

## ФИЗИКА

УДК 535.5

*Академик В. А. ПИЛИПОВИЧ, В. Б. ЗАЛЕССКИЙ, А. И. КОНОЙКО, В. М. КРАВЧЕНКО***АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ СВЕТА  
ПУТЕМ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОЛУЧЕВОЙ  
ИНТЕРФЕРЕНЦИЕЙ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ ФАБРИ–ПЕРО***Институт физики им. Б. И. Степанова, Минск, Беларусь  
zaleski@inel.bas-net.by; kon54@yandex.by*

В настоящей работе были рассмотрены вопросы, связанные с уменьшением управляющего напряжения амплитудных модуляторов Фабри–Перо с сохранением их высокой эффективности. Были предложены схематические модели высокоэффективных амплитудных электрооптических модуляторов Фабри–Перо.

*Ключевые слова:* электрооптический эффект, амплитудная модуляция, фазовая модуляция, многолучевая интерференция, модулятор Фабри–Перо.

*V. A. PILIPOVICH, V. B. ZALESKY, A. I. KONOIKO, V. M. KRAVCHENKO***LIGHT AMPLITUDE MODULATION BY ELECTROOPTICAL CONTROL OF MULTIBEAM INTERFERENCE  
IN THE FABRY-PEROT INTERFEROMETER***B. I. Stepanov Institute of Physics of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
zaleski@inel.bas-net.by; kon54@yandex.by*

In present work the questions related to decreasing the control voltage of amplitude Fabry–Perot modulators with conserving their high efficiency have been considered. Schematic models of high-efficient amplitude Fabry–Perot electrooptical modulators have been proposed.

*Keywords:* electro-optical effect, amplitude modulation, phase modulation, multipath interference, a modulator of Fabry–Perot.

В последнее время наблюдается бурное развитие спектральных оптических методов обработки информации, в которых широко используются различные интерферометры [1]. Их использование позволяет осуществлять как сканирование по оптическому спектру путем изменения показателя преломления электрооптической среды, так и все виды модуляции излучения, в том числе и модуляции добротности лазерных резонаторов видимой и ИК области спектра [2; 3]. Наиболее чувствительными из интерферометров являются многолучевые интерферометры, например, Фабри–Перо (ИФП). Существующий метод стабилизации светомодуляционных характеристик электрооптического модулятора Фабри–Перо [4] позволяет получить их стабилизацию только для широкополосного излучения.

Использование фазовой модуляции на базе электрооптики в устройствах многолучевой интерференции для целей амплитудной модуляции света позволяет за счет многократного взаимодействия света с электрооптической средой значительно снизить величину управляющего электрического напряжения, а следовательно, увеличить рабочий частотный диапазон таких модуляторов. Однако в существующих методах не в полной мере учитывается влияние на эффективность амплитудной модуляции особенностей устройств на базе многолучевой интерференции, что существенно ограничивает рабочий частотный диапазон, стабильность и эффективность таких модуляторов. Поэтому представляет интерес рассмотреть, во-первых, возможность уменьшения управляющего напряжения амплитудных модуляторов Фабри–Перо при сохранении их высокой

эффективности. Во-вторых, возможность повышения стабильности и эффективности амплитудной модуляции плоско поляризованного лазерного излучения за счет исключения обратной связи между модулятором Фабри–Перо и лазерным резонатором за счет поляризационной фильтрации отраженных модулятором световых пучков и, в-третьих, рассмотреть оптические схемы амплитудных модуляторов Фабри–Перо с многократным прохождением светового пучка.

Для осуществления модуляции света наиболее перспективными считаются методы, основанные на явлении изменения показателя преломления среды под действием электрического поля – методы, основанные на применении электрооптического эффекта. Эти методы позволяют осуществлять как поляризационную, так и фазовую модуляцию.

Одной из основных причин, ограничивающих частотный диапазон электрооптических модуляторов, является рассеиваемая в их кристаллах электрическая мощность, которая приводит к уменьшению эффективности модуляции.

В поляризационных электрооптических модуляторах величина рассеиваемой электрической мощности задается, с одной стороны, как характеристиками используемого электрооптического материала, ориентацией управляющего поля, так и конструктивными параметрами элементов модулятора. Использование кристаллов с более высокими электрооптическими свойствами не позволяет расширить частотный диапазон поляризационных модуляторов в силу закономерности, состоящей в том, что величина электрооптического эффекта и его быстродействие – величины взаимосвязанные: чем больше эффект, тем меньше его быстродействие. Работа электрооптических кристаллов группы KDP вблизи точки фазового перехода также не позволяет уменьшить величину рассеиваемой в кристалле электрической мощности вследствие того, что относительная диэлектрическая постоянная и электрооптический коэффициент этих кристаллов изменяются по одному и тому же закону Кюри–Вейса. Поэтому расширение частотного диапазона таких модуляторов достаточно проблематично.

Использование фазовой модуляции на базе электрооптики в устройствах многолучевой интерференции для целей амплитудной модуляции света позволяет за счет многократного взаимодействия света с электрооптической средой значительно снизить величину управляющего электрического напряжения, а следовательно, увеличить рабочий частотный диапазон таких модуляторов. Однако в существующих методах не в полной мере учитывалось влияние на эффективность амплитудной модуляции особенностей устройств на базе многолучевой интерференции, что существенно ограничивало рабочий частотный диапазон таких модуляторов.

В настоящей работе рассмотрены вопросы, связанные с уменьшением управляющего напряжения амплитудных модуляторов Фабри–Перо при сохранении их высокой эффективности.

Амплитудная модуляция светового излучения на базе многолучевой интерференции является следствием фазовой модуляции одинаково поляризованных световых пучков внутри многолучевого интерферометра, например, Фабри–Перо.

Такие модуляторы обладают достаточно высоким светопропусканием. На рис. 1 показан график расчетной зависимости максимальной величины коэффициента светопропускания модулятора на базе интерферометра Фабри–Перо ( $Q_{\max}$ ) от коэффициента отражения зеркал ( $R$ ) в случае однократного (1) и двукратного (2) прохождения его световым пучком.

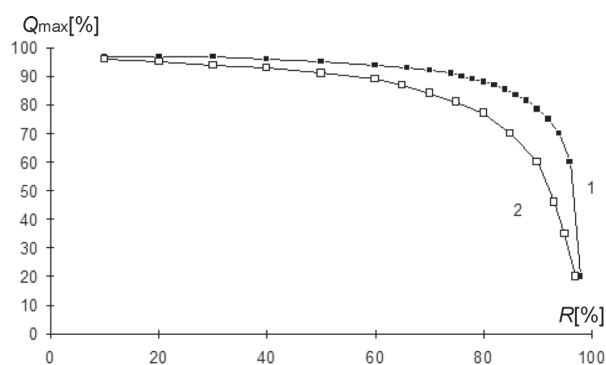


Рис. 1. Зависимость величины коэффициента максимального ( $Q_{\max}$ ) светопропускания в модуляторе на базе ИФП в случае однократного (1) и двукратного (2) прохождения его световым пучком

При расчете принималось, что коэффициент пропускания электрооптической среды ( $\nu$ ) выбирался равным 0,995, а коэффициент поглощения зеркал ( $K$ ) – 0,005.

Величина эффективности такого модулятора в случае однократного ( $\eta_1$ ) и двукратного ( $\eta_2$ ) прохождения его световым пучком будет определяться выражениями, имеющими соответственно следующий вид:

$$\eta_1 = \frac{I_{\approx}}{I_0} = Q_{\max} - Q = \frac{1}{v(1/v + K/T)^2} \left\{ 1 - \frac{1}{1 + [4vR/(1-vR)^2] \sin^2(q/2)} \right\},$$

$$\eta_2 = \frac{I_{\approx}}{I_0} = Q'_{\max} - Q' = \frac{1}{v^2(1/v + K/T)^4} \left\{ 1 - \frac{1}{\{1 + [4vR/(1-vR)^2] \sin^2(q/2)\}^2} \right\},$$
(1)

где  $I_0$  – интенсивность падающего света;  $I_{\approx}$  – переменная составляющая света на выходе модулятора;  $v$  – коэффициент пропускания электрооптического кристалла, находящегося между зеркалами интерферометра;  $q = Nq_0 = N2l_0\delta n \cos(\alpha)$  – разность фаз, наводимая в интерферометре и позволяющая изменять коэффициент пропускания модулятора от максимальной величины ( $Q_{\max}$ ) до требуемой ( $Q$ );  $2l_0\delta n \cos(\alpha) = \delta\Delta_0$  – оптическая разность хода, наводимая в одном электрооптическом кристалле;  $Nl_0$  – расстояние между зеркалами интерферометра;  $l_0$  – толщина одного электрооптического кристалла;  $\delta n$  – величина изменения коэффициента преломления кристалла под воздействием электрического поля;  $\alpha$  – угол падения светового пучка на интерферометр;  $\lambda$  – длина световой волны;  $T$  и  $R$  – коэффициенты светопропускания и отражения полупрозрачных покрытий зеркал интерферометра при условии, что  $T_1 = T_2 = T$ , а  $R_1 = R_2 = R$ . Последние величины связаны между собой соотношением  $R + T + H = 1$ , где  $H$  – коэффициент поглощения отражающих покрытий.

Выражения для соответствующей оптической разности хода ( $\delta\Delta_1$ ,  $\delta\Delta_2$ ), вносимой каждым электрооптическим кристаллом будут иметь следующий вид:

$$\delta\Delta_1 = \frac{\lambda}{N\pi} \arcsin \left[ \frac{(1-vR)}{2} \sqrt{\frac{1}{vR} \frac{I_{\approx}}{I_{\phi}}} \right];$$

$$\delta\Delta_2 = \frac{\lambda}{N\pi} \arcsin \left\{ \frac{(1-vR)}{2} \sqrt{\frac{1}{vR} \left[ \sqrt{\frac{I_{\approx}}{I_{\phi}} + 1} - 1 \right]} \right\},$$
(2)

где  $(I_{\approx} / I_{\phi})$  – отношение сигнал/фон.

На основании выражений (2) и параметров из (1) можно получить зависимости величины управляющего электрического напряжения от требуемой величины отношения  $(I_{\approx} / I_{\phi})$  для продольного ( $\parallel$ ) и поперечного ( $\perp$ ) подключения управляющего поля в случае однократного ( $U_{1\parallel}$ ,  $U_{1\perp}$ ) и двукратного ( $U_{2\parallel}$ ,  $U_{2\perp}$ ) прохождения светового пучка:

$$U_{1\parallel} = \frac{\lambda}{\pi N} \frac{1}{n_0^3 r_{ij}} \left\{ \arcsin \left[ \frac{(1-vR)}{2} \sqrt{\frac{1}{vR} \frac{I_{\approx}}{I_{\phi}}} \right] \right\},$$

$$U_{1\perp} = \frac{\lambda}{\pi N} \frac{1}{n_0^3 r_{ij}} \frac{d}{l_0} \left\{ \arcsin \left[ \frac{(1-vR)}{2} \sqrt{\frac{1}{vR} \frac{I_{\approx}}{I_{\phi}}} \right] \right\};$$

$$U_{2\parallel} = \frac{\lambda}{N\pi} \frac{1}{n^3 r_{ij}} \arcsin \left\{ \frac{(1-vR)}{2} \sqrt{\frac{1}{vR} \left[ \sqrt{\frac{I_{\approx}}{I_{\phi}} + 1} - 1 \right]} \right\},$$

$$U_{2\perp} = \frac{\lambda}{N\pi} \frac{1}{n^3 r_{ij}} \frac{d}{l_0} \arcsin \left\{ \frac{(1-vR)}{2} \sqrt{\frac{1}{vR} \left[ \sqrt{\frac{I_{\approx}}{I_{\phi}} + 1} - 1 \right]} \right\},$$
(3)

где  $r_{ij}$  – электрооптический коэффициент;  $d$  – апертура кристалла.

На рис. 2 показаны графики расчетной зависимости величины управляющего напряжения ( $U_1$ ,  $U_2$ ) соответственно для продольного (1, 3) и поперечного (2, 4) подключения электрического

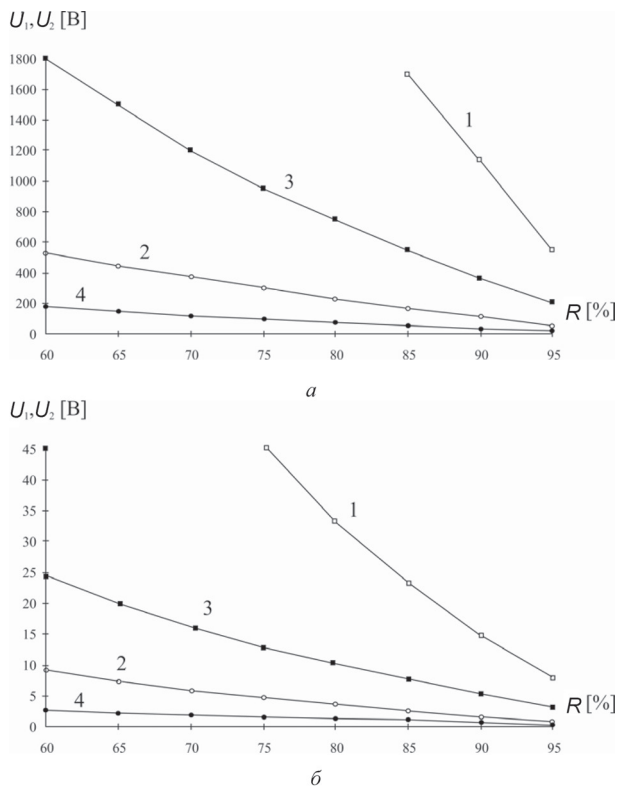


Рис. 2. Зависимости величин управляющего напряжения амплитудного модулятора Фабри–Перо от коэффициента отражения зеркал для заданного отношения сигнал/фон, равного 50, при температуре  $20\text{ }^\circ\text{C}$  (а),  $-55\text{ }^\circ\text{C}$  (б) в случае однократного ( $U_1 - 1, 2$ ) и двукратного ( $U_2 - 3, 4$ ) прохождения его световым пучком

факторы приводят к резкому снижению эффективности амплитудной модуляции и снижению стабильности характеристик всей оптической схемы.

Повышения стабильности и эффективности амплитудной модуляции можно достичь за счет исключения обратной связи между модулятором и лазерным резонатором путем поляризационной фильтрации отраженных от модулятора световых пучков.

Оптическая схема такого модулятора представлена на рис. 3. Она состоит из анализатора плоскости поляризации (1); двух, развернутых друг относительно друга на угол  $45^\circ$ , фазовых элементов  $\lambda/4$  (2, 3); интерферометра Фабри–Перо с электрооптическим элементом (4), одна из осей оптической анизотропии которого параллельна плоскости поляризации входящего в интерферометр светового пучка. Причем оси индикатрисы показателей преломления первого фазового элемента  $\lambda/4$  ориентированы под углом  $45^\circ$  к плоскости поляризации падающего светового пучка. В этом случае свет, отразившись от входного зеркала модулятора, не будет возвращаться к выходному зеркалу лазерного резонатора, а в модулятор поступит плоскополяризованный световой пучок, что соответствует оптимальному режиму работы.

В рассмотренном модуляторе электрооптический элемент работает в режиме фазовой модуляции. Возникновение анизотропии показателей преломления, обусловленной упругооптическим эффектом в электрооптическом кристалле, приводит к уменьшению эффективности модуляции проходящего светового пучка. В этом случае компенсацию влияния упругооптического эффекта можно осуществить за счет использования четного количества электрооптических кристаллов [3]. При этом каждый второй кристалл должен быть ориентирован под углом  $90^\circ$  относительно первого, а направления

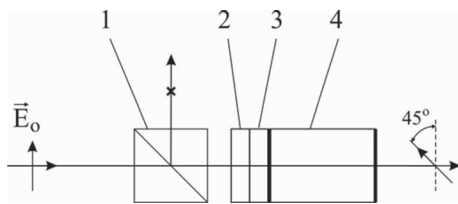


Рис. 3. Оптическая схема амплитудного модулятора Фабри–Перо с поляризационной фильтрацией

поля к кристаллам модуляторов, выполненных на базе одного ( $N = 1$ ) кристалла DKDP, от коэффициента отражения зеркал интерферометра ( $R$ ), работающих, соответственно, при температуре  $20\text{ }^\circ\text{C}$  (а) и  $-55\text{ }^\circ\text{C}$  (б) в случае однократного и двукратного прохождения его световым пучком, для отношения сигнал/фон ( $I_{\approx} / I_{\phi}$ ), равного 50.

Приведенные зависимости показывают возможность снижения управляющего напряжения для модулятора Фабри–Перо, выполненного на базе электрооптического кристалла DKDP, до величины порядка  $0,8\text{ В}$ , в случае его работы вблизи температуры Кюри, и порядка  $60\text{ В}$  – при нормальной температуре.

Работа таких модуляторов с лазерным излучением имеет свои особенности. Так как лазерный резонатор представляет собой интерферометр Фабри–Перо с помещенным в него активным элементом, то непосредственное использование рассмотренного выше амплитудного модулятора света приводит к возникновению в такой оптической схеме целой совокупности связанных между собой интерферометров Фабри–Перо (лазерного резонатора, модулятора, промежуточного, образованного выходным зеркалом лазера и входным зеркалом модулятора и т. д.). Перечисленные выше

управляющих полей в соседних кристаллах противоположны.

Дальнейшее снижение управляющих напряжений в модуляторах Фабри–Перо возможно осуществить двумя путями: используя последовательное оптическое соединение нескольких модуляторов с применением поляризационной фильтрации или многократное прохождение светового пучка в оптической схеме модулятора. С точки зрения упрощения конструкции и реализации наибольший интерес представляет модулятор с многократным прохождением светового пучка.

На рис. 4 представлена оптическая схема амплитудного модулятора с прямым и обратным ходом светового пучка. Она содержит электрооптический модулятор Фабри–Перо (3), образованный зеркалами и электрооптическим элементом, оси наведенной анизотропии которого ориентированы под углом  $45^\circ$  к кристаллографическим осям ближайших фазовых элементов  $\lambda/4$ , вращателей плоскости поляризации светового пучка (2, 4), которые в свою очередь повернуты на угол  $45^\circ$  по отношению к дальним фазовым элементам  $\lambda/4$  вращателей; 1, 5 – анализаторы поляризации световых пучков, главные плоскости которых ориентированы под углом  $45^\circ$  к кристаллографическим осям дальних фазовых элементов  $\lambda/4$  вращателей плоскости поляризации светового пучка (2, 4); 6 – синхронизатор световых пучков, одна из осей наведенной анизотропии которого параллельна главной плоскости второго анализатора поляризации светового пучка (5), и глухое зеркало (7).

Отличительной особенностью рассматриваемого модулятора является то, что наряду с поляризационной фильтрацией, осуществляемой анализаторами поляризации световых пучков и вращателями плоскости поляризации светового пучка, в нем предусмотрена управляемая фазовая синхронизация интерферирующих световых пучков, осуществляемая синхронизатором, которая позволяет получить максимальную эффективность при использовании его, например, для модуляции добротности лазерного резонатора.

Наряду с кристаллами DKDP для ряда практических применений, например, для управления параметрами излучения с длиной волны  $\lambda = 1,5$  мкм, необходимо использование кристаллов ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$ .

Расчеты показывают, что для модулятора на кристалле ниобата лития с апертурой  $d = 5$  мм и поперечным приложением управляющего электрического поля при коэффициенте отражения зеркал равном 0,6 и  $\lambda = 1,5$  мкм, управляющее напряжение составит порядка 200 В при отношении сигнал/фон 50 и светопропускании 0,9.

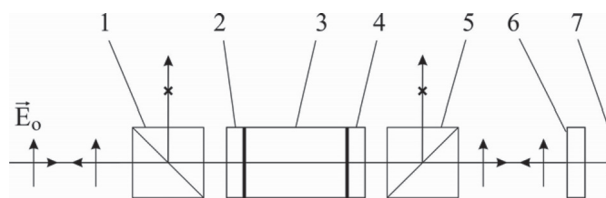


Рис. 4. Оптическая схема амплитудного модулятора с прямым и обратным ходом светового пучка

### Список использованной литературы

1. Двухканальный виброустойчивый интерферометр с совмещенными каналами зондирования / В. А. Пилипович [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2012. – № 4(13). – С. 30–34.
2. Пилипович, В. А. Высокоэффективные электрооптические затворы для лазеров видимой и ближней ИК области спектра / В. А. Пилипович, А. А. Ставров, А. И. Конойко // Электроника инфо. – 2008. – № 4. – С. 45–48.
3. Пилипович, В. А. Методы и средства электрооптической модуляции излучения ИК области спектра / В. А. Пилипович, А. И. Конойко, А. М. Поликанин // Проблемы физики, математики и техники. – 2011. – № 4(9). – С. 54–59.
4. Метод стабилизации светомодуляционных характеристик электрооптического модулятора Фабри–Перо для широкополосного излучения / В. А. Пилипович [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 4(21). – С. 30–35.

Поступило в редакцию 13.04.2015