

**РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ, ОХОРОНА  
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

УДК 621.9.01

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИО НА ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНУЮ  
РЕКОМБИНАЦИЮ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ  
СТРУКТУРАХ**

*Богданов А.В., Малыгин Б.В., Бень А.П., Коновалов М.Ю.,  
Херсонская государственная морская академия*

*В статье предложена модель долговременной намагниченности на основе донорно-акцепторной рекомбинации неравновесных носителей заряда, расположенных на границах доменов в магнетиках. Выведены уравнения, описывающие долговременную релаксацию неравновесных носителей заряда. Экспериментально исследовано влияние частоты, длительности и формы импульсов магнитного поля на величину индукции в соленоиде.*

*Ключевые слова: магнетики, домены, донорно-акцепторная рекомбинация носителей заряда, индуктивность, соленоид.*

**Постановка проблемы.** В настоящее время магнитно-импульсная обработка (МИО) нашла широкое применение в машиностроении, обрабатывающей промышленности, медицине и других областях народного хозяйства [1]. МИО используется как для диагностики изделий, так и для повышения их положительных качеств.

Переменное магнитное поле, в отличие от постоянных магнитов, создаёт электродвижущую силу индукции неподвижных электрических зарядов, а также предотвращает разогрев образца при фиксированной величине магнитной индукции. Как показывают экспериментальные результаты, с увеличением температуры намагниченность материала уменьшается.

С другой стороны, значительное увеличение частоты магнитного поля приводит к значительному росту индуктивного сопротивления и соответствующему уменьшению индукции магнитного поля соленоида. Отсюда, для получения положительного эффекта МИО необходимо выбирать оптимальную частоту и форму импульсов магнитного поля.

При рассмотрении магнетиков (тел способных намагничиваться – приобретать магнитные свойства) учитывают магнитные моменты электронов в атомах (спины электронов). Однако, угловая частота кругового движения электрона в плоскости перпендикулярной магнитному полю - Ларморова частота, намного выше обычно используемых частот при МИО. Релаксация свойств намагниченности может продолжаться многие часы и быть обратимой или необратимой.

Для объяснения долговременной релаксации намагниченности ферромагнетиков (веществ, в которых собственное (внутреннее) магнитное поле может в тысячи раз превосходить внешние магнитные поля) учитывают

их доменную структуру. Размер домена  $10^{-3} - 10^{-2}$  см. Под воздействием внешнего магнитного поля домены изменяют размеры или поворачиваются по полю, что, учитывая их размеры, сравнительно невысокую используемую индукцию магнитного поля и жёсткое закрепление в исследуемых структурах, сомнительно. То, что необходимым условием ферромагнетизма является перекрытие волновых функций электронов, указывает на важную роль электронов в объяснении долговременной релаксации намагниченности ферромагнетиков.

**Анализ существующего состояния проблемы и постановка задачи исследования.** Из приведённых литературных данных можно сделать следующие выводы:

1. Долговременную релаксацию приобретаемых изделиями новых свойств в результате МИО невозможно объяснить только ориентацией спинов электронов. В процессе МИО могут происходить как необратимые явления, в частности, увеличение (или уменьшение) приобретаемых изделием положительных качеств, так и обратимые, например, известная петля гистерезиса. Именно процессы в доменах обуславливают долговременные релаксационные явления.

2. Для изменения размеров и поворота доменов с размером  $10^{-3} - 10^{-2}$  см недостаточны магнитные поля, при которых наблюдается, например, магнитный гистерезис, а необходима достаточно большая индукция магнитного поля, создаваемая, например, МИО.

3. Зависимость положительного эффекта МИО от определённого перекрытия волновых функций электронов, от температуры, частоты и формы сигнала указывает на участие захвата и освобождения неравновесных носителей заряда на ловушки, образованные на границе доменов и возможность донорно-акцепторной рекомбинации неравновесных носителей заряда (ДАР) [2-4].

4. Зонную структуру с ловушечными уровнями, аналогичную зонной структуре полупроводников, при исследовании данных структур использовать нельзя. Поэтому, механизм ДАР носителей заряда, используемый для объяснения долговременных релаксационных явлений в синтетическом полупроводниковом алмазе (СПА), требует существенной коррекции.

5. Физической модели влияния МИО на изделия, учитывающей отмеченные выше литературные данные, на сегодня не существует [1]. Параметры МИО зачастую подбираются экспериментально, исходя с величины получаемого положительного эффекта.

Задачей настоящей статьи является построение физической модели для неупорядоченных структур, учитывающей приведённые теоретические и экспериментальные результаты исследований, а также подбор параметров импульсов для получения максимальной магнитной индукции в соленоиде.

Целью работы являлся подбор оптимальных параметров импульсов, при которых происходит максимальное их влияние на характеристики обрабатываемых изделий.

**Построение модели долговременной релаксации намагниченности в неупорядоченных структурах.** Для построения модели долговременной релаксации намагниченности в неупорядоченных структурах, в том числе и в ферромагнетиках, нами учитывались как их доменная структура, так и ДАР неравновесных носителей заряда, образуемых на границах доменов в результате МИО.

Домены отличаются структурой от остального образца, и на их границах образуются донорно-акцепторные пары (ДАП). Рассмотрим границу домена, в которой концентрация акцепторных ловушек (в дальнейшем – акцепторов) в домене равна  $N_a$ , а концентрация донорных ловушек (в дальнейшем – доноров) в неупорядоченной структуре  $N_d$ , где  $N_a > N_d$  (рис.1).

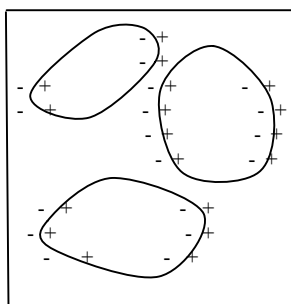


Рисунок 1 – Схема расположения неравновесных зарядов в доменах неупорядоченной структуры

Данная схема справедлива и в противоположном случае, когда в неупорядоченной структуре имеются акцепторы, а в доменах – доноры.

Расстояние между противоположными зарядами в ДАП должны быть не настолько малыми, чтобы произошла их рекомбинация, но достаточно малыми, чтобы кулоновскими силами притяжения между ними невозможно было пренебречь. Соответствующее расстояние между зарядами в ДАП удовлетворяет условию слабого перекрытия волновых функций электронов, что необходимо как для образования ферромагнетизма, так и для эффективной ДАР носителей заряда.

Для использования модели ДАР необходимы следующие ограничения по концентрации акцепторных ловушек [4, 5]:

1) В простейшем случае температурного разброса ловушек расстояние между донорами и акцепторами должно быть намного больше расстояний между соседними атомами в неупорядоченной структуре:

$$N_a^{-1/3} \gg a_p; \quad N_a^{-1/3} \gg r \quad (1)$$

где:  $a_p = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0\hbar}{q^2 m_p^*}$  – боровский радиус дырки;  $m_p^*$  – эффективная масса дырки;

$$r = \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0 kT}{q^2 N_d}}$$

2) Концентрация ловушек должна быть достаточно большой, чтобы между ними было малое геометрическое расстояние  $R$ , обуславливающее эффективную ДАР носителей заряда:

$$W_f = W_{f0} \exp\left(-\frac{2R}{a_{DA}}\right) \quad (2)$$

где:  $W_f$  – коэффициент ДАР;  $W_{f0}$  – некоторая постоянная,  $a_{DA}$  – порядка расстояния между ближайшими атомами. Для эффективной ДАР, например в СПА, необходимо, чтобы  $N_a = 10^{17} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

В случае температурного разброса ловушек наиболее вероятное расстояние для удалённых ДАП ( $R_m$ ) определяется выражением:

$$R_m = (2\pi N_a)^{-1/3} \quad (3)$$

Энергия кулоновского взаимодействия между ловушками определяется выражением:

$$E_g = \frac{q^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R_m} \quad (4)$$

В пространственной схеме ДАР (не зонной диаграмме, как в полупроводниках) носителей заряда на границе домена учитываются как положение ловушек с концентрацией  $N_a$ ,  $N_d$ , так и положение свободных неравновесных и равновесных электронов с концентрациями –  $n$ ,  $n_0$  и дырок –  $p$ ,  $p_0$ , соответственно (рис. 2).

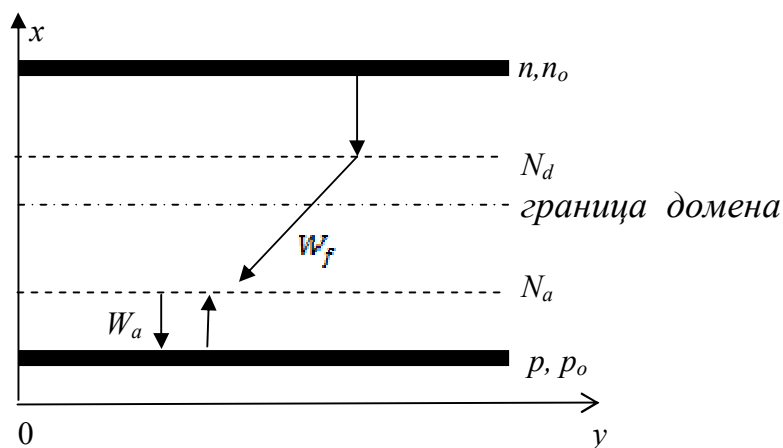


Рисунок 2 – Схема ДАР носителей заряда на границе домена

По представленной схеме на доноры могут захватываться неравновесные и равновесные электроны  $n$ ,  $n_0$ , а на акцепторы могут

захватываться вследствие теплового разогрева и освободиться с вероятностью  $W_a$  как равновесные, так и не равновесные дырки  $p, p_o$ .

Пусть концентрация положительных доноров равна  $N_+$ , а при захвате на них электронов –  $N_{do}$ . Концентрация отрицательных акцепторов равна  $N_-$ , а при захвате на них дырок –  $N_{ao}$ . В равновесном случае все доноры положительны, а концентрация отрицательных и нейтральных акцепторов, соответственно, равны:  $N_-^0, N_{ao}^0$ .

Доноры с захваченными на них неравновесными электронами с концентрацией  $N_{do}$  образуют с акцепторами, заполненными дырками с концентрацией  $N_{ao}$  ДАП, в которых возможна ДАР с вероятностью  $W_f$ .

Неравновесные электроны и дырки на донорах и акцепторах, соответственно, могут образовываться в результате различных внешних воздействий: МИО, при пропускании электрического тока или под воздействием радиации.

Концентрации как  $N_d$  и  $N_a$ , так и  $N_{do}$  и  $N_{ao}$ , обеспечивающих эффективную ДАР, например в СПА, примерно равны  $10^{16} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , что намного больше концентрации свободных носителей заряда  $n, n_o, p, p_o$ .

$$N_+, N_-, N_{do}, N_{ao} \ll p + p_o \ll n + n_o \quad (5)$$

Концентрацию свободных дырок можно найти из кинетических уравнений, описывающих изменение со временем концентраций заполненных дырками акцепторов  $\frac{dN_{ao}}{dt}$  и неравновесных дырок  $\frac{dp}{dt}$  при МИО

данной структуры. Изменение со временем концентрации заполненных дырками акцепторов обуславливается тремя процессами (рис. 2): захватом свободных дырок на отрицательные акцепторы с вероятностью  $W_a$ , тепловым их освобождением с такой же вероятностью  $W_a$  и их ДАР с неравновесными электронами, захваченными на доноры с вероятностью –  $W_f$ . Изменение со временем концентрации неравновесных дырок обуславливается первыми из двух, указанных выше процессов, но с обратным знаком. С учётом уравнения электрической нейтральности для данного случая получаем систему из трёх уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dN_{ao}}{dt} = (p + p_o)W_a N_- - \frac{p_o W_a N_-^o}{N_{ao}^o} N_{ao} - N_{ao} W_f N_{do} \\ \frac{dp}{dt} = -(p + p_o)W_a N_- + \frac{p_o W_a N_-^o}{N_{ao}^o} N_{ao} \\ N_{ao} - N_{do} = N_a - N_d - p \end{cases} \quad (6)$$

Из решения данной системы уравнений получаем зависимость концентрации свободных дырок от времени ( $t$ ) и температуры ( $T$ ):

$$(p + p_o)(t, T) = \frac{qN_v(N_a - N_d) \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)}{N_d - cN_a \exp\left[-W_f(N_a - N_d)t\right]} \quad (7)$$

Зависимость электропроводности  $\sigma$  образца от времени  $t$  имеет вид:

$$\sigma = \frac{\sigma_c}{1 - \frac{N_{od} \cdot N_a}{N_d^2} \exp\left[-W_f(N_a - N_d)t\right]} \quad (8)$$

где  $\sigma_c$  – электропроводность структуры в равновесном случае.

В работах [2-4], было показано, что данная зависимость электропроводности от времени может приводить к отрицательному дифференциальному сопротивлению  $N$ -типа данной структуры. При определённой частоте устройство с отрицательным дифференциальным сопротивлением  $N$ -типа может генерировать колебания (быть генератором напряжения) или переходить в резонанс от внешнего генератора электромагнитных колебаний.

В частности, неравновесные ДАП, находящиеся на границах доменов и являясь фактически некоторым колебательным контуром, имеют некоторую собственную частоту, которая может вступать в резонанс с частотой МИО. Именно поэтому для получения положительного эффекта МИО изделий важна как величина индукции магнитного поля, так и параметры импульсов (форма, длительность, частота). Этим объясняется актуальность проведённых исследований.

**Результаты экспериментальных исследований.** Для экспериментальных исследований влияния длительности, частоты и формы подаваемых на образец импульсов магнитного поля изготавливались соленоиды с различным количеством витков на единицу длины, различным сопротивлением соленоида, различными геометрическими размерами активного пространства соленоидов, с сердечниками и без сердечников. С помощью генератора специальных сигналов создавались синусоидальные, треугольные, прямоугольные и пилообразные импульсы, которые подавались на соленоид. Величина проходящего через соленоид тока, а значит величина и форма образуемых импульсов индукции магнитного поля, снималась через нагрузочное сопротивление, подключенное последовательно к соленоиду. Форма импульсов подаваемого сигнала на соленоид и форма сигнала индукции магнитного импульса (верхний и нижний рисунки на осциллограммах, соответственно) представлены на рис. 3, 4.

Как видно из приведённых осциллограмм, при низких частотах происходит более сильное искажение формы сигнала (рис. 3). При увеличении частоты происходит существенное уменьшение величины индукции магнитного импульса (рис. 4).

На рис. 5 приведена зависимость полного сопротивления соленоида от частоты для различных форм сигнала.

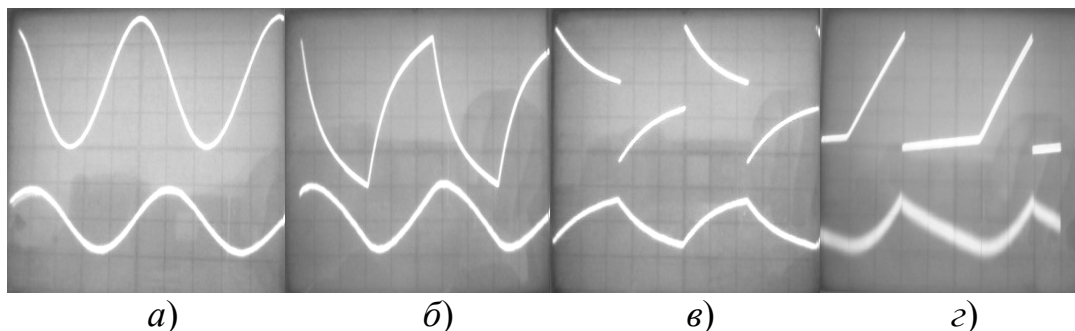


Рисунок 3 – Осциллограммы подаваемого сигнала на соленоид (сверху) и магнитного импульса (снизу) на частоте 100 Гц, соответственно синусоидальной, треугольной, прямоугольной и пилообразной формы

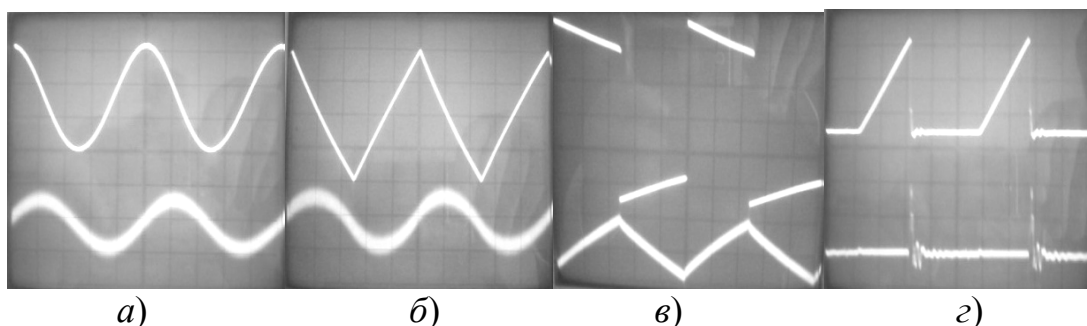


Рисунок 4 – Осциллограммы подаваемого сигнала на соленоид (сверху) и магнитного импульса (снизу) на частоте 1000 Гц, соответственно синусоидальной, треугольной, прямоугольной и пилообразной формы.

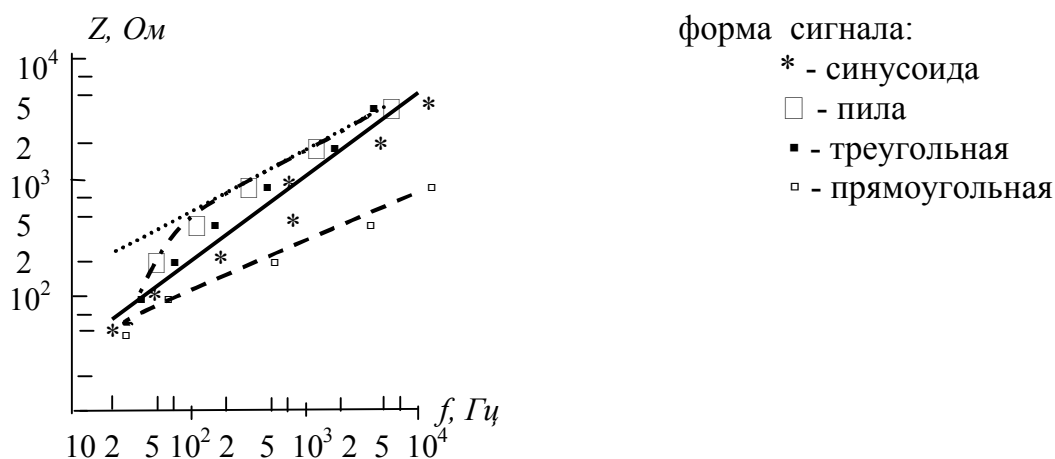


Рисунок 5 – Зависимость полного сопротивления соленоида от частоты для различных форм сигнала

Активное сопротивление первого соленоида равнялось 7,9 Ом, а полное сопротивление на синусоидальном сигнале при 20 Гц равнялось 60 Ом и с увеличением частоты линейно увеличивалось. Учитывая, что индуктивное сопротивление значительно больше активного, выражение для полного сопротивления приобретает вид:

$$Z \approx \omega L \sqrt{1 + \frac{R^2}{\omega^2 L^2}} \quad (9)$$

Индуктивность соленоида, определённая по углу наклона зависимости полного сопротивления от частоты, равнялась  $L = 0,2$  Гн. Полученное значение индуктивности соответствует её значению вычисленной по формуле:

$$L = \mu \mu_0 n^2 S l \quad (10)$$

где  $\mu, \mu_0$  – относительная и абсолютная магнитные проницаемости;  $n$  – количество витков на единицу длины соленоида;  $S, l$  – поперечное сечение и длина соленоида.

### Выводы.

1. Предложенная в статье модель позволяет пояснить и описать аналитически долговременную намагничённость в процессе МИО не с помощью изменения размеров или поворота по полю доменов, а ДАР носителей заряда на границах доменов.

2. Известные уравнения, описывающие ДАР, используемые в зонной теории полупроводников, преобразованы для объяснения аналогичных явлений в неупорядоченных структурах. Известная зонная диаграмма электронных переходов в полупроводниках заменена обычной пространственной схемой переходов электронов.

3. Экспериментально показано, что возрастание индукции магнитного поля ограничивается частотой и формой импульса магнитного поля. Увеличение частоты сигнала или уменьшения фронта импульса приводит к практически линейному уменьшению индукции магнитного поля при неизменном напряжении, подаваемом на соленоид.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малыгин Б. В. Магнитное упрочение изделий (теория и практика) / Б. В. Малыгин, А. П. Бень. – Херсон : Издательство Херсонского государственного морского института, 2009. – 352 с.

2. Богданов А. В. Механизм образования отрицательного дифференциального сопротивления  $N$  – типа в неупорядоченных структурах. / А. В. Богданов, Б. В. Малыгин, М. Ю. Коновалов, А. П. Бень. – ААЭКС, 2011 (в печати).

3. Богданов А. В. Вольтамперные характеристики синтетических полупроводниковых алмазов, легированных в процессе синтеза бором. / Богданов А. В., Преснов В. А. // Изв. вузов СССР ; Сер. Физика. – 1978. – № 9. – С. 130-132.

4. Богданов А. В. Приборы на основе полупроводниковых алмазов / Богданов А. В., Викулин И. М. // Обзоры по электронной технике. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Выпуск 3 (1274). – Москва: Изд-во ЦНИИ «Электроника», 1987. – 56 с.



5. Бонч-Бруевич В. Л. Физика полупроводников / В. Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников. – М. : Наука, 1977. – 672 с.

**Богданов О.В., Малигін Б.В., Бень А.П., Коновалов М.Ю. ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ МІО НА ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНУ РЕКОМБІНАЦІЮ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В НЕВПОРЯДКОВАНИХ СТРУКТУРАХ**

*У статті запропонована модель довгострокової намагніченості на основі донорно-акцепторної рекомбінації неврівноважених носіїв заряду, розташованих на кордонах доменів в магнетиках. Виведені рівняння, що описують довготривалу релаксацію неврівноважених носіїв заряду. Експериментально досліджено вплив частоти, тривалості та форми імпульсів магнітного поля на величину індукції в соленоїді.*

*Ключові слова: магнетики, домени, донорно-акцепторна рекомбінація носіїв заряду, індуктивність, соленоїд.*

**Bogdanov A.V., Malygin B.V., Ben A.P., Kononov M.Y. INFLUENCE OF MPT PARAMETERS ON DONOR-ACCEPTOR RECOMBINATION OF CHARGE CARRIERS IN DISORDERED STRUCTURES**

*A model of long-term magnetization on the basis of donor-acceptor recombination of disordered charge carriers located at the domain borders in magnetic is proposed. The equations describing the long-term relaxation of disordered charge carriers are done. The effect of frequency, duration and shape of the pulses in the magnetic field on the induction value in solenoid is experimentally researched.*

*Keywords: magnetic, domains, donor-acceptor recombination of charge carriers, inductance, solenoid.*