

СНИЖЕНИЕ ПОРОГА СВЕТОВОГО ПРОБОЯ В ФОКУСЕ ЛАЗЕРА ПРИ НАЛОЖЕНИИ СВЧ ПОЛЯ

А.П.Дарманян, В.Е.Мицук, В.А.Черников

Установлено, что порог светового пробоя в фокусе луча лазера (см., например, обзор [1]) для инертных газов и воздуха при давлениях порядка атмосферного и ниже имеет величину, по напряженности электрического поля в световой волне, порядка $10^6 - 10^7$ в/см. В данной статье описывается эксперимент, в котором показано, что при наличии в объеме фокусировки достаточно сильного СВЧ поля ($> 10^3$ в/см) порог светового пробоя может быть снижен (до 10^5 в/см).

В эксперименте использовался ОКГ на рубине с модуляцией добротности на вращающейся призме (длительность лазерного импульса 60 нсек, энергия 0,6 Дж, расходимость 7°). Луч лазера фокусировался с помощью линзы ($f = 18$ мм) внутрь низкодобротного СВЧ резонатора (закороченный отрезок волновода 3-сантиметрового диапазона сечением 23×10 мм²). Ввод луча лазера в резонатор осуществлялся через отверстие в широкой стенке волновода, так, что для основного типа волны H_{10} вектор электрического поля совпадал с направлением луча лазера. Резонатор возбуждался с помощью импульсного магнетрона на частоте 9400 МГц (длительность импульса 1 мксек). Мощность СВЧ импульса достигала 100 кВт, что соответствовало амплитуде напряженности электрического поля в резонаторе в фокусе лазера $\sim 7 \cdot 10^3$ в/см. Для совмещения во времени моноимпульса лазера с одним из импульсов магнетрона, работавшего в режиме повторения импульсов, использовалась специальная схема синхронизации. Луч света от специального осветителя, отражаясь от передней грани призмы модулятора добротности в определенной фазе

ее вращения, попадал на фотодатчик, расположенный на расстоянии ~ 3 м. Сигнал с фотодатчика осуществлял запуск магнетрона. Частота повторения СВЧ импульсов задавалась, таким образом, числом оборотов призмы (550 μ с). Посредством перемещения фотодатчика относительно оси системы фиксировалось нужное положение во времени (в том числе и опережающее) импульса СВЧ по отношению к импульсу лазера.

При исследованных давлениях мощность СВЧ генератора была недостаточна для того, чтобы вызвать СВЧ пробой в резонаторе без наложения лазерного импульса. Пробойные СВЧ поля в импульсном режиме работы генератора [6] в два – три раза превышают максимальное значение СВЧ поля, используемое в эксперименте, даже при минимальных давлениях (~ 40 мм рт.ст. в случае аргона) и растут с увеличением давления. Световой пробой регистрировался визуально и фотоэлектрически по появлению спектральных линий исследуемого газа в спектре излучения световой искры. Кроме того, искра фотографировалась.

Эксперименты в Kr, Ar, He показали, что наличие СВЧ поля резко снижает порог лазерного пробоя. При этом экспериментально обнаружено, что эффект снижения практически не зависит от положения импульса лазера внутри прямоугольного импульса СВЧ. Результаты экспериментов представлены на рис. 1 и 2. Ниже приведена табл. 1, в которой дано отношение E_2/E_2' (E_2' , E_2 – соответственно, пороговые значения средней по объему фокусировки напряженности электрического поля в световой волне при наложении СВЧ поля и без него).

Т а б л и ц а 1

P , мм рт.ст.	100	160	260	360	460
Ar	7	24	31	29	28
Kr	3,5	8,3	19	19	19
He	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6

Согласно представлению об электронной лавине [2], световой пробой газа происходит в том случае, когда скорость набора энергии свободными электронами за счет эффекта тормозного поглощения при столкновениях с нейтральными атомами превосходит некоторую критическую величину, зависящую от рода газа, давления, различных видов потерь как энергии, так и самих электронов, в стадии первичного пробоя

[1, 3, 4]. При наложении СВЧ поля $E_1 e^{i\omega_1 t}$ в случае, если $E_1 \perp E_2$ ($E_2 e^{i\omega_2 t}$ — поле в световой волне) и $\omega_2^2 \gg \nu_{3\phi} \gg \omega_1^2$, результирующая скорость набора энергии есть сумма скоростей набора энергии в лазерном и СВЧ полях, т.е.

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{e^2 E_2^2 \nu_{3\phi}}{2m\omega_2^2} + \frac{e^2 E_1^2}{2m\nu_{3\phi}}.$$

В условиях эксперимента скорость нагрева в СВЧ на порядок и более превосходит скорость нагрева в поле лазера. Однако, без действия лазера электронная лавина не развивается, так как, согласно оценкам для используемых в эксперименте значений поля, скорость потерь

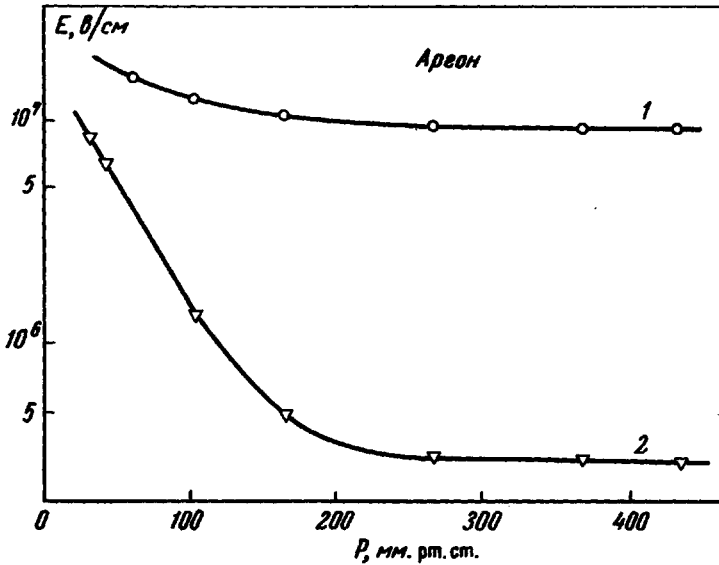


Рис.1. Зависимость порогового лазерного поля от давления без (1) и при наличии СВЧ поля (2)

энергии на возбуждение нейтралов превосходит скорость нагрева от СВЧ. При наложении же светового поля существенно возрастает вероятность проскока электроном зоны потерь на возбуждение, прежде всего, за счет "вылетания" электронов с верхних возбужденных уровней в результате фотоэффекта с поглощением одного или двух лазерных фотонов,

Квантовое кинетическое уравнение [2] для числа электронов $n(\epsilon, t)$ при одновременном действии СВЧ и лазера запишется в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n(\epsilon, t)}{\partial t} = & G_1 N_a \{-a_1(\epsilon)n(\epsilon, t) - b_1(\epsilon)n(\epsilon, t) + a_1(\epsilon - \hbar\omega_1)n(\epsilon - \hbar\omega_1) + \\ & + b_1(\epsilon + \hbar\omega_1)n(\epsilon + \hbar\omega_1)\} + G_2 N_a \{-a_2(\epsilon)n(\epsilon, t) - b_2(\epsilon)n(\epsilon, t) + \\ & + a_2(\epsilon - \hbar\omega_2)n(\epsilon - \hbar\omega_2) + b_2(\epsilon + \hbar\omega_2)n(\epsilon + \hbar\omega_2)\} + Q, \quad (1) \end{aligned}$$

где a_1, b_1, a_2, b_2 – коэффициенты вынужденного тормозного поглощения и излучения, а G_1, G_2 – потоки фотонов для СВЧ и лазера

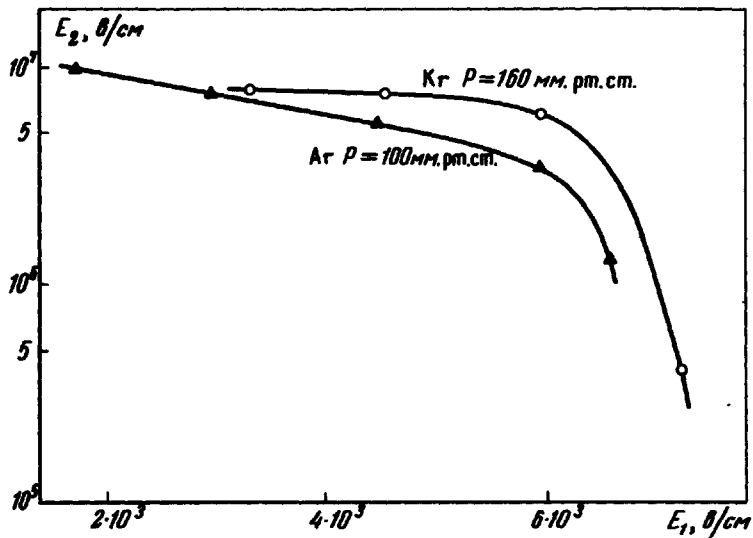


Рис. 2. Зависимость порогового лазерного поля от величины поля СВЧ

соответственно. N_a – концентрация нейтралов. Q – члены, учитывающие потери. Решая это уравнение при допущениях, сделанных в работе [2], можно получить следующее выражение для определения постоянной времени лавины θ_0 :

$$\frac{l_1^* m \nu_{эф}}{e^2 E_1^2 \theta_0} = \alpha + \beta(1 - \alpha) W_2 \theta_0. \quad (2)$$

l_1^* – потенциал первого возбужденного уровня, α – вероятность проскока зоны потерь на возбуждение, β – отношение числа возбужденных атомов с энергией $l_k^* \geq l_1 - 2\hbar\omega_2$ к общему числу возбужденных атомов, $W_2 = CE_2^4$ – вероятность двухфотонного поглощения [1].

Используя условие пробоя

$$\frac{1}{\theta_0} - \frac{1}{r_{D_e}} = \frac{1}{\theta_{кр}} = \frac{\ln n_{кр}/n_0}{r_{имп}} \quad (3)$$

(n_0 , $n_{кр}$ — начальное и конечное число электронов в объеме фокусировки, $r_{имп}$ — длительность лазерного импульса, r_{D_e} — диффузионное время жизни электрона) можно получить выражение для определения порогового лазерного поля

$$E_{кр}^4 = C^{-1} \left[\frac{I_1^* \left(1 + \frac{\theta_{кр}}{r_{D_e}}\right) m_{эф}}{e^2 E_1^2 \theta_{кр}} - a \right] \frac{1 + \frac{\theta_{кр}}{r_{D_e}}}{\beta \theta_{кр} (1-a)} \quad (4)$$

Величины a и β , входящие в формулу (4), рассчитываются при детальном учете потерь на возбуждение по методике, использованной в работе [5].

В табл. 2 приведено сравнение теоретических значений пороговых полей ($E_{2т}$), рассчитанных по формуле (4) с экспериментальными значениями ($E_{2э}$).

Т а б л и ц а 2

P , мм рт.ст.	100	160	260	360	460	
Ar	$E_{2т}$	$2,3 \cdot 10^6$	$4,7 \cdot 10^5$	$2,9 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^5$
	$E_{2э}$	$1,8 \cdot 10^6$	$4,4 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$
Kr	$E_{2т}$	$3,9 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^6$	$3,6 \cdot 10^5$	$2,9 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$
	$E_{2э}$	$2,9 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^6$	$4,2 \cdot 10^5$	$3,9 \cdot 10^5$	$3,8 \cdot 10^5$
Ne	$E_{2т}$	$1,6 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^7$	$7,9 \cdot 10^6$	$5,6 \cdot 10^6$	$4,7 \cdot 10^6$
	$E_{2э}$	$1,2 \cdot 10^7$	10^7	$7,2 \cdot 10^6$	$6,4 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$

Как видно из табл. 2, значения пороговых полей, рассчитанные теоретически, находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными результатами.

Физический факультет
Московского
государственного университета
им. М.В.Ломоносова

Поступило в редакцию
6 мая 1968 г.

Литература

- [1] Ю.П.Райзер. УФН, 87, 29, 1965.
- [2] Я.Б.Зельдович, Ю.П.Райзер. ЖЭТФ, 47, 1150, 1964.
- [3] В.Е.Мицук, В.И.Савоскин, В.А.Черников. Письма ЖЭТФ, 4, 129, 1966.
- [4] В.Е.Мицук, В.А.Черников. Письма ЖЭТФ, 6, 627, 1967.
- [5] М.Л.Грутман, Р.М.Миникаева, В.Е.Мицук, В.А.Черников. Письма ЖЭТФ, 7, 311, 1968.
- [6] В.Е.Голант. УФН, 65, 39, 1958.