

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОХРОМНЫХ ПЛЕНОК GAFCHROMIC EBТЗ

О.С. Таларико<sup>1,2,3</sup>, Т.А. Крылова<sup>2</sup>, И.М. Лебедеко<sup>2,3</sup>, Н.Н. Мельник<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

<sup>2</sup> Национальный медицинский исследовательский центр онкологии  
им. Н.Н.Блохина Минздрава России, Москва

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

Показана возможность применения метода комбинационного рассеяния света для считывания показаний с радиохромных пленок. Показана возможность построения калибровочных кривых для определения поглощенной дозы и картирования поверхности пленки. Приведены характерные спектры комбинационного рассеяния пленок Gafchromic EBТЗ в облученном и необлученном состояниях.

Ключевые слова: радиохромные пленки Gafchromic EBТЗ, дозиметрия *in vivo*, комбинационное рассеяние света

### Введение

В лучевой терапии существует множество проблем, связанных с измерением распределения изодоз ионизирующего излучения и определением глубинной дозы. Измерения распределений доз в высокоградиентных областях с использованием обычных измерительных систем, таких как ионизационные камеры (ИК), полупроводниковые детекторы (ППД) или термолюминесцентные детекторы (ТЛД), вызывает определенные трудности. ИК и ППД не обеспечивают достаточного пространственного разрешения для некоторых методов облучения. Даже ТЛД с небольшими размерами становятся громоздкими и трудоемкими, когда необходимо измерить одно- или двумерные распределения дозы. Используя обычные процедуры считывания показаний ТЛД дозиметрические данные невозможно сохранять в архиве. Рентгеновские пленки обладают относительно высоким пространственным разрешением, но их поглощаю-

щие свойства не соответствуют биологическим тканям. Недостатком фотопленки является также чувствительность к освещению в помещении и необходимость химической обработки.

Указанные трудности привели к поиску дозиметров с высоким пространственным разрешением, которые не требуют специальной процедуры обработки и дают устойчивые значения абсолютной поглощенной дозы с приемлемой точностью при простоте обработки и анализа данных. Этим требованиям полностью соответствует радиохромная пленочная дозиметрия. Радиохромные пленочные дозиметры представляют собой средство измерений поглощенной дозы с очень высоким пространственным разрешением и относительно низкой спектральной чувствительностью. Они нечувствительны к видимому свету, что обеспечивает простоту обработки и анализа данных даже в освещенном помещении. Радиохромные дозиметры не требуют химической обработки – изменение цвета указывает на уровень облуче-

ния. Формирование изображения происходит в результате окрашивания пленки за счет процесса полимеризации, в котором энергия переносится с фотона или частицы на молекулы мономера. Посредством химических изменений происходит изменение цвета пленки [1, 2].

Радиоцветные пленки представляют интерес для использования в дозиметрии с высоким пространственным разрешением. Особенно полезными пленки могут быть для нужд брахитерапии и при дозиметрии малоразмерных полей. В этих случаях от измерений *in vivo* требуется оценка дозы в регионах с высоким градиентом [2]. Радиоцветные пленки представляют собой подходящую альтернативу привычным детекторам, так как не ограничены малым размером чувствительного объема, обладают возможностью быстрого считывания результатов. Другой важной характеристикой радиоцветных пленок является их элементный состав, близкий к составу воды. Наконец, радиоцветные пленки доступны в форме двумерных дозиметров.

Для считывания результатов традиционно используются денситометры для измерений оптической плотности пленок [4–6]. Однако с недавнего времени исследуется возможность применения методики комбинационного рассеяния света, которая может обеспечить пространственные и временные измерения поглощенной энергии на клеточном уровне [2].

### Комбинационное рассеяние света

Комбинационное рассеяние света (КРС) открыто в 1928 г независимо двумя учеными: советским ученым Л.И. Мандельштамом и индийским ученым Ч. Раманом, который в 1930 г. получил за это открытие Нобелевскую премию. В англоязычной литературе данное рассеяние известно под названием эффекта Рамана (Raman effect).

В основе метода КРС света лежит эффект неупругого рассеяния оптических фотонов. Если облучать среду (твердое тело, жидкость, газ) монохроматическим излучением, то в результате взаимодействия излучения и вещества в спектре рассеянного излучения может появиться дополнительное излучение с частотой  $\omega_s = \omega_L \pm \Omega$ , где  $\omega_s$  – частота рассеянного излучения,  $\omega_L$  – частота излучения возбуждающего лазера,  $\Omega$  – собственная частота колебания исследуемой среды. В процессе рассеяния выпол-

няются законы сохранения импульса и энергии. При приближении энергии возбуждающего излучения к энергии электронного перехода вещества происходит увеличение сечения рассеяния. Это так называемое резонансное КРС [3].

### Экспериментальная установка для КРС

На рис. 1 показана принципиальная схема эксперимента с использованием методики КРС. Образец облучается излучением лазера. Рассеянное излучение пропускается через монохроматор или спектрометр и попадает на фотоэлектронный умножитель или многоканальный детектор. Данные записываются в память компьютера. В наших экспериментах спектры КРС регистрировались на спектрометре U-1000 производства фирмы Jobin-Yvon (Франция).

Измерения образцов выполняли в геометрии “на отражение” (рис. 2). Данная геометрия рассеяния обладает рядом преимуществ: использование микрообъектива позволяет выбрать участок образца без царапин и пылинок; при падении возбуждающего излучения на образец под углом отраженный свет не попадает в прибор; использование Р-поляризованного света позволяет увеличить проникновение излучения в непрозрачный образец и тем самым увеличить интенсивность сигнала.

Обычно в спектрах КРС проявляются собственные частоты колебаний атомов и групп атомов. Для данной среды набор собственных колебаний зависит от вида атомов и пространственной структуры среды. Известно, что спектры КРС любого вещества обладают

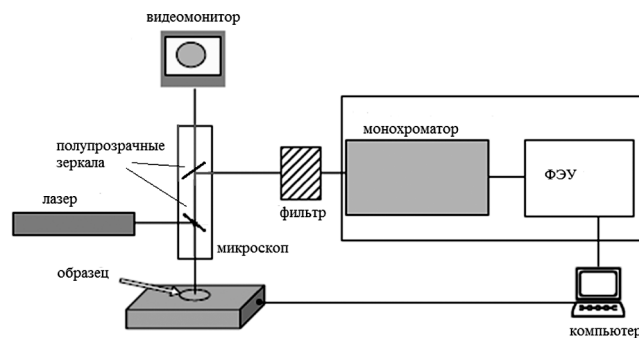
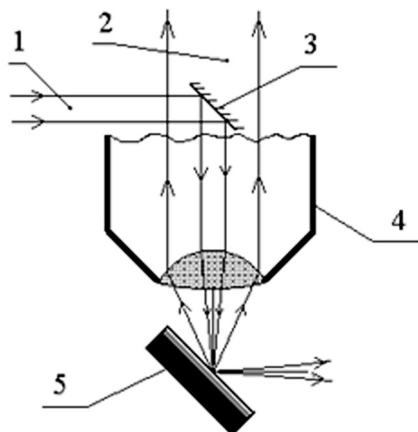


Рис. 1. Схема эксперимента с использованием методики комбинационного рассеяния света



**Рис. 2.** Оптическая схема регистрации спектров КРС в геометрии «на отражение»: 1 – возбуждающее лазерное излучение; 2 – рассеянное излучение; 3 – зеркало; 4 – объектив микроскопа; 5 – исследуемый образец

особенностью «отпечатков пальцев», т.е. невозможно спектр КРС одного вещества получить от какого-либо другого вещества или соединения. И наоборот, если спектр какого-либо вещества и спектр неизвестного вещества совпадают, то это одно и то же вещество.

В экспериментах по КРС регистрируются спектры, содержащие информацию как о собственных колебаниях решетки/атомов, входящих в исследуемую систему, так и о люминесценции исследуемого объекта.

### Считывание показаний с радиоохромных пленок

Воздействие ионизирующего излучения приводит к изменению цвета пленки. Изначально бледнозеленый цвет радиоохромных пленок Gafchromic EBТЗ изменяется до темно-зеленых оттенков из-за полимеризации. Никакой физической, химической или термической обработки не требуется, чтобы выявить этот цвет. Цвет пленки относительно слабо изменяется в течение первых 24 ч после облучения, т.е. эффект обесцвечивания незначительный. Изменение цвета радиоохромных пленок обычно измеряется в узком спектральном диапазоне с помощью денситометра. Эти измерения выражаются в терминах увеличения по-

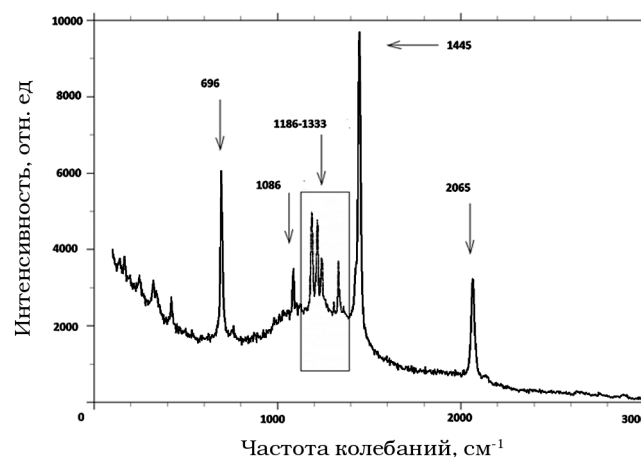
глощения (т.е. оптической плотности) или коэффициента пропускания.

### Результаты эксперимента

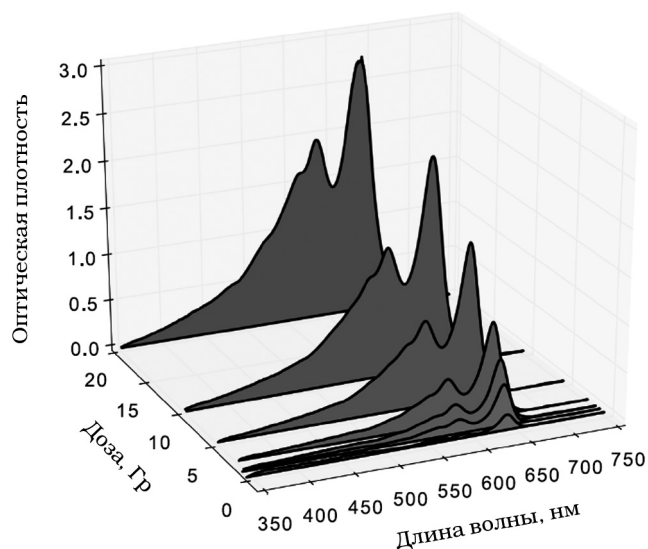
Радиоохромные пленки Gafchromic EBТЗ разрезали на пластины размером примерно 3×3 см. Пленки подвергались воздействию фотонов с номинальной энергией 6 МэВ на ускорителе электронов фирмы Varian, при этом поглощенная доза находилась в диапазоне 0–40 Гр. Условия облучения были стандартными: поле 10×10 см, РИП=100 см, пленки находились между пластинами фантома из твердой воды на расстоянии 1,5 см от верхней поверхности.

Метод КРС применялся к облученным и необлученным радиоохромным пленкам. Общий вид полученного спектра приведен на рис. 3. Пики соответствуют колебательным модам материала и подробно описаны в [1].

На рис. 4 представлены спектры поглощения пленок для разных поглощенных доз, взятые из работы [2]. Видны два пика в районе 570 нм и 630 нм. Пики в спектрах поглощения говорят о наличии соответствующих электронных состояний. При приближении энергии возбуждающего излучения к энергии электронного перехода вещества происходит увеличение сечения рассеяния. Поэтому из имеющегося набора возбуждающих линий были выбраны



**Рис. 3.** Общий вид спектра радиоохромной пленки Gafchromic EBТЗ. Стрелками обозначены значения пиков, характеризующих колебательные моды материала



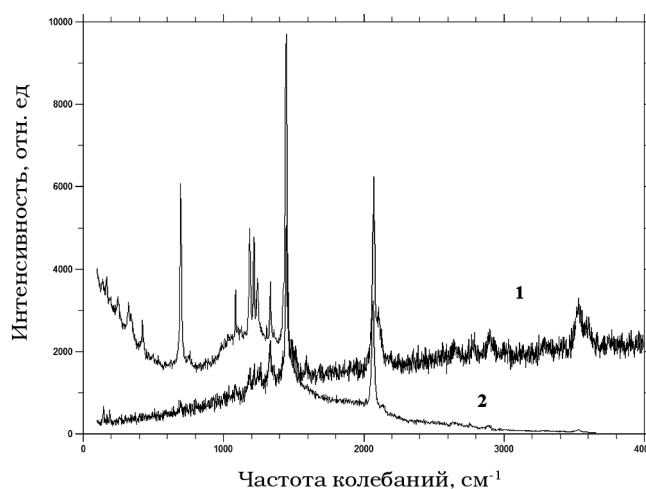
**Рис. 4.** Спектр поглощения для различных доз [2]

наиболее совпадающие по длине волны линии с данными резонансными областями. Таким образом, для возбуждения использовались линии 647,1 и 456,9 нм как совпадающие со спектрами поглощения.

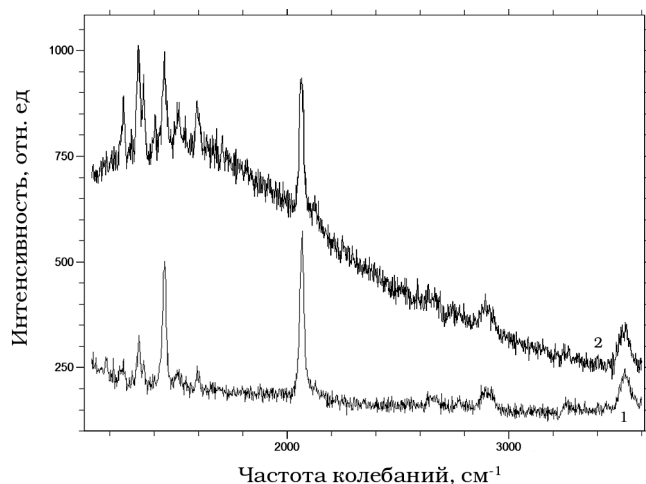
На рис. 5 сопоставлены спектры, полученные для этих возбуждающих линий. Линия 2 – спектр при возбуждении 647,1 нм. В данных условиях возбуждения в спектре по рассеянному свету резонанса нет, так как мы находимся за областью электронного перехода. Пик в районе  $3500\text{ см}^{-1}$  почти неразличим. Потребовались более тщательные эксперименты с большим временем экспозиции для обнаружения данного пика (красная линия спектра – увеличенная часть спектра, находящегося в диапазоне, превышающем  $3000\text{ см}^{-1}$  при возбуждении 647,1 нм). Линия 1 на рис. 5 характеризует спектры КРС радиохромных пленок, полученные при возбуждении линией лазера с возбуждающей длиной волны 456,9 нм. В этом случае наблюдается резонанс по рассеянному свету, и полосы, не проявившиеся при возбуждении 647,1 нм оказываются легко различимыми. Наблюдается увеличение интенсивности для всей области, лежащей справа от  $2000\text{ см}^{-1}$ .

Таким образом, показано, что для исследования конкретных пиков, характеризующих различные колебательные моды данного материала необходимо применять возбуждающее излучение с разными длинами волн.

На рис. 6 представлено сравнение спектров КРС, полученных для облученных (поглощенная доза 40 Гр) и необлученных пленок, полученное при возбуждающей длине волны лазера 457,9 нм. Видно, что происходит перераспределение интенсивности между пиками, что указывает на возможность построения калибровочных кривых. Кроме того, происходит изменение интенсивности люминесценции от подложки. При исследовании спектров КРС пленок, облученных промежуточными дозами (от 0 до 40 Гр) наблюдается



**Рис. 5.** Сравнение спектров комбинационного рассеяния света для различных возбуждающих линий лазера, спектр (1) соответствует 456,9 нм, спектр (2) соответствует линии лазера 647,1 нм



**Рис. 6.** Сопоставление спектров КРС для облученной (1) и необлученной (2) пленки

тенденция перераспределения интенсивностей пиков, особенно в области 1200–1500 см<sup>-1</sup>. Кроме того, необходимо отметить, что современные установки для получения спектров комбинационного рассеяния света позволяют производить картирование поверхности с микронным разрешением. Это обеспечивает возможность измерений распределения поверхностной дозы с очень высокой точностью.

## Выводы

В работе оценены изменения интенсивностей пиков спектров КРС для облученных и необлученных радиохромных пленок. Данный эффект требует дальнейшего исследования и тщательного измерения спектров. Первые результаты говорят о возможности построения калибровочной кривой по эффекту КРС для определения поглощенной дозы пленками и возможности применения радиохромных пленок в клинической дозиметрии для определения пространственного распределения доз с микронным разрешением.

## Список литературы

1. Mirza J.A., Park H., Park S.-Y., Ye S.-J. Use of radiochromic film as a high-spatial resolution dosimeter by Raman spectroscopy // *Med. Phys.* 2016. Vol. 43. P. 4520–4528.
2. Callens M., Crijns W., Simons V. et al. A spectroscopic study of the chromatic properties of GafChromic™ EBT3 films // *Med. Phys.* 2016. Vol. 4., P. 1156–1163.
3. Handbook of Raman Spectroscopy, I.R. Lewis, H.G. Edwards (ed.) – New York–Basel: Marcel Dekker, 2001.
4. Сухих Е.С., Сухих Л.Г., Маликов Е.Л. Калибровка радиохромных пленок на пучках рентгеновского излучения // *Мед. физика.* 2015. № 4(68). С. 16–23.
5. Сухих Е.С., Филатов П.В., Маликов Е.Л. Калибровка полимерной пленки Gafchromic EBT3 на электронном и фотонном пучках // *Мед. физика.* 2013. № 2(58). С. 50–60.
6. Коконцев А.А., Русецкий С.С., Смыслов А.Ю., Васильев В.Н. Сравнение методик верификации индивидуальных планов пациентов для технологии лучевой терапии с модуляцией интенсивности пучка // *Мед. физика.* 2016. № 4(72). С. 13–23.

## THE USE OF RAMAN SCATTERING TO STUDY RADIOCHROMIC FILMS GAFCHROMIC EBT3

O.S. Talarico<sup>1,2,3</sup>, T.A. Krylova<sup>2</sup>, I.M. Lebedenko<sup>2,3</sup>, N.N. Melnik<sup>1</sup>

<sup>1</sup> P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russia

<sup>3</sup> National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia

The possibility of Raman scattering method using for reading out exposed radiochromic films is discussed. The possibility of calibration curves plotting for the determination of absorbed dose and the dose surface mapping of the film are shown. Typical Raman spectra of irradiated and unirradiated Gafchromic EBT3 films are presented.

Key words: radiochromic films Gafchromic EBT3, dosimetry in vivo, Raman scattering

E-mail: [tanya.mifi@list.ru](mailto:tanya.mifi@list.ru)