

**Luigi Salamandra**

- MiSE - ISCOM

- Dip.di Ingegneria

Elettronica, Università degli  
Studi di Roma "Tor Vergata"

**Claudio Fazolo**

- Dip.di Ingegneria

Elettronica, Università degli  
Studi di Roma "Tor Vergata"

**Vincenzo Attanasio**

**Gianpaolo Susanna**

**Stefano Penna**

- MiSE - ISCOM

- Dip.di Ingegneria

Elettronica, Università degli  
Studi di Roma "Tor Vergata"

**Anna Stefania Michelangeli**

- MiSE - ISCOM

## Comunicazioni Ottiche con Luce Visibile da dispositivi Organici

### *Organic Visible Light Communication*

*Sommario: Dato il notevole incremento degli utilizzatori finali di internet, per la televisione digitale, i contenuti in streaming, i social network, l'Internet-delle-Cose (Internet-of-Things, IoTs), la richiesta di una connessione sicura e veloce per il trasferimento dei dati "sempre/ovunque" richiede nuovi approcci. Le Comunicazioni Ottiche con Luce Visibile (Visible Light Communication, VLC) è una delle più promettenti nuove tecnologie per le comunicazioni wireless, grazie alla possibilità di usare le luci ambientali come canali di trasferimento dei dati in spazio libero. Le VLC possiedono caratteristiche uniche non presenti in altri sistemi di comunicazione radio, come un'intrinseca sicurezza nel trasferimento dell'informazione e l'uso di frequenze libere (non licenziate). In questo ampio campo, le VLC realizzate con dispositivi organici (Organic Visible Light Communication, OVLC) stanno catturando rapidamente l'interesse della comunità scientifica, in quanto tecnologia per comunicazioni ottiche wireless a sé stante, dato che i dispositivi organici, sia diodi emettitori di luce, sia fotodiodi, posseggono affascinanti caratteristiche, come ad esempio la flessibilità meccanica e i bassi costi di realizzazione da processi di stampa per fase liquida (solution process). Una tale tecnologia è estremamente interessante per le applicazioni in dispositivi di rete per "Smart City".*

*Abstract: Since the growth of internet final consumers for broadband services as digital television, streaming, social networks, Internet-of-Things (IoT), the demand of a secure and fast data transfer connection "anywhere/time" requires new technology solutions capable to ensure the proper Quality of Services expected by the users. Visible Light Communication (VLC) is one of the most promising new wireless communication technology, due to the possibility of using environmental artificial lights as data transfer channel in free-space. VLC technology (or LiFi, light fidelity) is candidate to replace actual indoor radio communications system (WiFi, wireless fidelity), offering higher data transfer rate plus unique benefits, such as inherent security and license free operation. In this wide field, organic visible light communication (OVLC) is rapidly gaining interest in the research community as a standalone technology in optical wireless communication, since organic light-emitting diodes and photonic devices possess fascinating characteristics, such as mechanical flexibility, realization on wide-area and extremely low cost solution-based processing. Such a technology is extremely interesting for application in network devices for "Smart City".*

## 1. Introduzione

La rete mobile di quinta generazione (5G) non è solo un mero miglioramento dell'attuale interfaccia radio LTE (*Long Term Evolution*), atto a fornire velocità maggiori per venire incontro alle richieste del mondo del lavoro e degli utenti [1]. Più profondamente, il 5G rappresenta il concetto di una nuova ed evoluta rete di comunicazione, in cui tutti gli elementi sono dispositivi connessi ad internet (IoT), comunicanti tra loro, così permettendo l'espansione delle potenzialità della rete stessa. Ad oggi, l'uso della rete internet è relegato al bisogno "conscio" dell'utente (*on-demand*), quali lo streaming di contenuti, la televisione digitale, i social network, affiancati da dispositivi sempre più "portatili" (*smart-device*, quali smartphone, tablet, netbook), realizzati proprio a questo scopo. In realtà, la rete 5G è intimamente correlata con il concetto più ampio di "Smart City" [2], in cui, appunto, anche gli elementi "urbanistici", ad esempio, semafori, edifici, insegne pubblicitarie, cartelli stradali, o gli elettrodomestici di casa (eventualmente connessi ad una centralina intelligente unica) hanno una "mente" artificiale, capace di comunicare l'un l'altro e col resto del mondo per raggiungere uno "scopo superiore" (l'utilizzo fruttuoso ed energeticamente senza sprechi delle risorse, scenario dell'IoT).

In conseguenza, l'espansione e la crescita di una smart city porta inevitabilmente ad un aumento dei dispositivi potenzialmente "connessi ad internet", e il conseguente sfruttamento della banda è diventato un problema fondamentale. Le moderni reti wireless in locale (wireless LAN) hanno reso possibile l'invio tramite internet di un flusso di contenuti (dati) ad alta velocità verso i dispositivi wireless degli utenti finali; tuttavia, in un ristretto e ben confinato spazio (come in una casa), un solo singolo utente finale può avere contemporaneamente molti dispositivi connessi e richiedenti l'uso di internet, come smart TV, smartphone, tablet, notebook, e (nel prossimo futuro) diversi apparecchi elettrodomestici provvisti di tecnologia IoT. Questo incremento di richiesta di dati è il cosiddetto "collo di bottiglia dell'ultimo metro" [3]: le onde radio di una rete wireless possono subire interferenze da più svariate fonti, quali altri utenti di reti WiFi adiacenti, oppure elettrodomestici di casa (forno a microonde, monitor per bambini, telefoni senza fili), i quali minano ed indeboliscono il segnale della rete stessa, e le sue prestazioni.

## 2. Visibile light communication

Esiste una implementazione alternativa del concetto di connessione senza fili (wireless) [4], basata su comunicazione /trasferimento dei dati tramite luce artificiale nel range visibile, chiamata LiFi (Light Fidelity) [5], grazie allo sfruttamento di sorgenti di luce a diodo (LED, light-emitting diode), tecnologia meglio nota come Comunicazioni Ottiche con Luce Visibile (Visible Light Communication, VLC) [6].

Il concetto principale alla base del funzionamento della VLC (già dal 2011 è in via di standardizzazione da parte dell'IEEE 802.15.7 working

group, che ha definito le caratteristiche principali: bit-rate di almeno 10Mbps, bi-direzionalità, facilità di connessione e supporto a dispositivi mobili) [7] è, per l'appunto, l'uso delle luci ambientali artificiali come sistema ottico di trasmissione dati (). Sostanzialmente, ogni sistema di luci indoor, come in un centro commerciale, ufficio, o in casa, può diventare potenzialmente il trasmettitore di un sistema di comunicazioni dati. Tra le varie tecnologie di illuminazione, le luci a stato solido (LED bianchi o nel range del visibile) stanno diventando sempre più efficienti, con alta affidabilità, e incorporabili facilmente in molte applicazioni basate sulla luce. Esempi recenti includono i fari delle automobili basati sui LED bianchi, i semafori a LED colorati, o l'illuminazione LED come attrazione architettonica (*interior design*). È inevitabile fare un pronostico che, nell'immediato futuro, l'illuminazione generale userà LED bianchi, anche grazie al risparmio energetico che questa scelta comporta.

Visto che queste sorgenti di luce sono regolate attraverso il controllo della corrente che scorre in essi, è possibile modulare (direttamente) la corrente, per poter commutare il LED on/off, creando così un segnale di luce con contenuto informativo. Se la commutazione avviene ad alta velocità, i LED vengono utilizzati simultaneamente per illuminazione dell'ambiente (l'occhio umano vedrà il dispositivo come fosse sempre acceso) e per trasferimento di dati (). La VLC si propone come una valida alternativa alle tecnologie di comunicazione basate su radio frequenza (RF), offrendo diversi vantaggi, come l'innata sicurezza del canale di comunicazione e l'operatività su frequenze non licenziate (libere).

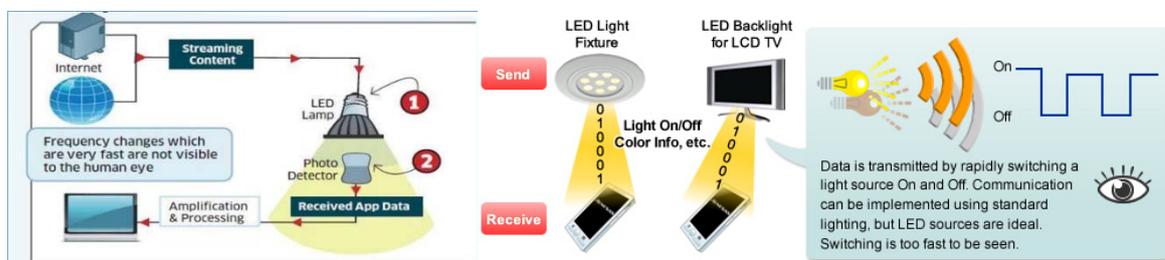
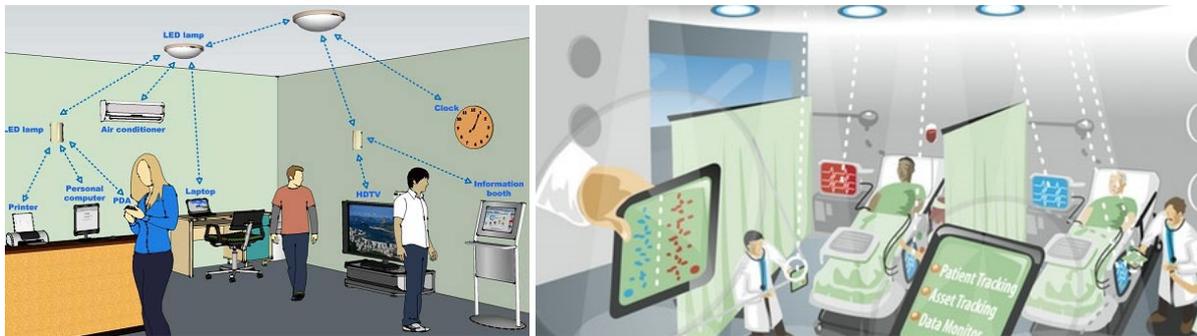


Figura 1. . Principio di funzionamento di un sistema di comunicazioni ottiche con luce visibile [5][8]

Effettivamente, è ben noto che smuove interessi economici elevati lo sfruttamento della banda radio, porzioni della quale sono venduti o concessi in licenza per vari servizi di trasmissione radio (televisione digitale, rete mobile cellulare), e regolata severamente da leggi nazionali (ed internazionali), per prevenire problemi di interferenza tra utilizzatori (provider). Oltre a questo, la capacità delle onde radio di penetrare oggetti solidi (in primis, muri di edifici), anche se è una delle caratteristiche più interessanti del segnale di una rete wireless (WiFi), tuttavia è anche il principale aspetto che rende questa tecnologia così vulnerabile agli attacchi esterni, portando, quindi, ad un concreto problema di sicurezza. Le VLC, invece, superano questo problema, perché in ambienti chiusi (e dove si opera con dati sensibili)

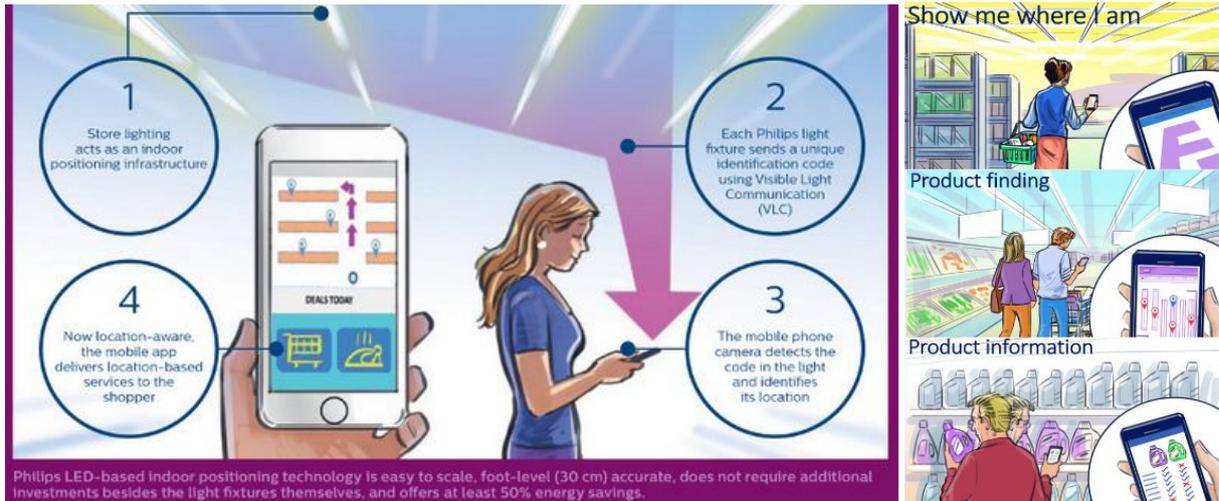
trasmettitore e ricevitore sono nello stesso ambiente (), senza possibilità che il segnale trasmesso sia intercettabile da un'altra stanza.

Un altro aspetto interessante delle comunicazioni ottiche con luce visibile è la "sicurezza" (in senso "fisico") intrinseca del mezzo di trasporto dei dati per il consumatore. In un ambiente "sensibile", come un ospedale (), la tecnologia RF potrebbe interferire o influire sui dispositivi di diagnostica e/o salvavita; al contrario, l'illuminazione ambientale è innocua, necessaria (per l'attività lavorativa), e potrà essere usata per connettere direttamente diversi dispositivi diagnostici e di monitoraggio, ad esempio durante il check-up di un paziente [9].



Più in generale, ogni ambiente chiuso e frequentato giornalmente (abitazioni, centri commerciali, uffici) in cui la radiazione elettromagnetica deve essere limitata per questioni di salute delle persone stesse, o magari all'interno di un aeroplano, dove le onde radio wireless sono proibite per problemi di sicurezza, legati all'interferenza con gli strumenti di bordo, sono ambienti perfetti per sfruttare le potenzialità dei sistemi VLC. Le comunicazioni ottiche con luce visibile sono altresì particolarmente adatte per applicazioni di tipo IPS (Indoor Positioning System, praticamente un sistema di guida GPS in ambienti chiusi), per tracciare e trovare la posizione di un soggetto di interesse (come la marca preferita di cereali in un super-mercato, il quadro più importante di un autore in un grande museo, vedi **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Figura 2. Disegni schematici di applicazione di un sistema VLC: (sinistra) ufficio; (destra) ospedale



Un argomento altamente caldo in questi anni, nell'ambito delle smart city, in cui trova terreno fertile l'applicazione dei sistemi VLC, è sicuramente quello delle comunicazioni tra veicoli motorizzati, tra loro e/o con la segnaletica stradale (semafori e cartelli luminosi), chiamata Vehicle VLC (V<sup>2</sup>LC) [11], in modo da prevenire incidenti, monitorare e gestire il traffico, instradamento intelligente dei veicoli di soccorso [12]

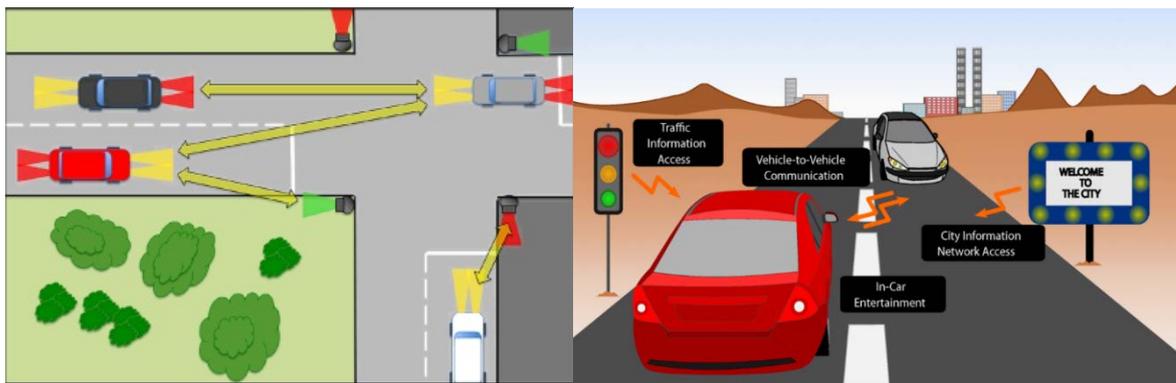


Figura 3. IPS (indoor GPS) realizzato dalla Philips [10], usando un sistema VLC

Figura 4. Principio di applicazione della tecnologia VLC per "Smart Traffic" [11][12][13]

È importante sottolineare che la VLC non intende sostituirsi alle reti esistenti, bensì affiancarsi ad esse andando a formare un data-link addizionale sfruttabile in parallelo, oppure in modo complementare alla trasmissione tradizionale in ambienti in cui le radiofrequenze non sono ammesse, sono limitate o non sono sufficienti (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**); in questo modo si viene a creare un ambiente di reti eterogenee, che permettono una connessione continua. Tuttavia, in alcuni casi essa rappresenta l'unico sistema di comunicazioni wireless fattibile, con rispetto all'applicazione finale di interesse. Per esempio, la VLC è largamente sperimentata e testata, ad oggi, come sistema wireless per trasferimento dati in ambiente subacqueo, uno scenario in cui le tecniche wireless standard sono inutilizzabili [14].



È da sottolineare, comunque, che il Light Fidelity [5], se basata sulla tecnologia VLC più prestazionale (alta velocità), nella futura rete 5G troverà sicuramente ampio spazio, visti i vantaggi soprattutto in termini di banda di frequenza, range spettrale e velocità della connessione (come riportato in Tabella 1).

	LI- FI	WI- FI
SPEED	1-3.5 Gbps	54-250 Mbps
RANGE	10 meters	20-100 meters
IEEE STANDARD	802.15.7	802.11b
SPECTRUM RANGE	10000 times than WI-FI	Radio spectrum range
NETWORK TOPOLOGY	Point-to-Point	Point-to-Multi Point
DATA TRANSFER MEDIUM	Use light as a carrier	Use radio spectrum
FREQUENCY BAND	100 times of THz	2.4 GHz

Sul mercato si trovano già diversi prodotti commerciali che sfruttano le potenzialità della tecnologia VLC, ad esempio il LiFi-X (commercializzato dalla pureLiFi) [15], un data-link full duplex a 40Mbps, oppure il WYSIPS Glass (della Sunpartner Technologies) [16], un dispositivo foto-voltaico integrabile all'interno del display touch-screen di uno smartphone, che permette contemporaneamente di ricevere dati da una rete VLC, e di ricaricare lo smartphone stesso. E si è già menzionato il GPS indoor della Philips [10]. Persino la Disney sta sperimentando largamente l'uso delle VLC per applicazioni IoT con i giochi per bambini [17].

Tabella 1.  
Comparazione tra LiFi (VLC) e WiFi (RF) [5]

Figura 5. Possibili applicazioni finali per la tecnologia VLC [8]



Ad oggi, le VLC sono realizzate con tecnologia a semiconduttore inorganico, per via delle maggiori prestazioni in termini di velocità e resa (efficienza quantica, EQE) dei dispositivi. In particolare, i sistemi VLC hanno avuto un buon impatto sulla comunità scientifica e nell'industria grazie ai moderni LED bianchi a stato solido (LED-chip) [18], utilizzabili come sorgenti di illuminazione a basso costo e, per quanto detto, come trasmettitore del data-link VLC (ne consegue, infatti, un impatto economico relativamente contenuto qualora si intenda trasformare un impianto di illuminazione in una VLC). Essenzialmente, vengono utilizzate due tipologie di LED-chip (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Il primo è un LED-chip 'blu', ricoperto da un fosforo che assorbe parte dei fotoni emessi nel blu e, per fosforescenza, ri-emette su un range di lunghezze d'onda più basse (variabile a seconda del fosforo); la somma (sovrapposizione) delle emissioni crea l'impressione del bianco. La seconda tipologia sfrutta lo stesso principio di sovrapposizione del pixel degli schermi, tre sorgenti RGB (red, green, blue) LED-chip, sovrapposte nella giusta *proporzione*. Con questa seconda tipologia si riescono a raggiungere frequenze di modulazione superiori (vedi tabelle in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), in quanto il fenomeno della fluorescenza è più lento dell'emissione diretta della giunzione a semiconduttore; inoltre, una sorgente RGB può essere modulata come 3 canali disgiunti in parallelo, sovrapponendo quindi alla modulazione del segnale anche una WDM (Wavelength Division Multiplexing), triplicando, potenzialmente, il data-rate [19]. Tuttavia, diventa anche più complicato e costoso il sistema di controllo della sorgente, per cui la velocità finale richiesta dal sistema diventa il vero 'selettore' del tipo di LED-chip da impiegare. Discorso affine per i ricevitori della VLC, dove si sfruttano foto-rivelatori già presenti sul mercato (ad esempio i sensori delle fotocamere degli smartphone) [20], ma vengono studiate anche soluzioni specifiche [21].

Figura 6. Applicazioni commerciali della tecnologia VLC: (sinistra) data-link [15]; (destra) ricevitore smartphone [16]

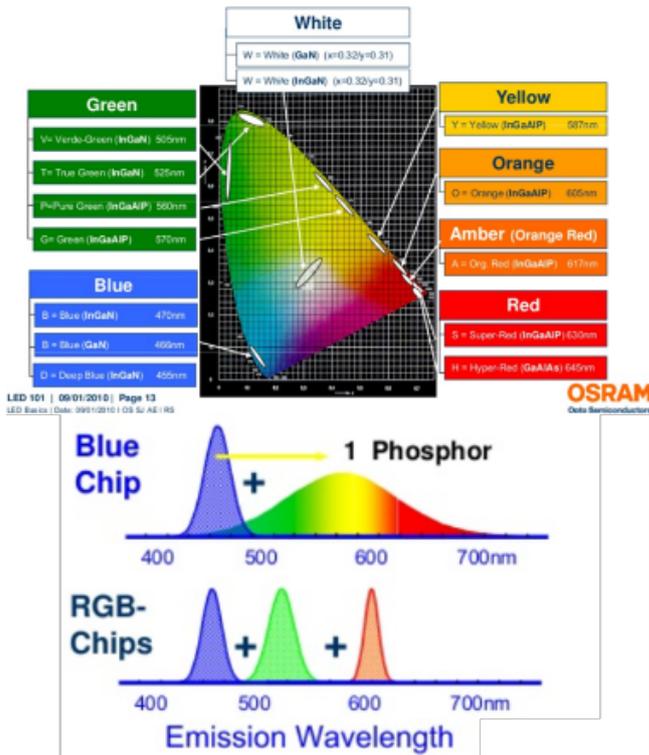


Table 1. Recent demonstrations of LED based white light VLC

Ref. Year	Applied LED(s)	Applied schemes	Brightness	Data-rate
[4] 2015	Commercial R+Y+G+B	CAP WDM	450 lx	8 Gb/s
[5] 2015	Commercial R+Y+G+B	OFDM WDM	720 lx	5.6 Gb/s
[6] 2015	Custom R+G+B	OFDM WDM	70 lx	2.3 Gb/s
[7] 2014	Custom single white	OFDM	240 lx	1.68 Gb/s
[8] 2012	Commercial single white	OFDM	400 lx	1 Gb/s

\*R: red, Y: yellow, G: Green, B: blue, OFDM: orthogonal-frequency division multiplexing, CAP: carrierless amplitude-phase modulation, WDM: wavelength division multiplexing

**New WDM 10Gb/s!!!**

Table 3. Measured data-rate, BER, and Brightness

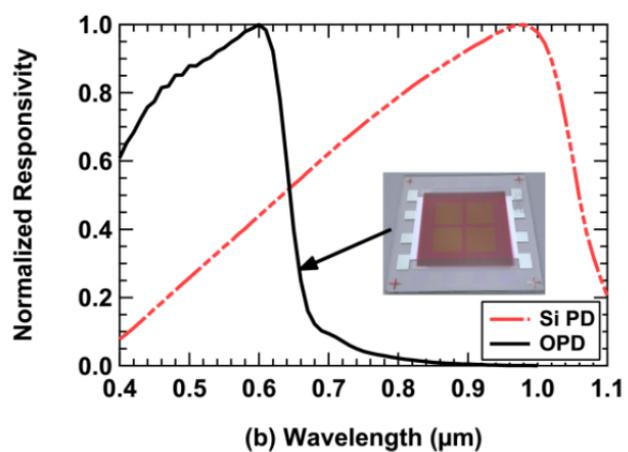
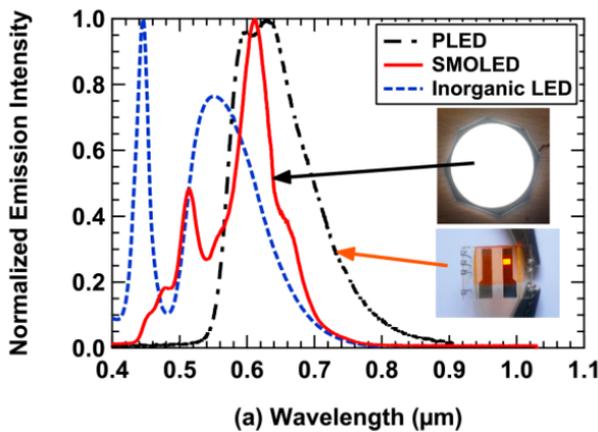
	Red (RC650)	Green ( $\mu$ LED)	Blue ( $\mu$ LED)
Data-rate	4000 Mb/s	2558 Mb/s	4724 Mb/s
	Aggregate = 11.28 Gb/s		
BER	$3.4 \times 10^{-2}$	$3.7 \times 10^{-3}$	$2.8 \times 10^{-3}$
Brightness	984 lx		

**3. ORGANIC VISIBLE LIGHT COMMUNICATION**

Come visto, riducendo un sistema VLC all'essenziale, esso comprende un LED, usato contemporaneamente per illuminare e trasmettere il segnale ottico, ed un dispositivo foto-voltaico (usato in modalità foto-rilevatore), come ricevitore del segnale stesso. Nell'ampio calderone delle possibili configurazioni implementabili di un data-link VLC, un'interessante opzione è un sistema comprendente sia come trasmettitore, sia come ricevitore, un dispositivo realizzato con materiali organici (*small-molecules* o *polimeri*), quali OLED (*organic light-emitting diode*) e OPD (*organic photo-detector*), rispettivamente (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**); questa implementazione viene detta OVLC (*Organic Visible Light Communication*).

Figura 7. Tipologie di LED-chip, i semiconduttori utilizzati [18], e le tabelle comparative sulle velocità delle VLC, estratte dalla Ref. [19].

Figura 8. Confronto delle proprietà ottiche dei dispositivi organici rispetto allo standard inorganico [22]: (sinistra) emissione degli OLED (SMOLED, *small-molecules*; PLED, *polymer*); (destra) responsività dell'OPD.



Come la controparte a semiconduttore inorganico, anche i dispositivi organici, trasmettitori OLED e ricevitori OPD, sono basati, entrambi, su una struttura multi-strato, un 'sandwich' comprendente:

a) uno strato attivo, o in emissione, o in assorbimento di fotoni, fatto con materiali organici, siano essi small-molecules, o polimeri;

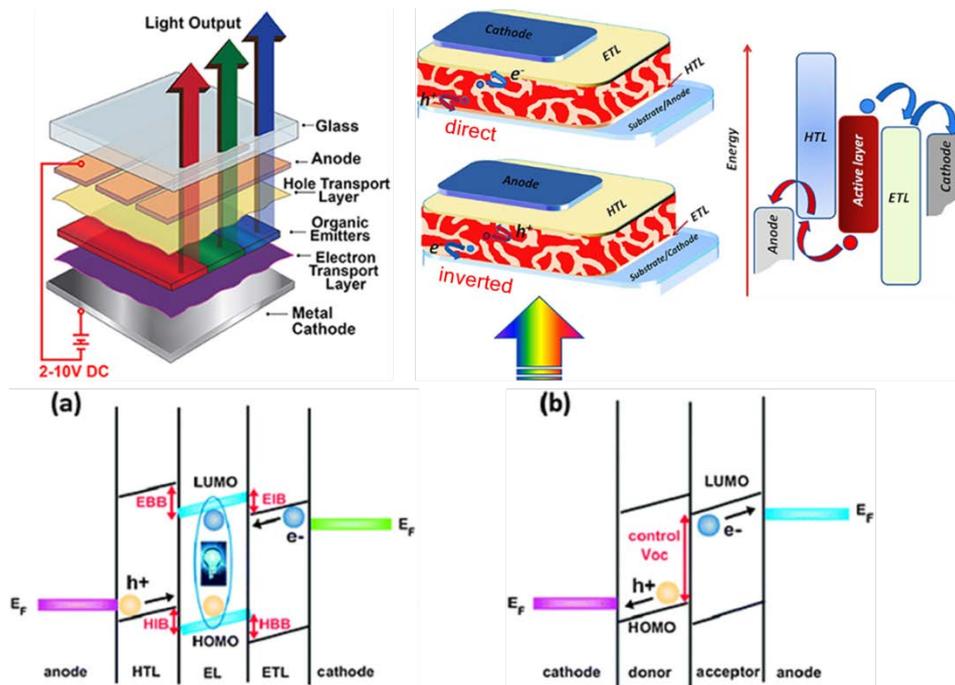
b) due elettrodi (anodo e catodo), di cui uno almeno realizzato sostituendo al metallo un ossido conduttivo trasparente (TCO, *transparent conductive oxide*) depositato su vetro o plastica flessibile (serve per avere almeno un lato del dispositivo attraversabile dalla radiazione luminosa, uscente o entrante che sia);

c) tra strato attivo ed elettrodi, due strati (uno per parte) funzionalizzati per aiutare selettivamente le cariche, lacune o elettroni (*HTL* o *ETL*, *hole* o *electron transport layer*, rispettivamente) nel passaggio dallo strato attivo all'elettrodo (estrazione, caso dell'OPD), o viceversa (iniezione, caso dell'OLED).

Il cuore dei due dispositivi, lo strato attivo organico, è ciò che realmente fa la differenza. Nel caso degli OLED (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**a), lo strato attivo è realizzato con un materiale emettitore organico, avente i due livelli energetici HOMO (equivalente alla banda di valenza dei semiconduttori inorganici) e LUMO (banda di conduzione) tali che, attraverso l'iniezione di cariche dai due strati HTL e ETL (il dispositivo viene polarizzato agli elettrodi), gli elettroni in LUMO decadano ad occupare lo stato energetico della lacuna iniettata in controparte in HOMO, emettendo un fotone. A seconda della distanza energetica tra i due livelli, si possono avere emettitori organici praticamente in tutto il range del visibile.

Per gli OPD (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**b), invece, lo strato attivo è composto da due specie organiche differenti, una donore (cede l'elettrone), l'altra accettore (acquisisce l'elettrone), mischiate insieme (*blend*) a formare una eterogiunzione distribuita (*bulk-heterojunction*); cioè la blend si comporterà come fosse un solo materiale avente HOMO quello del donore, e LUMO quello dell'accettore.

Allorché il fotone (con energia opportuna) viene assorbito dal materiale organico donore, l'elettrone vede il livello LUMO dell'accettore (energeticamente favorevole), per cui la carica passa dal LUMO donore a quello accettore, la coppia elettrone-lacuna (stato di *eccitone*) si scinde nelle due cariche singole, e queste vanno poi, tramite HTL e ETL, ai rispettivi elettrodi di estrazione.



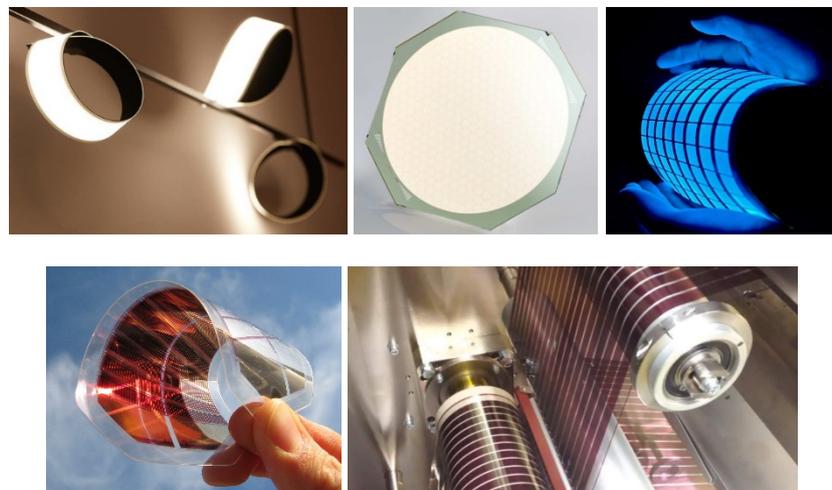
I trasmettitori organici (OLED) hanno subito un notevole sviluppo in tempi recenti, grazie al loro impiego in dispositivi mobile (smartphone e tablet in primis) e negli schermi ad alta risoluzione (smart TV e monitor PC). Sono, quindi, già una consolidata realtà industriale, commercialmente disponibili, e più recentemente si sta espandendo anche il loro utilizzo per integrazione architettonica in edifici, soprattutto come installazioni ricercate per illuminazione di interni [26], data la possibilità di realizzarli su ampie superfici flessibili e direttamente sull'arredo (*interior design*, vedi **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Rimangono ancora alcuni problemi legati alla durata della vita, all'intensità luminosa e alla degradazione del dispositivo, tuttavia il loro successo è fortemente sostenuto, grazie soprattutto ai bassi costi di fabbricazione ed alle maggiori dimensioni fabbricabili (in termini di area) rispetto alle controparti inorganiche.

Dall'altro lato, i dispositivi foto-voltaici organici (Organic Photo-Voltaic, OPV) hanno già raggiunto un'alta visibilità nel ramo delle energie rinnovabili (applicati come OSC, organic solar cell), grazie ad una serie di caratteristiche affascinanti, come la possibilità di "confezionare" *ad hoc* gli attributi ottici ed elettrici dei materiali organici grezzi (per applicazioni di nicchia), la flessibilità meccanica (si possono realizzare dispositivi intrinsecamente flessibili), gli estremamente bassi costi di produzione, grazie all'uso di tecniche da fase liquida tipiche dell'industria della stampa, applicabili anche su larga area e con tecniche di fabbricazione veloci a rullo continuo (R2R, *Roll-2-Roll*).

Sono soprattutto flessibilità e fabbricazione tramite stampa i fattori chiave che determinano l'interesse dell'industria per questa tecnologia OVLC. Infatti, le tecniche da fase liquida, tipiche dell'odierna stampa (*ink-jet, screen-printing, spray-coating, slot-die*) [27][28][29], sono intrinsecamente adattabili ai processi per dispositivi diodi emettitori e

Figura 9. Schema e diagramma di: (a) un OLED; (b) un OPD (Ref. [23][24][25]).

foto-voltaici organici (polimerici in primis), semplicemente inserendo nel processo di stampa un supporto plastico flessibile con annesso ossido conduttivo trasparente, che è poi alla base stessa dei dispositivi, cioè rotoli di PET-ITO (*Indium-Tin-Oxide coated Polyethylene Terephthalate*). Grazie a questo, si può realizzare un processo automatizzato in linea R2R, su larga scala, con pochissimi sprechi e passaggi di testimone, e molto veloce, per una fabbricazione seriale (a catena di montaggio), come auspicato dall'industria stessa. Tutto questo vasto *know-how* sulle metodologie di fabbricazione può essere trasferito interamente ed applicato per la realizzazione dei dispositivi organici emettitori e foto-detector per luce visibile, aprendo la strada alla realizzazione di un sistema di comunicazioni ottiche nel range visibile interamente da dispositivi organici (OVLC).



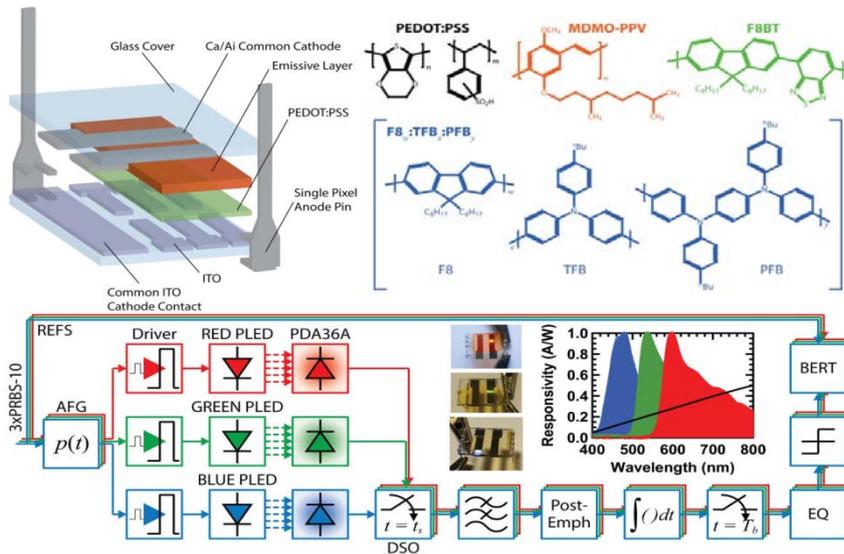
Al momento, la letteratura scientifica è concentrata sulla fattibilità dei sistemi OVLC, andando a studiare e caratterizzare OLED e OPD, soprattutto nei loro limiti 'intrinseci' di velocità, sia per i materiali (i materiali organici hanno mobilità molto inferiori alle controparti inorganiche), sia per le dimensioni dei dispositivi (le capacità geometriche possono diventare il collo di bottiglia delle prestazioni del dispositivo organico). Di seguito saranno presentati i più recenti e rilevanti lavori sui sistemi OVLC, con particolare risalto al lato ricezione del sistema, al momento l'argomento più acerbo.

Sorvolando sugli OLED con strato attivo realizzato tramite small-molecules (una realtà commerciale consolidata), più recentemente vengono sperimentati LED organici a base polimerica (PLED) in applicazioni OVLC. Nel lavoro di Haigh [30] viene testato un sistema di comunicazione VLC, avente come trasmettitore tre (canali) PLED (RGB), controllati in parallelo (fig.11).

I singoli canali (R, G, B) sono stati testati separatamente, ma ipotizzando l'aggregato, si potrebbe ottenere un sistema di trasmissione  $\geq 50\text{Mb/s}$ , largamente sopra le specifiche richieste [7]. Rimane un problema di cross-talk (sovrapposizione) tra i 'colori', soprattutto per il verde, avente interferenze sia col blu, sia col rosso.

Figura 10. Alcuni esempi di OLED (sopra) e OPD (sotto).

Tuttavia, questo problema dipende da come viene realizzato il sistema OVLC in ricezione, per cui, con gli opportuni filtri, diminuendo in maniera trascurabile il rapporto segnale/rumore (SNR), è possibile realizzare il trasmettitore come da ipotesi.



Già nel 2011, un foto-rilevatore organico (polimerico) basato sulla blend P3HT:PCBM (lo strato attivo più noto e studiato nel campo dei dispositivi foto-voltaici organici) era risultato applicabile come ricevitore per un segnale ottico da sorgente LED verde ( $\lambda_{em} \approx 520\text{nm}$ ) a 200KHz [31], ipotizzando, per altro, la possibilità di raggiungere una maggiore bandwidth. Il lavoro di Arredondo [32] ha confermato questa idea, trovando una frequenza di cut-off di  $\sim 790\text{KHz}$  per una struttura di OPD praticamente identica (vedi **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

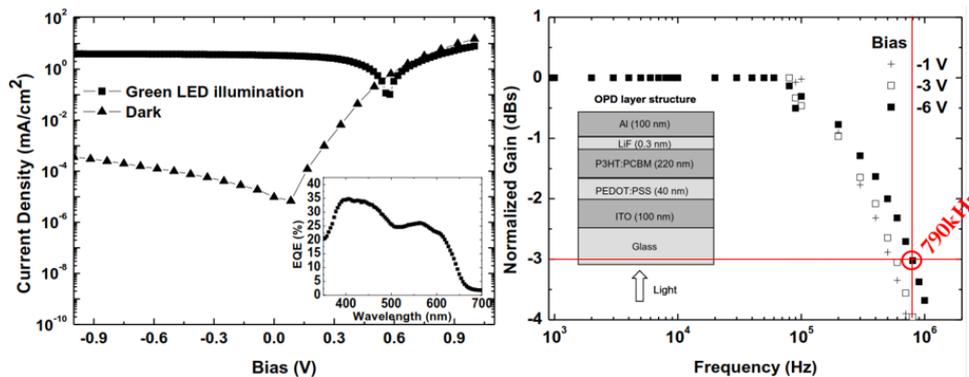
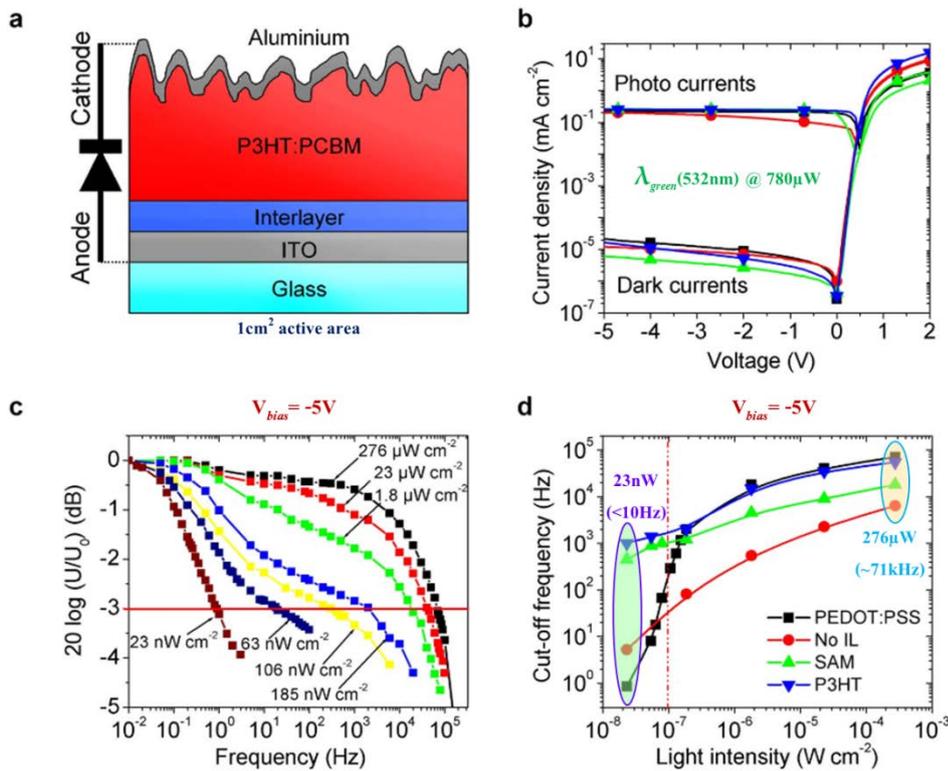


Figura 11. OLED a base polimerica (PLED) e loro applicazione in OVLC (lato trasmettitore) [30]

Figura 12. Caratterizzazione dell'OPD basata su blend P3HT:PCBM [32]: (sinistra) comportamento J-V al buio (dark) e sotto eccitazione di una sorgente LED verde ( $\lambda_{em} \approx 530\text{nm}$ ) al variare della polarizzazione; (inset) efficienza quantica a bias nullo; (destra) struttura del dispositivo e comportamento in frequenza

Un importante aspetto da valutare, che richiede un buon impegno da parte della comunità scientifica del settore, è quello della tecnica di stampa usata per la realizzazione del dispositivo. Infatti, come precedentemente sottolineato, sono molteplici le tecniche di stampa da fase liquida adottabili per la realizzazione di questi dispositivi fotovoltaici organici [27][28][29], e ognuna comporta pregi e difetti, ma soprattutto, una diversa resa del dispositivo finale stesso. Già come **cella** solare, l'OPV cambia radicalmente le efficienze raggiungibili in termini di energia prodotta al variare della tecnica di stampa, per cui è chiaro che un fenomeno simile sia inevitabile anche nel caso di dispositivo usato come ricevitore (OPD).

Un lavoro molto interessante in tal senso è quello di Arca [33], dove viene analizzato un foto-rilevatore organico con strato attivo in P3HT:PCBM, stampato, però, non con la tecnica standard (e benchmark nel settore di ricerca!) dello *spin-coating*, ma tramite aerografia (*spray-coating*). Il lavoro mostra come, al variare del materiale usato come HTL, e della conseguente variazione dell'interfaccia che si viene a creare con lo strato aerografato (per *spin-coating* lo strato tende a riempire tutte le disomogeneità dello strato sottostante, l'aerografia no), si creavano degli stati trappola (*interface trap-state*), che andavano ad inficiare la bandwidth massima raggiungibile dal dispositivo. Per altro, il lavoro mostra anche un valido metodo per recuperare e migliorare la frequenza di cut-off, che consiste nell'illuminare l'OPD con una potenza ottica minima, tale da riempire gli stati trappola, e far guadagnare velocità di risposta al dispositivo stesso (meno stati da riempire durante la dinamica di assorbimento dei fotoni). Tale schema si ipotizza applicabile in uno scenario reale di OVLC funzionante, perché il sistema di trasmissione, dovendo anche illuminare in 'continua' l'ambiente, può essere modulato creando un bias ottico utilizzabile per il riempimento degli stati trappola.



Altro importante aspetto dei dispositivi OPD è il materiale organico usato come donore. Infatti, le proprietà di assorbimento dello spettro visibile, nonché la velocità massima di commutazione raggiungibile (frequenza di cut-off), sono attribuibili in gran parte al donore della blend, visto che l'accettore è quasi sempre un fullerene, che ha mobilità superiori e un assorbimento ottico trascurabile (nel range di interesse). In questo senso è molto interessante lo studio di Kim [34] sull'utilizzo delle small-molecules funzionalizzate per essere solubili (generalmente vengono depositate tramite processi di evaporazione termica in alto-vuoto), quindi miscelabili in blend con i fullereni derivati (nello specifico si parla della blend p-DTS(FBTTh<sub>2</sub>)<sub>2</sub>:[70]PCBM, vedi **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**a). Due sono i risultati più interessanti. Da un lato, l'OPD risulta particolarmente performante come banda di utilizzo, raggiungendo una frequenza di cut-off (con semplice modulazione OOK, On-Off Keying) di 4MHz, senza per altro sentire l'influenza del bias di polarizzazione inversa (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**b).

Dall'altro, la risposta elettrica del dispositivo alle varie lunghezze d'onda del visibile (EQE) è pressoché piatta (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**c), per cui il dispositivo è ottimale per essere utilizzato in diversi scenari di (O)VLC, con diverse forme di sorgenti (bianca, RGB o ibride), magari su un dispositivo mobile, che si deve adattare a vari sistemi VLC (se non standardizzati), oppure si può pensare ad un sistema di ricezione OVLC con sensori multipli, ma realizzati tutti con lo stesso processo, semplicemente resi selettivi tramite filtri ottici (semplificazione dei processi di produzione e riduzione dei conseguenti costi).

Figura 13. OPD realizzato con tecnica di spray-coating (aerografia) dello strato attivo in P3HT:PCBM [33]: (a) struttura del dispositivo (interlayer = HTL); (b) comportamento J-V al buio e sotto illuminazione (LED verde con  $\lambda_{em} \approx 530\text{nm}$ ); (c) bandwidth e frequenza di cut-off al variare del bias di illuminazione; (d) effetto del riempimento degli strati trappola sulla frequenza di cut-off al variare dello strato HTL.

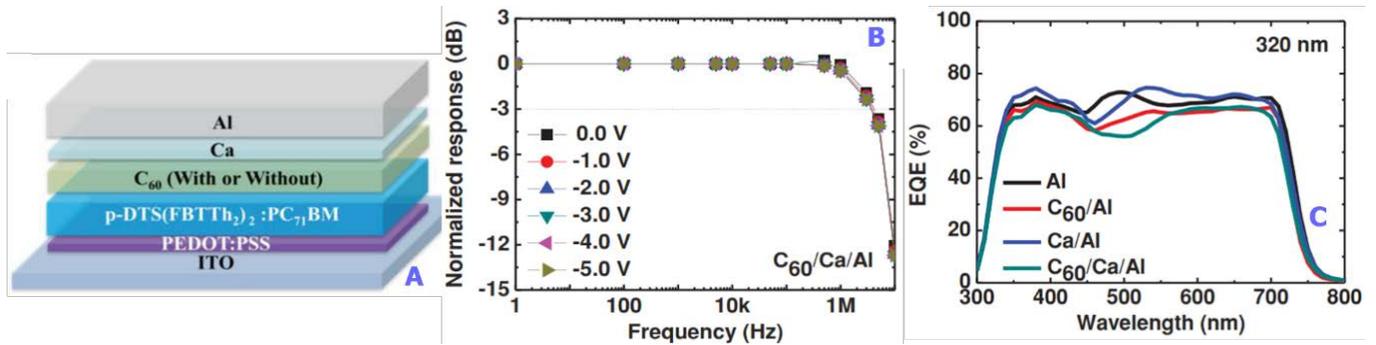
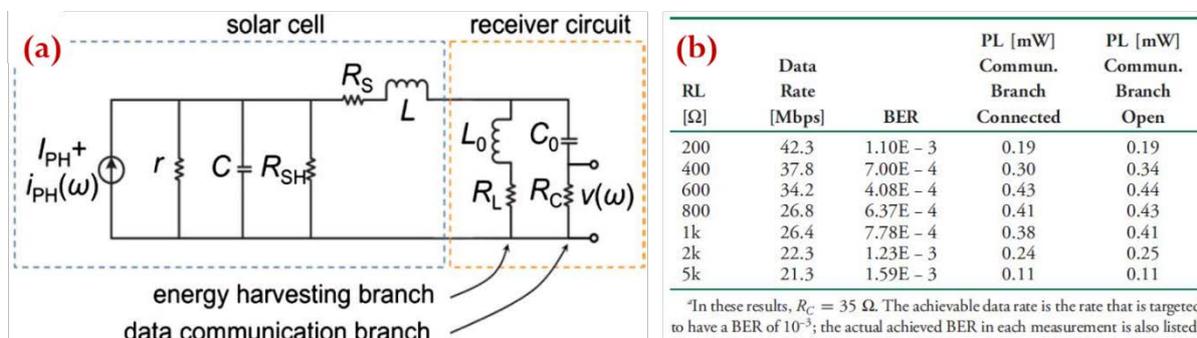


Figura 14. OPD realizzato tramite small-molecules solubili come donore [34]: (a) struttura dell'OPD; (b) efficienza quantica del dispositivo al variare della lunghezza d'onda; (c) comportamento in frequenza (bandwidth) al variare del bias.

Figura 15. OPD realizzato tramite small-molecules solubili come donore [34]: (a) struttura dell'OPD; (b) efficienza quantica del dispositivo al variare della lunghezza d'onda; (c) comportamento in frequenza (bandwidth) al variare del bias.

Si è detto che un dispositivo foto-voltaico, a seconda del suo utilizzo, può essere considerato una cella solare, per produzione di energia, oppure un foto-rilevatore, per sensoristica e comunicazioni ottiche.

Tuttavia, è possibile utilizzare contemporaneamente le due nature [16], come sperimentato nel lavoro di Zhang [35]. Al dispositivo OPV vengono collegati due carichi,  $R_L$ , sul ramo visibile in continua (DC),  $R_C$  attivo solo sul ramo per i segnali in frequenza (AC). I risultati mostrano che la potenza prodotta sul ramo DC viene influenzata pochissimo dal ramo AC. Inoltre, è ipotizzabile che il circuito si auto-alimenti per la rilevazione del segnale ottico in frequenza. Questo risultato è molto interessante per applicazioni di tipo IoT, se si pensa ad un apparecchio che debba ricevere comunicazioni sporadicamente, e rimanere a basso consumo energetico nel restante tempo.



Dato che un sistema VLC è, di fatto, un 'collage' di due elementi "distinti" (trasmettitore e ricevitore), con l'informazione che viaggia in

spazio libero, non è indispensabile che i due abbiano la stessa natura. Non a caso, spesso in letteratura dove vengono proposti e studiati sistemi ibridi, solo uno dei due dispositivi è organico. Questo è sensato, visto che, per conformità allo standard [7], la VLC deve essere bi-direzionale.

Tuttavia, in termini di prestazioni globali è necessario realizzare, studiare e ottimizzare il sistema VLC completamente organico. In tal senso, il lavoro pubblicato da Haigh [36] risulta molto interessante, dato che come sorgente viene usato un OLED commerciale (per installazione di interni), mentre il foto-rilevatore è un classico OPD basato sulla blend P3HT:PCBM, realizzato per spray (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Le prestazioni non sono elevatissime, ma si riesce comunque ad ottenere una velocità finale di poco superiore a 1Mb/s.

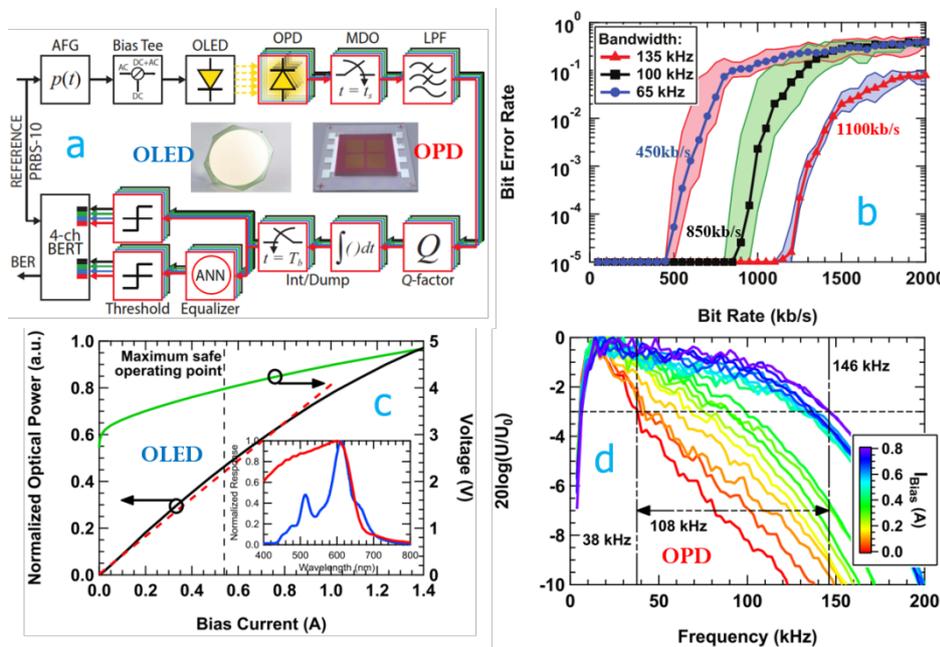
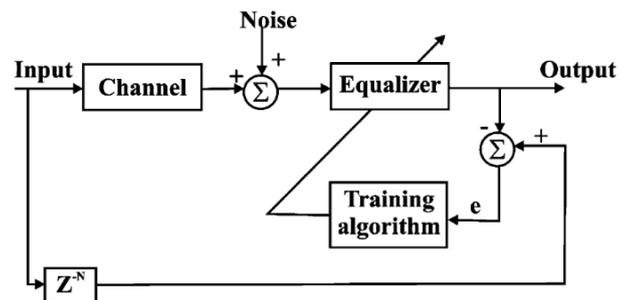


Figura 16. Sistema di comunicazioni ottiche con luce visibile da dispositivi organici (OVLC), realizzato tramite un OLED commerciale e un OPD fabbricato in laboratorio [36]: (a) schema prototipale del sistema OVLC; (b) confronto tra bandwidth iniziale (Hz) e velocità finale (b/s) della OVLC; (c) potenza ottica dell'OLED al variare del bias in corrente e (inset) confronto dello spettro di emissione dell'OLED e della responsività dell'OPD; (d) comportamento in frequenza e cut-off al variare del bias in corrente della sorgente OLED (riempimento stati trappola).

trasmissione, si possono adottare svariate tecniche già note, e altre sviluppate ad hoc per i sistemi VLC (come l'aggregazione di sorgenti multiple RGB), mentre in ricezione risulta necessario un robusto sistema di de-modulazione per il riconoscimento dell'informazione. A questo scopo, gli studi sulle (O)VLC si sono concentrate sui modelli di equalizzatore adattativo [37] di tipo ANN (artificial neural network, vedi **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). I risultati sono, comunque, innegabili, dato che la velocità del data-link, in termini di bit al secondo, può superare la frequenza di cut-off (espressa in Hz) anche più di un ordine di grandezza [38].



Al fine di implementare l'equalizzatore, e, più in generale, per 'inserire' il sistema (O)VLC nel contesto globale, occorre un'interfaccia col resto del mondo. A tal fine, il sistema (O)VLC può essere collegato ad una scheda (mini PC e/o micro-ctrllore), economica, personalizzabile, e con un supporto informatico in background fervido, e quanto più possibile, open source, come è tipico del contesto Internet-of-Things. Un esempio è l'uso di una scheda mini PC come la Raspberry Pi [39], che può essere programmata per realizzare sia il modulatore in trasmissione, sia l'equalizzatore in ricezione, eventualmente entrambe le funzioni, considerando un apparato mobile VLC.

#### 4. Conclusione

Dato il forte incremento dei dispositivi utilizzando internet, come *smart-device* e IoTs, la richiesta di banda è sempre più incalzante. Il concetto di rete 5G, oltre che ad un aumento delle prestazioni delle tecnologie a radio frequenza, affronta il problema proponendo nuove soluzioni tecnologiche wireless, tra cui le comunicazioni tramite luce visibile (VLC), in quanto economiche, veloci e sicure, dato che dispositivi emittenti radiazione luminosa visibile (lampade da interno ed esterno, TV, segnali stradali, display ed insegne pubblicitarie, fari delle auto, semafori, ecc.) si usano ovunque. Grazie a tutte le sue peculiarità, la tecnologia VLC è un'eccellente candidata come sistema di trasferimento dati per implementare il concetto "smart city" di una rete univoca, atta a migliorare la qualità della vita dei cittadini.

Figura 17. Schema a blocchi di un equalizzatore adattativo, quale l'ANN [37]

Nel panorama generale, le comunicazioni ottiche con luce visibile realizzati con un sistema a dispositivi organici (OVLC), facilmente realizzabili su supporti flessibili e tramite tecniche economiche di stampa, sono un ulteriore passo avanti in termini di integrazione e diminuzione dei costi di realizzazione ed installazione.

La tecnologia OVLC è ancora ad uno stadio iniziale, richiede ancora molta ricerca, ma non di base, in quanto si può sfruttare un vasto know-how relativo alle sorgenti (OLED) ed ai foto-ricevitori (OPD) organici

Ai laboratori NGN di nano-dispositivi fotonici presso l'ISCOM è attiva una ricerca avanzata sulla realizzazione e studio di foto-rilevatori organici (OPD) per applicazioni su OVLC. La ricerca si basa principalmente sullo studio delle varie combinazioni di architettura del dispositivo OPD, parametri fisici e materiali organici grezzi impiegati, al fine di ottimizzare la banda di lavoro in frequenza e la risposta ottico-elettrica dell'OPD stesso rispetto alla sorgente di luce (LED bianco, monocromato o combinazione/sovrapposizione RGB). Inoltre, necessitando di una "intelligenza artificiale" per la de-modulazione tramite equalizzatore ANN del segnale dati a valle del sistema VLC, verrà usata e programmata un'interfaccia IoT tramite scheda Raspberry Pi e/o Arduino, realizzando, di fatto, un sistema OVLC a basso costo.

## Reference

- [1] A. Osseiran et al., "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project" *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 5, pp. 26–35, May 2014.
- [2] A. Cocchia, "Smart and Digital City: A Systematic Literature Review" in *Progress in IS*, Springer International Publishing, 2014, pp. 13–43.
- [3] L. Hanzo et al., "Wireless Myths, Realities, and Futures: From 3G/4G to Optical and Quantum Wireless" *Proc. IEEE*, vol. 100, no. Special Centennial Issue, pp. 1853–1888, May 2012.
- [4] M. Mukherjee, "Wireless Communication-Moving from RF to Optical" in *10th INDIAcom-2016*, 2016, pp. 1079–1086.
- [5] K. Khandelwal and S. Kumar, "A Review Paper on Li - Fi Technology" in *National Conference on Innovations in Micro-electronics, Signal Processing and Communication Technologies (V-IMPACT-2016)*, 2016, no. February, pp. 3–6.
- [6] K.-D. Langer et al., "Rate-adaptive visible light communication at 500Mb/s arrives at plug and play" *SPIE Newsroom*, Nov. 2013.
- [7] *International Standard IEEE 802.15.7*  
(<http://www.ieee802.org/15/pub/TG7.html>)
- [8] *RENESAS website* (<https://www.renesas.com>)

- [9] J. Songet et al., "Indoor hospital communication systems: An integrated solution based on power line and visible light communication" in 2014 IEEE Faible Tension Faible Consommation, 2014, pp. 1–6.
- [10] *Philips* website  
(<http://www.lighting.philips.com/main/systems/themes/led-based-indoor-positioning.html>)
- [11] A. Bazzi et al., "Visible light communications as a complementary technology for the internet of vehicles", *Comput. Commun.*, vol. 93, pp. 39–51, Nov. 2016.
- [12] M. Abualhoul et al., "Visible Light Inter-Vehicle Communication for Platooning of Autonomous Vehicles", in 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium IV2016, 2016.
- [13] *Visible Light Communications* website  
(<http://visiblelightcomm.com>)
- [14] G. Cossu et al., "Experimental demonstration of high speed underwater visible light communications," in 2013 2nd International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW), 2013, pp. 11–15.
- [15] *pureLiFi* website (<http://purelifi.com/lifi-products/lifi-x>)
- [16] *Sunpartner Technologies* website  
(<http://sunpartnertechnologies.com>)
- [17] *Disney Research* website  
(<https://www.disneyresearch.com/project/visible-light-communication>)
- [18] *OSRAM Opto Semiconductors* (<https://www.osram.com/os>)
- [19] H. Chun et al., "LED Based Wavelength Division Multiplexed 10 Gb/s Visible Light Communications", *J. Light. Technol.*, vol. 34, no. 13, pp. 3047–3052, Jul. 2016.
- [20] R. Boubezari et al., "Smartphone Camera Based Visible Light Communication", *J. Light. Technol.*, vol. 34, no. 17, pp. 4121–4127, Sep. 2016.
- [21] P. Louro et al., "Transmission of Signals Using White LEDs for VLC Applications", *Mater. Today Proc.*, vol. 3, no. 3, pp. 780–787, 2016.
- [22] P. A. Haigh et al., "Organic visible light communications: Recent progress", 2014 16th Int. Conf. Transparent Opt. Networks, pp. 1–5, 2014.
- [23] S. Zhong et al., "The role of gap states in the energy level alignment at the organic–organic heterojunction interfaces", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 14, no. 41, p. 14127, 2012.
- [24] N. Wijeyasinghe and T. D. Anthopoulos, "Copper(I) thiocyanate (CuSCN) as a hole-transport material for large-area opto/electronics", *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 10, p. 104002, Oct. 2015.
- [25] *Newhaven Display* website  
([http://www.newhavendisplay.com/oled\\_page.html](http://www.newhavendisplay.com/oled_page.html))
- [26] S. Carlucci et al., "A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design" *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 1016–1033, Jul. 2015.

- [27] F. C. Krebs, "Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques" *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 93, no. 4, pp. 394–412, Apr. 2009.
- [28] A. Reale et al., "Spray Coating for Polymer Solar Cells: An Up-to-Date Overview", *Energy Technology*, vol. 3, pp. 385-406, Apr. 2015.
- [29] Marcin Kielar et al., "Ultra-efficient all-printed organic photodetectors", *Proc. SPIE 9944, Organic Sensors and Bioelectronics IX*, 994409, Sep. 27, 2016.
- [30] P. A. Haigh et al., "Wavelength-Multiplexed Polymer LEDs: Towards 55 Mb/s Organic Visible Light Communications" *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 9, pp. 1819–1828, Sep. 2015.
- [31] L. Salamandra et al., "Time-Resolved Response of Polymer Bulk-Heterojunction Photodetectors", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 23, no. 12, pp. 780–782, Jun. 2011.
- [32] B. Arredondo et al., "Visible Light Communication System Using an Organic Bulk Heterojunction Photodetector", *Sensors*, vol. 13, no. 9, pp. 12266–12276, Sep. 2013.
- [33] F. Arca et al., "Interface Trap States in Organic Photodiodes", *Sci. Rep.*, vol. 3, p. 1324, Feb. 2013.
- [34] I. K. Kim et al., "High-Performance, Solution-Processed Non-polymeric Organic Photodiodes", *Adv. Opt. Mater.*, vol. 3, no. 1, pp. 50–56, 2015.
- [35] S. Zhang et al., "Organic solar cells as high-speed data detectors for visible light communication", *Optica*, vol. 2, no. 7, p. 607, Jul. 2015.
- [36] P. A. Haigh, "A 1-Mb/s Visible Light Communications Link With Low Bandwidth Organic Components", *IEEE PTL 2014*, vol. 26, pp. 1295-1298, Jul. 2014.
- [37] K. Burse et al., "Channel Equalization Using Neural Networks: A Review", *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part C (Applications & Reviews)*, vol. 40, no. 3, pp. 352–357, May 2010.
- [38] Z. Ghassemlooy et al., "Visible light communications: 3.75 Mbits/s data rate with a 160 kHz bandwidth organic photodetector and artificial neural network equalization", *Photonics Res.*, vol. 1, no. 2, p. 65, Aug. 2013.
- [39] M. S. Gujar et al., "Data Transmission Using Visible Light Communication", *Int. J. Eng. Sci. Comput.*, vol. 6, no. 3, pp. 2263–2265, 2016.