

07

## **Использование обратного магнитооптического эффекта Фарадея для генерации фемтосекундных импульсов тока**

© В.В. Кругляк, М.Е. Портной

School of Physics, University of Exeter, Stocker Road, Exeter EX4 4QL, UK  
E-mail: V.V. Kruglyak@exeter.ac.uk, M.E. Portnoi@exeter.ac.uk

Поступило в Редакцию 27 июля 2005 г.

Предлагается новый способ генерации сверхкоротких импульсов тока с помощью фемтосекундной оптической накачки мезоскопической структуры, состоящей из металлического кольца с сердечником из материала, обладающего гигантской магнитооптической восприимчивостью. Приводится расчет основных динамических характеристик предлагаемого устройства.

Дальнейший прогресс в области носителей информации с повышенной плотностью записи обуславливает необходимость создания сверхбыстрых устройств манипуляции данными. Быстродействие таких приборов определяется продолжительностью импульсов магнитного и электрического полей (электрического тока и напряжения), используемых, например, для перемагничивания магнитных наноэлементов. Использование импульсных лазеров с продолжительностью импульса порядка нескольких десятков фемтосекунд [1] является в этом смысле весьма перспективным, однако ограничено быстродействием элементов, превращающих оптическую энергию в электрическую. В данной работе описываются устройство и динамические характеристики сверхбыстрого фотодетектора, способного превращать короткие импульсы света в практически столь же короткие импульсы электрического тока.

В одной из недавних работ по оптической ориентации спинов было показано, что благодаря обратному эффекту Фарадея циркулярно поляризованный импульс света продолжительностью 200 fs в состоянии навести в кристалле диспрозия ортоферрита ( $\text{DyFeO}_3$ ) магнитное поле такой же продолжительности и с амплитудой порядка нескольких

тесла [2]. Наша идея состоит в том, что, согласно закону электромагнитной индукции, столь быстро меняющиеся импульсы магнитного поля должны создавать в окружающем пространстве интенсивное вихревое электрическое поле и, стало быть, индуктивную э.д.с. в проводнике, помещенном в данное поле.

Действительно, давайте проведем несложный расчет. Предположим, что оптически наведенное магнитное поле  $B$  будет меняться во времени так же, как и интенсивность светового импульса, хорошо описываемая функцией Гаусса

$$B(t) = B_0 \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

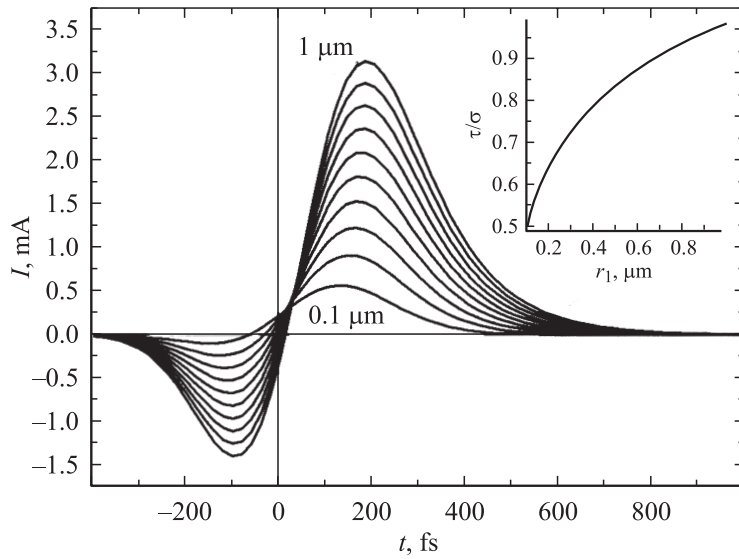
где  $T$  — время,  $B_0$  — амплитуда магнитного поля, а продолжительность импульса на полувывоте дается выражением  $2\sigma\sqrt{\ln 2}$ . Благодаря непрерывности нормальной к поверхности кристалла составляющей магнитной индукции и ничтожному значению спонтанной намагниченности  $\text{DyFeO}_3$  (около 8 Gs) поле в кольце на поверхности кристалла будет иметь практически такую же величину, как и внутри него. Э.д.с.  $\varepsilon(t)$  равна производной по времени от магнитного потока через поверхность кольца  $S$

$$\varepsilon(t) = \frac{\varepsilon_0 t}{\sigma} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0 = \frac{B_0 S}{\sigma}$ . Рассматривая кольцо как последовательно соединенные сопротивление  $R$ , индуктивность  $L$  и э.д.с. (2), несложно получить следующее выражение для импульса тока в цепи:

$$I(t) = -\frac{B_0 S}{L} \left\{ \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) - \frac{\sigma\sqrt{\pi}}{\tau} \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{t}{\sigma\sqrt{2}} - \frac{\sigma}{\tau\sqrt{2}}\right) \right] \exp\left(\frac{\sigma^2}{2\tau^2} - \frac{t}{\tau}\right) \right\}, \quad (3)$$

где время релаксации  $\tau$  равно  $L/R$ . Предполагая, что кольцо представляет из себя тор радиусом  $r_1$  и радиусом сечения  $r_2$ , запишем его



Зависимость тока в золотом кольце на поверхности кристалла  $\text{DyFeO}_3$  от времени показана для различных значений радиуса кольца при радиусе сечения в  $30 \text{ nm}$  и импульсе оптически наведенного магнитного поля в  $0.01 \text{ T}$  с продолжительностью  $200 \text{ fs}$ .

сопротивление и индуктивность как [3]

$$R = \frac{2\rho r_1}{r_2^2}, \quad (4)$$

$$L = \mu_0 r_1 \left( \ln \frac{8r_1}{r_2} - \frac{7}{4} \right),$$

где  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума, а  $\rho$  — удельное сопротивление. Зависимость тока в цепи от времени изображена на рисунке. Легко заметить, что величина тока в цепи растет с увеличением радиуса кольца, в то время как продолжительность импульса тока остается практически неизменной.

Важная особенность предлагаемого устройства — его чувствительность к знаку циркулярной поляризации светового импульса. Так же как

в спинтронике (spintronics) используется дополнительная квантовая степень свободы (спин) носителей заряда, предлагаемое нами устройство использует дополнительную степень свободы света — его поляризацию. Это позволяет отнести предлагаемый прибор к новому классу так называемых спин-оптронных устройств (spin-optonics).

В заключение заметим, что предлагаемое устройство помимо прямого применения в качестве сверхбыстрого фотодетектора сможет также использоваться во множестве других областей физики, например для генерации импульсного спинового тока [4,5] и магнитного поля в исследованиях динамики намагниченности в наноматериалах [6]. Учитывая фемтосекундную длительность генерируемых импульсов тока, предложенный прибор может также найти применение в качестве источника терагерцевого излучения, поиск которых является одной из насущных задач современной технической физики [7,8].

Авторы выражают глубокую благодарность Dr. R.J. Hicken за критические замечания в ходе обсуждения данной работы.

## Список литературы

- [1] *Avrutin E.A., Marsh J.H., Portnoi E.L.* // IEE Proc.-Optoelectron. 2000. V. 147. N 4. P. 251–278.
- [2] *Kimel A.V., Kirilyuk A., Usachev P.A., Pisarev R.V., Balbashov A.M., Rasing T.* // Nature. 2005. V. 435. P. 655–657.
- [3] *Landau L.D., Lifshits E.M.* Electrodynamics of continuous media. Pergamon, Oxford, 1984.
- [4] *Berger L.* // Phys. Rev. B. 1996. V. 54. P. 9353–9358.
- [5] *Slonczewski J.C.* // J. Magn. Magn. Mater. 1996. V. 159. P. L1–L7.
- [6] *Kruglyak V.V., Barman A., Hicken R.J., Childress J.R., Katine J.A.* // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. P. 220409(R).
- [7] *Малевиц В.Л.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. С. 48–55.
- [8] *Кубис О.В., Портной М.Е.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. С. 85–89.