

7. Kanaya S., Hashimoto and Kichize E. «Subjective Balance between general colour rendering index. Colour Temperature and Illuminance of Interior Lighting». Proc. 19th CIE Session, 1979. Kyoto, p. 79—46, 274—278.
8. Лебедкова С. М., Матвеев А. Б. О комплексной оценке качества световой среды// Светотехника. 1984. № 9. С. 1—3.
9. Лебедкова С. М., Матвеев А. Б. Оценка качества освещения по спектральному составу излучения// Светотехника. 1982. № 11. С. 11—13.
10. Беляева Н. М., Фаермарк М. А. Об освещении производственных помещений с учетом цветовых характеристик разрядных ламп// Светотехника. 1986. № 9. С. 6—9.
11. Беляева Н. М. Принципы рационального применения источников света с различными цветовыми параметрами// Светотехника. 1984. № 7. С. 4—6.
12. Епанешников М. М., Перова Н. С., Ундасынов Г. Н. Выбор типа люминесцентных ламп для освещения административных зданий// Светотехника. 1975. № 10. С. 4—6.
13. Шефтель Е. Б., Скобарева З. А. О спектре излучения люминесцентных ламп для освещения лечебных учреждений// Светотехника. 1972. № 7. С. 7—9.
14. Характеристики новых люминесцентных ламп/ М. А. Баулина, И. Н. Дьяконова, Р. С. Иоффе, Е. П. Усвяцова// Светотехника. 1978. № 12. С. 22—23.
15. Ильина Е. И. Влияние параметров светоцветовой среды на работоспособность контролеров качества цветных тканей и разработка оптимальных условий освещения участков контроля: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1989.
16. Publication Guide on interior lighting (second edition). CIE № 29.2. 1986.

УДК 621.327.534:546.13

О НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПЛАЗМЫ РАЗРЯДА МЕТАЛЛОГАЛОГЕННЫХ ЛАМП

В. Г. ВДОВИН, канд. физ.-мат. наук,
Н. А. ВДОВИНА, инж.

Всесоюзный институт источников света
им. А. Н. Лодыгина

Экспериментальные данные, в том числе полученные новейшими методами исследования, показывают, что для адекватного моделирования металлогалогенных ламп (МГЛ) и успешного поиска путей повышения их световой отдачи целесообразно отказаться от предположения о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР) в плазме этих ламп. В работах по МГЛ это обстоятельство, как правило, во внимание не принимается. Считается достаточной критериальная оценка наличия ЛТР, однако с этим нельзя согласиться. Мы в своих исследованиях [1—4] исходим из самой общей неравновесной концепции физических условий в плазме МГЛ и экспериментального определения микропараметров разряда.

На примере базовой МГЛ типа ДРИ700 (Tl, InI, NaI, Hg) с длиной дуги 5—6 см, диаметром трубки 2,3 см, при перепаде температуры на поверхности между верхом и низом горелки $\sim 50^\circ\text{C}$, в диапазоне практических дозировок компонентов, токов 3—10 А частоты 50 Гц демонстрируются проявления неравновесных условий в приосевой области разряда, если определять микропараметры экспериментально с помощью методов абсолютных измерений интенсивностей, полного поглощения в пределах спектральных линий [1], инверсии Абеля, анализа вандерваальсовской и штарковской ширины, сдвига и формы контуров

линий в оптически тонком слое [2], голограммической интерферометрии плотности и температуры буферного газа и других методов [4], не требующих априорных модельных предположений ЛТР. В частности установлено, что распределение заселенности N_i уровней атомов Me (Tl, In, Na, Hg) в МГЛ переменного тока существенно неравновесно (рис. 1): многие из высоковозбужденных состояний Tl, In, Na обеднены, а у атомов буферного газа Hg, наоборот, перезаселены относительно N_i , рассчитанных по температуре заселения T_3 первого возбужденного и основного уровней. Отступления $\lg N_i = f(E_i)$ от больцмановского распределения при «Т» (Hg 577/579 нм) далеко выходят за пределы ошибок измерений и неточностей знания вероятностей переходов [3]. Поэтому определение основного параметра температуры электронов T_e нами оценивалось с точностью $\pm 0,1$ эВ по неравновесной модели модифицированного диффузного приближения (МДП) [4] из расчетов $\lg N_i = f(E_i)$ всех добавок Me в диапазоне значений E_i от основного до самых высоковозбужденных уровней с учетом потока возбужденных состояний в ассоциативную ионизацию (аи) j_{ai} и экспериментальным данным о N_i :

$$y'_{\text{k}}' = \left(y_1 \frac{S_{ke}}{S_{1e}} + y_2 \frac{S_{1,k-1}}{S_{1e}} \right) + j_{\text{ai}} S_{ke} \left(1 - \frac{S_{ke}}{S_{1e}} \right), \quad (1)$$

где $y'_{\text{k}} = N_{\text{k}}/N_{\text{k}}^0$, $y_e = N_e/N_e^0$ приведенные величины, N_{k}^0 , N_e^0 — расчетные равновесные значения заселенности уровней при T_e , $S_{ke} = \sum_{i \geq k} S_i$, $S_{1,k-1} = \sum_{i < k} S_i$, $S_i^{-1} = \langle Z_{k,k+1} \rangle \times$

$\times N_{\text{k}}^0 \Pi_{\text{k}} F_{\text{k}}$ соответственно $\langle Z_{k,k+1} \rangle$ — эффективная вероятность перехода, F_{k} — фактор влияния дефицита быстрых электронов, Π_{k} — фактор влияния излучения на заселенность уровня, $j_{\text{ai}} = \beta_{\text{k}} N_{\text{k}}$ [Hg], $\beta_{\text{k}} \sim (2 \div 9) 10^{-9}$ [$\text{см}^{-3} \text{s}^{-1}$] — коэффициент скорости ассоциативной ионизации [3].

При этом было показано, что температура возбуждения $T_b \approx T_3$ первых резонансных уровней добавок в максимуме фазы тока МГЛ достигает значения T_e и далее использовалась для оценки $T_e(r)$ (рис. 2).

Концентрация нормальных атомов добавок $N(r)$ определялась по полному поглощению $A_G(x)$ в пределах самообращенных линий, $T_3(r)$ — модифицированным методом Бертельса, примененным к резонансным линиям [2]. Концентрация атомов буферного газа $N_{\text{Hg}}(r)$ и атомная температура $T_a(r, z)$ (рис. 2) находились методом голограммической интерферометрии [1, 5] с использованием закона Дальтона, известной температуры стенки или торца электрода и условия сохранения полного числа частиц в объеме горелки

$$4 \int_0^{l/2} dz \int_0^R dx \int_x^R \frac{N(r, z) - N_0}{(r^2 - x^2)^{1/2}} \dot{r} dr = 0, \quad (2)$$

где r , x , z — радиальная, поперечная и аксиальная координаты луча наблюдения, N_0 — концентрация атомов Hg после выключения разряда. Полученные значения N_{Hg} хорошо совпали с расчетами по резонансному уширению линий Hg 577/579 нм [2]:

$$\Delta\lambda_p [\text{\AA}] = (2,1 \pm 0,2) 10^{19} N_{\text{Hg}} [\text{см}^{-3}]. \quad (3)$$

В релаксации ($t \rightarrow 100$ с) после шунтирования разряда исследовались молекулярные системы полос TII (переход $X^1\Sigma^+ - A^3\Pi_0$) — поперечная серия Деландера (X, v), InI (переход $X^1\Sigma^+ - B^3\Pi_1$) — диагональная серия Деландера (v', v). Учитывалось полное перекрытие вращательной

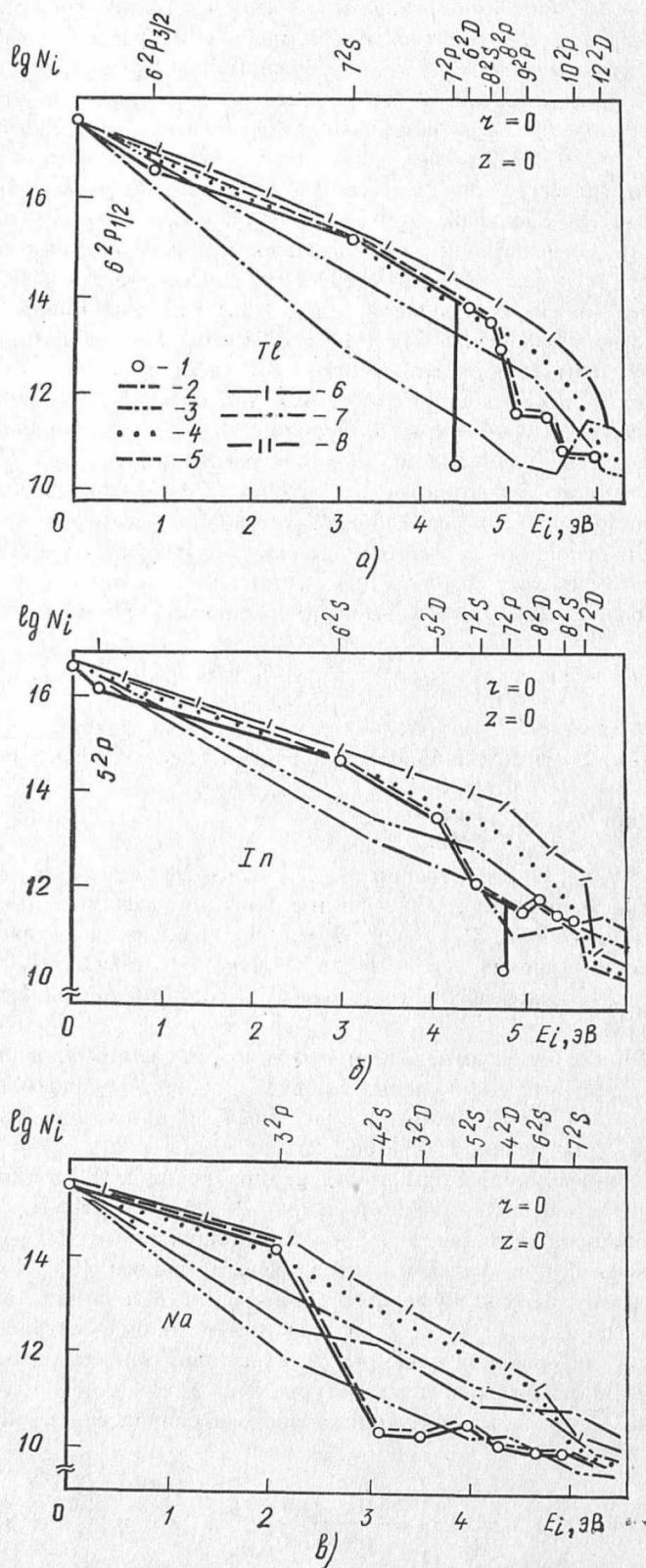


Рис. 1. Распределение заселенности N_i (см^{-3}) по возбужденным состояниям E_i атомов добавок и ртути в максимуме фазы тока в центре разряда МГЛ:

a — таллий; *б* — индий; *в* — патрий; *г* — ртуть; *1* — эксперимент, расчет: *2* — при $T_e = 0,3 \text{ эВ}$; *3* — $0,5 \text{ эВ}$; *4* — $0,7 \text{ эВ}$; *5* — $0,7 \text{ эВ}$ с учетом ассоциативной ионизации; *6* — $1,0 \text{ эВ}$, $N_{\text{Tl}}^+ = 0,3N_e$, $N_{\text{In}}^+ = 0,3N_e$, $N_{\text{Na}}^+ = 0,1N_e$, $N_{\text{Ag}}^+ = 0,3N_e$; *7* — при $T_e = 0,3 \text{ эВ}$, $N_{\text{Na}}^+ = 0,01N_e$; *8* — при $T_e = 0,45 \text{ эВ}$, $N_{\text{Ag}}^+ = 0,05N_e$

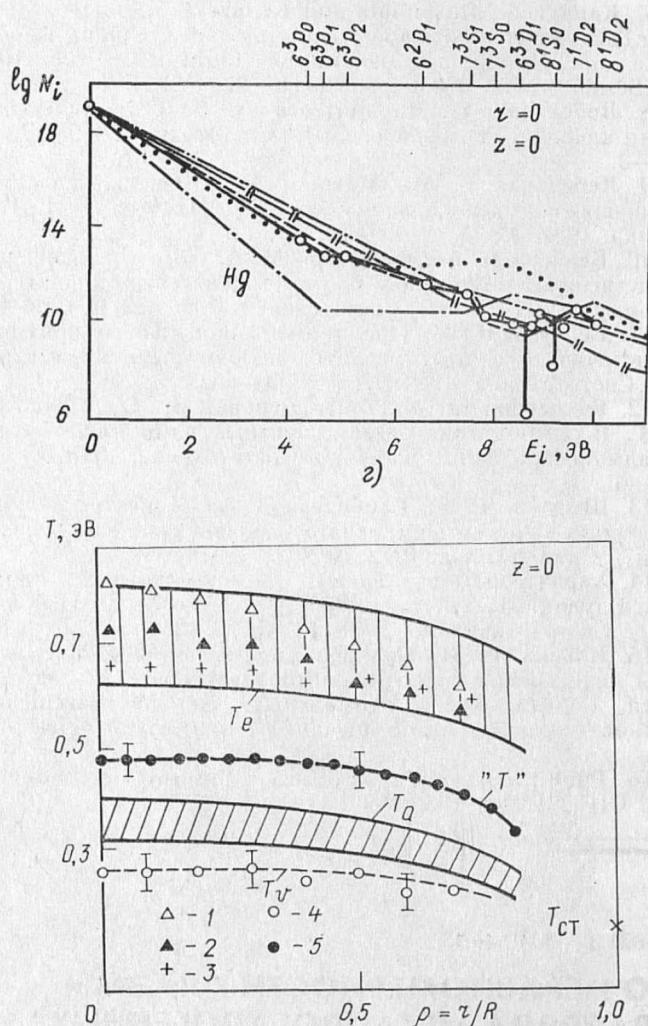


Рис. 2. Радиальные профили температуры $T(\rho)$ в максимуме тока в центральном сечении разряда МГЛ:

T_e — температура электронов, расчет; *1—3* — температура возбуждения, определенная по линиям соответственно Tl 535, In 451, Na 589 нм, эксперимент; T_a — атомная температура буферного газа, эксперимент; T_v — колебательная температура молекул; *4* — эксперимент; « T » — условная термодинамическая температура; *5* — эксперимент; $T_{\text{ст}}$ — температура стенки горелки

структуры полос за счет уширения ртутью, что облегчило определение концентрации молекул. В [4] показано, что

$$\sum_v \kappa_{0,v} = 2(\ln 2)^{1/2} \frac{e^2}{mC\Delta\nu_D} f_{XA} N_{\text{TlI}}, \quad (4)$$

где $\kappa_{0,v}$ — коэффициент поглощения в центре полосы. При $\kappa_{0,v} \gg 1$ $A_{G,v}$ — эквивалентная ширина полосы

$$A_{G,v} = \frac{\Delta\nu_D}{2(\ln 2)^{1/2}} \int_{v_1}^{v_2} \{1 - \exp[\kappa_{0,v} l \exp(-\omega^2)]\} d\omega, \quad (5)$$

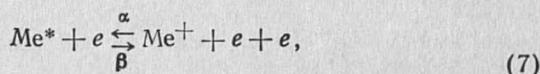
$f_{XA} = (1,4 \pm 0,2) 10^{-2}$, $f_{XB} = (2,2 \pm 0,2) 10^{-3}$ — силы осциллятора, $\omega : (v - v_0)$, $\Delta\nu_D = (180 \pm 10)$ — ширина равноточных полос гауссовской формы [см^{-1}]. Установлено, что на оси разряда остаточная концентрация молекул TlI , InI в стационарном состоянии ($t=0$) независимо от дозировки составляет $\sim(1 \div 2) 10^{16} \text{ [см}^{-3}]$. Количество добавок, рекомбинирующих в иодиды ($t \rightarrow 1 \div 10 \text{ с}$), заметно меньше, чем должно быть по наполнению, по причине удержания TlI и InI в жидкой фазе NaI . При $t=0$ колебательные состояния молекул с $v=0, 1, 2$ перезаселены, остальные с $v=3 \div 8$ образуют группу состояний с $T_v \sim 2500 \pm 500 \text{ K}$, что соответствует значениям T_a (рис. 2).

Релаксация заселенности $N_e(t)$ уровней Me ($t \rightarrow 15$ мс) описывается суммой двух экспоненциальных зависимостей

$$N_e(t) = Ae^{-(t/\tau_1)} + Be^{-(t/\tau_2)}, \quad (6)$$

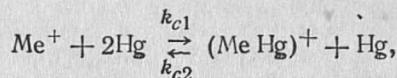
где $\tau_2 \gg \tau_1$ — константы затухания, $A/B \sim 2 \div 3$. Всегда τ_1 заметно уменьшается с ростом E_i , для первых резонансных переходов $\tau_{1,2} \sim 3 \div 4$ мс. Релаксация $N_e(t)$, определяемая по штарковской ширине линий Na 5682/88, Tl 5520 и 5580 Å [1], имеет постоянную $\tau_{1,2} \sim \tau_{1,2}$ (рис. 3) и очень затянута во времени. Зависимости $N_e(t)$, $N_i(t)$ показывают, что в МГЛ микропараметры не успевают подстраиваться в равновесие с изменением электрических параметров на переменном токе. Как следует из рис. 3, рекомбинационный поток электронов j_p равен $\sim (2 \div 5) 10^{18}$ [см⁻³ с⁻¹].

Оценим потоки частиц в некоторых реакциях при релаксации $T_e(t=0) \sim 0,7$ эВ $\rightarrow T_a \sim 0,3$ эВ [3, 4]: — ступенчатая рекомбинация (ионизация) с учетом поглощения (Π_k)



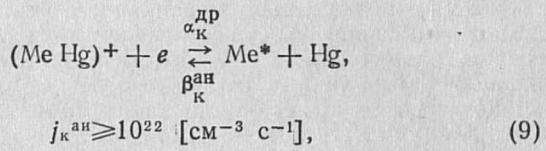
$$j_p^e = j_{p,1}^e \sim 10^{22} \text{ [см}^{-3} \text{ с}^{-1}\text{]};$$

— конверсия атомарного иона в молекулярный ион



$$j^m \sim (2 \div 5) 10^{22} \text{ [см}^{-3} \text{ с}^{-1}\text{]}; \quad (8)$$

— ассоциативная ионизация (диссоциативная рекомбинация), реакция Хорнбека — Молнара



$$j_k^{\text{ai}} \geq 10^{22} \text{ [см}^{-3} \text{ с}^{-1}\text{]},$$

при $T_e = T_a = 0,3$ эВ $j_k^{\text{dp}} \approx 10^{18}$ [см⁻³ с⁻¹].

Реакция (8) является лимитирующей стадией превращения: $j_p^e \rightarrow j_k^{\text{ai}} \rightarrow j^m$, поскольку [4]

$$k_{c2} [\text{Hg}] \gg \alpha_k^{\text{dp}} [\text{Me, Hg}]^+ N_e, \quad (10)$$

откуда имеет место случай, при котором молекулярные ионы, возникающие при ассоциативной ионизации, гибнут, превращаясь в атомарные.

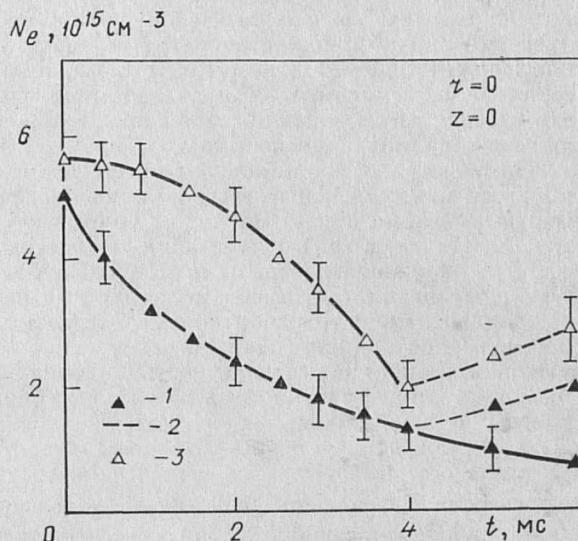
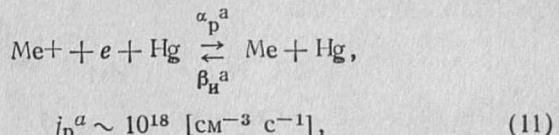


Рис. 3. Релаксация концентрации электронов $N_e(t)$ в центре дуги: 1 — после шунтирования разряда в фазе максимума тока; 2 — после включения разряда; 3 — в различных фазах тока разряда

Таким образом, ожидаемый рекомбинационный поток j_p^e блокирован встречным сильным ионизационным потоком j_k^{ai} и ряд высоковозбужденных состояний атомов добавок и ртути оказывается существенно обедненным (рис. 1), поэтому спад $N_e(t)$ обусловлен более медленными в условиях МГЛ процессами: диссоциативной рекомбинацией молекулярных ионов (9), ступенчатой рекомбинацией с участием атомов буферного газа



прямой рекомбинацией электронов в основное состояние

$$j_p^{\text{np}} = \alpha_{np} [\text{Me}^+] N_e^2 \sim (1 \div 5) 10^{18} \text{ [см}^{-3} \text{ с}^{-1}\text{]}. \quad (12)$$

Как следует из расчетов по (6) — (12), ассоциативная ионизация, при которой затрачивается кинетическая энергия атомов ртути и возможно понижается атомная температура, поддерживает электропроводность плазмы, инерционность высовечивания спектра добавок, способствует росту светового потока и снижению его пульсаций с увеличением давления буферного газа.

Представленные результаты имеют достаточно общий характер в практически используемом диапазоне соотношений добавок и условий работы МГЛ на переменном токе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vdovin V. G., Hahaev A. D. Experimental study on plasma nonequilibrium of high pressure metal-halide discharge. ICPG-14. Grenoble, Fr., J. Phys, 1979, vol. 40, N C7, p. 177—178.
2. Vdovin V. G., Vdovina N. A. On determination of Tl, In, Na normal atom concentration by resonance lines broadened with mercury pressure. — ICPG-14. Grenoble, Fr., J. Phys., 1979, vol. 40, № C7, p. 839—840.
3. Vdovin V. G., Vdovina N. A., Shuratova O. V. The calculation of nonequilibrium population of the atom excited states in metal-halide discharge taking into account ion-molecular reactions. — ICPG-15. Minsk, USSR, Cont. paper, p. II, p. 1616, p. 941—942, 1981.
4. Вдовин В. Г. Экспериментальное исследование физических условий в плазме разряда высокого давления в смеси паров ртути с добавками металлогалоидов: Автореф. дис. . . . канд. физ.-мат. наук. М., 1980.
5. Vdovin V. G., Pustoshkin A. A., Vdovina N. A., Pritchett A. A. Holographic interferometry applicable to investigation of temperature field and thermal loss in discharge lamps. III. Int. Simp. Sci. and Technol. Light Sources. Toulouse, Fr., 1983, p. 174—176.

* * *

Assumption of local thermodynamic equilibrium (LTE) in discharge plasma of metal-halogen lamps filled with TII, InI, NaI, Hg and supplied by 50 Hz alternating current is not compulsory for constructing of model of such plasma. Observations of central part of the discharge show non-equilibrium in population distribution of atoms of Hg and additives under the influence of ion-molecule reactions with electron temperature 0.7 eV; observing atom temperature comes to only 0.3 eV and is close to oscillation temperature of TII, InI molecules, as «thermodynamic» temperature which is determined according to the intensity of Hg triplet of 577/579 nm lines is about 0.5 eV. In relaxation the arc was shunted it was detected that levels population and electrons concentrations are non-equilibrium as well, and according to appraisal slow decay of electrons concentration results from the fact that recombination flux is blocked by strong contrary flux associative ionization with participation of buffer gas of Hg atoms.

It is pointed to the positive role of associative ionization in increasing of plasma conductance and luminous flux and decreasing of its fluctuations with rise of pressure of buffer gas