дельных групп атомов, имеющихся в структуре растворителя. Для проверки предположения, что разложение комплексов бора в полярных растворителях может быть обусловлено координацией молекул растворителя через донорные атомы такие, как кислород или сера, записаны ИК спектры поглощения комплексов в полярном диметилсульфоксиде. Как показано в [2], в растворе диметилсульфоксида молекулы последнего могут вступать в донорно-акцепторную связь с молекулами растворенного вещества. При координации сульфоксида через атом кислорода полоса поглощения, относящаяся к колебаниям S=O, смещается в низкочастотную область, а при координации через атом серы — в высокочастотную. В ИК спектрах поглощения растворов комплексных соединений бора в диметилсульфоксиде не наблюдалось смещения характерных полос. Это указывает на отсутствие координации молекул растворителя через атом кислорода или серы. Однако отметим, что соединения № 3—6 наиболее стабильны в растворителях, молекулы которых содержат атом азота, например, в диметилформамиде $C_3H_7NO$ или в ацетонитриле $C_2H_3N$, и неустойчивы в растворителях, имеющих атом серы или атом кислорода в структуре, например, в диметилсульфоксиде $(CH_3)_2SO$ или в диоксане $C_4H_8O_2$.

Таким образом, для исследуемых борсодержащих органических комплексов № 1—6 в диоксане и диметилсульфоксиде предполагается, что атомы серы и кислорода играют главную роль в разрыве донорно-акцепторной связи в молекуле, по-видимому, за счет большого дипольного момента S=O связи.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет заключить, что молекулы борсодержащих органических комплексов № 1—6 устойчивы в толуоле. Установлено, что в диметилсульфоксиде разрыв донорно-акцепторной связи бор-кислород в молекуле комплексных соединений происходит за счет диполь-дипольных взаимодействий молекул растворенного вещества с молекулами растворителя.

В заключение автор выражает глубокую благодарность доктору физико-математических наук профессору А. И. Комяку за большую помощь в осуществлении работы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кьен Хак Туан. Спектрально-люминесцентные характеристики борсодержащих органических комплексов.— Рукопись деп. в БелНИИНТИ. № 607 БЕ-Д83. Деп. от 04.05.1983.

2. Гурьянова Е. Н., Гольдштейн И. П. Донорно-акцепторная связь.— М., 1973.

*УДК 539.1+539.2*

*О. М. АНШАКОВ, В. Л. ГУРАЧЕВСКИЙ, М. МАШЛАН, А. Л. ХОЛМЕЦКИЙ, В. А. ЧУДАКОВ*

## МЁССБАУЭРОВСКИЙ ТОЛЩИНОМЕР ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

В ряде задач современной технологии производства большое значение имеет развитие методов и аппаратуры для толщинометрии и неразрушающего контроля качества защитных покрытий материалов. Это обусловлено, с одной стороны, растущими требованиями к качеству таких покрытий, с другой — непрерывным усложнением их производства.

Для целей толщинометрии защитных покрытий используется ряд физических методов, например рентгенофлюоресцентный метод обратного рассеяния β-частиц и т. д. [1, 2]. Однако эти методы становятся малоэффективными, когда атомные номера материалов основания и покрытия близки, например, при нанесении хромо-никелевых покрытий на железо. В этом случае единственным неразрушающим методом толщинометрии практически становится метод регистрации резонансно рассеянного мёс-

сбауэровского излучения, имеющий чрезвычайную избирательность к ядрам определенного типа, содержащимся в веществе основания. При этом материал покрытия играет роль ослабителя падающего и рассеянного мёссбауэровского излучения, следовательно, интенсивность последнего связана с толщиной защитного покрытия по обычному закону ослабления гамма-излучения в веществе:

$$I_{\text{р}} = BI_0 e^{-\mu 2l}, \qquad (1)$$

где $I_{\text{р}}$ — регистрируемая интенсивность резонансного рассеяния при толщине покрытия $l$; $I_0$ — интенсивность резонансного рассеяния при толщине покрытия, равной нулю; $\mu$ — линейный коэффициент поглощения гамма-квантов в веществе покрытия; $B$ — фактор накопления, величина которого постоянна при фиксированной геометрии измерений.

Несмотря на простоту физических принципов, лежащих в основе работы мёссбауэровского толщиномера, практическая реализация такого прибора в переносном виде связана с целым рядом технических трудностей, главной из которых является проблема минимизации размеров электродинамического вибратора мёссбауэровского спектрометра, с помощью которого реализуется движение источника по некоторому фиксированному закону.

Обычно задают движение с линейно изменяющейся скоростью, при котором полнее используется время эксперимента и наиболее просто обеспечивается линейность скоростной шкалы регистрирующего устройства путем равномерного переключения регистрирующих каналов. Однако в этом случае предъявляются значительные требования к конструкции вибратора, вытекающие из необходимости отрабатывать линейно изменяющуюся скорость.

Для иллюстрации технических трудностей, возникающих при этом, достаточно отметить хотя бы то обстоятельство, что линейный закон является многокомпонентным по фурье-составляющим, в то время как функция отклика механической системы в зависимости от частоты воздействующего сигнала имеет резко неоднородный характер. Конструкция такого вибратора поэтому достаточно сложна и громоздка.

Для преодоления указанных трудностей нами разработаны принципы построения портативного ЯГР-спектрометра, в котором предусматривается задание гармонически изменяющейся скорости с использованием системы автоматической линеаризации скоростной шкалы регистрирующей системы [3]. При гармоническом задании скорости существенно снижаются требования к параметрам системы задания движения, что позволило создать мини-вибратор весом 0,4 кг и размерами $\varnothing 30 \times 50$ мм, что примерно на порядок величины меньше габаритов вибраторов, предназначенных для отработки линейно изменяющейся скорости. На рис. 1 представлен мёссбауэровский спектр поглотителя из $\alpha$-железа, измеренный с помощью портативного ЯРГ-спектрометра с гармоническим заданием скорости. Удовлетворительное разрешение резонансных линий и величина интегральной нелинейности скоростной шкалы, составляющая $<1$ %, являются достаточными для проведения большинства прикладных исследований.

На основе портативного ЯГР-спектрометра разработан мёссбауэровский толщиномер покрытий переносного типа, включающий в себя пульт управления и измерительный зонд, с помощью которого реализуется та или иная геометрия измерений.

Пульт управления содержит измерительный блок (см. рис. 2), который включает функциональный генератор *1*, вырабатывающий гармонически изменяющееся напряжение, которое через кабельную связь подается на задающую катушку вибратора, обеспечивая движение источника по гармоническому закону. Дифференциальный дискриминатор *2* через кабельную связь подключен к выходу детектора обратно-рассеянного гамма-излучения и предназначен для выделения линии резонансно-

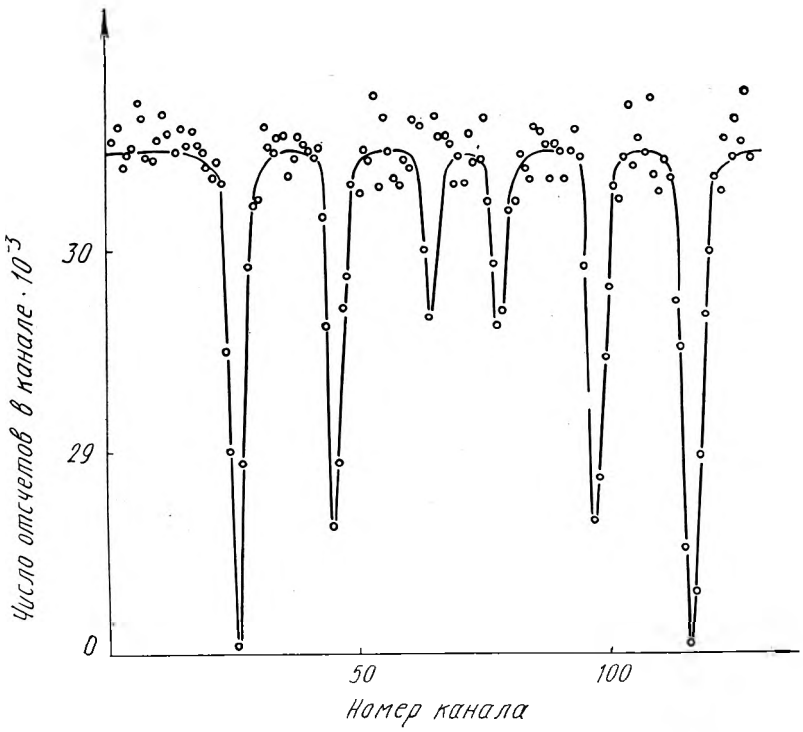


Рис. 1. Мёссбауэровский спектр поглощения образца из α-железа, измеренный с помощью портативного ЯГР-спектрометра. Источник — Co-57 (*Pt*)

го взаимодействия. Импульсы с выхода дифференциального дискриминатора *2* поступают на вход логического блока *3*, в котором осуществляется регистрация резонансных событий по закону задания скорости с одновременным обеспечением одинаковых условий счета в каждом скоростном канале. Предположим далее, что спектр резонансно-рассеянного излучения содержит только одну линию. В этом случае в логическом блоке *3* запоминаются значения четырех адресов регистрирующих каналов — $n_1$ и $n_2$, соответствующие значениям скорости, лежащим на краях резонансного пика, и $n_3$ и $n_4$, соответствующие двум значениям скорости вдали от резонанса; при этом $n_2-n_1=n_4-n_3$. Когда текущее значение адреса регистрирующего канала $i$ лежит в пределах $n_1<i<n_2$, открывается схема «И» 5, когда значение $i$ лежит в пределах $n_3<i<n_4$, открыва-

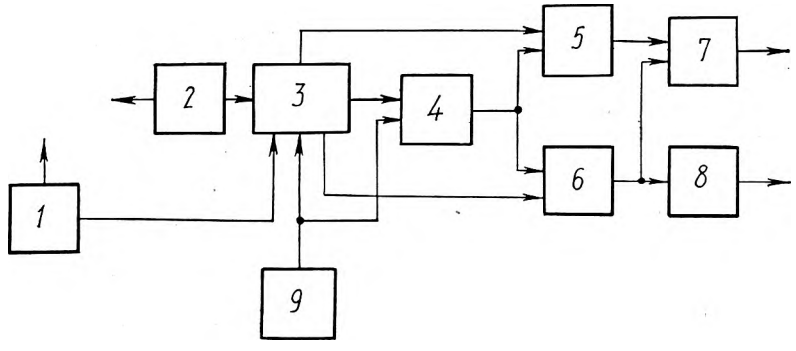


Рис. 2. Структурная схема мёссбауэровского толщиномера защитных покрытий

ется схема «И» 6. Очевидно, что при этом с выхода схемы «И» 5 поступают импульсы, соответствующие регистрации резонансного пика, а с выхода схемы «И» 6 — импульсы, соответствующие регистрации нерезонансного фона. Разность средних частот следования импульсов с выходов схем «И» 5 и 6 равна интенсивности резонансных событий. Вычитание указанных частот производится в реверсивном счетчике *7*, время измерения задается таймером *9*, управляющим работой схемы совпадений *4*. Таким образом, по окончании времени измерения в реверсивном счетчике *7* записано число, равное числу зарегистрированных резонансных событий, связанному соотношением (1) с толщиной измеряемого покрытия. Это число выводится на индикационное табло, по соответствующим калибровочным кривым определяется толщина покрытия. Так как источник $^{57}Co$, используемый для измерения толщин покрытий на железосодержащих материалах, имеет сравнительно небольшой период полураспада (~270 дней), необходима постоянная корректировка калибровочной кривой, учитывающая изменение активности источника. Очевидно, что интенсивность нерезонансного фона прямо пропорциональна активности источника, поэтому с помощью счетчика *8* отдельно регистрируется уровень фона и его величина выводится на индикационное табло.

В общем случае, когда спектр обратнорассеянного мёссбауэровского излучения имеет несколько линий, производится измерение интенсивностей каждой из резонансных линий и определяется суммарная величина резонансного эффекта. При этом в логическом блоке *3* запоминаются значения чисел $n_{1к}$, $n_{2к}$ ($k=1 \ldots m$, где $m$ — число резонансных линий в спектре), соответствующие значениям скорости, лежащим на краях каждой линии, и $n_3$ и $n_4$, которые соответствуют значениям скорости вдали от резонанса, при этом для сопоставимости результатов необходимо соблюдение условия

$$\sum_{k=1}^{m} (n_{2k} - n_{1k}) = n_4 - n_3. \qquad (2)$$

В остальном схема построения измерительного блока остается без изменений.

На основе описанного мёссбауэровского толщиномера легко реализуется дефектоскоп защитных покрытий, принцип работы которого заключается в том, что при измеренной за некоторое фиксированное время величине резонансного эффекта, больше некоторой пороговой (т. е. толщине защитного покрытия, меньшей некоторой критической величины), на индикационном табло появляется соответствующий сигнал. При этом, по сравнению с мёссбауэровским толщиномером, изменяется только система индикации. Кроме того, для дефектоскопии защитных покрытий можно проводить измерение не абсолютной величины резонансного эффекта (зависит от активности источника, изменяющейся во времени), а измерение отношения величины резонансного эффекта к уровню фона, т. е. отношения показаний счетчиков *7* и *8*. При этом сигналом обнаружения дефекта является превышение этой величиной некоторого критического значения.

Немаловажным вопросом является экспрессность измерений рассмотренных приборов и методы ее повышения. В принципе, при достаточно большой активности источника и выборе оптимальной геометрии для регистрации обратнорассеянного резонансного излучения время измерения мёссбауэровского спектра может составлять несколько минут [4]. Кроме того, в специализированном мёссбауэровском толщиномере удобно использовать источник излучения в матрице того же материала, что и материал основания, на которое нанесено защитное покрытие. В этом случае мёссбауэровский спектр содержит одну резонансную линию в районе нуля скоростей, что позволяет сузить задаваемый диапазон изменения скорости и сократить время регистрации нерезонансного фона. Следует также отметить, что в отличие от обычного мёссбауэровского

эксперимента, в котором требуется измерять как интенсивность, так и форму резонансных линий, в рассмотренном толщиномере достаточно измерить только интенсивность резонансных линий, величина которой в соответствии с выражением (1) дает полную информацию о толщине контролируемого покрытия, а для определения интенсивности линии требуется значительно меньшее время, чем для измерения ее формы. С учетом перечисленных обстоятельств необходимое время измерения мёссбауэровского толщиномера или дефектоскопа можно, по-видимому, довести до величины $\sim 1$ мин.

Детектором обратнорассеянного резонансного излучения может служить компактный сцинтилляционный спектрометр. В настоящее время разрабатывается портативная система для регистрации спектров ядерного гамма-резонанса и первичной обработки информации на основе микропроцессорной системы управления.

Таким образом, на основе портативного ядерного гамма-резонансного спектрометра с гармоническим заданием скорости вполне реальной становится задача по созданию переносного мёссбауэровского толщиномера, описанного в настоящей работе.

## ЛИТЕРАТУРА


1. Ohno K.— In: Advances in X-ray Analysis, Ründ, Plenum Press. New York, U. S., 1978, v. 21, p. 89.
2. Novaka I., Sigai I.— Nucl. Instrum. and Meth., 1979, v. 158, № 2—3, p. 453.
3. Аншаков О. М., Нестерович З. И., Холмецкий А. Л., Чудаков В. А.— В кн.: IX Всесоюзная науч.-техн. конф. Неразрушающие физические методы и средства контроля, секция Г. М., 1981, с. 252.
4. Pawlowski Z., Marrec I., Cudny W., Holinicka I.— Nucl. Instrum. and Meth., 1979, v. 163, p. 423.
5. Аншаков О. М., Чудаков В. А., Холмецкий А. Л., Гуринович В. И.— ПТЭ, 1982, № 6, с. 31.


*УДК 621.372.412*

*М. ПАТЕК, А. П. ХАПАЛЮК*

# ОТКРЫТЫЙ РЕЗОНАТОР С ПЕРИОДИЧЕСКИ РАСПОЛОЖЕННЫМИ ЛИНЗАМИ

В работе [1] показано, что расчет собственных полей открытого оптического резонатора, усложненного произвольным числом $m-2$ фокусирующих или дефокусирующих элементов типа оптических линз или гауссовых диафрагм, можно свести к более простой задаче расчета параметров эквивалентных резонаторов (ЭР). Каждый $j$-ый из $(m-1)$ ЭР характеризуется длиной $L_j = z_{mj+1} - z_{1j}$ ($z_{1j}$ и $z_{mj+1}$ — координаты первого и второго зеркал $j$-го ЭР на оси $z$) и радиусами кривизны зеркал $\rho_{1j}$ и $\rho_{mj+1}$. Собственные гауссовы пучки $j$-го ЭР совпадают с собственными пучками $j$-го промежутка между линзами исходного резонатора. Параметры этих пучков (положение локусов $l_j$ и радиусы в них $w_j$) определяются через параметры ЭР по известным формулам [1, 2]:

$$
\begin{aligned}
knw_{ja}^2 + il_{ja} &= iz_{mj+1} + \frac{D_j - iL_j(\rho_{1j} - L_j)}{\rho_{1j} + \rho_{mj+1} - 2L_j}, \\
knw_{jb}^2 - il_{jb} &= -iz_{1j} + \frac{D_j - iL_j(\rho_{mj+1} - L_j)}{\rho_{1j} + \rho_{mj+1} - 2L_j}, \\
D_j^2 &= L_j(\rho_{1j} - L_j)(\rho_{mj+1} - L_j)(\rho_{1j} + \rho_{mj+1} - L_j),
\end{aligned}
\tag{1}
$$

где индексом $a$ отмечены параметры волн, распространяющихся вдоль положительного, $b$ — вдоль отрицательного направлений оси $z$; $n = \mathrm{Re}\, N$, $N$ — комплексный коэффициент преломления среды; $k$ — волновое число в вакууме.