

УДК 537.9

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА В СРЕДАХ С ДИСПЕРСНОЙ ФАЗОЙ

Ю.Ю. Луценко, В.А. Власов, Ю.В. Вендеревская

Томский политехнический университет

E-mail: luts@mail.ru

Проведены измерения тока, напряжения и амплитуды электрического поля запылённого высокочастотного емкостного разряда. Установлено увеличение тока, протекающего в разряде при его запылении веществами с потенциалом ионизации менее 7 В. Проведены расчёты параметров электромагнитной волны, распространяющейся в запылённом высокочастотном емкостном разряде. Показано отсутствие изменения характеристик электромагнитного поля разряда при степенях его запыления $\nu < 10^{-2}$.

Газовые разряды в плазменной технологии обычно используются лишь в качестве источника плазменной струи. Однако переработка веществ непосредственно в газовом разряде имеет ряд преимуществ по сравнению с переработкой веществ в плазменной струе. Прежде всего, для газового разряда характерна более высокая температура плазмы и меньший осевой градиент температуры. Наличие электрических полей и более высокая концентрация электронов в разрядной зоне делают более выраженными каталитические свойства плазмы.

Для проведения процессов в разрядной зоне наиболее оптимально использовать высокочастотные разряды емкостного типа. Разряды этого типа имеют большой объём разрядной плазмы при малом уровне подводимой к разряду мощности. Очистка стенок плазмохимического реактора и интенсификация процессов, протекающих в плазме, может осуществляться посредством амплитудной модуляции.

В настоящей работе были проведены измерения электрофизических характеристик высокочастотного емкостного разряда, запылённого диэлектрическими и проводящими материалами. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Использовался высокочастотный емкостной разряд с одним кольцевым электродом диаметром 48 мм. Наличие второго, заземлённого электрода, как показывает опыт, не оказывает [1] существенного влияния на характеристики и режимы горения емкостного разряда. Разряд возбуждался в кварцевой трубке диаметром 36 мм. Горение разряда осуществлялось в воздухе при атмосферном давлении. Мощность разряда варьировалась от 1 до 3 кВт. Частота электромагнитного поля составляла 40 МГц. Дисперсность материалов, которыми запылялся разряд, составляла 20...60 мкм. Порошок подавался в центральную зону разряда посредством пневматического питателя. Расход плазмообразующего газа составлял 0,6 м³/ч.

Нами проводились измерения вольтамперных характеристик разряда в режиме свободного горения и в случае запыления плазмы разряда диэлектрическими и проводящими частицами. Степень запыления плазмы разряда, определяемая как отношение объёма распыляемого вещества к общему объёму

разрядной камеры, изменялась от 0 до 10^{-4} . Измерение степени запыления разряда проводилось путём определения изменения веса распыляемого порошка за определённый промежуток времени работы экспериментальной установки. Измерение напряжения осуществлялось вольтметром В3-52/1, снабжённым дополнительным емкостным делителем. Измерение тока проводилось поясом Роговского.

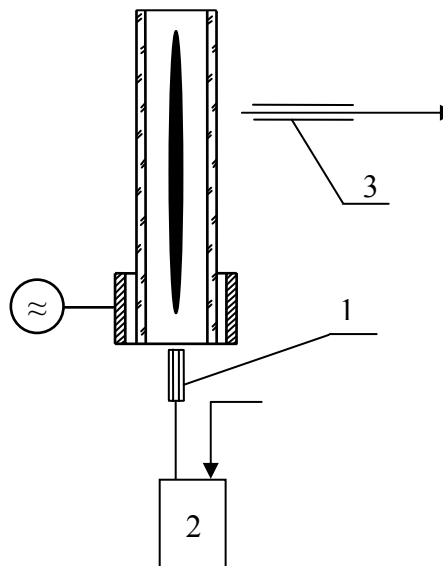


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1) трубка для подачи порошка; 2) питатель; 3) емкостной зонд

В результате измерений было установлено увеличение высокочастотного тока в разряде при запылении его такими веществами, как Al_2O_3 , Na_2SO_3 , $Ca(CH_3COO)_2$. При запылении разряда веществами, имеющих потенциал ионизации больший, чем потенциал ионизации [2] кальция, изменение характеристик разряда не наблюдается. В частности, при запылении разряда Ni, Fe, изменение тока в разряде находится в пределах погрешности измерений. Результаты измерений изменения тока в разряде при запылении его веществами с различным потенциалом ионизации приведены на рис. 2. По оси абсцисс отложена величина ионизационного потенциала, по оси ординат — отношение тока в запылённом разряде к току в свободном разряде.

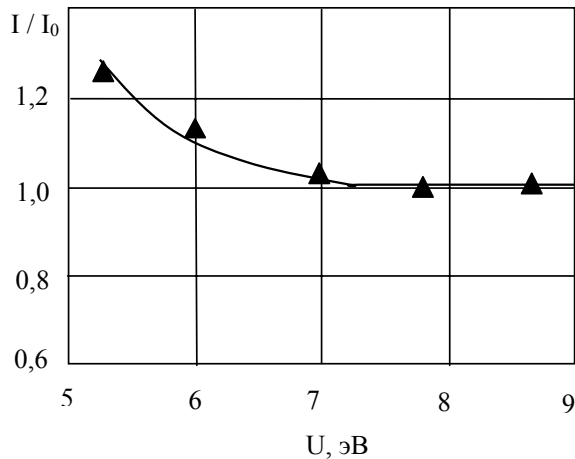


Рис. 2. Зависимость тока в разряде от величины ионизационного потенциала

Заметим, что увеличение тока в разряде сопровождается соответствующим уменьшением напряжения на высоковольтном электроде. Так при запылении разряда окисью алюминия ток возрастает на 15 %, одновременно напряжение уменьшается на 15 %. Следовательно, мощность разряда при его запылении не меняется. Степень запыления и дисперсность запыляющего материала незначительно влияют на сопротивление разрядной плазмы.

Результаты экспериментов показали высокую устойчивость высокочастотного емкостного разряда к запылению как диэлектрическим, так и проводящим материалом. Заметим, что устойчивость разряда к запылению определяется преимущественно изменением в процессе запыления его электродинамических характеристик.

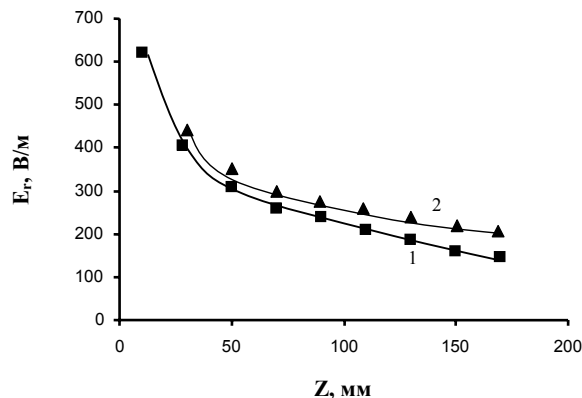


Рис. 3. Распределение электрического поля вдоль оси высокочастотного емкостного разряда: 1) свободно горящий разряд; 2) разряд, запылённый никелем ($\nu=10^{-4}$)

В связи с этим нами также проводились измерения радиальной компоненты электрического поля высокочастотного емкостного разряда. Измерения проводились емкостным зондом, сигнал с которого подавался на вход осциллографа. Емкостной зонд представлял собой медный штырь диаметром 1 мм и длиной 3...5 мм. Результаты измерений представлены на рис. 3. Из результатов измерений следует, что изменения в осевом распределении радиальной

компоненты электрического поля емкостного разряда при его запылении несущественны. Наблюдается лишь некоторое увеличение амплитуды электрического поля вдоль оси разряда в случае его запыления проводящим материалом.

Рассмотрим процесс распространения электромагнитной волны вдоль канала высокочастотного емкостного разряда. Как нами показано в работе [1], характер электромагнитного поля высокочастотного емкостного разряда аналогичен характеру электромагнитного поля высокочастотного факельного разряда за исключением зоны, примыкающей непосредственно к высокочастотному электроду. Поэтому можно предположить, что горение высокочастотного емкостного разряда осуществляется за счёт диссипации энергии «прямой» и «отражённой» поперечно-магнитных волн, как и в случае высокочастотного факельного разряда. Затухание электромагнитного поля в плазме разряда, а соответственно и доля энергии затрачиваемой на поддержание процесса горения разряда будет определяться величиной коэффициента затухания электромагнитной волны. В свою очередь коэффициент затухания можно определить из выражения для волнового числа. Волновое число поперечно-магнитной волны, распространяющейся вдоль канала разряда [3] имеет следующий вид:

$$h^2 = (\alpha + j\beta)^2 \approx -\frac{2}{5a^2\epsilon'},$$

где a — радиус канала разряда; $\epsilon' = \epsilon/\epsilon_0$ — относительная величина комплексной диэлектрической проницаемости плазмы разряда; α — коэффициент затухания; β — коэффициент фазы.

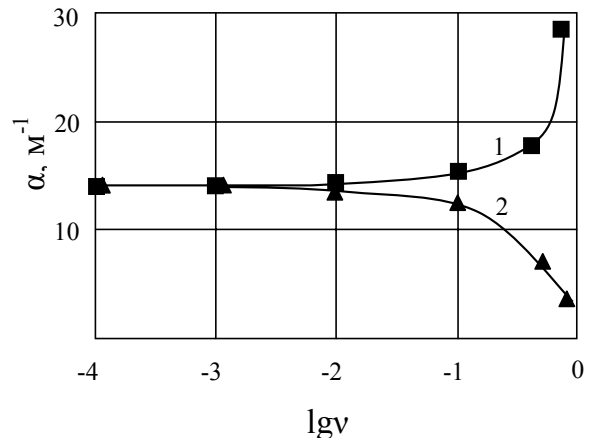


Рис. 4. Зависимость коэффициента затухания электромагнитной волны в плазме разряда от степени её запылённости: 1) Al_2O_3 (диэлектрик); 2) Ni (металл)

Комплексную диэлектрическую проницаемость ϵ запылённой плазмы разряда можно определить [4] по формуле Лоренца — Лорентца:

$$\epsilon = \epsilon_2 \left[1 + \frac{\nu(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{\epsilon_2 + \frac{1-\nu}{3}(\epsilon_1 - \epsilon_2)} \right].$$

Здесь: ε_1 , ε_2 — соответственно комплексные диэлектрические проницаемости запыляющего материала и плазмы; ν — отношение объема запыляющего материала к общему объему запыленной плазмы. Результаты расчёта коэффициента затухания электромагнитной волны, распространяющейся в плазме высокочастотного емкостного разряда мощностью 1 кВт в зависимости от степени её запыления, представлены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, изменение коэффициента затухания электромагнитного поля емкостного

разряда наблюдается лишь при степенях запыления $\nu > 10^{-2}$. Подобные степени запыления на практике невозможно получить. Реальные степени запыления разряда, в частности при использовании пневматического питателя, составляют $\nu < 10^{-4}$.

Таким образом, результаты расчётов позволяют утверждать, что горение высокочастотного емкостного разряда устойчиво при его запылении диэлектрическими и проводящими материалами при $\nu < 10^{-2}$, что подтверждается результатами экспериментальных измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луценко Ю.Ю. Особенности электромагнитного поля высокочастотного емкостного разряда шнурового вида, горящего при атмосферном давлении // Журнал технической физики. — 2005. — № 11. — С. 124–127.
2. Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. Справочник под ред. В.Н. Кондратьева. — М.: Наука, 1974. — 350 с.
3. Качанов А.В., Трехов Е.С., Фетисов Е.П. Электродинамическая модель высокочастотного факельного разряда // Журнал технической физики. — 1970. — Т. 40. — № 2. — С. 340–345.
4. Нетушил А.В., Жуховицкий Б.Я., Кудин В.Н., Парини Е.П. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. — 480 с.

Поступила 7.12.2006 г.

УДК 621.315.592

ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ СТРИМЕРНОГО РАЗРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

В.В. Паращук, К.И. Русаков*

Институт физики им. Б.И. Степанова НАНБ, г. Минск
Брестский государственный технический университет
E-mail: v_shchuka@rambler.ru

Промоделирована пространственно-временная динамика стримерных разрядов в полупроводниках с учетом процессов ударной (туннельной и фото-) ионизации, излучательных спонтанной и стимулированной рекомбинации, а также электрон-фотонного взаимодействия в сильном электрическом поле. Показана возможность образования в этих условиях пространственно-неоднородных диссипативных структур, автоколебательных регулярных и иных режимов, установлены их закономерности и взаимосвязь с динамикой разряда стримерного лазера. Выявлены немонотонная зависимость характеристик системы от основных параметров — скорости возбуждения, времени жизни неравновесных носителей и фотонов, квантовой эффективности активной среды, а также усиление взаимодействия структур в условиях стимулированной рекомбинации, обуславливающие многообразие собственной динамики системы. Излучательные процессы обеспечивают высокую скорость распространения структур, сравнимую с фазовой скоростью света, и являются основным механизмом генерации неравновесных носителей в автоколебательном режиме, соответствующем оптимальным условиям возникновения и развития стримера.

1. Введение

Электрические («стримерные») разряды в полупроводниках — сравнительно новое и не до конца изученное явление, представляющее значительный научный и практический интерес [1–4], в частности, для создания нового поколения полупроводниковых лазеров и современной элементной базы оптоакусто-электроники и информатики на основе использования прямозонных материалов с большой шириной запрещенной зоны.

Ранее [2, 3] была выдвинута и качественно обоснована идея о самоорганизации стримеров, в соответствии с которой процесс развития разряда предполагает многообразие явлений взаимодействия между неравновесными носителями заряда, фотонами, фо-

нонами, электрическим полем и т. д., в том числе образование в такой сложной системе пространственно-неоднородных диссипативных структур (ДС) и установление автоколебаний (АК). Указанные режимы, как известно, являются важнейшими элементами поведения (самоорганизации) нелинейной системы [5]. В связи со сложностью рассматриваемых явлений приобретает актуальность численное моделирование соответствующих процессов.

Возможность АК режимов следует из данных наших предварительных исследований [4, 6] и отмечалась также в независимых исследованиях других авторов [7] применительно к условиям туннельного механизма генерации неравновесных носителей и безызлучательной спонтанной рекомбинации. Однако пространственно-временная карти-