

Лазерно-индуцированное образование плазмы в воде  
от наносекунды до фемтосекунды. Расчет пороговых значений, поглощение  
Коэффициенты и плотность энергии

Иоахим Ноак и Альфред Фогель

**Аннотация** — Генерация плазмы в воде мощными лазерными импульсами была исследована при длительности импульсов от 100 нс до 100 фс на основе уравнения скорости для плотности свободных электронов. Уравнение скорости было численно решено для расчета эволюции электронной плотности во время лазерного импульса и определения коэффициента поглощения и плотности энергии плазмы. Для наносекундных лазерных импульсов генерация свободных электронов в дистиллированной воде инициируется многофотонной ионизацией, но затем преобладает каскадная ионизация. Для более короткого лазерного импульса, многофотонная ионизация приобретают все большее значение, а потери на столкновение и рекомбинацию при пробое уменьшаются.

Соответствующие изменения в эволюции плотности свободных носителей заряда объясняют снижение энергетического порога пробоя и плотности энергии плазмы, наблюдаемое с уменьшением длительности лазерного импульса. Решив уравнение скорости, мы могли бы также объяснить сложную зависимость пропускания плазмы от длительности импульса, обнаруженную в предыдущих экспериментах. Было обнаружено хорошее количественное соответствие между расчетными и измеренными значениями для порога пробоя, коэффициента поглощения плазмы и плотности энергии плазмы.

Ключевые термины — Лазерно-индуцированный пробой, лазерная медицина, численное моделирование, плазмообразование.

## Введение

Когда мощные лазерные импульсы фокусируются на прозрачную среду, среда внезапно становится непрозрачной для лазерного излучения, как только превышает определенный порог освещенности. Внезапное повышение коэффициента поглощения происходит из-за образования плотной, оптически поглощающей плазмы.

Образование плазмы, также известное как лазерно-индуцированный пробой, наблюдалось в газах [1], [2], твердых телах [3], [4] и жидкостях [5], [6]. Это приводит к быстрому нагреву материала в фокальном объеме с последующим его взрывным расширением и выбросом от ударной волны. Расширение нагретого объема дополнительно приводит к образованию полости, если это происходит в твердых телах [7], или кавитационного пузырька, если это происходит в жидкостях [8]. Вызванный лазером пробой в конденсированных средах изучался главным образом в твердых телах из-за его важности для повреждения оптических компонентов в мощных лазерных системах. Однако в последние годы оптический пробой в жидкостях приобрел значительный интерес, поскольку пробой в водных жидкостях нашел различные терапевтические применения в лазерной медицине. Примерами являются офтальмологическая микрохирургия [9], [10], лазерная литотрипсия [10], [11] и ангиопластика [12].

Интерес еще больше усилился с появлением компактных фемтосекундных лазерных систем, которые значительно расширили диапазон длительностей импульсов, доступных для плазменно-опосредованной лазерной хирургии. Лазерно-индуцированный пробой в водных и глазных средах также имеет большое значение в области лазерной безопасности, поскольку это возможный механизм повреждения глаз короткими и ультракороткими лазерными импульсами [13].

Ключевыми параметрами для характеристики событий пробоя, вызванных лазером, являются: 1) порог пробоя; 2) поглощение созданной

плазмой; и 3) плотность энергии, достигаемая в плазме. Порог радиационного воздействия для пробоя определяет минимально достижимый размер лазерный эффект, используемый для обработки материалов или лазерной хирургии.

Поглощение плазмы определяет, сколько энергии поступает в среду и сколько энергии передается за пределы целевой области. Таким образом, это важно для эффективности и безопасности лазерной хирургии, если она проводится вблизи чувствительных биологических структур, таких как, например, сетчатка. Плотность энергии плазмы, с другой стороны, тесно связана с силой механических воздействий (ударных волн и кавитации), связанных с пробоем. Это определяет, как насколько разрушительным является событие поломки и насколько серьезны механические повреждения в непосредственной близости от лазерного фокуса [14], [15].

Недавние экспериментальные исследования образования плазмы в воде выявили следующие тенденции в зависимости длительности импульса от перечисленных выше ключевых параметров: 1) при уменьшении длительности импульса со 100 нс до 100 фс порог излучения для пробоя увеличивается с 10 Вт/см до 10 Вт см, но порог воздействия излучения уменьшается с 10 Дж см до 1 Дж см [16], [17]; 2) пропускание плазмы невелико при длительности импульса в наносекунду диапазон, значительно увеличивается для пикосекундных импульсов, с максимумом около 3 пс, и снова уменьшается для фемтосекундных импульсы [17], [18]; и 3) плотность энергии плазмы более чем на порядок меньше при фемтосекундных импульсах, чем при наносекундных импульсах [17], [19].

Целью данной статьи является получение лучшего теоретического понимания этих тенденций. Принимая во внимание более ранние попытки смоделировать лазерно-индуцированный пробой в конденсированных средах [20]–[25] поскольку мы в основном ограничивались исследованием порога пробоя, мы исследовали не только пороговые значения, но и эволюцию плотности свободных электронов во время лазерного импульса. Это позволило

нам проанализировать взаимодействие между многофотонная ионизация, ударная ионизация и рекомбинация во время лазерного импульса, а также для расчета коэффициента поглощения и плотности энергии создаваемой плазмы. Исследования проводились при длительности импульсов от 100 фс до 100 пс для длин волн от 532 до 1064 нм. Полученные результаты сравниваются с результатами предыдущих экспериментальных исследований.

## Теория

Взаимодействие сильных полей электромагнитного излучения с электронами в конденсированной среде с шириной запрещенной зоны, превышающей энергию фотона, может привести к генерации квазисвободных электронов в зоне проводимости посредством нелинейных процессов, таких как многофотонная ионизация или туннельный эффект [26]. Эти свободные заряды впоследствии могут получить достаточную кинетическую энергию от электрического поля за счет обратного поглощения тормозного излучения, чтобы произвести больше свободных носителей за счет ударной ионизации [20]. (На протяжении всей статьи мы используем термин “бесплатный” носители и “ионизация” как сокращения для “квазисвободных” носителей и “возбуждения в зоне проводимости”.) Быстрая ионизация среды приводит к образованию плазмы и резкому увеличению коэффициента поглощения, что, в свою очередь, приводит к быстрому переносу энергии из поля излучения в зону проводимости. средний. Этот процесс называется оптическим пробоем или вызванным лазером пробоем, когда плотность свободных электронов превышает критическое значение  $10^{18} \dots 10^{20} \text{ см}^{-3}$  [4], [20], [21]. При этом значении плазма достаточно плотная, чтобы поглощать значительную часть лазерного излучения.