

07:09
©1995

О ВОЗМОЖНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ НОВЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРО- И МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В СИЛЬНЫХ БЫСТРОНАРАСТАЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТОМ ПОЛЯХ (ЭФФЕКТ МИХЕЛЬСОНА)

А.Е.Дубинов, К.Е.Михеев, В.Д.Селемир

Еще в 1899 г. В.А. Михельсон предложил [1] следующее обобщение принципа Доплера: если между источником и приемником электромагнитного излучения с длиной волны λ_0 под действием какого-либо воздействия изменяется показатель преломления среды n , то в результате изменения оптической длины пути кажущееся для приемника движение источника должно приводить к сдвигу длины волны принимаемого излучения. Насколько нам известно, эта разновидность эффекта Доплера (эффект Михельсона) в эксперименте ранее не наблюдалась.*

В настоящее время, когда техника получения сверхсильных быстронарастающих электрического и магнитного полей достигла определенного уровня (10^{16} В/м·с [3] и 10^{12} Э/с [4] соответственно), появилась реальная возможность наблюдения эффекта Михельсона в конденсированных средах, показатель преломления в котором изменяется в результате одного из эффектов: Керра, Погкельса или Коттона-Мутона, причем скорость изменения коэффициента преломления в квадратичных (нелинейных по полю) электро- и магнитооптических эффектах может достигать больших значений, достаточных, чтобы при современном развитии импульсной оптической спектроскопии можно было бы уверенно зарегистрировать соответствующий этим значениям сдвиг длины волны.

Из литературы известны и другие эффекты, также приводящие к изменению длины волны под действием нестационарного электрического или магнитного поля (например, [5]), однако эти эффекты имеют различную природу и, как

* В недавней работе [2] обнаружен сдвиг длины волны СВЧ излучения при прохождении электромагнитной волны через слой плазмы с быстрорастущей концентрацией, что, по-видимому, можно объяснить проявлением эффекта Михельсона.

следствие, различные количественные выражения величины эффекта. Так, в [5] изменение длины волны происходит за счет комбинационного смещения частоты лазерного луча с частотой модуляции электрооптического кристалла переменным электрическим полем. Это изменение частоты, в отличие от рассматриваемого нами эффекта Михельсона, не имеет места при стремлении частоты модуляции к нулю (в случае квазистационарного поля).

Все эти эффекты, особенно в твердых телах, хорошо изучены [6], однако в нашем случае помимо больших величин самих вышеуказанных эффектов большую роль играют размеры образцов, что приводит к ограничению использования твердых веществ в силу их слабой прозрачности. Поэтому основное внимание в данной работе было сосредоточено на жидких средах с большой прозрачностью, электро- и магнитооптические свойства которых достаточно велики.

Из жидкостей наибольшими электро- и магнитооптическими эффектами в сочетании с хорошей прозрачностью обладает нитробензол [7,8]. Рассмотрим эффекты, связанные с прохождением лазерного луча с длиной волны $\lambda_0 = 589$ нм через кювету длиной $L = 10$ см по ходу луча, заполненную нитробензолом и помещенную в быстронарастающее электрическое или магнитное поле.

Тогда в результате эффекта Керра и Коттона-Мутона соответственно имеем

$$d(\Delta n)/dt = 2B\lambda E(dE/dt); \quad (1)$$

$$d(\Delta n)/dt = 2C\lambda H(dH/dt), \quad (2)$$

где B — постоянная Керра, C — постоянная Коттона-Мутона для нитробензола, а $\Delta n = n_n - n_s$, где n_n — показатель преломления для луча с поляризацией, параллельной полю; n_s — показатель преломления для луча с поляризацией, перпендикулярной полю. Для нитробензола постоянные $B, C \sim \lambda^{-1}$ и, следовательно, эффекты Керра и Коттона-Мутона имеют слабую дисперсию [7,8], что и отражено в соотношениях (1), (2). Так как

$$\min(\Delta n_n; \Delta n_s) < \Delta n/2 \quad (3)$$

и обычно $n_n \approx n_s$, то приходим к соотношениям

$$d(n_n; n_s)/dt = \pm B\lambda E(dE/dt); \quad (4)$$

$$d(n_n; n_s)/dt = \pm C\lambda H(dH/dt), \quad (5)$$

которые совместно с выражением для доплеровского сдвига

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 - \frac{L}{c} \frac{dn}{dt} \right) \quad (6)$$

дают уравнения, описывающие эффект Михельсона для заданных временных зависимостей $E(t)$ и $H(t)$. Соотношение (6) является точным в приближении геометрической оптики, когда выполняются условия:

$$\frac{1}{2\pi\omega} \frac{dn}{dt} \ll n; \quad \frac{\lambda}{2\pi} \frac{dn}{dz} \ll n, \quad (7)$$

где λ , ω и n — мгновенные локальные длина волны, частота электромагнитной волны и соответствующее этой частоте мгновенное локальное значение показателя преломления.

Для выполнения соотношения (6) также необходимо, чтобы время распространения излучения по среде τ_p было больше характерного времени изменения свойств среды τ_c . Так как обычно $\Delta n/n \ll 1$, то это означает, что

$$\tau_p \approx Ln/c \ll \tau_c. \quad (8)$$

Оценки для нитробензола дают, что в электрических полях, уверенно достижимых в лабораториях, возможно наблюдать существенный сдвиг длины волны. Более того, в полях $E = 10^7$ В/м (пробойное поле для нитробензола — $1.5 \cdot 10^7$ В/м [9]) и $dE/dt = 10^{16}$ В/м·с (для фронта 1 нс), также доступных для эксперимента, и при $L = 10$ см кажущаяся скорость $|\nu_k| = Ldn/dt \approx 1.3 \cdot 10^9$ м/с заметно превышает скорость света в вакууме (постоянная Керра для нитробензола, взятая из [10], составляет $B = 2.2 \cdot 10^{-7}$ м/В²), что должно привести к появлению принципиально нового эффекта — аномального эффекта Михельсона — аналога аномального эффекта Доплера* [11]. Легко видеть, что условия (7) выполнены в рассмотренном примере с запасом в несколько порядков.

В магнитном поле с параметрами $H = 10^7$ Э и $dH/dt = 10^{12}$ Э/с и при $L = 10$ см в нитробензоле кажущаяся скорость заметно ниже скорости света в вакууме ($|\nu_k/c| = (L/c)dn/dt \approx 10^{-6}$); здесь бралось значение постоянной Коттона-Мутона для нитробензола $C = 24.1 \cdot 10^{15}$ м/А² из [10]. Сдвиг длины волны, соответствующий такому значению ν_k , вряд ли может быть уверенно зарегистрирован в условиях, в которых достигаются подобные магнитные поля [4]. Однако, как указано в [12], в коллоидных растворах (например, в растворах ферромагнитных веществ Fe, Fe₃O₄), а

* Так как реально для всех сред при $\omega \rightarrow \infty$ (фактически для γ -квантов) показатель преломления $n = 1$, то скорость света при $dn/dt < 0$ не может быть превзойдена. Следовательно, аномальный эффект Михельсона можно наблюдать лишь при $dn/dt > 0$.

также в жидких кристаллах вблизи температуры фазового перехода [13] величина Δn в электрических и магнитных полях превосходит величину Δn для молекулярных жидкостей в $10^6 - 10^7$ раз. Таким образом, нормальный и аномальный эффекты Михельсона также могут наблюдаться и в сильных магнитных полях. Кроме того, этот эффект может быть наиболее заметен вблизи резонансов зависимостей $n(\omega)$, $B(\omega)$ или $C(\omega)$.

Описанные явления можно использовать для измерения величин dE/dt и dH/dt , а если ход этих величин известен, то возможно получение новой информации об оптических свойствах конденсированных сред в экстремально сильных полях. По-видимому, регистрация эффекта Михельсона на основе эффектов Керра и Коттона-Мутона является единственной методикой, позволяющей измерять законы дисперсии $B(\omega)$ и $C(\omega)$ аналоговым образом, тогда как в стационарных полях возможно лишь получение зависимостей $B(\omega)$ и $C(\omega)$ для дискретного набора ω .

Список литературы

- [1] Михельсон В.А. // ЖРФХО. 1899. Т. 31. С. 9.
- [2] Kuo S.P., Zhang Y.S., Ren A. // Phys. Lett. A. 1990. V. 150. N 2. P. 92.
- [3] Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974.
- [4] Павловский А.И., Людаев Р.З. // Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики. Л.: Наука. 1984. С. 206.
- [5] Skupsky S., Short R.W., Kessler T. et al. // J. of Appl. Phys. 1989. V. 66. N 8. P. 3456.
- [6] Звездин А.К., Котов В.А. Магнитооптика тонких пленок. М.: Наука, 1988.
- [7] Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970.
- [8] Вукс М.Ф. Электрические и оптические свойства молекул конденсированных сред. Л.: ЛГУ, 1984.
- [9] Справочник по лазерной технике / Под ред. Ю.В. Байбородина и др. Киев: Техника, 1978.
- [10] Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. М.: Наука, 1988.
- [11] Волотовский Б.М., Быков В.П. // УФН. 1990. Т. 160. № 6. С. 141.
- [12] Валькенштейн М.В. Молекулярная оптика. М.-Л.: ГИТТЛ, 1951.
- [13] Цветков В. // ЖЭТФ. 1944. Т. 14. № 1. С. 35.

Поступило в Редакцию
12 июля 1995 г.