

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ НАГРЕВА ВЕЩЕСТВА В ФОКУСЕ ЛУЧА ЛАЗЕРА И ПОЛУЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ ИОНИЗАЦИИ

Т.У.Арифов, Г.А.Аскаръян, Н.М.Тарасова

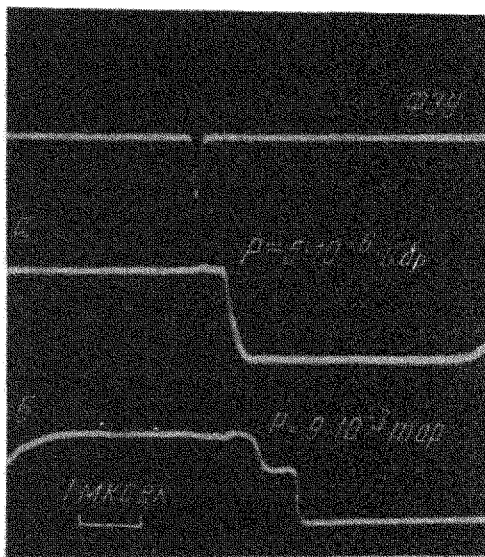
Известно, что фокусируя лазерное излучение на вещество, можно нагреть его до высоких температур, порядка нескольких десятков килоэлектронвольт, при которых появляется жесткое ультрафиолетовое и рентгеновское излучение [1 – 4], однако, не было данных об его интенсивности и ионизирующей способности. В данной статье впервые показано сильное ионизирующее действие такого излучения, свидетельствующее о большой его интенсивности и отмечается, что это излучение может сыграть существенную роль в проблеме получения плазмы с высокой степенью ионизации, так как оно будет ионизовать нейтральные атомы, выброшенные вместе с плазмой при воздействии лазера на вещество (на частичку, мишень или порцию газа).

Поскольку сечение фотоионизации $\sigma_f \sim 3 \cdot 10^{-17} + 10^{-18} \text{ см}^2$, то сильное ионизирующее действие с вероятностью ионизации атома, близкой к единице, следует ожидать при интенсивностях $N_1 \sim 1/\sigma_f \sim 10^{17} - 10^{18} \text{ квант/см}^2$, что соответствует плотности излучения вакуумного ультрафиолета порядка долей джоуля/см^2 . Как будет видно из дальнейшего, это вполне достижимо даже для лазеров средней мощности. Рекордные плотности потока ультрафиолета могут быть достигнуты вблизи горячей точки.

Были поставлены специальные эксперименты по исследованию ионизирующего действия излучения, возникающего при фокусировке лазера на вещество. На мишень в вакуумной камере фокусировался луч рубинового лазера с модулированной добротностью. Энергия излучения лазера составляла 1,5 дж при длительности импульса по полуширине $\sim 30 \text{ нсек}$. Фокусное расстояние линзы $f = 14 \text{ см}$.

Плазма регистрировалась с помощью СВЧ излучения с длиной волны $\lambda = 1 \text{ см}$; излучающая антенна создавала направленный поток радиоизлучения параллельно плоскости мишени на расстоянии 4 см от нее. Вспомогательная металлическая сетка, помещенная на расстоянии 3 см от мишени и экранирующая часть камеры с мишенью от СВЧ излучения позволяла более точно сопоставлять начало перекрытия СВЧ с моментом появления плазмы перед сеткой.

При высоком вакууме в камере СВЧ регистрировалось только приход плазмы от воздействия на мишень (рисунок, а); при добавлении газа в камеру появлялась так называемая "форплазма", возникающая под действием ионизирующего излучения раньше прихода фронта основной плазмы с мишени (рисунок, б). С увеличением давления газа величина перекрытия СВЧ "форплазмой" возрастала и при давлении $P_{кр}$ становилась соизмеримой с сильным перекрытием от основной плазмы с мишени. Это свидетельствовало о том, что концентрация форплазмы становилась близкой к критической $n_{кр} \approx 10^{13}$ эл/см³ для используемого радиоизлучения. Сравнение с концентрацией молекул $n_0 = 3,5 \cdot 10^{16} P(\text{тор})$ позволяет определить вероятность ионизации $W_1(R) \approx (n_{кр} / n_0) \approx 3 \cdot 10^{-4} / P_{кр}(\text{тор})$. По порядку величины $P_{кр} \approx 10^{-2} + 10^{-1}$ тор, что дает



вероятность ионизации $W_1 \sim 10^{-2}$ на расстоянии $R = 4$ см от точки фокуса, что по порядку величины довольно хорошо согласуется с теоретическими оценками, сделанными в предположении, что заметная часть энергии ($\sim 10^{-1}$) лазерного излучения переходит в ионизирующий ультрафиолет. Так как при заданной энергии лазера вероятность ионизации $W_1 \sim 1/R^2$, где R – расстояние от горячей точки, то полной фотоионизации следует ожидать на расстояниях $R_1 \sim \sqrt{R^2 W} \sim 1$ см.

Были исследованы мишени из алюминия, титана, молибдена и свинца при наполнении камеры воздухом и водородом. Рисунки а и б отно-

сются к случаю титановой мишени и воздушному заполнению. В этом случае $P_{кр} = 3 \cdot 10^{-2}$ тор и $W \approx 3 \cdot 10^{-2}$. В таблице приведены величины критических давлений, из которых следует, что свинцовая мишень дает наибольшее ионизирующее действие, а отношение сечений фотоионизации $\sigma_f(\text{возд})/\sigma_f(\text{H}_2) \approx 10$ для титановой мишени и $\sigma_f(\text{возд})/\sigma_f(\text{H}_2) \approx 5$ для свинцовой мишени¹⁾.

Материал мишени	Критическое давление для воздуха, тор	Критическое давление для водорода, тор
Pb	$9 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$
Mo	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-1}$
Ti	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$
Al	10^{-1}	$5 \cdot 10^{-1}$

Были поставлены контрольные эксперименты по проверке возможной роли быстрых электронов с горячего пятна мишени и иных возможных нефотоионизирующих факторов в создании форплазмы. Наложение поперечного магнитного поля ($H = 200$ э) не ослабило создания форплазмы, что показало, что вклад электронов в создании форплазмы мал. Малое время создания форплазмы ($< 0,1$ мксек) на достаточно большом расстоянии от мишени (4 см) исключает ее создание быстрой порцией плазмы с мишени. Более резкое образование форплазмы при нагреве тяжелой мишени также подтверждает этот вывод.

Описанные эксперименты показывают, что нагрев вещества в фокусе лазера может дать сильно ионизирующую вспышку в вакуумной камере. Эта вспышка может быть использована для ионизации порций газа, пучков атомов для получения плазмы, заполнения ловушек, получения

¹⁾ Вспышка ультрафиолета была зарегистрирована также салициловым люминофором, помещенным на расстоянии 5 см от мишени. Длительность вспышки была порядка 100 мксек. В качестве контрольных поглощающих фильтров использовался слой воздуха, напускаемого в камеру, тонкие пластинки кварца и стекла.

Кварцевая пластинка, пропускающая $\lambda > 2000$ Å, уменьшала величину вспышки в 1,5 раза.

Напуск воздуха при давлении ~ 1 тор уменьшал в 1,3 раза величину вспышки люминисценции. Это показывает, что в жестком, ионизирующем ультрафиолете находится значительная часть энергии излучения, вызывающего люминисценцию.

поляризованных электронов и т.п. Наличие ионизирующего излучения должно резко снизить количество нейтральных атомов в плазме, создаваемой с помощью лазера. Была проверена возможность использования различных зеркал, фокусирующих ионизирующее излучение и устраняющих попадание плазмы от мишени в объем, где происходит фотоионизация. Мишень помещалась в одном фокусе сфероидального зеркала, отражение от которого создавало ионизацию газа за мишенью в другом фокусе.

Отметим, что при выделении лазерной энергии в воздухе при нормальном давлении (лазерная искра, воздействие на мишень) ионизирующая радиация также приводит к созданию быстро возникающего ореола ионизации [5]. Однако, в этом случае ионизирующие ультрафиолетовые кванты поглощаются в слое воздуха порядка долей миллиметра и поэтому неэффективны для ионизации большого объема ореола с размерами порядка сантиметров. Поэтому вероятность ионизации на таких расстояниях составляет всего лишь 10^{-6} . Возможно, что существенную роль в ионизации воздуха при таких давлениях и толщинах газа играют многоступенчатая ионизация или рентгеновские кванты.

Проведенные эксперименты показали, что с увеличением мощности лазера выход ультрафиолета резко увеличивается, поэтому воздействие луча мощного лазера на мишень может обеспечить высокоэффективную генерацию жесткого ультрафиолета. Это излучение можно использовать не только для концентрированной ионизации атомов и молекул, но и для фотовозбуждения, фотодиссоциации молекул и т.п. В частности, возбужденные атомы, получаемые при этом, могут быть использованы для получения индуцированного излучения в области ультрафиолета.

Ультрафиолетовое излучение от плазмы при воздействии лазера на мишень может быть причиной мощного фототока с мишени. При этом фотоионизация газа вблизи мишени обеспечит одновременно компенсацию кулоновского заряда и позволит получить мощные токи без приложения внешнего напряжения. Нами, совместно с И.М.Раевским, были обнаружены токи с мишени, достигающие ~ 100 а при давлении газа $P \sim 10^{-2}$ тор [6]. Аналогичные токовые эффекты могут иметь место при высокотемпературных вспышках радиации у поверхности Земли.

Авторы благодарят Н.К.Суходрев за ряд полезных советов.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
30 мая 1968 г.

Литература

- [1] A. W. Ehler. G. L. Weissler. Appl. Phys. Lett., 8, 89, 1966.
- [2] B. C. Fawcett, A. H. Gabriel, F. E. Irons, N. I. Peacock P. A. H. Saunders. Proc. Phys. Soc., 88, 1051, 1966.
- [3] D. D. Burgess, B. C. Fawcett, N. I. Peacock. Proc. Phys. Soc., 92, 805, 1967.
- [4] Н.Г.Басов, В.А.Бойко, Ю.П.Войнов, Э.Я.Кононов, С.Л.Мандельштам, Г.В.Склизков. Письма ЖЭТФ, 5, 177, 1967.
- [5] Г.А.Аскарьян, М.С.Рабинович, М.С.Савченко, В.К.Степанов. Письма ЖЭТФ, 3, 465, 1966.
- [6] Т.У.Арифов, Г.А.Аскарьян, Н.М.Тарасова. ЖЭТФ, 55, вып. 8, 1968.