

МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ОПТОВОЛОКОННЫЕ НЕЙРОИНТЕРФЕЙСЫ

Экономический кризис подталкивает мир к очередной технологической революции. Какой она будет на этот раз, к каким кардинальным изменениям жизни приведет нанотехнологии. Об одном из перспективных направлений nanoиндустрии размышляет директор научно-технического центра "Интрофизика" (г.Рыбинск).

ЗАЧЕМ ИМПЛАНТИРОВАТЬ МОБИЛЬНИК?

В прошедшем веке большинство технических достижений было связано с передачей и обработкой информации. Возник глобальный Интернет, в котором с использованием компьютерной сети происходит усиление интеллектуального потенциала миллиардов людей.

В будущем следует ожидать дальнейшего развития этого процесса, которое, с высокой долей вероятности, проявится в виде киборгизации людей. Проблема широко обсуждается в СМИ. Не отстает и Голливуд. В фильме "Терминатор-2" у киборга имелась микросхема, которая сама восстанавливала разрушенные в его теле соединения. А в фантастическом триллере "Матрица" мы уже видим изобретение на порядок страшнее. Демонстрируемые ужасы демонизируют киборгизацию, однако, как считают многие эксперты, с развитием общества киборгизация станет важной составляющей его существования.

В самом деле, клавиатурные интерфейсы уже устарели, поскольку они замедляют скорость ввода и вывода информации. В то же время естественные интерфейсы – речь, слух и зрение – обладают куда большей скоростью и намного удобнее. Мобильный телефон стал настолько необходим, что его потеря вводит людей в стрессовое состояние. Ведь утрачивается не просто дорогая вещь – теряются связи и информация. Вполне объяснимо стремление сделать такое изделие существенно меньшим и более удобным.

Рано или поздно решение этих задач пойдет по пути имплантации изделия в организм человека. В черепе человека имеется достаточно много пористых костных тканей и полостей, идеально подходящих для размещения имплантируемой электроники. (Автор рассматривает техническую сторону вопроса, не обсуждая морально-этические и физиологические проблемы – Ред.). Имплантированный мобильный телефон никогда не потеряется, его не надо будет заряжать, менять, доставать из карманов, когда заняты руки. Не нужно будет за-

тыкать уши в шумной обстановке и искать очки, чтобы ознакомиться с поступившей информацией или переслать ее адресату. Таким образом, имплантированный телефон не только позволит получить множество благ и удобств, но, прежде всего, обеспечит оперативный доступ к информации.

Можно отметить, что имплантированная электроника способна обеспечить ее обладателю массу преимуществ. Например, процессы обучения сократятся на порядок. Облегчится жизнь школьников, студентов и преподавателей, водителей и бизнесменов. Качественно ускорятся и облегчатся процессы коммуникации и получения информации.

Главным преимуществом киборгизации станет возможность управления техникой силой мысли – все электронные устройства станут узнавать "хозяина" и будут немедленно исполнять его желания. Качество жизни кардинально изменится. Вся автоматика вокруг, а в будущем ее, несомненно, будет много, станет заботиться о своем "хозяине" и его здоровье. Будет развлекать и помогать ему.

Не будем рассуждать о виртуальных мирах, в которых сможет жить и работать человек, имеющий имплантат. Это произойдет потом, когда будут созданы нейроинтерфейсы, способные с высоким качеством передавать в мозг изображения и звук. В ближайшие же 5–7 лет можно ожидать появления первых имплантируемых средств для спецслужб, содержащих звуковой канал, средства управления и источник питания, использующий ресурсы организма для производства электричества.

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ НЕЙРОИНТЕРФЕЙСОВ

Обсуждая затронутую проблему, следует напомнить, что нервные импульсы передаются по очень сложным биологическим конструкциям. Нервы состоят из нервных волокон, уложенных в пучки как в электрическом кабеле, но в отличие от последнего в каждом пучке уложены десятки и сотни тысяч нервных волокон. Например, в берцовом нерве насчитывает-

ся более 50 тысяч нервных волокон, а в спинном мозге (всяма условно) – до десяти миллионов!

Слуховой или улитковый нерв (рис.1) содержит около 300 тысяч нервных волокон, спирально исходящих из улитки внутреннего уха. У многих людей повреждения этого нерва приводят к глухоте. Для того чтобы вернуть слух, используют кохлеарные имплантаты. Исследования в области кохлеарной имплантации быстро переросли в доходный бизнес, приносящий владельцам десятки миллионов долларов ежегодно. Лидирует в нем австралийская фирма COCHLEAR. Контактная часть ее имплантатов вкладывается в полость улитки и содержит 22 металлические площадки, на которые поступает звуковой сигнал. Кохлеарный имплантат позволяет вернуть слух совершенно глухим людям. Но слышат они совсем не так, как люди с нормальным слухом. Некоторое время пациенты ощущают лишь глухие звукоподобные ощущения, из которых мозг после тренировки учится распознавать реальные звуки и человеческую речь.

Исследованиями установлено, что нейроны весьма чувствительны к поляризационным токам. Используя эффект поляризации, с ними можно установить двухстороннюю связь. Например, электрическое поле поляризует мембрану нейрона, заставляя открываться и закрываться ионные каналы, управляемые чувствительными к электрическому полю белками.

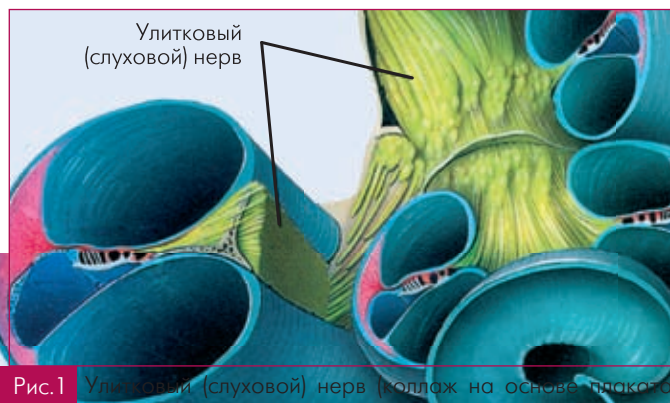


Рис.1 Улитковый (слуховой) нерв (коллаж на основе рисунка "Анатомическое строение внутреннего уха" Crippincott Williams&Wilkins, USA)

Этот эффект обнаружен в 1999 году в Институте им. Макса Планка. Нейрон крысы диаметром около 20 мкм размещался на матрице транзисторов, покрытых слоем диоксида кремния. Затем матрица с нейроном помещалась в раствор электролита. Диоксид кремния оказался хорошо совместимым с живой клеткой – в течение трех дней нейрон жил на поверхности чипа и взаимодействовал с транзисторами [1–3].

За счет поляризационных токов в физиологических жидкостях нейроструктур вблизи проводников с током может возникать беспорядочное возбуждение нейронов. Поэтому использование проводников тока для создания высококачественных

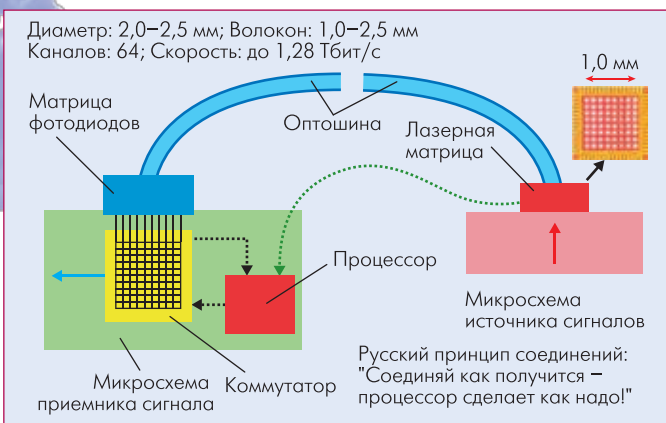


Рис.2 "Умное" соединение

нейроинтерфейсов нецелесообразно. Решить проблему передачи информации в глубинные нейроструктуры мозга можно с помощью оптоволокну, поскольку при движении по нему света поляризационные наводки не возникают. Оптоволоконные датчики известны, однако, чтобы можно было работать с единичными нейронами, их размеры должны быть меньше 10 мкм.

Еще одна проблема нейроинтерфейсов – подключение к массивам элементов, насчитывающим десятки и сотни тысяч объектов – нейронов. Необходимо было разработать принцип соединения, позволяющий обеспечить такое подключение.

УМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

В 2004 году в НТЦ "Интрофизика" разработана и запатентована технология ИМКС – интеллектуальных многоконтактных соединений (патент РФ №2270493). Эти соединения можно назвать "умными" или *смартлинками* (англ. smartlink).

Создание новых способов соединений – достаточно редкое явление в технике, а в электронике особенно. Каждый новый способ приводит к возникновению большой группы новых устройств, в которых используется такой способ. Технология ИМКС – яркий тому пример. На базе "умных" соединений становится возможным создание электронной техники, обладающей свойствами регенеративности и полиморфности.

В технологии ИМКС сложнейшие устройства можно соединять произвольным образом – "как получится". Процессор, обслуживающий соединение, делает все "как надо".

Смартлинк (рис.2) состоит из передатчика, оптошины и приемника. "Умом" *смартлинка* является процессор, управляющий соединением с помощью коммутатора.

Основой передатчика является VCSEL-матрица, т.е. матрица вертикально излучающих лазеров. Отметим, что впер-

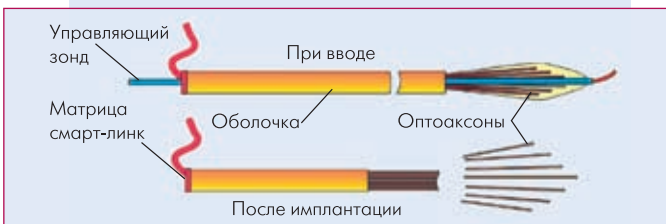


Рис.3 Устройство нейроинтерфейса

ле 1990-х годов в "Sandia National Laboratories" (США) (<http://www.sandia.gov/mstc/technologies/photonics/index.html>).

В качестве оптошины использовались оптоволоконные жгуты, подобные тем, которые применяются в эндоскопии. Обычно это тонкая трубка, содержащая несколько тысяч оптических волокон толщиной 10–50 мкм. Волокна часто делают из мягкого прозрачного пластика. Жгуты способны качественно передавать изображения. Приемником информации является матрица фотодиодов, подобная применяемым в скоростных кинокамерах, но с прямым доступом к каждому фотодиоду. Чтобы устройство работало, фотодиодов должно быть больше, чем лазеров в передающей матрице. Для современного уровня технологий, когда серийно выпускаются матрицы с 50-ю миллионами пикселей, это не много.

Работает *смартлинк* следующим образом. На входы VCSEL-матрицы, расположенной в микросхеме – источнике информации, подают электрические импульсы, которые модулируют излучение лазеров. Это излучение по оптошине поступает к FD-матрице, расположенной в приемнике информации, и преобразуется фотодиодами в поток электрических импульсов. Каждый фотодиод подключен к управляемому процессором коммутатору (рис.3).

Так как при соединении оптошину подключают к VCSEL-матрице передатчика и к FD-матрице приемника, совмещая каждый канал передатчика с каналом приемника, а совмещая лишь оптические области матриц и оптошины, на входы FD-матрицы сигналы от лазеров поступают неупорядоченно. Чтобы получить нужный порядок подключения шины, процессор в начале работы устройства соединяется с матрицей передатчика и по особой процедуре проводится "прозвон" и распознавание каналов. Разработано несколько процедур распознавания каналов, в том числе и таких, которые не требуют дополнительной физической связи процессора с передатчиком. С помощью коммутатора распознанные каналы связи переподключаются на выход коммутатора в заданном порядке. Неработоспособные и дублирующие каналы отключаются. Важно, что процедура распознавания каналов и переподключения производится однократно и никак не влияет на скорость передачи информации в дальнейшем.

Если работа *смартлинка* нарушается, то, восстанавливая работоспособность, он может проводить повторные распознавания каналов. Таким образом, в изделии реализуется свойство самовосстановления или регенерации. Если в процессе работы потребуется изменить порядок подключения шины, процессор с помощью коммутатора может это сделать очень быстро. Так реализуется свойство полиморфности.

Смартлинки решают проблему "тирании соединений" в микроэлектронике. Они позволяют выводить из кристаллов не 1000 металлических контактов как сейчас, а десятки тысяч высокоскоростных оптоволоконных линий связи. Естественно, скорость ввода-вывода информации возрастает на поряд-

ки. (Положительное решение №2007108476/09 от 21.08.2008 г. на выдачу патента РФ). По существу, это аналоги микросхем, которые показаны в "Терминаторе-2".

Обладая компактностью при большом числе каналов, *смартлинки* будут лидировать в скорости передачи информации. Используя 64-канальную VCSEL-матрицу с частотой модуляции лазеров до 20 Гбит/с, что уже достигнуто, можно в перспективе получить *смартлинку* с фантастической производительностью – 1,28 Тбит/с. Более того, *смартлинки* пригодны для автоматизированной сборки. Следовательно, открывается перспективное направление по созданию самоформирующихся суперкомпьютеров. Суперкомпьютеры-роботы будут оснащаться манипуляторами и строить сами себя из одинаковых плат, содержащих FPGA-чипы и порты для *смартлинков*. С помощью манипуляторов они будут вставлять платы в стойки, и соединять их *смартлинками* так, как им необходимо. Все процессы разработки и аппаратной реализации собственной архитектуры суперкомпьютер-робот будет производить сам, руководствуясь принципом оптимальности решения конкретной задачи. Человеческая рука не будет прикасаться к "железу". В случае поломки суперкомпьютер сам найдет и заменит неисправную плату.

Вследствие своих преимуществ технология ИМКС должна оказать значительное влияние на развитие суперкомпьютеров и дать сильнейший импульс развитию бикибернетики.

ОПТОВОЛОКОННЫЕ НЕЙРОИНТЕРФЕЙСЫ

Чтобы создать качественный нейроинтерфейс, необходимо научиться создавать как можно большее число соединений с нейронами нужных структур мозга. *Смартлинки* как нельзя лучше подходят для этих целей, поскольку позволяют соединять десятки и сотни тысяч каналов одним разъемом, который может иметь сечения, совпадающие с размерами нервов.

Нейроэлектронный оптоволоконный интерфейс для передачи информации в мозг (патент РФ №2327202) представляет собой пучок оптоаксонов, размещенных в общей оболочке. С одной стороны, он соединен с передающей матрицей *смартлинки*, а с другой, – покрыт лекарственным веществом, которое скрепляет пучок, придавая ему необходимые жесткость и эластичность. Для управления движением имплантата при операциях вживления может использоваться управляющий зонд, который впоследствии удаляется.

В процессе вживления лекарственное вещество имплантата расс



Рис.4 Соединение нейронов с оптоаксонами

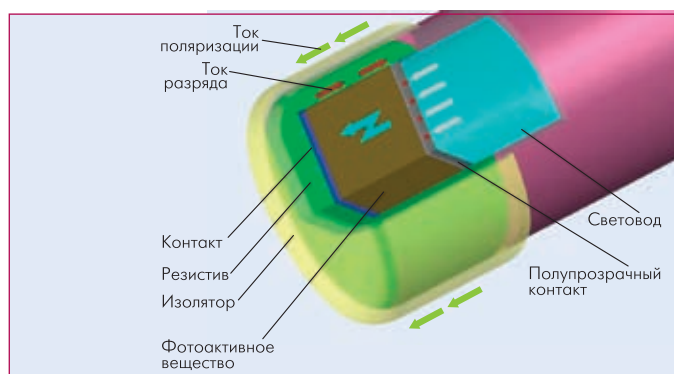


Рис.5 Устройство оптоаксона

структуре. При соответствующей тренировке нейроны будут образовывать с оптоаксонами синаптические связи так же, как это происходит при обучении людей новым навыкам (рис.4).

Несущим элементом оптоаксона служит световод диаметром 5–10 мкм (рис.5). На торце световода размещена наноструктура, содержащая миниатюрный фотоэлемент и разрядник. Фотоэлемент состоит из полупрозрачного электрода, слоя фотоактивного вещества и торцевого контакта. Вся наноструктура покрыта слоем резистивного вещества, а затем слоем диэлектрика толщиной 5–10 нм.

В качестве фотоактивного вещества могут использоваться поликристаллические пленки диселенида меди и индия (CuInSe_2) или теллурида кадмия (CdTe) [4–7]. Они обладают высокой способностью к поглощению света, что важно для создания фотопреобразователей нанометровых размеров. В качестве полупрозрачных электродов можно использовать проводящие оксидные пленки из SnO_2 , In_2O_3 или $\text{SnO}_2+\text{In}_2\text{O}_3$.

Для формирования пленки изолятора можно применить хорошо зарекомендовавший себя на практике диоксид кремния.

Работает оптоаксон следующим образом. Световой импульс от матрицы *смартлинки* проходит через световод и, попадая на слой фотоактивного вещества, преобразуется в электрический импульс, заряжая наноструктуру до определенного потенциала. Этот потенциал (переносной внеклеточный потенциал) через слои диэлектрика и электролита (межклеточной жидкости) действует на мембраны синапсов нейронов, поляризуя их.

Это заставляет открываться и закрываться ионные каналы, управляемые чувствительными к электрическому полю белками [1–3]. После окончания действия светового импульса наноструктура разряжается через область резистивного вещества. Внеклеточный переносной потенциал оптоаксона формируетс

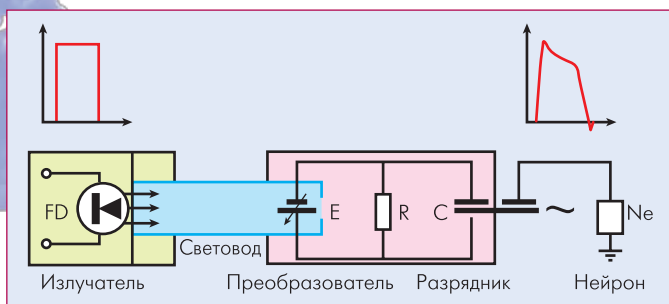


Рис.6 Электрическая схема оптоаксона

структуры, может быть использован при протезировании органов зрения и слуха, реабилитации парализованных больных, лечении серьезных психических заболеваний. Перспективно применение интерфейса для стимулирования первичных областей мозга, ответственных за производство гормонов, управляющих развитием организма. Создание эффективных нейроэлектронных интерфейсов позволит иметь мощнейшие средства усиления возможностей и способностей людей и животных.

Число оптоаксонов в нейроинтерфейсах при их совершенствовании должно приблизиться к количеству реальных нервных волокон, которые ими заменяются. Для высококачественного аудиоинтерфейса это сотни тысяч, а для видеоинтерфейса – миллионы оптоаксонов. Скорее всего, однако, эти цифры будут значительно меньше. Уже сейчас понятно, что можно не передавать весь объем информации. Достаточно адекватно активизировать области коры мозга, ответственные за распознавание и представление информационных образов.

Нейроинтерфейсы, способные передавать информацию из мозга в электронные структуры, устроены сложнее (патент РФ №2333526, <http://www.fips.ru/russite>). Их матрицы содержат светоизлучающие и светочувствительные ячейки, расположенные в шахматном порядке так, чтобы на каждый торец оптоволоконного световода попадало минимум по одной светоизлучающей и светочувствительной ячейке. Со стороны, обращенной к нейронной структуре, на конце каждого световода сформирована активная наноструктура, которая содержит жидкокристаллический модулятор, чувствительный к электрическому полю или микрогидроакустическим импульсам, возникающим при работе нейронов. По оптоволоконным световодам свет передается к нейронной структуре. С помощью активной наноструктуры, размещенной на конце каждого оптического волокна, луч в световоде модулируется в зависимости от активности ближайшего нейрона и отражается обратно в многоканальную матрицу, где в светочувствительной ячейке преобразуется в электрическую форму. Такой интерфейс может использоваться для управления протезами конечностей, реабилитации парализованных, управления технологическими средствами, транспортом, оружием, для прямого вывода из нейронных структур аудио-, зрительной, сенсорной, моторной и даже логической информации. Применение таких интерфейсов позволит также создать удобные и внешне невидимые технические средства связи и управления.

ЭПОХА ИМПЛАНТИРУЕМОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Разработка и внедрение имплантируемой электроники и есть то самое изобретение, которое должно улучшить жизнь и сравнимо по эффекту с телевидением и Интернетом.

С широким внедрением имплантируемой электроники в мире произойдет много революционных изменений.

Прежде всего, резко уменьшится число инвалидов – слепых, глухих, парализованных. Станет возможным лечение болезней, связанных с расстройством вестибулярного и гормонального аппаратов, что актуально для пожилых людей.

С помощью нейроинтерфейсов можно будет раскрыть тайны головного мозга и понять принципы его работы.

Имплантируемая электроника позволит создать средства управления с помощью мысли технологическим оборудованием, оружием и транспортом.

Нейроинтерфейсы объединяют уникальный феномен мышления людей с мощностью и скоростью электронных машин. Глобальные информационные сети постепенно превратятся в гигантские мыслящие биоэлектронные нейросети, обладающие могучим интеллектом, возможности которого сейчас трудно даже представить.

Нанотехнологии должны активно способствовать великому объединению биологического разума и электроники. Возможно, именно в этом заложен смысл эволюции Человечества как биологического вида, обладающего разумом. А значит, нации, лидирующие в этом процессе, будут доминировать в науке и в мировой политике.

Мировой рынок имплантируемой электроники только формируется. Но емкость его очень быстро вырастет до сотен миллиардов долларов. В России изобретены "умные" соединения и оптоволоконные интерфейсы. Это дает шанс нашей стране занять достойное место на рынке имплантируемой электроники.

Осталось решить главный вопрос. Кто в России поддержит это направление?

ЛИТЕРАТУРА

1. Max Planck Institute of Biochemistry in Martinsried, Department of Membrane and Neurophysics: <http://www.biochem.mpg.de/mnphys/>
2. Max Planck Institute of Biochemistry in Martinsried, Department of Membrane and Neurophysics: обзор "Neuroelectronic Interfacing" <http://www.biochem.mpg.de/mnphys/publications>
3. Свидиенко Ю. Мозг On Line: кое-что о нейрочипах 2005.05.27 <http://www.nanonewsnet.ru/>
4. Мейтин М. Пусть всегда будет солнце. Фотовольтаика: материалы, технологии, перспективы. – Электроника: Наука, Технологии, Бизнес, 2000, №6.
5. Rudiono, Shuichi Okazaki, Manabu Takeuchi. Effects of NO₂ on Photovoltaic Performance of Pthalocyanine Thin Film Solar Cells. – Thin Solid Films, 334(1998), p.187–191.
6. Yang J., Banerjee A., Lord K., Guha S. Correlation of Component Cells with High Efficiency Amorphous Silicon Alloy Triple-Junction Solar Cells and Modules. – Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion.
7. Guha S., Yang J., Banerjee A. Glat felter T. Amorphous Silicon Alloy Solar Cells for Space Application. – Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion.