

Проблема моделирования филаментов при лазерно-индуцированном пробое среды

П.П. Трохимчук

Восточноевропейский национальный университет им. Леси Украинки,
Луцк, Украина

E-mail: trope1650@gmail.com

При самофокусировке наблюдались явления образования лазерно-индуцированных, филаментов, которые сопровождают оптический пробой среды [1–6]. При этом размеры филаментов изменяются от нескольких сот микрон для карбида кремния до нескольких сот метров для воздуха. Спектр излучения непрерывный [5, 6] и напоминает излучение Вавилова–Черенкова [7–10]. Поэтому было развито представление о том, что излучение филаментов и излучение Вавилова–Черенкова имеют одну и ту же природу [3, 4].

Следует отметить, что проблема оптического возбуждения черенковского излучения детально обсуждается в [7–10]. Далее мы будем обсуждать условия возникновения лазерно-индуцированного излучения Вавилова–Черенкова для гауссового сечения лазерного пучка (мода TEM_{00}) [3, 4]. Аналогия этого режима облучения с микроскопической теорией Н. и О. Боров [8] исследовалась в [1–4]. Особенности возникновения черенковского излучения при оптической накачке с микроскопической точки зрения рассеяния света в среде следующие. Во-первых, результирующий эффект элементарного акта рассеяния не должен успеть стать коллективным, при этом сохраняется направленность вторичного собственно черенковского излучения [4]. Во-вторых, порогом для возникновения такого излучения служат пороги образования различных нелинейнооптических эффектов, что и приводит, в конечном счете, к непрерывному спектру излучения [4]. Грубо говоря, это не что иное, как нелинейнооптический отклик (релаксация) первичновозбужденной среды. При этом, как и в случае микроскопической теории Н. и О. Боров [8] черенковского излучения, на периферии профиля лазерного пучка происходит менее интенсивное электромагнитное возбуждение среды, нежели в центральных областях этого профиля [3, 4]. В отличие от теории Боров, мы здесь имеем не множество гиперболоидов для каждой налетающей частицы, а единый гауссоид (т. е. поверхность, образованная гауссовой формой пучка лазерного излучения) [1–4].

Дифракционные и интерференционные явления, которые возникают при этом, могут быть объяснены как с точки зрения плазменной теории

В. Макина [11], так и на основании модифицированной модели И. Франка [4].

Проблема образования филаментов возникла при изучении явления самофокусировки и самоканалирования [12]. Так, в воздухе длина филаментов может достигать несколько сот метров [5, 6]. Было обнаружено, что излучение филаментов имеет непрерывный спектр от ультрафиолетовой до инфракрасной области [5, 6, 12]. Кроме того, было получено расслоение излучения по сечению пучка облучения, а также по длине самого филамента [6].

Результаты по расслоению излучения по сечению пучка облучения можно объяснить как на основании теории движущихся фокусов Лугового-Прохорова [4], так и на основании модифицированной модели Релея дифракционного расслоения лазерного пучка [4], что в конечном счете приводит к непротиворечивому объяснению полученных результатов.

Неоднородность распределения излучения по длине филамента может быть объяснена также на основании теории движущихся фокусов Лугового-Прохорова [4] и модифицированной модели Релея дифракционного расслоения лазерного пучка [4]. Но при этом каждый фокус является источником черенковского излучения и поэтому дальнейшее высвечивание имеет непрерывный спектр, и еще происходит интерференция черенковского излучения [4]. Максимумы этих интерференционных картин и являются причиной образования микро- и нано- картин фазовых трансформаций материала [4]. Особенно хорошо это прослеживается в экспериментальных результатах группы Окады по облучению гексагонального карбида кремния сфокусированным лазерным излучением [1–4]. С помощью этой модели удовлетворительно объясняются экспериментальные результаты по получению филаментов в воздухе, полученные при облучении фемтосекундными лазерными импульсами [4, 6]. Результаты этих исследований могут служить подтверждением существования оптически генерируемого излучения Вавилова-Черенкова и выяснения его роли в фазовых превращениях облучаемой среды [4]. В пользу черенковского излучения как излучения филаментов говорит тот факт, что непрерывность спектра излучения филамента не зависит от природы облучающей среды (твердое тело, жидкость или газ) [4]. Характеристики черенковского излучения (черенковский угол и т. п.) более наглядно прослеживаются при облучении твердого тела [4].

Однако следует отметить, что ударный характер черенковского излучения с оптической накачкой с квантовой точки зрения заключается в том, что локальные квантовые процессы должны происходить быстрее, чем время электромагнитной «коллективизации» возбуждения или же

перехода к дальнодействию (грубо говоря, это время образования плазменных колебаний). Реально об использовании тепловых моделей, которые позволяют объяснить цитируемые экспериментальные результаты, не может быть и речи [1–6].

Само же появление филамента может быть промоделировано с помощью кинетической каскадной модели поэтапного возбуждения химических связей в режиме насыщения возбуждения облучения (лазерный эффект) [3, 4]. В этом случае можно учитывать и механизмы релаксации (излучательная или безызлучательная). Кроме того, эта модель представляет и моделирование ударных процессов с физико-химической точки зрения [1–4]. При этом главную роль играет скорость накоплений локальных возбуждений, и она в принципе может быть и меньше среднестатистической фазовой скорости света в среде, что и акцентировалось при изучении возможности возникновения черенковского излучения с оптической накачкой в любой среде [7–10].

Таким образом, для моделирования лазерно-индуцированного образования филаментов в среде нужно использовать комплексный подход, который включает методы моделирования самофокусировки лазерного излучения, черенковского излучения и других нелинейнооптических эффектов, дифракционного расширения и кинетических методов моделирования фазовых превращений в облученном материале.

1. *Trokhimchuck P.P.* Relaxed Optics. Realities and Perspectives. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2016. 260 p.
2. *Трохимчук П.П.* // Электроника ИНФО. 2014. № 1. С. 32–34.
3. *Trokhimchuck P.P.* // Int. J. Adv. Res. Phys. Sc. (IJARPS). 2018. Vol. 5. Is. 11. P. 1–14.
4. *Trokhimchuck P.P.* // Int. J. Adv. Res. Phys. Sc. (IJARPS). 2019. Vol. 6. Is. 7. P. 5–17.
5. Self-Focusing: Past and Present. / Eds. R.W. Boyd, S.G. Lukishova, Y.-R. Shen, Springer Series: Topics in Applied Physics, Vol. 114, New York: Springer, 2009. 609 p.
6. *Чекалин С.В., Кандидов В.Р.* // Успехи физических наук. 2013. Т. 156, №2, С. 133–152. (in Russian)
7. *Франк И.М.* Излучение Вавилова-Черенкова. Теоретические аспекты. Москва: Наука, 1988. 286 с.
8. *Бор Н.* Прохождение излучения через вещество. Москва: ИЛ, 1950. 148 с.
9. *Болотовский Б.М.* // Успехи физических наук. 1957. Т. 62, № 3, С. 201–246.
10. *Jelly J.V.* Čerenkov radiation and its applications. London a. o.: Pergamon Press, 1958. 306 p.
11. *Макин В.С.* Закономерности образования упорядоченных микро- и наноструктур в конденсированных средах при лазерном возбуждении мод поверхностных поляритонов. Дис. на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2013. 384 с.
12. *Шен И.* Принципы нелинейной оптики. Москва: Наука, 1989. 509 с.