

04;10

Безыскровой разряд в плотных газах с предыонизацией пучком низкоэнергичных электронов барьерного открытого разряда

© А.Р. Сорокин

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск
E-mail: IFP@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 2 ноября 2005 г.

Продемонстрирована высокая устойчивость безыскрового разряда с предыонизацией пучком электронов, фотоподсветкой и электронами плазмы барьерного открытого разряда (в нем сетчатый электрод, служащий одновременно катодом для основного разряда, располагается непосредственно на поверхности диэлектрика). В смеси газов для ArF-лазера давлением 2.5 atm получен энерговыход 2.5 J/cm^3 за 12 ns мощностью 210 MW/cm^3 . Результаты работы представляют интерес для разработки технологических эксимерных лазеров с высокой частотой следования импульсов.

PACS: 52.80.Sm, 42.55.Lt

В компактных эксимерных лазерах для технологических применений необходимая высокая частота следования импульсов достигается высокой скоростью прокачки газа поперек разрядного промежутка и требует уменьшения ширины разряда вдоль прокачки до величины $\sim 1 \text{ mm}$. Такие лазеры работают с предыонизацией газа от блока искр сбоку от разрядного промежутка.

Для повышения недостаточно высокой устойчивости разряда к искрообразованию, из-за малой эффективности предыонизации газа от искр, вследствие их удаленности от основного разрядного промежутка, прибегают к продольному (вдоль оптической оси лазера) попарному секционированию катода и анода основного разряда с емкостно-индуктивной развязкой между секциями. В [1] — 25 секций с шагом 10 mm при высоте разряда 12 mm и ширине $\sim 1 \text{ mm}$. Устойчивость повышается, но основная причина неустойчивости: малая эффективность предыонизации газа от искровых разрядов, — остается. Кроме

того, электроды искровых промежутков разрушаются, а продукты их обгорания загрязняют газ, что требует дополнительного увеличения скорости прокачки газа.

Предлагается: отказаться от искр, а устойчивость разряда повысить пучком электронов барьерного открытого разряда, предложенного в [2]. Этот источник электронов — основной элемент и остановимся на нем подробнее, уделяя внимание его работе как источнику предыонизации. Модельные опыты проводились со стандартной смесью газов для электроразрядного ArF-лазера.

1. До десятков Torr в обычном открытом разряде с металлическими электродами и разрядным промежутком $d < 1$ мм эффективно формируются электронные пучки, извлекаемые через сетчатый анод. Энергия электронов w_e соответствует приложенному к разрядному промежутку напряжению $U \rightarrow w_e \approx eU$, если $d \lesssim 1$ — длины области катодного падения потенциала. Если сетчатый электрод использовать как катод основного разряда, то электроны пучка, вышедшие за сетку, подхватятся основным разрядом, обеспечивая перекрытие формирующихся в основном разряде электронных лавин и тем самым стабилизируя его. Из области открытого разряда дополнительно идет подсветка фотонами основного разрядного промежутка. Однако давление эксимерных лазеров $p = 1-3$ atm, что требует увеличить рабочее давление открытого разряда на 2 порядка. Посмотрим, какие проблемы возникают для открытого разряда, причем в условиях аномального тлеющего разряда, который быстро формируется в разряде для рассматриваемых условий высокого давления.

Длина области катодного падения потенциала — l из формулы для параметра подобия (разряд в He)

$$p_{\text{He}} l \approx 0.48 \text{ Torr} \cdot \text{cm} \quad (1)$$

при $p_{\text{He}} = 3$ atm составит всего $2 \mu\text{m}$. Организовать разрядный промежуток $d \sim 1$, чтобы энергия электронов пучка соответствовала приложенному к разрядному промежутку напряжению U , затруднительно. Если же будет $d \gg 1$, то энергия электронов пучка определится не величиной U , а катодным падением потенциала U_{cf} (в нем всегда выполняются условия „убегания“ электронов), которое, например, при напряжении $U = 20$ kV может составить всего 200 eV, из-за „размазывания“ U по всей длине d , преимущественно за областью катодного падения потенциала: $w_e \approx eU_{cf} \ll U$.

Для нашей цели высокая энергия электронов пучка необязательна, но глубина проникновения L в газ электронов с энергией 200 eV, сформированных в области катодного падения потенциала при $p_{\text{He}} = 3 \text{ atm}$, согласно формуле, аппроксимирующей данные [3] и справедливой для $U_{cf} = 10^2 - 10^4 \text{ V}$:

$$p_{\text{He}} L = 6.5 \cdot 10^{-4} (eU_{cf})^{1.54} \text{ Torr} \cdot \text{cm}, \quad (2)$$

где eU_{cf} берется в eV, мала — $L = 10 \mu\text{m}$. Для выхода электронов за сетчатый электрод длина d должна быть также слишком мала $d < L = 10 \mu\text{m}$.

Кроме того, для $U_{cf} = 200 \text{ V}$, $p_{\text{He}} = 3 \text{ atm}$ поле у катода $E_c = 2U_{cf}/l$ (полагается типичный, близкий к линейному спад поля в области катодного падения потенциала в сторону от катода) составит $E_c = 2 \cdot 10^6 \text{ V/cm}$ и разряд без катодных пятен сохранится менее 10 ns. Разряд может быть устойчив и с катодными пятнами, но для малых d пятно сразу перекроет промежуток d и возникнет искра.

Таким образом, обычный открытый разряд для нашей цели непригоден. Покажем, как перечисленные проблемы решаются с барьерным открытым разрядом.

2. Барьерный разряд с одним или двумя электродами, покрытыми диэлектриком, обладает повышенной устойчивостью к искрообразованию. Но в традиционном исполнении устройства для барьерного открытого разряда, который формируют в промежутке d между поверхностью диэлектрика, прикрывающего металлический катод, и сетчатым анодом, перечисленные проблемы остаются прежними (подобный предыонизатор с фотоподсветкой разрядного промежутка через сетчатый анод, который служил анодом и для основного разряда, был использован в [4]). Решить их удалось в барьерном открытом разряде (БР), где сетчатый анод располагается непосредственно на поверхности диэлектрика, прикрывающего металлический катод [2].

Здесь поверхностный разряд по диэлектрику в пределах отверстий A сетчатого анода затруднен из-за скомпенсированности тангенциальной составляющей электрического поля вследствие близкого расположения перемычек сетки.

Далее. Сетчатый электрод экранирует проникновение сильного поля вглубь за сетку. Положительный заряд в области катодного падения потенциала дополнительно экранирует поле. В результате силовые линии электрического поля, перпендикулярные поверхности диэлектрика,

коротким путем замыкаются на перемычки сетчатого электрода, что уменьшает „размазывание“ U и повышает катодное падение потенциала, в области которого ускоряются электроны пучка.

Наконец, здесь ток случайной неоднородности быстро снижает местную напряженность электрического поля, заряжая поверхность диэлектрика размером в одно отверстие, и тем самым предотвращается развитие слабой неоднородности в искру (эффект секционирования разряда).

С таким БР в устройстве, в котором сетчатый электрод имел отверстия $A = 0.17$ mm, получены пучки электронов с энергией до 10 keV при атмосферном давлении гелия. Для увеличения длительности импульса тока, которая определяется временем зарядки диэлектрика током разряда, использовался диэлектрик с высокой диэлектрической проницаемостью $\epsilon \approx 1000$ (конденсаторная керамика). Для нашей цели большая продолжительность БР необязательна, и можно использовать, например, стекло ($\epsilon \approx 10$) или обычную керамику.

Размер отверстий A в сетчатом электроде определяет ход силовых линий электрического поля с перемычек сетки на диэлектрик. Их усредненную длину можно условно принять за эффективную длину разрядного промежутка d_{BD} , грубо — $d_{BD} \sim A/2$. Чем меньше A , тем короче силовые линии, меньше „размазывание“ U , выше катодное падение потенциала и энергия электронов пучка.

Оценим „размазывание“ U , исходя из измерений в опытах с обычным разрядом между металлическими электродами в условиях: $p_{\text{He}} = 100$ Torr, $d = 7.4$ mm, $U = 3.3$ kV, — когда, согласно (1), l составляет 1/157 часть d . „Размазывание“ U оказалось не столь уж велико: $U_{cf} \approx 0.5U = 1.65$ kV. Для $p_{\text{He}} = 3$ atm, когда $l = 2 \cdot 10^{-3}$ mm, $U_{cf} \approx 0.5U$ будет, если $d = 1 \cdot 157 \approx 0.3$ mm или $A = 0.6$ mm.

Сетчатый электрод можно получить на поверхности диэлектрика, например, напылением металла толщиной в несколько μm . Но для нашей цели, когда сетчатый электрод служит одновременно катодом для основного разряда, тонкий слой металла сетчатого электрода постепенно разрушится в процессе катодного распыления. Поэтому за приемлемую толщину сетчатого электрода можно принять $\delta = 0.1$ – 0.2 mm. Для рассмотренного выше случая с энергией электронов $eU_{cf} = 1.65$ keV глубина их проникновения в газ по (2) для $p_{\text{He}} = 3$ atm составит 0.26 mm, т.е. пучок выйдет за пределы толщины сетчатого электрода, если $\delta < 0.26$ mm, что вполне приемлемо.

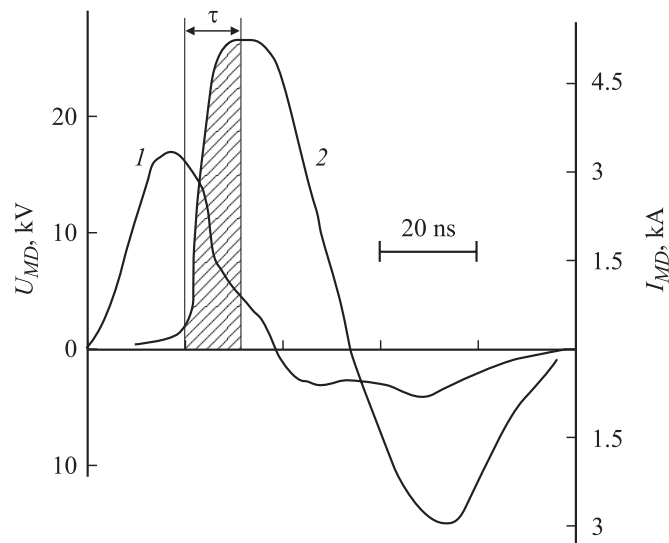


Рис. 1. Оциллограммы напряжения U_{MD} (1) и тока I_{MD} (2) основного разряда в смеси $\text{He}:\text{Ar}:\text{F}_2 = 80:20:0.3$ давлением $p = 2.5 \text{ atm}$. Для барьерного открытого разряда и основного разряда использованы отдельные источники питания.

Для реальных условий разряда границы приведенных оценок могут быть уточнены опытным путем. Дополнительными источниками электронов предыонизации для основного разряда служат электроны от фотоионизации газа и электроны самой плазмы БР, которые извлекаются полем основного разряда.

3. Для модельных опытов со стандартной смесью ArF -лазера: $\text{He}:\text{Ar}:\text{F}_2 = 80:20:0.3$ давлением $p = 2.5 \text{ atm}$, — использовалась разрядная ячейка с коаксиальным расположением электродов для БР и с активным объемом основного разряда $V = d_{MD} \times a \times b \approx 8 \times 1 \times 30 = 240 \text{ mm}^3$, где d_{MD} — расстояние между сетчатым катодом и пластинчатым анодом, a — ширина, b — длина основного разряда. Сетчатый электрод (плоская сетка из нержавеющей стали: геометрическая прозрачность — 0.5, отверстия $A = 1 \text{ mm}$, толщина $\delta = 0.2 \text{ mm}$) обворачивался вокруг стеклянной трубки диаметром 5 mm. В трубку с отверстием диаметром 3 mm вставлялся второй электрод для БР из фольги. Для повышения жесткости узла БР сетку можно „вживлять“ в поверхность диэлектрика. Частота следования импульсов $\sim 10 \text{ Hz}$.

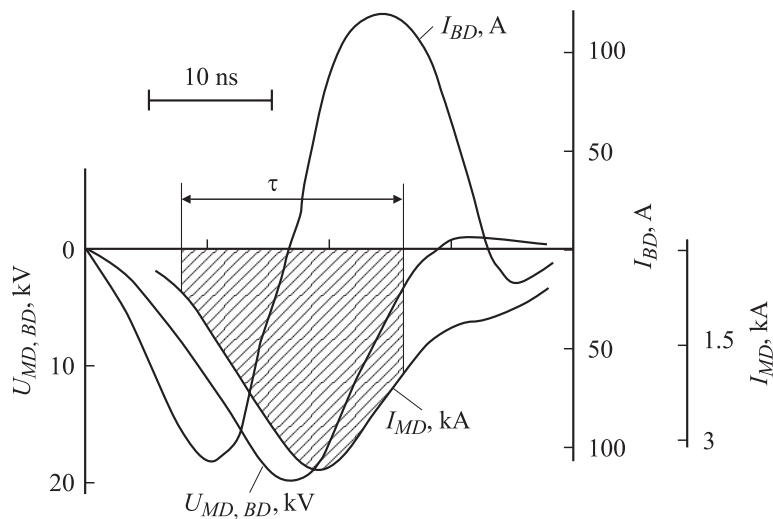


Рис. 2. Осциллограммы единого напряжения $U_{MD,BD}$ для основного разряда и барьерного открытого разряда, токов I_{MD} — основного разряда и I_{BD} — барьерного открытого разряда в смеси $He:Ar:F_2 = 80:20:0.3$ давлением $p = 3 \text{ atm}$. Для барьерного открытого разряда и основного разряда использован единый источник питания, подключенный минусом к сетчатому электроду, а плюсом одновременно к аноду основного разряда и к электроду из фольги, вставленному в стеклянную трубку.

Импульс напряжения для основного разряда подавался с регулируемой задержкой t_d относительно начала импульса напряжения для БР. Осциллограммы импульсов напряжения и тока основного разряда представлены на рис. 1. Оптимальная задержка t_d соответствовала моменту окончания первого полупериода тока БР и составила 60 нс. БР был настолько слаб, что в отсутствие основного разряда не вызывал свечения газа, заметного глазом. Амплитудные значения напряжения и тока на электродах БР составили: $U_{BD} = 11 \text{ kV}$ (передний фронт — $(t_f)_{BD} = 35 \text{ ns}$), $I_{BD} = 12 \text{ A}$. Реальные значения напряжения и тока самого БР меньше регистрируемых U_{BD}, I_{BD} . В период протекания БР зарядка поверхности диэлектрика не занятой перемычками сетки ведет к выравниванию потенциала поверхности диэлектрика и сетчатого электрода, что снижает реальное значение напряжения на самом БР. Регистрируемый ток БР дополнительно включает в себя ток зарядки

поверхности диэлектрика занятой перемычками сетки. Сокращением $(t_f)_{BD}$ можно повысить эффективность предыонизации.

Энерговклад в основной разряд (рис. 1) за время наиболее эффективного энерговклада — $\tau = 12 \text{ ns}$ (заштрихованная часть осциллограммы импульса тока) составил 2.5 J/cm^3 при средней мощности $P = 210 \text{ MW/cm}^3$, что на порядок выше, чем в известных устройствах с искровой предыонизацией.

БР может использоваться и с измененной полярностью питания, когда сетчатый электрод служит катодом БР. В этом случае электронный пучок, инжектируемый в область основного разряда, формируется в области катодного падения потенциала части поверхности сетчатого электрода, обращенной в сторону области основного разряда. Дополнительно электронами предыонизации для основного разряда служат электроны от фотоподсветки из области БР и из плазмы, формирующейся в полостях отверстий в сетчатом электроде в результате взаимодействия в них встречных электронных пучков от внутренних поверхностей перемычек сетки с газом (как в полном катоде).

В опытах ($p = 3 \text{ atm}$) с измененной полярностью питания БР энерговклад за $\tau = 18 \text{ ns}$ составил 2 J/cm^3 , мощность — $P = 110 \text{ MW/cm}^3$ (рис. 2). Предыонизация оказалась настолько высокой, что основной разряд зажигался почти одновременно с подачей импульса напряжения. Это свидетельствует о несамостоятельности основного разряда в начальной фазе его развития.

4. Полученные энергетические характеристики разряда, на порядок превышающие ранее достигнутые, в более простом и надежном (нет обгорания электродов) устройстве показывают перспективность продолжения работ в этом направлении. Практическая значимость предложенного для эксимерных лазеров определится в исследованиях характеристик генерации, в том числе при высокой частоте следования импульсов.

Список литературы

- [1] Андряманов А.В., Кабаев С.А., Лажинцев Б.В. и др. // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 4. С. 311–315.
- [2] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 9. С. 42–51.
- [3] La Verne Jay A., Mozumder A. // J. Phys. Chem. 1985. V. 89. N 20. P. 4219–4225.
- [4] Sze R.C., // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 3. P. 1224–1227.