

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР И МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПРИ ИХ ПРИМЕНЕНИИ В МЕДИЦИНСКИХ ЦЕЛЯХ

Г.В. Дятчина^{1,2}, О.П. Кузовлев^{1,2}, В.Е. Илларионов²

¹ФГУЗ Клиническая больница № 83 ФМБА России, Москва

²Кафедра восстановительной медицины, лечебной физкультуры и спортивной медицины, курортологии и физиотерапии ФГОУ ДПО ИПК ФМБА России

В статье детально изложены: строение, физические свойства и процессы взаимодействия с окружающими телами магнитных пленочных структур, а также их возможное влияние на биоструктуры и системы живого организма. Обоснован и изложен механизм терапевтического действия магнитных пленочных структур.

Ключевые слова: магнитный момент, доменная структура, цилиндрические магнитные домены, монокристаллические пленки феррит-гранатов.

PHYSICAL PROPERTIES OF MAGNETIC FILM STRUCTURES AND MECHANISM OF THEIR THERAPEUTIC EFFECT

Dyatchina GV, Kuzovlev OP, Illarionov VE

The article sets out in details the structure, physical properties and processes of interaction with the surrounding bodies of the magnetic film structures and their possible impact on biostructures and systems of the organism. The mechanism of therapeutic effect of the magnetic films is justified and described.

Keywords: magnetic moment, domain structure, cylindrical magnetic domains, single-crystal iron garnet films.

Рождение в рамках оптоэлектроники нового научного направления – прикладной магнитооптики привело к созданию уникального магнитного материала – магнитных пленок. Материал в магнитных пленках по существу представляет собой решетку ионов (атомов), имеющих магнитный момент и участвующих в различных взаимодействиях. Магнитный момент – это физическая величина, характеризующая магнитные свойства системы заряженных частиц (или отдельных частиц) и определяющая, наряду с другими мультипольными моментами, взаимодействие системы с внешними электромагнитными полями и с другими подобными системами. Магнитные моменты ионов располагаются в определенной закономерности, т.е. существует магнитное упорядочение. Для описания свойств упорядоченных кристаллов вводят понятие магнитных под-

решеток, каждая из которых объединяет одинаковые или родственные ионы, расположенные в эквивалентных узлах кристаллической решетки и имеющие одинаковое направление магнитных моментов [1].

В ряде случаев для описания свойств магнитных материалов, в том числе и магнитных пленок, оказывается достаточной модель ферромагнетика.

Выделяют пять основных взаимодействий, обусловленные магнитными моментами ионов [2, 3]:

- 1) магнитоэлектрическое взаимодействие;
- 2) обменное взаимодействие;

3) взаимодействие, определяемое ориентацией магнитных моментов ионов (атомов) относительно внутренней структуры магнитного материала, в частности кристаллической структуры;

4) взаимодействие магнитных моментов с любым внешним локальным магнитным полем;

5) взаимодействие магнитных моментов с локальными напряжениями.

Обменное взаимодействие выстраивает элементарные магнитные моменты ферромагнетика параллельно друг другу. Результирующий магнитный момент единицы объема ферромагнетика (намагниченность M) ориентируется в одном из направлений, соответствующих энергии магнитной анизотропии, – вдоль одной из осей легкого намагничивания (ОЛН). При этом на поверхности образца возникают магнитные полюсы (магнитостатические полюсы), и при не равном нулю результирующем магнитном моменте часть энергии образца оказывается запасенной в его электростатическом поле. Эта энергия может быть уменьшена, если часть образца оказывается намагниченной в одном, а часть – в другом направлении. При этом образуется магнитная доменная структура, простейший тип которой – плоскопараллельная структура. В соседних доменах векторы M ориентированы в противоположных направлениях вдоль одной и той же ОЛМ. А магнитостатическое поле распространяется в пространство лишь на расстояние, равное толщине домена [4].

Положительная магнитостатическая энергия пленочных структур, в отличие от энергии обменного взаимодействия, достигает в общем случае минимума, когда распределение намагниченности результируется путем разбиения образца на домены – области однородной намагниченности, разделенные переходными областями – доменными стенками, в которых намагниченность резко меняется по направлению. При образовании доменов магнитные заряды на поверхности образца становятся знакопеременными, что снижает магнитостатическую энергию. Однако формирование доменов сопровождается также некоторым возрастанием энергии, связанной с образованием доменных стенок. Когда выигрыш в магнитостатической энергии за счет образования более мелких доменов станет меньше энергии, необходимой для образования новых доменных стенок, процесс разбиения магнитного материала на домены заканчивается. Конфигурация доменной структуры в магнитном материале зависит от его статических магнитных параметров, коэрцитивной силы, внешнего магнитного поля и предыстории образца [2].

Для образования цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) необходимо наличие достаточно большой магнитной анизотропии (зависимость намагниченности от выделенного направления в магнетике), причем ОЛН должна быть перпендикулярна поверхности пленки. ЦМД могут образовываться при намагничивании пленки во внешнем магнитном поле, направленном вдоль ОЛН. Если анизотропия в плоскости магнитной пленки отсутствует, все ориентации доменных стенок эквивалентны. В такой пленке может сформироваться лабиринтная доменная структура, образованная полосовыми доменами, самым причудливым образом обвивающими друг друга. При увеличении напряженности поля смещения лабиринтная доменная структура превращается в структуру ЦМД. Домены с намагниченностью, ориентированной по полю, стремясь уменьшить энергию образца, увеличиваются в объеме, а домены с противоположным направлением намагниченности сжимаются по ширине и уменьшаются по длине до тех пор, пока не превратятся в изолированные ЦМД. При увеличении плотности ЦМД в пленке магнитостатическое взаимодействие между доменами приводит к их упорядочению, в результате формируется гексагональная решетка ЦМД. Если на гексагональную решетку ЦМД действовать полем смещения, параллельным вектору намагниченности внутри ЦМД, то формируется так называемая сотовая доменная структура [5].

Материалы, в которых могут образовываться ЦМД, называются ЦМД-материалами, к ним относятся, в первую очередь, монокристаллические пленки феррит-гранатов (МПФГ). МПФГ выращиваются на подложке из немагнитных гранатов методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденного раствора-расплава, и в первую очередь Bi -содержащих МПФГ. Феррит-гранаты описываются общей формулой: $\{\sum R_i\}_3 [Fe, Me]_2 (Fe, D)_3 O_{12}$. Элементы в фигурных скобках соответствуют додекаэдрической подрешетке – s -подрешетке граната. Элементы в квадратных скобках соответствуют октаэдрической подрешетке – α -подрешетке граната. Элементы в круглых скобках соответствуют тетраэдрической подрешетке – d -подрешетке граната. R_i – редкоземельные элементы: кальций, висмут, свинец; Me – элементы, замещающие железо в α -подрешетке (скандий, индий, титан, алюминий, галлий,

свинец, редкоземельные элементы с малым ионным радиусом); D – элементы, замещающие железо в d-подрешетке (ванадий, кремний, германий, галлий, алюминий). В одной формульной единице граната содержатся три додекаэдрические, две октаэдрические и три тетраэдрические позиции. Намагниченность насыщения M_S феррит-гранатов определяется магнитными моментами подрешеток. Магнитные моменты α - и d-подрешеток в первом приближении противоположно направлены, поэтому если в с-подрешетке нет магнитных ионов, то M_S равна разности намагниченности этих подрешеток, а если в с-подрешетку входят магнитные редкоземельные ионы, то к этой разности добавляется намагниченность с-подрешетки, направленная для всех ионов кроме Nd^{3+} и Pr^{3+} , противоположно намагниченности d-подрешетки. Наличие трех магнитных подрешеток, связанных ферримагнитным взаимодействием, и наведенной в процессе роста магнитной анизотропии позволяет в широких пределах изменять размер доменов (от 10^{-7} до 10^{-3} м), намагниченность насыщения (от 0 до $\geq 1,5 \times 10^2$ кА/м) и другие параметры МПФГ [5].

МПФГ – основной материал, используемый в магнитооптике для создания запоминающих устройств и магнитооптических приборов. Именно эти источники низкоинтенсивных регулярно структурированных магнитных полей стали объектом изучения возможности применения в медицинских целях. Со второй половины 80-х годов прошлого столетия ведутся исследования возникновения ряда клинических эффектов при применении МПФГ для лечения некоторых заболеваний.

Однако следует отметить, что магнитная индукция на поверхности МПФГ может равняться нулю или иметь очень малые значения из-за особенностей направленности намагниченности подрешеток феррит-граната. Взаимодействие магнитных моментов решетки ионов (атомов) МПФГ с локальными напряжениями относится к пяти основным внешним и внутренним взаимодействиям ферримагнетиков [5]. В подобных ситуациях проявляется магнитоэлектрический эффект – возникновение в кристаллах намагниченности при помещении их в электрическое поле, и данный эффект возможен только в магнито-упорядоченных кристаллах, в частности в ферримагнетиках [6].

Экспериментальные данные свидетельствуют, что ткани организма человека генерируют

долговременное электростатическое поле напряженностью до 2 В/м на расстоянии 10 см от их поверхности. Это поле возникает за счет электрохимических реакций, протекающих в живом организме, за счет квазиэлектретной поляризации тканей, за счет наличия внутреннего электротонического поля, трибоэлектрических зарядов и колебаний зарядов, индуцированных действием атмосферного электрического поля. Динамика этого поля характеризуется медленными аperiodическими колебаниями при спокойном состоянии испытуемых и резкими изменениями величины, а иногда и знака потенциала при изменении их функционального состояния. Генерация данного поля связана с тканевым метаболизмом, а не с кровообращением, поскольку у трупа оно регистрируется в течение 20 часов после смерти [7].

Разнообразные клинические эффекты при применении МПФГ возникают именно за счет взаимодействия электростатического поля тела человека и МПФГ, в которых происходит переориентация доменных структур и возникновение или усиление магнитной индукции, т.е. возникновение внешнего постоянного магнитного поля пленочных структур. На фото представлена процедура воздействия излучателем на основе МПФГ на болевую зону (рис.).

Анализ результатов исследований ведущих ученых в области магнитобиологии и магнитотерапии [8-16] дает обобщенную картину ответной реакции организма человека на воздействие магнитного поля. Результаты воздействия магнитных полей нами условно разделены на соответствующие иерархические уровни живого организма [17].

На атомно-молекулярном уровне возникают следующие эффекты и явления: взаимодействие внешнего магнитного поля с соответ-



Рис. Излучатель МПФГ

ствующими акцепторами организма; возникновение в биоструктурах электростатического, диэлектрического эффектов и реструктуризации доменов поляризации; конформационные изменения биоструктур; электролитическая диссоциация ионов; появление электродвижущей силы, токов проводимости и смещения; изменение электрического статуса клетки.

Клеточный уровень характеризуется такими явлениями как: изменение энергетической активности клеточных мембран; повышение проницаемости клеточных мембран; активация окислительно-восстановительных процессов; повышение реакционной способности ферментативных систем; изменение соотношения свободного и фосфорилирующего окисления в дыхательной цепи (применительно к действию МПФГ – стимуляция тканевого дыхания).

На тканевом и органном уровнях происходит: магнитогидродинамическое торможение циркуляции биологических жидкостей; соответствующая ориентация в магнитном поле форменных элементов крови; активация про-

тивосвертывающей системы крови; увеличение количества функционирующих сосудов микроциркуляторного русла; уменьшение интерстициального отека и напряжения тканей; тормозной эффект нервной системы на действие постоянного магнитного поля.

Клинические эффекты как интегральный ответ всего организма включают в себя: улучшение регионарного кровообращения, в первую очередь, за счет активизации микроциркуляторного русла; гипокоагулирующий; седативный; гипотензивный; противовоспалительный; обезболивающий; противоотечный; регенераторный; спазмолитический; десенсибилизирующий; иммунокорректирующий; нормализацию липидного обмена.

Таким образом, МПФГ могут быть потенциально полезны при целом ряде воспалительных и дистрофических заболеваний, однако для широкого их внедрения в медицинскую практику требуется проведение клинических исследований, основанных на принципах доказательной медицины.

Литература

1. Физический энциклопедический словарь. М.: Большая Российская энциклопедия, 1995.
2. Звездин А.К., Котов В.А. Магнитооптика тонких пленок. М.: Наука, 1988.
3. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма: Пер. с японск., в 2-х томах. М.: Мир, 1987
4. Барьяхтар В.Г., Иванов Б.А. В мире магнитных доменов. Киев: Наукова думка, 1986.
5. Рандошкин В.В., Червоненкис А.Я. Прикладная магнитооптика. М.: Энергоиздат, 1990.
6. Березовский В.А., Колотилов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека: Справочник. Киев: Наукова Думка, 1990.
7. Кулин Е.Т. Биоэлектростатический эффект. Минск: Наука, 1980.
8. Абдуллина З.М. Биологическое действие магнитных полей на живой организм. Фрунзе, 1975.
9. Биогенный магнетит и магниторецепция. Новое о биомагнетизме: В 2-х т. Т. 1: Пер. с англ. / Под

ред. Дж. Киршвинка, Д. Джонса, Б. Мак-Фаддена. М.: Мир, 1989.

10. Введение в электромагнитную биологию / Под ред. Г.Ф. Плеханова. Томск, 1979.

11. Влияние магнитных полей на биологические объекты / Под ред. Ю.А. Холодова. М.: Медицина, 1971.

12. Демецкий А.М., Алексеев А.Г. Искусственные магнитные поля в медицине. Минск: Беларусь, 1981.

13. Забродина Л.В. Действие постоянных магнитных полей на свертывающую систему крови в эксперименте: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 1972.

14. Реакция биологических систем на магнитные поля / Под ред. Ю.А. Холодова. М.: Медицина, 1978.

15. Холодов Ю.А. Реакция нервной системы на электромагнитные поля. М.: Наука, 1975.

16. Холодов Ю.А. Мозг в электромагнитных полях. М.: Наука, 1982.

17. Илларионов В.Е. Магнитотерапия. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2010.

Информация об авторах:

Дятчина Галина Владимировна – зав. отделением физиотерапии ФГУЗ КБ№83 ФМБА России, к.м.н. Тел.: [495] 395-63-77

Кузовлев Олег Петрович – главный врач ФГУЗ КБ №83 ФМБА России, д.м.н., профессор. Тел.: [495] 395-61-97

Илларионов Валерий Евгеньевич – проф. кафедры восстановительной медицины, лечебной физкультуры и спортивной медицины, курортологии и физиотерапии ИПК ФМБА России, д.м.н. Тел.: [495] 395-63-77