

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НАНОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ КРИСТАЛЛАХ $Y_3Fe_5O_{12}$ И $YFeO_3$

Д.А. БАГДАСАРЯН, Г.С. ГЕВОРКЯН, А.О. МАКАРЯН,
Ю.С. СААКЯН*, В.Р. ТАТЕВОСЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: yuri.sahakyan@edu.ysu.am

(Поступила в редакцию 22 марта 2023 г.)

Экспериментально исследовано оптическое детектирование наносекундного лазерного импульса в прозрачных в ИК области ферромагнитных монокристаллах железо-иттриевого граната и иттриевого ортоферрита при комнатной температуре. В качестве источника электромагнитного излучения был использован линейно поляризованный неодимовый лазер (длина волны 1.06 мкм), работающий в режиме модуляции добротности. Длительность импульса составляла ~20 нс, а пиковая мощность ~10 МВт. Установлено, что ферромагнитный детектор обладает достаточным быстродействием для регистрации наносекундных импульсов. Амплитуда детектированного сигнала сильно зависит от внешнего поля намагничивания и хорошо коррелирует с нелинейностью кривой статической намагниченности используемого образца ферромагнитного кристалла.

1. Введение

Ферромагнитные материалы широко используются в различных областях науки и технологии в качестве сердечников трансформаторов, электромагнитов и дросселей, в электромоторах и генераторах, в качестве постоянных магнитов и др. Создано множество приборов для управления излучением СВЧ, инфракрасного и оптического диапазонов (вращатели плоскости поляризации, вентили, циркуляторы и др. [1–4]). Ферромагнитные материалы используются также для записи и хранения информации.

Во многих исследованиях (см., например, [5, 6]) показана возможность переориентации магнитного момента ферромагнетика под воздействием ультракоротких лазерных импульсов, что может быть использовано для быстрой записи и воспроизведения информации. В работах [7, 8] экспериментально получены детектирование и преобразование частоты линейно-поляризованного амплитудно-модулированного излучения ИК и СВЧ диапазонов в намагниченном ферромагнетике при комнатной температуре.

В работах, представленных в сборниках [3, 4], нелинейные взаимодействия излучения СВЧ диапазона с ферромагнетиком происходят вследствие прецессии

магнитного момента вокруг намагничивающего поля и носят резонансный характер. Поэтому они практически не проявляются в инфракрасной и видимой областях. Обычно считается, что нелинейные эффекты в оптическом и ИК диапазонах не могут быть связаны с магнитной нелинейностью, т.к. магнитная проницаемость ферромагнитных материалов близка к единице [9]. В работе [6] предполагается, что наблюдаемую сверхбыструю переориентацию намагниченности ферромагнетика можно объяснить появлением нелинейной диэлектрической восприимчивости в оптической области. Однако такое объяснение чисто феноменологическое и физически не обосновано.

В работе [8] показано, что магнитный момент ферромагнитного образца в переменном магнитном поле наряду с затухающей прецессией осуществляет также колебательное движение с частотой переменного магнитного поля. При подмагничивании образца амплитуда колебаний магнитного момента зависит от наклона кривой намагничивания образца, которая в свою очередь зависит от внешнего подмагничивающего поля. Следовательно, вблизи нелинейной области кривой намагничивания в ферромагнетике могут возникнуть нелинейные колебания магнитного момента.

Таким образом, указанные выше нелинейные эффекты, выявленные при взаимодействии электромагнитного излучения с ферромагнитным веществом, разными авторами интерпретируются по-разному, и до сих пор остаются предметом дебатов. Следовательно, для полного выяснения механизма нелинейного взаимодействия электромагнитной волны с намагниченным ферромагнетиком необходимо провести дальнейшие исследования.

В настоящей работе экспериментально исследовано оптическое детектирование наносекундных лазерных импульсов в намагниченных монокристаллических ферромагнетиках железо-иттриевого граната – YIG ($Y_3Fe_5O_{12}$) и иттриевого ортоферрита ($YFeO_3$) при комнатной температуре.

2. Экспериментальная часть

Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В качестве источника импульсного излучения нами был использован неодимовый лазер (длина волны $\lambda = 1.06$ мкм), работающий в режиме модуляции добротности резонатора. Длительность лазерного импульса составлял ~ 20 нс, а пиковая мощность ~ 10 МВт. Лазерный пучок был линейно-поляризован.

Исследования оптического детектирования проводились в ферромагнитных монокристаллах железо-иттриевого граната и иттриевого ортоферрита, которые имеют окно прозрачности в диапазоне длин волн от ~ 1 до 5.5 мкм [2].

На длине волны неодимового лазера $\lambda = 1.06$ мкм коэффициент поглощения используемого нами образца YIG составил $\beta \approx 5$ см $^{-1}$, а для образца ортоферрита – $\beta \approx 1$ см $^{-1}$.

Ферромагнитный кристалл размещался на пути лазерного излучения так, чтобы направление магнитного поля $H \sim$ линейно-поляризованного лазерного излучения совпало с направлением внешнего подмагничивающего поля H_0 (рис. 1). При таком расположении ферромагнитного образца воздействие магнитного

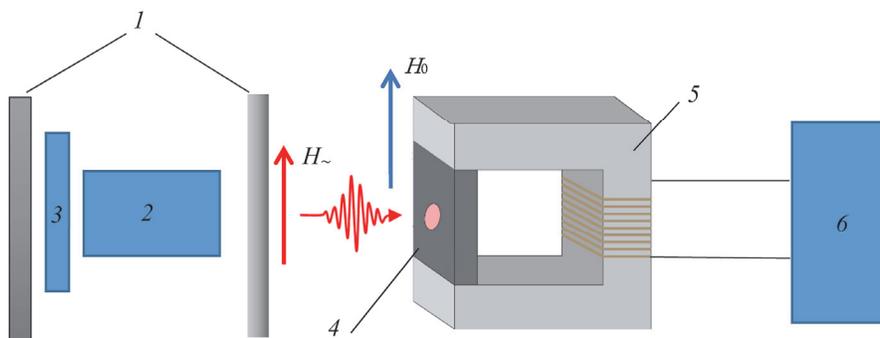


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – зеркала резонатора лазера, 2 – активный элемент лазера с системой накачки, 3 – пассивный модулятор, 4 – образец магнитного монокристалла, 5 – магнитный датчик (подковообразный феррит с катушкой индуктивности), 6 – осциллограф Tektronix TBS 1102.

поля лазерного импульса при определенном значении внешнего подмагничивающего поля приводит к изменению среднего значения магнитного момента. Для регистрации этого изменения (детектированного сигнала) нами был использован магнитный датчик, представляющий из себя подковообразный феррит с катушкой индуктивности 5 (рис.1). Выходной сигнал магнитного датчика регистрировался на осциллографе Tektronix TBS 1102.

3. Результаты и их обсуждение

Результаты измерений амплитуды детектированного сигнала в зависимости от внешнего подмагничивающего поля приведены на рис.2. Как и следовало ожидать, при отсутствии подмагничивающего поля детектированный сигнал тоже отсутствует. С увеличением поля подмагничивания амплитуда детектированного сигнала увеличивается до определенного максимума, после чего уменьшается с дальнейшим увеличением внешнего поля. При глубоком насыщении магнитного момента ферромагнитного образца детектированный сигнал полностью исчезает. Изменение направления магнитного поля приводит к изменению полярности детектированного сигнала.

При детектировании лазерного импульса с пиковой мощностью излучения ~ 10 МВт (диаметр пучка ~ 5 мм) максимальная амплитуда выходного сигнала

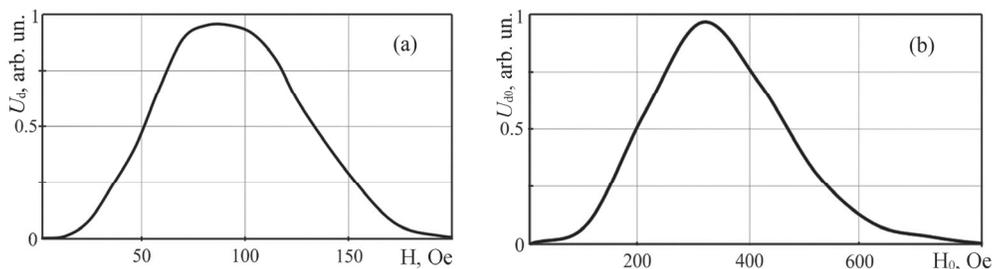


Рис.2. Зависимости амплитуд зарегистрированного сигнала от внешнего подмагничивающего поля: (а) для детектора на основе монокристалла YIG и (б) для детектора на основе монокристаллического иттриевого ортоферрита.

магнитного датчика на основе YIG с толщиной 0.4 мм составляла ~ 350 мВ. При детектировании с помощью детектора на основе ортоферрита с толщиной 10 мм амплитуда выходного сигнала составляла ~ 4 В.

Аналогичные результаты для зависимости амплитуд детектированного сигнала от внешнего подмагничивающего поля были получены в работе [7]. Однако в данной работе исследовалось детектирование излучения фемтосекундного лазера с частотой повторения импульсов ~ 80 МГц. Используемый ферритовый датчик не мог реагировать на изменения магнитного момента на таких высоких частотах, поэтому была применена дополнительная – низкочастотная (1 кГц) модуляция лазерного излучения. Таким образом, в работе [7] было зарегистрировано изменение среднего значения магнитного момента ферромагнитного образца.

В настоящей работе помимо исследований зависимости амплитуды детектированного сигнала от материала, размеров ферромагнитного образца и внешнего магнитного поля, исследовалась также возможность регистрации временной формы наносекундного лазерного импульса.

Временная форма лазерного импульса, зарегистрированного магнитным детектором на основе YIG представлена на рис.3а, а для сравнения на рис.3б представлена форма импульса на выходе детектора на основе фотодиода.

Отметим, что представленные сигналы получены после обработки (дифференцирования) зарегистрированных на осциллографе сигналов, т.к. в обоих случаях система регистрации интегрирует наносекундный сигнал. Интегрирование выходного сигнала ферромагнитного детектора в основном связано с наличием магнитного датчика на подковообразном феррите. Сравнение показывает, что длительности импульсов на половине высоты примерно равны и составляют ~ 20 нс.

Анализ полученных результатов и сравнение с результатами моделирования показывают, что экспериментально полученные значения амплитуды зарегистрированных сигналов хорошо коррелируют со статическими кривыми намагничивания ферромагнитных образцов. Следует отметить, что статические кривые намагничивания ферромагнитных образцов сильно зависят не только от материала самого образца, а также от формы, размеров образца и от параметров магнитного датчика.

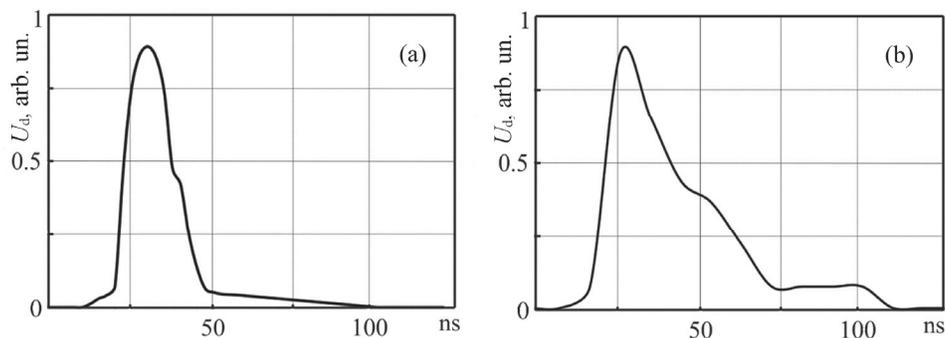


Рис.3. Временная форма лазерного импульса зарегистрированного: (а) магнитным детектором на монокристалле YIG и (б) полупроводниковым фотодиодом.

4. Заключение

Основываясь на результатах настоящего исследования, можно заключить, что механизм детектирования лазерного импульса полностью соответствует механизму, представленному в работах [7,8]. Результаты настоящей работы могут найти широкое практическое применение для управления параметрами электромагнитного излучения, для оптической записи, хранения и обработки информации и т.д. В частности, из результатов исследований следует, что на основе прозрачного ферромагнетика может быть построен достаточно быстродействующий фотодетектор для регистрации мощных лазерных импульсов оптического и ИК диапазонов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ю.М. Яковлев, С.Ш. Генделев.** Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике. Москва: Сов. Радио, 1975.
2. **В.В. Рандошкин., А.Я. Червоненкис.** Прикладная магнитооптика. Москва, Энергоатомиздат, 1990.
3. Ферриты в нелинейных СВЧ устройствах. Сб. статей под ред. А.Г. Гуревича. Москва, ИИЛ, 1961.
4. Нелинейные свойства ферритов в полях СВЧ. Сб. статей под ред. А.Л. Микаэляна. Москва, ИИЛ, 1963.
5. **A.V. Kimel, A. Kirilyuk, P.A. Usachev, R.V. Pisarev, A.M. Balbashov, Th. Rasing.** Nature, **435**, 655 (2005).
6. **A.V. Kimel, A. Kirilyuk, F. Hansteen, R.V. Pisarev, Th. Rasing.** J. Phys.: Condens. Matter, **19**, 043201 (2007).
7. **R.M. Martirosian, A.H. Makaryan, V.M. Mekhitarian, V.R. Tadevosyan.** JETP Letters, **99**, 435 (2014).
8. **T.S. Yezekyan, A.H. Makaryan, V.R. Tadevosyan.** Armenian J. Physics, **11**, 91 (2018).
9. **L.D. Landau, E.M. Lifshitz.** Course of Theoretical Physics, Vol. **8**: Electrodynamics of Continuous Media Pergamon, New York, 1984.

INVESTIGATION OF NANOSECOND LASER PULSES OPTICAL DETECTION IN FERROMAGNETIC CRYSTALS $Y_3Fe_5O_{12}$ AND $YFeO_3$

D.H. BAGHDASARYAN, G.S. GEVORKYAN, A.H. MAKARYAN,
Y.S. SAHAKYAN, V.R. TADEVOSYAN

The optical detection of a nanosecond laser pulse in transparent ferrimagnetic single crystals of yttrium iron garnet and yttrium orthoferrite in the IR range at room temperature was experimentally studied. A linearly polarized neodymium laser (wavelength 1.06 μm) operating in the Q-switched mode was used as the source of electromagnetic radiation. The pulse duration was about 20 ns, and the peak power ~ 10 MW. It was found that the ferrimagnetic detector has sufficient response time to detect nanosecond laser pulses. The amplitude of the detected signal strongly depends on the external magnetic field, and correlates well with the nonlinearity of the static magnetization curve of the ferrimagnetic crystal sample used.