

Доплеровская диагностика нестационарного выноса массы при лазерной абляции биотканей

А.К.Дмитриев, В.Н.Кортунов, В.А.Ульянов

Продемонстрированы возможности использования автодинного детектирования обратнорассеянного излучения для исследования нестационарного массопереноса при абляции биотканей импульсами CO₂-лазера. Показано, что различия в характере лазерно-индуцированного выноса массы обусловлены структурными особенностями биотканей.

Ключевые слова: лазерное излучение, абляция, биоткань.

Основной причиной лазерной абляции биотканей является локальный энерговыход, приводящий к фазовым переходам, интенсивному испарению и выносу массы вещества в виде паракапельной смеси и частиц ткани. В зоне воздействия излучения формируется поле скоростей гидродинамических потоков, зависящее как от структурных особенностей ткани, так и от режимов ее облучения. Ранее нами было показано, что самоиндуцированная модификация спектра лазерного излучения, обусловленная попаданием в резонатор обратнорассеянного излучения с доплеровским сдвигом частоты (автодинный эффект), является источником информации о типе биоткани непосредственно в процессе ее лазерного разрушения [1, 2]. В настоящей работе автодинное детектирование обратнорассеянного излучения (рис. 1) используется для исследования в реальном масштабе времени выноса массы при лазерной абляции тканей разных типов.

Образцы тканей печени и жира свиньи *in vitro* облучались длинными ($t \sim 300$ мс) одиночными импульсами одномодового CO₂-лазера. Плотность мощности излучения в фокусе пучка составляла 15 кВт/см². Непосредственно перед образцами в горизонтальной плоскости, приблизительно на расстоянии 1 мм от оси лазерного пучка (параллельно ей), помещался диск, вращающийся с постоянной угловой скоростью. Вращение диска обеспечивало пространственно-временное распределение осаждавшихся на его поверхности продуктов разрушения ткани. Одновременно с помощью неохлаждаемого HgCdTe-приемника регистрировался доплеровский сигнал. Последующее фурье-преобразование исходного сигнала позволяло получать доплеровские спектры в диапазоне частот 10–600 кГц. В качестве количественной характеристики изменения доплеровского сигнала за время действия лазерного импульса использовалась его интегральная мощность S .

Изменение S за время действия лазерного импульса при лазерной абляции жировой ткани представлено на рис. 2. Абляция жира сопровождалась квазипериодическими выбросами продуктов разрушения – жировых ка-

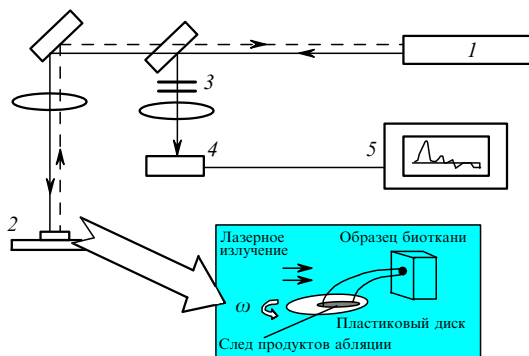


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – CO₂-лазер; 2 – образец; 3 – ослабитель; 4 – неохлаждаемый HgCdTe-детектор; 5 – компьютер.

пель диаметром от 15 до 300 мкм. Стрелками на рис. 2 показаны моменты наиболее интенсивного выброса продуктов – «факелов», наблюдаемых на диске. Как следует из рис. 2, положения «факелов» на диске совпадают с экстремумами зависимости $S(t)$. Лазерная абляция печени сопровождалась равномерным выносом и осаждением на диске частиц ткани неправильной формы размером 15–50 мкм. При этом колебательного характера выноса массы не наблюдалось. Соответствующая зависимость $S(t)$ для ткани печени представлена на рис. 3.

Различия в характере выноса массы при лазерной абляции жира и печени обусловлены, на наш взгляд, структурными особенностями этих тканей. Основным компонентом, поглощающим излучение CO₂-лазера, является внутритканевая вода (коэффициент поглощения $\mu \sim 830$ см⁻¹ для $\lambda = 10.6$ мкм). В жировой ткани вода сильно

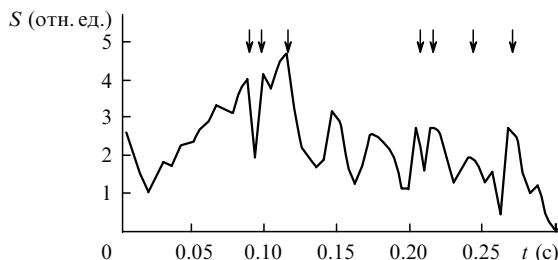


Рис. 2. Зависимость интегральной мощности доплеровского сигнала S от времени лазерного воздействия t на жировую ткань.

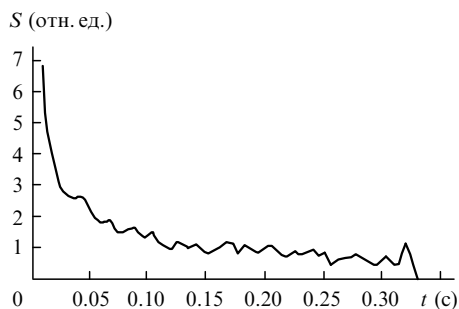


Рис.3. Зависимость интегральной мощности доплеровского сигнала S от времени лазерного воздействия t на ткань печени.

локализована и содержится главным образом в перегородках, отделяющих друг от друга жировые глобулы; ее общее весовое содержание составляет $\sim 30\%$. Для излучения CO_2 -лазера жировая ткань является гетерогенной поглощающей средой, т. к. вещества, содержащиеся в глобулах – жирные кислоты и глицериды – практически прозрачны для него ($\mu \sim 1 \text{ см}^{-1}$ для $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$) [3]. Напротив, в печени вода является основным составным компонентом (80 % по весу) и равномерно распределена в объеме ткани.

Указанные структурные различия определяют характер выноса массы в этих тканях. Абляция печени идет преимущественно путем интенсивного поверхностного испарения, сопровождающегося равномерным выносом продуктов (рис.3) – смеси водяного пара, капель и мелких органических фрагментов ткани. Интенсивность испарения падает по мере углубления дна кратера. При лазер-

ной абляции жировой ткани доминирует взрывное вскипание воды, локализованной внутри ткани. Расширение перегретого водяного пара приводит к быстрому росту внутритканевого давления, разрушению перегородок между жировыми глобулами и резкому выбросу смеси, состоящей главным образом из паров воды и содержащего жировых глобул. На начальном этапе абляции, пока необходимое для запуска механизма объемного разрушения внутритканевое давление не достигнуто, доминирует испарение. Переход от поверхностного испарения к объемному взрывному вскипанию и от непрерывного выноса продуктов к импульсному их выбросу соответствует установлению колебательного характера изменения $S(t)$ (приблизительно через 70 мс после начала лазерного импульса, как следует из рис.2).

Итак, различия в характере лазерно-индуцированного выноса массы обусловлены структурными особенностями биотканей. Автодинное детектирование обратнорассеянного излучения является эффективным методом получения информации о механизме лазерной абляции реальных биотканей как неоднородных многокомпонентных сред.

Работа поддержана грантом РФФИ № 00-02-16469.

1. Гордиенко В.М., Дмитриев А.К., Коновалов А.Н., Курочкин Н. Н., Путивский Ю.Я., Панченко В.Я., Ульянов В.А. *Квантовая электроника*, **23**, 869 (1996).
2. Ульянов В.А., Гордиенко В.М., Дмитриев А.К., Кортунов В.Н., Панченко В.Я., Путивский Ю.Я. *Изв.РАН. Сер.физич.*, **63**, 2068 (1999).
3. Ross E.V., Domankevitz Y., Anderson R.R. *Lasers Surg.Med.*, **21**, 59 (1997).