

## Управление фазовыми характеристиками стоксовых волн в интерферометре Майкельсона с ВРМБ-зеркалами

А.А.Гордеев, В.Ф.Ефимков, И.Г.Зубарев, С.И.Михайлов

*Установлено, что при использовании ВРМБ-зеркал со встречной фокусировкой, установленных в кольцевой схеме интерферометра Майкельсона, при накачке импульсами с крутыми (2–3 нс) передними фронтами и при использовании в качестве активной среды фреона FC-75 разность фаз стоксовых волн на полупрозрачном зеркале интерферометра подчиняется зависимости  $\Delta\varphi = 2\Delta k\Delta l$  ( $\Delta k$  – разность абсолютных величин волновых векторов накачки и стоксовой компоненты,  $\Delta l$  – разность оптических длин плеч).*

**Ключевые слова:** ВРМБ-зеркала со встречной фокусировкой, кольцевая схема интерферометра Майкельсона, импульсы накачки с крутыми передними фронтами.

Настоящая работа является продолжением исследований, результаты которых были опубликованы около года назад [1]. Было показано, что при ударном возбуждении ВРМБ во фреоне FC-75 импульсами с короткими передними фронтами ( $\tau \leq 2-3$  нс) в кольцевом интерферометре Майкельсона осуществляется фазировка независимых лазерных каналов. При этом интерферометр был настроен на нулевую разность длин плеч, в связи с чем сфазированные стоксовы пучки отражались точно назад в канал накачки. Для практического использования этой схемы необходимо установить разность фаз стоксовых пучков, равную  $\pi$ . В работе [2] нами исследовалась схема интерферометра Майкельсона, в которой пучки накачки после полупрозрачного зеркала отражались в одном ВРМБ-зеркале. Было установлено, что разность фаз стоксовых компонент на полупрозрачном зеркале подчиняется соотношению

$$\Delta\varphi = \Delta k\Delta l, \quad (1)$$

где  $\Delta k$  – разность абсолютных величин волновых векторов накачки  $k_p$  и стоксовой компоненты  $k_s$ . Мы полагаем, что при использовании схемы кольцевого интерферометра Майкельсона с двумя ВРМБ-зеркалами соотношение (1) будет выполняться. Однако первые же эксперименты показали, что в этом случае реализуется другое соотношение. Определению правильной величины разности длин плеч данного интерферометра для получения равной  $\pi$  разности фаз стоксовых пучков и посвящена настоящая работа.

**А.А.Гордеев, В.Ф.Ефимков, С.И.Михайлов.** Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: efimkov@sci.lebedev.ru

**И.Г.Зубарев.** Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

Поступила в редакцию 10 октября 2016 г., после доработки – 21 октября 2016 г.

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис.1. В качестве входного излучения накачки использовался одномодовый одночастотный лазер на неодимовом стекле с пассивной модуляцией добротности. Излучение накачки  $I_p$  с длиной волны  $\lambda = 1.06$  мкм проходит через поляризатор 1 и изолятор Фарадея 2. Стеклопластина 3 отражает часть излучения на калориметр 4 для измерения энергии накачки и на фотодиод 5 для измерения формы импульса накачки. Полупрозрачное зеркало 6 (стеклянный клин с углом  $2^\circ$  с диэлектрическим напылением (коэффициент отражения  $R \approx 0.5$ ) на одной поверхности и просветлением на другой) делит пучок на две части, практически равные по энергии. Прошедший (плечо 1) и отраженный (плечо 2) пучки направляются шестью стеклянными призмами в кювету 7 с активной ВРМБ-средой (фреон FC-75). Вышедшие из кюветы пучки совмещаются на зеркале 8 и, отражаясь, фокусируются один в другой точно в обратных направлениях. Таким образом, была использована схема встречной фокусировки [3] с зависимыми ВРМБ-зеркалами [1]. Фокусное расстояние вогнутого зеркала 8 составляло 25 см, расстояние от кюветы – примерно 8 см. Длины оптических путей от полупрозрачного зеркала до фокусов зеркала 8 (длины плеч интерферометра)  $l_{1,2} = 208$  см  $\pm$  4 мм ( $\Delta l \leq 0.8$  см). Эксперименты проводились при энергиях импульсов 6–14 мДж, форма импульсов накачки определялась параметрами электрооптического затвора и высоковольтного разрядника с лазерным поджигом [1]. С их помощью осуществлялось вырезание импульса с крутым передним фронтом из импульса задающего генератора, имевшего близкую к гауссовой форму и длительность по полувысоте  $\sim 45$  нс. Полная длительность вырезанного импульса не превышала 40 нс, а длительность его переднего фронта составляла 2–3 нс [1].

Форма стоксова импульса, сформировавшегося в фокальной перетяжке зеркала 8 (плечо 1) и распространяющегося в обратном направлении к своему сфокусированному пучку накачки, измерялась фотодиодом 11. Аналогично, форма стоксова импульса, сформировавшегося в фокальной перетяжке зеркала 8 (плечо 2) и распространяющегося обратно своему сфокусированному пучку на-

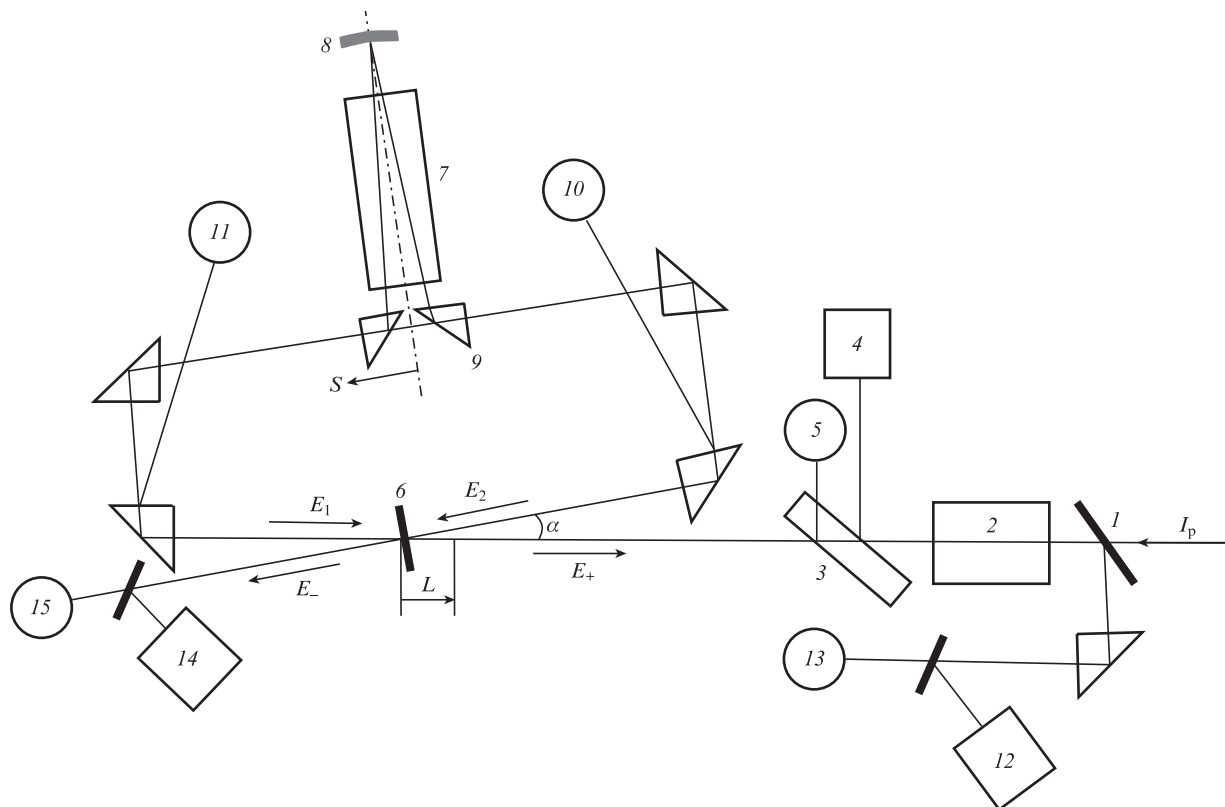


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – поляризатор; 2 – изолятор Фарадея с кварцевой 45°-ной пластинкой; 3 – стеклянная пластина; 4, 12, 14 – калориметры; 5, 10, 11, 13, 15 – фотодиоды; 6 – полупрозрачное зеркало; 7 – кювета с активной ВРМБ-средой; 8 – плотное вогнутое зеркало с фокусным расстоянием 250 мм; 9 – поворотные призмы.

качки, измерялась фотодиодом 10. На зеркале 6 стоксовы волны  $E_1$  и  $E_2$  интерферируют между собой. Результат интерференции определяется разностью фаз  $\Delta\varphi$  между ними. Если  $\Delta\varphi$  близка к нулю, волны, складываясь, следуют в направлении  $E_+$ , обратном направлению входной накачки  $I_p$ . При прохождении излучения через изолятор Фарадея плоскость поляризации волн поворачивается на  $90^\circ$ , излучение отражается поляризатором 1 на калориметр 12 и фотодиод 13. Если величина  $\Delta\varphi$  между стоксовыми волнами близка к  $\pi$ , то волны, складываясь, следуют в направлении  $E_-$ , и это излучение измеряется калориметром 14 и фотодиодом 15.

Параметром синфазности стоксовых пучков, определяющим степень близости  $\Delta\varphi$  к нулю, служит величина

$$\eta_+ = |E_+|^2(|E_+|^2 + |E_-|^2)^{-1},$$

где  $|E_+|^2$  и  $|E_-|^2$  – энергии излучений, измеряемые калориметрами 12 и 14 соответственно. Здесь подчеркнем, что для суммирования излучения двух стоксовых каналов необходимо обеспечить, чтобы  $\Delta\varphi$  была равна 0 или  $\pi$  в зависимости от схемы суммирования. Если  $\Delta\varphi = 0$ , тогда  $|E_-|^2 = 0$  и  $\eta_+ = 1$ . Если  $\Delta\varphi = \pi$ , тогда  $|E_+|^2 = 0$  и  $\eta_+ = 0$ . Если фазировка в каналах отсутствует, то деление энергии стоксовых волн на зеркале 6 будет хаотически меняться от импульса к импульсу.

В работе [3] в схеме с независимыми ВРМБ-зеркалами со встречной фокусировкой и при накачке короткими (8–9 нс) импульсами достигнута стабильность разности фаз стоксовых компонент. При этом начальная разность фаз (т.е. после монтажа экспериментальной схемы) была случайной, а необходимая величина  $\Delta\varphi$  обеспечивалась

микроремещениями (на доли длины волны) вогнутого зеркала в одном из плеч интерферометра с помощью пьезоустройств. В работе [1] нами подробно исследована схема интерферометра с независимыми ВРМБ-зеркалами. В этой схеме надежно установлена нестабильность от импульса к импульсу разности фаз стоксовых пучков, интерферирующих на полупрозрачном зеркале, в том числе при ударном возбуждении импульсами накачки с коротким передним фронтом (примерно 2–3 нс). Причина разброса разности фаз в наших экспериментах заключается в нестабильности длин плеч интерферометра, обусловленной микроремещениями элементов интерферометра, расположенных на нескольких оптических скамьях, а также температурным дрейфом, движением воздуха, механическим воздействием ламп-вспышек лазерных усилителей (использовалась лазерная схема на Nd-стекле с частотой срабатывания один импульс в несколько минут).

Для компенсации нестабильности длин плеч интерферометра была предложена схема со связанными зеркалами (см. рис.6 в работе [1]), в которой каждый из пучков накачки фокусировался в другой. Такую схему можно рассматривать либо как известный интерферометр Саньяка, либо как антирезонансное кольцо [4, 5], в которые установлены ВРМБ-зеркала. Будем называть эту схему кольцевой схемой интерферометра Майкельсона с ВРМБ-зеркалами, работающими в варианте встречной фокусировки. Разброс разности фаз удалось устранить, причем только при накачке импульсами с коротким (2–3 нс) передним фронтом; параметр синфазности  $\eta_+$  составил  $0.93 \pm 0.02$ , что соответствует  $\Delta\varphi \approx 0$ , т.е. энергия стоксовых компонент  $E_1$  и  $E_2$  сложилась в направлении

$E_+$ . При этом оптические длины плеч  $l_{1,2} = 208 \text{ см} \pm 4 \text{ мм}$  ( $\Delta l \leq 0.8 \text{ см}$ ),  $l_1$  и  $l_2$  измерялись от полупрозрачного зеркала до соответствующих фокусов пучков.

Для практических применений может потребоваться, чтобы энергия стоксовых компонент  $E_1$  и  $E_2$  сложилась в направлении  $E_-$  (см. рис.1). Для этого необходимо установить  $\Delta\varphi = \pi$ . Кроме того, для данной схемы интерферометра представляет значительный интерес, как изменяется  $\Delta\varphi$  в зависимости от  $\Delta l = l_1 - l_2$ . С этой целью изменялась величина  $\Delta l$ . В работе [2] это достигалось изменением длины одного из плеч интерферометра. В наших экспериментальных условиях оказалось проще сдвигать полупрозрачное зеркало  $b$  (см. рис.1). Ввиду малости угла отражения ( $\alpha \approx 4.3^\circ$ ) можно считать, что длина плеча 1 увеличивается, а плеча 2 уменьшается на одинаковую величину. Сдвигая полупрозрачное зеркало на  $L$  от положения, при котором  $l_1 \approx l_2$ , что соответствует разности фаз, близкой к нулю [2], получаем

$$\Delta l \approx 2L, \quad \Delta\varphi = \Delta k 2L. \quad (2)$$

Исходя из (2), разности фаз  $\Delta\varphi = 2\pi$  соответствует длина  $L_{2\pi}$ , которая находится из соотношения  $2\pi = \Delta k 2L_{2\pi} = 2\pi\Delta\nu 2L_{2\pi}$ , где  $\Delta\nu = 0.045 \text{ см}^{-1}$  – стоксов сдвиг для фреона FC-75 на длине волны неодимового лазера [1]. Отсюда имеем

$$L_{2\pi} = (2\Delta\nu)^{-1} \approx 11.1 \text{ см}. \quad (3)$$

Однако в экспериментах длина  $L_{2\pi}$  оказалась примерно вдвое меньше, т. е. равной 5.6 см. При этом параметр синфазности  $\eta_+ \approx 0.91 \pm 0.04$ . При уменьшении сдвига в два раза ( $L \approx 2.8 \text{ см}$ ) разность фаз оказалась близкой к  $\pi$ , поскольку в этом случае параметр синфазности  $\eta_+ \approx 0.1 \pm 0.04$ .

Очевидно, что для исследования зависимости  $\Delta\varphi$  от  $\Delta l$  необходимо экспериментально измерить  $\Delta\varphi$ , изменяя  $\Delta l$  в определенном диапазоне (аналогично тому, как это сделано в работе [2]). Измерения проводились на установке, изображенной на рис.1. При этом полупрозрачное зеркало  $b$  возвращалось в исходное положение ( $L = 0$ ), а изменение  $\Delta l$  осуществлялось перемещением оптического рельса, на котором монтировались зеркало  $\delta$ , кювета  $7$  и две поворотные призмы, перпендикулярно оси рельса (кюветы). На рис.2 показана экспериментальная зависимость параметра синфазности  $\eta_+$  от  $\Delta l$ ; точками обозначены измеренные значения  $\eta_+$ , сплошная кривая – аппроксимирующая функция

$$f(\Delta l) = 0.51 + 0.48\sin(2\Delta k\Delta l + 1.494), \quad (4)$$

где соответствующие параметры вычислялись с помощью функции <sinfit> математического пакета Mathcad 15. Здесь изменение разности длин оптических плеч интерферометра  $\Delta l = 2S$ , а  $S$  – смещение оптического рельса, на котором установлено ВРМБ-зеркало.

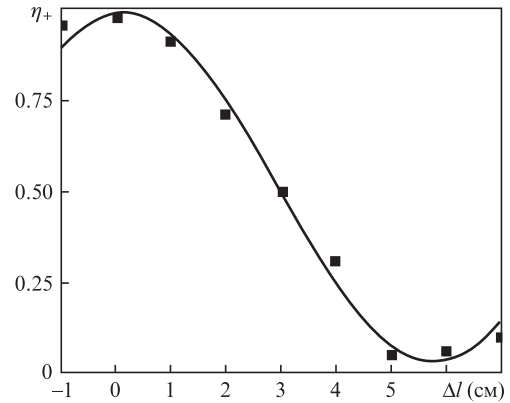


Рис.2. Зависимость параметра синфазности  $\eta_+$  от разности хода  $\Delta l$  (точки – измеренные значения параметра синфазности; сплошная кривая – аппроксимирующая синусоида).

Полученные результаты находятся в кажущемся противоречии с формулой (1) [2]. Принципиальная разница в данном случае состоит в том, что в работе [2] ОВФ-зеркало включается одновременно для обоих пучков накачки, независимо от величины  $\Delta l$ . В нашем же случае оба зеркала срабатывают одновременно только при  $\Delta l = 0$ . Поэтому разность фаз  $\Delta\varphi$  состоит из двух частей: пространственной  $\Delta\varphi_{sp} = \Delta k\Delta l$  и временной  $\Delta\varphi_t = \Delta\omega\Delta\tau$ , где  $\Delta\omega$  – бриллюэновский сдвиг частоты,  $\Delta\tau = \Delta l/c$  – задержка времени включения одного ВРМБ-зеркала относительно другого. Тогда  $\Delta\varphi = \Delta\varphi_{sp} + \Delta\varphi_t = 2\Delta k\Delta l$ , что и соответствует результатам настоящего эксперимента.

Итак, показано, что в условиях проведенных экспериментов, а именно: при использовании ВРМБ-зеркал со встречной фокусировкой, установленных в кольцевой схеме интерферометра Майкельсона (благодаря чему обеспечивалась устойчивая фазировка стоксовых волн), при накачке импульсами с крутыми (2–3 нс) передними фронтами и применении в качестве активной среды фреона FC-75, разность фаз стоксовых волн подчиняется зависимости  $\Delta\varphi = 2\Delta k\Delta l$ . Отметим также, что, как указывалось в [6], в нашем случае имеет место режим абсолютной неустойчивости встречных волн накачки. При этом величины  $\Delta k$  соответственно могут не совпадать с таковыми для точного резонанса. Данный вопрос требует отдельного рассмотрения, чему и будет посвящена следующая работа.

1. Гордеев А.А., Ефимков В.Ф., Зубарев И.Г., Михайлов С.И. *Квантовая электроника*, **45** (10), 899 (2015).
2. Басов Н.Г., Зубарев И.Г., Миронов А.Б., Михайлов С.И., Окулов А.Ю. *ЖЭТФ*, **79**, 1678 (1980).
3. Lee S.K., Kong H.J., Nakatsuka M. *Appl. Phys. Lett.*, **87** (16), 161109(3) (2005).
4. Беляев Ю.Н., Кузнецов С.П., Новиков М.А. *Изв. Вузов. Сер. Радиофизика*, **21** (3), 388 (1978).
5. Vanherzeele H., Torti R., Diels J.-C. *Appl. Opt.*, **23** (23), 4182 (1984).
6. Гордеев А.А., Ефимков В.Ф., Зубарев И.Г., Михайлов С.И. *Квантовая электроника*, **41** (11), 997 (2011).