

2. Думаревский Ю. Д., Ковтолюк Н. Ф., Компанец И. Н. и др. Структуры металл — диэлектрик — полупроводник — жидкий кристалл: влияние параметров управляющих сигналов на характеристики пространственной модуляции света.— Квант. электроника, 1984, т. 11, № 4, с. 730—735.
3. Компанец И. Н., Парфенов А. В., Попов Ю. М. Пространственная модуляция света в фоточувствительных высококонтрастных структурах МДП с жидким кристаллом.— Квант. электроника, 1980, т. 7, № 2, с. 290—298.
4. Захаров И. С. Стационарные характеристики фототока легированных кристаллов типа силленита.— ФТТ, 1985, т. 27, № 4, с. 1062—1068.
5. Захаров И. С., Кичуткин К. М., Леонов Е. И. и др. Спектральные характеристики пропускания, поглощения и фотопроводимости кристаллов типа силленита, подвергнутых различным обработкам.— М., 1985, рукопись деп. в ВИНТИ, № 3577-85 Деп.
6. Кичуткин К. М., Захаров И. С. Анализ эквивалентной схемы структуры МДП — ЖК как носителя оптической информации.— М., 1985, рукопись деп. в ВИНТИ, № 3217—85 Деп.

Поступила в редакцию 8 июля 1985 г.

УДК 681.3 : 535

Е. А. КУЗИН, М. П. ПЕТРОВ

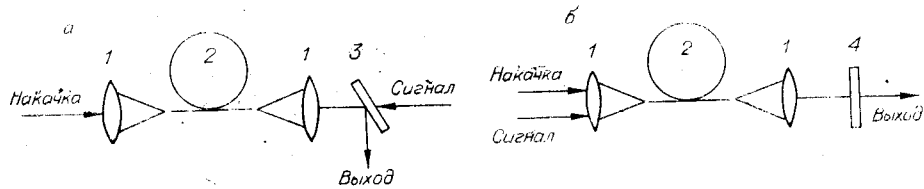
(Ленинград)

ОПТИЧЕСКИЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ СВЕТОВОЛОКНА

Развитие электронной вычислительной техники, несмотря на колоссальный прогресс, сталкивается с определенными трудностями при создании вычислительных систем сверхбольшой мощности. Проблема заключается, в частности, в том, что с повышением быстродействия и увеличением степени интеграции электронных вентилях возрастают трудности с отводом тепла от электронных схем и взаимные помехи. С увеличением быстродействия вентилях усложняется также синхронизация схемы в целом из-за разброса времен задержек импульсов вследствие различия длин межэлементных связей.

Все эти трудности заставляют обращаться к альтернативным методам обработки информации, в частности оптическим. Основным элементом цифровых оптических вычислительных устройств является оптический логический элемент. Наибольший интерес до последнего времени вызывали логические элементы на основе полупроводниковых бистабильных устройств [1].

В настоящей работе рассматриваются принципиальные возможности использования механизмов вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) и вынужденного рассеяния Мандельштама — Бриллюэна (ВРМБ) в оптическом волокне для выполнения логических операций. При этом, как будет показано ниже, открываются возможности обеспечить энергопотребление на уровне 10^{-10} — 10^{-12} Дж/опер., производительность до 10^{12} Гц, что находится на уровне или даже превосходит предельные теоретические возможности бистабильных полупроводниковых элементов. Кроме того, использование механизмов ВКР и ВРМБ в оптическом волокне обладает рядом преимуществ, связанных с практически полной нечувствительностью к внешним воздействиям, в том числе температурным, возможностью работы в широком спектральном диапазоне, хорошей согласованностью с волоконно-оптическими линиями связи.



Логический элемент НЕ:

а — на основе ВРМБ; *б* — на основе ВКР; 1 — фокусирующие линзы; 2 — оптическое волокно; 3 — светоделительная пластина; 4 — фильтр, пропускающий только излучение накачки.

Принцип выполнения логических операций на основе процессов вынужденного рассеяния света в волокне продемонстрируем на примере операции НЕ. Выполнение этой операции на основе ВРМБ и ВКР поясняется на рисунке, *а*, *б* соответственно. В рассматриваемых устройствах на оптическое волокно подается последовательность световых импульсов накачки с длиной волны λ_L и информационная последовательность, в которой логической единице соответствует световой импульс со стоксовой длиной волны λ_S , а логическому нулю — отсутствие импульса. В случае ВРМБ импульсы накачки и информационные импульсы распространяются навстречу друг другу, в случае ВКР — попутно. (В принципе возможно использование и ВКР со встречным распространением импульсов, хотя эта ситуация оказывается более специфической.) В качестве выходного сигнала используется последовательность импульсов накачки, прошедших через волокно. Мощность импульсов накачки выбирается меньше пороговой мощности вынужденного рассеяния, поэтому в отсутствие стоксового импульса (на вход подан логический нуль) импульс накачки беспрятственно проходит по волокну и на выходе элемента образуется сигнал, соответствующий логической единице. Если в волокно одновременно с импульсом накачки вводится и стоксов импульс (т. е. на вход подается логическая единица), то возникает перекачка энергии из первого в последний. В результате наступает истощение накачки и на выход элемента поступает сигнал, соответствующий логическому нулю. Таким образом осуществляется операция инверсии.

Оценим необходимые мощности накачки, энергию накачки на переключение и быстродействие волоконно-оптических логических элементов, основанных на явлениях ВКР и ВРМБ.

Как следует из вышеизложенного, в основу логического элемента может быть положен ВКР- или ВРМБ-усилитель. Усиление стоксовой волны в нем описывается выражением [2, 3]

$$P_{S_{\text{вых}}} = P_{S_{\text{вх}}} \exp \{gP_L l / S\}, \quad (1)$$

где $P_{S_{\text{вх}}}$ и $P_{S_{\text{вых}}}$ — мощности стоксовой волны на входе в усилитель и выходе из него; g — коэффициент усиления, определяемый нелинейными свойствами среды; P_L — мощность излучения накачки; S — площадь сечения светового пучка, распространяющегося по волокну; l — длина эффективного взаимодействия импульса накачки и стоксового импульса. Выражение (1) справедливо как для ВКР-, так и для ВРМБ-усилителя, но коэффициенты g будут иметь конечно-разностное значение для этих процессов.

Вообще говоря, выражение (1) точно описывает усиление только в том случае, если в процессе вынужденного рассеяния можно пренебречь уменьшением P_L . Однако его используют и для грубой оценки необходимой мощности импульса накачки.

Эффективность перекачки энергии от импульса накачки к стоксовому импульсу возрастает с увеличением мощности накачки. Однако если эта мощность больше пороговой, интенсивная стоксова волна и истощение накачки развиваются даже при отсутствии входного стоксового импульса. Пороговые условия достигаются, если показатель экспоненты в (1)

приблизительно равен 15, т. е.

$$P_L \approx 15S/gl. \quad (2)$$

Эту мощность и будем считать мощностью накачки, необходимой для работы логического элемента.

Из выражения (2) видно, что для уменьшения мощности накачки желательно уменьшать S и увеличивать l . Как показано в [4], при уменьшении диаметра сердцевинки волокна площадь светового пучка стремится к своему минимальному значению λ^2 , где λ — длина волны света. Для оценок в дальнейшем будем считать, что площадь S равна 10^{-8} см². Максимальная длина l определяется затуханием света в волокне и может достигать нескольких километров.

Для волокна, изготовленного из кварцевого стекла, коэффициент ВКР-усиления $g_{\text{ВКР}} = 2 \cdot 10^{-11}$ см/Вт [5], и при площади сечения пучка 10^{-8} см² и длине волокна 1 км необходимая мощность излучения накачки составит всего $5 \cdot 10^{-2}$ Вт. В капиллярных волокнах, заполненных жидкостью, коэффициент $g_{\text{ВКР}}$ может быть на 2—3 порядка больше (так, для сероуглерода $g_{\text{ВКР}} = 24 \cdot 10^{-9}$ см/Вт [6, с. 378]). Однако затухание света в капиллярных волокнах много больше, чем в стеклянных, и это ограничивает возможные длины несколькими метрами. Использование ВРМБ вместо ВКР позволяет уменьшить требуемые мощности накачки. Для кварцевого стекла коэффициент ВРМБ усиления $g_{\text{ВРМБ}} = 5 \cdot 10^{-9}$ см/Вт [7], и при указанных выше параметрах волокна необходимая мощность накачки составит всего $2 \cdot 10^{-4}$ Вт.

Рассмотрим причины, ограничивающие производительность ВКР и ВРМБ логических элементов. Производительность представляет собой частоту следования импульсов в информационном сигнале и определяется длительностью импульса и интервалом между соседними импульсами. Существует еще время, затрачиваемое на выполнение операции. Как следует из принципа работы логического элемента, оно равно времени пробега света по волокну и может быть достаточно велико. Но это время определяет не производительность элемента, а только задержку выходного сигнала от входного.

При использовании явления ВРМБ информационный импульс и импульс накачки движутся навстречу друг другу. Если в волокне распространяется несколько импульсов накачки, движущийся навстречу им информационный импульс провзаимодействует с каждым из импульсов накачки. Однако по смыслу работы логического элемента каждый информационный импульс должен провзаимодействовать только с одним импульсом накачки. Это условие приводит к требованию, чтобы интервал между импульсами был не меньше времени пробега света по волокну, и при скважности 2 получаем связь между максимально допустимой длиной волокна l и длительностью используемых импульсов t_u :

$$l = t_u c/n, \quad (3)$$

где c — скорость света; n — коэффициент преломления сердцевинки волокна. Из (2) и (3) следует оценка для энергии импульса накачки

$$W_L = P_L t_u = 30(S/g_{\text{ВРМБ}})(n/c). \quad (4)$$

В (4) учтено, что при длительности импульса $t_u = ln/c$ в процессе усиления фактически участвует только половина длины волокна, поэтому вместо коэффициента 15 появился коэффициент 30. Из (4) вытекает, что при использовании волокна из кварцевого стекла с диаметром сердцевинки 1 мкм энергия накачки, необходимая на одну операцию, не зависит от длительности импульса и составляет величину порядка 10^{-9} Дж.

Существует ограничение на производительность, связанное с временами релаксации гиперзвуковых колебаний, возникающих при ВРМБ. При длительности импульса, сравнимой с временами релаксации гиперзвуковых колебаний, процесс ВРМБ становится нестационарным, что

приводит к увеличению необходимых мощностей накачки. Кроме того, при временах релаксации, больших, чем интервал между импульсами, гиперзвуковая волна от предыдущего импульса влияет на последующий, что может оказаться недопустимым. Для оценок будем считать, что предельная производительность элемента определяется выражением

$$f_{\text{пр}} = 1/\tau_{\text{зв}}, \quad (5)$$

где $\tau_{\text{зв}}$ — время релаксации гиперзвуковой волны. Для кварцевого стекла в зависимости от длины волны накачки ($\tau_{\text{зв}} \sim \lambda^2$) время релаксации лежит в пределах 1—10 нс для видимого и ближнего ИК-диапазонов и производительность может достигать 10^8 — 10^9 Гц.

При использовании ВКР стоксов импульс и импульс накачки движутся попутно, поэтому в волокне одновременно имеют возможность находиться много импульсов. Тем не менее и в этом случае имеет место связь максимально допустимой длины волокна и длительности импульса. Происходит это из-за того, что скорости распространения импульса накачки и стоксового импульса по волокну различны и при большой длине волокна могут пространственно разделиться и перестать взаимодействовать [8]. Оценим ограничения, накладываемые дисперсией групповых скоростей.

Разность времен пробега стоксового импульса и импульса накачки по волокну можно определить следующим образом:

$$\Delta t = \gamma l \Delta \lambda, \quad (6)$$

где l — длина волокна; $\Delta \lambda$ — разность длин волн стоксова импульса и импульса накачки; γ — коэффициент, характеризующий дисперсию групповых скоростей. Будем считать, что элемент работоспособен до тех пор, пока Δt меньше длительности импульса. Таким образом, (6) дает ограничение на длину волокна

$$l \leq t_u / \gamma \Delta \lambda. \quad (7)$$

Из (2) и (7) следует оценка для энергии импульса накачки при ВКР:

$$W_L = P_L t_u = 15 S \gamma \Delta \lambda / g_{\text{ВКР}}. \quad (8)$$

В (8) так же, как и в (3), имеется в виду, что длина волокна выбрана максимально допустимой для данного быстрогодействия элемента. В волокне из кварцевого стекла при длине волны накачки $\lambda_L = 1,42$ мкм $\gamma = 3,1 \cdot 10^{-16}$ с/см·нм [9]; результаты [5], пересчитанные к длине волны 1,42 мкм, дают $g_{\text{ВКР}} = 10^{-11}$ см/Вт, $\Delta \lambda = 28$ нм. При сечении светового пучка $S = 10^{-8}$ см² имеем для энергии импульса накачки величину 10^{-10} Дж.

Для сероуглерода при длине волны накачки $\lambda = 532$ нм величина γ , полученная из данных по коэффициенту преломления [10], равна $0,7 \cdot 10^{-14}$ с/см·нм, $\Delta \lambda = 18$ нм, $g_{\text{ВКР}} = 24 \cdot 10^{-9}$ см/Вт [6]. Для волокна в виде капилляра, заполненного сероуглеродом, энергия накачки на операцию составит 10^{-12} Дж.

Так же как и в случае ВРМБ, при уменьшении длительности импульса процесс ВКР перейдет к нестационарному режиму, что сопровождается увеличением пороговой мощности и ухудшением эффективности преобразования накачки в стоксову волну.

Время релаксации молекулярных колебаний τ связано с шириной спектра комбинационного рассеяния соотношением

$$\tau = 1/2\Gamma, \quad (9)$$

где 2Γ — ширина на полувысоте спектра спонтанного комбинационного рассеяния. Если, как и в случае ВРМБ, находить максимальную производительность из соотношения (5), то

$$f_{\text{пр}} = 2\Gamma. \quad (10)$$

Тип элементов	Экспериментальные значения энергии переключения, Дж	Теоретические минимальные значения энергии переключения, Дж	Производительность, Гц
Бистабильные элементы			
GaAs	$8 \cdot 10^{-9}$	10^{-12}	$2,5 \cdot 10^8$
InSb	$5 \cdot 10^{-9}$	10^{-14}	$2 \cdot 10^7$
Волоконно-оптические элементы			
ВКР в стеклянном волокне		$3 \cdot 10^{-11}$	10^{12}
ВКР в капиллярном волокне		$2 \cdot 10^{-13}$	10^{10}
ВРМБ в стеклянном волокне		10^{-10}	$10^8 - 10^9$

Здесь $f_{пр}$ — максимальная производительность элемента, определяемая временем релаксации молекулярных колебаний среды.

Для кварцевого стекла $2\Gamma \approx 200 \text{ см}^{-1}$ [5] или $6 \cdot 10^{12}$ Гц, для CS_2 ширина спектра составляет величину $0,5 \text{ см}^{-1}$ [6, 11] или $1,5 \cdot 10^{10}$ Гц.

Сравним полученные оценки энергий переключения и производительности волоконно-оптических логических элементов и элементов на основе GaAs и InSb, которые на сегодняшний день считаются наиболее перспективными для создания полностью оптических логических устройств. В таблице приведены результаты наших оценок для волоконно-оптических логических элементов и данные по бистабильным устройствам, взятые в [1]. Из таблицы видно, что оценки энергий для стеклянных волокон несколько хуже теоретических для бистабильных элементов, но лучше экспериментально достигнутых. Волоконные элементы могут обладать существенно большей производительностью, особенно элементы, построенные на принципе ВКР. Что касается элемента из капиллярного волокна, заполненного сероуглеродом, то его энергия может быть даже меньше, чем для бистабильного элемента на основе GaAs. Кроме того, надо учесть, что элемент на основе InSb работает с длинами волн в области 10 мкм и поэтому не может использоваться совместно с волоконными линиями связи.

Определенные преимущества волоконные оптические логические элементы по сравнению с бистабильными полупроводниковыми могут иметь также с точки зрения диссипации в них энергии излучения. Важность этой проблемы легко понять из следующих простых оценок. Пусть на бистабильный элемент поступает 10^8 световых импульсов в секунду, каждая из них имеет теоретически минимальную энергию для GaAs бистабильных элементов — 10^{-12} Дж. Средняя мощность излучения будет при этом составлять 10^{-4} Вт. При площади светового пятна λ^2 (оценка 10^{-12} Дж/переключение получена именно при этом условии) плотность мощности, рассеянной на элементе, составит $\sim 10^4$ Вт/см². В отличие от полупроводниковых бистабильных устройств в волокне в процессе вынужденного рассеяния лишь небольшая часть излучения накачки переходит в тепло, $10^{-1} - 10^{-2}$ при ВКР и 10^{-5} при ВРМБ. И, кроме того, эта энергия рассеивается в волокне на достаточно большой длине, что также существенно уменьшает проблемы, связанные с нагреванием.

Таким образом, видим, что логические элементы на основе процессов вынужденного рассеяния в оптическом волокне могут обладать параметрами, позволяющими рассчитывать на их эффективное использование в системах цифровой оптической обработки информации и во многом превосходящими параметры бистабильных устройств на основе полупроводников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Smith P. W. On the physical limits of digital optical switching and logic elements.— The Bell Syst. Techn. J., 1982, v. 61, N 8, p. 1975—1993.
2. Грасюк А. З. Комбинационные лазеры.— Квант. электроника, 1974, т. 1, № 3, с. 485—509.
3. Старунов В. С., Фабелинский И. Л. Вынужденное рассеяние Манделъштата — Бриллюэна и вынужденное энтропийное (температурное) рассеяние света.— УФН, 1969, т. 98, № 3, с. 441—491.
4. Kogelnik H. Limits in integrated optics.— Proc. IEEE, 1984, v. 69, p. 232—238.
5. Stolen R. H., Ippen E. P. Raman gain in glass optical waveguides.— Appl. Phys. Lett., 1973, v. 22, N 6, p. 276—278.
6. Ярив А. Квантовая электроника.— М.: Сов. радио, 1980.
7. Ippen E. P., Stolen R. H. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers.— Appl. Phys. Lett., 1972, v. 21, N 11, p. 539—544.
8. Кузин Е. А. Пороговые значения мощности накачки при вынужденном комбинационном рассеянии света в оптическом волокне.— Письма в ЖТФ, 1981, т. 7, № 7, с. 410—413.
9. Lin Chinlon, Stolen R. H., Cohen L. G. A tunable 1.4 μm fiber Raman oscillator.— Appl. Phys. Lett., 1977, v. 31, N 2, p. 97—99.
10. Сборник физических констант/Под ред. А. Г. Дорфмана и С. Э. Фриша.— М., 1937.
11. Smith R. G. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering.— Appl. Opt., 1972, v. 11, N 11, p. 2489—2494.

Поступила в редакцию 23 октября 1985 г.

УДК 534.86

В. А. ТАРКОВ

(Новосибирск)

ФОРМИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ С МАЛОЙ РАСХОДИМОСТЬЮ В TeO_2

Монокристаллы парателлуриата (TeO_2) достаточно широко используются в акустооптике для создания оптических перестраиваемых фильтров [1], дефлекторов, позволяющих производить отклонение как параллельных световых пучков [2], так и изображений [3] и т. п. Это обусловлено тем, что парателлурит обладает высоким значением коэффициента акустооптического качества при дифракции света на медленной сдвиговой акустической волне [4] и возможностями выбора различных геометрий акустооптического взаимодействия. Однако сильная анизотропия акустических свойств монокристаллов приводит к тому, что поток энергии акустического пучка отклоняется от направления волнового вектора и, кроме того, величина пространственной расходимости значительно превышает дифракционный предел расходимости [5, 6]. Указанные особенности вызывают также и пространственную неоднородность акустооптического взаимодействия в TeO_2 .

Цель настоящей работы состоит в нахождении условий формирования акустических пучков с низкой пространственной расходимостью в монокристаллах парателлуриата.

Рассмотрим распространение медленной сдвиговой волны. Известно, что для плоской волны, волновой вектор которой направлен под углом α в плоскости (110) и β в плоскости (001), вследствие анизотропии акустических свойств поток энергии волны отклоняется от направления ее волнового вектора в плоскости (110) на угол φ , в плоскости (001) на