

Свойства сверхбыстрого чисто оптического коммутатора на основе интегрального кремниевого интерферометра Маха – Цендера*

Жианвей Ву, Фенгуанг Луо, Жихуа Ю, Кинг Тао

Представлен сверхбыстрый чисто оптический коммутатор на основе интегрального интерферометра Маха – Цендера (ИМЦ), два плеча которого образованы идентичными оптическими волноводами типа кремний-на-диэлектрике (КНД). Промоделирована работоспособность предложенного устройства как для непрерывных, так и для импульсных пробных сигналов и показано, что на выходе ИМЦ коммутационный импульс пробного сигнала сильно зависит от энергии и длительности сверхкороткого управляющего импульса и длины волновода из КНД. Кроме того, в случае использования импульсного пробного сигнала начальная задержка между обеими оптическими волнами также будет оказывать существенное влияние на оптический коммутатор.

Ключевые слова: интегральная оптика, технология кремний-на-диэлектрике, интерферометр Маха – Цендера, сверхбыстрая чисто оптическая коммутация.

1. Введение

Сверхбыстрая чисто оптическая коммутация вызывает повышенный интерес из-за потенциальных возможностей ее применения в оптической связи, например для оптического временного мультиплексирования (ОВМ), в системах 3R и т. д. В большинстве известных на сегодняшний день чисто оптических коммутаторах использовался интерферометр Маха – Цендера (ИМЦ), что обусловлено простотой его разработки и изготовления. Ранее исследовались различные волноводные коммутирующие устройства, основанные на конфигурации ИМЦ. Развитие интегральной оптоэлектроники вызывает настоятельную потребность в интегральном ИМЦ. Мы разработали кремниевый ИМЦ, поскольку в последнее время кремниевая фотоника привлекает все больше внимания из-за ее потенциальных возможностей для интегральной оптики [1, 2].

В кремниевых нанопотонных устройствах, в которых благодаря структуре кремний-на-диэлектрике (КНД) использование КНД-волноводов представляется особенно перспективным, было успешно продемонстрировано и тщательно исследовано множество новых типов нелинейных оптических явлений, таких, например, как двухфотонное поглощение (ДФП), поглощение свободных носителей, индуцированное ДФП, дисперсия свободных носителей (ДСН) и т. д. Оптический КНД-волновод имеет кремниевую сердцевину с показателем преломления $n \approx 3.5$, окруженную оболочкой из SiO_2 с $n \approx 1.5$, что

*Перевод с англ. В.В.Кошечкиной.

Jianwei Wu. College of Mathematics and Physics, Hohai University, Nanjing 210098, P.R. China
Fengguang Luo, Zhihua Yu, Qing Tao. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, P.R. China; College of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P.R. China; e-mail: jwwu@hhu.edu.cn

Поступила в редакцию 24 августа 2008 г.

обеспечивает высокий контраст показателей преломления сердцевины и оболочки, и поэтому оптическое поле удерживается в кремниевом слое с малым поперечным сечением. Как следствие, нелинейные процессы, включая эффект Керра и другие, протекают в КНД-волноводе гораздо интенсивнее, чем в обычных хорошо исследованных волоконных световодах, которые используются при изготовлении самых разных функциональных элементов.

Учитывая вышесказанное, в настоящей работе представлена и проанализирована конфигурация кремниевый ИМЦ, предложенная ранее в [3]. Однако в этой работе демонстрировались лишь фильтрующие свойства ИМЦ, поэтому возникла необходимость в исследовании и других возможностей его использования. С учетом этого функциональность ИМЦ в волноводе КНД была нами расширена, а именно, с его помощью была осуществлена сверхбыстрая чисто оптическая коммутация. Полностью исследованы свойства оптических коммутируемых импульсов для непрерывных и импульсных пробных сигнальных волн при изменении энергии и длительности управляющего импульса, длины волновода и времени первоначальной задержки.

2. Устройство и принципы работы волноводного коммутатора

Разработанная конфигурация ИМЦ и поперечное сечение гребенчатого КНД-волновода показаны на рис.1. Два идентичных КНД-волновода (рис.1,а) расположены в верхнем (фазомодулирующем) и в нижнем (опорном) плечах ИМЦ. На рисунке Y_1 и Y_2 – трехдецибелльные Y-разветвители, C_1 и C_2 – направленные трехдецибелльные ответвители и F – фильтр, который отсекает управляющий импульс. Принцип работы оптического коммутатора можно описать следующим образом: пробный сигнал с помощью ответвителя C_1 поровну распределяется между верхним и нижним плечами ИМЦ и затем, перед входом в КНД-волновод, в верхнем плече часть проб-

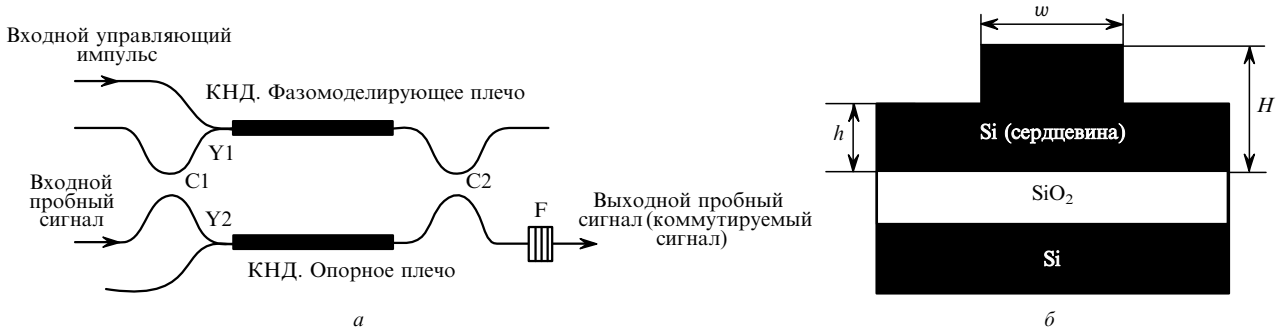


Рис.1. Схема ИМЦ (а) и поперечное сечение гребенчатого КНД-волновода (б).

ного сигнала смешивается с управляющим импульсом. В КНД-волноводе пробный сигнал получает дополнительный набег по фазе из-за нелинейного воздействия управляющего импульса. В опорном плече через КНД-волновод проходит только часть пробного сигнала. Как следствие, фазовый сдвиг между двумя частями пробного сигнала после прохождения КНД-волновода обеспечивает сверхбыструю чисто оптическую коммутацию в нижнем выходе ИМЦ. Если же управляющий импульс на вход не подается, энергия пробного сигнала на выходе нижнего плеча равна нулю, т. е. пробный сигнал полностью выключен из-за разности фаз π , вносимой двумя трехдецибелными направленными ответвителями.

На рис.1,б показана структура КНД-волновода шириной w с высотой ребра H и высотой основания h . При распространении оптических волн в КНД-волноводе будут накапливаться свободные носители, эффективное время рекомбинации которых [4]

$$\tau_{\text{eff}}^{-1} = \frac{S}{H} + \frac{w + 2(H - h)}{wH} S' + 2 \frac{h}{H} \left[\frac{D}{w^2} \left(\frac{S + S'}{h} \right) \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где первое слагаемое определяет время рекомбинации на границе раздела, второе слагаемое соответствует поверхностной рекомбинации на стенках и последнее слагаемое относится к времени переноса за пределы области взаимодействия; S и S' – эффективные скорости рекомбинации; D – коэффициент диффузии.

Нелинейные уравнения переноса для управляющей и пробной волн в фазомодулирующем плече КНД-волновода имеет следующий вид [5, 6]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial A_c}{\partial z} + \beta_{c1} \frac{\partial A_c}{\partial t} + i \frac{1}{2} \beta_{c2} \frac{\partial^2 A_c}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_{c3} \frac{\partial^3 A_c}{\partial t^3} \\ &= -\frac{1}{2} \alpha_{c1} A_c - \frac{1}{2} \alpha_{cFC} A_c - \frac{1}{2} \frac{\beta_{ccTPA}}{B_{c\text{eff}}} |A_c|^2 A_c - \frac{\beta_{cdTPA}}{B_{c\text{eff}}} |A_d|^2 A_c \\ & \quad + i \gamma_{c,c} |A_c|^2 A_c + i 2 \gamma_{c,d} |A_d|^2 A_c + i \frac{2\pi}{\lambda_c} \Delta n_{\lambda_c} A_c, \quad (2) \\ & \frac{\partial A_d}{\partial z} + \beta_{d1} \frac{\partial A_d}{\partial t} + i \frac{1}{2} \beta_{d2} \frac{\partial^2 A_d}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_{d3} \frac{\partial^3 A_d}{\partial t^3} \\ &= -\frac{1}{2} \alpha_{d1} A_d - \frac{1}{2} \alpha_{dFC} A_d - \frac{1}{2} \frac{\beta_{ddTPA}}{B_{d\text{eff}}} |A_d|^2 A_d - \frac{\beta_{dcTPA}}{B_{d\text{eff}}} |A_c|^2 A_d \\ & \quad + i \gamma_{d,d} |A_d|^2 A_d + i 2 \gamma_{d,c} |A_c|^2 A_d + i \frac{2\pi}{\lambda_d} \Delta n_{\lambda_d} A_d. \quad (3) \end{aligned}$$

Уравнение переноса пробной волны в опорном плече КНД-волновода имеет вид

$$\frac{\partial A_d}{\partial z} + \beta_{d1} \frac{\partial A_d}{\partial t} = -\frac{1}{2} \alpha_{d1} A_d - \frac{1}{2} \alpha_{dFC} A_d - \frac{1}{2} \frac{\beta_{ddTPA}}{B_{d\text{eff}}} |A_d|^2 A_d$$

$$+ i \gamma_{d,d} |A_d|^2 A_d + i \frac{2\pi}{\lambda_d} \Delta n_{\lambda_d} A_d, \quad (4)$$

где индексы c и d соответствуют управляющему импульсу и пробному сигналу соответственно; A – медленно меняющаяся огибающая импульса; β_1, β_2 и β_3 – коэффициенты дисперсии первого, второго и третьего порядков. Параметр β_1 обратно пропорционален групповой скорости импульса $v_g = 1/\beta_1$, β_2 определяет дисперсию групповой скорости (ДГС), а β_3 отвечает за дисперсию третьего порядка (ДТП), приобретая важное значение в случае ультракоротких импульсов из-за их широкого спектра. Величина $\gamma = 2\pi n_2/\lambda B_{\text{eff}}$ – нелинейный параметр; n_2 – нелинейный коэффициент; B_{eff} – эффективная площадь сердцевинны; λ – центральная длина волны; α_1 – линейные потери распространения; α_{FC} – коэффициент поглощения на свободных носителях (ПСН); β_{TPA} – коэффициент двухфотонного поглощения, имеющий схожие значения для всех типов ДФП; ω – круговая частота. Первые четыре слагаемых в правой части уравнений (2) и (3) обозначают потери при распространении, потери на свободных носителях, вырожденное и невырожденное ДФП соответственно. Следующие два слагаемых представляют собой фазовую самомодуляцию (ФСМ) и кросс-фазовую модуляцию (КФМ) соответственно, а последнее слагаемое описывает дисперсию свободных носителей, связанную с изменением эффективного показателя преломления Δn :

$$\begin{aligned} \Delta n_{\lambda_{c,d}} &= -8.8 \times 10^{-22} \left(\frac{\lambda_{cd}}{1.55} \right)^2 \Delta n_e \\ & \quad - 8.5 \times 10^{-18} \left(\frac{\lambda_{cd}}{1.55} \right)^2 (\Delta n_h)^{0.8}; \quad (5) \end{aligned}$$

коэффициент ПСН

$$\begin{aligned} \alpha_{FC} &= 8.5 \times 10^{-18} \left(\frac{\lambda_{cd}}{1.55} \right)^2 \Delta n_e \\ & \quad + 6.0 \times 10^{-18} \left(\frac{\lambda_{cd}}{1.55} \right)^2 \Delta n_h = \sigma n_{eh} = \sigma_0 \left(\frac{\lambda_{cd}}{1.55} \right)^2 n_{eh}, \quad (6) \end{aligned}$$

где $\sigma_0 = 1.45 \times 10^{-7} \text{ см}^{-2}$ – сечение поглощения на свободных носителях, измеренное на длине волны $\lambda = 1.55 \text{ мкм}$ [7]; $n_{eh} = n_e = n_h$ – плотность электронно-дырочных пар, генерируемых в результате вырожденного и невырожденного ДФП, которая определяется уравнением

$$\begin{aligned} \frac{dn_{eh}}{dT} &= -\frac{n_{eh}}{\tau_{\text{eff}}} + \frac{\beta_{ccTPA}}{2\eta\omega_c} (|A_c(z, t)|^2 B_{c\text{eff}}^{-1})^2 \\ & \quad + \frac{\beta_{ddTPA}}{2\eta\omega_d} (|A_d(z, t)|^2 B_{d\text{eff}}^{-1})^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\beta_{cd\text{TPA}}}{\eta\omega_d} (|A_d(z, t)|^2 |A_c(z, t)|^2 B_{c\text{eff}}^{-1})^2 \\
& + \frac{\beta_{dc\text{TPA}}}{\eta\omega_c} (|A_c(z, t)|^2 |A_d(z, t)|^2 B_{d\text{eff}}^{-1})^2. \quad (7)
\end{aligned}$$

Для наблюдения свойств полученной сверхбыстрой чисто оптической коммутации можно численно решить систему уравнений (1)–(7) с заданными граничными условиями. Подробные результаты моделирования представлены в следующих разделах.

3. Численное моделирование и обсуждение результатов

Параметры, использованные при моделировании, соответствуют литературным данным [4, 8] и представлены ниже.

Длина волны управляющего импульса λ_c (нм).....	1550
Длина волны пробного сигнала λ_d (нм)	1650
Нелинейный коэффициент n_2 ($\text{м}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$).....	6×10^{-18}
Коэффициент дисперсии первого порядка на длине волны накачки β_{c1} ($\text{с} \cdot \text{м}^{-1}$).....	7.3960×10^{-8}
Коэффициент дисперсии второго порядка на длине волны накачки β_{c2}	0
Коэффициент дисперсии третьего порядка на длине волны накачки β_{c3} ($\text{пс}^3 \cdot \text{м}^{-1}$)	4.0×10^{-3}
Коэффициент дисперсии первого порядка на длине волны непрерывного излучения β_{d1} ($\text{с} \cdot \text{м}^{-1}$).....	7.3836×10^{-8}
Коэффициент дисперсии второго порядка на длине волны непрерывного излучения β_{d2} ($\text{пс}^2 \cdot \text{м}^{-1}$)	-0.3
Коэффициент дисперсии третьего порядка на длине волны непрерывного излучения β_{d3} ($\text{пс}^3 \cdot \text{м}^{-1}$)	4.1×10^{-3}
Коэффициент линейной потерь волновода $\alpha_{cl,dl}$ ($\text{дБ} \cdot \text{см}^{-1}$) ..	0.22
Коэффициент двухфотонного поглощения β_{TPA} ($\text{см} / \text{ГВт}$)	0.5
Ширина гребня волновода w (нм)	900
Высота гребня волновода H (нм)	780
Высота основания h (нм)	390
Эффективная скорость поверхностной рекомбинации S, S' ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$).....	80
Коэффициент диффузии D ($\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$).....	16
Приведенная постоянная Планка \hbar (Дж·с).....	1.06×10^{-34}

Мы провели вычислительный эксперимент с целью исследования свойств коммутирующих импульсов кремниевого ИМЦ. На рис.2 показаны выходные коммутируемые импульсы и соответствующие разности фаз между фазомодулирующим и опорным плечами при входных мощностях управляющего импульса $P_{c0} = 1, 2$ и 5 Вт, а

также длине КНД $L = 15$ мм, первоначальной длительности управляющего импульса по уровню интенсивности $1/e$, $T_{c0} = 100$ фс, входной мощности непрерывного пробного сигнала $P_{d0} = 100$ мВт и гауссовой форме управляющего импульса. Из рис.2,а следуют некоторые важные выводы: с ростом первоначальной пиковой мощности управляющего импульса с 1 до 5 Вт энергия коммутируемого импульса быстро увеличивается, а его форма значительно искажается – на заднем фронте появляется мощный и длинный пик, а сам импульс сдвигается во времени относительно управляющего импульса. Это явление можно объяснить следующим образом: когда управляющий импульс попадает в КНД-волновод, он нелинейным образом (через КФМ, ДФП, ПСН, ДСН и т. д.) воздействует на распространяющуюся вместе с ним пробную сигнальную волну, вследствие чего изменяется фаза пробного сигнала. При этом разность фаз между плечами интерферометра уже не будет равна π , что обеспечивается двумя направленными ответвителями (рис.2,б), а следовательно, коммутатор находится во включенном состоянии. Когда мощность входного управляющего импульса невелика ($P_{c0} = 1$ Вт), такими нелинейными процессами как поглощение и дисперсия свободных носителей можно пренебречь. Это связано с тем, что накопление свободных носителей, обеспечиваемое, в основном, управляющим импульсом, при небольшом уровне мощности чрезвычайно мало, в результате чего дополнительный фазовый сдвиг волны пробного сигнала определяется, главным образом, процессами КФМ и ДФП в фазомодулирующем плече, и получается почти симметричный коммутируемый импульс. С увеличением входной мощности управляющего импульса до 2 Вт и более следует учитывать влияние свободных носителей, вызывающее больший фазовый сдвиг между фазомодулирующим и опорным плечами после прохождения интерферометра. Благодаря этому энергия полученного коммутируемого импульса увеличивается. Поскольку из-за возросшей плотности свободных носителей показатель преломления волновода сильно изменяется, разность фаз пробного сигнала и фазоудерживающего управляющего импульса также изменится. В связи с этим коммутируемый импульс приобретает затянутый пик на заднем фронте, мощность которого будет расти с увеличением мощности управляющего импульса. Следует отметить, что коммутируемый импульс задержан во времени относительно управляющего импульса, поскольку групповая скорость пробной сигнальной волны меньше, чем у последнего.

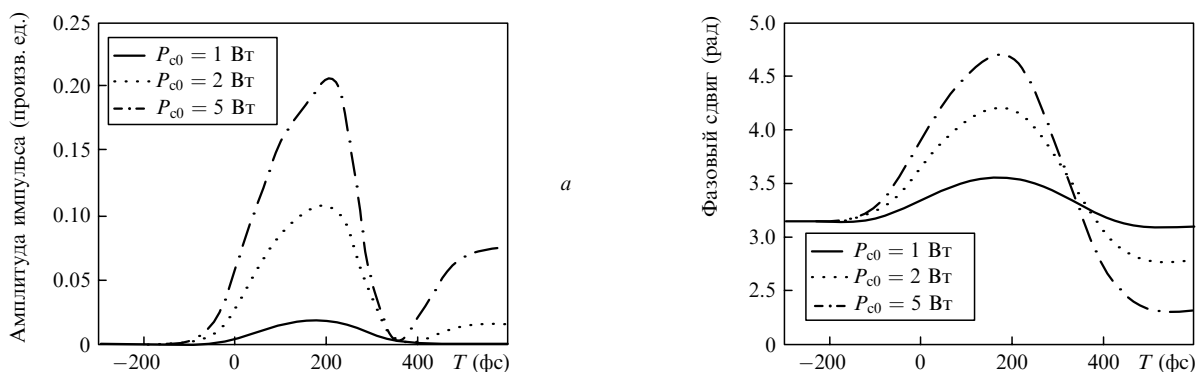


Рис.2. Амплитуды выходного коммутируемого импульса (а) и соответствующие фазовые сдвиги (б) при различных мощностях входного управляющего импульса.

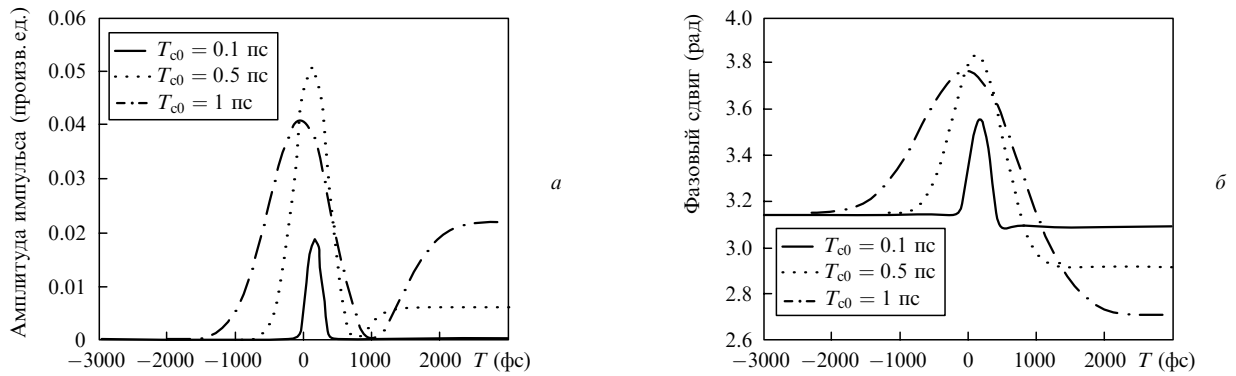


Рис.3. Амплитуды выходного коммутируемого импульса (а) и соответствующие фазовые сдвиги (б) при различных длительностях входного управляющего импульса.

На рис.3 показаны изменения амплитуды коммутируемого импульса и сдвига фаз при $P_{c0} = 1$ Вт, $L = 15$ мм, $P_{d0} = 100$ мВт и различных длительностях управляющего импульса. При увеличении T_{c0} коммутируемый импульс быстро расширяется, поскольку при этом растет область перекрытия импульсов. В результате диапазон изменения фазы пробного сигнала тоже расширяется (рис.3,б), что, в свою очередь, ведет к уширению выходного коммутируемого импульса. Однако с увеличением длительности управляющего импульса плотность свободных носителей будет возрастать, так что при $T_{c0} = 0.5$ и 1 пс усилятся пик на заднем фронте коммутируемого импульса. Объяснение этого аналогично проведенному выше.

Такое же влияние на свойства коммутируемого импульса будет оказывать длина волновода (рис.4,а). Параметры моделирования следующие: $T_{c0} = 100$ фс, $P_{c0} = 2$ Вт и $P_{d0} = 100$ мВт. Коммутируемый импульс уширяется при увеличении длины волновода из-за различия в групповых скоростях управляющей и пробной волн. Отметим, что при увеличении длины волновода от 5 до 10 мм выходная энергия возрастает. Это можно объяснить тем, что при удлинении волновода растет длина нелинейного взаимодействия, в результате чего соответствующий фазовый сдвиг (рис.4,б) также увеличивается. В то же время при $L = 20$ мм пиковая мощность коммутируемого импульса падает по сравнению со случаем $L = 10$ мм, поскольку с длиной волновода растут и нелинейные потери.

Для сравнения со случаем непрерывного пробного сигнала было проведено теоретическое моделирование с импульсным пробным сигналом. На рис.5 показаны изменения коммутируемого импульса при вариации мощности и длительности управляющего импульса, а также

длины волновода. Хорошо видно, что при изменении соответствующих параметров эволюция коммутируемого импульса аналогична случаю непрерывного пробного сигнала. Физическое обоснование эволюции также идентично рассмотренному выше случаю (рис.2–4). Например, повышение мощности управляющего импульса до 15 Вт вызывает усиление осцилляций на заднем фронте из-за увеличения числа свободных носителей. Кроме того, при увеличении длительности управляющего импульса и длины волновода коммутируемый импульс также быстро расширяется и распадается на два импульса из-за увеличения длины взаимодействия.

Другим очень важным параметром является начальное время задержки между входным управляющим импульсом и пробным сигналом. Этот параметр оказывает значительное влияние на выходной коммутируемый импульс (рис.6), где положительное (отрицательное) время задержки означает, что управляющий (пробный) импульс отстает от пробного (управляющего) импульса. Когда время задержки $T_d = 100$ фс, коммутируемый импульс имеет наибольшую мощность по сравнению с другими случаями, поскольку групповая скорость управляющего импульса меньше, чем пробного. Это связано с тем, что при выборе подходящей начальной задержки управляющий импульс будет формировать более сильный нелинейный фазовый сдвиг пробного импульса. Однако когда время задержки возрастает до 300 фс, оба импульса практически не перекрываются во времени, поэтому влияние управляющего импульса на пробный становится чрезвычайно малым, а амплитуда коммутируемого импульса при дальнейшем увеличении времени задержки уменьшается вплоть до нуля. С другой стороны, когда время задержки равно -300 фс, коммутируемый

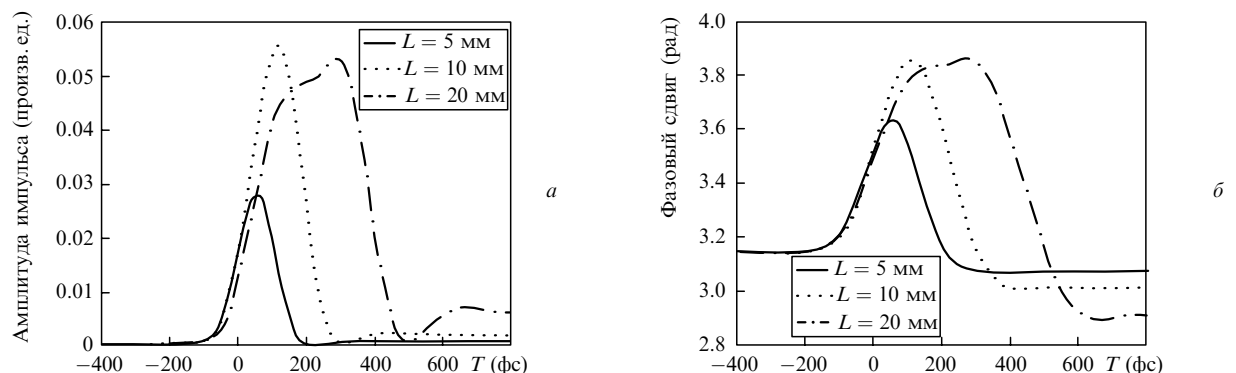


Рис.4. Амплитуды выходного коммутируемого импульса (а) и соответствующие фазовые сдвиги (б) при различных длинах волновода.

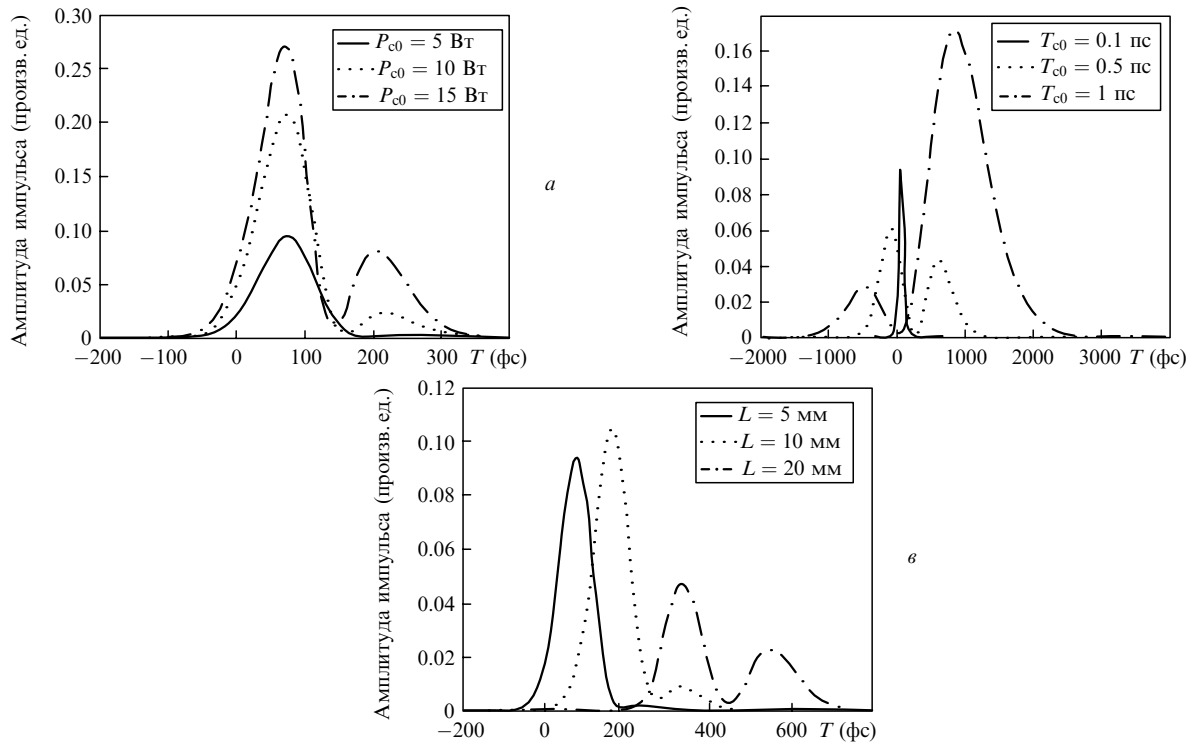


Рис.5. Амплитуды выходного коммутируемого импульса при изменении входной мощности управляющего импульса и $L = 5$ мм, $T_{c0} = 100$ фс и $P_{d0} = 100$ мВт (а), длительности управляющего импульса и $L = 5$ мм, $P_{c0} = 5$ Вт и $P_{d0} = 100$ мВт (б), а также длины волновода и $P_{c0} = 5$ Вт, $P_{d0} = 100$ мВт и $T_{c0} = 100$ фс (в).

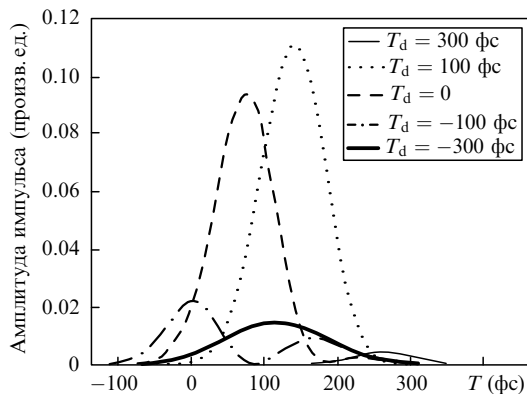


Рис.6. Амплитуды выходного коммутируемого импульса при различных временах задержки и $L = 5$ мм, $P_{c0} = 5$ Вт и $P_{d0} = 100$ мВт.

импульс имеет заметный уровень мощности, поскольку управляющий импульс с большой энергией изменяет показатель преломления волновода из-за генерации свободных носителей, что приводит к сдвигу отстающей фазы пробного импульса. Действительно, полученный коммутируемый импульс практически не меняется, если отрицательное время задержки меньше эффективного времени рекомбинации свободных носителей.

4. Заключение

Представлено теоретическое описание и продемонстрированы свойства сверхбыстрого чисто оптического коммутатора на основе симметричной конфигурации ИМЦ с КНД-волноводом в обоих плечах. По сведениям авторов, впервые продемонстрирована сверхбыстрая чисто оптическая коммутация в подобных волноводных уст-

ройствах на основе численного решения уравнения переноса. Мощный управляющий импульс нелинейно, через КФМ, двухфотонное поглощение, поглощение и дисперсию свободных носителей и т. д., воздействует на пробный сигнал, что обеспечивает сдвиг фазы пробного сигнала в фазомодулирующем плече относительно фазы в опорном плече и появление коммутируемого импульса вследствие интерференционного эффекта. В проведенных исследованиях рассматривались случаи непрерывного и импульсного пробного сигналов. В обоих случаях в основе сверхбыстрой оптической коммутации лежит одинаковый физический принцип. Получаемый коммутируемый импульс из-за влияния свободных носителей искажается при росте мощности и длительности управляющего импульса, а также длины волновода. Кроме того, в случае импульсного пробного сигнала значительное влияние на оптическую коммутацию оказывает начальное время задержки, изменяя которое можно получить максимальную мощность коммутируемого импульса.

Работа выполнена благодаря поддержке Chinese National Natural Science Foundation (грант 60677023) и Chinese National High Technology Research and Development Program (грант 2006AA01Z240).

1. Soref R. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **12**, 1678 (2006).
2. Jalali B., Fathpour S. *J. Lightwave Technol.*, **24**, 4600 (2006).
3. Zhou L., Poon A.W. *Opt. Lett.*, **32**, 781 (2007).
4. Dimitropoulos D., Jhaveri R., Claps R., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 071115 (2005).
5. Leonardis F.D., Passaro V.M.N. *J. Lightwave Technol.*, **25**, 2352 (2007).
6. Michael K., Renner H., Fathpour S., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **44**, 692 (2008).
7. Dimitropoulos D., Raghunathan V., Claps R., et al. *Opt. Express*, **11**, 149 (2003).
8. Lin Q., Zhang J., Fauchet P.M., et al. *Opt. Express*, **14**, 4786 (2006).