

ПРОБОЙ ГАЗОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДЛИННОВОЛНОВОГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА НА CO_2

*Н.А.Генералов, В.П.Зимаков, Г.И.Козлов,
В.А.Масюков, Ю.П.Райзер*

Пробой газов в СВЧ [1] и оптическом [2, 3] диапазонах изучен весьма подробно. В этой работе впервые исследуется пробой излучением промежуточной области спектра – импульсами лазера на CO_2 , с $\lambda = 10,6 \text{ мк}^1$). Свечение газа в области пробоя казалось непрерывным, так как частота пробоя была больше 10 гц.

Газовый лазер работал на смеси CO_2, N_2 . Не при непрерывной прокачке; длина трубы – 3,5 м, диаметр – 57 мм, разрядный ток – до 90 ма. В непрерывном режиме он давал до 70 вт. С помощью вращающегося зеркала модулировалась добротность. Импульсы, следующие с частотой 50 – 250 гц имели пиковую мощность порядка 10 квт и длительность 0,3 – 1,5 мксек. Через соляное окно излучение проходило в кювету высокого давления объемом 270 см³, отражалось назад сферическим зеркалом с $f = 1,5 \text{ см}$, помещенным внутри, и фокусировалось в центре сосуда в кружок с радиусом $r \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ см}$. Газы исследовались при давлениях p до 25 атм.

В опытах одновременно регистрировались формы импульсов: падающего, прошедшего через плазму пробоя и отраженного от плазмы назад к зеркалу, а также видимое свечение плазмы. Приемниками инфракрасного излучения служили фотоспротивления на основе германия, легированного золотом, видимого – фотоумножитель ФЭУ – 52. Сигналы одновременно подавались на три канала осциллографа С1 – 33.

Пример осциллограмм показан на рис. 1. Пробой (лавина) развивается быстро, за время, не превышающее постоянную времени приемников $\approx 0,1 \text{ мксек}$. В ксеноне большая часть излучения поглощается плазмой (до 75%), отражение не менее 7% от падающего излучения. Отраженный от плазмы сигнал уменьшается при уменьшении давления и исчезает при $p < 5 \text{ атм}$ (остается только отражение от входного окна). Поглощение, отражение и свечение возникают практически одновременно, в момент пробоя, который у порога близок к моменту пиковой мощности. Продолжительность свечения плазмы превышает длительность импульсов, но на три порядка меньше периода между импульсами.

Наиболее надежные измерения пороговой интенсивности сделаны для ксенона (рис. 2). Энергия падающего импульса измерялась специальным калориметром, импульсы ослаблялись калиброванными ослабителями из полиэтиленовой пленки. За порог принималось начало появления редких видимых вспышек. На рис. 3 представлены результаты для других газов. В отличие от Хе, порог в Не заметно возрастает с повышением чистоты газа. Искры в Аг, Не, Не светятся дольше, чем в Хе, а поглощение и отражение импульсов меньше.

¹⁾ В работах [5, 6] приводятся по одной фразе о том, что наблюдался пробой в газах под действием инфракрасного излучения с $\lambda = 10,6 \text{ мк}$, но никаких количественных данных или качественных соображений не дается.

Последнее, видимо, объясняется тем, что в He и Ne существенную роль играет ионизация примесей путем передачи возбуждения от атомов основного газа (эффект Пеннинга). Плотность электронов при видимом пробое в этом случае невелика. В Xe же ионизируются атомы основного газа и при больших давлениях электронная плотность достигает критической для $\lambda = 10,6 \text{ мк}$ величины $1,13 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Вопрос о механизме появления затравочных электронов пока остается открытым.

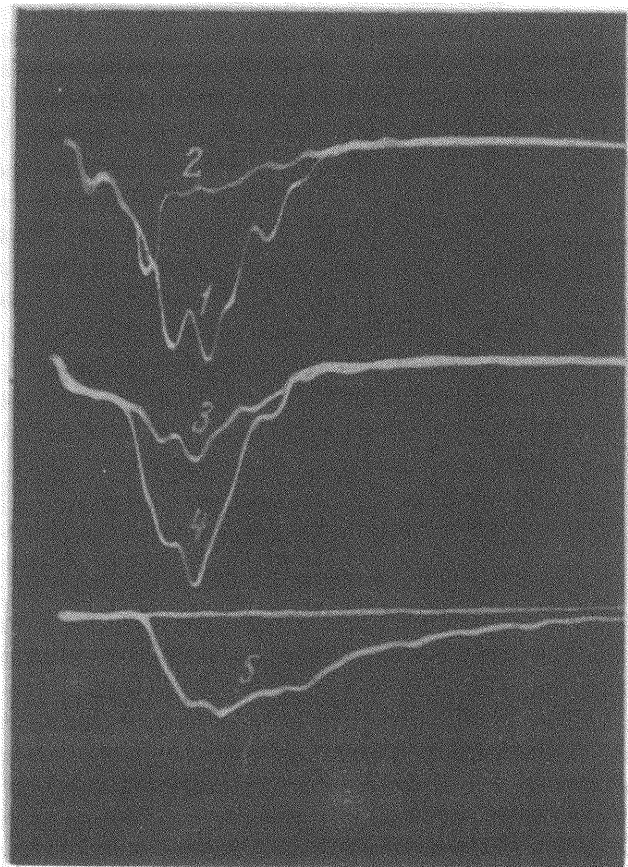


Рис. 1. Пробой в Xe, $p = 21 \text{ атм}$. Большое деление по оси абсцисс — 1 мксек . Кривые 1 и 2 — падающий и прошедший импульсы; 3 и 4 — падающий и отраженный, причем сигнал 3 ослаблен в 30 раз по сравнению с 4; 5 — импульс свечения плазмы

Измеренные пороги можно объяснить на основе представлений о лавинной ионизации. Под действием поля электрон набирает энергию со скоростью

$$d\epsilon/dt = e^2 E^2 \nu_m / m \omega^2 + \nu_m^2 ; \quad \mathcal{J} = c E^2 / 4 \pi ,$$

где ω и \mathcal{J} — частота и интенсивность света, $\nu_m(\epsilon)$ — частота столкновений электронов с атомами. Развитие лавины тормозят упругие и неупругие поте-

ри энергии и диффузионный уход электронов из области действия поля; соответствующие эффективные скорости потерь энергии равны

$$d\epsilon/dt|_e = \frac{2m}{M} \epsilon v_m; \quad |d\epsilon/dt|^* = \frac{\epsilon^*}{r^*} \frac{l - \epsilon^*}{l}; \quad |d\epsilon/dt|_d = \frac{\epsilon}{r_d},$$

где M — масса атомов, ϵ^* , l — потенциалы возбуждения и ионизации, $1/r^*$ — частота возбуждений, $r_d = \Lambda^2/D$ — характерное время диффузии, D — коэффициент диффузии, $\Lambda = r/\pi$. Грубо говоря, лавина развивается, если скорость набора энергии превышает суммарную скорость потерь. Характерные времена процессов $l |d\epsilon/dt|^{-1}$ настолько меньше длительности импульса, что для развития лавины достаточно лишь незначительного превышения ионизации над потерями. Следовательно, порог соответствует стационарности электронной плотности, как и при СВЧ — пробое [1], в отличие от случая кратковременных гигантских импульсов рубинового и неодимового лазеров [4].

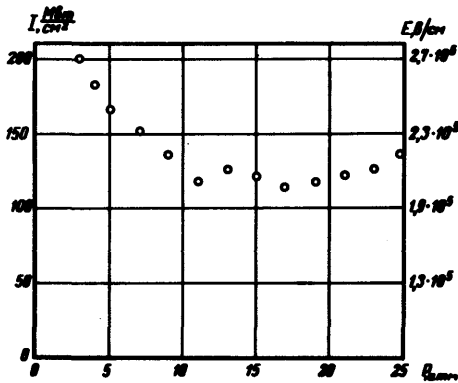


Рис. 2. Порог для пробоя в Хе

Рассмотрим конкретно Хе. На основе данных о сечениях выберем $v_m = 9 \cdot 10^{12} \rho_{\text{атм}} \text{сек}^{-1}$, $D = 610 \rho_{\text{атм}}^{-1} \text{см}^2/\text{сек}$, $1/r^* = 3,1 \cdot 10^{10} \rho_{\text{атм}} \text{сек}^{-1}$ (при $9 < \epsilon < 13 \text{ эВ}$). Упругие потери в тяжелом Хе всегда незначительны, а при наших ρ и $\Lambda = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ см}$ неупругие потери гораздо важнее, чем диффузия. Приравнявая, в соответствии с условием стационарности, скорости набора энергии и неупругих потерь, немедленно получаем $\mathcal{U} \approx 500 \text{ МэВ/см}^2$, что по порядку величины согласуется с измеренными порогами.

Правильнее, конечно, исходить из кинетического уравнения для распределения электронов по энергиям $n(\epsilon, t)$. Сколько-нибудь детальное рассмотрение приводит к чрезвычайно громоздким вычислениям и сложным формулам [1]. Сделаем упрощения в духе теории [4], но усовершенствуем [4]. Опустим член упругих потерь и будем считать v_m , D и r^* (при $\epsilon > \epsilon^*$) не зависящими от ϵ ; при $\epsilon < \epsilon^*$ $1/r^* \equiv 0$. Положим, что электроны, достигшие энергии l , мгновенно ионизуют атомы, т. е. $n(l) = 0$. Поток по энергетической оси $j(\epsilon)$ подчиним условию размножения $j(0) = 2j(l)$. Кроме того, n и j непрерывны при $\epsilon = \epsilon^*$. Тогда уравнение решается элементарно и условие стационарности $\partial n / \partial t = 0$ приводит к простому трансцендентному уравнению для безразмерного порогового поля $Z = Z(\xi, b)$, где $\xi = (r_d/r^*)^{1/2}$, $b = (l/\epsilon^*)^{1/2} \approx 1,2$. Практически универсальная функция $Z(\xi)$ монотонно возрастает: $Z(0) = 0,55$; $Z(3) = 0,75$; $Z(5) = 0,95$; $Z(10) = 1,56$, приближаясь к асимптоте $Z = 0,145 \xi$ при $\xi > 10$. У нас $\xi = 9 \rho_{\text{атм}}$.

Пороговая интенсивность равна

$$J = \frac{3}{2} \epsilon^* \frac{mc}{\pi e^2} \frac{D v_m}{\Lambda^2} \left(1 + \frac{\omega^2}{v_m^2} \right) Z^2(\xi).$$

Эта формула дает $J \approx 200 - 250 \text{ Мвт/см}^2$ при $p = 2 - 20 \text{ атм}$, что ближе к опытным значениям, хотя минимум J оказывается сдвинутым, он лежит при $p \approx 5 \text{ атм}$ вместо опытных 15 атм . Примечательно, что эта простая и компактная формула хорошо описывает экспериментальные данные [1] по СВЧ – пробой ксенона в диапазоне p от 10^{-2} до 10^2 мм рт. ст.

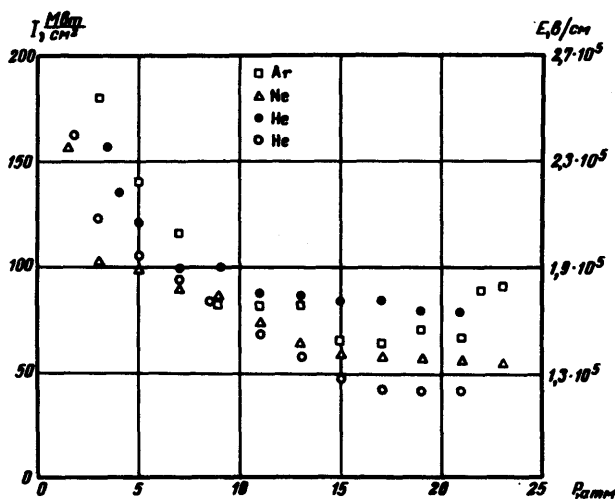


Рис. 3. Пороги в Ar, Ne, Ne. Черные кружки соответствуют гелию более высокой чистоты. Небольшая точность эксперимента и влияние примесей не позволяют ругаться за правильность соотношения порогов в разных газах

Авторы глубоко благодарны А.Э.Абалиеву и Д.И.Ройтенбургу за помощь в экспериментах.

Институт проблем механики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
25 февраля 1970 г.

Литература

- [1] А.Мак-Дональд. СВЧ пробой в газах. М., Изд. Мир, 1969.
- [2] Ю.П.Райзер. УФН, 87, 29, 1965.
- [3] Сб. переводов Действие лазерного излучения, М., Изд. Мир, 1968.
- [4] Л.Б.Зельдович, Ю.П.Райзер. ЖЭТФ, 47, 1150, 1964.
- [5] D.C.Smith. IEEE. Journal of Quantum Electronics, № 6, 291, 1969.
- [6] Laser Focus, October, 46, 1969.