

Stabilisation of ionization instability in an alternating electric field.

Shapiro, Georgy

<http://hdl.handle.net/10026.1/11931>

Journal of Technical Physics letters, vol 4, issue 7, 393-396, 1978 (Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki 4, 393-396)

All content in PEARL is protected by copyright law. Author manuscripts are made available in accordance with publisher policies. Please cite only the published version using the details provided on the item record or document. In the absence of an open licence (e.g. Creative Commons), permissions for further reuse of content should be sought from the publisher or author.

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ПИСЬМА
В
ЖУРНАЛ
ТЕХНИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ
том 4

Отдельный оттиск

ЛЕНИНГРАД

„НАУКА“

Ленинградское отделение

1978

СТАБИЛИЗАЦИЯ ИОНИЗАЦИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ
В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Г.И. Шапиро

В работах [1-3] указывается, что в слабоионизованной плазме газового разряда CO_2 -лазера наряду с ионизационно-перегревной неустойчивостью возможна ионизационная неустойчивость в молекулярных газах (ИНМГ). Эта неустойчивость обусловлена заселением колебательных уровней N_2^0 молекул, повышением электронной температуры T_e вследствие ударов второго рода и ростом частоты самостоятельной ионизации $\nu_i(T_e)$.

Развитие ИНМГ в постоянном электрическом поле E было теоретически рассмотрено в [3]. Отметим, однако, что в экспериментах [4, 5] стабильность разряда в переменном поле была выше, чем в постоянном. В [4] в импульсном несамостоятельном разряде в азоте использовалось спадающее во времени поле, в [5] на разряд постоянного тока в смеси $\text{CO}_2 : N_2 : He$ накладывались быстроповторяющиеся импульсы электрического поля. Поэтому для нахождения оптимальных режимов разряда представляет интерес изучение неустойчивости в переменном поле.

В данной работе теоретически исследовано развитие ИНМГ в непрерывном разряде в быстропеременных электрических полях $E(t)$. Показано, что разряд в переменном поле более устойчив, чем в постоянном, причем, степень стабилизации существенно зависит от временной зависимости $E(t)$. Найдены условия, при которых можно ожидать значительной стабилизации неустойчивости и повышения мощности разряда.

Для описания неустойчивости примем двухуровневую модель [3], однако учтем, что в лазерных смесях возможен канал девозбуждения верхнего уровня с частотой ν_T (например, столкновения с тяжелыми частицами или излучение) более эффективной, чем электронные удары второго рода. Для большей наглядности рассмотрим разряд без внешнего ионизатора

$$\frac{dn}{dt} = \nu_i(T_e)n - \gamma n^2, \quad \nu_i(T_e) = \nu^0 e^{-I/T_e}, \quad (1)$$

$$\frac{dN_2^0}{dt} = N_1 n K_{12} - N_2^0 \nu_T, \quad K_{12} \approx K_{21} = K^0 \left(\frac{T_e}{T_{e0}}\right)^p, \quad (2)$$

$$\sigma E^2 = n E_{12} (N_1 K_{12} - N_2^0 K_{21}), \quad \sigma = e^2 n / m_e \nu_m, \quad (3)$$

$$v_m = v_m^0 (T_e/T_{e0})^m, \quad N_2^0 \ll N_1 = \text{const}, \quad (4)$$

где n - концентрация электронов, γ , K_{12} , K_{21} - константы рекомбинации, возбуждения и девозбуждения колебательных уровней, v_m - частота столкновений электронов, E_{12} - эффективная энергия колебательного кванта. При заданном $E(t) = E_a(t)$ будем искать решение системы (1-4) в виде

$$\frac{T_e}{T_{e0}} = A \left(\frac{E(t)}{N_1} \right)^{\frac{2}{m+p}} \cdot \varphi(t), \quad A \equiv \left[\frac{e^2 N_1}{m_e v_m^0 K^0 E_{12}} \right]^{1/m+p}$$

Если характерная частота ω_x изменения поля такова, что

$$v_{Te} \gg \omega_x \gg \gamma \bar{n} \gg \frac{v_T}{m+p} (v_{Te}^{-1} - \text{время установления } T_e), \text{ то}$$

величины $\varphi(t)$ и $n(t)$ мало отклоняются от медленно меняющихся значений $\bar{\varphi}$, \bar{n} , а средняя концентрация электронов квазистационарно следует за изменением $\bar{\varphi}$ (и за изменением заселенности N_2). Черта означает осреднение по времени за период изменения поля. Тогда уравнения для стационарного значения $\bar{\varphi}$ и инкремента $\bar{\Omega}$, полученные из (1-4), запишутся в виде

$$v_T + \bar{\varphi}^{m+p} \left[K^0 A^p \left(\frac{E(t)}{N_1} \right)^{\frac{2p}{m+p}} \cdot \bar{\varphi}^{-p} \frac{v_i(T_e)}{\gamma} - v_T \right] = 0 \quad (5)$$

$$\bar{\Omega} = \frac{1}{m+p} \bar{\varphi}^{-m+p} \left[K^0 A^p \left(\frac{E(t)}{N_1} \right)^{\frac{2p}{m+p}} \bar{\varphi}^{-p} \frac{v_i(T_e)}{\gamma} (m+2p+\frac{\Lambda}{v_i}) - v_T (m+p) \right], \quad (6)$$

где $\frac{\Lambda}{v_i} = \frac{v_i \hat{v}_i}{v_i}$, $\hat{v}_i = d \ln v_i / d \ln T_e$.

Такие же формулы (без осреднения) справедливы в случае постоянного поля. При заданной $f(t)$ уравнения (5,6) при $\bar{\Omega} = 0$ определяют предельные значения $\bar{\varphi}$, E_a и N_2 , когда разряд еще устойчив. Из уравнений (5, 6) можно определить также оптимальную $f(t)$, дающую наибольшую стабильность.

Можно показать, что при фиксированном \bar{v}_i (т. е. \bar{n}) величина $\frac{\Lambda}{v_i}$ максимальна в постоянном поле. Из (6) поэтому следует,

что разряд в постоянном поле менее устойчив, чем в переменном. Это особенно наглядно видно при $p = 0$.

Сравним предельные заселенности возбужденного уровня N_2 в постоянном и переменных полях. Из (5, 6) получим, что

$$\frac{N_{2n}}{N_1} = \frac{v^0 K^0 \left(\frac{I}{T_{e0}} \right)^p e^{-Q_n}}{\gamma v_T Q_n^p} \approx \frac{1}{m+2p+L}, \quad (7)$$

где $Q_n \approx L + \ln \frac{m+2p+L}{L^p}$, $L \equiv \ln \frac{K^0 \left(\frac{I}{T_{e0}} \right)^p v^0}{v_T (m+p) \gamma}$.

При выводе (7) учтено, что $Q_n \equiv I/T_{en} \gg 1$, $L \gg 1$.

В ВЧ поле $f(t) = \cos \omega t$ и из (5, 6) получим, что степень стабилизации разряда ξ приближенно равна

$$\xi_{ВЧ} = \frac{N_{2ВЧ}}{N_{2п}} \approx 1 + \frac{1}{m+2p+Q_n} \ln \frac{\pi \sqrt{Q_n} \cdot p \cdot \Gamma\left(\frac{p}{m+p}\right)}{(m+p)^{1.5} \cdot \Gamma\left(\frac{p}{m+p} + \frac{1}{2}\right)}, \quad (8)$$

где Γ -гамма-функция. Поскольку $Q_n \sim 10$; $m, p \sim 1$, то $\xi_{ВЧ} = 1.1-1.2$, т. е. однородное по объему ВЧ-поле слабо стабилизирует ИНМГ. Еще меньше ξ в комбинированном ВЧ+постоянном поле.

В случае переменного поля в виде коротких интенсивных импульсов на фоне относительно слабого поля [5] стабилизация может быть значительной. Пусть $f(t) = 1$ при $t < \tau_1$ и $f(t) = f_2 < 1$ при $\tau_1 < t < \tau_1 + \tau_2$. Если ионизация в поле $E_2 = E_a f_2$ незначительна, то максимальная степень стабилизации достигается, когда переменная составляющая поля имеет вид последовательности δ -функций (т. е. при $\tau_1/\tau_2 \rightarrow 0$)

$$\xi_{имп}^{\max} = \frac{m+2p+Q_n}{m+2p} \gg 1.$$

При конечных τ_1/τ_2 формула для $\xi_{имп}$, получающаяся из (5, 6) имеет громоздкий вид и здесь не приводится.

Рассмотрим численные примеры. При $m = 1/2$, $p = 1/2$, $v_T / v_0 = 10^{-5}$, $\gamma = 10^{-6} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, $K^0 = 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, $I/T_{e0} = 14$ получим в постоянном поле $Q_n = 9.5$; в ВЧ-поле $\xi_{ВЧ} = 1.2$; в поле с импульсами при $f_2 = 1/3$, $\tau_1/\tau_2 = 10^{-2}$, $\xi_{имп} = 2.2$, при $\tau_1/\tau_2 = 10^{-3}$ $\xi_{имп} = 3.9$.

Подавление неустойчивости в разряде с повторяющимися импульсами связано со значительным ослаблением зависимости $\psi_i(T_e)$ во время ионизирующего импульса τ_1 и отсутствием ионизации во время передачи энергии от электронов молекулам τ_2 . При этом разряд приближается по своим свойствам устойчивости к несамостоятельному с внешним ионизатором. Таким образом, выбрав зависимость $E(t)$ близкой к оптимальной, можно повысить стабильность разряда по отношению к ИНМГ в несколько раз. Отметим, что в более точной теории необходимо учитывать наличие большого числа колебательных уровней.

Автор благодарит профессора Ю.П. Райзера за внимание к работе.

Л и т е р а т у р а

- [1] С.В. Пашкин. ТВТ, 16, 475(1972).
- [2] А.А. Веденов, А.Ф. Витшас, А.М. Дыхне, Г.Д. Мильников, А.П. Напартович. Тр. XI Международной конференции по явлениям в ионизованных газах, Прага (1973).
- [3] А.Ф. Витшас, К.Н. Ульянов. ЖТФ, 46, 896(1976).
- [4] Л.П. Менахин и др. Тр. XII Международной конференции по явлениям в ионизованных газах, Эйндховен(1975).
- [5] Н.А. Генералов, В.П. Зимаков, В.Д. Косынкин, Ю.П. Райзер, Д.И. Ройтенбург. Физика плазмы, 3, 626(1977).

Институт проблем механики
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию
6 февраля 1978 г.

Письма в ЖТФ, том 4, вып. 7

12 апреля 1978 г.

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ
УЛУЧШЕНИЯ СВОЙСТВ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ
ИЗ ГОМОГЕННЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ
С ФАЗОЙ, УПОРЯДОЧИВАЮЩЕЙСЯ ПО ТИПУ $SiAuI$

В.С. Б о й д е н к о

Показана возможность существенного увеличения ряда магнитных характеристик некоторых упорядочивающихся по типу $SiAuI$ сплавов железа и кобальта с палладием и платиной.

Недавно появилось сообщение [1] об изготовлении постоянных магнитов на основе упорядочивающегося сплава $Fe - 47 \text{ ат\% Pd}$ с