

УДК 533.915

Поведение температуры нейтрального газа в ВЧЕ-разряде низкого давления в воздухе

В. А. Лисовский, Е. В. Мышко
Харьковский национальный университет, Харьков, Украина

С. Д. Яковин
НФТЦ НАН и МО Украины, Харьков, Украина

Исследованы внутренние параметры и режимы горения высокочастотного емкостного разряда, используемого при обработке полупроводниковых материалов и для накачки газовых лазеров.

Высокочастотный емкостный разряд (ВЧЕ) широко используется при обработке полупроводниковых материалов (травление, осаждение), для накачки газовых лазеров. В последнее время ВЧ-разряд в воздухе низкого давления применяется также для плазменной стерилизации медицинских инструментов [1, 2], поэтому исследование внутренних параметров и режимов горения ВЧ-разряда является актуальной задачей.

Как известно [3—5], ВЧ-разряд может гореть в двух различных режимах: слаботочном (α) и сильноточном (γ). В α -режиме электроны приобретают энергию для ионизации молекул газа в ВЧ-поле в квазинейтральной плазме, при этом эмиссия электронов с поверхности электродов существенной роли в поддержании разряда не играет. В α -режиме проводимость приэлектродных слоев мала. В γ -режиме вторичные электроны, выбитые с поверхности электродов ускоренными ионами, могут набрать значительную энергию в ВЧ-поле вблизи поверхности электродов, и в приэлектродных слоях развиваются электронные лавины. Основная ионизация молекул газа электронами в γ -режиме происходит вблизи границ приэлектродных слоев, а ВЧ-поле в квазинейтральной плазме становится недостаточным для того, чтобы электроны могли приобрести достаточную для ионизации энергию. Приэлектродные слои в γ -режиме имеют значительную проводимость и по характеристикам подобны катодному слою разряда постоянного тока.

В настоящей работе термодарным методом измерены осевые профили температуры нейтрального газа в ВЧЕ-разряде в воздухе как в α -, так и в γ -режиме горения. Определен диапазон давлений воздуха, при которых α - γ -переход ВЧЕ-разряда сопровождается уменьшением температуры нейтрального газа во всем разрядном промежутке.

Эксперименты проводились при давлениях воздуха $p = 0,1$ — 2 торр, в диапазоне эффективных ВЧ-напряжений $U_{\text{эф}} \leq 1000$ В и частоте ВЧ-поля $f = 13,56$ МГц. Расстояние между плоскими параллельными электродами из нержавеющей стали диаметром 100 мм было равно 53 мм. ВЧ-напряжение прикладывалось к одному из электродов, при этом другой электрод был заземлен. Для удаления постоянного напряжения автосмещения между электродами подключался дроссель индуктивностью 4 мГн. Температура нейтрального газа измерялась термодарой хромель—алюмель. Методика измерения температуры нейтрального газа в плазме была рассмотрена в работе [6]. При плавающем потенциале термодары и низких концентрациях заряженных частиц можно считать температуру термодары равной температуре нейтрального газа.

На рис. 1 показаны осевые профили температуры нейтрального газа для двух различных давлений газа. Из рис. 1 видно, что при низком давлении воздуха ($p = 0,1$ торр) осевые профили температуры нейтрального газа имеют четко выраженный максимум в центре разряда во всем исследованном диапазоне ВЧ-напряжений. При давлении воздуха $p = 0,6$ торр в слаботочном режиме горения ВЧ-разряда максимум на осевых профилях температуры газа наблюдается в центре разряда. При α - γ -переходе с ростом ВЧ-напряжения температура газа уменьшается во всем разрядном промежутке, при этом максимальное уменьшение температуры газа может достигать 30 %. В сильноточном режиме горения температура нейтрального газа становится практически постоянной во всей квазинейтральной плазме и резко уменьшается в приэлектродных слоях. При давлении воздуха $p = 2$ торр с повышением ВЧ-напряжения температура газа монотонно растет во всем промежутке, при этом «колоколообразный» вид профиля в слаботочном режиме преобразуется в сильноточном режиме в профиль с минимумом в центре разряда.

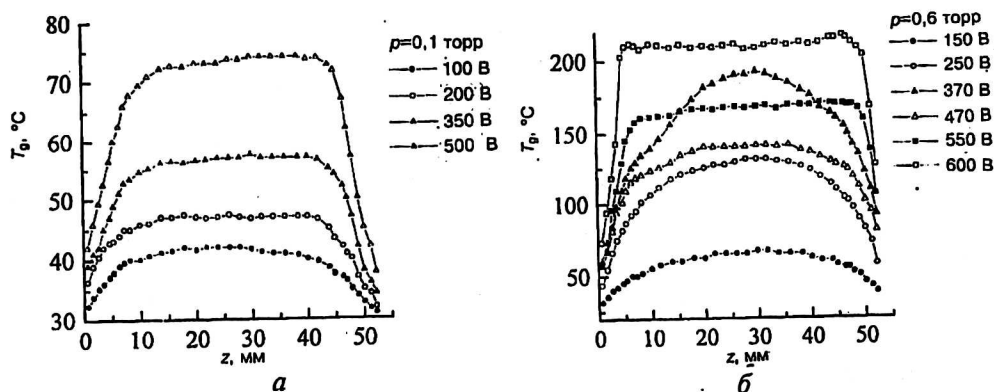


Рис. 1. Осевые профили температуры нейтрального газа при давлениях воздуха 0,1 (а) и 0,6 (б) торр

На рис. 2 показаны зависимости температуры нейтрального газа в центре разряда от приложенного ВЧ-напряжения при различных давлениях воздуха. Из рис. 2 видно, что в диапазоне давлений воздуха $p = 0,2-1,5$ торр наблюдается область немонотонного поведения температуры газа, т. е. с ростом ВЧ-напряжения в слаботочном режиме горения температура газа возрастает, при α - γ -переходе температура газа уменьшается, и затем в γ -режиме снова растет. В этом диапазоне давлений воздуха в α -режиме горения свечение разряда распределено примерно равномерно по всей области квазинейтральной плазмы. С ростом ВЧ-напряжения в начале α - γ -перехода равномерное свечение разряда распадается на три ярко выраженные отдельные светящиеся области: две из них — вблизи границ приэлектродных слоев, а третья — в центральной области разряда. При этом центральная светящаяся область является аналогом положительного столба разряда постоянного тока, а более темные области между нею и свечениями вблизи границ слоев — аналогом темных фарадеевых пространств. При дальнейшем повышении ВЧ-напряжения интенсивность и протяженность свечения в центральной области уменьшаются, а затем исчезают; именно в этом диапазоне ВЧ-напряжений и наблюдается уменьшение температуры нейтрального газа как в центре разряда, так и во всем разрядном промежутке.

После перехода разряда в γ -режим увеличение ВЧ-напряжения сопровождается ростом температуры нейтрального газа во всем промежутке.

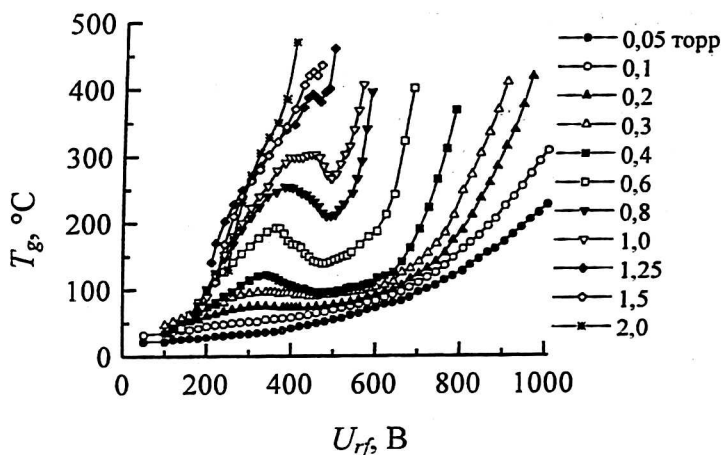


Рис. 2. Зависимость температуры нейтрального газа в центре разряда от приложенного ВЧ-напряжения при различных давлениях воздуха

На рис. 3 представлены зависимости температуры термопары, полного и электронного токов на термопару от приложенного потенциала при $p = 0,1$ торр и ВЧ-напряжении 500 В. При этом на термопару подавалось постоянное напряжение и снималась вольт-амперная характеристика термопары как лэнгмюровского зонда. Из рис. 3 видно, что при отрицательных потенциалах происходит нагрев термопары ионным током, а при потенциалах, превышающих потенциал плазмы, наблюдается быстрый нагрев термопары электронным током. В области между плавающим и плазменным потенциалами (выделенными на рис. 3 пунктирными линиями) на зависимости температуры термопары от приложенного потенциала наблюдается минимум. При давлении воздуха 0,6 торр температура термопары зависит от ионного тока значительно слабее, чем при 0,1 торр.

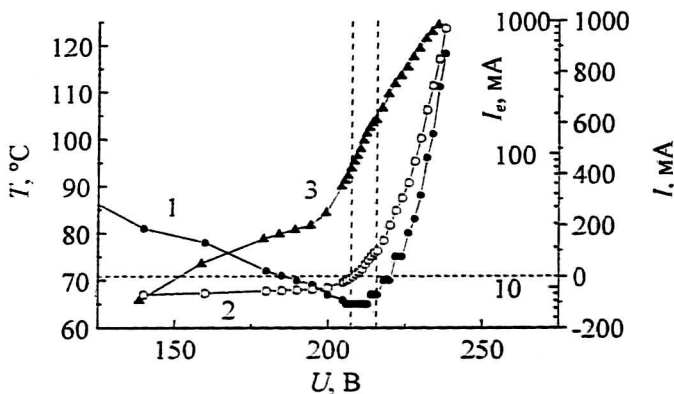


Рис. 3. Зависимость температуры термопары T (1), полного I (2) и электронного I_e (3) токов на термопару от приложенного потенциала при давлении воздуха $p = 0,1$ торр и ВЧ-напряжении 500 В

Таким образом, экспериментально получены осевые профили температуры нейтрального газа в ВЧЕ-разряде низкого давления. Показано, что в определенном диапазоне давлений воздуха наблюдается немонотонное поведение температуры газа: α - γ -переход сопровождается уменьшением температуры нейтрального газа во всем разрядном промежутке, в то время как в α - и γ -режимах повышение ВЧ-напряжения приводит к росту температуры газа.

Л и т е р а т у р а

1. Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н., Яценко Н. А. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. — М.: изд-во МФТИ; Наука-Физматлит, 1995.
2. Левитский С. М. // ЖТФ. 1957. Т. 27. С. 970.
3. Лисовский В. А. // Там же. 1998. Т. 68. С. 52.
4. Lisovskiy V. A., Yakovin S. D., Yegorenkov V. D., Terent'eva A. // Abstracts of XI Gaseous Electronics Meeting, 2000, Armidale, Australia. P. 39.
5. Лисовский В. А., Яковин С. Д., Егоренков В. Д., Терентьева А. Г. // ВАНТ. 2000. № 1. С. 55.
6. Piejak R., Godyak V., Alexandrovich B., Tishchenko N. // Plasma Sources Sci. Technol. 1998. V. 7. P. 590.

Behaviour of the neutral gas temperature in the HFC discharge at low air pressure

V. A. Lisovsky, E. V. Myshko
Kharkov National University, Kharkov, Ukraine

S. D. Yakovin
National Physical and Technical Center, Kharkov, Ukraine

The interior parameters and combustion regimes of the high-frequency capacitive discharge to be used at handling the semiconductor materials and for pump of gas lasers have been explored in the paper.