

Полностью оптический модулятор и оптико-оптический фотонный АЦП на основе эффекта оптического переключения намагниченности

© П.О. Якушенков

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Исследована возможность переключения намагниченности ферромагнетика лазерными импульсами через волновод и возможность построения полностью оптического волноводного модулятора на основе эффекта оптического переключения намагниченности. Модулятор способен управлять одним световым потоком с помощью другого излучения и модулировать сигнал со скоростью порядка 100 ГГц. На основе таких магнитооптических модуляторов был разработан оптико-оптический фотонный аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Ключевые слова: эффект оптического переключения намагниченности, обменное взаимодействие, ферромагнетик, магнитооптический модулятор, оптико-оптический фотонный АЦП.

Введение. Управление потоком излучения и оптическое переключение являются актуальными темами в связи с бурным развитием фотонных информационных систем. Фотонные информационные системы обладают преимуществами перед электронными — на порядки меньшие потери, устойчивость к помехам, на порядки большая скорость обработки и передачи данных, а также преимущество в КПД. Для сверхвысокоскоростных полностью оптических фотонных схем (например, оптико-оптического фотонного АЦП на интегральной фотонной схеме) необходим полностью оптический модулятор, способный управлять одним световым потоком с помощью другого излучения. Эффект оптического переключения намагниченности является перспективным вариантом оптического управления и построения полностью оптического сверхвысокоскоростного модулятора на его основе. Намагниченность ферромагнетика переключается за время действия лазерного импульса, т. е. за десятки фемтосекунд.

Переключать намагниченность ферромагнетика можно магнитным полем, спин-поляризованным током либо лазерными импульсами [1]. При оптическом переключении намагниченность изменяется аналогично переключению спин-поляризованным током [2], т. е. за счет обменного взаимодействия, но не с электронами, а с фотонами. Переключо-

чать намагниченность нужно короткими лазерными импульсами, примерно равными одной фемтосекунде, для того чтобы ферромагнетик успел перемагнититься, но не успел нагреться и размагнититься.

Эффект оптического переключения намагниченности. Намагниченность ферромагнетика можно переключать разными способами: магнитным полем, спин-поляризованным током, а также лазерными импульсами. Перспективный вариант оптического переключения — это переключение намагниченности в ферромагнетиках при взаимодействии разных структур с фемтосекундными импульсами лазерного излучения, например, на базе MnFe, TmFeO₃, FeVO₃ или GdFeCo. На рис. 1 представлена обобщенная структурная схема переключения намагниченности [1], на рис. 2, а показана структура на основе GdFeCo, а на рис. 2, б — график изменения намагниченности.

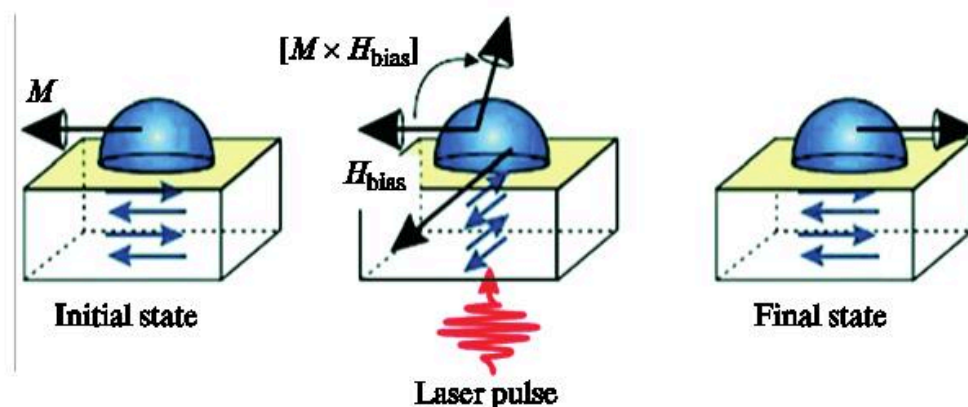


Рис. 1. Обобщенная структурная схема переключения намагниченности

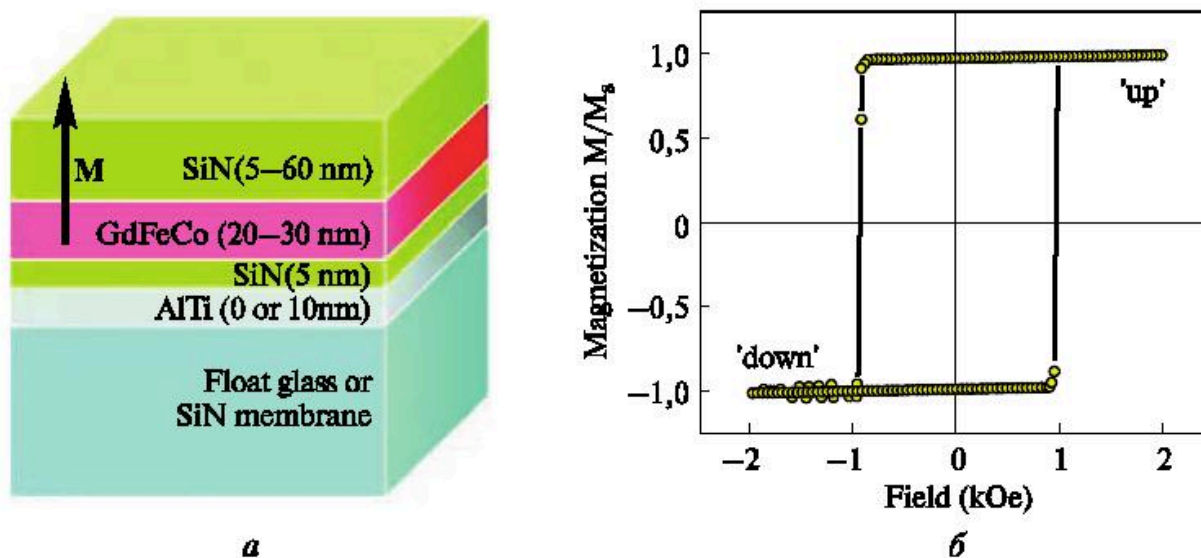


Рис. 2. Структура на базе GdFeCo и график изменения намагниченности

При переключении намагниченности светом поле лазерного излучения $\delta \mathbf{H}^a$ поворачивает вектор намагниченности $\mathbf{M}$ [3] (рис. 3):

$$d\mathbf{M}/dt = -\gamma[\mathbf{M} \times (\mathbf{H}_{\text{eff}} + \delta \mathbf{H}^a)] = -\gamma[\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}] - \gamma[\mathbf{M} \times \delta \mathbf{H}^a]$$

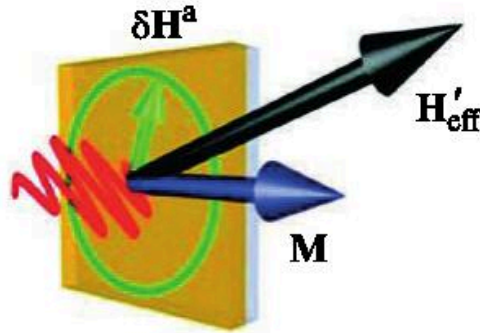


Рис. 3. Переключение намагниченности светом

Пусть магнитного поля нет ($\mathbf{H}_{\text{eff}} = 0$), тогда компонента $\delta \mathbf{H}^a$ дает вклад в изменение намагниченности $d\mathbf{M}/dt = -\gamma[\mathbf{M} \times \delta \mathbf{H}^a]$. Следовательно,

$$\delta \mathbf{H}^a = 1/(\gamma|\mathbf{M}|^2 \times [\mathbf{M} \times d\mathbf{M}/dt]).$$

Учесть размагничивание можно, введя эффективное размагничивающее поле, также равное

$$\delta \mathbf{H}^b = -1/(\gamma|\mathbf{M}|^2 \times [\mathbf{M} \times d\mathbf{M}/dt]).$$

Тогда получаем уравнение:

$$\begin{aligned} d\mathbf{M}/dt &= -\gamma[\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}] - A/\gamma [\mathbf{M} \times [\mathbf{M} \times d\mathbf{M}/dt]]|\mathbf{M}|^2 = \\ &= -\gamma[\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}] - \eta\gamma/|\mathbf{M}|[\mathbf{M} \times d\mathbf{M}/dt] = \\ &= -\gamma[\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}] - \beta\gamma/|\mathbf{M}|[\mathbf{M} \times d\mathbf{M}/dt] + \mu\gamma/|\mathbf{M}|[\mathbf{M} \times [\mathbf{M} \times \delta \mathbf{H}^a]], \end{aligned}$$

что аналогично теории Слованчевского — Берже при переключении намагниченности спин-поляризованным током [2].

Из итоговой формулы видно, что коэффициент β отвечает за размагниченность, а μ — за намагниченность, и эти коэффициенты зависят от температуры. Особенность экспериментов по переключению намагниченности светом в том, что нужны фемтосекундные импульсы — чтобы образец успел перемагнититься, но не успел нагреться и размагнититься из-за температуры. Следовательно? нужна достаточная плотность мощности, чтобы иметь достаточную магнитную компоненту

поля и достаточно малое время взаимодействия, чтобы он сильно не нагрелся. Поэтому ферромагнетики начинают перемагничиваться с определенной плотности мощности, когда магнитной компоненты поля достаточно для перемагничивания, и затем начинают проявлять хаотичность в намагниченности после слишком большой поглощенной мощности, когда нагреваются, получив слишком много энергии.

Переключение намагниченности зависит от поляризации света: правоциркулярная намагничивает в одну сторону, левоциркулярная — в другую, но поскольку любую поляризацию можно разложить на суперпозицию правой круговой и левой круговой, а коэффициенты перемагничивания в разные стороны разные, то перемагнитить ферромагнетик можно даже и линейной поляризацией, где суммы правой и левой одинаковы, но коэффициенты для одной из них больше.

Магнитооптический волноводный модулятор типа интерферометра Маха — Цандера. Рассмотрим магнитооптический модулятор типа интерферометра Маха — Цандера (рис. 4). Реализовать такой модулятор можно аналогично электрооптическому, напылив вместо электродов магнитные пленки. Тогда, переключая намагниченность магнитных пленок излучением из другого волновода, можно модулировать показатель преломления магнитным полем.

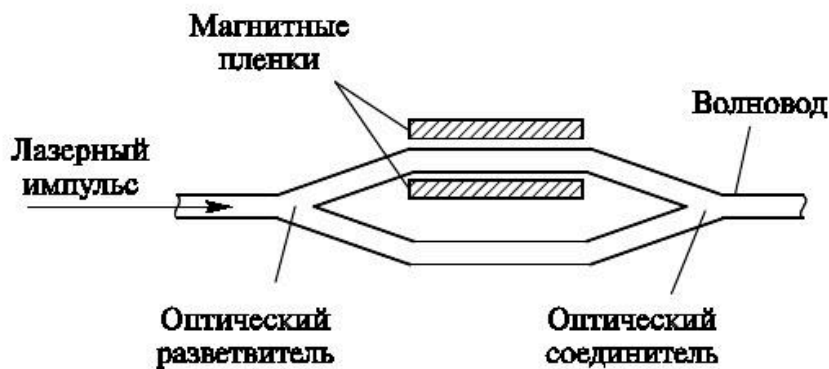


Рис. 4. Магнитооптический модулятор типа интерферометра Маха — Цандера

Рассмотрим теоретическое описание влияния магнитного поля на показатель преломления. Диэлектрическая проницаемость $D = \epsilon E$. Бывают случаи, когда поле, направленное вдоль оси X , вызывает поляризацию вещества и по оси Y , тогда в общем случае диэлектрическая проницаемость описывается тензором диэлектрической проницаемости ϵ_{ij} .

При поляризации вещества в электромагнитной волне, где $E \perp H$, диэлектрическая проницаемость описывается так:

$$D = \epsilon E + i[g \times E], \text{ где } g = \alpha H,$$

т. е. магнитная компонента света добавляет в тензор ε_{ij} недиагональные компоненты [5]:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 & ig & 0 \\ -ig & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_0 \end{vmatrix}.$$

В магнитных средах магнитное поле среды (намагниченность) будет также добавлять недиагональные компоненты в ε_{ij} , где $g = \alpha M$, а M — намагниченность. Влияние электрического поля на тензор магнитной восприимчивости тоже добавляет недиагональные компоненты $\sim E$ [2]. Здесь мы не рассматриваем эффект Керра, а ограничиваемся линейным приближением, иначе было бы $\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + \zeta M^2$.

Если среда магнитная, то изменением намагниченности можно модулировать показатель преломления и, соответственно, $\Delta n = \Delta \sqrt{\varepsilon} = \Delta \varepsilon / 2\sqrt{\varepsilon}$. Под влиянием магнитного поля в тензоре диэлектрической проницаемости ε_{ij} будут появляться недиагональные компоненты $\sim M$, которые будут влиять на показатель преломления, соответственно

$$\Delta \varepsilon_{ij} = m_{ijk} M_k = \Delta (n_{ij})^2, \quad i \neq j.$$

Таким образом, магнитооптический модулятор типа интерферометра Маха — Цандера будет модулировать показатель преломления не электрическим (в случае электрооптического модулятора), а магнитным полем.

Оптическое переключение намагниченности через волновод. Для проверки возможности реализации волноводного магнитооптического модулятора типа интерферометра Маха — Цандера был проделан эксперимент по переключению намагниченности ферромагнетика через волновод. В эксперименте использовали ферромагнетик DyFeCo, а воздействовали на него различными лазерными импульсами — правоциркулярной, левоциркулярной и линейной поляризации, длительностью ~ 40 фс, при плотности мощности 1,2; 3; 6 и 12 мДж/см² и на длине волны 1064 нм. Схема эксперимента представлена на рис. 5.

Для генерации лазерных импульсов использовали титан-сапфировый лазер и регенеративный усилитель AVESTA (рис. 6, а), а для визуализации результатов перемагничивания — поляризационный микроскоп (рис. 6).

В ходе экспериментов по переключению намагниченности была замечена зависимость от поляризации излучения. В самом нижнем ряду (рис. 7), который соответствует плотности мощности 3 мДж/см², слева и справа видны точки, перемагниченные линейной и правоциркулярной

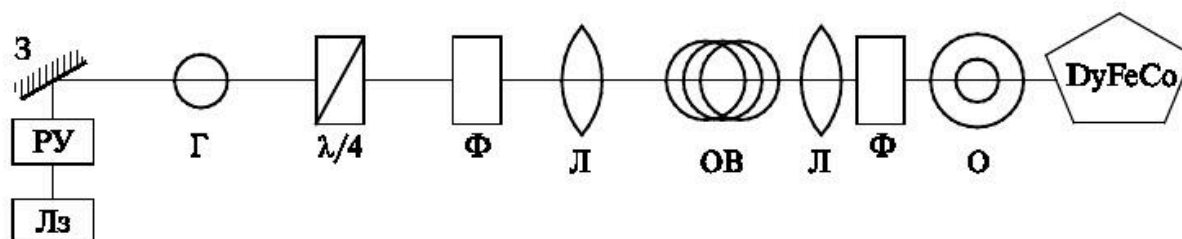


Рис. 5. Схема эксперимента по перемагничиванию ферромагнетика DyFeCo через волновод:

Лз — лазер; РУ — регенеративный усилитель; З — зеркало; Г — призма Глана; $\lambda/4$ — четвертьволновая пластина; Ф — фильтры; Л — линза; ОВ — оптическое волокно; О — объектив; DyFeCo — образец

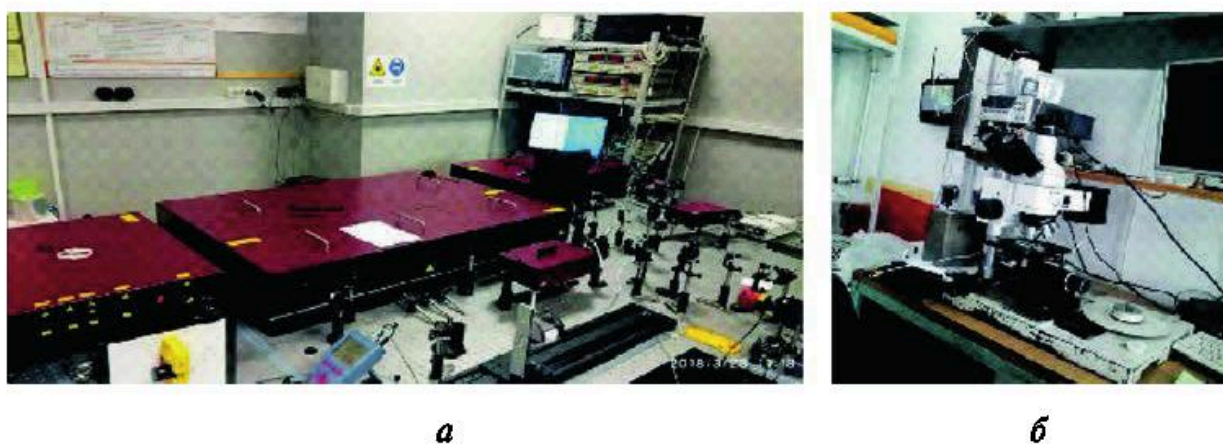


Рис. 6. Титан-сапфировый лазер и регенеративный усилитель AVESTA (а) и поляризационный микроскоп (б)

поляризацией, а по центру перемагниченных левоциркулярной нет, что свидетельствует о зависимости перемагничивания от поляризации [6]. Видно, что правоциркулярной поляризацией перемагничивается больше (коэффициент перемагничивания). Зависимость от поляризации излучения была также замечена при плотности мощности 12 мДж/см^2 . На рис. 8 можно сравнить точку, полностью перемагниченную правоциркулярной поляризацией, и точку, перемагниченную хуже левоциркулярной поляризацией (изображения на рис. 8 различаются позицией поляризатора микроскопа). Данное различие наблюдалось для всех точек, перемагниченных излучением с разной поляризацией. На рис. 9 справа — полностью перемагниченные точки, а слева — перемагниченные хуже левоциркулярной поляризацией.

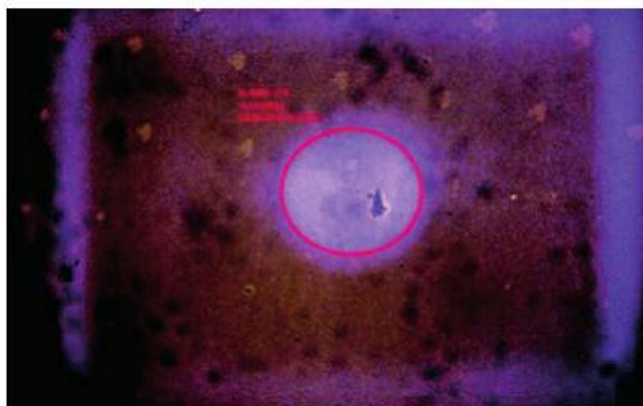
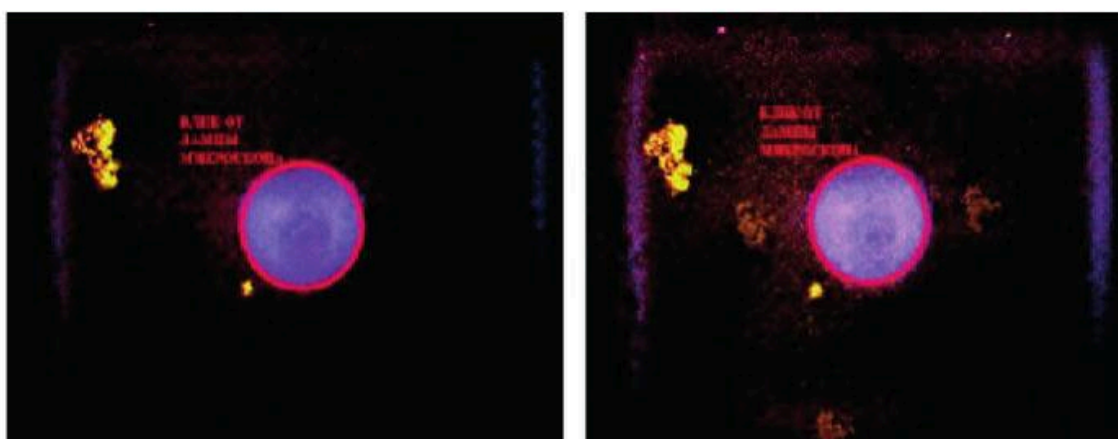


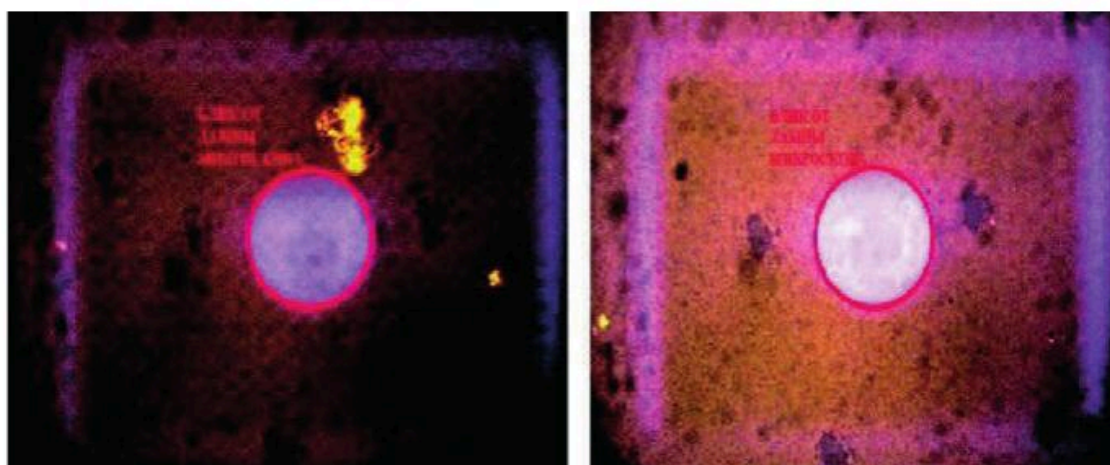
Рис. 7. Перемагниченный (ряды светлых точек) DyFeCo при 10-кратном увеличении поляризационного микроскопа



а

б

Рис. 8. Сравнение правоциркулярной (а) и левоциркулярной (б) поляризации при 50-кратном увеличении



а

б

Рис. 9. Точки, перемагниченные левоциркулярной поляризацией (а) и правоциркулярной поляризацией (б)

Поскольку перемагнитить ферромагнетик через волновод можно, то возможна и реализация полностью оптического волноводного магнитного модулятора типа интерферометра Маха — Цандера. Напылив магнитные пленки вместо электродов, можно переключать намагниченность пленок излучением из одного волновода и модулировать излучение в другом волноводе путем изменения показателя преломления с помощью магнитного поля.

Перспективы применения магнитооптического модулятора. Магнитооптический модулятор типа интерферометра Маха — Цандера имеет перспективы применения в сверхвысокоскоростных полностью оптических фотонных информационных системах. Реализовать такие системы можно на основе фотонных интегральных схем [6], которые приходят на смену электронным. Для реализации цифровой оптической вычислительной техники необходим фотонный аналого-цифровой преобразователь [7]. На основе магнитооптических модуляторов был разработан и запатентован оптико-оптический фотонный аналого-цифровой преобразователь [8].

Разработанный фотонный АЦП по схеме Тейлора (рис. 10) с магнитооптическими модуляторами типа интерферометра Маха — Цандера способен оцифровывать оптический сигнал лазерными импульсами.

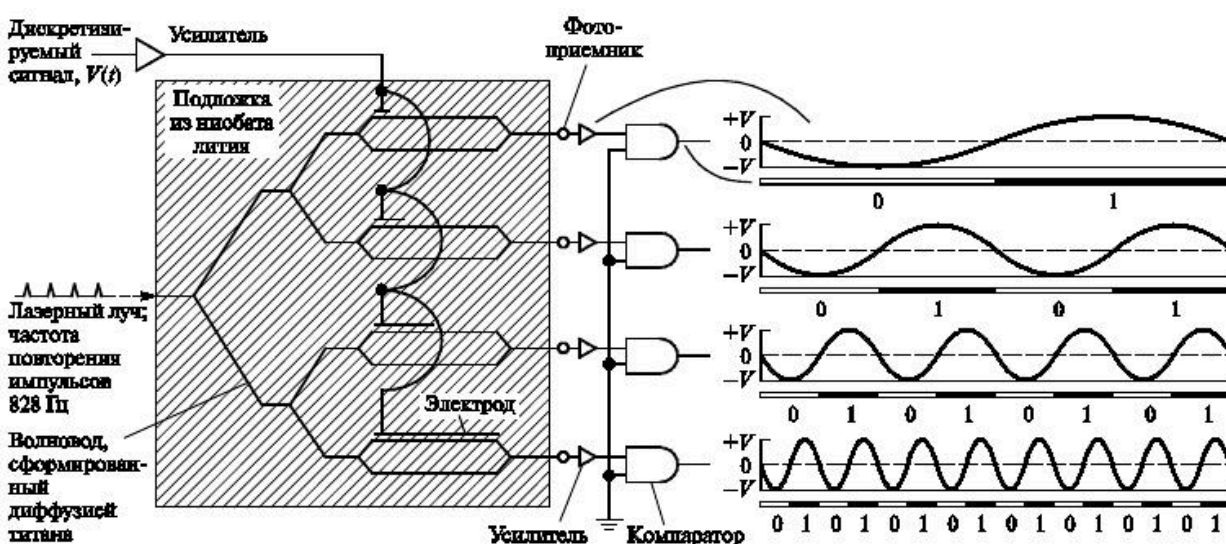


Рис. 10. Фотонный аналого-цифровой преобразователь по схеме Тейлора

Поскольку электронные АЦП из-за шумов электронного генератора, повышающихся с возрастанием частоты, остановились в развитии на частоте около 4 ГГц, высокоскоростной фотонный АЦП можно применить в системах связи, в том числе в ВОЛС (например, в системах типа MS-400E), в системах обработки информации для анализа

сигнала в реальном времени (например, спектра излучения при спектральном анализе), в оборонных системах (например, для анализа сигнала с АФАР) и еще в целом ряде областей, где используется цифровая электроника. Ниже представлена формула полезной модели разработанного фотонного АЦП.

Полезная модель фотонного АЦП имеет следующую формулу изобретения.

1. Фотонный аналого-цифровой преобразователь, содержащий источник последовательности высокочастотных лазерных импульсов, и оптически соединенные с ним параллельные, в количестве, равном количеству разрядов АЦП, каналы, каждый из которых включает в себя последовательно соединенные модулятор и фотоприемник, отличающийся тем, что он представляет собой интегральную схему, а в качестве каждого из модуляторов использован магнитно-оптический модулятор Маха — Цандера, при этом длина каждой из магнитных пленок, входящей в состав модулятора, соответствующего последующему разряду аналого-цифрового преобразователя, увеличена в два раза относительно длины магнитной пленки, входящей в состав модулятора, соответствующего предыдущему разряду аналого-цифрового преобразователя.

2. Аналого-цифровой преобразователь по п. 1, отличающийся тем, что упомянутый источник высокочастотной последовательности лазерных импульсов представляет собой интегральный полупроводниковый лазер.

3. Аналого-цифровой преобразователь по п. 1, отличающийся тем, что упомянутый источник высокочастотной последовательности лазерных импульсов выполнен с возможностью подведения лазерного излучения от внешнего лазера.

4. Аналого-цифровой преобразователь по п. 3, отличающийся тем, что упомянутый источник высокочастотной последовательности лазерных импульсов выполнен с возможностью подведения лазерного излучения с помощью каплера или средства фокусировки.

5. Аналого-цифровой преобразователь по любому из пп. 1–4, отличающийся тем, что упомянутая интегральная схема выполнена из материалов АЗВ5.

6. Аналого-цифровой преобразователь по любому из пп. 1–4, отличающийся тем, что в качестве материала упомянутых магнитных пленок использован ферромагнетик, выбранный из группы, включающей в себя DyFeCo, GdFeCo или соединения граната.

Заключение. В данной работе представлен полностью оптический волноводный магнитный модулятор типа интерферометра Маха —

Цандера, способный управлять одним световым потоком с помощью другого излучения со скоростью порядка 100 ГГц. Реализовать магнитооптический модулятор можно аналогично электрооптическому, напылив магнитные пленки вместо электродов, тогда показатель преломления можно модулировать магнитным полем — в тензоре диэлектрической проницаемости будут появляться недиагональные компоненты. Переключать оптически намагниченность пленок можно за счет эффекта оптического переключения намагниченности (что подтверждено экспериментами), аналогично перемагничиванию спин-поляризованным током, но за счет обменного взаимодействия с фотонами. Использовать такой модулятор можно в полностью оптических сверхвысокоскоростных фотонных информационных системах, реализованных, например, на фотонных интегральных схемах, в частности, в интегральном оптико-оптическом фотонном АЦП, представленном в данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kimel A., Kirilyuk A., Rasing T. Femtosecond photomagnetic switching of spins in ferromagnetic garnet films. *Nature*. 2005, vol. 45, no. 047402, pp. 1–4.
- [2] Попков А.Ф., Журавлев М.Н. *Физические основы магнетизма и спинового транспорта в устройствах магнитной электроники*. Москва, ИПК МИЭТ, 2014, с. 189–212.
- [3] Kirilyuk A., Kimel A.V., Rasing T. Laser-induced magnetization dynamics and reversal in ferrimagnetic alloys. *Reports on progress in physics*. 2013, vol. 76, no. 2, p. 026501.
- [4] Вдовичев С.Н. *Магнитооптические эффекты*. Нижний Новгород, Нижегородский государственный университет им. Лобачевского, 2010, с. 3–4.
- [5] Hunsperger R.G. *Integrated Optics: Theory and Technology*. Springer, 2009.
- [6] Ovcharenko S.V., Yakushenkov P.O., Ilyin N.A., Brekhov K.A., Semenova E.M., Wu A., Mishina E.D. Ultrafast magnetization reversal in DyFeCo thin film by single femtosecond laser pulse. *Physics of Metals and Metallography*. 2019, vol. 120, no. 9, pp. 825–830.
- [7] Khilo A. Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electronic jitter. *Optics Express*. 2012, vol. 20, no. 4, pp. 4454–4469.
- [8] *Патент РФ № 215210*. Срок действия исключительного права на полезную модель до 1 июня 2032 года.

Якушенков Павел Олегович — младший научный сотрудник лаборатории фотоники молекул Отделения квантовой радиофизики Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук. e-mail: loss24680@yandex.ru

Fully optical modulator and optic-optical photonic ADC based on the effect of the optical switching of magnetization

© P.O. Yakushenkov

Lebedev Physical Institute of RAS

The possibility of switching the magnetization of a ferromagnetic by laser pulses through a waveguide and the possibility of constructing a fully optical waveguide modulator based on the effect of the optical switching of magnetization are investigated. The modulator is able to modulate one light stream using another radiation and modulate the signal at the frequency of about 100 GHz. An optic-optical photonic ADC was developed based on such magneto-optical modulators.

Keywords: *the effect of the optical switching of magnetization, exchange interaction, ferromagnetic, magneto-optical modulator, optic-optical photonic ADC.*

Yakushenkov P.O., Junior Research Fellow of molecular photonics laboratory of Quantum Radiophysics Department of Lebedev Physical Institute of RAS.
e-mail: loss24680@yandex.ru