

Near-field optical communication and optoelectronic data medium based on a new physical principle – an alternative to NFC and RFID

Vladimir Livshits
OKB SAPR JSC
Moscow, Russia
vl@okbsapr.ru

Abstract — A new physical principle of two-way short distance optical communication is proposed, according to which light is emitted only by the first of two communicating sides, interacting according to the "master-slave" principle, and the response signal of the second side is formed by modulating part of the radiation of the first side returned to it by the second side by reflection, backward scattering or luminescence. Concepts of optoelectronic data medium and data recording/reading devices based on this principle for special applications requiring small dimensions, metallic surroundings and/or immunity to electromagnetic radiation are presented.

Keywords — optical communication, optoelectronic data medium, optical connectors and interfaces, photoelectric conversion, optical reaction.

I. ВВЕДЕНИЕ

Новые перспективы, открываемые концепцией ближней оптической связи (Near Light Communication – NLC) и реализующих ее приборов, запатентованных как пионерные изобретения [1], обусловлены тем, что модуляция части излучения передающей стороны, возвращенной ей приемной стороной путем отражения, обратного рассеяния или люминесценции, представляет собой качественно менее энергозатратный физический механизм формирования ответного сигнала приемной стороны, чем генерация ей собственного излучения.

Естественно, что такая связь возможна только как ближняя, причем между связываемыми сторонами, взаимодействующими по принципу «ведущий – ведомый», согласно которому сеанс связи может быть инициирован только одной стороной – ведущей (инициирующим устройством), а вторая, ведомая сторона (целевое устройство) черпает из принимаемого сигнала не только информацию, которую обрабатывает, но и энергию, которую потребляет.

Существует важнейшая область применения ближней связи по этому принципу, в которой пока безраздельно доминируют т.н. «ближняя полевая связь» (Near Field Communication – NFC) в радиочастотном диапазоне и представленные во многих вариантах NFC-теги (RFID-метки и карты) – от разнообразных идентификаторов (в т.ч., персональных) до электронных средств платежа. В этой обширной области имеются сегменты, в которых были бы полезны и даже незаменимы новые, по сравнению к NFC, качества NLC, связанные, прежде всего, с уменьшением длин волн несущих сигналов на 5 – 6 порядков по сравнению с радиоволнами, которые микросхема целевого устройства без присоединенных антенных структур принимать и излучать не способна.

NLC-устройство, функционально аналогичное RFID – оптоэлектронный микрочип (ОМ) – может иметь микроскопические размеры, беспрепятственно, и, при необходимости, скрытно устанавливаться на все, в т.ч. металлические, поверхности, и быть невосприимчивым к импульсному электромагнитному излучению [2]. Кроме того, NLC открывает пути создания нового класса оптических разъемов и интерфейсов – рефлексно-оптических (РОИ), предназначенных для периферийных устройств компьютерной техники, особенно, мобильной, с повышенными требованиями к уровню защищенности.

II. ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ NLC

Наиболее просто концепция NLC реализуется, если целевое устройство – в частности, ОМ – в качестве фотоприемной структуры содержит комбинированный оптоэлектронный прибор, составленный из двух заведомо работоспособных оптоэлектронных приборов: фотоэлектрического преобразователя (например, фотодиода, работающего в фотовольтаическом режиме), и модулятора отраженного им излучения. Второй оптоэлектронный прибор сформирован поверх первого, причем разграничивающий их общий полупрозрачный электрод используется в режиме приема и передачи.

Стандартная структура фотопреобразователя, таким образом, в этом варианте дополнена, по меньшей мере, двумя слоями: оптически активным слоем, управляемым электрическим полем, который выполнен, например, из сегнетоэлектрического или жидкокристаллического диэлектрика, и еще одним полупрозрачным электродом – внешним, включенным в электрическую схему в качестве модулятора излучения, отраженного фотоприемником. Внешний полупрозрачный электрод используется только в режиме передачи. ОМ именно такого исполнения изображен на принципиальной схеме NLC, приведенной на рис. 1.

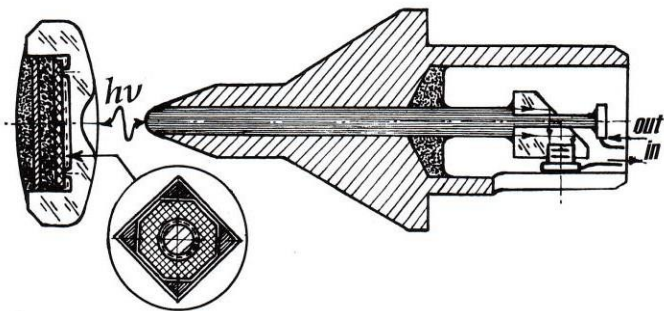


Рис.1. Принципиальная схема NLC: оптоэлектронный микрочип – слева (увеличен), оптическая головка устройства записи/чтения – справа. Зазор между микрочипом и оптической головкой показан условно.

Основной недостаток этого варианта – повышенная сложность – компенсируется тем, что наличие в нем третьего электрода (внешнего модулятора) расширяет функциональные возможности по сравнению с рассмотренными далее более простыми вариантами с модуляцией возвращенного излучения путем управления нагрузкой, в которых отдельный модулятор отсутствует. Другим его преимуществом является наличие готовых технических решений для комбинированного прибора, который подобен единичному пикселю серийно выпускаемых LCoS (Liquid-Cristal-on-Silicon) дисплеев, применяемых в компьютерных мониторах в виде очков. На основе обычных жидкокристаллических материалов, являющихся слишком «медленными», достижение нужной скорости обмена данными вряд ли возможно – однако разработка новых сегнетоэлектрических жидких кристаллов, пригодных для создания сверхбыстрых оптических затворов [3], вселяет надежду, что и этот вариант может быть востребован.

Изображенное на рис. 1 устройство записи/чтения (УЗЧ), предназначенное для взаимодействия в качестве ведущего (иницилирующего) устройства с подобными ОМ, выполнено в виде ручки (стилуса) с оптической головкой в наконечнике. Сеанс обмена данными между УЗЧ и ОМ осуществляется в режиме касания первым вторым с тактильным ответом пользователю. Для этого надо, чтобы на поверхности ОМ была выполнена лунка, в которую проваливается при касании заостренный наконечник УЗЧ, стыкуясь с ОМ сферическими поверхностями одного радиуса. Поэтому надежно защищающая ОМ от внешних воздействий его прозрачная, например, стеклянная, капсула должна быть подобна часовому камню – как это изображено на рис. 1.

С задней стороны капсулы выполнено углубление со столбиковыми выступами на дне – на уровне контактных площадок ОМ, предназначенных для соединения с внешним электродом-модулятором. Его полупрозрачное электропроводное покрытие (например, на основе двуокиси олова) должно быть нанесено на полную поверхность углубления, включая выступы. При посадке на них ОМ этими контактными площадками – в режиме ультразвуковой сварки – осуществляют, таким образом, не только его крепление, но и электромонтаж. Затем сверху закапывают жидкокристаллический материал, который под действием сил поверхностного натяжения заполняет капиллярный зазор, и герметизируют капсулу.

Такие ОМ очень удобно встраивать в оснащаемые предметы – например, в постоянно находящиеся у владельца защищенные от несанкционированного доступа хранилища личных данных, эстетические и эргономические качества которых, а также уровень защищенности – в том числе, от внешних разрушающих воздействий – значительно превосходят достижимые в известных NFC-аналогах – например, кольцах “Smart Ring” (линия “Smart Jewelry”).

УЗЧ, предназначенные для взаимодействия с ОМ, могут быть не только контактными, работающими в режиме касания – как на рис. 1 – но и бесконтактными, в качестве которых могут быть использованы оптические головки для записи/чтения информации на CD/DVD, осуществляющихся по тому же физическому принципу. В этом случае возможно встраивание ОМ в корень диска – например, в качестве носителя служебной (ключевой)

информации, открывающей доступ к контенту. Для этого углубление под ОМ должно быть предусмотрено в пресс-форме для литья поликарбонатной основы диска, а дисковод соответствующим образом запрограммирован.

В оптической головке дисковода CD/DVD разделение запросных и ответных сигналов предусмотрено в ее конструкции, а в контактных устройствах, особенностью которых является произвольный (в известных пределах) угол касания ОМ наконечником УЗЧ, задача разделения запросных и ответных сигналов, входящих и выходящих с одного участка поверхности ОМ (мишени), требует выработки принципиально новых технических решений.

В предложенном варианте (рис. 1, справа) применен жесткий волоконно-оптический блок, представляющий собой пучок параллельно уложенных оптоволоконных световодов. На внешнем (обращенном к ОМ) конце он закруглен, а на внутреннем содержит хвостовик с меньшим сечением – таким, чтобы в него вошла сердцевина, предназначенная для первичного излучения (запросных сигналов), а торцы расположенных на периферии волокон, предназначенных для пропускания вторичного излучения (ответных сигналов), оказались бы в зоне ступенчатого перехода от сердцевины к хвостовику. Он пропущен через отверстие в призме, отражающая грань которой расположена наклонно по отношению к оптической оси блока – так, чтобы торцы периферийных волокон отражались на чувствительную область фотоприемного прибора, установленного на параллельную блоку грань призмы полного отражения.

Передающий (излучательный) прибор УЗЧ – светодиод или лазер в исполнении, сопрягаемом с оптоволоконными – установлен на выпущенном за пределы призмы полного отражения торце хвостовика. Тем самым задача разделения запросных и ответных сигналов в УЗЧ решена: излучение передающего прибора не может попасть на приемный прибор иначе, чем выйти наружу по сердцевине блока на его внешнем конце, отразиться от предмета, на который он опирается или куда направлен (в штатном режиме – на мишень ОМ, а в общем случае – на любую опорную поверхность), и, отразившись, вернуться обратно по периферийным волокнам – уже в виде ответного сигнала. Для взаимодействия с мишенями особо малых размеров внешний конец блока может быть выполнен в виде фоконя (фокусирующего конуса) – например, путем его вытягивания в размягченном состоянии до размеров, превышающих физически обусловленный минимум.

III. РЕФЛЕКТИВНЫЕ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЕ ЯЧЕЙКИ

Особый интерес представляют варианты ОМ без отдельного модулятора на основе рефлективной фотовольтаической ячейки (РФЯ) – фотоприемника, для которого рефлективное (отражательное) действие – возврат не поглощенной части падающего излучения, проявляющийся, в той или иной мере, у всех тел – функциональное (поддерживаемое на заданном уровне специальными мерами), а не паразитное (подавляемое). Специальное требование к структуре РФЯ состоит в том, чтобы ее отраженное (обратно рассеянное) излучение несло бы информацию о состоянии ее электрической нагрузки в достоверно распознаваемом виде. Для описания этого эффекта целесообразно ввести новое понятие – оптическая реакция.

Оптическая реакция (реактивные проявления фотовольтаики) – неизученная, однако достоверно прогнозируемая (как следствие закона сохранения энергии) группа феноменов, в существование которой трудно поверить: фотоэффект как таковой (во всех его видах и проявлениях) более ста лет изучался лучшими физиками всего мира, в том числе, Эйнштейном. Однако в литературе не удалось найти описания ни одного опыта, в котором регистрировался бы не только электрический отклик фотопреобразователя на засветку, но и его отклик оптический: изменение характеристик отраженного (обратно рассеянного) излучения в ответ на изменение состояния его электрической нагрузки.

Из закона сохранения энергии следует, что любые изменения электрической нагрузки фотовольтаической ячейки должны отразиться на общем энергетическом балансе фотоэлектрического преобразования – равенстве первичной оптической энергии сумме трех вторичных энергий: полезной электрической, вредной тепловой, и условно полезной оптической (тем, что она, в принципе, может позволить передавать информацию во встречном направлении) – энергии отраженного излучения. Так как составляющие вторичной энергии проявляются внутри одной физической системы, то все они – так или иначе – взаимосвязаны. Поэтому изменения любой из них, при этой же первичной энергии, должны повлиять на другие.

Наиболее сильные проявления оптической реакции следует ожидать в фотовольтаических ячейках с обратной засветкой особого исполнения, которые на этом основании могут быть названы рефлективными фотопреобразователями (РФП). Обратная засветка – облучение фотопреобразователей с задней стороны – в принципе, не нова, и используется, в частности, фирмой “Sony” в некоторых типах фотоприемных ПЗС-матриц для электронных фотокамер.

Если же так построить фотопреобразователь толщины настолько малой, чтобы доля энергии дважды прошедшего через него излучения была бы достаточной для уверенного детектирования, то на его основе может быть реализован вариант ОМ, представляющийся самым перспективным – бинарный оптоэлектронный микрочип (БОМ), изображенный на рис. 2.

IV. БИНАРНЫЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ МИКРОЧИПЫ

БОМ имеет сэндвич-структуру, состоящую из двух состыкованных “face-to-face” чипов с, по меньшей мере, двумя соединенными – в частности, путем групповой пайки – жесткими выводами. Капиллярная щель между ними заполнена темным полимерным материалом во избежание паразитного фотоэффекта в цифровом чипе.

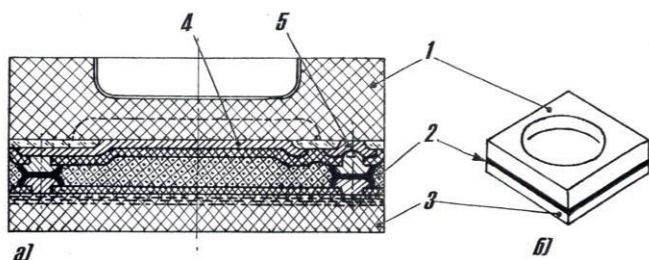


Рис. 2. Бинарный оптоэлектронный микрочип – структура (а) и общий вид (б): 1 – чип РФП, 2 – прослойка из пигментированного герметика, 3 – цифровой чип, 4 – световозвращающий электрод, 5 – общий электрод.

Структура чипа РФП, входящего в состав БОМ, имеет аналогию в живой природе: она подобна структуре светящегося отраженным светом (и тоже, в этом смысле, рефлективного) глаза животного, ведущего ночной образ жизни (например, кошки), в котором улучшение зрения в темноте обеспечивается двукратным прохождением света через полупрозрачную сетчатку, расположенную над зеркальной поверхностью глазного дна. Аналогично и в РФП: его *p-n* переход покрыт с лицевой стороны световозвращающим (зеркальным) электродом, а засветка осуществляется сзади – через углубление в обратной стороне кристалла. Благодаря этому, падающее излучение проходит через структуру РФП дважды: в первый раз – к световозвращающему электроду, и, во второй раз, отразившись от него и следуя назад – уже как ответный сигнал.

Прохождение света через слои РФП сопровождается его частичным поглощением, в результате которого энергия поглощенных квантов преобразуется в бесполезную – тепловую, и в полезную – электрическую, выделяющуюся в виде разности потенциалов электродов. Если величину первой можно считать практически постоянной (слабо зависящей от внешних факторов), то величина второй зависит от того, подключена электрическая нагрузка или нет: при отключенной нагрузке она – практически нулевая, а при подключенной, причем согласованной (сопротивление которой равно внутреннему сопротивлению РФП) – максимальная. Следовательно, прохождение света через РФП сопровождается разным отбором от него энергии, причем во втором случае значительно большим, чем в первом. Извне описанный эффект должен наблюдаться как изменение коэффициента поглощения света его структурой, благодаря которому обратно рассеянное им излучение окажется модулированным по амплитуде.

Большое практическое значение имеет то, что осуществляемая по этому физическому принципу в РФП т.н. «нагрузочная модуляция» (Load Modulation) света – по существу, полный оптический аналог таковой для NFC, реализованной в радиодиапазоне в серийно выпускаемых RFID-метках и картах. Это позволяет сократить сроки и стоимость разработки БОМ благодаря заимствованию стандартизованных протоколов обмена данными, а также блок-схем адаптеров РОИ для УЗЧ.

Внешнее оформление БОМ изображено на рис. 3. Отличие его прозрачной оболочки-капсулы от той, что изображена на рис. 1, заключается в том, что дно ее углубления для монтажа БОМ оформлено иначе: вместо четырех столбиков по углам – один усеченный конус по центру. К нему оптическим клеем присоединяют БОМ.

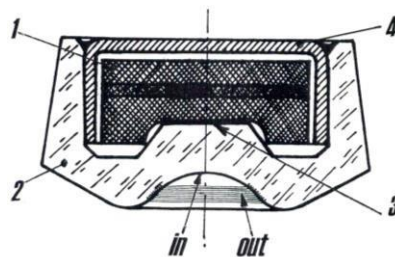


Рис. 3. Внешнее оформление бинарного оптоэлектронного микрочипа: 1 – БОМ, 2 – прозрачная оболочка (сапфир или поликарбонат – основа CD/DVD), 3 – оптический клей, 4 – герметизирующий колпачок, in – гладкая входная поверхность, out – рельефная выходная поверхность.

Чип РФП в БОМ может быть не только кремниевым, в котором ожидаемые проявления оптической реакции относительно слабые, но и на базе полупроводниковых материалов с излучательной рекомбинацией носителей заряда – например, из группы A_3B_5 . Они используются, в частности, для изготовления светодиодов, возможность работы которых как фотопреобразователей для длин волн, короче излучаемых, подтверждена опытом [4]. На основе таких материалов изготавливают, как известно, и наиболее эффективные солнечные элементы – поэтому они представляются оптимальными, в т.ч., для РФП, оптическая реакция которых в этом случае будет иметь сильное проявление – управляемая фотолюминесценция.

Из эквивалентной схемы фотовольтаического преобразователя [5, рис. 5] следует, что генерируемый им фототок разделяется на две параллельные ветви: внутреннюю (ток насыщения) – через собственный $p-n$ переход в прямом (открытом) направлении, и внешнюю – через сопротивление нагрузки. При отключенной нагрузке, таким образом, весь фототок протекает через $p-n$ переход, поддерживая излучательную рекомбинацию на максимально возможном уровне. При подключенной же – тем более, закороченной – нагрузке большая часть фототока отводится через электроды, и генерируемые носители заряда, не излучая, в основном, разряжаются на электродах. Таким образом, установив, по меньшей мере, один электронный ключ – параллельно РФП – можно, отпирая его, гасить фотолюминесценцию.

При установке еще одного электронного ключа – последовательно с РФП – можно, подавая на его затвор запирающее напряжение, нагрузку отключать, переводя тем самым РФП в режим чистого холостого хода с максимально возможным уровнем фотолюминесценции относительно среднего уровня с включенной нагрузкой, который можно считать логическим «0». Установкой двух ключей можно обеспечить, таким образом, троичное кодирование передаваемой информации, увеличив трафик по сравнению с двоичным.

Такой РФП работает как фотолюминесцентная метка – но на самом деле таковую не являясь в связи с иным физическим механизмом излучения – инжекционной электролюминесценцией. Следовательно, совместив его в составе БОМ с логической частью в виде цифрового чипа, получающего энергию от генерируемой фотоЭДС, можно эмулировать фотолюминесцентную метку – но не с неизменным, а с динамически изменяемым, благодаря модуляции излучения, откликом. Для взаимодействия с такими БОМ пригодно существующее оборудование для работы с люминесцентными метками.

Для ряда применений перспективны ОМ (не обязательно бинарные) в виде гибких аппликаций на фольговой подложке из универсальных органических (полимерных) материалов, пригодных как для дисплеев на органических светодиодах (OLED), так и для солнечных элементов [6]. Импульсное облучение фотоприемных полимерных структур с управляемой люминесценцией, дающее пульсирующую ЭДС, позволяет путем ее выпрямления схемами на коммутируемых конденсаторах – например, схемой Н.М.Катасонова [7] – довести напряжение питания логической части ОМ до уровня, достаточного, в том числе, для перезаписи его энергонезависимой памяти.

Потенциальные возможности пластиковой или органической электроники – одного из наиболее перспективных путей ее развития – как известно, распространяются практически на все виды электронных компонентов. Но только оптоэлектронные изделия пока остаются единственным практически применяемым продуктом пластиковой электроники, а всё прочее, включая RFID-метки из органических полупроводников, не выдерживает конкуренции с кремниевыми аналогами. На наш взгляд, у данной ситуации есть объективная причина: из двух путей создания носителей информации, пригодных для применения в качестве массовых товарных маркеров – средствами радиоэлектроники или оптоэлектроники – второй путь гармоничнее сочетается с возможностями пластиковой электроники, чем первый, и именно на нем возможен технологический прорыв.

ССЫЛКИ

- [1] Лившиц В.И., RU. Способ ближней оптической связи, оптоэлектронный носитель информации и устройство записи/чтения. Международная заявка на изобретение по процедуре РСТ, заявл. 25.12.2013, # РСТ RU 2013/001170, опубл. 20.05.2016, # WO 2015/099565, патент на изобретение России № 2 586 578 С2, опубл. 10.06.2016, БИ № 16.
- [2] Лившиц В.И. Ближняя оптическая связь (NLC) - альтернатива коммуникации ближнего поля (NFC) для сверхминиатюрных и экстремально устойчивых носителей информации – оптоэлектронных микрочипов. - Четверть века в мире электротехники. Сборник трудов членов АЭН РФ. – М.: Издательство ЗАО "Торговый дом ВНИИКИП", 2018, с. 231 – 243.
- [3] Компанеец И., Андреев А., Заляпин Н. Новые жидкокристаллические материалы и 3D-технологии записи и отображения информации. – Радиоэлектронные технологии. 2016, № 1, с. 86 – 89.
- [4] Сорокин А. ИК светодиод АЛ 107 как фотоприемник. – <http://www.electrosad.ru/Electronics/FPAL107.htm>
- [5] Мейтин М. Фотовольтаика: материалы, технологии, перспективы. – Электроника: наука, технология, бизнес. 2000, № 6, с. 41.
- [6] Хакина Е.А. и др. Полимерное соединение и его применение в фотовольтаических устройствах. Патент России RU 2 641 103 С2, патентообладатель – ФГУП ИПХФ РАН (RU).
- [7] Шустов М. Практическая схемотехника. Книга 3. Преобразователи напряжения. М., Додэка XXI в., 2007 – 192 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Лившиц Владимир Иосифович – к.т.н., доктор электротехники, чл.-корр. Академии электротехнических наук РФ. Адрес для переписки – 105318, г. Москва, Измайловское ш., д. 13, кв. 4, тел. +7(915)201-75-08. Руководитель группы патентования закрытого акционерного общества «Особое конструкторское бюро систем автоматизированного проектирования». Активный изобретатель, автор ряда изобретений, в т.ч. пионерных, запатентованных в России и ряде зарубежных стран в т.ч. США, Англии и Франции. Области научных интересов – электротехника и электроника.