

03;04;07

Влияние наносекундной ионизации на характеристики быстропроточного CO₂-лазера с самостоятельным разрядом

© Л.М. Василяк, С.П. Ветчинин, П.Г. Кадиева,
Д.Н. Поляков, А.В. Хотина

Институт теплофизики экстремальных состояний Объединенного
института высоких температур РАН, Москва
E-mail: lab852@ihed.ras.ru

Поступило в Редакцию 4 февраля 2002 г.

Исследована возможность повышения устойчивости электрического разряда, увеличения КПД и расширения динамического рабочего диапазона технологического электроразрядного CO₂-лазера непрерывного действия за счет дополнительной импульсной ионизации, производимой высоковольтными наносекундными импульсами.

Практическое использование мощных CO₂-лазеров показало, что для технологических приложений перспективными являются лазеры с мощностью излучения ~ 1 kW. Электроразрядный способ накачки мощных лазеров стационарным электрическим разрядом наиболее прост и широко распространен, однако область существования однородного тлеющего разряда в молекулярных газах и их смесях ограничена по току из-за термической контракции при больших энерговкладах. Для расширения диапазона объемного горения разряда по току и давлению газа и для повышения КПД лазера используется электроионизационный способ накачки, при котором ионизация газа производится электронным пучком или дополнительными высоковольтными импульсами [1–3], а возбуждение уровней — несамостоятельным разрядом. В работе [4] исследовалось влияние внешней ионизации, подобной емкостному ВЧЕ-разряду, производимой высоковольтными импульсами амплитудой около 20 kV в продольном разряде постоянного тока мощного технологического лазера „Лантан“. Импульсы подавались на дополнительные электроды. Отмечено увеличение предельной мощности, вкладываемой в такой комбинированный разряд, а также выравнивание электрического поля и концентрации электронов по длине разряда.

В данной работе исследовано влияние дополнительной ионизации, производимой высоковольтными наносекундными импульсами амплитудой до 30 кВ с длительностью по полуширине 50–150 нс и частотой следования 1 кГц, на работу CO₂-лазера типа „Протон“ [5] с мощностью излучения до 1.5 кВт с самостоятельным поперечным электрическим разрядом и замкнутым циклом прокачки газа. Импульсы подавались на рабочие электроды лазера через разделительные емкости. Катодом лазера служил медный стержень диаметром 1.4 см и длиной 80 см, а анод был выполнен в виде пластины той же длины, шириной 15 см, расстояние между катодом и анодом составляло 6 см. Электроды охлаждались водой. Величина накопительной емкости генератора импульсов регулировалась в пределах 500–3000 пФ. Для защиты стационарного источника лазера и развязки использовались LC-фильтры. Исследовался разряд в различных смесях CO₂:N₂:He при сумме парциальных давлений молекулярной смеси CO₂:N₂ 6–18 Торр. Прокачка лазерной смеси осуществлялась поперек разряда со скоростью 30–60 м/с. Исследовались характеристики самостоятельного и комбинированного разрядов.

В отсутствие ионизирующих импульсов в межэлектродном промежутке нет видимого свечения при токах меньше 4 А, светится лишь прикатодный слой. Наложение наносекундных импульсов приводит к однородному свечению всего разрядного промежутка. Дополнительная ионизация позволяет значительно расширить диапазон устойчивых режимов горения разряда постоянного тока и позволяет как устойчиво работать при значительно меньших токах, так и избежать контракции при больших токах. В обычной схеме для устойчивого горения самостоятельного разряда при малых токах необходимо включать большие балластные сопротивления и увеличивать напряжение источника питания.

На рис. 1 представлены вольт-амперные характеристики разряда для различных смесей при давлении CO₂ + N₂ 8 Торр, скорости прокачки смеси 60 м/с и значении накопительной емкости импульсного генератора 1000 пФ. В зависимости от значений зарядной емкости импульсного генератора постоянное напряжение на разрядном промежутке для фиксированного значения тока может как возрасти, так и упасть, поэтому в зависимости от параметров импульсной ионизации можно или получить более высокий энерговклад в разряд (при уменьшении емкости), что дает повышение выходной мощности лазерного излучения, или осуществить режим работы с более высоким значением тока при той же величине постоянного напряжения на разрядном

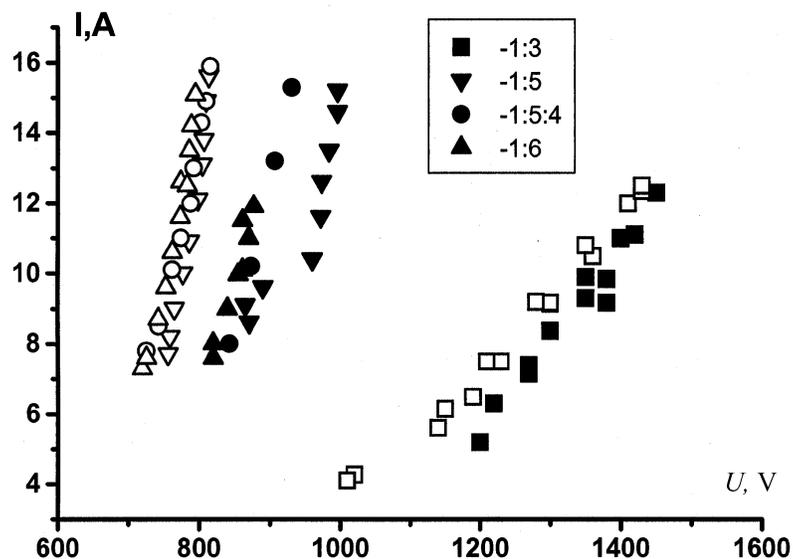


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики разряда для различных лазерных смесей $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ при давлении молекулярной смеси 8 Торг. Открытые значки — комбинированный разряд, залитые — самостоятельный.

промежутке (рис. 1). Импульсная ионизация стабилизирует разряд постоянного тока и также позволяет расширить диапазон давлений устойчивого горения самостоятельного разряда без контракции. Она позволяет осуществлять однородный разряд при повышении рабочего давления без снижения предельного тока и тем самым повысить энергоклад в плазму. Амплитуда высоковольтных импульсов значительно выше пробойного напряжения, поэтому они производят значительную ионизацию в разрядном промежутке, не нагревая газ. Поскольку наносекундный разряд реализуется в промежутке с ионизацией, созданной стационарным разрядом, то он происходит в виде высокоскоростной волны ионизации [6], которая производит наиболее эффективную дополнительную ионизацию. Минимальная длительность наносекундного импульса определяется временем движения волны ионизации через промежуток при характерной скорости 10^9 cm/s [6].

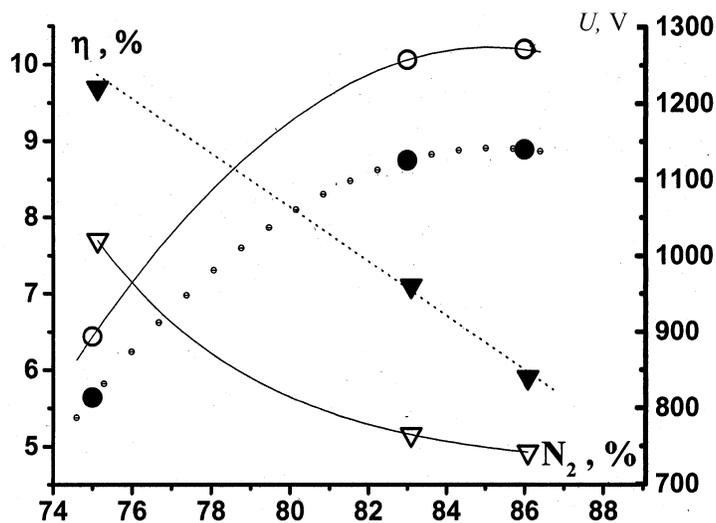


Рис. 2. Зависимость максимального КПД лазера η (кружки) и напряжения U (треугольники), соответствующего этому КПД, от содержания азота в молекулярной смеси. Безгелиевая смесь, давление 8 Торг. Открытые значки — комбинированный разряд, залитые — самостоятельный.

Импульсный разряд приводит к увеличению концентрации электронов, что видно из рис. 1, 2. Как показано в [7], при детальном численном исследовании нестационарных процессов в тлеющем разряде, это связано с резким уменьшением скорости прилипания электронов в сильных электрических полях. Нехватка малоподвижных отрицательных ионов при резком уменьшении скорости прилипания приводит к замещению их электронами, движущимися от катода. При этом проводимость и ток разряда возрастают (рис. 1). Наложение наносекундных импульсов приводит к смещению приведенной напряженности поля в область более низких значений (рис. 2, правый график), чем те, которые реализуются в самостоятельном разряде и являются наиболее оптимальными для накачки колебательных лазерных уровней, что приводит к увеличению КПД лазера (рис. 2, левый график). Максимальное увеличение КПД для приведенных смесей наблюдается при мощности лазерного излучения 0.3–1 kW. КПД возрастает с ростом относительного энерговклада в

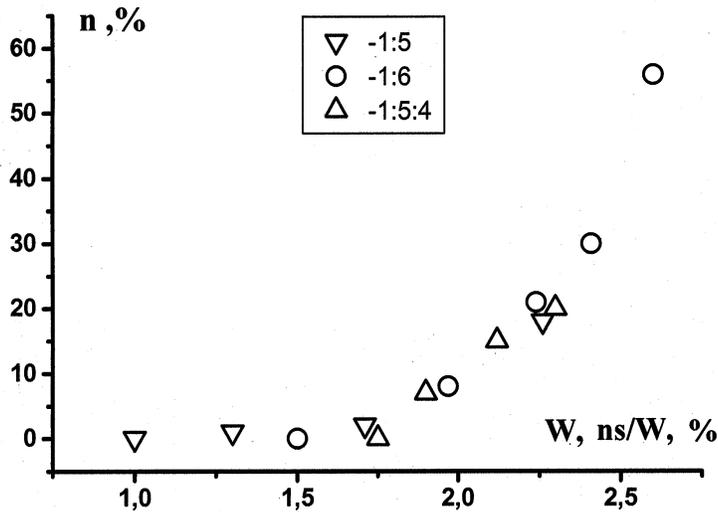


Рис. 3. Зависимость относительного прироста КПД при накачке комбинированным разрядом от процентного отношения мощности наносекундного источника W, ns к мощности самостоятельного разряда W для различных смесей.

разряд от импульсного источника по отношению к энерговкладу от стационарного разряда, и относительный прирост КПД достигает 55% при тенденции дальнейшего роста (рис. 3). Из рис. 3 видно, что более выгодно использовать смеси с увеличенным содержанием азота. В комбинированном разряде основная энергия, идущая на дополнительную накачку лазерных уровней после наносекундного импульса, вкладывается в плазму от источника постоянного тока, при этом в области оптимальных E/P наблюдается почти линейная зависимость мощности лазерного излучения от тока разряда для различного состава газовой смеси. В отличие от несамостоятельного разряда в нашем случае между импульсами происходит размножение электронов и эффективно производится возбуждение лазерных уровней самостоятельным разрядом. Если в несамостоятельном разряде частота следования импульсов низка, то существуют моменты между импульсами, когда концентрация электронов падает настолько низко, что накачка лазера не происходит. В нашем случае накачка лазера осуществляется постоянно.

Таким образом, наложение коротких наносекундных импульсов на самостоятельный разряд является перспективным методом для повышения эффективности накачки СО₂-лазеров с самостоятельным поперечным разрядом без конструктивной переделки, который позволяет повысить КПД и работать без контракции разряда с простыми не секционированными электродами, на безгелиевых смесях с высоким содержанием азота. При этом улучшаются рабочие характеристики лазера: увеличивается глубина регулирования по току, упрощается поджиг разряда, повышаются стабильность, однородность и устойчивость разряда при больших токах. Повышение стабильности разряда позволяет получить более однородное распределение по сечению интенсивности лазерного излучения.

Список литературы

- [1] *Генералов Н.А., Зимаков В.П., Косынкин В.Д.* и др. // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 8. С. 1549–1557.
- [2] *Наумов В.Г., Шашков В.И.* // Квантовая электроника. 1977. Т. 4. № 11. С. 2427–2434.
- [3] *Напартович А.П., Наумов В.Г., Шашков В.И.* // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3. С.1152–1157.
- [4] *Генералов Н.А., Зимаков В.П., Рудный И.Г.* и др. // Лазерная технология. В. 6. Ин-т физики АН Литовской ССР. Вильнюс, 1988. С. 23–24.
- [5] *Иванченко А.И., Крашенинников В.В., Пономарев А.Г.* // Электротехника. 1987. № 11. С.37–39.
- [6] *Василяк Л.М., Костюченко С.И., Кудрявцев Н.Н., Филогин И.В.* // УФН. 1994. Т. 164. № 3. С. 263–286.
- [7] *Бреев В.В., Двуреченский С.В., Пашкин С.В.* // ТВТ. 1979. Т. 17. № 2. С. 250–255.