

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОБЪЕМНУЮ ДИФФУЗИЮ Ga В α -Fe ПРИ 760 °C

С.В. Дивинский^{1,2}, А.В. Покоев², В.С. Трофимов², А.А. Федотов², А.В. Волков²

¹*Институт физики материалов, Университет Мюнстера,
ул. Вильгельма Клемма, 10, Мюнстер, 48149, Германия;*

²*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия
e-mail: a.v.pokoev46@mail.ru*

THE PULSE MAGNETIC FIELD INFLUENCE ON THE Ga BULK DIFFUSION IN α -Fe AT 760 °C

S.V. Divinskiy^{1,2}, A.V. Pokoev², I.S. Trofimov², A.A. Fedotov², A.V. Volkov²

¹*Institute of Materials Physics, University of Münster,
10 Wilhelm-Klemm Str., Münster, 48149 Germany;*

²*Samara National Research University n.a. Academician S.P. Korolyov,
34 Moskovskoye highway, Samara, 443086 Russia
e-mail: a.v.pokoev46@mail.ru*

Рентгенографическим методом впервые исследовано влияние импульсного магнитного поля с амплитудой напряженности 278,6 кА/м и частотой следования импульсов в диапазоне от 1 до 20 Гц на коэффициент объемной диффузии Ga в ферромагнитном α -Fe при температуре 760 °C. Установлено, что включение ИМП заметно влияет на величину коэффициента объемной диффузии Ga в α -Fe. Наблюдается резонансное поведение КД Ga в α -Fe на частоте в области 10 Гц. Обсуждается возможные механизмы магнитодиффузионного эффекта.

For the first time the influence of a pulsed magnetic field on the Ga bulk diffusion coefficient in a ferromagnetic α -Fe with range of magnetic field intensity of 278,6 kA/m and frequency range of 1–20 Hz at 760 °C via X-ray method has been investigated. The measuring of bulk diffusion coefficient was performed by X-ray diffraction analysis. It was determined that the pulsed magnetic field enable has significant influence on Ga volume diffusion coefficient value in ferromagnetic α -Fe. The "resonant" behavior for Ga bulk diffusion coefficient in α -Fe at frequency of 10 Hz is observed. Possible mechanisms of the magnetic field influence on the diffusion processes are considered.

Ранее, экспериментально показано [1,2], что импульсные магнитные поля (ИМП) оказывают существенное влияние на диффузионную подвижность атомов примеси в ферромагнитном α -Fe, а степень влияния ИМП на гетеродиффузию в ферромагнетиках, зависит от состояния намагниченности (магнитного упорядочения), типа магнитного поля и во многом определяется структурным состоянием матрицы ферромагнетика-растворителя. В работе [1] сделано также обоснованное предположение, что увеличение массопереноса при включении ИМП обусловлено магнитоупругим взаимодействием полей упругих напряжений примесных атомов и дислокаций с упругими полями движущихся в ИМП доменных стенок α -Fe, а в [2] – высказана гипотеза о существовании релаксационных механизмов влияния ИМП на величину коэффициента диффузии (КД) немагнитной примеси в α -Fe. Однако ограниченность сведений об эффекте влияния ИМП на диффузионные свойства в ферромагнитных материалах не позволяют однозначно выделить группу механизмов ответственных за данный эффект.

С целью проверки имеющихся гипотез, предпринято исследование влияния ИМП на КД Ga в α -Fe в ферромагнитной области при 760 °C. Для решения поставленной задачи были изготовлены цилиндрические образцы из армко-Fe диаметром 11 мм и длиной 11 мм. С целью исключения влияния вклада зернограницной диффузии на результаты измерений коэффициента

объемной диффузии, образцы были подвергнуты рекристаллизационному отжигу в вакууме при температуре 1400 °С в течение двух часов. После отжига средний размер зерна составил ~350 мкм, что соответствует требованиям, предъявляемым к размеру зерна d при измерениях коэффициента объемной диффузии $d \geq 4.3(Dt)^{1/2}$ рентгеновским методом [2]. Затем, на одну из торцевых поверхностей образцов, методом термического испарения нанесли тонкие пленки Ga толщиной от 150 до 260 нм. Диффузионные отжиги, подготовленных таким образом образцов, проводили в опытной установке для отжигов в магнитных полях ПМП-2 в динамическом вакууме $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ Па. Значение амплитуды напряженности ИМП 278,6 кА/м (3,5 кЭ), частота импульсов изменялась от 1 до 20 Гц, а форма импульса была максимально приближена к полусинусоидальной и описывается следующим выражением:

$$H(t) = \begin{cases} H_1 \sin(2\pi ft), & 0 < t < t_1; \\ 0, & t_1 < t < t_1 + t_2, \end{cases}$$

где H_1 – амплитуда импульсной гармонической составляющей ИМП, f – частота гармонической составляющей ИМП, t_1 – длительность импульса, t_2 – длительность паузы между импульсами, $t_1/t_2 \approx 0.5 \pm 0.1$.

Рентгеносъемку образцов вели в дифрактометре ДРОН-2 с автоматизированным блоком записи и обработки данных в Co K_{α} -излучении. По смещению положения дифракционной рентгеновской α_1 -линии Fe с углом отражения $\vartheta_{211} = 49,85^\circ$ определяли поверхностную концентрацию Ga, по которой затем методикой описанной в [2] рассчитывали эффективный КД, соответствующий диффузии по объему зерен. Поверхностная концентрация Ga изменялась в пределах 2,9-5,8 ат.%, что соответствовало смещению дифракционной линии на дифрактограммах в пределах 0,15 до 0,34 угл.°. Длительность диффузионных отжигов составляла от 1,5 до 3 часов. Погрешность измерений КД в данной схеме измерений составляла ~12%.

Степень влияния ИМП на КД Ga в α -Fe характеризовали относительным КД $D_{rel}(f, H) = D_H(f, H) / D_{H=0}$, где $D_H(f, H)$ – КД Ga в α -Fe в ИМП с амплитудой H на частоте f импульсов ИМП, $D_{H=0} = (1,5 \pm 0,2) \text{ см}^2/\text{с}$ – КД Ga в α -Fe без ИМП соответственно.

Зависимость КД Ga в α -Fe от частоты импульсов ИМП $D_{rel}(f)$ (далее частотная зависимость КД) измерена в интервале 1–20 Hz с дискретностью 5 Гц при амплитуде напряженности ИМП 278,6 кА/м. На рисунке представлен график частотной зависимости относительного КД Ga в α -Fe $D_{rel}(f, H)$ при температуре 760 °С и амплитуде ИМП 278,6 кА/м (3,5 кЭ).

В результате выполненных экспериментальных измерений установлено, что «включение» ИМП оказывает существенное влияние на величину КД Ga в α -Fe при 760 °С. Зависимость величины КД Ga в α -Fe от частоты в диапазоне 1-20 Гц при амплитуде ИМП 278,6 кА/м имеет выраженный «резонансный» характер, а значения относительного КД изменяются в пределах $0,4 \div 3$ (см. рисунок). Подобное поведение частотных зависимостей относительного КД в ИМП для диффузии Al и Sn в α -Fe наблюдали в [1,2], которое можно объяснить наличием периодических магнитоэстроционных напряжений (деформаций) матрицы ферромагнитного α -Fe во внешнем ИМП. Включение внешнего ИМП усиливает взаимодействие упругих напряжений как комплексов дефектов (пары примесных атомов, пары примесный атом-вакансия, бивакансии), так и одиночных примесных атомов с полями упругих напряжений кристаллической решетки α -Fe.

Уменьшение относительного КД Ga в α -Fe $D_H(f, H)$ до $0,43 < 1$ при $f=0$ соответствует случаю диффузии Ga в α -Fe в постоянном магнитном поле с напряженностью 278,6 кА/м при 760 °С, значение которого было измерено независимым экспериментом и оказалось равным $D_H(0, H) = (6,4 \pm 0,8) \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$. Это уменьшение связано с изменением намагниченности матрицы, характеризующей магнитное упорядочение ферромагнитной среды диффузии – α -Fe, и влияет на измеряемый КД. Степень этого влияния магнитного упорядочения различна и определяется степенью влияния величины напряженности ПМП на намагниченность: зависимость существенна только на начальных участках кривой первого технического намагничивания матрицы, где отсутствует насыщение намагниченности [2]. Согласно данным [3], при напряженности магнитного поля 278,6 кА/м железо при 760 °С достигает состояния насыщения намагниченности – практически полного магнитного упорядочения, что и объясняет уменьшение значения относительного КД Ga в α -Fe $D_H(f, 0)$ до $0,43 < 1$.

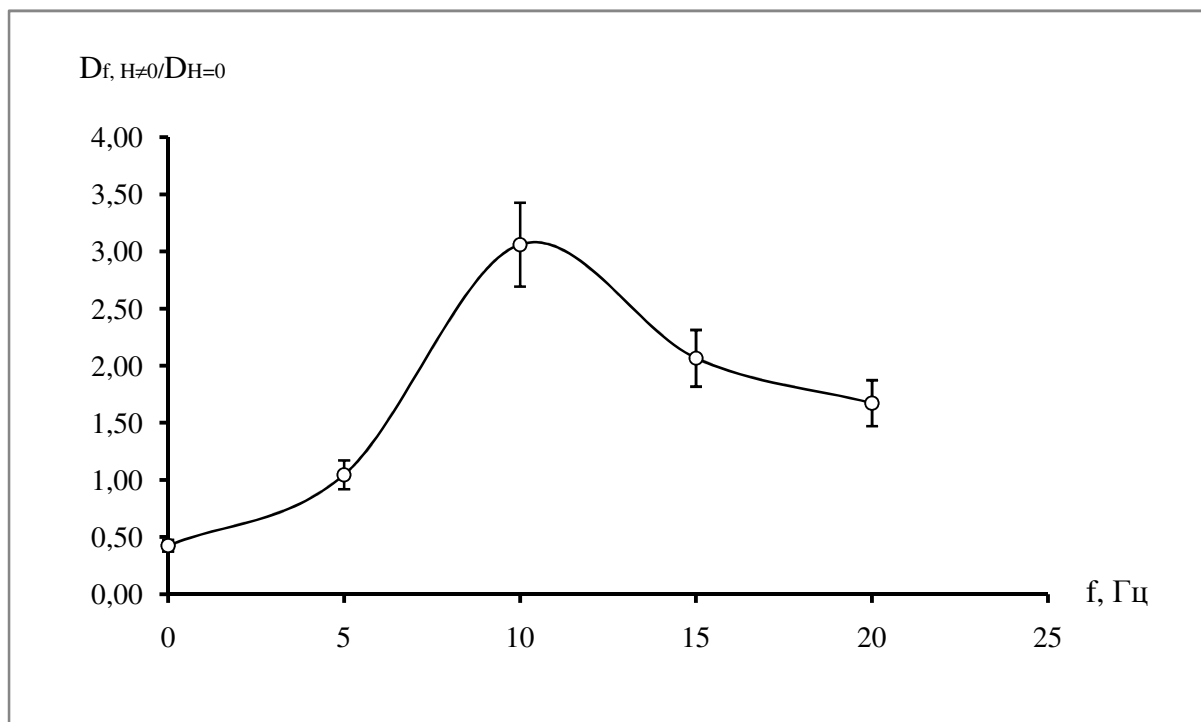


Рис. - Частотная зависимость относительного коэффициента диффузии Ga в Fe при 760 °С

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать предположение о наличии двух механизмов влияния ИМП на подвижность атомов примеси в матрице α -Fe:

1. магнестрикционного, в результате которого происходит изменение параметра решетки и как следствие этого, изменение величины потенциального барьера, преодолеваемого диффундирующим атомом; макроскопически, это выражается в изменении КД Ga в α -Fe при наложении ИМП;

2. релаксационного, наличие которого подтверждается «резонансным» характером поведения КД Sn в α -Fe и является следствием анизотропии упругих взаимодействий атомных комплексов дефектов с полями магнестрикционных напряжений кристаллической решетки [2].

Отметим также здесь механизм взаимодействия движущихся, во время воздействия импульсов магнитного поля, доменных границ с дислокациями, который может вносить вклад в массоперенос примесных атомов [4]. Выполненные в работе экспериментальные исследования дают новую информацию для обсуждения и развития представлений о действующих механизмах влияния ИМП на диффузию примесей в ферромагнитных матрицах. Окончательное решение о действующих механизмах воздействия ИМП на объемную примесную диффузию в описываемых условиях могут дать запланированные радиоизотопные исследования, позволяющих анализировать непосредственно ход концентрационных распределений.

Список использованных источников:

1. Pokoev A.V., Verjakovskaya M.A. // Defect and Diffusion Forum. 2009- Vol. 289-292.- P. 323.
2. Fedotov A.A., Pokoev A.V., Divinski. // Defect and Diffusion Forum. 2017. – Vol. 383. P. 185-189.
3. Таблицы физических величин: Справочник/ Под ред. акад. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1006 с.
4. Вержаковская М.А., Петров С.С., Покоев А.В. // Известия РАН. Серия физическая. 2007. – Т.71 . - №12. – С. 1717-1722.