

МАТЕРИАЛЫ XV МЕЖДУНАРОДНОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ “МЕССБАУЭРОВСКАЯ
СПЕКТРОСКОПИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ”

УДК 539.1.08534.615538.913

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОГЕРЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ
СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
ГАММА-ФОТОНОВ И ИХ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

© 2020 г. Р. Н. Шахмуратов^{1,2}, Ф. Г. Вагизов^{2,*}, В. Я. Гайдук³

¹Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского, ФИЦ Казанского научного центра РАН,
Казань, Россия

²Казанский федеральный университет, Казань, Россия

³ЗАО “ЭТНА”, Москва, Россия

*E-mail: vagizovf@gmail.com

Поступила в редакцию 20.05.2019 г.

После доработки 20.09.2019 г.

Принята к публикации 15.10.2019 г.

Обсуждаются перспективные методы управления спектрально-временными характеристиками гамма-фотонов, которые имеют важное значение для развития квантовой информатики и повышения точности измерений в мессбауэровской спектроскопии. Обсуждаются конкретные экспериментальные реализации методов управления гамма-фотонами, достигнутые на сегодняшний день, а также пути дальнейшего развития этого направления. Приводятся результаты, полученные с помощью нового поколения пьезопреобразователей фирмы “ЭТНА”. Они позволяют существенно увеличивать частоты колебаний источника или поглотителя, создавать импульсы гамма-излучения наносекундной длительности, существенно увеличивающие информационную емкость однофотонных волновых пакетов, и приближать свойства источников гамма-излучения, основанные на распаде нестабильных ядер, к свойствам синхротронного излучения. В этих пьезопреобразователях используется обратный пьезоэффект кварцевого резонатора, генерирующего при подаче электрических импульсов акустические колебания заданной частоты в тонкой пьезокварцевой пластине, на поверхности которой в качестве электродов напыляется поглотитель, содержащий мессбауэровские изотопы ⁵⁷Fe, при колебательном возбуждении которых одиночная линия излучения источника преобразуется в гребенчатую структуру. Исследование спектра полученного излучения позволяет определить амплитуду колебаний тонкой пластины кварца с субангстремной точностью.

DOI: 10.31857/S0023476120030315

Преобразование однофотонных волновых пакетов в серию разделенных во времени импульсов представляет большой интерес с точки зрения квантовой информатики [1]. В оптическом диапазоне частот такое преобразование осуществляется с помощью интерферометров с несбалансированными плечами. В гамма-диапазоне частот удалось осуществить разбиение однофотонного излучения с помощью фильтрации излучения возбужденного радиоактивного ядра через резонансный поглотитель, положение которого колеблется по отношению к источнику благодаря пьезопреобразователю, возбуждаемому генератором на определенной частоте [2, 3]. Длительность импульсов составляет четверть периода колебаний поглотителя при отстройке частоты излучения от резонансной частоты поглотителя на частоту колебаний. Если эта отстройка равна удвоенной частоте колебаний, то длительность

импульсов сокращается до одной восьмой периода колебаний [3]. В [2, 3] использовались полимерные пьезопреобразователи из поляризованного механической вытяжкой поливинилиденфторида (ПВДФ). Между тем из-за малого коэффициента электромеханической связи и больших механических потерь у этого материала трудно возбудить колебания с частотой выше 15 МГц. Амплитуды колебаний, которые создают эти полимеры, тоже ограничены. Поэтому с помощью таких пьезопреобразователей трудно получить импульсы гамма-излучения короче 10 нс.

В данной работе приводятся первые результаты экспериментов с новым поколением пьезопреобразователей фирмы ЭТНА. Они представляют собой кварцевые резонаторы, изготовленные на основе кристаллических элементов с обратной мезаструктурой, формируемой с применением технологии ионно-плазменного трав-

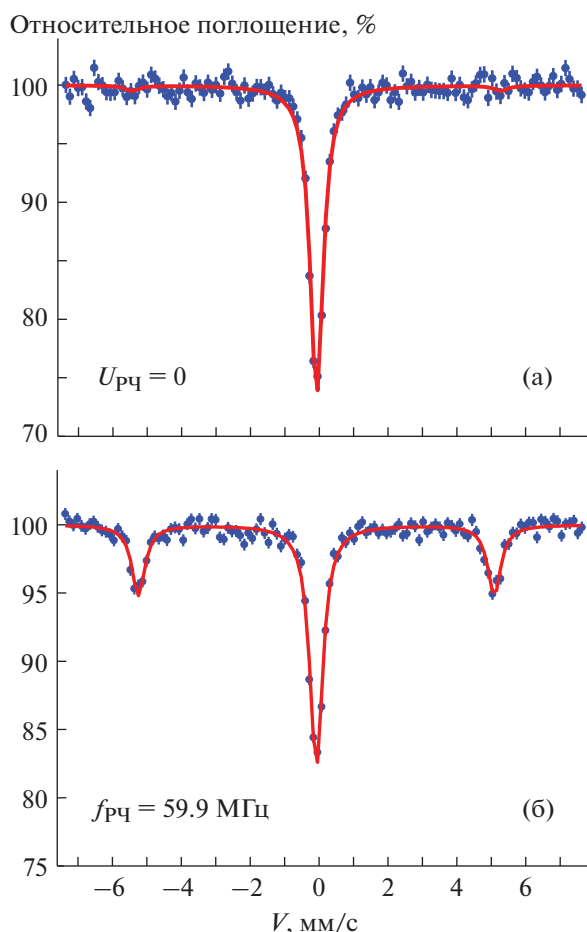


Рис. 1. Мессбауэровский спектр фольги нержавеющей стали неподвижной (а) и колеблющейся с частотой 59.9 МГц (б). Эффективная толщина фольги $T = 5.2$. Сплошная линия – результат компьютерной обработки.

ления с целью утонения активного слоя до микронных толщин, определяющих частоту основного резонанса до 450 МГц. Такие резонаторы характеризуются высокой добротностью и низкими значениями динамического сопротивления, обеспечиваемыми за счет высокого качества обработки активной поверхности. Были использованы два типа конструкции резонатора-поглотителя.

В сборке 1 на поверхность кварцевой пластины приклеивался небольшой кусочек фольги нержавеющей стали с природным содержанием изотопа ^{57}Fe (2.12%). Мессбауэровский спектр пропускания фольги для 14.4 кэВ излучения источника, содержащего радиоактивные ядра ^{57}Co , состоит из одиночной линии. В результате механических колебаний фольги вдоль распространения излучения у основной линии появляются сателлиты, которые отстоят от нее на частотах $\pm f$, $\pm 2f$, $\pm 3f$ и т.д., где f – частота механических коле-

баний [3]. В упрощенном виде зависимость числа фотонов, зарегистрированных детектором, от величины доплеровского сдвига излучения источника описывается выражением

$$N_{out}(\Delta) = N_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(m) B_n(\Delta), \quad (1)$$

где

$$B(\Delta) = \frac{\Gamma_S}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(\Gamma_A/2)^2 T}{(\Delta + n\omega - \omega)^2 + (\Gamma_A/2)^2}} \frac{1}{\omega^2 + (\Gamma_S/2)^2}, \quad (2)$$

N_0 – число фотонов, зарегистрированных вдали от резонанса, Γ_S и Γ_A – ширины линий излучения источника и поглощения образца соответственно, $\Delta = \omega_A - \omega_S$, ω_A и ω_S – резонансная частота поглотителя и частота излучения источника, $J_n(m)$ – функция Бесселя n -го порядка, $m = 2\pi a/\lambda$ – индекс модуляции фазы излучения, которое “видит” колеблющийся образец, a – амплитуда механических колебаний, λ – длина волны гамма-излучения. Поглощение излучения определяется эффективной толщиной образца $T = f_A n_A \sigma_0 l$, где f_A – фактор Дебая–Валлера образца, n_A – концентрация ядер ^{57}Fe , σ_0 – сечение резонансного поглощения и l – физическая толщина образца. В более общем случае необходимо учитывать нерезонансное поглощение образца, излучение источника с отдачей и распределение амплитуд колебаний разных участков образца.

Спектры неподвижного образца и образца, колеблющегося с частотой 59.9 МГц, показаны на рис. 1. Можно ожидать, что с помощью сборки 1 можно создавать импульсы с длительностью порядка 4 нс, равной четверти периода механических колебаний, что следует из теории и согласуется с результатами экспериментов, приведенных в [2], на более низких частотах.

Величина сателлитов невелика по сравнению с центральной линией, но они ясно видны на рис. 1б. Их интенсивности зависят от амплитуды механических колебаний образца. В данной сборке поглотителем является фольга нержавеющей стали толщиной 25 мкм. Поскольку она в 2.5 раза толще кварцевой пластины резонатора, трудно ожидать, что при умеренных мощностях и напряжении РЧ-генератора можно будет создать колебания большой амплитуды, так как нагрузка, создаваемая поглотителем, превышает возможности резонатора. Чтобы улучшить свойства сборки было решено создать поглотитель, обогащенный изотопом ^{57}Fe . Для этого напылили ^{57}Fe на поверхность кварцевой пластины (сборка 2).

На начальном этапе в качестве исходного материала для напыления использовалась фольга нержавеющей стали (304, состав Fe : Cr : Ni:

70 : 19 : 11) фирмы Alfa Aesar. К сожалению, температурные режимы процесса напыления не позволили получить на поверхности резонатора сплав, идентичный нержавеющей стали. Вместо одиночной линии, свойственной для стали марки 304, в мессбауэровском спектре напыленного слоя проявились несколько секстетов с широким распределением сверхтонких магнитных полей. Доминирующим среди этих секстетов был секстет, свойственный металлическому железу ($H(\alpha\text{-Fe})\text{Fe}$). Поэтому на следующем этапе в качестве исходного материала для напыления использовалась фольга металлического железа, обогащенная до 95% изотопом ^{57}Fe . Мессбауэровский спектр поглотителя на сборке 2 показан на рис. 2а. Он состоит из шести линий, соответствующих зеемановскому расщеплению ядерных уровней в сверхтонком магнитном поле 330 кЭ.

Удалось возбудить колебания резонатора в сборке 2 с частотой, равной 90 МГц по пятой гармонике. Амплитуда колебаний была достаточно велика, так что появление шести спутников наблюдали у каждой из шести линий, т.е. в итоге мессбауэровский спектр содержал кроме шести линий исходного спектра еще три пары боковых спутников от каждой исходной линии (всего 42 линии) (рис. 2б). Колебания поглотителя в сборке 2 с частотой $f = 90$ МГц позволяют получать импульсы гамма-излучения с длительностью, равной $T/4 = 2.8$ нс при настройке источника в резонанс с одним из первых спутников, или $T/8 = 1.4$ нс при настройке в один из вторых спутников основных линий мессбауэровского спектра, где T – период механических колебаний с частотой f . Длительность таких импульсов становится сравнимой с длительностью импульсов синхротронного источника излучения.

Оценка индекса модуляции фазы излучения источника, которую «видит» колеблющийся поглотитель, дает величину $m = 2.06$. Из нее можно оценить амплитуду колебаний поглотителя $a = m\lambda/2\pi = 27.4$ пм. Таким образом, из экспериментально наблюдаемой трансформации мессбауэровского спектра под действием механических колебаний и точного определения соотношения интенсивности каждой из основных линий с интенсивностями спутников можно узнать амплитуду колебаний поверхности пьезопреобразователя с субангстремной точностью. Подробно метод измерения амплитуд сверхмалых смещений и исследование распределения амплитуд механических колебаний вдоль поверхности поглотителя изложены в [3]. Этот метод открывает большие перспективы для исследования механических свойств тонких пластин и качества их поверхности.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы повышения конкурентоспособности

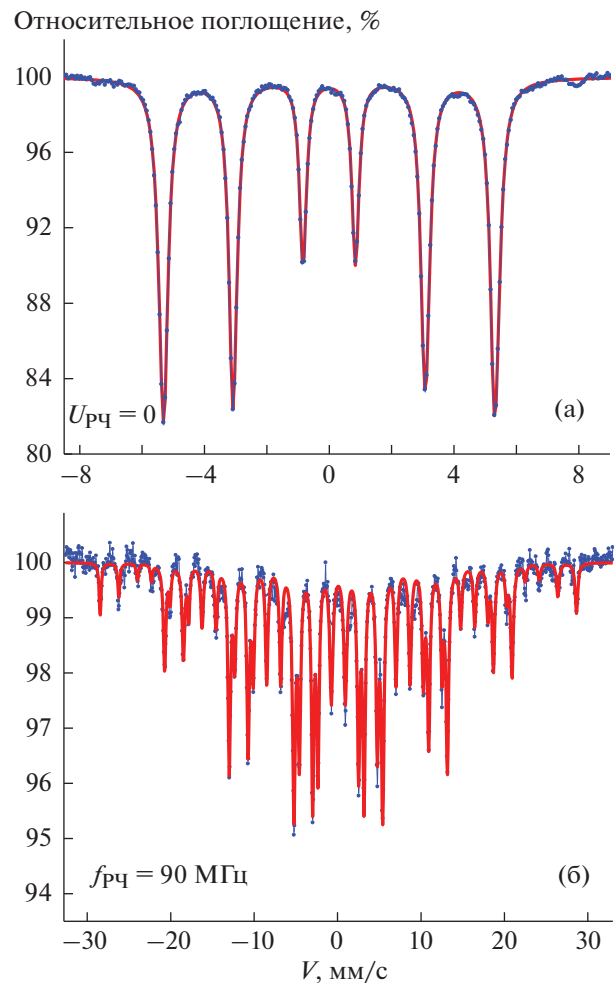


Рис. 2. Мессбауэровский спектр сборки 2, у которой на резонатор напылен слой металлического железа с 95%-ным обогащением изотопом ^{57}Fe . Спектр неподвижной сборки без приложенного напряжения РЧ-генератора ($U_{\text{РЧ}} = 0$) (а) и сборки, колеблющейся с частотой $f_{\text{РЧ}} = 90$ МГц (б). Сплошная кривая – результат компьютерной обработки.

Казанского федерального университета, Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-02-00845-а) и фонда NSF (№ PHY-150-64-67).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brendel J., Gisin N., Tittel W., Zbinden H.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. № 12. P. 2594.
2. *Vagizov F., Antonov V., Radeonychev Y. V. et al.* // Nature (London). 2014. V. 508. № 7494. P. 80.
3. *Shakhmuratov R.N., Vagizov F.G., Antonov V.A. et al.* // Phys. Rev. A. 2015. V. 92. № 2. P. 023836.
4. *Shakhmuratov R.N., Vagizov F.G.* // Phys. Rev. B. 2017. V. 95. № 24. P. 245429.