

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ПАРАМЕТРЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ**

*Работа выполнена под руководством к.т.н. Баршутина С. Н.*

*ГТУ, Кафедра «Материалы и технология»*

В последнее время растет спрос на разработку и получение новых материалов. Одним из перспективных методов получения является синтез различных веществ в низкотемпературной плазме. Такой метод производства позволяет с высокой производительностью получать новые материалы с особыми свойствами. К таким материалам можно отнести углеродные наноструктурные объекты в виде нанотрубок, фуллеренов, нановолокон и т.д.

Известно [1], что углеродные частицы в виде сажи или графита начинают диссоциировать на атомы при их взаимодействии с низкотемпературной плазмой. На выходе из нее происходит обратный процесс (ассоциация), в результате чего образуются различные формы углерода, в том числе и новая аллотропная форма углерода фуллерены, имеющие многочисленные области применения. Однако главным недостатком данного способа получения является низкий процент выхода фуллеренов, что мешает переводу способа в промышленное производство.

На процесс получения фуллеренов оказывают влияние некоторые параметры плазмы. Эти параметры можно изменять различными способами: составом плазмообразующих газов, структурным состоянием исходного материала, электромагнитным излучением и т.д. Наибольший интерес представляют методы, основанные на взаимодействии плазмы с электромагнитными излучениями, так как с их помощью параметры низкотемпературной плазмы можно менять в более широких пределах и с высокой точностью. Таким образом, главной задачей данной работы является установление связи между параметрами плазмы и электромагнитными полями и излучениями.

Рассмотрим модельное представление электромагнитных волн в проводящей среде. Их взаимодействие описывается уравнениями Максвелла [1]:

$$\operatorname{rot} H = \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} j, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} D = 4\pi\rho, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} B = 0. \quad (4)$$

Здесь  $E$  и  $H$  — напряженности электрического и магнитного полей,  $D$  и  $B$  — векторы электрической и магнитной индукции,  $j$  — плотность тока,  $\rho$  — плотность электрического заряда,  $c$  — скорость света в вакууме. Величины  $E$  и  $H$  линейно связаны с  $D$  и  $B$ , величина  $j$  линейно зависит от электрического поля:

$$D = \varepsilon E, \quad (5)$$

$$B = \mu H, \quad (6)$$

$$j = \sigma E. \quad (7)$$

При этом диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$ , магнитная проницаемость  $\mu$  и проводимость  $\sigma$  являются характеристиками среды.

На основании уравнений Максвелла (1) – (4) также можно рассмотреть волновые уравнения электромагнитных полей в диэлектрике со скоростью распространения электромагнитных волн в среде:  $v = c/(\varepsilon\mu)^{1/2}$  :

$$\Delta E - \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0, \quad (8)$$

$$\Delta H - \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0. \quad (9)$$

В случае выполнения условия монохроматичности плоская волна примет следующий вид:

$$E_x = E_{0x} e^{i\omega(t-r/v)} = E_{0x} e^{i\omega t - ikr}, \quad kr = k_x x + k_y y + k_z z, \quad (10)$$

где  $\omega$  — циклическая частота,  $r$  — траектория электрона и  $k$  — волновое число.

Эти выражения устанавливают связь между  $\omega$  и  $k$ :  $\omega^2 = k^2 v^2$ . И, зная, что показатель преломления среды имеет вид  $n = c/v$ , в итоге получаем  $n = (\varepsilon\mu)^{1/2}$ .

Отличие уравнений для проводящей среды от уравнений для непроводящего диэлектрика состоит в том, что вместо диэлектрической постоянной  $\varepsilon$  фигурирует комплексная диэлектрическая постоянная

$$\varepsilon' = \varepsilon - i4\pi\sigma/\omega \quad (11)$$

Напряженности электрического и магнитного полей подчиняются тем же волновым уравнениям с заменой  $\varepsilon$  на  $\varepsilon'$ . Дисперсионное уравнение имеет вид

$$k^2 = (\omega^2 / c^2) \varepsilon' \mu. \quad (12)$$

Волновое число является комплексной величиной с действительной  $k_r$  и мнимой  $k_i$  частями. Тогда поле записывается в виде:

$$E = E_0 \exp(-k_r r) \exp i(\omega t - k_r r). \quad (13)$$

Анализ модели электронных полей и излучений показал, что основные параметры, на которые могут повлиять электромагнитные поля и излучения, являются диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  и проводимость  $\sigma$  плазмы.

В НТП проводимость и поглощение энергии электромагнитного излучения возникают в результате соударений свободных электронов с нейтральными частицами. Частота соударений зависит от плотности частиц при данной температуре и давлении, средней тепловой скорости электронов и эффективного сечения соударений.

При движении электрона в поле электромагнитной волны соударения приводят к потерям энергии электронов, т.е. играют роль сил трения. Среднее изменение импульса в секунду равно  $m\nu_{\text{эф}}r'$ , где  $\nu_{\text{эф}}$  — эффективное число соударений в 1 с,  $r'$  — упорядоченная скорость, сообщаемая электрону полем,  $m$  — масса электрона. Уравнение движения электрона в поле электромагнитной волны имеет вид [1]

$$mr'' + m\nu_{\text{эф}}r' = eEe^{i\omega t}. \quad (14)$$

Под воздействием периодического электрического поля  $Ee^{i\omega t}$  траектория электронов также является периодической,  $r = r_0 Ee^{i\omega t}$ . В этом случае ускорение электрона равно  $r'' = i\omega r'$  и уравнение движения приводится к виду

$$i\omega mr' = eE - m\nu_{\text{эф}}r'. \quad (15)$$

Отсюда получается выражение для скорости электрона:

$$r' = \frac{e}{m(i\omega + \nu_{\text{эф}})} E. \quad (16)$$

По определению плотность тока  $j = n_e e r'$ . Подстановка в это выражение полученного значения скорости электронов дает связь между плотностью тока и напряженностью электрического поля в виде

$$j = \frac{n_e e^2}{m(i\omega + \nu_{\text{эф}})} E \quad (17)$$

Избавимся от комплексной части в знаменателе и получим

$$j = -\frac{n_e e^2 (i\omega - \nu_{эф})}{m(\omega^2 + \nu_{эф}^2)} E. \quad (18)$$

Исходя из (7) и (19) проводимость плазмы  $\sigma$  равна

$$\sigma = -\frac{n_e e^2 (i\omega - \nu_{эф})}{m(\omega^2 + \nu_{эф}^2)}. \quad (19)$$

Ввиду вещественной природы проводимости откидываем мнимую часть и получим в итоге

$$\sigma = \frac{n_e e^2}{m} \frac{\nu_{эф}}{(\omega^2 + \nu_{эф}^2)}. \quad (20)$$

Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  равна

$$\varepsilon = 1 - \frac{4\pi n_e e^2}{m(\omega^2 + \nu_{эф}^2)}. \quad (21)$$

Анализ представленных моделей взаимодействия плазмы с электромагнитными полями показал, что посредством изменения частоты  $\omega$  и  $\nu_{эф}$  возможно в больших интервалах менять такие параметры плазмы, как проводимость  $\sigma$  и диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon$ . Причем максимальное влияние электромагнитного поля оказывает при частотах  $\omega < \omega_0 = \sqrt{4\pi e^2 n_e / m}$  по закону  $\exp(-k_i z)$ ,  $k_i = \sqrt{\varepsilon}$  путем поглощения энергии электромагнитного поля плазмой и трансформации ее в изменение энергетического спектра электронов плазмы.

#### Список литературы

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том. / под ред. В.Е. Фортова. – М.: Наука, 2000. – кн.3. – 558с.