Доклады Академии наук СССР
1955. Том 101, № 3

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Н. С. ГАРИФЬЯНОВ

ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В СИЛИКАТНЫХ СТЕКЛАХ

(Представлено академиком А. Н. Терениным 14 X 1954)

Ферромагнитный резонанс был исследован в силикатных стеклах с различным содержанием Fe_2O_3 и FeO на частотах $9435 \cdot 10^6$ гц и $534 \cdot 10^6$—$50 \cdot 10^6$ гц в интервале температур 800—90 °К. На частотах $534 \cdot 10^6$—$50 \cdot 10^6$ гц исследования проводились методом сеточного тока (1) с применением модуляции постоянного магнитного поля H. На частоте $9435 \cdot 10^6$ гц методика измерения была аналогична использованной в работе (2).

Магнитное поле на частотах $534 \cdot 10^6$—$50 \cdot 10^6$ гц градуировалось при помощи свободного радикала $\alpha\alpha$-дифенил-β-тринитрофенилгидразила, g-фактор которого был определен на частоте $9435 \cdot 10^6$ гц при помощи протонного резонанса.

Таблица 1

№ стекла	Fe_2O_3, %	FeO, %	g-фактор	δ, эрст
235	0,0043	0,00035	4,00±0,03	~60
4056	0,0224	0,00075	4,00±0,03	~60
221	0,0820	0,0045	4,00±0,03	~60
68 (10)	0,253	0,0065	4,00±0,03	~60
227	0,338	0,011	4,00±0,03	~60
50	0,48	0,028	4,00±0,03	~60
51	0,96	0,055	4,00±0,03	~600

Номера исследованных стекол и соответствующие им концентрации Fe_2O_3 и FeO приведены в табл. 1*.

В стеклах от № 235 до № 50 включительно на частотах $\nu = 534{,}41 \cdot 10^6$, $169{,}4 \cdot 10^6$, $107{,}5 \cdot 10^6$ и $50{,}1 \cdot 10^6$ гц при комнатной температуре наблюдается резонансное поглощение с максимумом, отвечающим эффективному фактору спектроскопического расщепления $g = 4{,}00 + 0{,}03$, где $g = h\nu/\beta H^*$; здесь h — постоянная Планка, β — магнетон Бора и H^* — значение напряженности статического поля H, отвечающее максимуму поглощения.

Ширина кривых резонансного поглощения $\delta \sim 60$ эрст.; она очень слабо возрастает при увеличении концентрации Fe_2O_3 и FeO до 0,48 и 0,028%, соответственно (стекло № 50), и практически не зависит от частоты в диапазоне от $534 \cdot 10^6$ до $50{,}1 \cdot 10^6$ гц. При дальнейшем увеличении концентрации Fe_2O_3 и FeO (стекло № 51) наблюдается очень резкое возрастание ширины кривой резонансного поглощения до ~600 эрст, поэтому для стекла № 51 максимум поглощения с $g = 4{,}00 \pm 0{,}03$ удалось разрешить лишь на частоте $534{,}4 \cdot 10^6$ гц; на более низких частотах был наблюден только спад кривой.

Интенсивность линий поглощения в стеклах возрастает при увеличении концентрации Fe_2O_3 и FeO. Резонансное поглощение на частоте $9435 \cdot 10^6$ гц не удалось обнаружить ни в одном из приведенных в таблице образцов стекла.

В стеклах, указанных в табл. 1, на частотах $9435 \cdot 10^6$, $534{,}41 \cdot 10^6$ и $196{,}4 \cdot 10^6$ гц резонансное поглощение было изучено в интервале темпера-

* Эти стекла были получены от В. В. Варгина, которому автор выражает глубокую признательность.

тур 800—90 °К. При постепенном охлаждении на воздухе нагретого до красного каления стеклянного образца интенсивность пика на частотах $534{,}4 \cdot 10^6$ и $169{,}4 \cdot 10^6$ гц увеличивается от нуля до значения, соответствующего комнатной температуре. При этом g-фактор не изменяется. Интенсивность поглощения при 90 °К значительно больше, чем при комнатной температуре. При постепенном нагревании образца от 90 до 290 °К интенсивность линий поглощения уменьшается и достигает обычного значения, наблюдаемого при комнатной температуре. И в этом случае g-фактор сохраняется. На частоте $9435 \cdot 10^6$ гц эффект резонансного поглощения обнаружить не удалось во всем интервале температур от 90 до 800 °К.

Кроме силикатных стекол, указанных в табл. 1, автор исследовал образцы стекла пирекс, которые отбирались из котла в процессе варки через чаждый час от начала процесса. Исследования резонансного магнитного поглощения на этих образцах показали, что ширина кривых поглощения ($\sim$60 эрст.), g-фактор ($\sim$4) и интенсивность в максимуме почти не зависят от продолжительности варки.

Полученные результаты заставляют считать, что в силикатных стеклах имеются ферромагнитные примеси, вероятнее всего, Fe_2O_3 или FeO или же и то и другое вещество. В самом деле, возрастание интенсивности эффекта с ростом концентрации железа показывает, что эффект обязан именно этому элементу. Но ни одно из полученных до сих пор парамагнитных соединений двух- или трехвалентного железа не обнаруживает резонанса с $g = 4$. Наоборот, у ферромагнетиков эффективный g-фактор (без учета фактора размагничивания) больше 2.

Статистические измерения восприимчивости, проведенные в нашей лаборатории П. Г. Тишковым, подтвердили это заключение: оказалось, что образцы стекол №№ 50 и 51 действительно содержат ферромагнитные примеси (стекла с меньшим содержанием Fe_2O_3 и FeO не измерялись). Поэтому автор считает ошибочным предположение, высказанное в работе ([3]), где резонанс $g = 4$, наблюденный на низких частотах в стекле, был приписан парамагнитным загрязнениям. Ферромагнитный резонанс в стеклах отличается от ранее наблюдавшегося в обычных ферромагнитных материалах ([4]) большой узостью кривой поглощения и отсутствием измеримого эффекта на частоте $\sim 10^{10}$ гц. Весьма вероятно, что это различие связано с малыми размерами ферромагнитных включений в стекле; возможно, что эти включения состоят лишь из одного или нескольких доменов.

Кроме стекол, автор исследовал также плавленый кварц, каолинитовую глину, фарфор и красный силикатный кирпич. В плавленом кварце эффект резонансного поглощения не был обнаружен во всем интервале частот и температур. В каолинитовой глине и в фарфоре на частотах $534{,}50 \cdot 10^6 - 50{,}1 \cdot 10^6$ цг при 295 °К удалось обнаружить резонансное поглощение, причем форма и g-фактор кривых поглощения практически совпадают с формой и g-фактором кривых для силикатных стекол №№ 235—50, указанных в табл. 1.

Температурная зависимость резонансного поглощения в каолинитовой глине и в фарфоре аналогична наблюдаемой в силикатных стеклах. Подобно стеклам, и эти материалы не дают измеримого эффекта на частоте $9435 \cdot 10^6$ гц. Исследования резонансного поглощения в образце каолинитовой глины после отжига в течение 3 час. при 1300 °К показали, что форма кривой и g-фактор от этой обработки не меняются. Более сложную картину резонансного поглощения на частотах $9435 \cdot 10^6$ и $534{,}61 \cdot 10^6$ гц дает красный силикатный кирпич.

На частоте $534{,}61 \cdot 10^6$ гц при 298 °К в красном силикатном кирпиче наблюдается два максимума поглощения с $g \approx 4$ и $g \approx 2$, причем интенсивность этих линий поглощения по-разному зависит от температуры: интенсивность линий с $g \approx 4$ при охлаждении до 90 °К возрастает, а интенсивность линий с $g \approx 2$ падает до нуля. При нагревании же наблю-

дается обратная картина: интенсивность линий с $g \approx 2$ возрастает, интенсивность же линий с $g \approx 4$ падает.

На частоте $9435 \cdot 10^6$ гц при 295 °К в красном силикатном кирпиче наблюдается только максимум с $g \approx 2$, а максимум с $g \approx 4$ обнаружить не удалось. Таким образом, в красном силикатном кирпиче, аналогично стеклу, максимум поглощения с $g \approx 4$ наблюдается только на низких частотах.

Физико-технический институт
Казанского филиала
Академии наук СССР

Поступило
23 IX 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] Е. К. Завойский, Диссертация, ФИАН, 1944. [2] Н. С. Гарифьянов, Б. М. Козырев, ДАН, **98**, № 6 (1954). [3] E. L. Losaitis, B. Smaller, Rev. Sci. Instr., **24**, 991 (1953). [4] Ферромагнитный резонанс, Сборн. ст. под ред. С. В. Вонсовского, ИЛ, 1952.