ламп высокого давления (НЛВД) в освещении открытых пространств, поскольку они обладают наилучшей энергоэффективностью среди всех ЛВД. Световая отдача маломощных НЛВД может достигать 100 лм/Вт, а мощных — даже 150 лм/Вт. Долговечность ламп доходит до 25 000 ч. Правда, преимущественно желто-оранжевый спектр свечения НЛВД первоначально был довольно далек от комфортного белого света.

Применение для МГЛ аналогичных керамических горелок позволило поднять их эффективность (до  $\approx 120$  лм/Вт) и долговечность (до  $\approx 15 000$  ч).

В 1986 году благодаря повышению давления паров натрия удалось создать НЛВД с исправленной цветопередачей, они имеют цветовую температуру около 2700 К, индекс цветопередачи CRIC 85, что близко к свету ламп накаливания. Однако это было достигнуто за счет уменьшения эффективности и долговечности, а также за счет увеличения цены.

Важным качеством ламп высокого давления является возможность управления их яркостью (диммирование). Хотя НЛВД можно диммировать не более чем на 50%, а обычные МГЛ — только на 30% без существенного изменения спектра. Несколько лет назад были созданы специальные МГЛ для уличного освещения с возможностью 50%-го диммирования.

В современных светильниках с ЛВД так же, как и в люминесцентных, происходит замена ЭБ на ЭПРА с описанными выше преимуществами, включая возможность энергосбережения.

Отдельным подклассом газоразрядных ламп следует считать безэлектродные лампы. Возбуждение плазмы в этих лампах достигается с помощью различных генераторов электромагнитных полей. Поскольку в таких лампах отсутствуют электроды и улучшена герметизация, срок их службы существенно увеличивается — до 50 000 ч и более.

Из безэлектродных ламп первыми были изобретены индукционные лампы. В современном виде они представляют собой торообразную люминесцентную лампу с двумя надетыми на нее кольцевыми электромагнитными возбуждателями поля частотой в несколько сотен килогерц. Несмотря на возможность работы в широком диапазоне температур, они находят ограниченное применение в уличном освещении ввиду сложности получения КСС типа Ш.

В середине 1990-х появились серные лампы высокого давления (СЛ), в которых возбуждение серной плазмы в малогабаритной горелке в атмосфере аргона обеспечивается магнетроном с частотой 2,4 ГГц. По спектру излучения эти

лампы наиболее близки к спектру солнечного света, однако конструктивно сложны из-за магнетронного возбуждения, требований по экранированию излучения, а также необходимости вращения и охлаждения горелки.

Совсем недавно разработаны и безэлектродные МГЛ, в которых возбуждение разряда достигается с помощью диэлектрического объемного резонатора.

Безэлектродные ЛВД в сравнении с обычными ЛВД допускают более глубокое диммирование (до 3–4 раз).

Несмотря на улучшение ряда характеристик, бесконтактные ЛВД пока не находят широкого распространения из-за более высокой цены.

Таким образом, к концу XX века газоразрядное освещение достигло вершины своего развития и практически все последние инновации в этой области не приводили уже к каким-либо качественным сдвигам в системах наружного освещения. По закону жанра назрел переход к следующему технологическому этапу развития. Им стал этап светодиодного освещения.

## Полупроводниковое (светодиодное) освещение

Эффект электролюминесценции полупроводников был открыт и исследован русским физиком Олегом Владимировичем Лосевым (рис. 7) при экспериментах с детектирующим контактом на основе пары «карборунд — стальная проволока», проведенных в 1923 году в Нижегородской радиолaborатории [18]. В дальнейшем (с 1928 г.) он работал в Центральной радиолaborатории Треста заводов слабых токов и в Физико-техническом институте в Ленинграде. На пару десятилетий Лосев опередил отечественных и зарубежных исследователей, однако неразвитость науки полупроводников и технологий получения чистых материалов не позволила ему довести работу до практической реализации. В январе 1942-го О. В. Лосев умер от истощения в первую блокадную ленинградскую зиму.



Рис. 7. Олег Лосев

Повторное открытие светодиодов совершилось в лаборатории Ника Холоньяка (Никола Голоньяк) (рис. 8), и в 1962 году ему удалось создать первый коммерческий красный светодиод. Чуть позже появились желтые и зеленые светодиоды. По большей части они использовались в различных электронных приборах в целях индикации. Характерно, что в 1960-х светодиодное излучение в научных кругах называлось «Losev Light».

Эффективность светодиодов постоянно увеличивалась, и в конце 1980-х световой поток одиночных красных, желтых и зеленых светодиодов достиг значения 1 люмен (лм). Усилия исследователей ряда лабораторий в это время сконцентрировались вокруг создания эффективного синего светодиода.

Успех на этом поприще поджидал и японского исследователя Суджи Накамура (рис. 9), который в отличие от большинства ученых того времени из двух возможных материалов для изготовления синих светодиодов выбрал считавшийся менее перспективным нитрид галлия (GaN). Этот материал обладал существенно большей удельной плотностью дислокаций, чем популярный в то время селенид цинка (ZnSe). Ему удалось создать уникальную технологию и получить пленки нитрида галлия *n*-типа и *p*-типа, а также излучающий слой из InGaN. Итогом работы Суджи Накамура стало появление в конце 1993-го первого коммерческого образца синего светодиода [18].

В последующие годы усилиями коллективов исследователей были созданы эффективные светодиоды, которые могут излучать во всем оптическом диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного. При этом состав полупроводников светодиодов варьируется от нитрида галлия (GaN) до сульфида цинка (PbS).

Казалось бы, теперь можно легко получить любой цвет освещения (включая белый) путем аддитивного смешения цветов, описанного Исааком Ньютоном еще в 1672 году, используя красный, синий и зеленый светодиод, как это делается, к примеру, в телевидении. Однако этому препятствуют две не решенные



Рис. 8. Ник Холоньяк

до настоящего времени проблемы. Первая — эффективность зеленых светодиодов до настоящего времени остается весьма низкой (проблема так называемой зеленой долины [19]). Вторая — большая температурная нестабильность и разброс в характеристиках излучения мощных светодиодов. В результате многокомпонентные светодиодные светильники получили распространение в наружном освещении в основном для подсветки и создания различных спецэффектов. Производителям светодиодов, предназначенных для освещения, пришлось идти старым проторенным путем — использовать люминесценцию. Первые белые «сверхъяркие» светодиоды, объединяющие синий светодиод с желтым люминофорным покрытием, появились в 1996 году. С этого и началась современная история светодиодного освещения.

Эффективность серийно производимых белых светодиодов за это время возросла с 10 до 110 лм/Вт для «теплого» оттенка, подобного спектру ламп накаливания (цветовая температура  $\approx 3000$  К) и до 160 лм/Вт для «холодного» оттенка, подобного спектру люминесцентных ламп (цветовая температура  $\approx 5000$  К). Световой поток одиночного светодиода превысил 200 лм.

Постепенно светодиоды составили конкуренцию практически всем традиционным источникам света. В настоящее время они широко применяются в рекламном, театральном, офисном, домашнем и других видах освещения. Создание же конкурентного уличного светильника вызывает определенные сложности, связанные с большой мощностью. Так, при построении магистрального светильника со световым потоком  $\approx 20\,000$  лм на наиболее эффективных одноваттных светодиодах их потребуется около 200 штук. При этом для минимизации деградаций необходимо обеспечить режим работы кристалла светодиода при температуре, не превышающей  $85^\circ\text{C}$ . Это достигается применением довольно массивного радиатора (на 1000 лм требуется не менее 0,8 кг массы радиатора). Следует также учитывать, что электроника управляемого драйвера светиль-



Рис. 9. Суджи Накамура

ника должна отвечать требованиям высокой надежности и долговременности в широком температурном диапазоне. Необходимо также обеспечить высокий коэффициент мощности. В настоящее время такие светильники стоят гораздо дороже светильников на ЛВД, и, несмотря на большую экономию электроэнергии, срок их окупаемости весьма продолжительный. За рубежом высокие тарифы на электроэнергию стимулируют муниципальные власти активно внедрять современные энергосберегающие технологии освещения. Существуют уже отдельные города, полностью перешедшие на светодиодное освещение.

Завершая системологический обзор источников света, автор предполагает в третьей части повествования перейти собственно к системным вопросам. Прежде всего, необходимо будет определить, что собственно мы понимаем под системой освещения. Далее, классифицировать системы освещения открытых пространств по их типологическим признакам, вскрыть преимущества и недостатки существующих и гипотетических систем, установить критерии сравнения систем, а затем выявить наиболее перспективные из них. ●

*Продолжение следует*

## Литература

1. М. Цветаева. Мой Пушкин (Сборник прозы). М., «Советский писатель», 1937.
2. Kratschmer W., Lamb L. D., Fostiropoulos K., Huffman D. R. Nature, V. 347, № 354. 1990.
3. Велихов Е. П., Ковалев А. С., Рахимов А. Т. Физические явления в газоразрядной плазме. М., 1987.
4. Энциклопедический словарь Брокгауза и Эфрона. Электрическое освещение, т. XL, с. 431–458.
5. О. Зотин. В преддверии возрождения постоянного тока // Силовая электроника, 2013, № 4–6.
6. Маяковский В. В. Наше воскресенье. Полное собрание сочинений: В 13 т. / АН СССР. Институт мировой литературы им. А. М. Горького. — М.: Худож. лит., 1955–1961. Т. 5.
7. В. В. Петров. Известие о гальвани-вольтовых опытах / С.-Петербург, 1803.
8. Патент № 112024, выданный во Франции 23 марта 1876 г. П. Н. Яблочкову на электрическую лампу. Пять дополнений к патенту № 112024 от 16.09.1876 г., 02.10.1876 г., 23.10.1876 г., 21.11.1876 г., 31.03.1877 г.
9. Патент № 115793, выданный во Франции 30 ноября 1876 г. П. Н. Яблочкову на распределение токов, предназначенных для освещения электрическим светом. Два дополнения к патенту № 115793 от 20.02.1877 г. и 27.04.1877 г.
10. M. Oppenheimer. Austin's Moon Towers, Beyond 'Dazed and Confused'. The New York Times 13.02.2014.
11. Культовый кинофильм "Dazed and Confused" («Под кайфом и в смятении»), 1993. Режиссер Ричард Линклейтер, дважды лауреат Берлинского кинофестиваля.
12. А. Лодыгин. Патент США № 575002. Нить для лампы накаливания. Приоритет от 04.01.1893.
13. С. Чертопруд. Охота на «лампочку Ильича». Эксперт № 12 (795), 2012.
14. Donald G. Fink and H. Wayne Beaty, Standard Handbook for Electrical Engineers, Eleventh Edition, McGraw-Hill, New York, 1978, ISBN 0-07-020974-X, pg. 22–8.
15. Tests shine light on the secret of the Livermore light bulb. San Jose Mercury News. 6 February 2011.
16. Народная версия цитаты из повести А. и Б. Стругацких «Сказка о тройке».
17. А. Ф. Лосев. «Диалектика мифа». 1-е изд.: М.: Изд-е автора, 1930 (тираж был почти полностью конфискован и уничтожен).
18. О. В. Лосев. Светящийся карборундовый детектор и детектирование с кристаллами. Телеграфия и телефония без проводов (ТиТбп) № 5, 1927, Н. Новгород.
19. Bob Johnstone. Shuji Nakamura and the Revolution in Lighting Technology. Prometheus Books, Amherst, N.Y., 2007.
20. Закгейм А. Л. Светодиодные системы освещения: энергоэффективность, зрительное восприятие, безопасность для здоровья (обзор) // Светотехника, 2012, № 6.