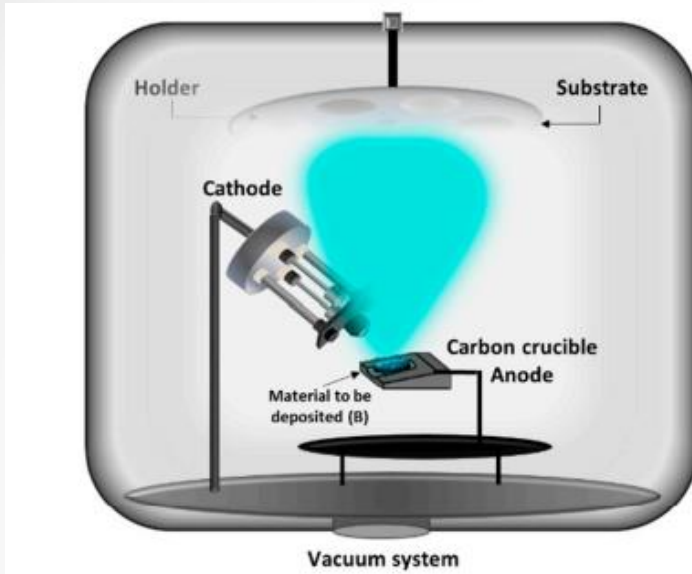


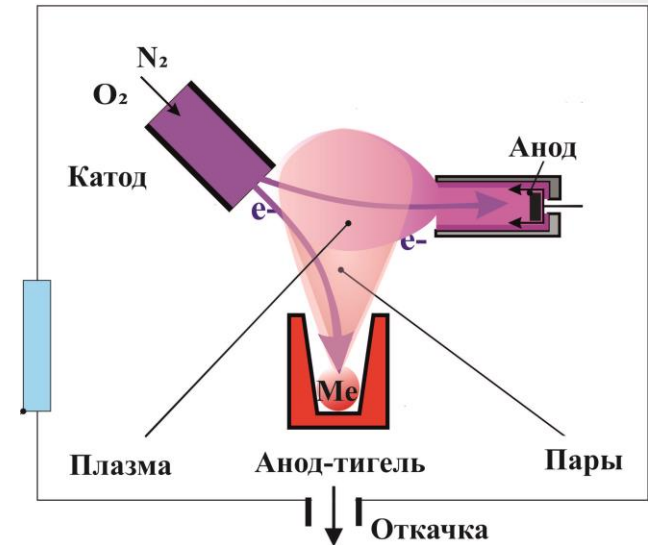
Диагностика плазмы дуги низкого
давления (N_2 , 0,1 – 1Па),
генерируемой в условиях анодного
испарения алюминия

Выполнил аспирант 2 года обучения
лаборатории пучков частиц
Ершов Алексей Анатольевич

Анодное испарение



- Принципиальное ограничение при работе в реакционных газах и повышенном давлении
- Получают только металлические покрытия
- Скорость роста покрытий более 1 мкм/ч

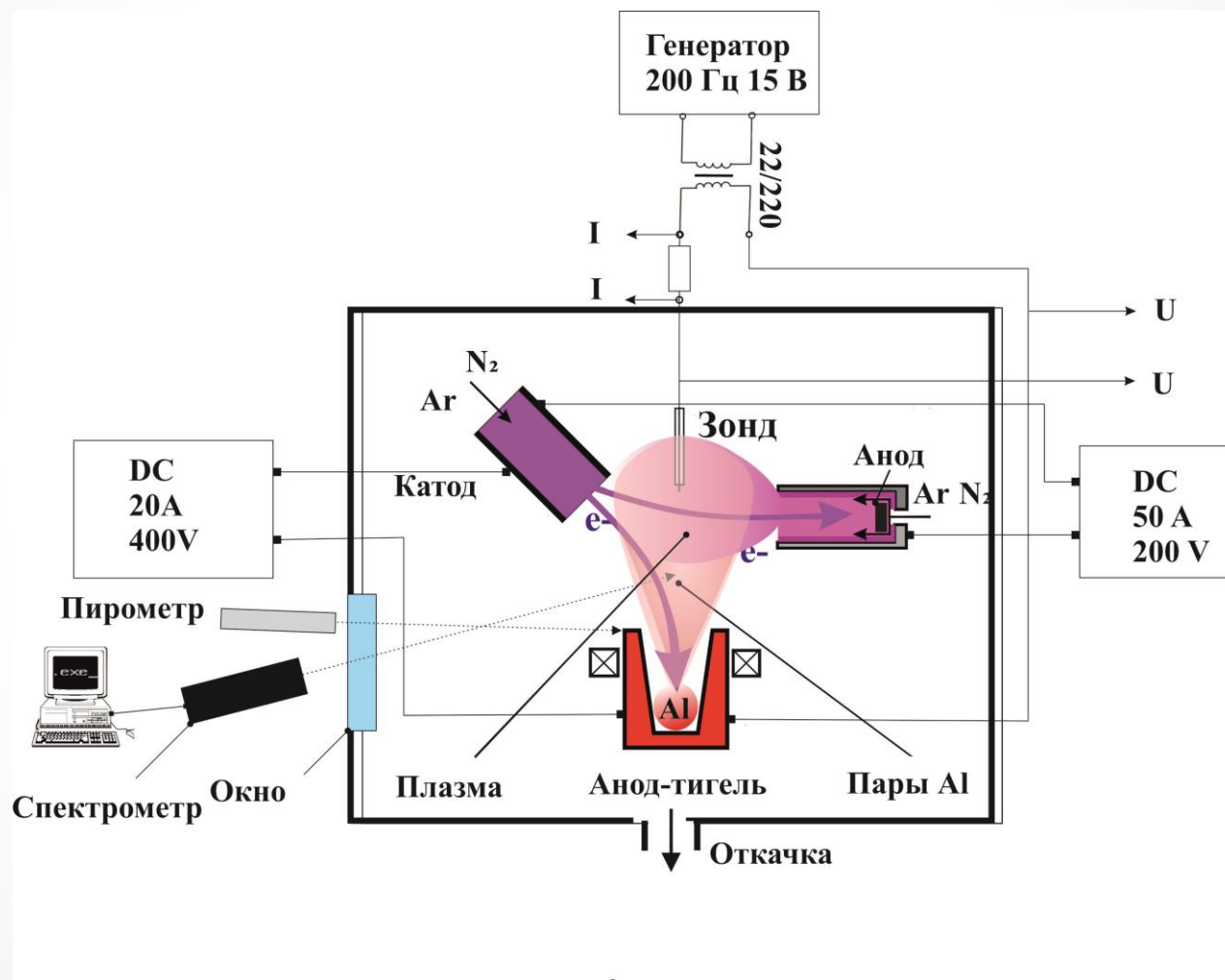


- Стабильная работа в реакционных средах (O_2 , N_2 , C_2H_2 и т.д.)
- Импульсно-непрерывный режим работы
- Получают оксидные, нитридные, композитные покрытия
- Скорость роста покрытий более 1 мкм/ч

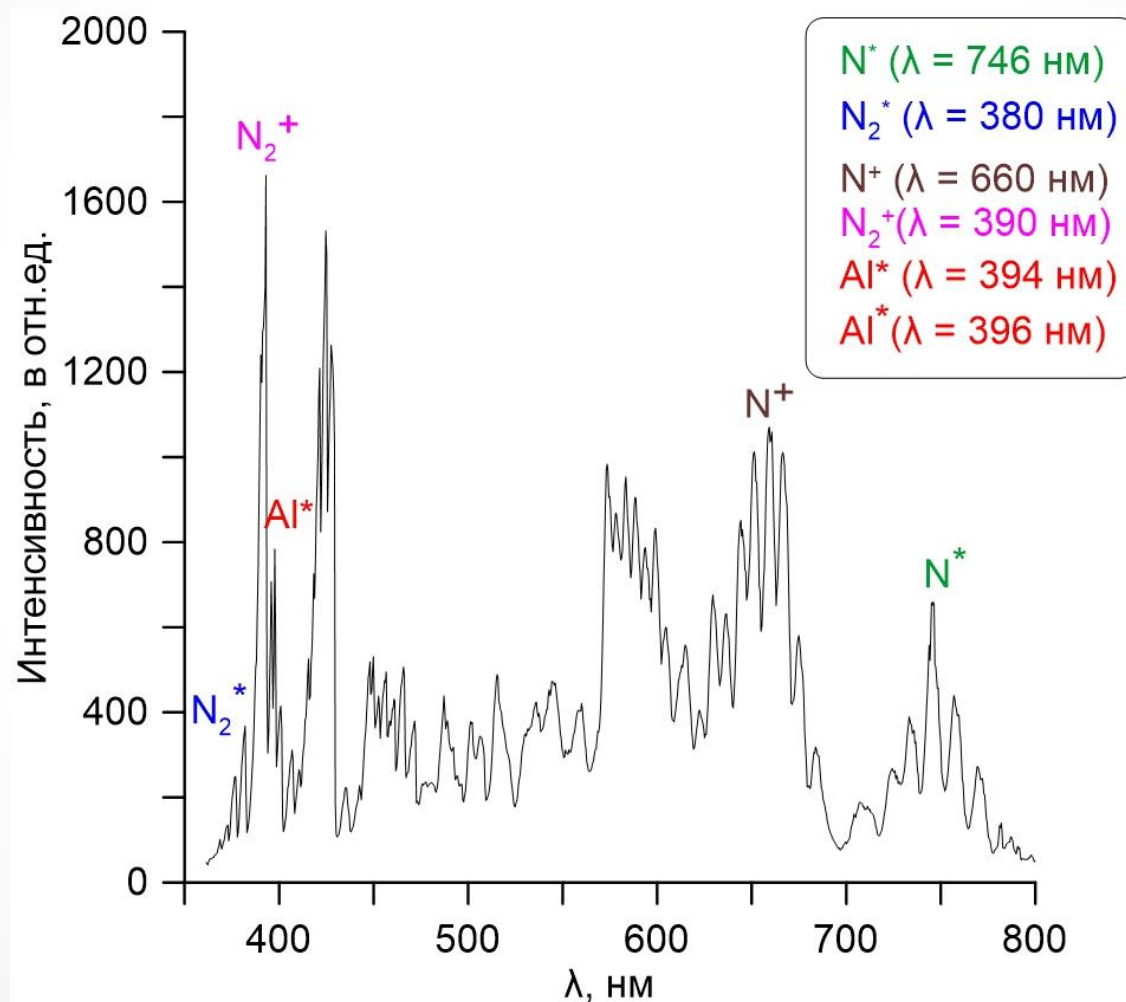
Цель и задачи работы

- **Целью является:** исследование плазмы дуги низкого давления (0.1-1 Па), поддерживаемой в электродной системе с самонакаливаемым полым катодом и анодом-тиглем
- **Задачи:**
- Определить состав и параметры азотной плазмы разряда СНПК в широком диапазоне изменения тока разряда и давления газа
- Определить состав и параметры плазмы парогазовой среды ($N_2 - Al$)
- Исследовать влияние газовой компоненты (давления и состава) на условия анодного испарения Al

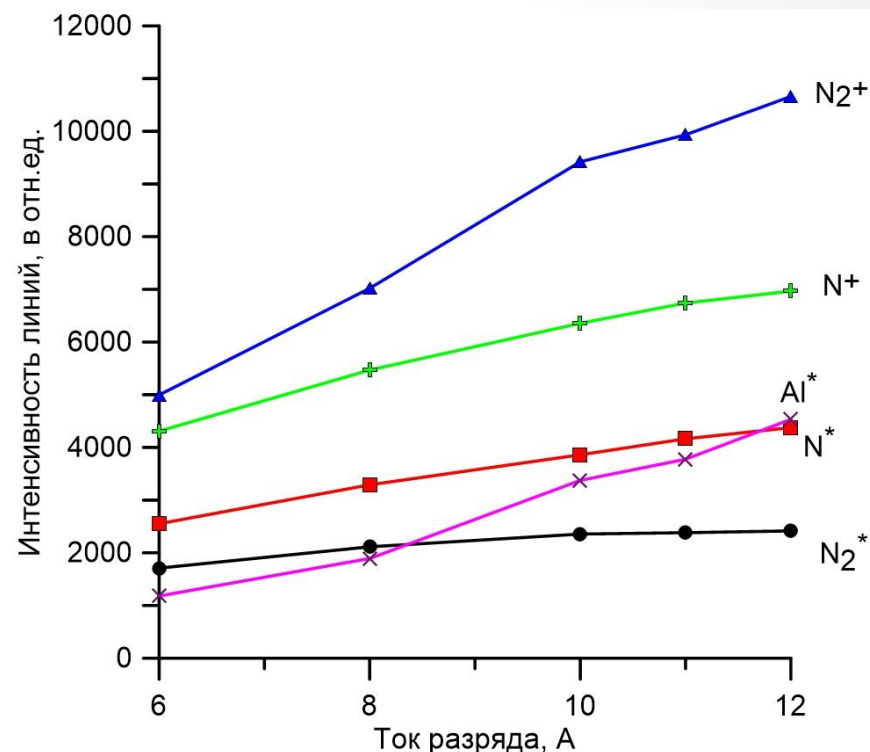
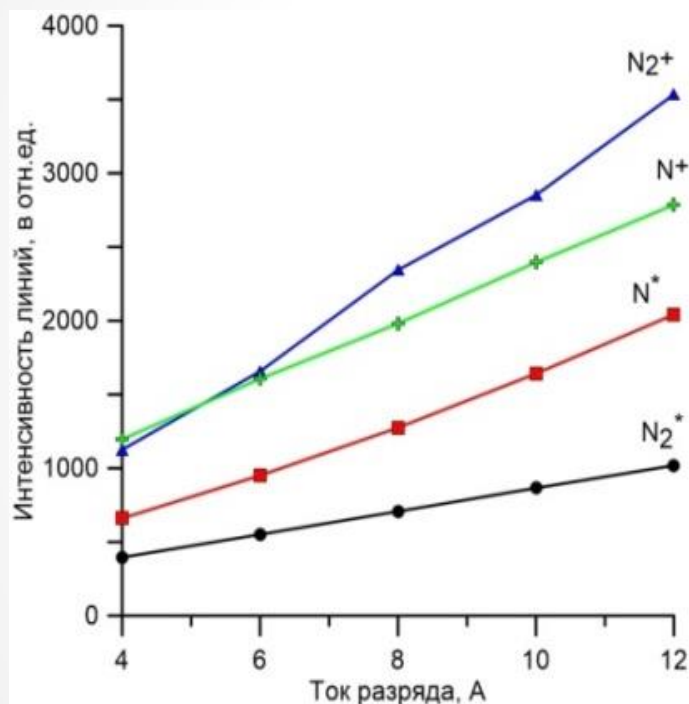
Схема экспериментальной установки



Характерный спектр оптической эмиссии плазмы парогазовой среды

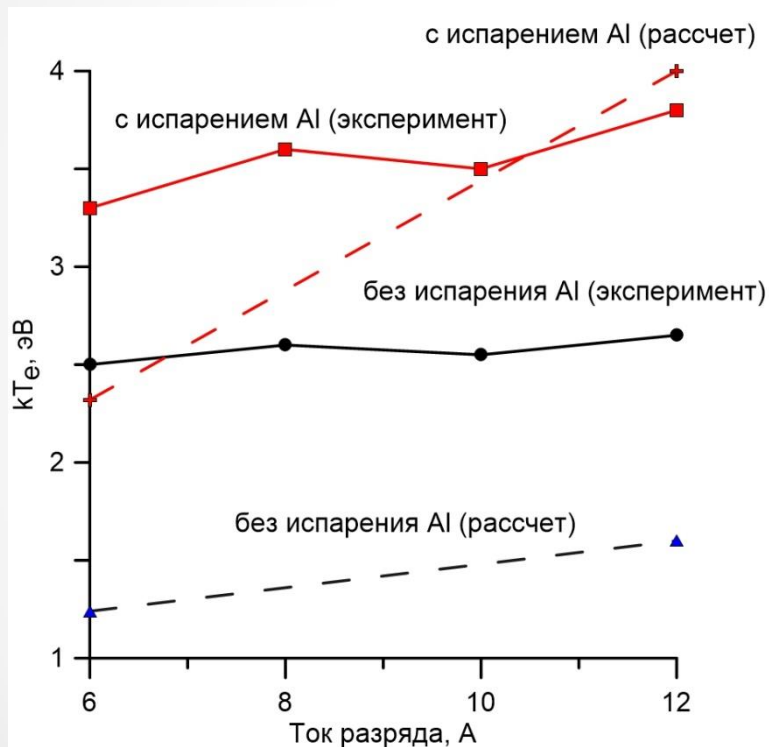


Зависимости интенсивностей линий оптической эмиссии от тока разряда



$\lg p = 9.2776 - 16540/T$ // А.Н.
 Несмеянов. Давление пара
 химических элементов

Зависимости электронной температуры от тока разряда



Реакция	Выражение для константы скорости реакции $K(T_e)$	Литературная ссылка	Значения $K(T_e)$ при токе разряда 10 A, см ³ /с	
			В азотной среде	В парогазовой смеси
$N_2 + e \rightarrow N_2^+ + 2e$	$K_1 = 1.95 \cdot 10^{-9} T_e^{1.13} \exp(-12.1/T_e)$	T. D. Mark, J. Chem. Phys. 63, 3731 1975.	$5.7 \cdot 10^{-10}$	$2.5 \cdot 10^{-9}$
$N + e \rightarrow N^+ + 2e$	$K_2 = 3.84 \cdot 10^{-9} T_e^{0.92} \exp(-14.4/T_e)$	E. Brook, M. F. A. Harrison, and A. C. H. Smith, J. Phys. B 11, 3115 1978.	$3.8 \cdot 10^{-10}$	$1.9 \cdot 10^{-9}$
$N_2 + e \rightarrow 2N + 2e$	$K_3 = 6.15 \cdot 10^{-9} T_e^{0.81} \exp(-12.8/T_e)$	P. C. Cosby, J. Chem. Phys. 98, 9544 1993.	$1 \cdot 10^{-9}$	$4.4 \cdot 10^{-9}$
$N_2 + e \rightarrow N_2^* + 2e$	$K_4 = 5.81 \cdot 10^{-9} \exp(-7.57/T_e)$	D. C. Cartwright, S. Trajmar, A. Chutjian, and W. Williams, Phys. Rev. A 16, 1041 1977	$3.2 \cdot 10^{-9}$	$6.7 \cdot 10^{-9}$

Теоретическая модель

$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} [r v e^{-\eta}] = z_i e^{-\eta}$ (1) – дифференциальное уравнение баланса частиц в плазме // A General Theory of the Plasma of an Arc / Lewi Tonks and Irving Langmuir Phys. Rev. **34**, 876 –1929

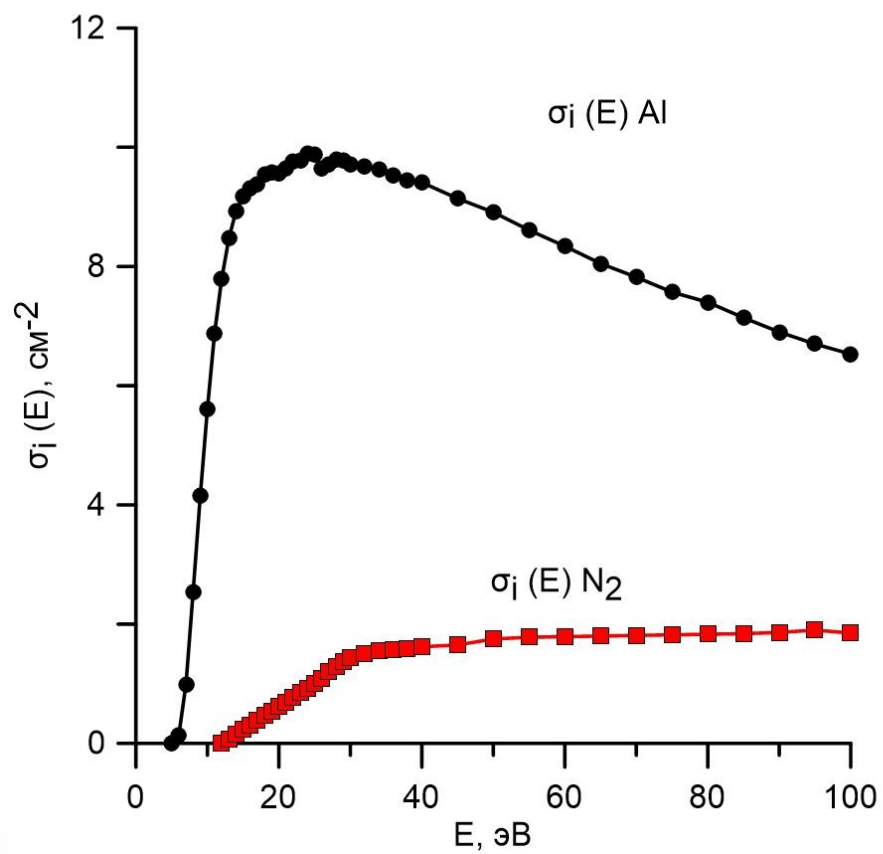
$v = \frac{\mu_0 E}{(1 + \alpha E/p)^{1/2}}$ (2) – приближенная формула из работы Фроста для вычисления дрейфовой скорости // Effect of Variable Ionic Mobility on Ambipolar Diffusion L. S. Frost Phys. Rev. **105**, 354 –1957

- $$z_i r = 0,24 \sqrt{\frac{2kT_g}{m_p}} \frac{\lambda_p}{r} \frac{T_e}{T_g} \left[2,4 - 0,71 \lg(2,8 \frac{\lambda_p}{r} \frac{T_e}{T_g} + 1) \right]^2$$
 (3) //

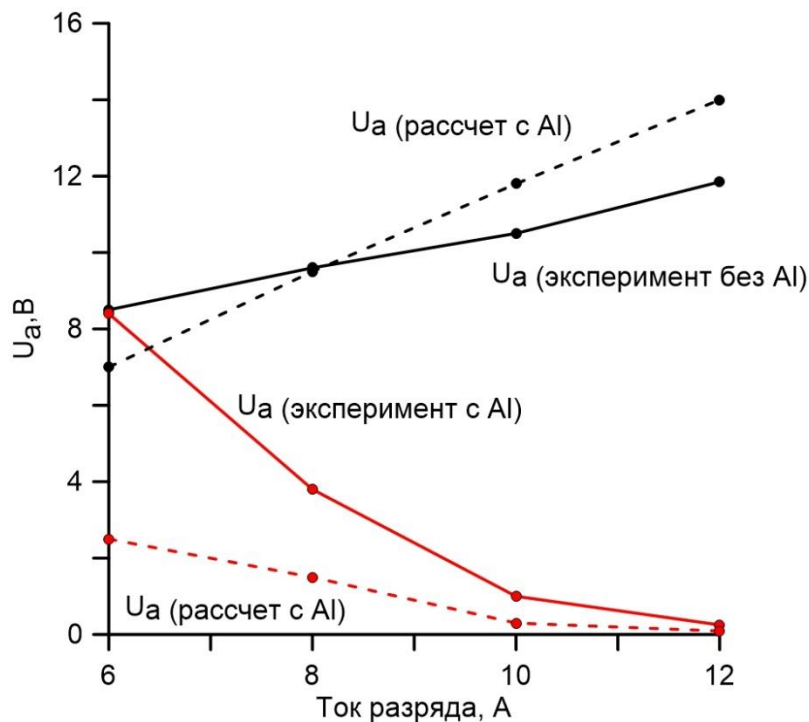
Положительный столб разряда в диффузионном режиме /Захарова В.М., Каган Ю.М., Перель В.И., Изв. АН СССР сер. Физ. 23, 999 – 1959

$$z_i = n_g \sqrt{\frac{2}{m}} \int_{U_i}^{\infty} \sigma_i(E) f(E) \sqrt{E} dE = n_g k_i$$
 (4)

Сечение ионизации



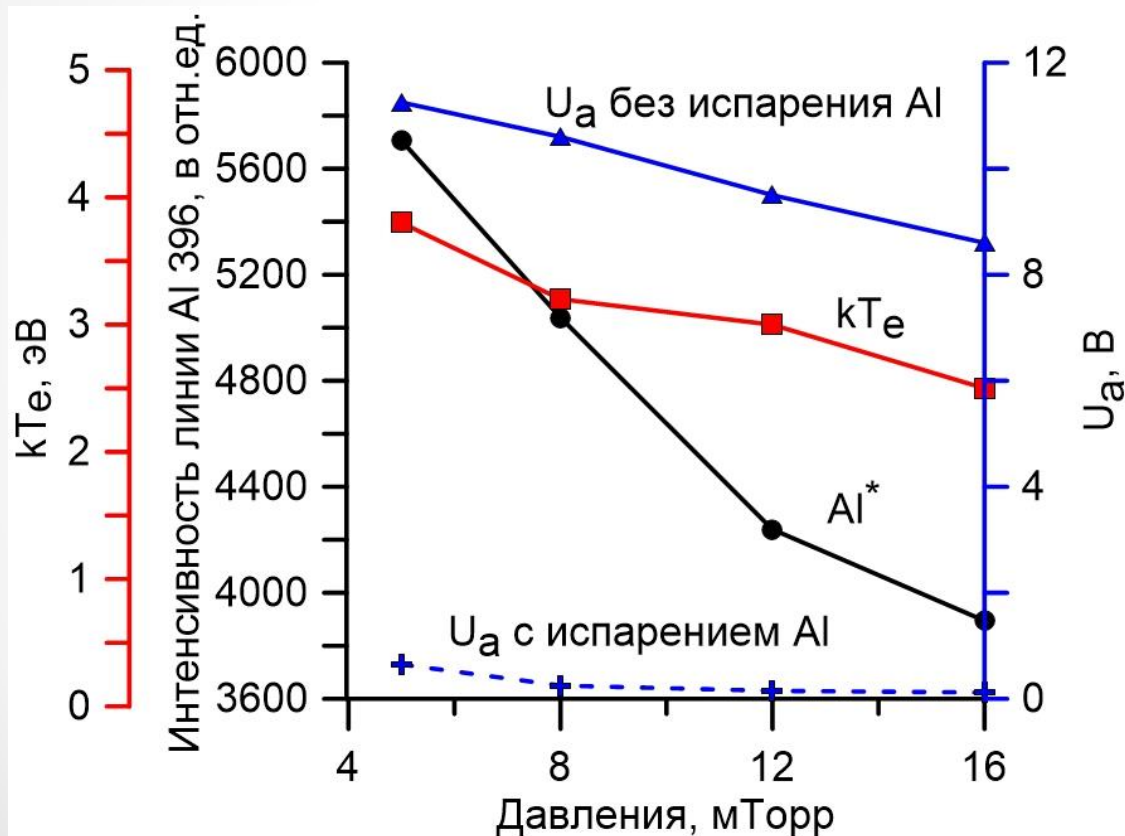
Зависимости положительного анодного падения потенциала от тока разряда



$$\frac{i_a}{p^2} = \frac{1,17}{16\pi} \frac{m_p}{m_e} \left(\frac{2e_0}{m_e} \right)^{1/2} C_1^2 U_a^{1/2} (U_a + \langle E_e \rangle - U_i)^3 \quad (5) -$$

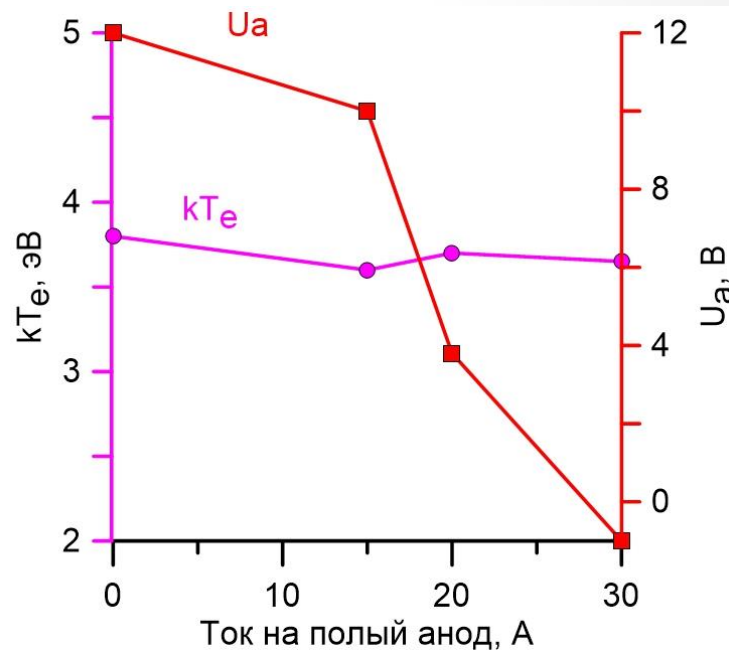
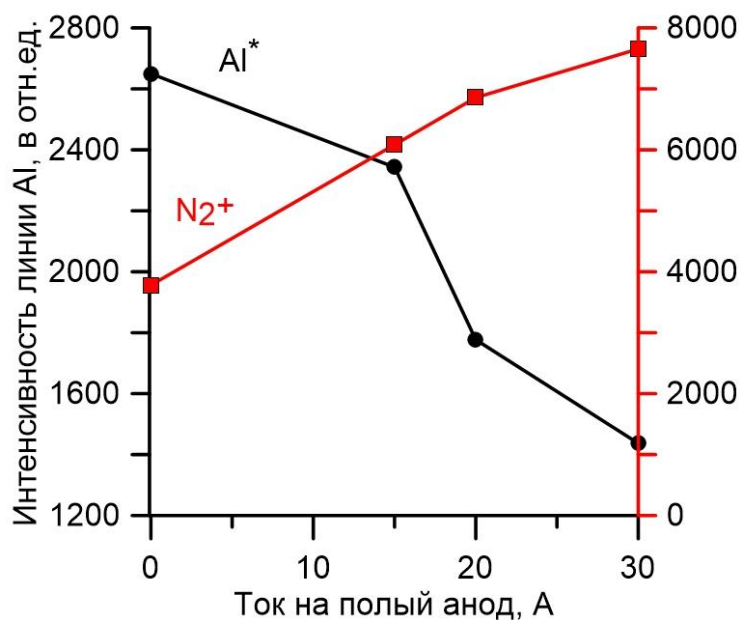
соотношение получено в работе Энгеля [Von Engel A. // Phil. Mag. 1941. Vol. 32. N 214. P. 417–428; A von Engel. Ionized Gases. Oxford: Clarendon, 1955]:

Зависимости интенсивности линии оптической эмиссии Al, положительного АП потенциала и электронной температуры плазмы от давления N₂



$W = I_p(kT_e + U_a + \varepsilon)$ –
мощность нагрева тигля
за счет электронного потока

Зависимости интенсивности линий оптической эмиссии Al и N_2^+ , положительного АП потенциала и электронной температуры плазмы от тока на полый анод



Заключение

- Исследована плазма парогазовой смеси (Al-N_2) разряда с самонакаливаемым полым катодом и испаряющимся анодом
- Показано, что поступление паров металла в разрядный промежуток повышает электронную температуру плазмы в 1,5 раза, в результате чего возрастает скорость плазмохимических реакций с участием азота
- Увеличение давления паров металла приводит к снижению величины положительного анодного падения потенциала вплоть до 0
- Влияние газовой компоненты на условия анодного испарения Al проявляется в снижении электронной температуры плазмы с ростом давления газа и величины положительного анодного падения потенциала, результатом чего является уменьшается энергия электронов, поступающих на анод, и скорость испарения металла