

ПЬЕЗООПТИЧЕСКИЕ СКАНИРУЮЩИЕ КОММУТАТОРЫ

Рябцов А.В.

Аннотация: В статье рассмотрены оптоволоконные коммутационные устройства на основе трубчатых и монолитных пьезоэлектрических актуаторов.

Ключевые слова: Волоконная оптика – Коммутационные устройства – Пьезоэлектрические актуаторы.

Ключевые слова классификации ACM: H.4.3 Communications Applications.

Введение

В настоящее время в мире идет активная борьба за лидерство в информационной сфере. Особое внимание уделяется полностью оптическим сетям, как наиболее перспективным среди прочих информационно-коммуникационных технологий с точки зрения увеличения объема и скорости передачи информации [Скляров, 2004, Гринфильд, 2002]. Основные усилия большинства ведущих производителей сетевого оборудования направлены сейчас на создание простых и эффективных устройств для коммутации оптических сигналов. На сегодняшний день в мире разработано и используется большое число оптических коммутаторов, основанных на различных физических принципах, но, ни один из них не является лидирующим в данной области в силу имеющихся схемных ограничений или конструктивных особенностей [Гайворонская, 2011, Гайворонская, 2010]. Одним из перспективных направлений является разработка пространственных оптических коммутационных устройств на основе микро-электромеханических систем (MEMS) с различного вида актуаторами - устройствами, осуществляющими микроперемещения подвижных частей оптического коммутатора [Little, 2001, Dooyoung, 2004].

Сканирующие пьезоактуаторы

В связи с этим представляет интерес применение сканирующих пьезоэлектрических элементов в качестве актуаторов оптических переключателей. Так, например, хорошо отработанная технология производства трубчатых пьезоэлектрических элементов (ТПЭ), широко применявшихся в недалеком прошлом в качестве чувствительных элементов звукоснимателей [Хазе, 1975], и с успехом применяющаяся сейчас в

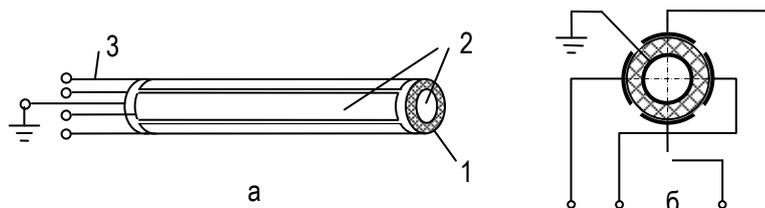


Рисунок 1. Трубчатый пьезоэлемент (а) и схема подключения его электродов (б):

1- трубчатый пьезоэлектрический элемент, 2 - плоские электроды, 3 - выводы

электронной микроскопии [Неволин, 1996], может быть использована в новом качестве в многоканальных оптических коммутаторах. Основным достоинством ТПЭ (рис. 1) является возможность получения изгибных пространственных деформаций в двух координатах при относительно небольших управляющих напряжениях. ТПЭ представляют собой тонкостенные полые цилиндры 1 из титаната бария или цирконата титаната свинца, на внешнюю и внутреннюю поверхности которых методом напыления нанесены электроды 2 с проволочными или ленточными выводами 3 для подключения ТПЭ к схеме управления. Электрод на внутренней поверхности ТПЭ обычно выполняется сплошным, а внешний электрод продольно разделен на четыре части по-квадрантно, как показано на рисунке 1.

Под действием напряжения, приложенного к электродам, пьезоэлемент изменяет свои геометрические размеры. Механическое напряжение, возникающее в ТПЭ вследствие обратного пьезоэффекта может быть описано в общем виде уравнением [Гайворонская, 2011]:

$$u_{ij} = d_{ijk} \cdot E_k \quad (1)$$

где u_{ij} – тензор деформаций, E_k – компоненты электрического поля, d_{ijk} – компоненты тензора пьезоэлектрических коэффициентов. При этом отличными от нуля являются только три коэффициента: d_{33} , d_{31} и d_{15} , характеризующие продольные, поперечные и сдвиговые деформации. Поперечными и сдвиговыми деформациями в ТПЭ в данном случае можно пренебречь. Тогда величина продольной деформации в ТПЭ под действием электрического поля остаточной поляризации может быть представлена в виде:

$$\delta = d_{33} \cdot l_1 \cdot E_{ocm} \quad (2)$$

где l_1 – длина ТПЭ в недеформированном состоянии, E_{ocm} – напряженность поля остаточной поляризации пьезоматериала.

Тогда абсолютное значение продольной деформации ТПЭ может быть представлено в виде:

$$\Delta = d_{33} \cdot \frac{l_1}{l_2} \cdot U_{упр} \quad (3)$$

где l_2 – толщина стенки трубки, $U_{упр}$ – приложенное напряжение управления. Очевидно, что при одном и том же напряжении $U_{упр}$ удлинение трубки будет тем больше, чем больше ее длина и чем меньше толщина ее стенки. Так как вектор поля остаточной поляризации имеет в ТПЭ радиальный характер, то механические деформации на участках, находящихся под диаметрально противоположными электродами, будут иметь противоположные знаки. В этом случае деформация ТПЭ приобретает изгибный характер. Величина углового отклонения конца ТПЭ от продольной оси определяется целым рядом факторов, не всегда поддающихся аналитическому описанию, среди которых следует упомянуть толщину, материал и способ нанесения электродов, жесткость закрепления ТПЭ в корпусе и т.д. В большинстве практических применений ТПЭ величина их изгибного отклонения от продольной оси при вышеуказанных размерах не превышает 3...5% от линейного размера при напряженностях приложенного электрического поля $E \leq 5 \cdot 10^4$ В/м.

Для использования ТПЭ в качестве мультиплексирующего оптического коммутатора один из концов такого трубчатого пьезоэлемента 1 должен быть консольно закреплен в неподвижном основании 2, как показано на рисунке 2.

Второй конец остается свободным и направляется в сторону пучка выходных световодов, торцы которых, снабженные коллимирующими линзами (на рисунке не показаны), образуют двухкоординатную матрицу 3.

Так как ТПЭ является полым стержнем, то через его центральную ось может быть пропущено одномодовое оптическое волокно 4 без защитных покровов, по которому в коммутатор будут поступать входные оптические сигналы.

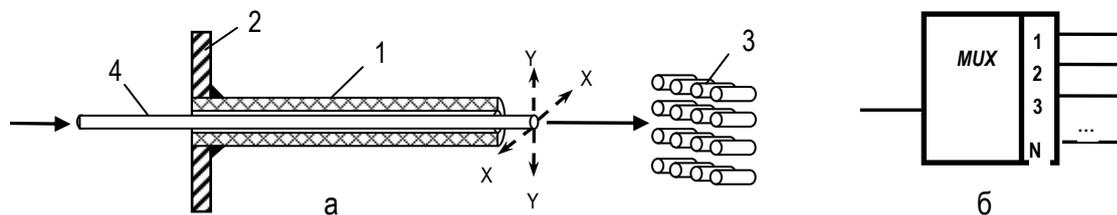


Рисунок 2. Конструкция оптического мультиплексора на основе ТПЭ (а) и его эквивалентная функциональная схема (б)

Подавая одновременно два управляющих напряжения $U_{упр}^X$ и $U_{упр}^Y$ на противоположные пары электродов ТПЭ, можно изгибать пьезоэлемент в двух координатах, осуществляя сканирование торца входного световода в плоскости выходных портов коммутатора, как показано на рисунке 2. Тем самым реализуется возможность пространственной коммутации оптического сигнала путем направления его с помощью ТПЭ в заданный порт. Очевидно, что данная конструкция на основе трубчатого пьезоэлектрического актуатора выполняет функцию мультиплексирующего (1xN) коммутатора оптических сигналов. Инvertируя оптические входы и выходы можно получить демультиплексирующий оптический коммутатор (Nx1) без изменения конструкции устройства.

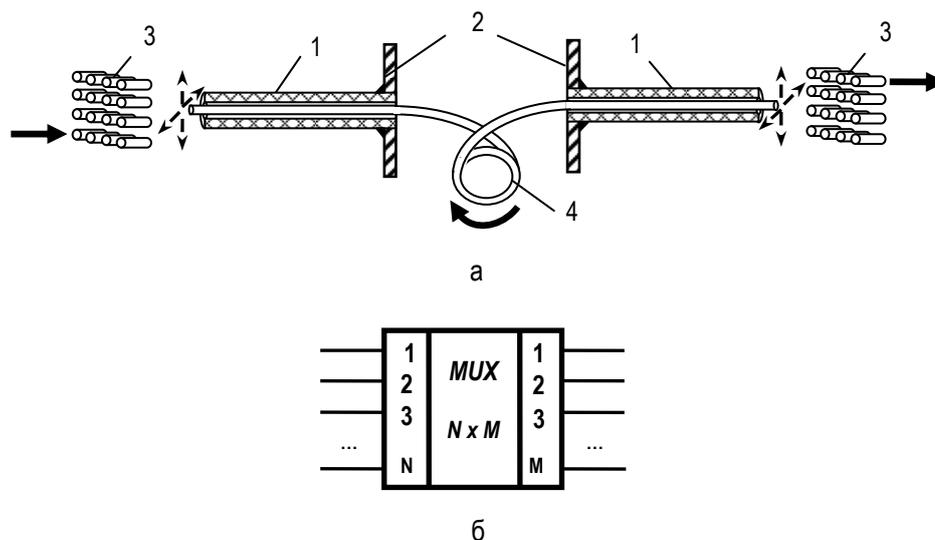


Рисунок 3. Конструкция полнофункционального оптоволоконного коммутатора на основе двух ТПЭ (а) и его эквивалентная функциональная схема (б)

Дальнейшее развитие предложенной конструкции позволяет реализовать полнофункциональный сканирующий оптический коммутатор (NxM), позволяющий обеспечить любой заданный алгоритм коммутации, на основе двух ТПЭ 1, закрепленных в основаниях 2, с отрезком световода 4, выполняющим функцию подвижного оптического патч-корда, как показано на рисунке 3.

Однако очевидным недостатком таких сборных конструкций является технологическая сложность в массовом производстве, обусловленная необходимостью обеспечения общей надежности и стабильности механических характеристик устройства в целом.

Гораздо эффективнее использовать в качестве сканирующего актуатора для оптического коммутатора не сборное изделие на основе ТПЭ, а монолитный пьезоэлемент из оптически прозрачного материала. Применяемые в технике кристаллы оптически чистого естественного кварца обладают великолепной прозрачностью, но весьма дороги. Поэтому, в настоящее время в электрооптических устройствах получили распространение такие искусственные прозрачные пьезоматериалы, как ниобат лития. Используя этот материал в качестве пьезоэлектрической основы актуатора можно получить новый тип пьезооптического сканирующего коммутатора, как предложено авторами в работе [Абрамов, 1984].

Основой такого монолитного сканирующего коммутатора является цилиндрический стержень 1 из прозрачного пьезоэлектрического материала, центрально закрепленный в неподвижном основании 2, как показано на рисунке 4.

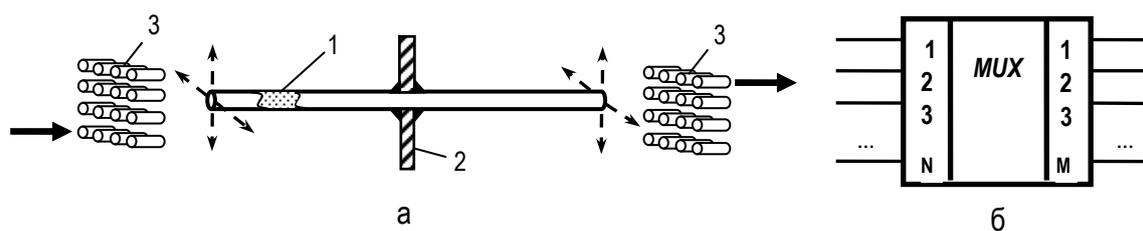


Рисунок 4. Конструкция полнофункционального оптоволоконного коммутатора на основе

сканирующего пьезоэлемента из ниобата лития (а) и его эквивалентная функциональная схема (б)

Нанеся электроды на внешнюю поверхность прозрачного пьезоэлемента, и прикладывая к ним два управляющих напряжения $U_{упр}^X$ и $U_{упр}^Y$, можно осуществлять функцию пространственной оптической коммутации, аналогично устройствам на рисунках 2 и 3.

Заключение

Основными достоинствами сканирующего актуатора, выполненного из монолитного прозрачного пьезокристалла, являются простота, технологичность и надежность конструкции. Кроме того улучшаются точность и повторяемость позиционирования, временная и температурная стабильность параметров, уменьшаются значения гистерезиса и дрейфа вследствие остаточных пластических деформаций пьезоэлемента.

Уменьшение температурных флуктуаций угла отклонения актуатора обеспечивается выбором материалов с минимально возможным температурным коэффициентом линейного расширения, который, в частности для пьезокерамики ЦТС-19, составляет $6 \cdot 10^{-6} \dots 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ [Джагулов, 1994]. Можно предложить также термостатирование всей конструкции коммутатора. Кроме того термостабильность актуатора можно повысить путем введения в конструкцию сканера или его держателя элементов, измеряющих и компенсирующих тепловые деформации, например как предложено авторами в работе [Джагулов Р.Г., 1991].

Быстродействие коммутатора в значительной мере зависит от фазочастотных характеристик актуатора. Консольное закрепление сканирующего пьезоэлемента предполагает наличие в характеристике резонансных пиков, что требует снижения рабочей частоты переключения коммутатора ниже частоты основного резонанса. Таким образом, быстродействие коммутатора будет определяться в основном линейными размерами актуатора и ограничиваться его нижней резонансной частотой.

Размеры актуатора определяют также долговременную стабильность параметров коммутатора. При больших (свыше $5 \cdot 10^4 \text{ В/м}$) напряженностях приложенного электрического поля в пьезокерамике

появляются признаки переполаризации, что приводит к постепенному ухудшению точности позиционирования сканера из-за снижения коэффициента пьезочувствительности материала [Рябцов, 1994].

Простое снижение величины управляющего напряжения в данном случае неприемлемо, так как при этом уменьшается диапазон сканирования по обеим координатам, а, следовательно, и максимально достижимая размерность оптического коммутатора.

Решение этой проблемы, по мнению авторов, лежит в использовании сканирующих актуаторов, выполненных из недавно созданных композитных материалов, в частности, из неполярных полимеров на основе диблоков полистирена, в которых обратный пьезоэффект проявляется в десятки раз сильнее, чем во всех известных естественных пьезокристаллах и искусственных пьезокерамиках [Overton, 2011]. Это позволит в десятки раз снизить размеры актуаторов при сохранении прежних величин его угловых отклонений, тем самым на порядок увеличив быстродействие оптических коммутаторов.

Таким образом, сканирующие пьезоэлектрические актуаторы можно с успехом применить для создания надежных и долговечных оптических коммутационных устройств в полностью оптических сетях.

Библиография

- [Dooyoung, 2004] Dooyoung H. et al. Low-Voltage, Large-Scan Angle MEMS Analog Micromirror Arrays with Hidden Vertical Comb-Drive Actuators // Journal of microelectromechanical systems, vol. 13. - №. 2. - 2004
- [Little, 2001] M. Little, B. Jamison. All-optical MEMS continue to evolve // Solus Micro Technologies. - July. - 2001 - Интернет-ресурс: <http://www.lightwaveonline.com/articles/print/volume-18/issue-8/features/all-optical-mems-continue-to-evolve-53471737.html>.
- [Overton, 2011] Gail Overton. New polymer from ORNL has 10 times the piezoelectric effect of crystals and ceramics. - Laser Focus World. - November 2011 - Volume 47 - Issue 11.
- [Абрамов, 1984] Абрамов Г. А., Джагулов Р.Г., Ковригин В.А., Рябцов А.В., Якубов Р.А. Пьезооптическое сканирующее устройство. - Авторское свидетельство СССР № 1136636.- ДСП.- Зарегистрировано в Госреестре изобретений 22.09.84.
- [Гайворонская, 2010] Гайворонская Г.С., Рябцов А.В. Методы и средства коммутации оптических сигналов в информационных сетях. Холодильна техніка і технологія. - Одеса: ОГАХ. - 2010. - №2 (124).
- [Гайворонская, 2011] Гайворонская Г.С., Рябцов А.В. Особенности применения оптических коммутаторов в современных информационных сетях // Applicable Information Models. - Sofia: ITNEA, 2011. - № 22. - Р. 169-181.
- [Гринфильд, 2002] Гринфильд Д. Оптические сети. - К. - Тид "ДС". - 2002. - 256 с.
- [Джагулов, 1994] Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: Справочник / Р.Г. Джагулов, А.А. Ерофеев. - СПб. - Политехника. - 1994.
- [Неволин, 1996] Неволин В.К. Основы туннельно-зондовой нанотехнологии. - М.: МГИЭТ (ТУ). - 1996.
- [Рябцов, 1994] Джагулов Р.Г., Рябцов А.В. Устройство для измерения перемещений.- Авторское свидетельство СССР № 1645807. - Оpubл.30.04.91. - БИ № 16.
- [Скляр, 2004] Скляр О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. - М. - Солон-Пресс. - 2004. — 272с.
- [Хазе, 1975] Хаазе Г.И. Современные электропроигрыватели. - М. - Энергия. - 1975.

Информация об авторах



Рябцов Александр Васильевич – Факультет Информационных технологий и кибербезопасности ОНАПТ, к.т.н., доцент кафедры информационно-коммуникационных технологий; Украина, Одесса, 65026, ул. Дворянская, 1/3; тел. (048)-720-91-48; e-mail: ryabtsov@usa.com
 Главные области научного исследования: информационные системы, коммутационная техника, оптические технологии, полностью оптические коммутаторы.