

зерными импульсами с энергией 1.3 мДж, длительностью 85 нс на длине волны 1540 нм. Диаметр сфокусированного пятна на образце составлял 70 мкм. Для обработки экспериментальных данных, которые показывают, что ситалл с нанокристаллами $\text{Co}^{2+}:\text{Ga}_2\text{O}_3$, хорошо просветляется, использовалась модель медленно релаксирующего насыщающегося поглотителя [3]:

$$\frac{dE_0}{dz} = -I_{sa} \cdot \frac{\ln(1/T_0)}{L} \cdot \left[(1-\gamma) \cdot (1 - e^{-\frac{E_0}{I_{sa}}}) + \gamma \cdot \frac{E_0}{I_{sa}} \right]$$

где $I_{sa} = h\nu/\sigma_a$ – интенсивность насыщения поглощения; $\gamma = \sigma_{esa}/\sigma_a$ – контраст просветления; σ_a и σ_{esa} – поперечные сечения поглощения из основного и возбужденного состояний, соответственно. По результатам моделирования определены контраст просветления $\gamma=0.12$, поперечные сечения поглощения из основного $\sigma_a=1.7 \cdot 10^{-19}$ см² и возбужденного $\sigma_{esa}=0.2 \cdot 10^{-19}$ см² состояний.

С помощью исследованного материала получена пассивная модуляция добротности лазера на эрбиевом стекле с поперечной диодной накачкой. Накачка осуществлялась лазерным диодом с длиной волны 940 нм и мощностью до 70 Вт. В качестве активной среды использовался стержень $\varnothing 1.6 \times 24$ мм. Резонатор лазера длиной 65 мм был образован парой плоских зеркал. Пропускание выходного зеркала на длине волны генерации составляло 13%. Начальное пропускание пассивного затвора толщиной 0.5 мм $T=85\%$. Радиус моды внутрирезонаторного излучения на затворе составлял 150 мкм. В описанном лазере были получены импульсы излучения с энергией 1.75 мДж и длительностью 25.4 нс.

Таким образом, в работе синтезирован новый лазерный материал – ситалл, содержащий нано-

кристаллы оксида галлия с ионами кобальта $\text{Co}^{2+}:\text{Ga}_2\text{O}_3$. Исследованы его структурные, спектрально-люминесцентные и нелинейно-оптические свойства. Получена пассивная модуляция добротности эрбиевого лазера с поперечной диодной накачкой. Показано, что ситаллы с нанокристаллами оксида галлия $\text{Co}^{2+}:\text{Ga}_2\text{O}_3$ являются перспективной средой для пассивной модуляции добротности лазеров спектрального диапазона 1.4-1.75 мкм.

1. Konstantin V. Yumashev, "Saturable absorber $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ crystal for Q switching of 1.34- μm $\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$ and 1.54- μm $\text{Er}^{3+}:\text{glass}$ lasers," *Appl. Opt.* **38**, 6343-6346 (1999).
2. K.V. Yumashev, I.A. Denisov, N.N. Posnov, P.V. Prokoshin, V.P. Mikhailov. Nonlinear absorption properties of $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ crystal. *Appl. Phys. B* **70**, 179–184 (2000).
3. Denisov I.A., Demchuk M.I., Kuleshov N.V., Yumashev K.V. $\text{Co}^{2+}:\text{LiGa}_5\text{O}_8$ saturable absorber passive Q-switch for 1.34 μm $\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$ and 1.54 μm $\text{Er}^{3+}:\text{glass}$ lasers. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 2455-2457 (2000).
4. [John B. Gruber, Ann W. Kennedy, Bahram Zandi and James A. Hutchinson](#) "Modeling of the Co^{2+} saturable absorber Q-switch for the $\text{Er}:\text{Yb}:\text{glass}$ laser (1.534 μm)", *Proc. SPIE* 3928, Nonlinear Materials, Devices, and Applications, 142 (March 23, 2000).
5. Alexander M. Malyarevich, Igor A. Denisov, Konstantin V. Yumashev, Olga S. Dymshits, Alexander A. Zhilin, and Uk Kang, "Cobalt-doped transparent glass ceramic as a saturable absorber Q switch for erbium:glass lasers," *Appl. Opt.* **40**, 4322-4325 (2001).

УДК 534-16:534-8:621.9.048.6

КОНЦЕНТРАТОРЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ НЕОДНОРОДНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Степаненко Д.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Возможность создания концентраторов ультразвуковых колебаний на основе кольцевых упругих элементов с постоянной и переменной площадью поперечного сечения была ранее теоретически обоснована автором [1, 2]. Основными преимуществами концентраторов на основе кольцевых упругих элементов по сравнению со стержневыми концентраторами являются простота изготовления, малые габаритные размеры и масса. В данной работе дается теоретическое обоснование возможности использования в качестве концентраторов ультразвуковых колебаний неоднородных кольцевых упругих элементов,

состоящих из двух кольцевых сегментов, выполненных из материалов с различным модулем упругости. В качестве прототипа для подобного типа концентраторов послужили стержневые концентраторы, состоящие из двух соединенных между собой четвертьволновых стержней с различным модулем упругости и одинаковой площадью поперечного сечения, ступенчатое изменение модуля упругости в которых равносильно ступенчатому изменению площади поперечного сечения в ступенчатых стержневых концентраторах.

В качестве основы для теоретического анализа возможности усиления колебаний неоднородными кольцевыми упругими элементами были использованы дифференциальные уравнения колебаний однородного кольцевого сегмента. Неизвестные постоянные в общих решениях этих уравнений определялись таким образом, чтобы обеспечить непрерывное сопряжение решений на границе сегментов концентратора и выполнение граничных условий, описывающих симметричность колебаний относительно плоскости симметрии концентратора. Характер общих решений определяется видом корней кубического уравнения

$$\zeta^3 + (2 + p\xi)\zeta^2 + (1 - \xi - p\xi)\zeta + \xi(1 - p\xi) = 0, \quad (1)$$

где $p = J/SR^2$ – безразмерный геометрический параметр, J – осевой момент инерции поперечного сечения сегмента, S – площадь поперечного сечения сегмента, R – радиус средней линии сегмента, $\xi = \omega^2/p\omega_0^2$ – безразмерный частотный параметр, ω – круговая частота колебаний, $\omega_0 = (1/R)\sqrt{E/\rho}$.

Существуют три точки изменения характера корней уравнения (1): $\xi_L < \xi_M < \xi_U$. В случае $\xi_M < \xi \leq \xi_U$ амплитуда V тангенциальных колебательных смещений точек средней линии кольцевых сегментов после учета условий симметрии, позволяющих сократить число неизвестных постоянных в каждом из общих решений с 6 до 3, будет выражаться равенствами

$$V_1(\varphi_1) = A_1 \sin(d_1\varphi_1) + A_2 \operatorname{sh}(e_1\varphi_1) + A_3 \operatorname{sh}(f_1\varphi_1), \quad (2)$$

$$V_2(\varphi_2) = A_4 \sin(d_2\varphi_2) + A_5 \operatorname{sh}(e_2\varphi_2) + A_6 \operatorname{sh}(f_2\varphi_2), \quad (3)$$

где $d_1, e_1, f_1, d_2, e_2, f_2$ – окружные волновые числа, выражаемые через корни уравнения (1); $A_1..A_6$ – неизвестные постоянные, подлежащие определению из условий сопряжения решений; φ_1 и φ_2 – угловые координаты, отсчитываемые от сечений, в которых плоскость симметрии пересекает сегменты.

Подстановка общих решений (2)-(3) в условия сопряжения приводит к системе линейных однородных алгебраических уравнений для определения неизвестных постоянных $A_1..A_6$:

$$\mathbf{M}(\omega)\mathbf{A} = 0, \quad (4)$$

где \mathbf{M} – матрица размером 6×6 , \mathbf{A} – вектор неизвестных постоянных.

Система (4) имеет нетривиальное решение при условии

$$\det \mathbf{M}(\omega) = 0,$$

из которого могут быть определены резонансные частоты колебаний.

Расчет собственных форм колебаний, зависящих от значения вектора \mathbf{A} , затрудняется тем, что матрица $\mathbf{M}(\omega)$ в окрестности точек резонанса

является плохо обусловленной. В связи с этим решение системы (4) производится методом сингулярного разложения (SVD-разложения). Правые сингулярные векторы, соответствующие нулевым или близким к нулю сингулярным числам матрицы $\mathbf{M}(\omega)$, будут являться линейно независимыми нетривиальными решениями системы (4).

В качестве численного примера, подтверждающего возможность усиления колебаний неоднородными кольцевыми концентраторами, был рассмотрен расчет концентратора со следующими параметрами: радиус средней линии $R = 29$ мм; толщина в радиальном направлении $h = 2$ мм; модули упругости материалов сегментов $E_1 = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па (сталь), $E_2 = 1,3 \cdot 10^{11}$ Па (бронза); плотности материалов сегментов $\rho_1 = 7800$ кг/м³, $\rho_2 = 8300$ кг/м³; центральный угол стального сегмента $2\varphi_0 = \pi/2$. Были рассмотрены частоты колебаний f в диапазоне от 20 до 25 кГц. На рисунке 1 приведена резонансная кривая концентратора, представляющая собой график зависимости $\lg(|\det \mathbf{M}(f)|)$ от частоты f .

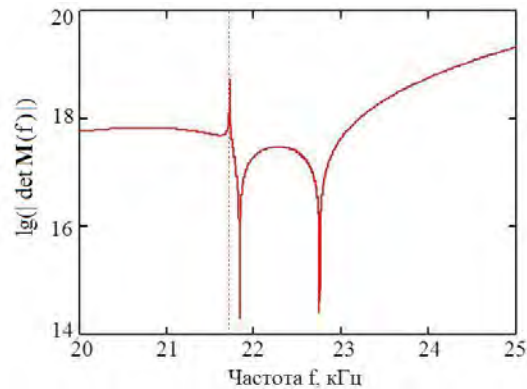


Рисунок 1 – Расчетная резонансная кривая кольцевого концентратора

Точки, в которых $\lg(|\det \mathbf{M}(f)|) \rightarrow -\infty$, соответствуют резонансным частотам, одной из которых является частота $f_{\text{рез}} = 22,75$ кГц. Для этой частоты с помощью метода SVD-разложения была рассчитана собственная форма колебаний, распределение амплитуды радиальных колебательных смещений $W(\varphi)$ для которой приведено на рисунке 2.

Распределение амплитуды показано для полукольца, отсекаемого плоскостью симметрии. Из множества линейно зависимых нетривиальных решений системы (4) было выбрано решение, удовлетворяющее условию $\|\mathbf{A}\| = 1$.

Как следует из анализа рисунка 2, рассматриваемая собственная форма колебаний характеризуется наличием усиления колебаний по амплитуде с коэффициентом усиления

$$K = |W(\pi)/W(0)| = 1,53.$$

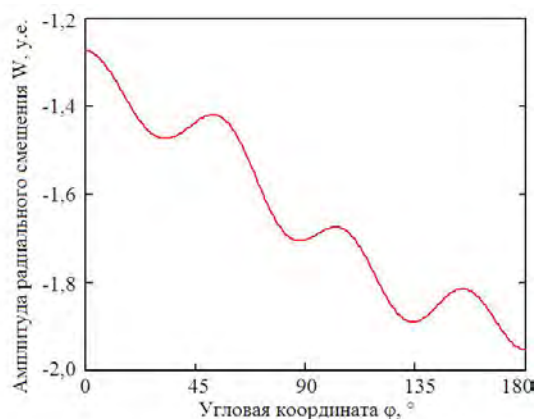


Рисунок 2 – Расчетная собственная форма колебаний кольцевого концентратора для частоты $f = 22,75$ кГц

УДК 620.179.14

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАМАГНИЧИВАНИЯ ТОНКОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ

Стрелюхин А.В.¹, Осипов А.А.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Институт прикладной физики НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Неразрушающий магнитный контроль получил широкое распространение для решения разнообразных задач обеспечения надежности выпускаемых изделий из ферромагнитных материалов, что обусловлено их широким использованием во многих отраслях промышленности. Кроме того, он имеет высокую производительность, надежность, точность и позволяет проводить испытания без разрушения изделия.

Для приборной реализации магнитного контроля необходимы разнообразные источники и измерители магнитного поля. Необходимые расчеты таких устройств и систем проводятся с использованием уравнений Максвелла и соответствующих конкретной задаче граничных условий. Однако из-за гистерезиса и нелинейности магнитных характеристик материала строго решить систему уравнений Максвелла для ферромагнитных изделий затруднительно. Поэтому для моделирования процесса намагничивания ферромагнитных материалов используют численные методы.

Такие численные методы как сеток, конечных элементов, граничных элементов и т.д. для своей реализации требуют учета граничных условий на поверхности объекта контроля (раздельно для нормальной \vec{n} и тангенциальной $\vec{\tau}$ составляющих) [1]. Известны подходы, при использовании которых расчет можно ограничить только объемом, занимаемым ферромагнетиком. Одним из

Таким образом, приведенный численный пример показывает возможность усиления ультразвуковых колебаний по амплитуде с помощью неоднородных кольцевых концентраторов.

1. Степаненко, Д.А. Разработка и исследование нового типа концентраторов ультразвуковых колебаний на основе кольцевых упругих элементов / Д.А. Степаненко [и др.] // *Материалы. Технологии. Инструменты.* – 2013. – Т. 18, № 2. – С. 90-94.
2. Степаненко, Д.А. Влияние формы кольцевого концентратора ультразвуковой системы на коэффициент усиления амплитуды колебаний / Д.А. Степаненко, И.В. Луговой, В.П. Луговой // *Наука и техника.* – 2016. – № 3. – С. 209-215.

таких методов является метод пространственных интегральных уравнений, результативность которого подтверждается рядом публикаций [2 – 4].

При моделировании и расчете магнитного состояния тонколистового проката возникает необходимость в решении трехмерной задачи. Это обусловлено геометрией изделия, анизотропией материала (при ее наличии) и использованием для намагничивания прямоугольных катушек [5].

Важным вопросом при численном моделировании процесса намагничивания является выбор способа описания зависимости намагниченности материала образца от величины поля. Для этого часто используются экспериментальные кривые, как наиболее точно соответствующие реальным физическим процессам, происходящим в материале образца при намагничивании. Однако для достижения высокой точности вычислений требуется измерять большие массивы экспериментальных зависимостей $M(H)$. Кроме того, возникают трудности при вычислении дифференциальных величин. В связи с этим при расчетах часто используют аналитические выражения [6, 7] для описания нелинейных свойств ферромагнетика.

В настоящей работе рассмотрено численное моделирование тонкого ферромагнитного листа, намагниченного двумя прямоугольными катушками. Расчет проводился для намагничивающей и измерительной системы, которые помещались