

А. Т. РАХИМОВ, В. Д. ПИСЬМЕННЫЙ

ОБ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНОЙ
КСЕНОНОВОЙ ПЛАЗМЫ

(Представлено академиком Л. А. Арцимовичем 24 VI 1970)

В ряде работ по импульсному разряду в ксеноне при высоких давлениях ($1-4$) было установлено, что для трубок различного диаметра ($1,3 \div 36$ мм) в широком интервале плотностей тока ($0,3 \div 10$ ка/см²), начальных давлений газа ($100 \div 600$ мм рт. ст.) и температуры ($0,7 \div 1,2$ эв) электропроводность плазмы σ и плотность тока j связаны закономерностью

$$\sigma \sim j^{1/2}. \quad (1)$$

Соотношение (1) может быть получено из уравнения баланса энергии в разряде при предположении, что плазма излучает как черное тело и ее электропроводность имеет кулоновскую природу. Такое объяснение, естественное для сильноточных разрядов, представляется необидительным, когда они характеризуются малыми плотностями тока и низкими значениями температуры и концентрации газа, так как при этом плазму нельзя считать оптически плотной.

Прозрачность плазмы зависит от соотношения между радиусом токового канала (R) и росселандовым пробегом кванта (l)⁽⁵⁾:

$$l = \frac{15}{4\pi^4} \int_0^{\infty} \frac{1}{\kappa_\nu} \frac{u^4 e^{-u}}{(1 - e^{-u})^3} du, \quad (2)$$

где $u = h\nu / T$ и $\kappa_\nu(N, T)$ — коэффициент поглощения света с частотой ν в газе с температурой T и плотностью N . Плазма оптически прозрачна при $l \ll R$.

Оценки показывают, что в области параметров, типичных для импульсных источников света ($T \geq 1,5$ эв; $N \sim 10^{18} \div 10^{19}$ см⁻³), основной вклад в κ_ν вносит фотоионизация нейтралов.

Выражение для коэффициента фотоионизационного поглощения на атомах XeI запишем в приближении Крамерса — Унзольда⁽⁶⁾:

$$\kappa_\nu = 7,3 \cdot 10^{-15} \frac{1}{T^2} e^{-I/T} N_I(T) \frac{1}{u^3} e^u, \quad (3)$$

где I и N_I — потенциал ионизации и плотность атомов ксенона соответственно. Здесь и во всех формулах в дальнейшем T выражена в электрон-вольтах, а все остальные величины — в системе CGSE.

Из (2) с учетом (3) следует

$$l = 5,3 \cdot 10^{12} T^2 e^{I/T} \frac{1}{N_I(T)} \int_0^{\infty} \frac{u^7 e^u}{(e^u - 1)^3} du. \quad (4)$$

Отсюда видно, что l определяется в основном пробегом квантов с частотами, лежащими в районе $u = 3,5$.

Следовательно, при $T \leq 1$ эв приближение Крамерса — Унзольда, оправданное в случае фотоионизации с верхних уровней, является удовлетворительным приближением для вычисления росселандового пробега. Это подтверждается хорошим согласием величины κ_ν ($u \approx 3,5$), вычисленной

по (3), со значением коэффициента поглощения, полученным в эксперименте (7).

Взяв интеграл в (4), получим окончательное выражение

$$l = 10^{14} T^2 e^{l/T} / N_1(T). \quad (5)$$

Вычислив с помощью этого выражения отношение l/R для ряда экспериментов (4, 7), можно убедиться, что во многих случаях, когда экспериментальные данные хорошо укладываются в зависимость (1), плазма является оптически прозрачной ($l/R \gg 1$).

В этом случае уравнение энергетического баланса имеет вид

$$\sigma E^2 + \text{div}(k \nabla T) = W_{\text{изл}}, \quad (6)$$

где σ — кулоновская проводимость и k — кулоновский коэффициент теплопроводности плазмы; $W_{\text{изл}} \sim T^4/l$ — энергия излучения.

Если в (6) пренебречь теплопроводностью, то зависимость электропроводности от тока получается логарифмической, что противоречит выражению (1), полученному экспериментально.

Если же в энергобалансе (6) пренебречь излучением, то решению уравнения (6) с граничными условиями $\frac{dT}{dx}(0) = 0$ и $T(R) = T_R$ можно придать вид:

$$T(0) \int_{T_R/T(0)}^{T(x)/T(0)} z^{3/2} (1 - z^5)^{-1/2} dz = \alpha E (R - x),$$

где α — константа.

Отсюда видно, что средняя температура газоразрядной плазмы близка к ее значению в центре разряда ($T(0)$) и, следовательно,

$$T \sim ER. \quad (7)$$

С помощью выражения (7) и при предположении кулоновского характера электропроводности легко получить зависимость между электропроводностью и током в оптически прозрачной плазме

$$\sigma \sim j^{3/2},$$

что близко к экспериментальному выражению (1).

Институт ядерной физики
Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова

Поступило
24 VI 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ И. С. Маршак, Импульсные источники света, 1963. ² G. H. Gopez, J. Appl. Phys., 36, 742 (1965). ³ И. В. Деменик, В. Е. Мнускин и др., ЖТФ, 38, 1092 (1968). ⁴ А. А. Бакеев, Р. Е. Ровинский, Теплофиз. высоких температур, 1, 207 (1970). ⁵ Я. В. Зельдович, Ю. Н. Райзер, Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений, «Наука» (1966). ⁶ А. Унзольд, Физика звездных атмосфер, ИЛ, 1949. ⁷ А. А. Бакеев, Р. Б. Ровинский, И. П. Широкова, Оптика и спектроскопия, 27, 215 (1969).