

04;05;09;11;12

Процессы разрушения поверхности электрода в плазме высокочастотного разряда

© Г.П. Строкань

Научно-исследовательский институт физики
при Ростовском государственном университете,
344104 Ростов-на-Дону, Россия
e-mail: int@ip.rsu.ru

(Поступило в Редакцию 9 января 2001 г.)

Исследованы процессы разрушения поверхности электродов различных материалов в плазме высокочастотного разряда, используемого для накачки ионных лазеров на частоте 10 МГц. Обнаружено, что разрушение электрода происходит за счет блистеринга, изучены закономерности этого явления в типичных условиях работы газоразрядной трубки от температуры, материала электрода и рода газа. В рамках геометрической оптики проведена количественная оценка концентрации в разряде пылеобразных частиц — продуктов блистеринга. Даны рекомендации борьбы с блистерингом в разряде с такими условиями.

Введение

На характеристики лазерного излучения существенным образом влияет состояние поверхности электрода, так как в лазерах с поперечным высокочастотным разрядом (ПВЧР) накачка рабочих уровней происходит за счет процессов в приэлектродной области [1–5]. Кроме того, во время работы лазера поверхность электрода подвергается интенсивному ионному облучению с энергией ионов, сравнимой или равной энергии прикатодного ускорения, что приводит к изменению состояния поверхности и выделению продуктов материала электрода как в атомарном, так и фрагментарном виде в рабочий объем газоразрядной трубки лазера. Все это в конечном счете приводит к изменению характеристик газового разряда [6–10] и, как следствие, к изменению характеристик генерации лазера.

Наряду с довольно известным явлением катодного распыления [11] в газовом разряде происходит разрушение электрода за счет других процессов, одним из таких процессов является блистеринг, достаточно известный в технике термоядерных реакторов [12], однако в условиях лазеров с ПВЧР этот процесс не изучен. Целью данной работы является исследование блистеринга в разрядных условиях, используемых для накачки ионных лазеров.

Методика измерений и экспериментальная установка

Для наблюдения макроскопических частиц, возникающих в разрядной трубке, и исследования их влияния на параметры генерации использовалась экспериментальная установка, показанная на рис. 1. В первом случае исследуемая трубка помещалась в один резонатор с трубкой гелий-неонового лазера ЛГ-75 (рис. 1, а). Резонатор состоял из плотных зеркал с коэффициентом отражения 99.9%. Таким образом, за счет большой интенсивности внутри резонатора можно было наблюдать места

зарождения сгустков частиц, а также их последующую локализацию. Используемая методика исследования пылеобразования за счет высокой интенсивности излучения позволяла наблюдать выбросы отдельных частиц размером 10–30 μm . Недостатком такой методики исследования было то, что с ростом концентрации частиц мощность генерации уменьшалась и при достижении некоторой пороговой концентрации падала до нуля.

Во втором случае (рис. 1, б) исследуемая трубка помещалась вне резонатора и просвечивалась излучением меньшей интенсивности. При таком способе можно было измерять потери в трубке при рассеянии излучения на пылеобразных частицах до величины 100%. Для наблюдения малой величины поглощения порядка 0.2% использовалась компенсационная схема измерения. С помощью микроскопа изучалось движение частиц и измерялась их величина. Зеркало 7 с селективным отражением исключало попадание спонтанного излучения исследуемой трубки в фотоприемник. Для исключения влияния собственных флуктуаций гелий-неонового лазера последний перед началом измерений прогревался в течении 3–4 ч.

Исследуемая трубка с внутренним электродом предварительно обезгаживалась откачкой до давления порядка 10^{-3} Па, затем прогревалась до температуры 300–400°C внешним нагревателем или в индукторе, затем вновь откачивалась. Критерием чистоты поверхности электрода являлось совпадение вольт-амперных характеристик при повторных измерениях. Надо отметить, что нагрев электрода в отсутствие разряда не приводит к разрушению его поверхности, как при блистеринге.

В работе использовались электроды из металла (из Ст3, нержавеющей стали, никелевые, алюминиевые), с нитридными покрытиями (нитрид титана и нитрид хрома) и диэлектрика (кварцевые и керамические). Толщина покрытия нитридными соединениями рабочей поверхности электрода была порядка 20 μm . Высокочастотный генератор обеспечивал выходную мощность на согласованной нагрузке до 1 kW при частоте от 1 до 20 МГц.

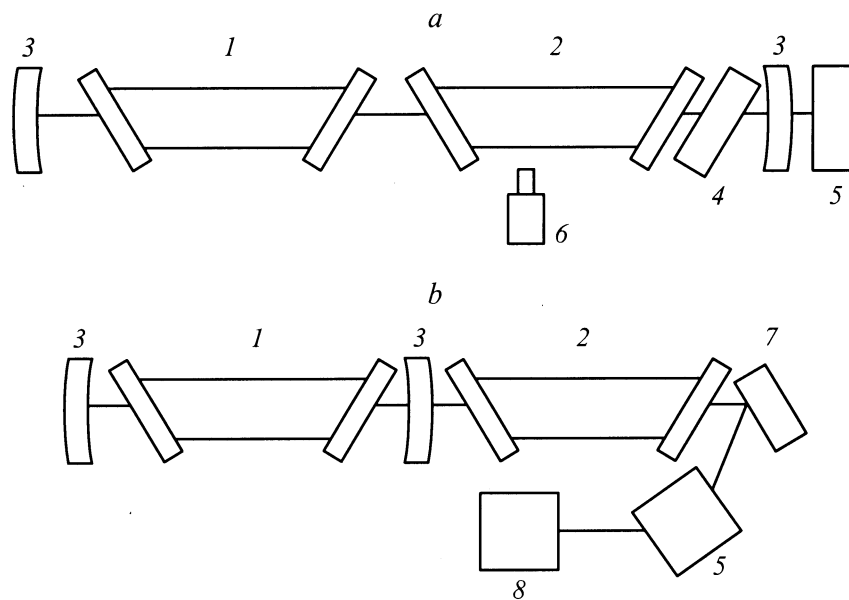


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для наблюдения продуктов блистеринга. Исследуемая трубка находится в резонаторе (*a*) и вне его (*b*). 1 — лазер ЛГ-75, 2 — исследуемая трубка, 3 — зеркала резонатора, 4 — поворотная пластина, 5 — измеритель мощности излучения, 6 — микроскоп, 7 — селективное зеркало, 8 — источник компенсационного сигнала.

Основные результаты и их обсуждение

При проведении исследований блистеринга в используемых разрядных трубках учитывались зависимости этого явления от температуры, рода газа и материала электрода. Полученные результаты сводятся к следующему.

1. Макроскопические частицы возникают как в разряде гелия, так и в смеси гелий–кадмий, причем в разряде гелия концентрация этих частиц выше. В разряде других газов (воздух, криптон) макроскопические частицы практически не образуются.

2. Из всех рассмотренных электродов при температуре 300°С наибольшее выделение макроскопических частиц наблюдается в разряде с электродами из нержавеющей стали и никеля. В разряде с алюминиевыми электродами и электродами, имеющими нитридное покрытие, выделение частиц незначительно. В случае кварцевого и керамического электродов макроскопические частицы практически не появляются.

3. Температурная зависимость выделения макроскопических частиц изучалась в разряде гелия с электродами из нержавеющей стали. При невысоких температурах ($T < 150^\circ\text{C}$) не происходило заметного пылеобразования. При температуре $T = 280^\circ\text{C}$ происходит интенсивное выделение макроскопических частиц с последующим оседанием их на стенках разрядной трубки. Дальнейший рост температуры электрода приводил к снижению пылеобразования, и при температуре $T = 700^\circ\text{C}$ выделение макроскопических частиц минимально.

Следует отметить, что, нагревая электроды в отсутствие разряда, не удалось получить заметного пылеобра-

зования. Нагрев электрода осуществлялся как внешним нагревателем, так и за счет индукционного нагрева до температуры порядка 600°С.

Полученные результаты объясняются свойствами блистеринга, отмеченными в работах [12,13].

1. При использовании различных газов наиболее интенсивное образование блистеров должно наблюдаться для разряда в чистом гелии, так как гелий не связывается с материалом электрода и, попадая в имеющиеся пустоты, вызывает блистеринг.

2. Факты, полученные при исследовании электродов из различных материалов, объясняются следующим образом. Атомы гелия, попадая вовнутрь электрода, скапливаются в пустотах, создавая в них большое давление. В результате этого происходит вспучивание — блистер, а затем и разрушение электрода. В случае пористой поверхности атомы гелия по порам выходят на поверхность, не разрушая электрод. Наиболее наглядно это проявляется в случае электрода из кварца, который имеет высокую проницаемость для гелия $7 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{l/cm}^2$ при температуре 300°С [14], в то же время, согласно правилу Нортона, металлы непроницаемы ни для одного из инертных газов, что должно приводить к блистерингу. Значительно меньшее выделение микрочастиц в разряде с алюминиевыми электродами объясняется наличием окисной пленки, толщина которой превышает глубину внедрения атома гелия. Кроме того, рабочая температура, при которой происходило исследование алюминиевого электрода, составляла $0.7 \cdot T_1$ (T_1 — температура плавления), а при температуре $0.5\text{--}0.6 \cdot T_1$ и более блистеринг маловероятен [12]. Аналогичные результаты

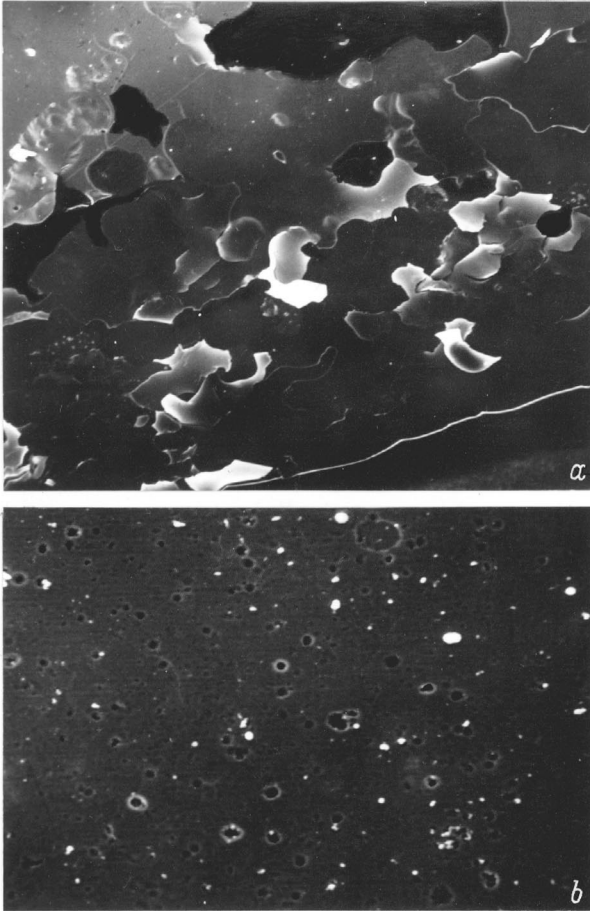


Рис. 2. Поверхность электрода из нержавеющей стали в случае отшелушивания (*a*) и в случае блистеринга (*b*). Масштаб $100 \mu\text{m}$.

получены для электродов с покрытием из нитрида титана при толщине покрытия порядка $20 \mu\text{m}$.

3. Закономерности появления макроскопических частиц от температуры совпадают с закономерностями, полученными в работах [12,13] для термоядерных реакторов. Приведенные выше зависимости блистеринга от температуры хорошо совпадают с наблюдаемым возникновением макроскопических частиц в разряде гелия с электродами из нержавеющей стали. При температуре, меньшей 150°C , на поверхности электрода под действием потока ионов гелия образуются блистеры малых (порядка единиц микрометров) диаметров. При отрыве крышек блистеров малых диаметров не происходит заметного пылеобразования в силу того, что интенсивность разрушения поверхности при этой температуре значительно меньше (на один–два порядка), чем при отшелушивании [13]. При температуре $T = 0.3 \cdot T_1$ блистеринг сменяется отшелушиванием. При этом возрастает скорость эрозии и размеры частиц. На рис. 2 приведена поверхность электрода из нержавеющей стали в случае блистеринга и отшелушивания. При температуре электрода порядка 700°C на его поверхности в резуль-

тате бомбардировки ионами гелия образуются блистеры малых диаметров, т. е. отшелушивание сменяется блистерингом. В эксперименте это проявляется в существенном уменьшении пылеобразования в разрядном объеме.

Исследование поглощения излучения в лазерных трубках с электродами, имеющими нитридное покрытие

Выше было показано, что в разряде с электродами, имеющими нитридное покрытие, выделение пылеобразных макроскопических частиц незначительно. Однако эта качественная характеристика не определяет уровень поглощения излучения в лазерных трубках с такими электродами. В то же время в конкретных лазерных трубках для получения максимальной мощности генерации необходимо знать уровень потерь, например, при выборе материалов электродов. В связи с этим представляют интерес более детальное изучение пылеобразования в лазерной трубке и связанного с ним поглощения излучения, а также определение концентрации частиц блистеринга.

Измерительная установка показана на рис. 1, *b*. Исследования проводились в трубке асимметричной конструкции с внутренним электродом длиной 0.5 m . Рабочий канал выполнен в виде щели $3 \times 2.5 \text{ mm}$. Внутренняя поверхность рабочего канала имела покрытие из нитрида титана.

После продолжительного прогрева и обезгаживания исследуемой трубки поглощение излучения составляет $K \approx 25\%$ и на протяжении длительного времени остается постоянным (рис. 3). В этом случае в объеме разрядной трубки не было пылеобразных сгустков, характерных при работе с электродом из нержавеющей стали. Незначительное поглощение в этом случае может быть объяснено небольшим выделением макроскопических частиц с поверхности электрода.

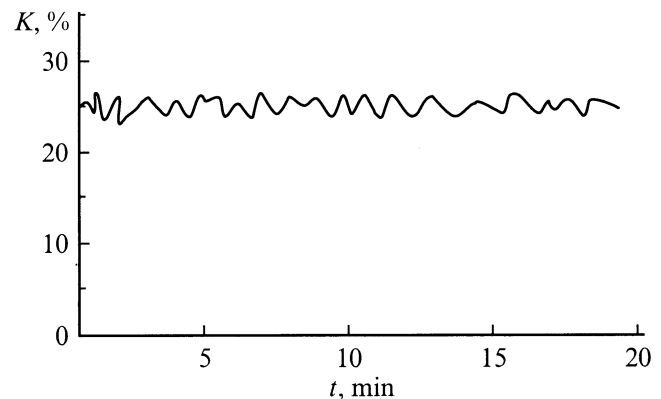


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения излучения от времени в трубках с электродом, имеющим нитридное покрытие. Температура электрода 300°C .

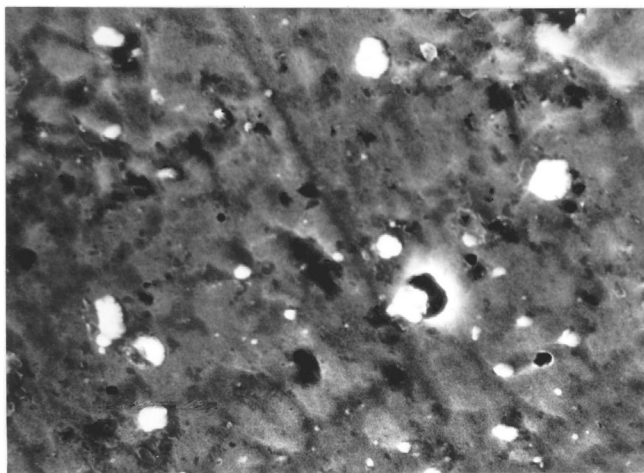


Рис. 4. Поверхность электрода, имеющего нитридное покрытие после десятичасовой работы в ПВЧР и при температуре 300°С. Масштаб 10 μm .

Уменьшение интенсивности прошедшего света из-за потерь, вызываемых наличием частиц в разряде, можно оценить в приближении геометрической оптики

$$\pi r_b^2 \alpha n = \frac{\ln(J_0/J)}{l},$$

где n — средняя концентрация частиц в разряде; r_b — диаметр частиц, l — длина исследуемой трубки; J_0, J — интенсивность на входе и выходе трубки; α — параметр ослабления.

При диаметре частиц 3 μm , что соответствует типичному диаметру частиц на рис. 4, а также величине визуального измерения частиц с помощью микроскопа $\alpha = 2$ [15], и с учетом используемой методики можно получить

$$n = 3.14 \cdot 10^4 \ln\left(\frac{100}{100 - K}\right).$$

В этом случае концентрация частиц составляет $\approx 10^4 \text{ cm}^{-3}$.

Такие оценки позволяют проводить сравнение электродов из различных материалов с целью минимизации потерь излучения в конструкции разрядной трубки лазера с ПВЧР, а также снижения уровня шумов излучения в низкочастотной области спектра.

Заключение

Таким образом, в разряде (как в ВЧ, так и постоянного тока) на поверхности металлических электродов возникает блистеринг. В зависимости от материала электрода и температуры блистеринг может проявляться либо в срыве крышек блистеров небольшого диаметра (от единиц до десятков микрон), либо в отшелушивании, при котором разрушение поверхности электрода происходит со скоростью, на один-два порядка большей, и продукты разрушения имеют размер нескольких сотен

микрон. В отличие от электродов из нержавеющей стали алюминиевые электроды и электроды с нитридными покрытиями в условиях работы гелий-кадмиевого лазера не подвержены отшелушиванию, что проявляется в незначительном пылеобразовании.

В целях уменьшения влияния продуктов блистеринга на характеристики лазеров рекомендуется использовать электроды с нитридными покрытиями или из материала, температура плавления которого составляет не более 1.5Т рабочей.

Список литературы

- [1] Латуш Е.Л., Михалевский В.С., Сэм М.Ф. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1976. Т. 24. Вып. 2. С. 81–83.
- [2] Александров С.В., Елагин В.В., Фотиади А.Э. // Письма в ЖЭТФ. 1980. Т. 6. Вып. 3. С. 160–161.
- [3] Дятлов М.Г., Касьян В.Г., Левин В.Г. // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3. Вып. 13. С. 644–646.
- [4] Корольков А.Н., Руделев С.А., Степанов В.А. // Электронная техника. Сер. 4. Электровакuumные и газоразрядные приборы. 1977. Вып. 9 (60). С. 12–17.
- [5] Кузовников А.А., Савинов В.П., Якунин В.Г. // Вестник МГУ. Сер. 3. Физика и астрономия. 1980. Т. 21. Вып. 4. С. 75–77.
- [6] Savranskii V.V., Strokan' G.P. // JRLREO. 1994. Vol. 15. N 1. P. 81–82.
- [7] Михалевский В.С., Строкань Г.П., Сэм М.Ф. и др. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 1. С. 37–42.
- [8] Строкань Г.П., Толмачев Г.Н. // Автометрия. 1984. № 1. С. 61–63.
- [9] Бородин А.В., Кравченко В.Ф., Строкань Г.П. // ЖТФ. 1996. № 8. С. 44–49.
- [10] Strokan' G.P., Tolmachev G.N. // TQE-85. Bucharest, 1985. Vol. I. С. 3. 10. P. 89–90.
- [11] Плевшцев Н.В. Катодное распыление. М.: Атомиздат, 1968. 343 с.
- [12] Гусева М.И., Мартыненко Ю.В. // УФН. 1981. Т. 135. Вып. 4. С. 671–691.
- [13] Wilson K.L. // J. Plasma Phys. and Thermonuclear Fusion. Specialissue. 1984. P. 85–94.
- [14] Технология тонких пленок. Справочник / Под ред. Л. Майссела. М.: Сов. радио, 1977. Т. 1. 664 с.
- [15] Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения полидисперсионными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.