

КОНФОКАЛЬНЫЙ КОЛЛИМАТОР ДЛЯ РАДИОНУКЛИДНОЙ ДИАГНОСТИКИ И РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА

© 2020 г. С. И. Зайцев^{a,**}, О. В. Трофимов^a,
Я. Л. Шабельникова^{a,*}, М. В. Чукалина^{b,c}

^a Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
Россия, 142432, Черноголовка Московской обл., ул. Академика Осипьяна, 6

^b Институт проблем передачи информации РАН
Россия, 127051, Москва, Большой каретный переулок, 19

^c Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН
Россия, 119333, Москва, Ленинский просп., 59

*e-mail: janeshabeln@yandex.ru

**e-mail: zaitsev@iptm.ru

Поступила в редакцию 31.12.2019 г.

После доработки 31.12.2019 г.

Принята к публикации 11.01.2020 г.

В методах радионуклидной диагностики (в медицине) и рентгеновского флуоресцентного анализа (в материаловедении) одним из подходов к получению информации о пространственном распределении детектируемого вещества является использование специального прибора, ограничивающего поле зрения детектора, — конфокального коллиматора. Этот прибор представляет собой монолитную конструкцию с большим числом прямых каналов, оси которых направлены в одну точку — фокус конфокального коллиматора. В работе продемонстрирована возможность создания конфокальных коллиматоров методом трехмерной печати, преимуществами которого являются надежность, относительная простота и широкая доступность. Для радионуклидной диагностики показано преимущество замены коллиматора, содержащего один канал, на конфокальный коллиматор, а именно существенное (2–7 раз) повышение чувствительности при улучшении разрешения примерно в 9 раз. Также продемонстрирована возможность с помощью конфокального коллиматора определять глубину залегания источника излучения, т.е. измерять трехмерное распределение излучающего (флуоресцирующего) вещества.

DOI: 10.31857/S0032816220030209

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в радионуклидной диагностике используются γ -зонды различных производителей [1–5]. Среди присутствующих на рынке моделей можно упомянуть следующие: C-Trak Gamma Probe от Care Wise [1], γ -зонд EuroProbe3 компании Capintec [2], γ -зонды компании Crystal-Photonics [3], Neoprobe Gamma Detection System от Mammatome [4], продукт компании Dilon Navigator [5]. Все γ -зонды имеют схожую конструкцию (рис. 1): коллиматор, выполненный из материала, способного поглощать γ -излучение, сцинтилляционный кристалл и фотоэлектронный умножитель. Гамма-зонд сканирует исследуемый объем, и роль коллиматора состоит в том, чтобы на сцинтиллятор попадали только кванты, идущие из определенной небольшой части этого объема, а остальные кванты отсекались [6]. Это достигается тем, что апертура коллиматора беспрепятственно пропускает кванты из исследуе-

мой области к поверхности сцинтиллятора, а излучение из соседних областей попадает на материал коллиматора и в нем поглощается [7].

Основная проблема всех современных γ -зондов состоит в том, что их чувствительность и разрешение связаны обратной зависимостью. Если увеличить диаметр коллиматора, то за счет увеличения телесного угла, высекаемого апертурой,

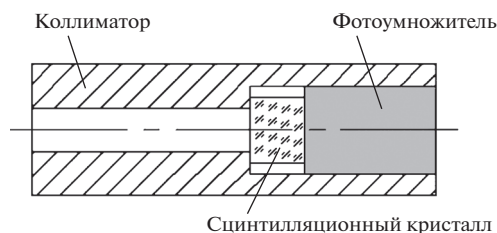


Рис. 1. Принципиальная схема γ -зонда.

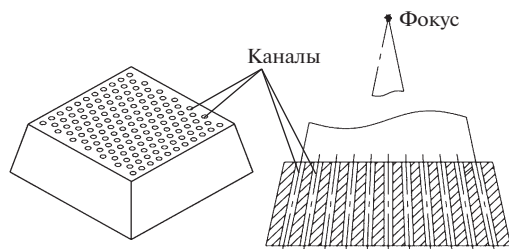


Рис. 2. Концепция конструкции конфокального коллиматора: общий вид (слева) и разрез в осевом сечении (справа).

повысится чувствительность. При этом автоматически ухудшится разрешение, так как сцинтиллятор будет “видеть” больший объем. Путем применения конфокальных коллиматоров с большим числом каналов можно многократно улучшить оба эти параметра одновременно: разрешение можно повысить уменьшением диаметра канала, а чувствительность — увеличением их числа.

Кроме того, ожидается, что поле чувствительности конфокального коллиматора в направлении вдоль оси будет иметь максимум вблизи точки фокуса, как это было показано в [7] по результатам моделирования для прибора, используемого в рентгенофлуоресцентном анализе. То есть с помощью конфокального коллиматора возможно будет определять глубину залегания источника излучения и таким образом получать трехмерную картину распределения источников в исследуемом объекте.

Изготовление коллиматора с конфокальным массивом отверстий — сложная и дорогостоящая технологическая задача. Принципиальная конструкция такого прибора показана на рис. 2. Конфокальный коллиматор [8–11] представляет собой монолитную деталь, в которой имеется большое число сквозных отверстий (каналов), выполненных таким образом, что их оси пересекаются в одной точке — фокусе коллиматора. Фокус расположен в пространстве над верхним торцом коллиматора. Отверстия могут иметь любую требуемую форму поперечного сечения.

Предложенные ранее способы создания конфокальных коллиматоров описаны в работах [8–11]. В работе [8] описан коллиматор, конструкция которого состоит из набора металлических пластин

с массивом протравленных отверстий. Для повышения разрешения такого прибора диаметр отверстий должен быть предельно малым, что из-за невозможности протравить отверстия с большим аспектным отношением требует уменьшения толщин пластинок и, как следствие, увеличения их числа. Это обуславливает высокую сложность технологии, большое время и значительную стоимость изготовления прибора.

В [9–11] описано формирование коллиматора послойной сшивкой молекул фотополимеризуемой композиции, т.е. методом стереолитографии. В работах [10, 11] рассмотрено создание прибора как путем выращивания матрицы с полыми каналами из фотоотверждаемого полимера, в который добавлено вещество-поглотитель, так и путем формирования каналов из полимера с последующим заполнением пространства между ними поглотителем. Каналы прохождения рентгеновского излучения в этих работах предложено соединять дополнительными жесткими связками. Изготовление коллиматора методом стереолитографии не столь технологически сложно, как в [8], но все же весьма времязатратно и дорого.

В настоящей работе предложено для создания коллиматоров использовать метод 3D-печати, который надежен, широко доступен и сравнительно дешев, а значит, может быть использован для серийного изготовления многоканальных коллиматоров.

СОЗДАНИЕ ПРОТОТИПА КОЛЛИМАТОРА И ИЗМЕРЕНИЕ ЕГО РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для изготовления прототипа конфокального коллиматора использовался 3D-принтер, работающий по методу послойного наплавления пластиковой нити (FDM — fused deposition modeling). Была использована нить из полилактида. Геометрические характеристики изготовленного прототипа приведены в табл. 1, а его внешний вид показан на рис. 3.

Для исследования рабочих параметров конфокальных коллиматоров с последующей оптимизацией их свойств был применен метод измерений с использованием источника видимого света. Этот метод не предполагает вовлечения радиоак-

Таблица 1. Геометрические параметры изготовленного прототипа коллиматора

Диаметр каналов, мм	Минимальный септум, мм	Расстояние от переднего торца до фокуса, мм	Высота коллиматора, мм	Угол раствора конфокального массива, градус	Размеры в плане, мм	Число каналов
~2	~1	100	100	15.7	62 × 62	85

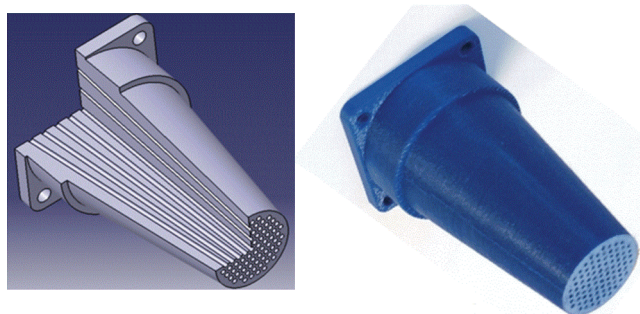


Рис. 3. Конфокальный коллиматор: слева – компьютерная модель, справа – готовое изделие из полилактида.

тивных источников, что позволило сделать исследование более безопасным и дешевым.

Принципиальная схема и внешний вид изготовленного измерительного стенда представлены на рис. 4. Измерения проводились в горизонтальной осевой плоскости при различных положениях коллиматора вдоль оси. Источник видимого света перемещался в поперечном направлении, а коллиматор – в продольном. Прошедший через коллиматор свет собирался линзой на приемное окно фотоприемника. Для уменьшения эффекта неполного попадания на линзу прошедшего через коллиматор излучения за ним было помещено рассеивающее матовое стекло. По величине сигнала, регистрируемого фотоприемником, судили об относительном значении чувствительности коллиматора в данной точке. По результатам измерений было получено поле чувствительности коллиматора. Сечения поля вдоль оси прибора и в поперечном направлении на расстоянии, равном фокусному, представлены на рис. 5.

Поперечное и продольное пространственное разрешение коллиматора можно определить по ширине графиков на полувысоте соответствующих профилей поля чувствительности на рис. 5. По величине сигнала на фотоприемнике можно судить об изменении чувствительности при изменении взаимного расположения коллиматора и источника. Максимальное значение чувствительности прибора удобно оценивать с помощью телесного угла, высекаемого коллиматором в точке, расположенной на оси на расстоянии, равном фокусному, от его переднего торца. На рис. 6 представлена схема расчета чувствительности для обычного одноканального коллиматора. Коллиматор высекает некоторый телесный угол, величина которого определяется размером апертуры и расстоянием от источника до скантиллятора. Чувствительность конфокального коллиматора характеризуется суммой телесных углов всех его каналов. Строго говоря, чувствительность определяется не только величиной апертуры, но также свойства-

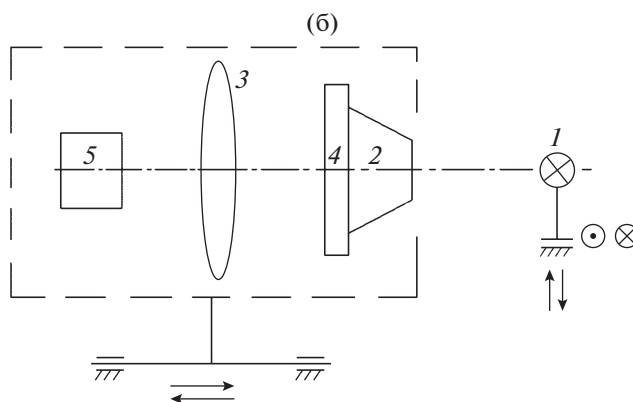
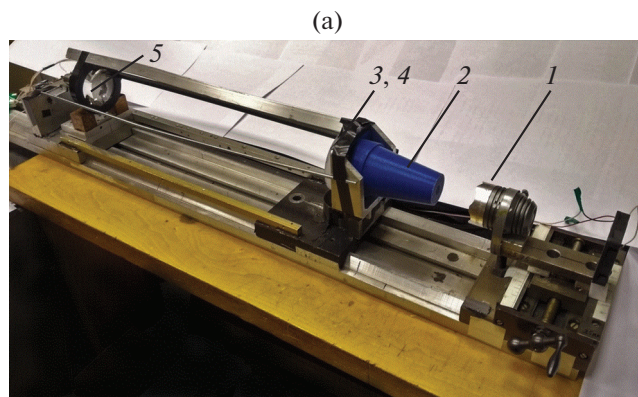


Рис. 4. Измерительный стенд: а – фотография, б – схема. 1 – источник излучения, 2 – конфокальный коллиматор, 3 – линза, 4 – матовое стекло, 5 – фотодиод.

ми поверхности канала, поскольку часть лучей может проходить через коллиматор, отражаясь от стенок. В данной работе было рассмотрено только прохождение лучей через каналы коллиматора на просвет, поскольку эффект отражения существенно подавляется рассеянием на шероховатостях поверхности каналов.

Значения разрешения, полученные в результате анализа профилей на рис. 5, и оценки чувствительности коллиматора по телесному углу приведены в табл. 2. Эти параметры сравнивались с рабочими характеристиками одноканального коллиматора, описанного в работе [12]. Был выбран цилиндрический коллиматор № 3 с конической передней частью (см. стр. 44 в [12]). В отличие от конфокального, чувствительность этого коллиматора монотонно падает при удалении от апертуры, а поперечное разрешение, напротив, линейно растет. Приведенная в табл. 2 оценка поперечного разрешения одноканального коллиматора на расстоянии 100 мм от переднего торца была получена из значения поперечного разрешения на расстоянии 50 мм в [12] в приближении линейного роста величины разрешения.

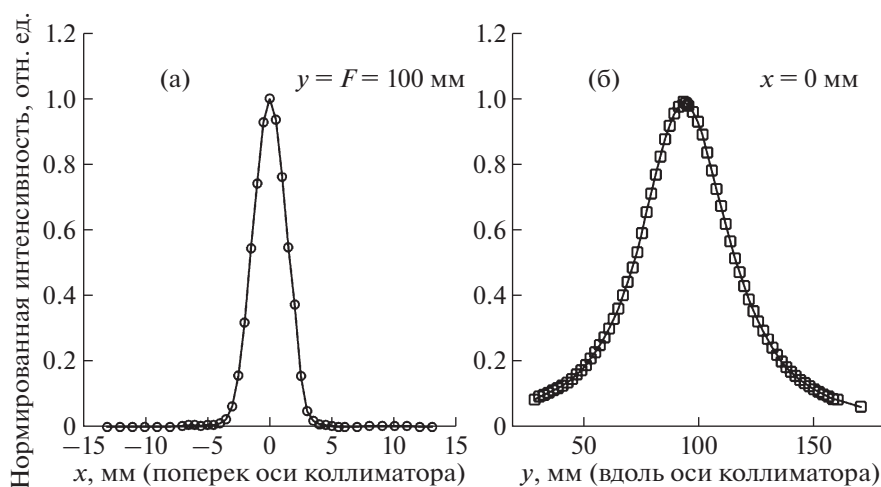


Рис. 5. Поперечное (а) и продольное (вдоль оси коллиматора) (б) сечения поля чувствительности конфокального коллиматора. $y = 100$ мм – расстояние от источника до переднего торца коллиматора.

Величина поперечного разрешения коллиматора № 3 [12] на воздухе составила ~ 26 мм на расстоянии 50 мм и 52 мм на расстоянии, равном фокусному расстоянию конфокального коллиматора (100 мм). Аналогичная величина для конфокального коллиматора (~ 3 мм) примерно на порядок (в 9 раз) меньше. Наш расчет для одноканального коллиматора из работы [12] показал, что чувствительность, определяемая телесным углом, высекаемым коллиматором, составляет 3.5 кв. градуса на расстоянии 100 мм от детектора до источника, а на рабочем расстоянии 50 мм этого коллиматора приблизительно равна 12.7 кв. градуса. То есть чувствительность конфокального коллиматора примерно в 2 раза выше чувствительности одноканального коллиматора на расстоянии 50 мм и в 7 раз выше на расстоянии 100 мм. Кроме того, конфокальный коллиматор демонстрирует продольное разрешение (~ 42 мм для данного прототипа), которое тем лучше, чем больше угол раствора конфокального массива. То есть, в отличие от обычного, он имеет свойство “видеть” глубину залегания источника.

Все вышеизложенное приводит к выводу о наличии существенных преимуществ у конфокаль-

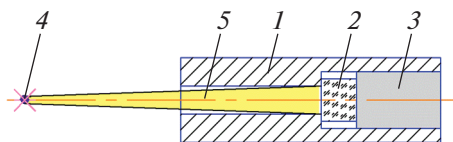


Рис. 6. Схема расчета чувствительности коллиматора (на примере обычного коллиматора с одним каналом). 1 – коллиматор, 2 – сцинтиляционный кристалл, 3 – фотоэлектронный умножитель, 4 – точечный источник, 5 – телесный угол, высекаемый коллиматором.

ных коллиматоров перед обычными одноканальными. Применение конфокальных коллиматоров в радионуклидной диагностике позволит точнее определять местоположение пораженной ткани и четче – границу между пораженной и здоровой тканью. В рентгенофлуоресцентном анализе применение конфокальных коллиматоров и аддитивных технологий их производства позволит расширить номенклатуру используемых детекторов и диапазон применения метода.

ВЫВОДЫ

Таким образом, разработан и изготовлен прототип конфокального коллиматора, продемонстрирована возможность использования аддитивных методов для его изготовления. Предложен безопасный метод измерения рабочих параметров конфокальных коллиматоров, таких как продольное и поперечное разрешение, а также чувствительность.

Проведено сравнение и показаны преимущества конфокальных коллиматоров перед обычными одноканальными. В частности, конфокальные коллиматоры демонстрируют значительно лучшее поперечное разрешение при многократном увеличении чувствительности, что весьма существенно для медицинской радионуклидной диагностики и рентгенофлуоресцентного анализа. Также показано, что конфокальный коллиматор имеет продольное разрешение, что дает возможность определять глубину залегания источника излучения. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими оценками, полученными ранее в [13].

В ходе дальнейших работ планируется применение радиоактивного источника для исследования рабочих параметров конфокального колли-

Таблица 2. Сравнение рабочих параметров коллиматоров

Тип коллиматора	Разрешение, мм		Чувствительность в фокусе, кв. градус
	поперечное в сечении фокуса	продольное в осевом сечении	
Конфокальный	~3	~42	~22
Одноканальный [12]	~26 (на 50 мм) ~52 (на 100 мм)	нет	~12.7 (на 50 мм) ~3.5 (на 100 мм)

матора из тяжелого, поглощающего γ -лучи материала с целью оценки влияния частичного прохождения излучения через матрицу коллиматора и отражения/рассеяния на стенках каналов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают А.П. Наумову благодарность за помощь в создании прототипа конфокального коллиматора.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 19-01-00790, 17-29-03492, 18-29-26019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C-Trak Galaxy Gamma Probe System – Care Wise. <https://carewise.com/c-trak-gamma-probe-instruments/c-trak-galaxy#probes> (accessed 27 November 2019)
2. EuroProbe3. Capintec, Inc. <https://capintec.com/product/europrobe3/> (accessed 27 November 2019)
3. Crystal Photonics GmbH. Crystal Optical Systems. <https://crystal-photonics.com/enu/products/probe-straight-enu.htm> (accessed 27 November 2019)
4. Neoprobe – Gamma Detection System. Mammotome, Neoprobe, Sentimag. <https://www.mammotome.com/neoprobe/> (accessed 27 November 2019)
5. Surgical Solutions. Dilon Diagnostics. <http://dilon.com/surgical-solutions/> (accessed 27 November 2019)
6. Зайцев С.И., Евсеев А.В., Чукалина М.В. // Техника машиностроения. 2008. Т. 67. С. 5.
7. Chukalina M.V., Simionovici A., Zaitsev S.I., Vanegas C.J. // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. 2007. V. 62. P. 544.
8. Richard A.D. US Patent 4288697. 1981.
9. Комардин О.В., Альберт Ф.Л., Лазарев П.И. Патент № RU 2119659. // Изобретения. 1998.
10. Зайцев С.И., Галиулин Э.А., Евсеев А.В. Патент № RU 46109 U1 // Полезные модели. 2004.
11. Зайцев С.И., Галиулин Э.А., Евсеев А.В. Патент № RU 2 248 635 C2 // Изобретения. 2002.
12. Бердникова А.К. Дис.... канд. физ.-мат. наук. М.: НИЯУ МИФИ, 2016.
13. Шабельникова Я.Л., Чукалина М.В. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 10. С. 6.