



Universitatea
Ștefan cel Mare
Suceava

Facultatea de Inginerie
Electrică și Știința
Calculatoarelor

Domeniul Inginerie Electronică, Telecomunicații și Tehnologii Informaționale

TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

Contribuții la dezvoltarea de dispozitive optoelectronice, tehnologii informaționale și de comunicații pentru telematica rutieră

Conducător științific:

Prof. univ. dr. **Mihai Dimian**

Doctorand:

Ing. Lucian-Mihai COSOVANU

Suceava, 2023



Proiect cofinanțat din Fondul Social European Operațional Capital Uman 2014-2020

Această lucrare a beneficiat de suport financiar prin proiectul

***Program pentru creșterea performanței și inovării în cercetarea
doctorală și postdoctorală de excelență -
PROINVENT***

Contract nr.: 62487/03.06.2022 POCU/993/6/13

Cod SMIS: 153299

Axa prioritară 6 – Educație și competențe

Obiectiv specific 6.13 – Creșterea numărului absolvenților de învățământ terțiar universitar și nonuniversitar care își găsesc un loc de muncă urmare a accesului la activități de învățare la un potențial loc de muncă/cercetare/inovare, cu accent pe sectoarele economice cu potențial competitiv, identificate conform SNC, și domeniile de specializare inteligentă, conform SNCDI



CUPRINSUL REZUMATULUI TEZEI DE DOCTORAT

Introducere	1
Capitolul I: Aspecte fundamentale privind creșterea performanțelor materialelor organice și a materialelor corelate pentru dispozitive optoelectronice.....	3
Capitolul II: Studiul comunicațiilor fără fir prin lumină vizibilă folosind diode electroluminiscente organice	8
Capitolul III: Îmbunătățirea performanțelor comunicațiilor VLC prin concentratori optici și tehnologii mixte RF-VLC	15
Capitolul IV: Dezvoltarea unui sistem de comunicații prin lumină vizibilă de la infrastructură către vehicul folosind diode electroluminiscente organice	20
Capitolul V: Tehnologii mixte RF-VLC pentru aplicații de siguranță rutieră	30
Capitolul VI: Concluzii generale, sinteza contribuțiilor originale și diseminarea rezultatelor cercetării	33
Bibliografie	37

Introducere

Studiul dispozitivelor optoelectronice și a tehnologiilor informaționale și de comunicații pentru telematica rutieră reprezintă o preocupare majoră a activității de cercetare desfășurate în cadrul domeniului inginerie electronică, telecomunicații și tehnologii informaționale la Universitatea „Ștefan cel Mare” din Suceava, cu rezultate recunoscute la nivel internațional, precum dezvoltarea de sisteme de comunicații în radiofrecvență și prin lumină vizibilă și de tehnologii informaționale pentru comunicații vehiculare și medii vehiculare inteligente.

Abordarea acestor direcții este motivată de provocările societale la nivel global, generate atât de numărul mare de accidente rutiere și de gradul ridicat de congestie rutieră, cât și de schimbările climatice cauzate de emisiile cu efect de seră. În cadrul transportului rutier, mai mult de 1 milion de oameni își pierd viața anual, iar peste 50 de milioane de oameni sunt victime ale accidentelor de circulație [1]. Analiza statisticilor privind pierderea de vieți omenești arată că grupele de vârstă cele mai afectate sunt copii cu vârste între 5 și 14 ani, precum și tineri cu vârste între 15 și 29 ani [2], pentru care accidentele rutiere reprezintă principala cauză de mortalitate. În acest context, am efectuat o analiză a situației existente la nivel național și județean, România situându-se pe primul loc la nivelul Uniunii Europene (UE) în ce privește rata mortalității rutiere iar județul Suceava ocupând primul loc între județele României în ce privește numărul anual de decese rutiere. Astfel, putem constata că soluțiile inovative pentru creșterea siguranței rutiere prezintă un interes deosebit atât la nivel global, cât și național și local, reprezentând una din motivațiile principale a direcțiilor de cercetare abordate în cadrul acestei teze de doctorat.

Accidentele rutiere au un impact major și în domeniul economic, diverse studii estimând ponderea acestor efecte la mai mult de 3% din produsul intern brut al diverselor țări analizate [3]. Atât la nivelul Organizației Mondiale a Sănătății, cât și la nivelul UE, s-au dezvoltat politici publice majore privind siguranța rutieră, asumându-se o țintă foarte ambițioasă, de a reduce la 0 numărul deceselor rutiere până în 2050, iar ca țintă intermediară reducerea cu 50% până în 2030. Subliniem faptul că acest deziderat trebuie realizat în contextul unei creșteri continue a numărului de vehicule rutiere la nivel global, fapt ce contribuie nu doar creșterea numărului de accidente, ci și la o altă provocare majoră cu care ne confruntăm, la nivelul orașelor, și anume congestiile rutiere, cu impact economic, social și climatic [4].

În deceniul precedent au fost inițiate mai multe acțiuni pentru creșterea siguranței rutiere, ce vizează șase componente cheie: managementul vitezei circulației, proiectarea și îmbunătățirea infrastructurii rutiere, promovarea leadership-ului asupra siguranței rutiere, verificarea aplicării standardelor de siguranță rutieră, aplicarea legislației rutiere, precum și îmbunătățirea șanselor de supraviețuire după un accident rutier [5]. Diverse studii realizate de autoritățile naționale de transport indică faptul că utilizarea tehnologiilor informaționale și de comunicații în domeniul vehicular poate contribui la reducerea cu până la 80% a accidentelor rutiere [6], [7]. În prezent, există diverse tehnologii informaționale și de comunicații dedicate contextului rutier, cum ar fi tehnologiile de comunicații vehiculare fără fir grupate în clasa rețelelor vehiculare ad-hoc VANET. Deși cercetările în acest domeniu au fost inițiate în urmă cu mai mult de două decenii, implementarea acestora este relativ restrânsă și nu este pe deplin reglementată la nivel internațional. Se poate astfel concluziona că tehnologiile nu au atins încă la maturitatea necesară sau că nu există o masă critică decizională de implementare a acestora la nivel global. Unii producători de mașini s-au alăturat inițiativei de a adopta sisteme de comunicații vehiculare de tip DSRC (dedicated short-range communications), incluzând Toyota, BMW, Daimler, Honda, Audi, Volvo. Însă, spre exemplu, grupul Toyota a anunțat că vor retrace planurile de a implementa sisteme DSRC începând cu anul 2021 [8], ca urmare a nemandatării acestor sisteme, precum și a lipsei suportului de a le adopta [9].

În acest context, teza de doctorat se orientează către tehnologii emergente de comunicații vehiculare (precum VLC) și utilizarea complementară a acestora în cadrul unor abordări mixte RF-VLC având drept scop transmiterea de mesaje specifice aplicațiilor de siguranță rutieră și de management al traficului. Teza de doctorat este structurată în șase capitole, precedate de o secțiune introductivă și urmate de o secțiune bibliografică.

Capitolul I prezintă aspecte fundamentale privind creșterea performanțelor materialelor organice și a materialelor corelate pentru dispozitive optoelectronice. Capitolul sintetizează evoluția dispozitivelor electroluminiscente organice, analizează mecanismele implicate în emisia luminii, în scopul creșterii vitezei de comutare a dispozitivelor electroluminiscente organice, și studiază diagrame de fază pentru materiale corelate emergente, în scopul dezvoltării de noi dispozitive electroluminiscente. *Capitolul II* sintetizează stadiul actual al cercetărilor din domeniul comunicațiile fără fir prin lumină vizibilă folosind diode electroluminiscente organice (VLC OLED) și identifică o serie de probleme deschise, ce sunt propuse a fi abordate prin cercetările din cadrul tezei. *Capitolul III* se axează pe îmbunătățirea comunicațiilor VLC prin concentratoare optice și prin tehnologii mixte RF-VLC. Prin intermediul simulărilor efectuate s-a cuantificat impactul concentratoarelor optice asupra nivelului de semnal VLC și implicit, asupra creșterii distanței de comunicație. De asemenea, a fost analizată complementaritatea comunicațiilor în radiofrecvență și prin lumină vizibilă din perspectiva dezvoltării unei tehnologii mixte RF-VLC cu aplicații vehiculare. *Capitolul IV* prezintă dezvoltarea unui nou sistem de comunicație prin lumină vizibilă între infrastructura rutieră și vehicul utilizând panouri OLED. În acest scop s-au adaptat corespunzător panouri OLED comerciale, s-au proiectat și implementat un semafor rutier OLED cu capacitate de transmisie de date și un receptor VLC asociate, generându-se un sistem VLC I2V OLED ce a fost testat în diverse condiții. *Capitolul V* este dedicat dezvoltării tehnologiilor mixte RF-VLC pentru realizarea de aplicații de siguranță rutieră, utilizând complementar atât sisteme de comunicații optice fără fir VLC cât și sisteme de comunicații mobile folosind module eSim. *Capitolul VI* se concentrează pe sintetizarea contribuțiilor originale și a diseminării rezultatelor cercetării, încheindu-se cu o serie de concluzii și direcții de cercetare viitoare.

Capitolul I: Aspecte fundamentale privind creșterea performanțelor materialelor organice și a materialelor corelate pentru dispozitive optoelectronice

Creșterea performanțelor materialelor organice și a materialelor corelate, din perspectiva utilizării lor în dispozitive optoelectronice, prezintă provocări majore atât în ce privește proiectarea unei structuri emise stabile cât, și a unor parametrilor emisivi adecvați. Implicarea lor în dispozitive destinate comunicațiilor de date, spre deosebire de aplicațiile din area dispozitivelor de iluminat sau de afișare, necesită și creșterea vitezei de comutare, aflată în prezent semnificativ în urma LED-urilor clasice. Drept urmare, s-au studiat inițial diverse aspecte fundamentale ale materialelor organice și ale materialelor corelate care permit înțelegerea limitărilor prezente în creșterea performanțelor și a tehnicilor ce ar putea fi utilizate pentru îmbunătățirea acestor proprietăți fundamentale ale materialelor.

În cercetarea dispozitivelor optoelectronice de tipul diodelor electroluminiscente organice (OLED) se utilizează diverse modele teoretice pentru descrierea cât mai fidelă a caracteristicilor măsurate experimental. Un model utilizat frecvent pentru descrierea dependenței mobilității purtătorilor de sarcină de câmpul electric este modelul Poole-Frenkel, exprimat de ecuația (1):

$$\mu_{n_{PF}}(E) = \mu_{n0} \exp \left(\sqrt{\frac{|E|}{E_{0n_{PF}}}} - \gamma_{n_{PF}} \sqrt{|E|} \right) \quad (1)$$

unde μ_{n0} este mobilitatea de câmp zero, $E_{0n_{PF}}$ câmpul caracteristic, E câmpul electric și $\gamma_{n_{PF}}$ factorul de mobilitate dependent de câmp. Efectul luminos al dispozitivelor electroluminiscente organice se datorează mai multor procese de relaxare ce se realizează între purtătorii de sarcină, electroni și goluri aflați într-o stare legată numită exciton. Pentru rata de recombinare $R_{L_{n,p}}$ se utilizează modelul Langevin de recombinare a purtătorilor descris de:

$$R_{L_{n,p}} = \frac{q[\mu_n(E) + \mu_p(E)]}{\varepsilon_r \varepsilon_0} (np - n_i^2) \quad (2)$$

unde q , ε_0 , ε_r , n , p , μ_n , μ_p reprezintă sarcina electrică elementară, permitivitatea electrică a vidului, permitivitatea electrică relativă, concentrația purtătorilor de sarcină, electroni (n) și goluri (p), mobilitatea purtătorilor de sarcină electrică a electronilor, respectiv a golurilor.

Obținerea de dispozitive OLED cu viteză de comutare ridicată, utile aplicațiilor de comunicații prin lumină vizibilă (VLC), poate fi realizată prin studierea potențialelor limitări, date de constanta electrică de timp caracteristică, mobilitatea scăzută a purtătorilor de sarcină electrică și timpul de viață al stărilor de excitate. În funcție de tipul de dispozitiv OLED ce se dorește a fi dezvoltat, mecanismul de emisie principal poate limita în mod direct viteza de comutare. Luând în considerare aspectele teoretice și implicațiile experimentale asupra fenomenelor de fluorescență, fluorescență întârziată asistată termic TADF (thermal-assisted-delayed-fluorescence), fisiune singlet SF (singlet-fission), anihilare triplet-triplet TTA (triplet-triplet annihilation), emisie indusă în agregat AIE (aggregate-induced-emission) și cel de fosforescență, se distinge faptul că cea mai rapidă tranziție dintre aceste fenomene este dată de fluorescență. Astfel, într-o aplicație precum cea a comunicațiilor de date folosind diode luminiscente organice, este necesară utilizarea de compuși emisivi având la bază spectre de fluorescență. Una din provocările realizării acestor dispozitive este cantitatea redusă de lumină emisă rezultată în urma tranzițiilor singlet-singlet, care reprezintă numai 25 % din numărul total al stărilor disponibile. În acest context designul dispozitivelor poate fi avantajat prin suprapunerea mai multor straturi OLED emise pentru a produce o cantitate de lumină suplimentară. De asemenea, este important de menționat că dimensiunea efectivă a zonei active joacă un rol deosebit de important în realizarea acestui tip de dispozitive în termeni de frecvență

de lucru, care ulterior poate facilita atingerea de rate de transfer de date importante de ordinul Gbps în comunicații optice. În cazul în care se dorește comandarea emisiei luminoase simultane a unui număr larg de dispozitive, controlul precis și rapid poate fi stabilit prin utilizarea plăcilor de dezvoltare cu porți programabile cu efect de câmp FPGA (Field Programmable Gate Arrays). O astfel de implementare face posibilă atât studiarea comunicațiilor prin lumină vizibilă având un singur emițător și un singur receptor SISO (Single-input-single-output), cât și altor tipuri de comunicații optice cu surse și/sau receptori multipli, precum MISO (multiple-input-single-output) sau MIMO (multiple-input-multiple-output). Pentru aplicațiile în lumină vizibilă în domeniul auto, este de interes dezvoltarea de emițători monocromatici organici cu lungimi de undă cât mai apropiate de valorile 680 nm, 595 nm, respectiv 500 nm [10], pentru a facilita integrarea de surse de lumină OLED în infrastructuri VLC existente.

Înțelegerea mecanismelor de generare, anihilare și tranziție a excitonilor sunt caracteristici esențiale în stabilirea parametrilor fotofizici ai dispozitivelor OLED. Metodele computaționale, precum este și cea care are la bază teoria funcțională a densității (DFT), pot facilita înțelegerea acestor mecanisme și reduce timpul necesar identificării de noi compuși cu parametri de interes. În cazul studierii unor filme OC1C10-PPV dopate cu 20% Bu-PBD, raportul dintre eficiența cuantică externă și cea a fotoluminescenței a fost de 50 de procente [11]. Acest studiu a demonstrat că statistica de spin poate fi depășită în cazul unor polimeri ordonați cu masă moleculară mare, și de asemenea, a condus la stimularea studiilor și a propunerilor de noi modele teoretice. Unul din mecanismele propuse pentru explicarea acestui comportament are la bază un proces de formare a excitonului dependent de spin, unde este implicată și o rată de relaxare spin rețea mai rapidă decât ratele asociate stărilor singlet și triplet. Energia de schimb redusă pentru starea de transfer a sarcinii (CT) inter-lanț permite interconversia ușoară între stările singlet și triplet [12]. O altă cale prin care se poate depăși limita statistică a stărilor singlet, este cea în care se utilizează mecanismul de anihilare triplet-triplet (TTA) pentru a promova parțial stări triplet excitate în stări singlet. Două stări triplet se pot recombină pentru a genera un exciton singlet [13]. Acest mecanism poate totodată să conducă la creșterea timpului de viață al dispozitivelor OLED realizate. În alte materiale se poate promova un mecanism de tipul hibridizării locale și respectiv de tipul transfer de sarcină (HLCT) numit *hot exciton*, ce conduce la promovarea unor rate de transfer între stările triplet și singlet, facilitate de traversarea inter-sistemică inversă rapidă (RISC), atât în cazul transfer de sarcină, dar și în cazul excitațiilor locale (LE) [14].

Trecând acum la o a doua direcție de studiu propusă pentru acest capitol, și anume a tehnologiilor emergente de dezvoltare a dispozitivelor electroluminiscente bazate pe materiale corelate, subliniem faptul că utilizarea materialelor corelate poate genera strategii pentru modificarea și stabilirea emisiei spontane a emițătorilor cuantici, prin mecanismul corelațiilor electronice, respectiv prin incorporarea unor centre aglomerate de culoare [15]. Pentru a ilustra implicațiile corelațiilor în materiale, o reprezentare grafică al acestor tipuri de materiale este prezentată în Figura 1, împreună cu parametri de conductivitate σ , tăria corelațiilor U , respectiv frecvența plasmonilor ω_{pl} .

Aceste materiale metalice transparente se manifestă diferit, prezentând valori mari ale conductivității sau reduse în funcție de tăria corelațiilor. În cazul materialelor precum $SrVO_3$ și $CaVO_3$ se observă o conductivitate electrică mai ridicată decât cele mai bune materiale semiconductoare dopate reprezentate de linia întreruptă orizontală. În cadrul structurii electronice a acestora, vacanțele de oxigen prezente sunt responsabile pentru emisia luminii vizibile, de interes în aplicațiile luminescente. Această reprezentare ne conduce la posibilitatea de a include materiale având corelații electronice în designul dispozitivelor LED/OLED, pentru modificarea anumitor parametrilor cheie, precum indicele de refracție și factorul de transmisie al lungimilor de undă emise.

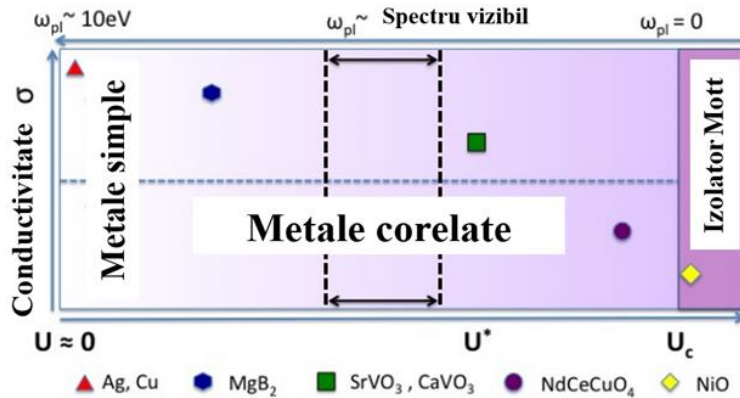


Figura 1 - Reprodușă după referința [15]. Evoluția conductivității, σ , a frecvenței plasmonilor ω_{pl} în funcție de tăria corelațiilor U

Pentru a înțelege mai bine natura materialelor corelate s-a realizat un studiu extensiv asupra materialelor NdNiO_2 , cât și LaNiO_2 , din clasa materialelor RNiO_2 , unde folosind calcul de prim principiu DFT, respectiv calcul embedded DMFT (eDMFT) s-au pus în evidență particularități importante ale acestei clase de materiale prin calcule consistente cu fizica variată a acestora. Realizarea unei diagrame de fază corelație (U)-temperatură (T) a fost esențială în evidențierea diferitelor regimuri care apar odată cu creșterea temperaturii (Figura 2).

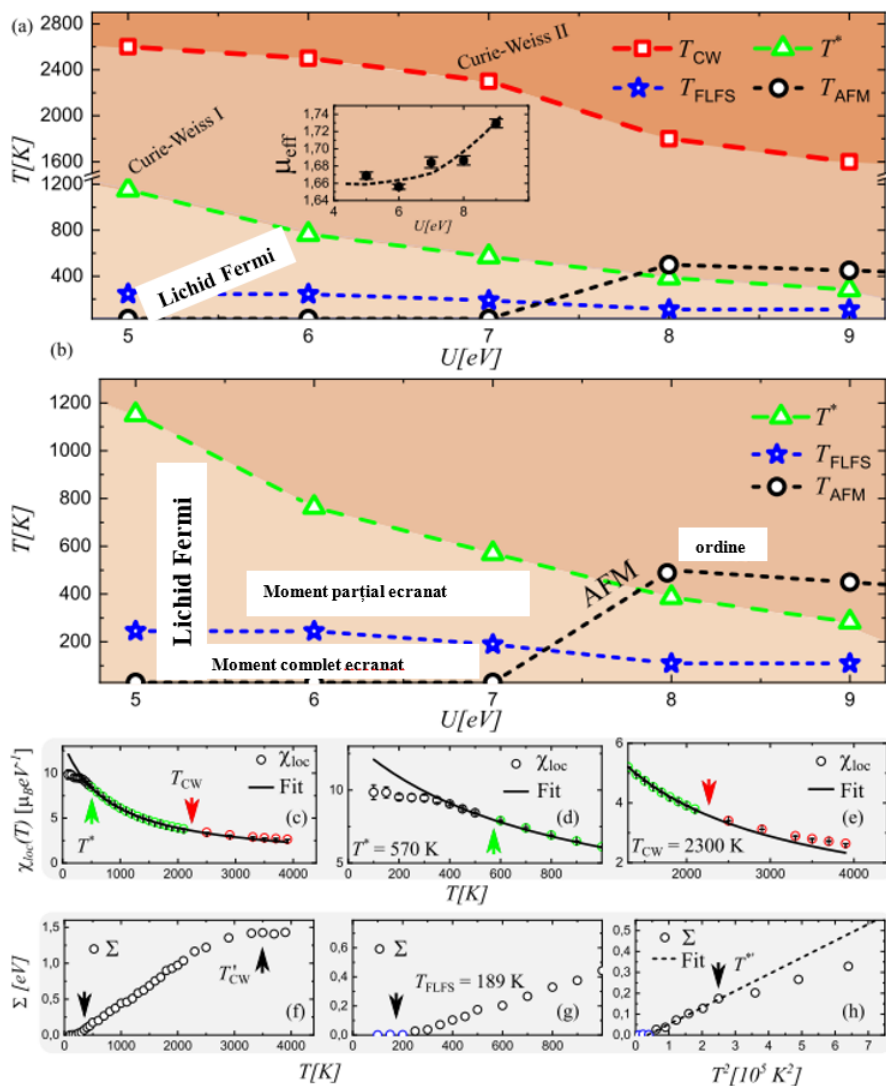


Figura 2 - Diagrama de fază corelație (U) – temperatură (T)

La construirea diagramei de fază s-au efectuat calcule pentru temperaturi cuprinse între 50 și 3500 Kelvin, pentru stări ale corelațiilor U cuprinse între 5 și 14 electron-volți (eV). În Figura 2 a) se observă diagrama de fază pentru scala completă U - T , iar în Figura 2 b) este prezentată numai componenta caracteristică la temperaturi joase. Diagrama de fază este bazată pe susceptibilitatea magnetică locală calculată, care oferă informații privind existența unui moment local asociat ionilor de nichel conform Figurii 2 c), iar ratele de împrăștiere ne oferă informații privind starea particulară în care se află precum în Figura 2 f), de lichid-Fermi sau alta. Explicațiile studiului sunt de asemenea susținute de densitatea de stări (DOS), hibridizarea orbitalilor și a funcțiilor spectrale proiectate ca funcție de corelație (U) și temperatură (T) [16]. Delimitarea fazelor Curie-Weiss și lichid Fermi sunt date de triunghiurile verzi. Susceptibilitatea magnetică calculată variază pe o scară largă, delimitându-se trei regimuri: primul regim este acela în care pentru temperaturi scăzute susceptibilitatea magnetică deviază de la una caracteristică comportamentului Curie-Weiss, acest prim regim fiind de regim de lichid-Fermi (FL); cel de-a doilea regim, intermediar, este acela în care susceptibilitatea poate fi încadrată utilizând formula Curie-Weiss-Wilson; pentru valori foarte mari ale temperaturii susceptibilitatea magnetică deviază la un regim Curie-Weiss II delimitat de T_{cw} .

Având în vedere capacitatea de investigație a metodei eDMFT, ea poate veni cu informații suplimentare pe care alte tehnici de calcul DFT nu le pot furniza. În viitor ne dorim să investigăm prin această metodă intensivă de calcul proprietățile fizice moleculare ale materialelor de interes pentru determinarea detaliată a condițiilor fizice care facilitează recombinarea luminiscentă, o direcție de mare interes pentru comunitatea științifică având în vedere multiplele forme sau mecanisme implicate, precum metal-organic-framework (MOF), AIE, TADF, SF, sau în complecși metalici unde au loc mecanisme de transfer metal-ligand charge (MLCT). De asemenea, ne propunem să adaptăm această metoda de analiză eDMFT-DFT pentru identificarea și proiectarea unor materiale noi cu proprietăți superioare.

În ultima parte a acestui capitol este prezentată evoluția dispozitivelor OLED, precum și a fenomenelor fundamentale ce stau la baza funcționării și fabricației acestora. La baza dispozitivelor optoelectronice organice emițătoare stă fenomenul de electroluminiscentă. Acest fenomen are loc atunci când în cadrul unui material organic cu proprietăți semiconductoare se îndeplinesc mai multe condiții, având loc recombinarea radiativă a unor perechi de electroni și goluri [17]. Prima raportare a acestui fenomen a fost făcută de către Bernanose în anul 1955 la aplicarea unui curent alternativ la o tensiune de până la 2000 V asupra unor adsorbați ai unor compuși organici fluorescenți, derivați de acridină dispersați în filme de celuloză [18]. În anul 1963, Pope și colaboratorii săi au observat emisia luminii unui monocristal de antracen la aplicarea unui curent alternativ cu o tensiune de peste 400 V. Fenomenul luminos a fost observat doar la aplicarea unui semnal dreptunghiular și numai pe porțiunile de creștere și scădere, în acest timp menținându-și aceeași intensitate luminoasă în ambele condiții [19]. Diodele electroluminiscente organice (OLED) au cunoscut un punct de referință în anul 1987 când Tang și Van Slyke au realizat și demonstrat primul dispozitiv electroluminiscent cu înaltă eficiență având la bază un material emițător organic în curent continuu [20]. Interesul crescut față de noile descoperiri au făcut ca dispozitivele OLED să fie cercetate mai intens, făcând posibilă trecerea de la investigații științifice fundamentale către produse comerciale. Astăzi la mai bine de 30 de ani, ele sunt incorporate în afișajele multor dispozitive cu dimensiuni variabile reprezentate de telefoane, tablete, laptopuri sau televizoare. Îmbunătățirea performanțelor materialelor OLED sau ale ansamblurilor de straturi ce constituie un dispozitiv OLED, ale tehnologiilor de fabricație, soluționarea problemelor privind timpul de viață și costurile de manufacturare, au dus în cele din urmă la capacitatea de a produce afișaje cu dimensiuni mari și cu caracteristici de iluminare superioare. Aceste noi surse de lumină oferă atât posibilitatea obținerii unei eficiențe energetice ridicate, dar și posibilitatea abordării unor modele noi care pun în valoare cercetările de materiale organice noi, transparente și flexibile.

Utilizând această tehnologie, moleculele organice pot conduce o cantitate mare de sarcină electrică cu scopul producerii recombinărilor electron-gol cu emisie de lumină, suficientă pentru aplicații precum afișare și iluminare. Folosind materiale și structuri noi ce depășesc inconvenienta rezistenței electrice înalte caracteristică a materialelor organice, se pot obține dispozitive organice luminescente prin introducerea sau injecția echilibrată de electroni și goluri. Prima încercare în combaterea cu succes a acestei limitări a fost menționată de către Tang și Van Slyke în anul 1987 prin suprapunerea de filme subțiri realizând o heterostructură [20]. În cadrul heterostructurii OLED aflată în funcțiune, prin electrozii anorganici are loc injecția de electroni și goluri, sarcinile electrice fiind transportate în straturile emise organice. Acesta a reprezentat unul din primele dispozitive OLED de primă generație, care însă se limitează la 25% din numărul total de stări, și anume tranziții singlet-singlet, mecanismul fluorescenței [21]. Sfârșitul anilor 2000 marchează debutul celei a doua generații de dispozitive OLED, în care scopul principal este acela de a "recolta" excitonii triplet, mecanismul fosforescenței, alături de cei singlet, unde eficiența internă este de până la 100% prin introducerea unei atom greu și îmbunătățirea cuplului spin-orbită prin mecanismul tranzițiilor inter-sistemică (ISC). Una din cele mai importante descoperiri în domeniul realizării de dispozitive OLED este cea a hiperfluorescenței. Acest tip de emisie se realizează prin prezența unui compus aromatic ce prezintă fluorescență întârziată activată termic (TADF) și respectiv o înaltă eficiență a fotoluminescenței. În Figura 3 se observă diagrama energetică a unei molecule organice de generație a doua ilustrând excitonii singlet S_1 și triplet T_1 , respectiv excitonii în stare fundamentală S_0 . La dispozitivele de generație a doua, cu un design optim nivelul de energie S_1 trebuie să fie mai sus față de nivelul de energie T_1 unde se remarcă o diferență de energie mică ΔE_{ST} , ce promovează traversarea intersistemică, *intersystem crossing ISC*, între nivelurile S_1 și T_1 , populând stările triplet T_1 cu costul reducerii stărilor ocupate S_1 . Acest mecanism este susținut prin cuplul spin orbită îmbunătățit de prezenta unor metale grele precum iridiu. Dispozitivele de generație a treia se disting de cele de generație a doua prin sensul mecanismului ISC. În acest caz, sensul populării este inversat, numit *reverse intersystem crossing (RISC)*, între nivelurile T_1 și S_1 (Figura 3). O moleculă ce prezintă mecanismul TADF necesită o energie mult mai redusă ΔE_{ST} . De regulă, această stare excitată este atribuită unui transfer de sarcină intramoleculară a unui sistem donor-acceptor delimitat spațial. Acest design a fost introdus de Adachi în anul 2012 cu scopul de a produce un dispozitiv OLED fără a utiliza fluorescența [22]. Cercetările ulterioare în noi dispozitive au pus în evidență și alte mecanisme de emisie luminoasă induse în agregat AIE- *aggregation-induced emission* [23], interfețe metal-organice MOF ce pot incorpora molecule organice emițătoare [24], sau de anihilare singlet-triplet (STA) [25], fisiune singlet singlet-fission (SF) [26] sau în complecși metalici unde au loc mecanisme de transfer metal-ligand charge (MLCT) [27].

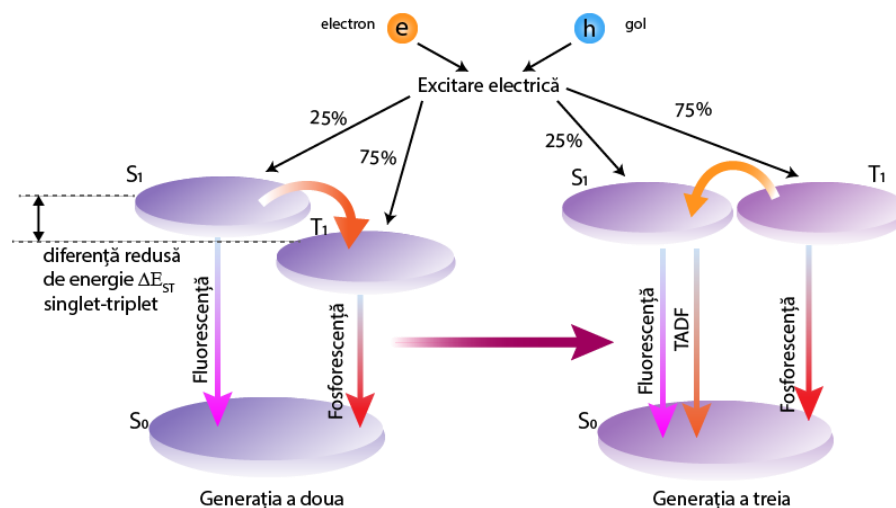


Figura 3 - Diagrama energetică a unei molecule OLED de generația a doua și respectiv a treia.

Capitolul II: Studiul comunicațiilor fără fir prin lumină vizibilă folosind diode electroluminiscente organice

Prima lucrare care a abordat utilizarea OLED în domeniul comunicațiilor optice fără fir a fost publicată de Haigh și colaboratorii săi în 2012 [28] și a prezentat un sistem VLC format dintr-un emițător organic OLED și o fotodiodă organică, demonstrând o distanță de comunicații de 10 cm. Banda de frecvență în care a lucrat sursa OLED a fost de 93 kHz pentru emisie, iar pentru recepție, fotodioda PIN a avut o bandă de frecvență de 30 MHz. Distanța a fost stabilită în raport cu condițiile de iluminare necesare lucrului la birou, de 400 lx. Pentru îmbunătățirea canalului de comunicație s-au introdus trei metode: un circuit RC între circuitul de TIA și osciloscop, Fractionally Spaced Zero Forcing Equalizer, respectiv un egalizator dintr-o rețea neurală artificială ANN. Rata de transmisie a datelor folosind metodele propuse a fost de aproximativ 100 kb/s, 300 kb/s, 500 kb/s. Aceiași autori revin în anul 2013 cu o versiune actualizată a sistemului VLC-OLED propus inițial, prin implementarea unei componente de procesare de semnal DSP, incluzând și o rețea neuronală artificială ANN [29]. Într-o dezvoltare ulterioară, autorii demonstrează experimental o modulație de tipul multiton discretă DMT, asupra unui canal de comunicație OLED-VLC. Prin modulație cu diviziune în frecvență ortogonală OFDM se obține o valoare îmbunătățită a ratei transmisiei de date la 1,4 Mb/s. Pentru OFDM au fost utilizate 32 de nivele de amplitudine împreună cu 1024 de subpurtători [30]. Într-un alt studiu, autorii au utilizat un alt tip de rețea neuronală ANN și anume perceptron multistrat MLP. Prin adoptarea acestei rețele cu dimensiune variabilă, de la 2 la 40 neuroni, s-au făcut multiple teste de modulație: on-off keying OOK, respectiv de modulație în poziția pulsului PPM (pulse position modulation) 2-PPM, 4-PPM. Menținând aceeași distanță de 10 cm între emițător și receptor, ratele de transmisie obținute au fost de 2,7 Mb/s (4-PPM), 2,2 Mb/s (OOK) și 1,25 Mb/s (2-PPM). În lipsa implementării perceptronului performanțele s-au limitat la 250 kb/s (OOK), 150 kb/s (2-PPM) și 500 kb/s (4-PPM) [31] [32].

În [33], Chun și colaboratorii săi au realizat un set de simulări considerând un sistem de emisie-recepție VLC la o distanță de 1,65 metri, bazat pe un dispozitiv OLED cu o bandă de frecvență de 10 Mhz, obținând, în cazul adoptării unor tehnici de egalizare, rate de transfer a datelor de până la 100 Mb/s. În partea experimentală, autorii au realizat un dispozitiv organic fosforescent, cu o eficiență cuantică externă de 12.5%, eficiența la curent maxim de 48 cd/A și respectiv o iluminanță de 100 cd/m², cu o lungime de undă a picului de emisie la 520 nm. La un potențial de 4.5 volți se obține frecvența de tăiere de 270 kHz. Fotodioda receptoare cu lărgimea de bandă de 10 Mhz a fost poziționată la o distanță de 1 cm, întrucât dimensiunile dispozitivului realizat avea dimensiuni reduse de 14 mm x 7 mm. Iluminarea stabilită în condițiile evaluării performanțelor sistemului a fost de circa 60 lx. S-a testat sistemul în 4 condiții: fără egalizatori, respectiv cu egalizatori: minimul erorii pătratică medii - MMSE (Minimum mean squared error), anularea succesivă a interferenței - SIC, respectiv un egalizator cu factor de decizie – DFE (decision feedback equalizer). În lipsa egalizatorilor s-a atins o rată de transmisie de circa 700 kbps cu o rată de apariție a erorilor BER de 10⁻³. În cazul folosirii anularii succesive a interferenței SIC (Successive interference cancellation) se atinge o rată de transmisie sub 3 Mbps, dar în acest caz apare o degradare a acesteia. Metoda DFE atinge o performanță de 10 Mbps cu o rată BER aflată sub 10⁻⁴.

În anul 2015, utilizând un alt tip de modulație împreună cu un comparator, Thai și colaboratorii săi au realizat un prototip de comunicație VLC bazat pe OLED cu o bandă de frecvență 7 kHz. Transmisia utilizată a fost cea asincronă, specifică modulației diferențiale în poziția pulsului (DPPM). Pentru optimizarea transmisiei au utilizat un comparator în vederea reconstruirii pulsurilor distorsionate ale semnalului recepționat. În setup-ul realizat sursa OLED de lumină albă a fost plasată la circa 5 centimetri de fotodiodă. Banda de frecvență a fotodiodei 10 MHz se poate reduce prin aplicarea amplificării până la 5 kHz. În condițiile

experimentale, fotodiodei i-a fost aplicat un câștig de 3 dB, limitând lățimea de bandă pentru recepție la 1 MHz. În urma testelor efectuate la distanța de 5 cm s-a obținut o rată de transmisie de 127,5 kbps, cu BER la 10^{-6} [34], [35]. Într-un studiu ulterior, același grup a stabilit o rată de transmisie de 138 kb/s la o distanță de 40 cm [36].

În anul 2017, Gulbahar și colaboratorii săi au abordat din punct de vedere teoretic un sistem de comunicație hibridă VLC outdoor prin modulația intensității luminii IM sau prin deplasarea culorii CSK, împreună cu canalul de comunicație de radiofrecvență în banda 5G. Sistemul de emisie bazat pe matrici de diode LED cu o putere de emisie totală de 100 W sunt poziționate pe acoperișul casei. Conceptual, pentru recepție se folosește un sistem telescopic cu cameră CCD, care ar putea să realizeze legături VLC, în condițiile de atenuare specifice vremii, pe distanțe de circa 20 de kilometri în funcție de diametrul unui LED. Conectarea serviciilor oferite de internet și televiziune pe partea de recepției-downlink se face prin radiofrecvență, iar canalul VLC al fiecărei case să deservească partea de emisie-uplink spre nodul central. În jurul turnului de recepție, spațiul este împărțit pe celule care deservește un număr limitat de case. O condiție principală în realizarea acestei rețele hibrid este dată de necesitatea existenței vizibilității la recepție, precum și existența unui număr ridicat de sisteme telescopice cu camere CCD de recepție VLC la turnul central [37]. În același an, Li și colaboratorii săi au abordat un canal de emisie VLC-OLED pe o distanță de până la 4 metri bazat pe o modulație de tipul vârf de putere raportat la puterea medie PAPR (high peak-to-average power ratio). Banda de frecvență a dispozitivului OLED cu emisie în lumină albă testat a fost de 9 kHz. Abordarea autorilor se concentrează pe analiza și soluționarea neliniarităților ce apar la nivelul OLED datorită emisie în modulație OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing). Se adoptă o dezvoltare în serie Volterra pentru modelarea neliniarităților OLED, precum și un egalizator neliniar cu scopul recuperării simbolurilor de date. Utilizând un egalizator în domeniul timp de ordinul 2 TDE (time domain equalizer), rezultatele obținute la distanța de 3 metri ating o rată de transmisie de circa 80 kb/s și o rată BER $2,9 \cdot 10^{-3}$ [38].

În anul 2018, Liu și colaboratorii săi au exemplificat o aplicație de interior, în care transmisia de date se face de la un OLED la un dispozitiv de recepție în infraroșu prin intermediul unui convertor de lumină, de la lumină vizibilă în lumină infraroșie. O performanță optimă, stabilă cu o rată de transmisie de 2404 bps a fost obținută în cazul în care iluminarea asupra obiectelor iluminate a fost de 500 lx. Circuitul intermediar ce face legătura între lumina vizibilă de la OLED și receptorul IR, conține o fotodiodă cu un maxim al sensibilității 0,45 A/W la lungimea de undă de 660 nm, un circuit de amplificare, precum și o diodă LED cu emisie în infraroșu la lungimea de undă de 940 nm. Testele realizate pentru transmisie au fost realizate atât la frecvența de 15 kHz și respectiv 38 kHz, în două moduri de variație a puterii. Prin utilizarea acestui design recepția se bazează pe radiații în infraroșu la 940 nm și pe semnalele recepționate la frecvența de 38 kHz. Celelalte lungimi de undă sunt filtrate, precum și semnalele la alte frecvențe [39].

Într-o altă abordare de a obține dispozitive OLED cu performanțe ridicate privind rata de transmisie, De Souza și colaboratorii săi au realizat trei tipuri dispozitive OLED cu dimensiuni de 3 mm x 3 mm, 1 mm x 1,1 mm, respectiv 0,3 mm x 0,4 mm. Utilizând un analizor de rețea vectorial au măsurat lărgimea de bandă a dispozitivelor realizate obținând valori de 3,8, 15 și respectiv 44 MHz. Acest lucru demonstrează că reducerea ariei dispozitivelor conduce la o foarte bună îmbunătățire a benzii de frecvență, precum și o reducere ca capacității electrice a dispozitivelor. Însă, această îmbunătățire nu se scalează invers proporțional cu aria dispozitivului, așa precum era de așteptat [40].

Într-un scenariu de indoor Chen și Xu au dispus de un panou OLED rectangular cu dimensiunea de 5 cm x 20 cm cu formă personalizată. Testarea experimentală a sursei de lumina proiectate a fost efectuată într-o cameră cu dimensiunile 5 m x 5 m x 3 m, cu o localizare în zona centrală, în porțiunea superioară a acesteia. Modelul de radiație a panoului a fost testat în mai multe instanțe cu diferite curburi. În formă plană distribuția intensității spațiale coincide

cu un model Lambertian cu coeficient $m=1$ având un semi-unghi de 120° . Întrucât îndoirea are loc între 0 și 240° , modelul de radiație obținut merge dincolo de profilul Lambertian, obținându-se o iradiere largă pentru acoperirea comunicației asupra unei arii mai mari. Detecția a fost efectuată cu o fotodiodă cu unghi de recepție de 85° și cu o arie de 1 cm^2 . Spațiul din zona inferioară a camerei a fost împărțit în 625 de regiuni de $0,2 \text{ m}^2$, locuri din care s-au efectuat măsurătorile. În descrierea canalului optic s-au luat în considerare reflexiile de ordinul întâi ale luminii, pe lângă propagarea în linie dreaptă. În măsurătorile efectuate dispersia canalului VLC este mai redusă decât în cazul profilului Lambertian cu până la 24,7%. [41].

Un studiu mai amănunțit asupra unui OLED monocromatic a fost realizat de Chen și colaboratorii săi pentru realizarea unui canal VLC pe distanțe reduse de 5, 7,5 și 10 cm. Un semnal OFDM-OQAM a fost generat. Numărul de componente ale transformatei Fourier directe și inverse a fost 512. Un cadru proiectat al transmisiei a dispus de 26 de simboluri, 23 fiind simboluri OFDM-OQAM, un simbol de sincronizare și 2 simboluri rezervate pentru antrenament. Algoritmii de alocare a puterii precum și a mixului de egalizatori LMMSE și DFE au condus la o rată maximă de transmisie de 51,6 Mbps la distanța de 12,5 cm. Dimensiunile dispozitivului OLED testat cu un vârf de emisie a luminii la lungimea de undă de 462 nm au fost de $0,3 \text{ cm} \times 1,2 \text{ cm}$. Banda de frecvență a diodei OLED a fost de 460 kHz. În condițiile în care fotodioda a fost acoperită cu o lentilă, distanța maximă la care s-a obținut o rată de transmisie de date de 10 Mbps a fost de 84 cm. Rezultatele obținute arată că, caracteristicile de transfer dinamice ale tehnicii OFDM-OQAM și de egalizare pot fi aplicate cu succes asupra dispozitivelor OLED monocromatice, alături de concentratoare optice, pentru a obține performanțe ridicate în contextul limitării lățimii de bandă și pentru a extinde distanța de comunicație [42].

Ca design într-o formă flexibilă, Vega-Colado și colaboratorii realizează un sistem de emisie și recepție VLC utilizând materiale flexibile atât pentru emițător cât și pentru receptor. Dispozitivul OLED cu dimensiunile $99 \text{ mm} \times 99 \text{ mm} \times 0,88 \text{ mm}$ a arătat o caracteristică de răspuns în frecvență de până la 40 kHz, o eficiență energetică de 60 lm/W și o putere de 1,28 W. Fotodioda organică a fost realizată prin imprimare roll-to-roll R2R, cu un strat activ P3HT:[60]PCBM cu o rezoluție de 120 linii pe cm. Pentru dispozitivul realizat cu aria de 25 mm^2 , banda de răspuns în frecvență a acestuia s-a ridicat la 50 MHz. Folosind un amplificator lock-in, la un potențial invers cuprins între 0 și 2 V, răspunsul fotodiodei a crescut de la 100 kHz la 200 de kHz. Scopul de a transmite un semnal audio cu frecvența de până la 44 kHz, a fost îndeplinit cu ajutorul modulării în frecvență, modulație FM utilizând un oscilator controlat în tensiune bazat pe circuitul integrat CD4046. Același circuit integrat a fost utilizat și pentru demodularea semnalului la recepție după blocul de transimpedanță, urmat de un amplificator operațional și un difuzor. Comunicația de date s-a realizat pe o distanță de câțiva centimetri.

În anul 2019 s-a demonstrat că materialele cu interfețe metal-organice MOF pot incorpora molecule organice emițătoare cu scopul de a obține un nou tip de diode OLED. Mai mult, folosirea acestora previne și apariția stingerii induse în agregat, precum și a relaxării neradiative datorată mișcării moleculare. În timpul sintezei, cristalele metal-organice pot fi ordonate în matrici pentru a realiza o suprafață emițătoare polarizată liniar. Cristalul organic metalic $[\text{Zn}_2(\text{BDC})_2\text{TED}]_n$ (TED = triethylenediamine, BDC = 1,4-benzenedicarboxylic acid), utilizat de Wang și colaboratorii, a constituit baza pentru realizarea acestui tip de OLED. Lumina albă compusă a fost realizată prin mixarea culorilor roșu, galben, verde și albastră emisă de cromoforii organici DCM, RhB, coumarin 6 (C6), coumarin 120 (C120) în cadrul acestei structuri. Prin stimularea optică cu lumina ultravioletă la 365 nm, vârfurile de emisie ale componentelor menționate s-au localizat la lungimile de undă 625 nm, 560 nm, 525 nm, respectiv 440 nm. Lumina compusă obținută a acoperit o bandă spectrală de 251,5 nm, cuprinsă între 391.5 nm și 643 nm la jumătatea maximului intensității. Timpul de viață a fluorescenței a fost cuprins între 3 și 5 ns. Randamentul cuantic al materialelor utilizate este cuprins între 2 și 4 %. Mai mult, o polarizare gravitațională poate fi folosită pentru aranjarea cristalelor de MOF-

RhB, cu emisie în galben, datorită unei anizotropii a geometriei cristalelor de tipul bară. Astfel, se pot orienta moleculele de RhB pe o direcție paralelă cu canelurile matricei. În acest mod, o nouă clasă de dispozitive OLED poate fi obținută, fezabilă pentru utilizarea în sisteme de comunicație VLC [24].

O aplicație conexasă VLC și anume comunicația prin lumină vizibilă folosind camera optică (VL-OCC), a fost realizată de Aggarwal și colaboratorii săi utilizând un ecran OLED cu rezoluția 32 x 32 pixeli împreună cu o camera aflată la o distanță de până la 5,5 metri. Scopul principal al sistemului realizat a fost de a transmite datele obținute din electroencefalografie EEG utilizând spectrul vizibil al matricii OLED printr-un singur canal. Prin utilizarea matricii OLED se codează anumite informații în codul cu răspuns rapid QR. Astfel codurile de bare 2D variază în timp. În același timp, ele sunt înregistrate de o cameră optică. Transmiterea prin lumină vizibilă a semnalului 1D în formă digitalizată se realizează printr-o modulație în On-Off keying Non-return to zero, OOK-NRZ, ca alternativă la o comunicație bazată prin radiofrecvență. Cu ajutorul unei camere cu o rată de 30 de cadre pe secundă s-a realizat o rată de transmisie a datelor de 2,8 kbps. Recepția VLC a fost realizată pe mai multe tipuri de camere: camera unui smartphone, cameră Thorlabs, respectiv camera DSLR. Ca metodă de control a transmisiei de date un ansamblu de 40 de biți era plasat la fiecare cadru, pentru a se putea verifica distincția dintre ele și pentru a menține sincronizarea dintre transmisie și recepție. Numărul de biți utili transmiși per cadru a fost de 20. În urma analizei ratei de apariției a erorilor BER, sistemul propus atinge o valoare de 10^{-4} , spre deosebire de valoarea minimă necesară pentru transmiterea semnalului EEG de 10^{-3} [43].

O altă lucrare a lui Lopez-Fraguas și colaboratorii săi, propune o comunicație VLC între un OLED flexibil și o fotodiodă pe bază de perovskiti. Pe partea de emisie s-a folosit un dispozitiv OLED comercial, iar pe partea de recepție s-a realizat o fotodiodă utilizând un mix de compuși, iodură de plumb de melammoniu ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, MAPI) și iodură de plumb formamidinium [$\text{HC}(\text{NH}_2)_2\text{PbI}_3$, FAPI]. Lățimea de bandă obținută la recepție a fost în jur de 120 kHz, ce este mai mult decât suficientă în stabilirea unei comunicații de date de tip audio sau text. Noutatea acestui studiu aduce beneficii privind obținerea de fotodetectori prin tehnici de procesare cu cost redus cu aplicativitate în domeniul comunicației cu lumină vizibilă [44].

În ceea ce privește acoperirea areală a unei comunicații folosind panouri flexibile OLED în interiorul unei clădiri comerciale, Chaleshtori și colaboratorii săi au propus un model de dispersie cu reflexii multiple în stabilirea canalului VLC. Pentru realizarea simulărilor s-au utilizat caracteristicile și profilul de iluminare a unui dispozitiv OLED flexibil cu dimensiunea de 200 mm x 50 mm. De asemenea, pentru obținerea unor condiții realiste de interior, s-au considerat atât dimensiunea și poziția obiectelor din situația reală cât și proprietățile de reflexie a luminii ale materialelor constituente. Dimensiunea spațiului comercial simulat a fost de 10 m x 10 m x 3 m, în care mai multe obiecte au fost distribuite spațial. Un număr de 38 de panouri OLED, a câte 64 de zone individuale de emisie au fost așezate pe un pilon central, cu o putere totală de 10 W. Puterea radiată raportată de o singură zonă de emisie a fost de 4,1 mW. Distanța dintre emițător și receptor în linie dreaptă LOS a variat între 0,5 și 6 m. Numărul de reflexii succesive considerate în propagarea razei luminoase a fost limitat prin intensitatea normalizată având o scădere de până la 10^{-3} . Sistemul VLC propus a folosit modulația OOK-NRZ și s-a bazat pe o bandă de frecvență de 50 kHz a fiecărei zone individuale OLED, respectiv o fotodiodă receptoare cu aria de 1 cm^2 și un câmp de recepție de 90° . Din investigațiile efectuate, pentru o incintă liberă la o distanță de 6 metri, rata de transmisie în linie dreaptă a fost de 10, respectiv 3,7 Mb/s utilizând panourile OLED într-o dispunere circulară și semicirculară. În scenariul incintei mobilate ratele de transmisie au fost de 10, 3,04, respectiv 1,02 Mb/s pentru 4, 5 și respectiv 6 metri, pentru dispunerea circulară a panourilor OLED. În cazul utilizării dispunerii semicirculară rezultatele au fost de 3,82, 1,48 și 0,46 Mb/s pentru distanțele menționate. Dispunerea circulară a panourilor OLED poate oferi aceeași capacitate a canalului utilizând o putere optică mai redusă decât cea obținută prin dispunerea semicirculară [45].

În 2020, Yoshida și colaboratorii săi au prezentat rezultatele cercetărilor efectuate pentru dezvoltarea a 3 tipuri de diode electroluminiscente organice cu aplicații în comunicații de date. Pentru primele două dispozitive, au utilizat în stratul emițător materialul organic MADN dopat cu 4% TBPe. Diferența dintre cel de-al doilea dispozitiv și primul a constat în îmbunătățiri asupra benzii de lucru OLED rezultate din reducerea ariei dispozitivului, scăderea rezistenței de contact al anodului, creșterea conductivității termice la nivelul catodului și respectiv creșterea tensiunii electrice. Din testele efectuate în stabilirea benzii de lucru, s-a constatat că aceasta crește odată cu creșterea tensiunii electrice și conduce la scăderea constantei electrice de timp. Această schimbare apare datorită caracteristicilor neliniare curent-tensiune, concretizându-se într-o reducere a rezistenței în urma creșterii tensiunii electrice. Pentru cel de-al doilea tip de dispozitiv cu aria de $0,12 \text{ mm}^2$ s-a atins o rată de transfer de date $0,61 \text{ Gbps}$ la 9 V la o distanță de 2 metri, folosind lentile pentru concentrarea optică. Pentru ultimul dispozitiv, ca măsuri pentru creșterea benzii de lucru s-a urmărit reducerea constantei de timp electrice, reducerea timpului de tranzit al sarcinii electrice, precum și scurtarea timpului de viață al emisie. Aceste măsuri s-au concretizat în creșterea grosimii electrodului de aluminiu, respectiv reducerea dimensiunii ariei active OLED la $0,092 \text{ mm}^2$, schimbarea materialului emisiv prin doparea materialul organic MADN cu 3 % BDAVBi (4,4'-Bis[4-(diphenylamino)styryl]biphenyl) pentru a reduce timpul de viață de la $4,4 \text{ ns}$ (TBPe) la $1,1 \text{ ns}$. Ca rezultat, banda de lucru în frecvență a crescut la 245 MHz datorită unei tensiuni electrice mai mari. La o tensiune electrică în curent continuu de 12 V și $1,3 \text{ V}$ vârf-la-vârf, cu lățime de banda de 165 MHz , s-a obținut o valoare medie de transfer de date de $1,130 \text{ Gbps}$ la 2 metri. Toți emițătorii emisivi utilizați au prezentat spectre de luminiscentă cu emisie în albastru [25].

Ca o concluzie, cercetările actuale privind utilizarea dispozitivelor OLED în domeniul comunicațiilor fără fir prin lumină vizibilă se orientează către următoarele direcții prioritare:

- Diversificarea tipurilor de modulații și a metodelor de egalizare pentru a obține transmisii de date cu performanțe ridicate;
- În cazul aplicațiilor de interior: elaborarea de sisteme VLC-OLED pentru comunicații de date: text, audio, informații medicale prin computer vision; studiul ariei de acoperire a comunicațiilor VLC-OLED; utilizarea de convertori pentru schimbarea spectrului în care se realizează comunicația;
- În cazul aplicațiilor de exterior: uplink pe partea de servicii internet și televiziune; realizarea de comunicații vehiculare prin infrastructuri;
- Extinderea comunicațiilor VLC pe distanțe mai mari.

Subliniez faptul că, la data efectuării studiului privind starea actuală a cercetării din area VLC-OLED, nu am identificat nicio publicație referitoare la dezvoltarea de sisteme VLC-OLED pentru domeniul vehicular, fapt ce m-a încurajat să explorez această direcție de cercetare în cadrul proiectului doctoral.

Pentru transferul tehnologic a cercetărilor din domeniul comunicațiilor fără fir prin lumină vizibilă (VLC) a fost inițiat un proces de standardizare, sub coordonarea IEEE. Astfel, în anul 2010, se pun bazele unui grup de lucru pentru elaborarea standardului de comunicații VLC, cu denumirea IEEE 802.15.7 [46]. Potrivit propunerii inițiale a standardului, acesta trebuia să cuprindă un strat fizic, *physical layer* (PHY) și un strat de acces și control, *medium access control* (MAC) pentru comunicații wireless optice pe distanțe scurte folosind radiația vizibilă, acestea oferind rate de transmisie a datelor pentru servicii de suport audio și video, mobilitatea conexiunii vizibile, compatibilitate cu infrastructuri în lumină vizibilă, capacitate de funcționare sub acțiunea zgomotelor și a interferențelor date de lumina ambientală; studiul efectelor asupra sănătății și mediului; respectarea reglementărilor aplicabile pentru siguranța ochilor. Avantajele inițiale prezentate cuprindeau: sursele de lumină în stare solidă înlocuiesc pe cele convenționale în infrastructurile de semnalizare, iluminare și afișare; banda vizibilă nu este reglementată și este lipsită de interferențe cu câmpurile radiofrecvență, potrivită pentru

mediile aglomerate în radiofrecvență sau mediile restricționate în radiofrecvență; caracteristica unică a vizibilității poate oferi o securitate sporită stratului fizic. Printre aplicațiile previzionate erau incluse: servicii de localizare în interior; sisteme de comunicații multipunct securizate (utilizări: birou, spital, avion); sisteme de transport inteligent.

În anul 2011, profesorul Harald Haas de la Universitatea din Edinburgh, a introdus termenul de *Li-Fi* sau *Light Fidelity* în cadrul unei conferințe TED Global Talk, ce a devenit foarte popular în comunitate pentru a descrie clasa de sisteme VLC orientate către transferul de date de mare capacitate [47]. În același an, s-au pus bazele *Consortiul Li-Fi* format de mai multe companii, precum Fraunhofer IPMS Germania, IBSEN telecom Norvegia, Supreme Architecture Israel/SUA și TriLumina SUA [48]. Interesul pentru dezvoltarea aplicațiilor *VLC / Li-Fi* a prins amploare pe parcursul deceniului precedent, iar în 2019 a avut loc la Paris primul congres internațional "*Global LiFi Congress*". În ultimii ani s-au adus numeroase inovații în domeniu provenind atât din industria semiconductoare, din industria surselor de iluminat în stare solidă, cât și din aplicațiile acestora în industria de telecomunicație și *Internet of Things*.

Subliniem faptul că proiectarea și implementarea rețelelor VLC OLED ridică numeroase provocări, mai ales atunci când se doresc rate de transfer ridicate și distanțe mari de comunicație. În continuare, prezentăm câteva dintre acestea, pe care ne-am propus să le abordăm în cadrul programului doctoral.

Provocarea nr. 1 – Îmbunătățirea condițiilor fotometrice ale VLC prin concentratori optici

Fluxul de lumină dintr-un emițător și receptor variază semnificativ, în funcție de condițiile existente, fiind astfel afectat semnificativ raportul semnal-zgomot. În anumite condiții, concentratorii optici pot extinde capacitatea de comunicație prin creșterea fluxului de lumină trimis către receptor.

Provocarea nr. 2 - Adaptarea surselor de lumină OLED pentru VLC

- Studiul caracteristicii dinamice a sursei OLED ce se dorește a fi utilizată pentru VLC;
- Studiul particularităților electrice ale sursei OLED și dispunerea de măsuri în vederea optimizării factorilor limitativi, precum capacitatea electrică și banda de frecvență.

Pentru adaptarea corespunzătoare a sursei de lumină OLED studiate și stabilirea comunicațiilor VLC, este necesar un circuit de alimentare și control care respectă particularitățile de emisie a luminii atât în regim continuu, cât și în regim dinamic.

Provocarea nr. 3 - Dezvoltarea unei infrastructuri de tip semafor, pe baza surselor de lumină OLED studiate anterior, în vederea stabilirii unei legături VLC pentru aplicații vehiculare

- În realizarea unei infrastructuri rutiere de tip semafor sunt necesare respectarea unor norme stabilite prin standardele internaționale clasa A 3/1 prEN 12368, precum și a unor caracteristici tehnice privind interacțiunea atmosferică la care acestea sunt supuse;
- Stabilirea unei legături VLC depinde de particularitățile receptorului VLC (amplificare, filtrare și tehnica reconstrucției semnalului) și de intensitatea luminoasă emisă de către sursa OLED.

Provocarea nr. 4 - Realizarea unui protocol de comunicație VLC a informațiilor disponibile la nivelul autovehiculului și a celor recepționate pentru o aplicație de siguranță vehiculară, care să corespundă legislației specifice transportului rutier

- Informațiile recepționate prin I2V / V2V trebuie prioritizate și ierarhizate;
- Dacă la nivelul vehiculelor se dispun sisteme ce generează informații suplimentare, acestea trebuie să se supună aceluiași proces de prioritarizare pentru transmisia prin V2V / V2I;

Provocarea nr. 5 - Realizarea unui studiu privind limitele aplicațiilor vehiculare realizate prin VLC

- Aplicațiile de siguranță vehiculară VLC se supun mai multor constrângeri materiale, de mediu, de spațiu și de timp;

- Tehnologiile surselor de lumină utilizate în VLC pot determina diferențe semnificative ale rezultatelor în comunicație;
- Întreruperea legăturii VLC din cauza lipsei de vizibilitate a emițătorului; amplasarea unui singur receptor VLC nu răspunde în egală măsură multiplelor unghiuri de vizualizare;
- Limitele legăturii VLC unidirecționale și complexitatea legăturii VLC bidirecționale.

Provocarea nr. 6 - Proiectarea unei soluții noi de extindere a gradului de siguranță rutieră oferit de comunicațiile VLC prin colaborarea cu module de comunicație mobilă eSim

- Se bazează pe disponibilitatea semnalului de date al tehnologiei mobile;
- Poate asigura un nivel de siguranță mai ridicat, pe o distanță mai mare decât cea oferită numai prin VLC;
- În caz de accident oferă posibilitatea anunțării automate a unei echipe de intervenție;
- În cazul în care sistemul de recepție VLC prezintă o defecțiune, eroare sau este obturat, mesajele din trafic persistă în a fi recepționate;
- În cazul în care se circulă într-o zonă fără acoperire de date mobile, precum un tunel, sistemul de siguranță VLC asigură funcționarea aplicațiilor de siguranță rutieră.

Capitolul III: Îmbunătățirea performanțelor comunicațiilor VLC prin concentratori optici și tehnologii mixte RF-VLC

În contextul aplicațiilor vehiculelor, au fost demonstrate experimental legături VLC ce pot atinge distanțe de comunicație de până la 150 m [49], [50] și acestea în teste cu mobilitate scăzută. Utilizarea unui concentrator optic în fața fotodiodei, face posibilă captarea unei cantități mai mari de lumină în zona activă a receptorului de la sursă, contribuind astfel la detectarea unui semnal aflat inițial sub pragul de detecție și implicit, la creșterea distanței de comunicație VLC. Această abordare prezintă avantaje și în cazul legăturilor VLC pe distanțe scurte deoarece poate contribui la creșterea ratei de transfer a datelor [51]. Nu în ultimul rând, lentila optică permite colectarea de lumină suficientă detecției și atunci legătura VLC este afectată de insuficienta aliniere dintre emițător și receptor în scenarii non-LoS (Line of Sight), situații frecvent întâlnite în aplicațiile vehiculare.

Sursele de lumină disponibile în infrastructura rutieră sau în autovehicule pot fi utilizate ca emițătoare VLC cu ajutorul unor drivere de control, special dezvoltate. Astfel, sursele relevante pentru aplicații VLC vehiculare ar fi stopurile auto, farurile, semafoarele și anumite indicatoare care au la bază diode electroluminiscente [52]. Pentru optimizarea iluminării nocturne a drumurilor și autostrăzilor, diferiți producători folosesc lentile de formă liberă către faruri pentru a obține o iluminare uniformă pe distanțe mai mari; această iluminare de ultimă generație oferă oportunități pentru îmbunătățirea performanțelor comunicațiilor VLC vehiculare atât în situații LoS cât și non-LoS [53], [54], [55]. Dacă acest concept de lentilă de formă liberă ar fi aplicat și surselor de lumină ale vehiculelor, o conexiune mai stabilă între vehicule ar putea fi realizată la schimbările de bandă sau depășiri, precum și în cazul unor distanțe mai mari între vehicule sau între vehicule și infrastructura. Înlocuirea unor surse LED cu surse OLED în cazul unor autovehicule de ultimă generație determină necesitatea explorării unei noi tehnologii de comunicații vehiculare VLC, pe bază de OLED.

Pentru a stabili o legătură VLC vehiculară temporară, trebuie să se poată recupera semnalul activ chiar și în influența mediului înconjurător sau a soarelui. Lumina soarelui are un impact major asupra raportului semnal zgomot (SNR) în cazul legăturilor VLC. Nu numai că SNR poate avea o valoare foarte mică, dar acesta e afectat și de procesul de amplificare, deoarece este nevoie de un factor ridicat de amplificare pentru recuperarea semnalului activ [50] [56]. Mai mult decât atât, există o variație semnificativă legată de unghiul dintre direcția emițătorului și a receptorului, și bineînțeles scăderea puterii cu inversul pătratului distanței dintre emițător și receptor. Încercăm să stabilim un cadru de pornire pentru analiza unei situații de interes din cadrul tezei, astfel vom analiza situația unei comunicații I2V, bazată de un semafor rutier, cu mențiunea că situația poate fi dependentă de reglementările specifice fiecărei țări privind infrastructura de transport rutier. Este important să observăm că îmbunătățirea SNR pe măsura diminuării distanței dintre sursă și receptor datorate apropierii vehicului de semafor poate fi afectată negativ de unghiul dintre sursă și receptor, după cum se poate observa în Figura 4. Astfel, dezvoltarea sistemului VLC necesită soluții pentru diminuarea acestui impact negativ al unghiului dintre sursă și receptor, pe lângă cele dedicate detecției semnalului în condițiile unui semnal și al unui SNR scăzute. Prezentul studiu analizează cazul unor legături VLC unidirecționale între semafor și vehicul (I2V) și între două vehicule (V2V).

În cazul receptorului VLC îmbunătățit cu un concentrator optic în fața fotodiodei, poziția receptorului VLC trebuie să fie foarte aproape de punctul focal al obiectivului fix. Lentila poate fi acoperită cu un strat subțire de material pentru a respinge spectrul în infraroșu (limitând astfel zgomotul generate de lumina solară) și, de asemenea, cu un filtru îngust suplimentar care poate limita lumina recepționată de fotodiodă la spectrul de interes. Când distanțele dintre două vehicule sunt sub distanța maximă de conectare VLC, se poate stabili o legătură I2V sau V2V. Un sistem VLC tipic fără îmbunătățiri, deci fără lentile, performanța

generală a sistemului VLC va trebui să se bazeze exclusiv pe fluxul de lumină incident pe receptor. Utilizarea lentilei în fața fotodiodei (Figura 5) permite ca zona activă, sensibilă a receptorului să capteze mai multă lumină de la sursa de lumină utilizată în realizarea legăturii VLC, iar o parte din zgomot să fie deja eliminat prin mijloace optice.

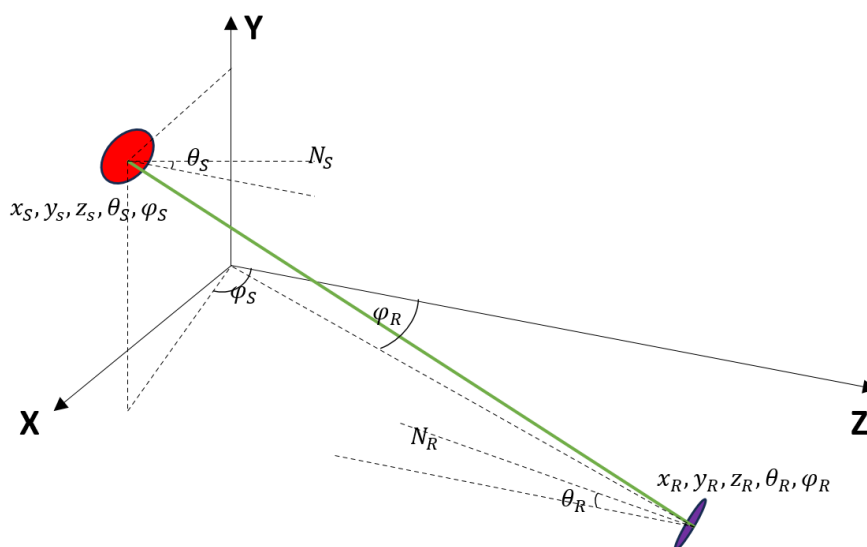


Figura 4 – Configurația geometrică a unui sistem VLC, cu emițătorul și receptorul nealiniați.

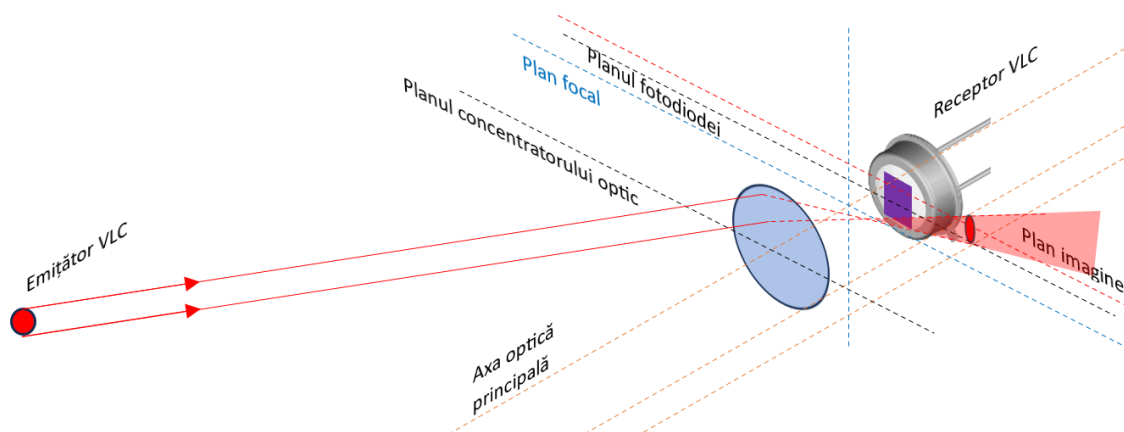


Figura 5 - Geometria legăturii V2V sau I2V a receptorului VLC îmbunătățit.

Pentru descrierea distribuției spațiale a iluminării sursei de lumină s-a folosit modelul Lambertian, definit prin ecuația (3):

$$E(\theta) = E(0) \cdot \cos \theta \quad (3)$$

unde $E(0)$ este iluminarea perpendiculară și θ este unghiul dintre direcția fasciculului și planul perpendicular al suprafeței unde este proiectată lumina. Într-o primă aproximație, se ia în considerare doar lumina incidentă perpendiculară. Fluxul incident (ϕ_{lens}) pe lentila care este analizată este descrisă de:

$$\phi_{\text{lens}} = \frac{R_{\text{lens}}^2}{d_l^2} \phi \quad (4)$$

unde R_{lens} reprezintă raza lentilei, d_l distanța dintre sursa de lumină și lentilă iar ϕ este fluxul emis de sursă. În ceea ce privește lumina incidentă asupra receptorului fără lentilă, fluxul incident pe receptor (ϕ_{receiver}) este determinat de:

$$\phi_{\text{receiver}} = \frac{A}{\pi d_r^2} \phi \quad (5)$$

unde A este zona activă a fotodiodei și d_r distanța dintre sursa de lumină și receptor. Deoarece în practică distanța focală va fi mult mai mică decât distanța între sursă și receptor, implicațiile sale în calculul acestei amplificări optice pot fi neglijate, iar $d_1 \sim d_r$. Drept urmare, factorul de amplificarea optică ε , calculat prin raportarea fluxului incident pe receptor obținut prin concentrarea pe zona activă a fotodiodei a întregului flux incident pe lentilă și fluxul incident pe zona activă a fotodiodei în absența lentilei poate fi aproximat prin ecuația (6), împărțind termenii din dreapta ai ecuațiilor (4) și (5), și neglijând diferența dintre cele 2 distanțe:

$$\varepsilon = \frac{\pi R_{\text{lens}}^2}{A} \quad (6)$$

Pornind de la caracteristicile tehnice ale unei fotodiode comerciale, am considerat aria zonei active a fotoreceptorului VLC ca fiind $7,5 \text{ mm}^2$ și am reprezentat grafic în Figura 6 impactul dimensiunii lentilei asupra factorului de amplificare optică, cu implicații directe asupra îmbunătățirii performanțelor receptorului VLC.

În tabelul 1 sunt sintetizate rezultatele teoretice obținute pentru câteva caracteristici fotometrice și geometrice ale sistemului VLC, considerând sursa și receptorul coliniare (situație întâlnită în comunicațiile V2V de tip pluton) la diverse distanțe între 1 m și 150 m, o strălucire a sursei de 200 cd și o rază a lentilei concentratoare de 15 mm.

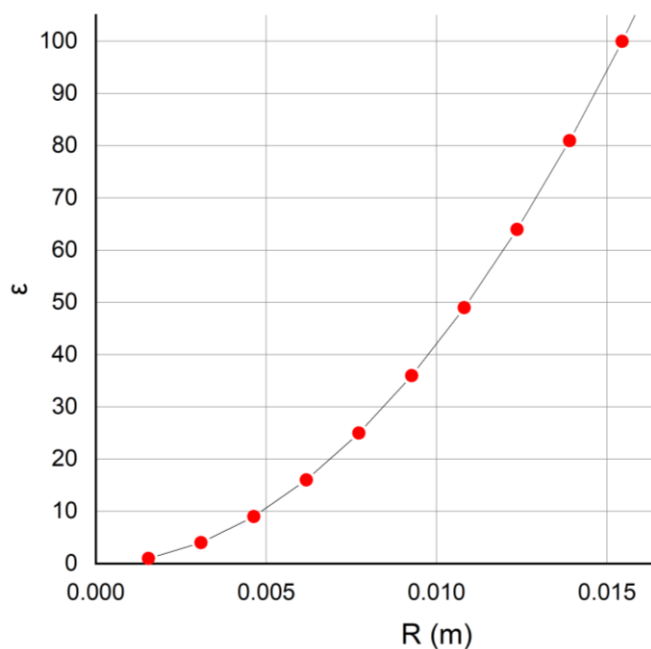


Figura 6 - Analiza factorului de amplificare optică

Tabelul 1 - Valori metrice și fotometrice

Distanță [m]	1	20	50	100	150
Strălucire [cd]	200	5.0E-1	8.0E-2	2.0E-2	8.89E-3
Unghi de vizualizare (° ‘ “)	5° 42’ 38”	0° 17’ 11”	0° 6’ 53”	0° 3’ 26”	0° 2’ 18”
Unghi solid sursă de lumină [sr]	9.92E-01	2.56E-01	4.12E-02	1.03E-02	4.59E-03
Dimensiunile imaginii sursă prin lentilă [m]	3.33E-01	2.53E-01	2.51E-01	2.51E-01	2.50E-01
Mărire liniară transversală	-3.33E-01	-1.27E-02	-5.03E-03	-2.51E-03	-1.67E-03

În tabelul 2 sunt sintetizate rezultatele teoretice obținute în cazuri când axa emițătorului VLC este diferită de cea a receptorului VLC (scenarii necoliniare), fiind evidențiate 3 situații inspirate din cazuri practice [57], [58], [59]:

- Legătură I2V VLC - Cazul 1 - pentru o sursă semafor instalată la 4,7 metri deasupra drumului cu un vehicul apropiindu-se de semafor de la o distanță de 150 m.
- Legătură I2V VLC - Cazul 2 - pentru o sursă semafor instalată la 2,7 metri deasupra părții laterale a drumului (axa verticală și orizontală) cu un vehicul apropiindu-se de semafor de la o distanță de 150 m, măsurată pe axul drumului.
- Legătura V2V VLC - Cazul 3 - presupunem un drum îngust cu o lățime de 4 metri, cu o bandă pe fiecare direcție în care se desfășoară traficul în mod normal iar mașinile, cu o lățime de 1,8m, se apropie din sensuri opuse de la o distanță de 150 m, măsurată pe axul drumului. Locația corespunzătoare instalării receptorului VLC corespunde la 0,2 metri de marginea stângă a mașinii și la 0,5 metri față de sol ca înălțime de instalare. Astfel, între două vehicule care circulă pe marginea dreaptă a direcției lor de deplasare, pentru o conexiune temporară VLC V2V identificăm o distanță laterală de aproximativ 0,8 metri și 0 metri pe distanță verticală. Pentru simplificare nu se ia în considerare nici o pantă a terenului și nici o ajustare a unghiului surselor de lumină.

Tabelul 2 - Cazuri versus factorul de amplificare optică

Caz	1 - I2V		2 - I2V		3 - V2V	
h [m]	4.2		2.2		0	
x [m]	0		1.6		-0.8	
Distanță polară [m]	4.2		2.72		0.8	
d [m]	θ (°)	ε	θ (°)	ε	θ (°)	ε
1	76.61	21.83	69.82	32.52	38.66	73.60
20	75.37	23.81	74.01	25.96	62.65	43.31
50	56.44	52.10	55.96	52.76	51.41	58.79
100	29.44	82.08	29.23	82.25	27.21	83.82
150	11.10	92.49	11.03	92.51	10.28	92.74

Analizând datele din Tabelul 2, putem observa că variația distanței are o influență redusă asupra amplificării optice pentru distanțe mari (între 100 și 150 m) și o influență semnificativă asupra amplificării optice pentru distanțe mici (de până la 50 m), influență ce se manifestă diferit în fiecare scenariu în parte. Scenariile astfel propuse ne oferă o perspectivă mai bună asupra problemelor pe care le putem întâlni în stabilirea unei legături VLC. Aceste aspecte justifică aprofundarea direcției de cercetare, fiind utilă o bază de date auto referitoare la sursele de lumină pentru a stabili configurația optimă pentru legăturile VLC temporare.

În concluzie, concentratorii optici măresc vizibilitatea emițătorului pentru fotoreceptor, ceea ce este vital pentru aplicațiile VLC din domeniul vehicular. Avantajul major al utilizării obiectivului este că mărește semnalul activ de intrare la receptor. Așa cum am amintit anterior, dezavantajul legat de amplificarea simultană și a zgomotului poate fi parțial compensat prin utilizarea unui filtru cu bandă îngustă potrivit picului de emisie a sursei emițătorului VLC.

Analiza complementarității comunicațiilor în radiofrecvență și în lumină vizibilă și dezvoltarea de tehnologii RF-VLC

Comunicațiile optice fără fir din spectrul vizibil, infraroșu și ultraviolet, oferă o bandă de frecvență cuprinsă între 300 GHz și 3000 THz, de aproximativ 10000 ori mai mare decât cea oferită de spectrul radio și microunde [60], [61]. Drept urmare, tehnologiile de comunicații optice fără fir au un potențial înalt în a furniza rate ridicate de transfer de date și de a contribui

la decongestionarea spectrului radio. Pentru a compensa limitările de bandă, tehnologia RF celulară se bazează pe refolosirea spațială a frecvențelor și pe reducerea dimensiunii celulelor. Făcând trecerea la comunicațiile optice, reducerea celulei de comunicație se poate face simplu întrucât lumina nu pătrunde prin materialele opace și astfel nu are nici o influență asupra datelor dintr-o încăpere alăturată. De aceea, comunicațiile optice fără fir furnizează o izolare spațială intrinsecă a celulelor învecinate. Pe baza acestor motive, tehnologiile wireless bazate pe lumină au un potențial foarte ridicat să devină tehnologii complementare celor radio în abordările hibride ce pregătesc generațiile viitoare de rețele de comunicații [62] [63].

O primă analiză comparativă și complementară a tehnologiilor RF și VLC pentru aplicații de siguranță rutieră a fost realizată în 2013, evidențiindu-se potențialul de dezvoltare al tehnologiei VLC [64]. Mai multe prototipuri VLC au confirmat ulterior performanțele așteptate în aplicații V2V [65] și I2V [66]. Recent, astfel de sisteme au demonstrat capacitatea de a realiza comunicații VLC viabile pe distanțe de până la 150 m [49], precum și menținerea acestora în cazul intensității puternice a luminilor parazite, ambientale sau a soarelui [67]. Sistemele VLC existente trebuie însă îmbunătățite în continuare, în termeni de rezistență la zgomot, distanță de comunicație și rata de transmisie a datelor, pentru a atinge nivel de maturitate tehnologică necesar tranziției către produse comerciale. O posibilă abordare a acestor probleme prezentate poate fi rezolvată prin dezvoltarea de sisteme VLC cu caracteristici de adaptare la context și mediu [68]. Ca urmare a acestei abordări, noile sistemele VLC pot evalua situația curentă și selecta în mod inteligent cea mai potrivită configurație pentru maximizarea capacității de comunicație VLC.

Pe de altă parte, implementarea celei de a 5-a generații de rețele celulare poate furniza latențe mult mai scăzute decât generațiile anterioare, estimându-se atingerea pragului de 1 ms, cu două ordine de mărime mai mic decât oferă 4G. Această caracteristică este esențială pentru a acționa în timp util în evitarea accidentelor, atât în tehnologiile de asistare a conducătorului auto cât și în tehnologiile informaționale și de comunicații necesare mașinilor autonome. În anul 2019 s-a lansat noul program inițiat de organizațiile partenere 3GPP cu scopul de a răspunde la noi direcții în implementarea comunicațiilor 5G [69]. Componentele acestui program aduce noi cerințe ce trebuie îndeplinite în termeni de trafic de date, densitate de conexiuni, comunicații critice și ultrafiabilitate, suportul pentru internetul lucrurilor [70]. Diversificarea acestor cerințe a avut ca scop tocmai utilizarea 5G în noi sectoare de activitate, inclusiv transportul rutier conectat sau autonom. În acest nou context, este oportună analiza comparativă și complementară a tehnologiilor emergente VLC și 5G C-V2X și dezvoltarea de prototipuri hibride prin utilizarea duală a acestor tehnologii [71], [72], [73].

O abordare practică a conceptului de tehnologie mixtă RF-VLC pentru aplicații de siguranță rutieră este prezentată în capitolul V al acestei teze de doctorat.

Capitolul IV: Dezvoltarea unui sistem de comunicații prin lumină vizibilă de la infrastructură către vehicul folosind diode electroluminiscente organice

O direcție importantă de cercetare a acestei teze este investigarea potențialului utilizării duale a dispozitivelor electroluminiscente organice (OLED), ce adaugă la iluminare și capacitatea de transmisie de date prin radiația vizibilă emisă. Piața globală OLED este în continuă creștere, depășind 38 de miliarde de dolari în 2022 și fiind estimată a atinge pragul de 100 miliarde de dolari până în 2028 [74]. Deși dominată de dispozitivele de afișare (OLED Displays), componenta de iluminat OLED are o pondere importantă din piață (18%) în condițiile în care se află încă în proces de tranziție de la o tehnologie de nișă la una de masă. Un interes deosebit este acordat tehnologiilor OLED pentru display-urile și sursele de lumină folosite în autovehicule, după cum rezultă și din raportul OLED for the Automotive Market publicat în septembrie 2023 [75]. Majoritatea producătorilor de autovehicule au trecut de la utilizarea OLED-urilor în interiorul mașinilor la folosirea lor pentru sisteme externe de semnalizare și iluminat în modelele de ultimă generație, situație ce stimulează investigarea conceptului de comunicații vehiculare pe bază de OLED.

La baza comunicațiilor de date stă capacitatea de modulație a sursei utilizate. Viteza de modulație este în principal limitată de rata la care electronii și golurile sunt transportați. Totodată, în folosirea dispozitive optoelectronice organice pentru comunicații, se constată că dispozitivele cu arii mari de lucru prezintă un răspuns dinamic mai lent din cauza comportamentului capacitiv [76]. În cadrul acestui capitol am încercat să răspundem acestei provocări pornind de la un set de panouri OLED comerciale (Tabelul 3) și dezvoltând un semafor OLED cu capacitate de transmisie de date, ce a fost integrat ulterior într-un sistem VLC funcțional.

Tabelul 3 – Fișa de specificații a panourilor OLED decorative, producător Sumitomo Chemical

	Unitate	Toleranță	Model	Model	Model
Culoare Luminiscentă			Roșu	Galben	Verde
Dimensiuni exterioare (a x b)	mm	±0.2	113x113	113x113	113x113
Dimensiunile părții emise	mm	±0.2	94x94	94x94	94x94
Grosime (parte emisivă)	mm	±0.2	1.2	1.2	1.2
Greutate (panou de sticlă)	g	-	26	26	26
Strălucire	cd/m ²	±30	300	200	300
Coordonate cromaticitate (CIE) (x)(y)		±0.02	0.566 0.272	0.437 0.451	0.242 0.562
Intensitate curent	mA	-	648	498	274
Curent maxim DC (25°C)	mA	-	842	647	356
Tensiune DC	V	±0.8	4.4	4.6	3.7
Putere DC	W	±0.50	2.90	2.30	1.00
Eficiență energetică	lm/W	±30	2.9	2.4	8.3
Durată de viață luminozitate: LT50 (25°C)	hr		30000	30000	50000

Întrucât scopul este de a adapta aceste panouri OLED decorative la un comportament în pulsuri, s-au studiat inițial caracteristicile curent-tensiune (I-V) ale acestora, rezultatele fiind prezentate în Figura 7 în curent continuu.

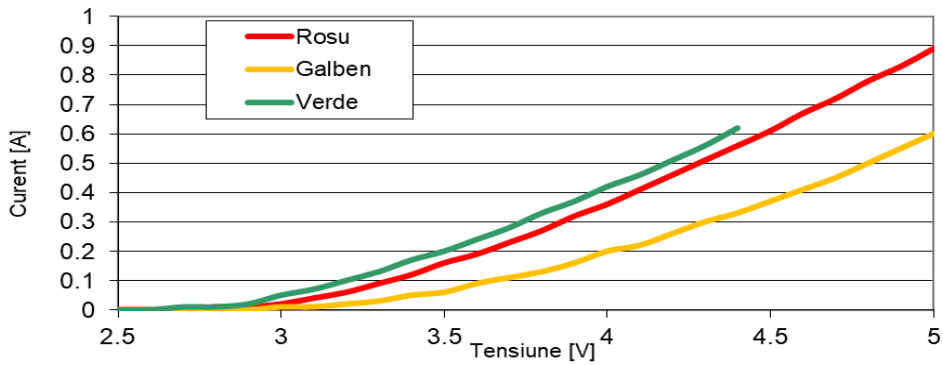


Figura 7 - Caracteristica I-V a panourilor având luminiscența în culoarea roșie, galbenă, verde.

Caracteristica de răspuns în frecvență nativă a panourilor OLED - 10-300 Hz

Într-o primă fază, utilizând generatorul de semnal s-a aplicat terminalelor unui panou OLED un semnal constant în amplitudine, după care s-a modificat treptat frecvența de apariție a acestuia pornind de la frecvențele joase către cele înalte. Variind frecvența semnalului de intrare de la 10 Hz, amplitudinea semnalului se reduce la jumătate la frecvența de ~300 Hz. Schema electrică asociată acestui prim test este prezentată în Figura 8. De asemenea, într-o altă investigație, s-a urmărit capacitatea electrică a fiecărui panou în parte, rezultatele arătând o capacitatea electrică constantă de 10,6 μF , indiferent de culoarea emisă. În aceste condiții, am obținut o bandă de frecvență cuprinsă între 10 și 300 Hz, o bandă de frecvență redusă și insuficientă pentru a realiza comunicații prin radiație vizibilă. În consecință, am studiat posibilitatea extinderii acestei benzi de frecvență.

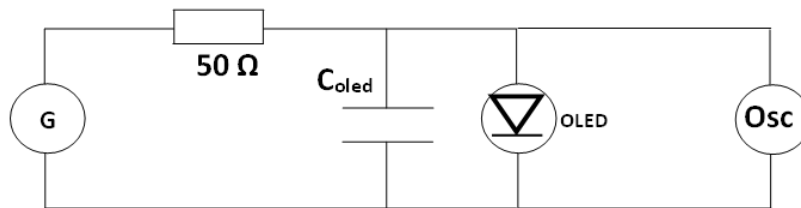


Figura 8 - Schema electrică pentru testele de frecvență inițiale

Creșterea capacității de răspuns în frecvență - 10 Hz – 2 kHz

Pentru creșterea capacității de răspuns în frecvență, am realizat câte un circuit de amplificare de clasă B în curent, cu scopul de a ridica frecvența de operare a fiecărui panou. Mai mult, în noua schemă electrică prezentată în Figura 9, cuplajul între amplificator și circuitul de alimentare al panoului s-a realizat printr-un condensator electrolitic cu capacitate electrică superioară față de capacitatea electrică echivalentă a panoului.

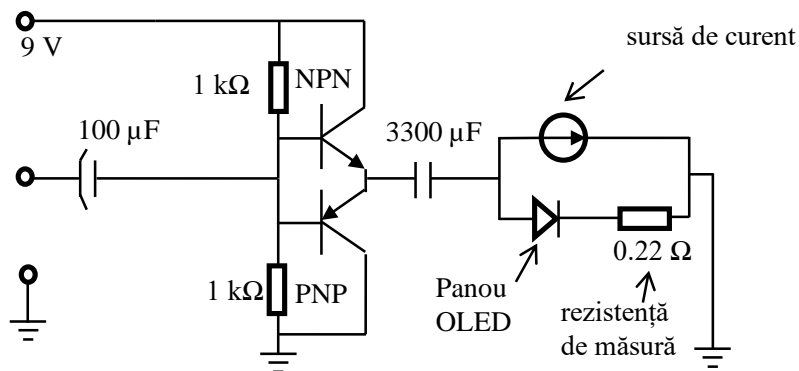


Figura 9 - Circuit inițial de amplificare

În acest test am utilizat tranzistorii NPN D2012, respectiv PNP TIP168. În urma verificărilor efectuate asupra curentului ce trece prin panoul OLED s-a observat că peste componenta continuă a curentului se suprapune un curent suplimentar furnizat de către generatorul (G) la intrarea amplificatorului. Astfel, pe partea pozitivă a semnalului de la intrare, tranzistorul NPN introduce sarcini suplimentare în condensatorul echivalent panoului OLED. Iar, pe partea negativă a semnalului de intrare, tranzistorul PNP preia sarcina acumulată în condensatorul echivalent al panoului OLED. Suma curenților traversează panoul OLED și rezistența de măsură aflată în serie cu acesta. Factorul de amplificare în curent se menține pentru o plajă de valori mai largă, fiind susținută de capacitatea internă a circuitului de amplificare, al capacității montajului propriu-zis precum și limitată de capacitățile parazite. În urma testelor de frecvență, amplitudinea semnalului la ieșire scade la jumătate sau are o scădere de 3 dB în jurul frecvenței de 2 kHz. Astfel în acest mod am obținut o creștere a benzii de frecvență de la 10-300 Hz la 10 Hz – 2 kHz.

Creșterea capacității de răspuns în frecvență - 10Hz – 20 kHz

Îmbunătățirea precedentă ne-a condus la un al doilea test, unde am testat un circuit de amplificare Darlington simulat. S-a urmărit creșterea amplificării comparativ cu cea furnizată de tranzistorii menționați anterior în circuitul de amplificare, menținând totodată tensiunea de deschidere de 0,6 V. Diferența majoră între noul circuit din Figura 10 și cel precedent este dată de faptul că s-a renunțat complet la sursa de curent a panoului OLED. Acest lucru a permis introducerea și scoaterea forțată a curentului din panoul OLED cu o frecvență mai mare decât cea stabilită anterior. Rezultatele obținute prin măsurare și vizualizare pe osciloscop au arătat că în circuitul nou am obținut o creștere a benzii de frecvență al panoului OLED până în jurul valorii de 20 kHz. Întrucât rezultatele au arătat o creștere de 10 ori a benzii de lucru în frecvență, de la 2 la 20 kHz, am propus un nou circuit de amplificare cu factor de amplificare înalt.

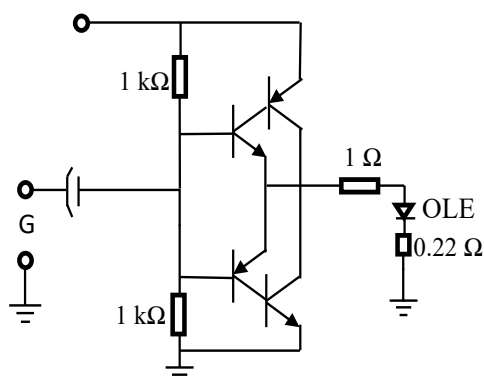


Figura 10 - Al doilea circuit de amplificare. Tranzistori complementari 2N2222 (PNP), BC517 (NPN).

Creșterea capacității de răspuns în frecvență - 10Hz – 50 kHz

Pentru cel de-al treilea circuit de amplificare din Figura 11, s-au selectat tranzistorii complementari TIP102 și TIP107, NPN, PNP, special concepuți pentru a gestiona curenți mari. În urma analizei rezultatelor la testele de frecvență, variind frecvența pulsurilor treaptă s-a constatat o urcare a punctului de lucru a panoului OLED până la frecvența de 50 kHz, la care amplitudinea inițială a semnalului de intrare este redusă la jumătate. Cu toate acestea, s-au observat de asemenea unele distorsiuni limitative, specifice circuitelor realizate pe breadboard. Acest lucru se datorează firelor lungi ce induc în circuit capacități și respectiv inductanțe parazite.

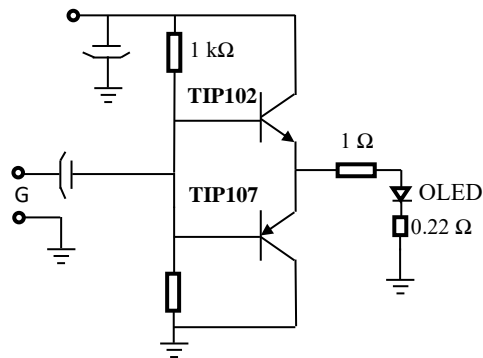


Figura 11 - Al treilea circuit de amplificare. Tranzistori complementari TIP102 (NPN), TIP107 (PNP)

Creșterea capacității de răspuns în frecvență - 10 Hz – 100 kHz

Pentru soluționarea inconvenientelor menționate și trasarea limitelor acestor panouri OLED s-a realizat un cablaj asociat schemei electrice pentru realizarea unui circuit de alimentare a panoului OLED în regim dinamic de frecvență ilustrat în Figura 12. După realizarea cablajului, montarea elementelor de circuit și testarea propriu-zisă s-a observat un comportament, respectiv o formă a semnalului de ieșire pe panoul OLED cu distorsiuni reduse, respectiv o iluminanță a panoului mai slabă. Pentru a corecta aceste două aspecte, s-a modificat rezistorul aflat între baza tranzistorului NPN și masă, cu unul având rezistența electrică de 1,8 kΩ. În consecință, iluminarea a devenit nominală, cu particularitatea că acest panou OLED, pe lângă funcția de iluminare, este capabil să transmită date prin intermediul luminii emise în corelație cu semnalului aplicat la intrarea amplificatorului. În urma repetării testelor anterioare în vederea evaluării benzii de frecvență, amplitudinea semnalului recepționat de osciloscop se înjumătățește în jurul frecvenței de 50 kHz. Peste această valoare, apar mici distorsiuni asupra formei, însă acestea nu foarte pronunțate până la frecvența de 100 kHz. Peste această frecvență, forma de undă a semnalului dreptunghiular se schimbă spre una cu formă triunghiulară.

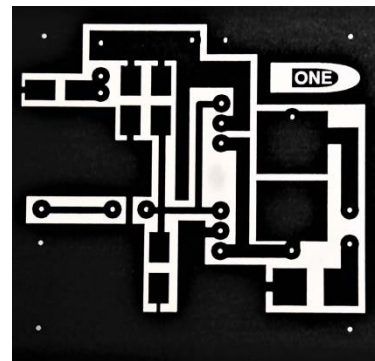
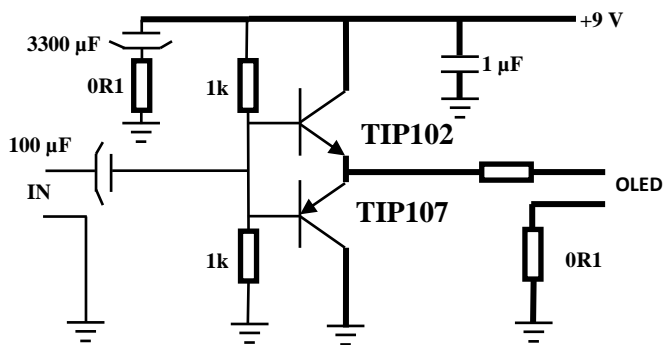


Figura 12 - Circuit de alimentare al panoului OLED în regim dinamic de frecvență (stânga). Cablajul asociat circuitului de alimentare al panoului OLED (dreapta). Tranzistori complementari TIP102 (NPN), TIP107 (PNP)

Concluzie

Răspunsul inițial în frecvență a panourilor OLED a fost unul foarte redus. Prin utilizarea de tehnici de amplificare și definitivarea formei finale a circuitului de amplificare s-a realizat o creștere a capacității de răspuns de 3 ordine de mărime, de la o bandă în frecvență de 10-300 Hz la 10-100000 Hz. Astfel, putem concluziona că obiectivul de a dezvolta o sursă de lumină capabilă de comunicație VLC a fost atins.

Contribuții la dezvoltarea unui semafor OLED capabil de comunicații VLC vehiculare

Etapele premergătoare ale acestui proiect au constat în realizarea CAD a suporturilor și imprimarea 3D a acestora utilizând ca material de fabricație acidul polilactic PLA ilustrat în imaginile din Figura 13. Se observă îmbinarea suporturilor de plastic imprimați 3D, circuitele de alimentare ale cablajelor aferente panourilor OLED prezentate în secțiunile anterioare, precum și panourile OLED așezate în spații special proiectate.

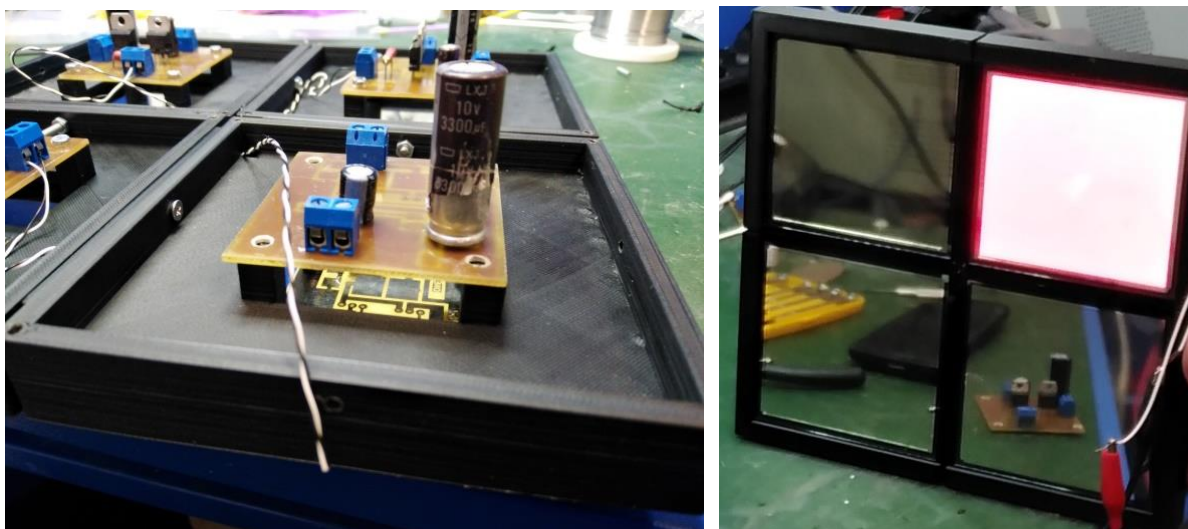


Figura 13 - Suporturi PLA îmbinați cu circuitele de alimentare al panourilor OLED (stânga), respectiv îmbinarea panourilor OLED în spațiile special proiectate în suporturi PLA

După montarea fiecărui capăt de iluminare pentru fiecare culoare roșu, galben, verde, acestea au fost așezate pe un suport vertical cu înălțime reglabilă, semaforul astfel realizat fiind constituit din 12 panouri OLED, 4 panouri pentru fiecare capăt de iluminare, respectiv 12 circuite de alimentare și comandă asociate (Figura 14). Emițătorul VLC reprezentat în Figurile 14 și 15 constă într-o multitudine de surse de lumină OLED conectate la circuitul de alimentare individual, la care se poate aplica un semnal de intrare de la generatorul de semnal. În studiul nostru fiecare capăt de iluminare a prezentat 4 panouri OLED cu circuite de alimentare și comandă independente. Semnalul extern circuitului de comandă a furnizat informații care se traduc în variațiile intensității luminii emise. Semnalul de intrare, precum în testele anterioare a fost unul cu formă dreptunghiulară, a cărui de frecvență de pornire a fost stabilită la frecvența de 1 kHz. Frecvența a fost crescută în testele de interior până la 100 kHz pentru a studia acoperirea de bandă în raport cu distanța. Modulația utilizată este de tipul ASK, *Amplitude Shift Keying*, unde semnalul de intrare suferă o variație în amplitudine. În cazul de față, modulația utilizată poartă numele de OOK, *On-Off keying*, întrucât amplitudinea variază între nivelele asociate pornit-oprit, pentru transmisia bitului 1, respectiv 0 în cazul absenței luminii.



Figura 14 - Infrastructură de tip semafor realizată cu panouri OLED cu luminiscentă în culoarea roșie, galbenă și verde.



Figura 15 - Emițători VLC, testare capete de iluminare

Receptorul VLC al sistemului este compus dintr-o fotodiodă, un circuit de amplificare, respectiv un bloc de reconstrucție și decodare a semnalului inițial. În cazul de față s-a utilizat o fotodiodă receptoare din silicon Thorlabs, cu circuit de amplificare intern de transimpedanță ajustabil (TIA), ilustrat în Figura 16. Ieșirea de la amplificatorul de transimpedanță este trecută printr-un circuit de control cu câștig adaptativ (AGC), urmat de un filtru trece bandă și respectiv un trigger Schmitt. Pentru investigarea semnalului recepționat și a procesărilor succesive de semnal, în cadrul testelor de interior s-au urmărit toate semnalele aferent cu a ajutorul unui osciloscop Tektronix TBS1104. Testele efectuate în interiorul laboratorului reflectă comunicația VLC I2V între un semnafor OLED și un vehicul staționar și au avut drept scop validarea funcționalității prototipului și a nivelului de maturitate tehnologică la care se află (TRL 4), oferind totodată informații despre caracteristicile tehnice ale acestuia precum banda de frecvență, distanța de comunicație, rata de eroare a biților.



Figura 16 - Receptor VLC și sistemul VLC în cadrul testelor efectuate în interiorul laboratorului

Diagrama bloc pentru sistemul OLED VLC I2V dezvoltat și pentru standul de test este reprezentată în Figura 17. Testele preliminare privind banda de frecvență au fost realizate în raport cu semnalul de intrare. măsurătorile efectuate asupra circuitului de alimentare și comandă OLED sunt ilustrate în Figurile 18 și 19. În ordine crescătoare al canalelor sunt reprezentate: semnalul de la generatorul de semnal, semnalul de la bornele panoului OLED, semnalul prin condensatorul de decuplare și respectiv curentul prin panoul OLED dat de rezistența de măsură cuplată în serie. După cum se poate observa și din aceste secvențe, avansarea în frecvență a semnalului de intrare are un efect observabil asupra formei de emisie a semnalului la nivelul panoului. Pe frontul pozitiv al semnalului se observă o creștere lentă pe un interval de 5 μ s. De asemenea pe frontul descendent, scăderea în amplitudine este și de mai lentă, pe un interval de timp de 20 μ s. Măsurările efectuate peste frecvența de 100 de kHz au arătat că forma semnalului la ieșire devine triunghiulară, conducând la stabilirea benzii de frecvență pentru emițătorul OLED VLC dezvoltat. Pentru al doilea set de teste, sistemul VLC a fost configurat coliniar, receptorul VLC aflându-se în aliniament cu centrul semaforului.

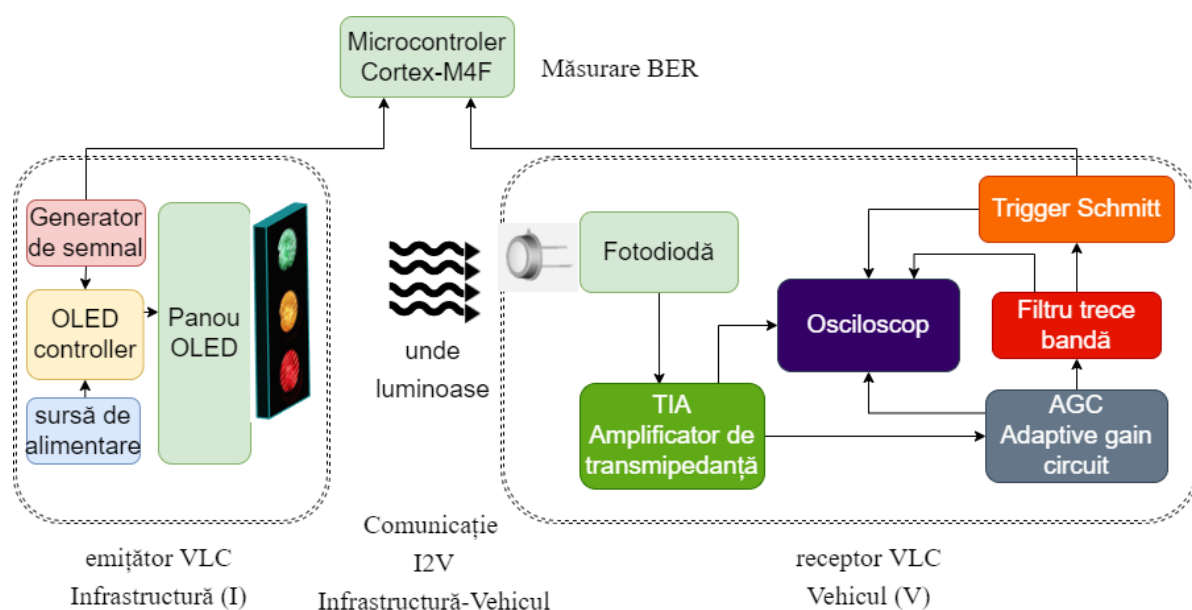


Figura 17 - Diagrama bloc a sistemului OLED VLC I2V dezvoltat și a standului de test.

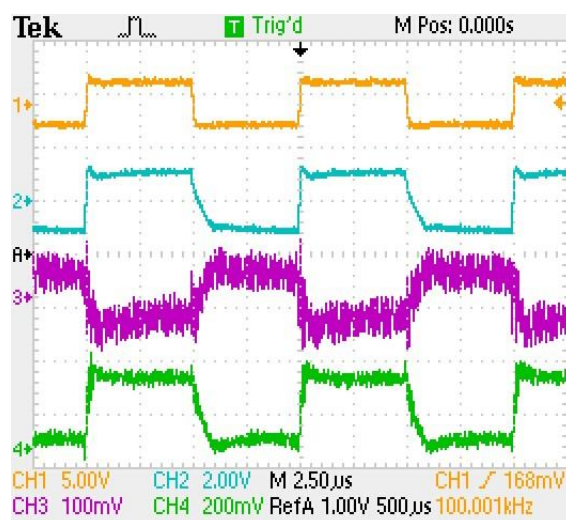
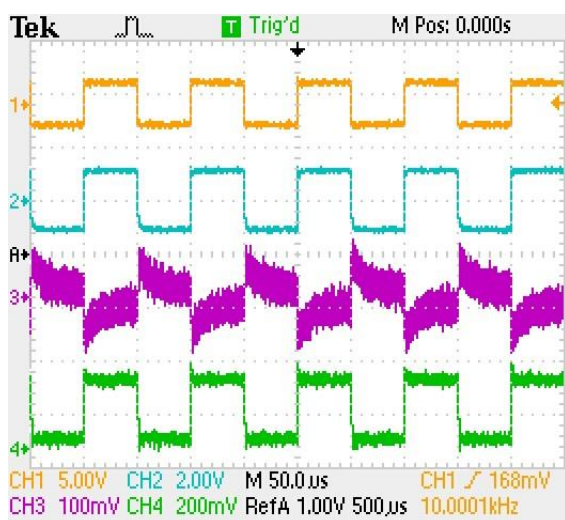


Figura 18. Măsurători efectuate la frecvența 10 kHz Figura 19. Măsurători efectuate la frecvența 100 kHz

Receptorul VLC a fost îndepărtat treptat față de emițătorul VLC până la o distanță de 20 metri, Figurile 20 și 21 ilustrând rezultatele obținute pentru frecvențele de 50 și respectiv de 100 kHz, la o distanță dintre emițător și receptor de 20 m, măsurătorile prezentând semnalul de colectat pe diferite canale: CH1- TIA, CH2- AGC, CH3- filtru trece bandă, respectiv CH4 - trigger Schmitt. Acest demers face posibilă verificarea corectitudinii informației recepționate. În Figura 21 se poate observa, de asemenea, că odată cu creșterea frecvenței semnalului de intrare, amplitudinea semnalului colectat la ieșirea fotodiodei scade. Drept urmare, o amplificare ridicată trebuie oferită de circuitul TIA pentru a menține amplitudinea semnalului la un nivel suficient de înalt pentru declanșarea Schmitt triggerului, menținând astfel transmisia de informații prin lumină vizibilă. Măsurătorile de mai sus arată disponibilitatea a unei legături VLC pe o distanță de 20 metri.

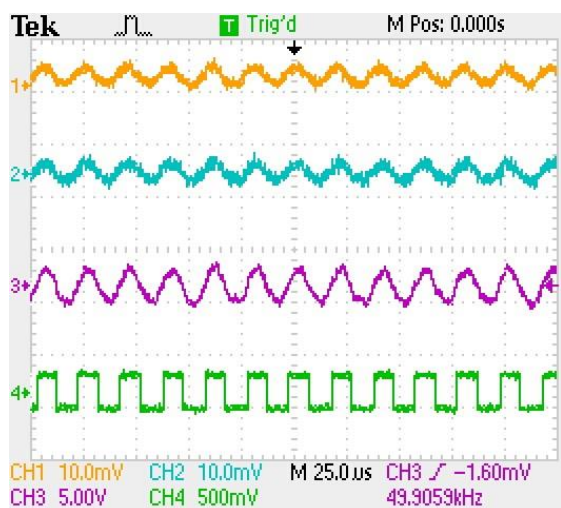


Figura 20 - Legătură VLC la 20 metri și 50 kHz

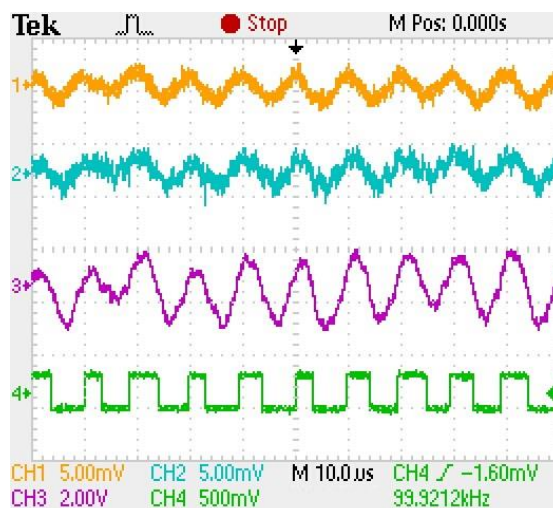


Figura 21 - Legătură VLC la 20 metri și 100 kHz

Investigațiile noastre au arătat că banda de operare a emițătorului VLC este puternic influențată de capacitățile electrice parazite a celulei OLED, care peste frecvența de 100 kHz introduce distorsiuni asupra semnalului emis. Ca urmare a acestei observații, construcția de dispozitive bazate pe panouri OLED cu dimensiune mai redusă, ar putea fi utilizate pentru a atinge o bandă de operare mai largă. În ceea ce privește robustețea semnalului recepționat, mai multe măsurători au fost efectuate pentru a stabili rata de apariție a erorilor (BER) la o frecvență fixă de 11 kHz a transmisiei semnalului activ. Pe timpul operării, amplitudinea semnalului și a parametrilor de operare a panourilor OLED au fost păstrate la nivel nominal. Măsurătorile de BER efectuate au fost realizate prin eșantionarea simultană a semnalului electric original de intrare la generator, respectiv a semnalului procesat și colectat după triggerul Schmitt. Urmărirea acestui proces a fost realizată de un microcontroler Cortex-M4F pentru o succesiune de un milion de evenimente de margine. Folosind un algoritm specific, se numără erorile de transmisie prin compararea semnalului colectat după triggerul Schmitt cu semnalul original. Pe parcursul testelor distanța dintre receptorul și emițătorul VLC a variat până la 20 m [77], rezultatele obținute pentru BER la diverse distanțe între emițător și receptor fiind prezentate în Figura 22. Astfel se poate observa că sistemul este capabil de a transmite date cu nivele BER mai mici de 10^{-6} pe distanțe până la 5 m între emițător și receptor, cu nivele BER de ordinul 10^{-3} pe distanțe între 5 și 20 m și depășind 10^{-2} la distanțe de peste 20 m. În concluzie, rezultatele obținute sunt net superioare raportărilor prezentate în capitolul II cu rezultate recente privind sisteme de comunicații VLC pe bază de surse OLED, publicate în literatura de specialitate. Este important de menționat că pentru aceste teste de comunicație nu s-au folosit coduri de corecție a erorilor sau concentratori sau amplificatori optici, de tipul celor propuși în capitolul III, ceea ce oferă un potențial considerabil de îmbunătățire a BER-ului pentru acest sistem.

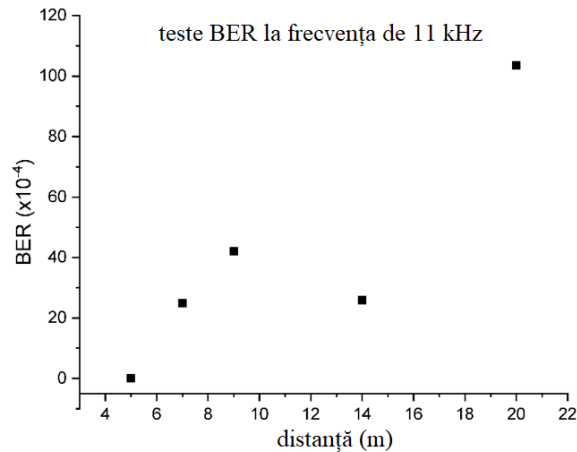


Figura 22 - Bit Error Rate (BER) pentru semnalul de intrare, modulație OOK la frecvența de 11 kHz

Sistem integrat de detecție a unor evenimente din trafic și comunicație VLC între vehicul și infrastructură a informațiilor relevante pentru creșterea siguranței rutiere

Detecția automată a situațiilor periculoase a devenit o importantă direcție de cercetare în domeniul siguranței rutiere și traficului rutier inteligent. În contextul numărului mare de accidente rutiere și a congestiei urbane masive, noi soluții tehnice trebuie identificate pentru abordarea acestor probleme. Sistemele inteligente de detecție cu aplicații ce folosesc fluxul video al camerelor de luat vederi, cu și fără feedback din partea senzorilor LIDAR, reprezintă o astfel de direcție de cercetare ce poate veni în sprijinul traficului rutier pentru a detecta în timp real un posibil pericol sau alte evenimente din trafic. În această secțiune, voi prezenta câteva contribuții preliminare în această direcție, cu scopul de a utiliza avertizările obținute nu doar pentru asistarea conducătorului auto ci și pentru a le transmite printr-un sistem de comunicații vehiculare către alți participanți la trafic ce ar putea fi interesați / avertizați. Prezenta abordare se bazează pe tehnologii standard de recunoaștere vizuală computerizată pentru analiza fluxului video și detecția unor clase de obiecte, declanșată de depășirea unui prag. Odată ce se depășește pragul de detecție, informații relevante sunt comunicate șoferului autovehiculului, sistemului de trafic inteligent, precum și altor vehicule participante la trafic. Problema abordată are un grad foarte ridicat de complexitate, mai ales că factorul uman este adesea imprevizibil iar mișcărilor acestuia sunt uneori ambigui. Reamintim faptul că un număr mare de accidente rutiere sunt cauzate de erori umane ale pietonilor, șoferilor și a altor participanți la trafic. Din acest motiv, monitorizarea și transmiterea în timp util a informațiilor relevante către participanții la trafic și sistemul de management al traficului au o importanță deosebită. Un model propus de noi în această direcție este prezentat schematic în Figura 23.

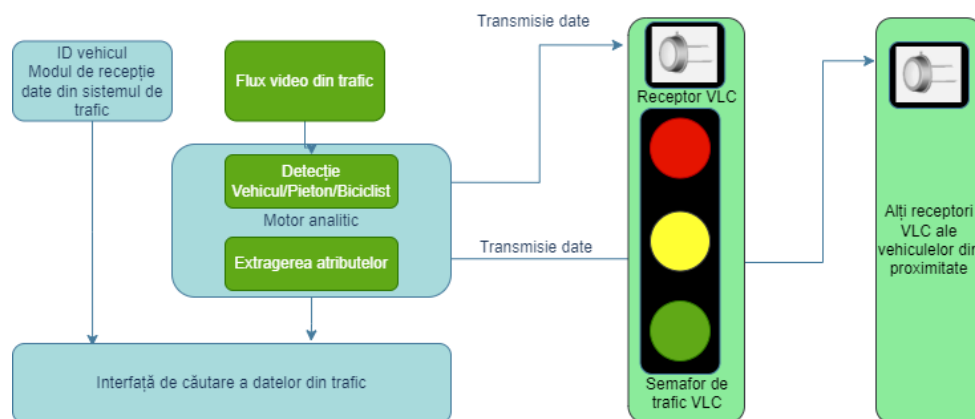


Figura 23 – Prezentarea schematică a sistemului integrat de detecție a unor evenimente din trafic și comunicație VLC între vehicul și infrastructură pentru creșterea siguranței rutiere.

Recepția VLC la nivelul autovehiculului se realizează cu ajutorul unei fotodiode, a unui circuit cu rol de amplificare și decodare, și a unui sistem de procesare a semnalelor și de detecție a informațiilor relevante, ce vor fi transmise pentru afișare pe navigația mașinii. Această avertizare se poate face și prin alte metode, precum folosirea sistemului audio sau utilizarea unui *Head-Up Display* (HUD). Un receptor VLC similar trebuie instalat și la semafor, ce este conectat la rețeaua infrastructurii rutiere și permite astfel distribuția bidirecțională a informațiilor relevante, primite de la centrul rețelei sau de la alte vehicule conectate. Dacă managementul inteligent al traficului necesită resurse suplimentare semnificative ce ar putea să nu fie disponibile pe scală largă, interconectarea vehiculelor la infrastructura rutieră poate avea aplicații imediate prin transmiterea informațiilor relevante către serviciul de salvare, pompieri, poliție, administratorul de drum pentru identificarea și localizarea problemelor și pentru intervenția în timp util în rezolvarea acestora.

Pentru a dezvolta un protocol general de diseminare a informațiilor relevante am elaborat o diagramă a fluxului de date, în zonele de interes exprimate anterior pentru acoperirea comunicațiilor V2X. În absența informațiilor, sursele de lumină revin la starea primară de funcționare în mod continuu, astfel încât atunci când informația dispare sau nu mai este valabilă, se încheie și transmisia. Putem spune că detecția uneia dintre clase acționează ca un declanșator în determinarea transmisiei și se menține pe toată durata detecției, la care se adaugă informațiile vehiculate în banda de comunicații VLC. Odată ce tipul unei clase este detectat, o casetă evidențiază fiecare element detectat, iar un mesaj specific este pregătit pentru clasa detectată este transmis către lista de prioritizare. De aici se face diseminarea informațiilor HUD/navigație/sistemul sonor al autovehiculului și către ceilalți participanți la trafic sau infrastructură, prin sistemele VLC disponibile. În Figura 24 este reprezentată diagrama fluxului de date descris anterior. Conform testelor experimentale efectuate, precum cel ilustrat în Figura 25, detecția claselor necesită în prezent între 50-100 milisecunde, timpul de detecție ce poate fi îmbunătățit prin utilizarea unor plăci de dezvoltare mai performante [78].

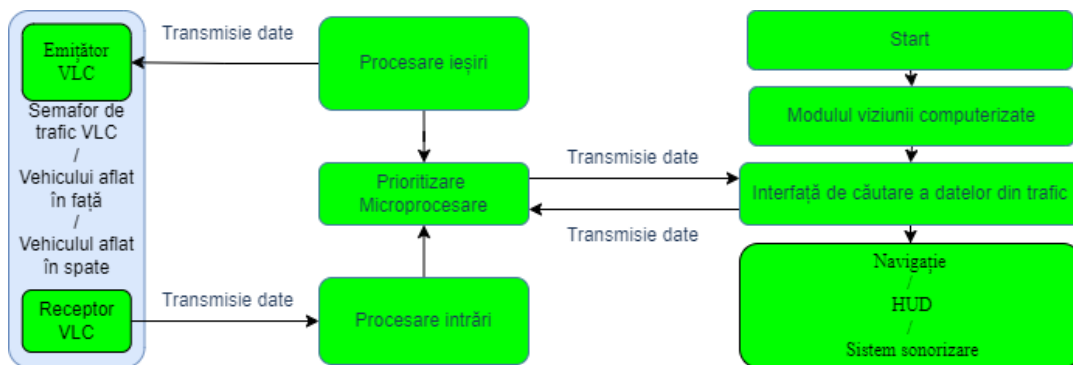


Figura 24 - Fluxul de data în cadrul sistemului de siguranță V2X – îndeplinit prin cooperarea a două plăci de dezvoltare privind intrarea și ieșirea datelor

Figura 25 – Test experimental privind reunoașterea automată a claselor de obiecte folosind tehnologii standard recunoaștere vizuală computerizată pentru analiza fluxului video.

Timp de inferență
0.055 s
Clase de obiecte:
Mașină: 91.76%
Autobuz: 83.24%
Camion: 70.68%
Persoană: 70.10%



Capitolul V: Tehnologii mixte RF-VLC pentru aplicații de siguranță rutieră

Tehnologia eSim reprezintă o formă de comunicație mobilă special concepută pentru implementare în cadrul autovehiculelor. Mai multe companii din domeniu au anunțat utilizarea acestei tehnologii în vederea administrării conectivității pentru sistemul de infotainment sau a altor dispozitive conectate [79], [80], [81]. Unele implementări menționează că pot facilita subscripția la mai mulți operatori de telefonie mobilă, respectând totodată cerințele de calitate în domeniul auto. Unul dintre promotorii acestei tehnologii este grupul Ericsson care a ajutat la inițierea eSim pe piața platformelor Internet-of-Things încă din anul 2012 [82]. În studiul prezentat în acest capitol, eSim beneficiază de benzi de comunicație pentru LTE, 4G și 5G, asigurând o latență scăzută și o viteză de transfer superioară tehnologiilor mobile anterioare.

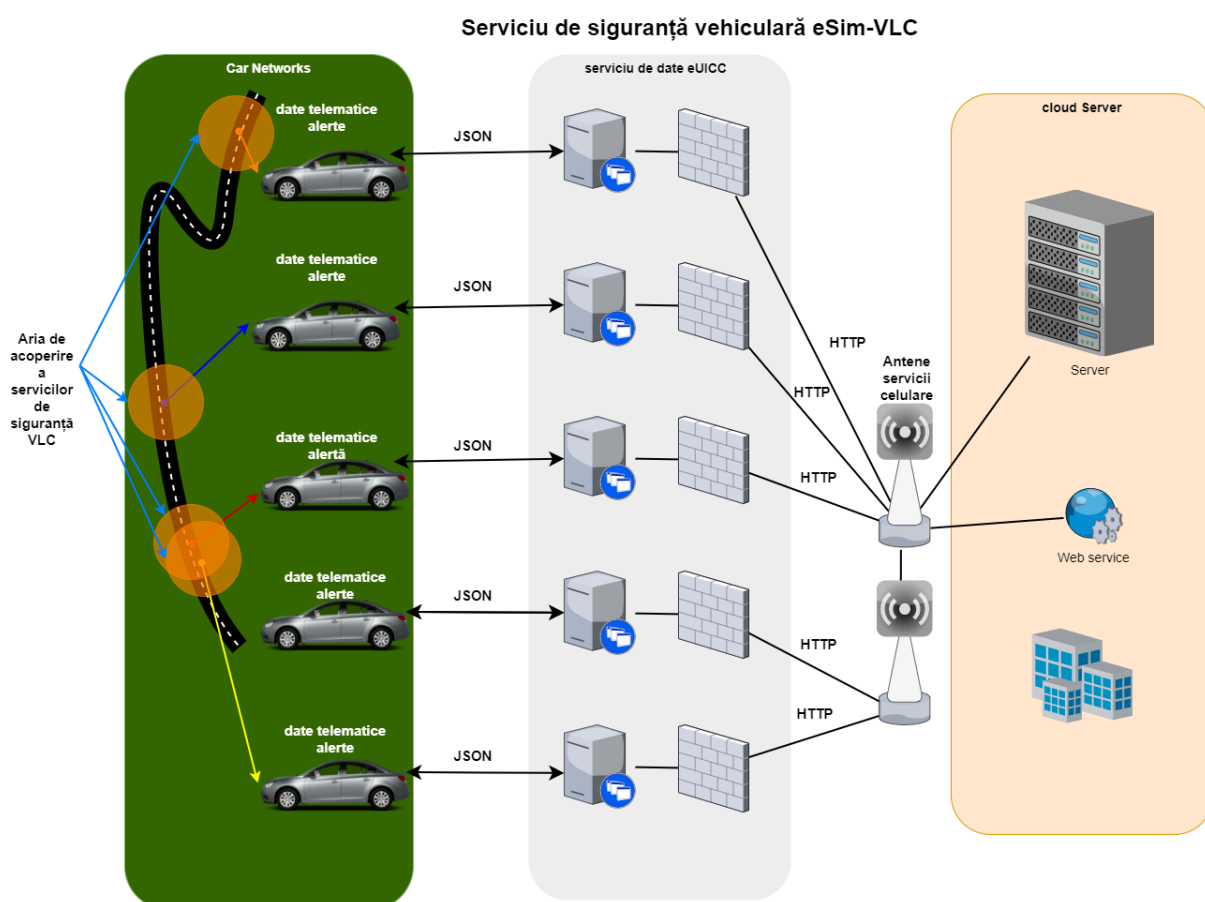


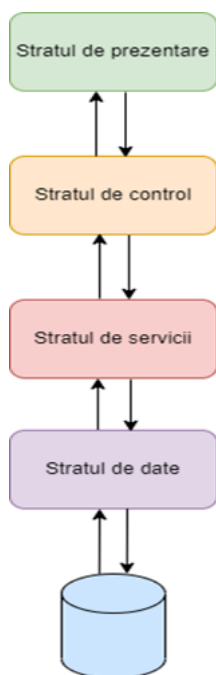
Figura 26 – Diagrama serviciului de siguranță vehiculară eSim-VLC

În scopul definirii mixului de tehnologii propunem o aplicație bazată pe protocolul de comunicație Hypertext Transfer Protocol (HTTP) oferit prin comunicațiile LTE. Aplicația are ca scop realizarea a două servicii de siguranță vehiculară bazate pe eSim, care vin în sprijinul facilitării schimbului de informații din trafic, complementând serviciul VLC de siguranță vehiculară. Este important de menționat că aceste servicii reprezintă surse alternative de informare vehiculară externe canalelor infrastructurii informatice rutiere standard, precum ITS. O diagramă desfășurată a acestui mix de tehnologii este prezentată în Figura 26. Serviciile de siguranță vehiculară bazate pe eSim transmit date telematice (id unic, drum, poziție, direcție) și alerte de trafic în format JSON [83].

Un prim scop al serviciului de siguranță vehiculară eSim-VLC este de a deservi toate vehiculele aflate pe un sector de drum, vehiculele care pot emite și primi alerte din trafic în baza senzorilor onboard, utilizând un protocol de prioritizare a informațiilor la nivelul mașinii. O altă implementare previzionată a acestui serviciu constă în deservirea vehiculelor aflate în misiune, care pe lângă serviciul specific destinat tuturor vehiculelor, apelează serviciul de siguranță vehiculară pe direcția înainte. Această metodă va asigura informarea participanților la trafic aflați în coloană, conducând la disponibilizarea eficientă a unei benzi de mers sau facilitarea formării unui culoar de trecere pentru vehiculele de urgență, ambulanță, poliție, descarcerare, pompieri și alte vehicule aflate în misiune.

Pentru proiectarea și realizarea serviciului de siguranță prin modulul eSim s-au făcut câteva presupuneri cu privire la informațiile necesare:

- Mașinile prezente în trafic la un anumit moment sunt dotate cu câte un modul eSim, pentru a facilita comunicația cu serverul ce gestionează serviciul de siguranță rutieră eSim, și cu sisteme de iluminare capabile de comunicații VLC vehiculare pentru emisie și recepție;
- Există acces la toate informațiile trimise de la fiecare vehicul în parte: telematice și alerte;
- Are loc schimbul de informații între cele două tipuri de comunicații eSim și VLC, inclusiv a informațiilor existente on-board prin intermediul senzorilor sau a modulelor de siguranță în vederea desemnării alertelor.



Aplicația de siguranță vehiculară este o aplicație web a cărei arhitectură dispusă pe patru nivele conform Figurii 27. Stratul de prezentare – este stratul care are ca scop prezentarea alertelor din rețeaua vehiculară. Acesta rămâne la nivelul autovehiculelor, întrucât la nivelul serverului acesta nu este necesar. Stratul de control – în cadrul acestui strat se implementează o componentă REST API, care facilitează comunicația între cererile utilizatorului prin protocolul HTTP, între mașina și stratul de servicii. Stratul de servicii – asigură o legătură indirectă cu serverul ce stochează datele. Informațiile disponibile în acest strat sunt disponibile prin intermediul unui sistem de cache. Stratul de date – în cadrul acestui strat s-a implementat o aplicație Spring Data JPA. Aplicația facilitează persistența datelor și nevoia de a prelua informații dintr-un sistem de stocare nevolatil.

Figura 27 - Arhitectura aplicației de siguranță vehiculară

Evenimentele recente au arătat că un singur sistem nu poate răspunde la toate cazurile de utilizare cu risc ridicat. Ca răspuns la problema identificată, se propune o soluție tehnologică mixtă pentru a obține un nivel mai ridicat de siguranță în transportul rutier. Mixul tehnologic este compus dintr-o tehnologie optică care utilizează VLC, pentru a trimite și primi date relevante pentru siguranță, și o tehnologie radio mobilă, asigurând conectivitatea 4G sau 5G printr-un dispozitiv cu dimensiuni reduse, facilitând totodată urmărirea poziției mașinii la intervale regulate de timp.

Mesajele VLC primite pot fi prezentate șoferului și, în același timp, pot fi transmise emițătorului VLC situat în spate, prin modulația luminii stopurilor. Prin urmare, mașina aflată în spatele mașinii șoferului poate primi același mesaj, cu o anumită întârziere. Consecutiv, tehnologia mobilă poate aduce mesaje de la surse de informare noi, care nu sunt în câmpul vizual al receptorului VLC (NLoS), fie de la un ITS, fie de la un alt utilizator de drum. Utilizarea celor 2 tehnologii (VLC și eSIM) este una complementară.

În scopul dezvoltării unei aplicații care să cuprindă tehnologia de comunicație VLC și comunicația mobilă am conceput o aplicație Android pentru a facilita comunicarea unor alerte din partea participanților la trafic pe un sector de drum. Un dispozitiv Android al utilizatorului de drum este folosit pentru a vizualiza alertele curente ce îl privesc pe conducătorul auto, respectiv pentru a emite și stabili noi alerte. Designul hardware al aplicației este reprezentat în Figura 28. Aplicația Android dispune o singură pagină pentru vizualizarea alertelor de pe sectorul de drum curent, respectiv pentru emiterea unor alerte noi printr-o singură interacțiune cu dispozitivul. Pentru emiterea de alerte se poate alege una din cele 15 alerte. Ordinea de transmisie și recepție respectă conceptul de prioritizare conform legislației rutiere.

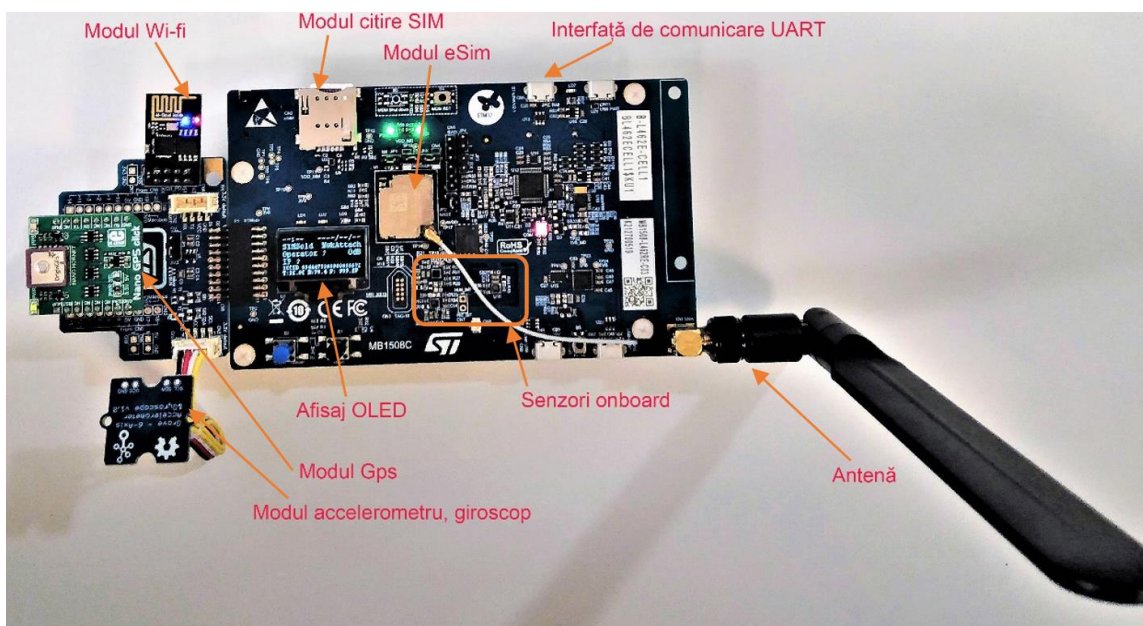


Figura 28 - Dispozitiv de comunicare mobilă IoT



Oricare din cele 15 alerte propuse în această dezvoltare, aduc modificări la regimul normal de circulație prin intermediul mesajului de alerta ales. În cazul nostru, în propunerea de tehnologie mixtă, fiecare tehnologie trebuie să fie implementată și să funcționeze independent, și să faciliteze schimbul de informații de la una la cealaltă. Astfel, vor exista două canale de comunicare de la o mașină la alta. Al doilea canal, cel al comunicațiilor mobile între vehicule, va fi susținut de microservicii în cloud. Această propunere, ce îmbină tehnologiile de comunicație fără fir VLC și tehnologiile de comunicație mobilă prin soluția software descrisă, are potențialul de fi implementată în realizarea de aplicații de siguranță rutieră VLC cu o mai bună acoperire.

Capitolul VI: Concluzii generale, sinteza contribuțiilor originale și diseminarea rezultatelor cercetării

Teza de doctorat intitulată ”Contribuții la dezvoltarea de dispozitive optoelectronice, tehnologii informaționale și de comunicații pentru telematica rutieră” prezintă aspecte legate de creșterea performanțelor materialelor organice și a materialelor corelate pentru dispozitive optoelectronice, de stadiul dezvoltării comunicațiilor fără fir prin lumină vizibilă folosind diode electroluminiscente organice, de utilizarea concentratorilor optici pentru îmbunătățirea performanțelor comunicațiilor VLC, de dezvoltarea unui sistem VLC I2V folosind OLED și de tehnologii mixte RF-VLC pentru aplicații de siguranță rutieră.

Cercetările utilizând dispozitive optoelectronice capabile de comunicații prin lumină vizibilă, complementate și de sisteme de comunicații vehiculare în radiofrecvență, pot aduce beneficii directe și indirecte în economie și societate pe termen mediu și lung. În particular, aplicațiile de siguranță rutieră prezintă un impact major atât în prezent, cât și în viitor, când este de așteptat să aibă loc tranziția de la mașini conduse de oameni la mașini autonome.

VI.1 Contribuții originale

Contribuțiile originale din cadrul cercetării doctorale au răspuns la provocările identificate inițial în calea dezvoltării de comunicații VLC OLED cu aplicații vehiculare. În acest sens, voi sintetiza contribuțiile originale, grupându-le pe baza răspunsurilor pe care le oferă la provocările identificate.

Îmbunătățirea condițiilor fotometrice ale comunicațiilor VLC prin concentratori optici

În cadrul acestei provocări au fost abordate mai multe limitări ale comunicațiilor VLC, cea mai importantă fiind nivelul scăzut al semnalului optic ce ajunge la fotoreceptor, cauzat de coeficientul ridicat de absorbție al atmosferei în banda luminoasă, comparativ cu benzile de radiofrecvență și microunde. Simulările realizate au cuantificat impactul concentratorilor optici asupra nivelului de semnal VLC și implicit, asupra creșterii distanței de comunicație.

Adaptarea surselor de lumină OLED pentru comunicații VLC

Pentru adaptarea corespunzătoare a sursei de lumină OLED studiate și stabilirea comunicațiilor VLC s-a realizat un circuit de alimentare și control care respectă particularitățile de emisie a luminii atât în regim continuu, cât și în regim dinamic. Regimul dinamic a fost studiat cu ajutorul unui semnal dreptunghiular, ale cărui particularități respectă condițiile necesare unei modulații ASK, precum OOK. Din rezultatele testelor realizate asupra panourilor OLED, dinamica de răspuns în frecvență, ce atingea inițial un maxim de 300 Hz, a crescut la 100.000 Hz. Practic, s-a obținut o creștere a capacității de răspuns cu aproximativ 3 ordine de mărime. Un rol important în acest rezultat l-a avut și amplificatorul de clasă B implicat în circuitul de alimentare și control.

Dezvoltarea unei infrastructuri de tip semafor, pe baza surselor de lumină OLED studiate anterior, în vederea stabilirea unei comunicații VLC pentru aplicații vehiculare

A fost proiectat și implementat în cadrul doctoratului un semafor rutier OLED cu capacitate de transmisie de date și sistemul VLC I2V asociat. Testele efectuate au demonstrat stabilirea de comunicații VLC pe o distanță de până la 20 metri utilizând o bandă de frecvență de până la 100 kHz. Această bandă de frecvență poate asigura o rată de transmisie de circa 100 kb/s, suficientă pentru aplicații vehiculare de siguranță rutieră. Calitatea comunicației VLC a fost studiată utilizând un microcontroler tactat la frecvența de 180 MHz în determinarea ratei de apariție a erorii. Rezultatele obținute pentru o frecvență de 11 kHz au arătat o fiabilitate ridicată, înregistrându-se o rată de apariție a erorilor (BER) mai mică de 10^{-6} pentru distanțe de

până la 5 metri, respectiv BER mai mică de 10^{-2} pentru distanțe de până la 20 metri, fără aplicarea codurilor de corecție a erorilor. Pentru creșterea performanțelor OLED-VLC ne propunem considerarea unor panouri OLED cu dimensiuni mai mici și iluminanță totală mai ridicată, în vederea obținerii de caracteristici de răspuns în frecvență mai largi, ce conduc la o capacitate de comunicație superioară.

Realizarea unui protocol de comunicație VLC a informațiilor disponibile la nivelul autovehiculului și a celor recepționate pentru o aplicație de siguranță vehiculară, care să corespundă legislației specifice transportului rutier

În realizarea studiului s-a propus o aplicație de siguranță vehiculară, care să asigure informații suplimentare din trafic prin utilizarea unui modul de viziune computerizată, pe lângă cele care sunt recepționate din comunicațiile I2V sau V2V. Această aplicație destinată creșterii nivelului de siguranță rutieră la nivelul autovehiculului se bazează pe comunicația unidirecțională, pe direcția în spate. În acest sens, mai multe clase de obiecte au fost stabilite spre a fi detectate: persoană, bicicletă, mașină, autobuz, camion. Această aplicație a fost implementată pe un autovehicul având acces la fluxul de date de la camera de bord, iar un mesaj specific detecției a fost proiectat pentru a fi prezentat șoferului autovehiculului. Din momentul detecției unei clase, informația poate fi codată și procesată în vederea prioritizării. Astfel, informațiile suplimentare, pe lângă cele rutiere, pot fi trimise altor participanți la trafic prin comunicațiile VLC. Ca urmare, următorii utilizatori de drum pot constata fie elemente noi în contextul rutier imediat sau vor acționa conform informațiilor recepționate prin canalul de comunicație VLC.

Realizarea unui studiu privind limitele aplicațiilor vehiculare realizate prin VLC

Succesul aplicațiilor de siguranță vehiculară se supune capacității de reacție a conducătorului autovehiculului la informațiile prezentate prin sistemul de infotainment/ audio/ HUD. S-a demonstrat că, în cazul prezentării informațiilor prin intermediul sistemului de infotainment, rata de afișare a imaginii poate influența în mod diferit rezultatul unei decizii în termen de spațiu, dar și de timp. Așadar, rapiditatea afișării informației este foarte importantă pe lângă alte calități ale afișajului precum amplasament, vizibilitate, contrast. Sistemul de siguranță vehiculară VLC se poate aplica cu succes, chiar și în cazul tranziției către mașinile complet autonome, unde timpul de reacție este mult mai redus în comparație cu timpul de reacție al șoferilor.

Proiectarea unei soluții noi de extindere a gradului de siguranță rutieră oferit de comunicațiile VLC prin colaborarea cu module de comunicație mobilă eSim

Soluția mixtă VLC - eSim se bazează pe disponibilitatea semnalului de date al tehnologiei mobile, prin module de recepție eSim, putând asigura un canal de comunicație suplimentar VLC în cazul indisponibilității temporare a acesteia sau a distanței limitate de comunicație. Pe de altă parte, în zonele cu bandă de radiofrecvență aglomerată sau fără acoperire radio (ex. tunel), sistemul de siguranță pe bază VLC oferă posibilitatea transmiterii informațiilor vitale către participanții la trafic.

VI.2 Diseminarea rezultatelor

Contribuțiile prezentate în cadrul tezei de doctorat au fost diseminate la nivel național și internațional, prin 9 lucrări publicate în reviste și volume de conferință indexate în baze de date internaționale și prin 4 prezentări orale efectuate la conferințe internaționale. 8 dintre lucrările publicate sunt indexate în baza de date internațională ISI – Clarivate Web of Science, 1 fiind publicată într-o revistă ierarhizată în prima quartilă ISI Journal Citation Report (Q1, zona roșie) și 1 fiind publicată într-o revistă ierarhizată în cea de a doua quartilă ISI Journal Citation Report (Q2, zona galbenă). Suplimentar, a fost publicată în perioada doctoratului o

lucrare conexă tezei de doctorat, într-o revistă ierarhizată în cea de a doua quartilă ISI Journal Citation Report (Q2, zona galbenă). Menționez, de asemenea, că 4 lucrări au fost publicate în calitate de prim autor, 3 dintre aceste fiind indexate ISI – Clarivate Web of Science.

VI.2.1 Lucrări publicate în reviste științifice cotate ISI (1 Q1 și 1 Q2):

1. Zadobrischi, E.; **Cosovanu, L.-M.**; Dimian, M., *Traffic Flow Density Model and Dynamic Traffic Congestion Model Simulation Based on Practice Case with Vehicle Network and System Traffic Intelligent Communication*, Symmetry 2020, 12, 1172. <https://doi.org/10.3390/sym12071172>, wos: 000554084000001, Factor de impact ISI: 2.7, Cuartila Q2.

2. Pascut, G.L., **Cosovanu, L.**, Haule, K. et al., *Correlation-temperature phase diagram of prototypical infinite layer rare earth nickelates*, Communication Physics, Nature Portfolio, vol. 6, nr. 45 (2023). <https://doi.org/10.1038/s42005-023-01163-7>, wos: 000953050100002, Factor de impact ISI: 5.5, Cuartila Q1.

VI.2.2 Lucrări publicate în volume de conferințe (6 ISI și 1 BDI)

1. E. Zadobrischi, **L.-M. Cosovanu**, S. -A. Avătămăniței and A. -M. Căilean, "*Complementary Radiofrequency and Visible Light Systems for Indoor and Vehicular Communications*", 23rd International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, Romania, 2019, pp. 419-423, <http://doi.org/10.1109/ICSTCC.2019.8885570>, wos:000590181100071.

2. **L. -M. Cosovanu**, A. Done, "*Development of Visible Light Communication System for Automotive Applications Based on Organic Light Emitting Diode Panels*", International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, Romania, 2020, pp. 84-89, doi: <http://doi.org/10.1109/DAS49615.2020.9108953>, wos:000589776100015.

3. **L. -M. Cosovanu**, E. Zadobrischi, M. Dimian, "*Optical amplification on automotive VLC applications*", 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, Romania, 2020, pp. 699-704, doi: <http://doi.org/10.1109/ICSTCC50638.2020.9259672>, wos: 000646582900115

4. E. Zadobrischi, **L. -M. Cosovanu**, M. Dimian, "*Benefits of a Portable Warning System Adaptable to Vehicles Dedicated for Seat Belts Detection*", 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, Romania, 2020, pp. 892-897, doi: <http://doi.org/10.1109/ICSTCC50638.2020.9259723>, wos: 000646582900147

5. **L. -M. Cosovanu**, E. Zadobrischi, M. Dimian, E. Plascencia, "*Unified Road Infrastructure Safety System using Visible Light Communication*", 28th Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2020, pp. 1-4, doi: <http://doi.org/10.1109/TELFOR51502.2020.9306674>, wos: 000666945500078

6. E. Zadobrischi, **L. -M. Cosovanu**, M. Negru, M. Dimian, "*Detection of Emotional States Through the Facial Expressions of Drivers Embedded in a Portable System Dedicated to Vehicles*", 28th Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2020, pp. 1-4, doi: <http://doi.org/10.1109/TELFOR51502.2020.9306572>, wos: 000666945500026

7. **L. -M. Cosovanu**, „Extending VLC Safety applications using mixed technologies and microservices”, EIRP Proceedings, Vol. 18 No. 1, 2023, pp. 396-404, <https://dp.univ-danubius.ro/index.php/EIRP/article/view/314/326>

VI.2.3 Rapoarte de cercetare

1. **L.-M. Cosovanu**, „Stadiul actual al cercetărilor în dezvoltarea de dispozitive optoelectronice”, Referat 1, 2021.

2. **L.-M. Cosovanu**, „Direcții de cercetare în dezvoltarea de dispozitive optoelectronice cu aplicații”, Referat 2, 2021.

3. **L.-M. Cosovanu**, „Dezvoltarea de dispozitive optoelectronice. Contribuții și Aplicații” Referat 3, 2022.

VI.2.4 Lucrări ISI publicate în domenii conexe (1 Q2)

1. M.E. Fortună, A. Lobiuc, **L.M. Cosovanu**, M. Harja, *Effects of In-Situ Filler Loading vs. Conventional Filler and the Use of Retention-Related Additives on Properties of Paper*, Materials 2020, 13, 5066. <https://doi.org/10.3390/ma13225066>, wos:000594740400001, Factor ISI: 3.6, Cuartila Q2.

VI.2.5 Implicarea în proiecte și echipe de cercetare:

- Proiect PNIII, „Exelență în cercetare avansată, leadership în inovare și brevetare pentru dezvoltarea universității și regiunii”, Programului 1 — Dezvoltarea sistemul național de cercetare și dezvoltare, Subprogramul 1.2 — Performanță instituțională — Proiect de finanțare a excelenței în CDI, contract nr. 18PFE /16.10.2018. Perioada de derulare 03.2019 – 12.2020. Director de proiect: Mihai Dimian.
- Proiect PNIII, „Funcționalități emergente și selectivitate orbitală în materiale corelate cu tranziții metal-izolator”, cod proiect PN-III-P1-1.1-TE2019-1767, contract nr. TE 124/2020. Perioada de derulare 11.2020 – 08.2022, Director de proiect: Lucian Pășcuț.
- Proiect PNIII, „Proiect de dezvoltare instituțională a Universității „Ștefan cel Mare” din Suceava pentru creșterea performanțelor și a capacității de cercetare, dezvoltare și inovare interdisciplinară în domeniul bioeconomie”, Programul 1 - Dezvoltarea sistemului național de cercetare-dezvoltare, Subprogramul 1.2 – Performanță instituțională – Proiect de finanțare a excelenței în CDI, Contract de finanțare 10 PFE/2021. Perioada de derulare 01.2022 – 06.2024, Director de proiect: Mihai Dimian
- Proiect POCU, „Program pentru creșterea performanței și inovării în cercetarea doctorală și postdoctorală de excelență – PROINVENT”, contract nr: 62487/03.06.2022 POCU/993/6/13 – Cod SMIS: 153299. Perioada de derulare 08.2022-07.2023, Responsabil proiect USV: Cornel Turcu.

VI.2.6 Stagii de practică

- Stagiul de practică în cadrul companiei SC MIND SOFTWARE SRL, în cadrul proiectului, POCU, „Program pentru creșterea performanței și inovării în cercetarea doctorală și postdoctorală de excelență – PROINVENT”, contract nr: 62487/03.06.2022 POCU/993/6/13 – Cod SMIS: 153299.

VI.2.7 Impactul rezultatelor cercetărilor

Cercetările publicate au obținut un număr total de 66 de citări, până la data elaborării tezei, 37 dintre acestea fiind indexate în ISI – Clarivate Web of Science. Dintre cele neindexate ISI menționez citarea din cadrul tezei de doctorat “Visible light communication control in a platoon vehicle environment” susținută la Universitatea Paris Saclay (Franța), cu tema foarte relevantă pentru direcția de cercetare a acestei teze.

VI.3 Direcții de cercetare viitoare

Potrivit concluziilor finale și a observațiilor aduse pe parcursul acestei lucrări, s-au constituit următoarele direcții de cercetare viitoare:

- Dezvoltarea de aplicații VLC utilizând dispozitive luminescente microLED, QLED;
- Cercetări în dezvoltarea de dispozitive electroluminescente utilizând materiale corelate;
- Sisteme de comunicație bidirecțională VLC OLED folosind plăci de dezvoltare FPGA (Field Programmable Gate Array);
- Implementarea de tehnici de codare și corecție a erorilor pentru comunicații VLC;
- Dezvoltarea de soluții de siguranță rutieră pentru detecția situațiilor limită și asistarea șoferilor bazate pe comunicații de date VLC;
- Continuarea dezvoltării prototipului de comunicație hibridă ce îmbină comunicațiile optice (VLC) și comunicațiile mobile pentru creșterea nivelului de siguranță rutieră.

Bibliografie

- [1] World Health Organization (WHO), "Global Status Report on Road Safety 2018," 2018.
- [2] Commission, European, "EU Road Safety Policy Framework 2021-2030 - Next steps towards "Vizion Zero", " 2019.
- [3] World Health Organization (WHO), "Road traffic injuries 20 June 2022".
- [4] P. Christidis, M. G. Vega, G. Ulpiani and N. Vettters, "Post-pandemic trends in urban mobility," Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023.
- [5] World Health Organization, "Save LIVES - A road safety technical package," 2017.
- [6] W. G. Najm, J. Koopmann, J. D. Smith and J. Brewer, "Frequency of Target Crashes for IntelliDrive Safety Systems," Washington, D.C., 2010.
- [7] National Technical University of Athens (NTUA), the Austrian Road Safety Board;(ERF), (KFV) and the European Union Road Federation, "Annual Accident Report 2018".
- [8] D. Shepardson, "Toyota halts plan to install U.S connected vehicle tech by 2021," [Online]. Available: <https://www.reuters.com/article/autos-toyota-communication-idUSL1N22816B>. [Accessed 2023].
- [9] US Transportation, Department of, "Request for Comments: V2X Communications," 2018. [Online]. Available: <https://downloads.regulations.gov/DOT-OST-2018-0210-0001/content.pdf>. [Accessed 2023].
- [10] "Traffic Light Spectra," Center, Wisconsin Materials Research Science and Engineering, 2006. [Online]. Available: https://chem.beloit.edu/edetc/background/LED/traffic_light/spectra.htm.
- [11] Y. Cao, I. Parker, G. Yu, C. Zhang, A. Heeger, "Improved quantum efficiency for electro-luminescence in semiconducting polymers," *Nature*, vol. 397, no. 6718, pp. 414-417, 1999.
- [12] A. Kadashchuk, A. Vakhnin, I. Blonski, D. Beljonne, Z. Shuai, J. L. Brédas, V. I. Arkhipov, P. Heremans, E. V. Emelianova and H. Bässler, "Singlet-Triplet Splitting of Geminate Electron-Hole Pairs in Conjugated Polymers," *Physical Review Letters*, vol. 93, no. 6, p. 66803, 2004.
- [13] S. M. King, M. Cass, M. Pintani, C. Coward, F. B. Dias, A. P. Monkman and M. Roberts, "The contribution of triplet-triplet annihilation to the lifetime and efficiency of fluorescent polymer organic light emitting diodes," *Journal of Applied Physics*, vol. 109, no. 7, p. 74502, 2011.
- [14] T. Liu, X. Chen, J. Zhao, W. Wei, Z. Mao, W. Wu, S. Jiao, Y. Liu, Z. Yang and Z. Chi, "Hybridized local and charge-transfer excited state fluorophores enabling organic light-emitting diodes with record high efficiencies close to 20%," *Chemical Science*, vol. 12, no. 14, pp. 5171-5176, 2021.
- [15] M. B. S. Neto and F. A. Pinheiro, "Controlling spontaneous emission via electronic correlations in transparent metals," *PHYSICAL REVIEW B*, 2019.
- [16] G. L. Pascut, L. Cosovanu, K. Haule and F. Q. Khandker, "Correlation-temperature phase diagram of prototypical infinite layer rare earth nickelates," *Commun Phys*, vol. 6, no. 45, 15.03.2023.
- [17] M. Nayfeh, "Chapter 7 - Characterization and Simulation Technologies of Nanomaterial," in *In Micro and Nano Technologies, Fundamentals and Applications of Nano Silicon in Plasmonics and Fullerines*, Elsevier, 2008, pp. 153-167.
- [18] A. Bernanose, "Electroluminescence of organic compounds," *British Journal of Applied Physics*, vol. 6, no. 54, pp. S54-S55, 1955.
- [19] M. Pope, H. P. Kallmann and P. Magnante, "Electroluminescence in Organic Crystals," *The Journal of Chemical Physics*, no. 38, pp. 2042-2043, 1963.
- [20] C. W. Tang, S. A. VanSlyke, "Organic electroluminescent diodes," vol. 51(12), p. 913-915, 1987.

- [21] D. M. Zink, "Singlet harvesting copper-based emitters: a modular approach towards next-generation OLED technology," *Translational Materials Research*, vol. 1, no. 1, p. 15003, 2014.
- [22] C. Adachi, "37.1:Invited Paper: Third Generation OLED by Hyperfluorescence," *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 44, no. 1, p. 513–514, 2013.
- [23] Y. Li, Z. Xu, X. Zhu, B. Chen, Z. Wang, B. Xiao, J. W. Y. Lam, Z. Zhao, D. Ma and B. Z. Tang, "Creation of Efficient Blue AIE Luminogens for High-Performance Nondoped Blue OLEDs and Hybrid White OLEDs," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 11, no. 19, pp. 17592-17601, 2019.
- [24] J. Wang, Y. Yu, X. Liu, Y. Zhang, X. Zhou and Y. Lu, "Metal-organic framework based OLED for visible light communication," in *2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, Huangshan, PEOPLES R CHINA, 2019.
- [25] K. Yoshida, P. P. Manousiadis, R. Bian, Z. Chen, C. Murawski, M. C. Gather, H. Haas, G. A. Turnbull and I. D. Samuel, "245 MHz bandwidth organic light-emitting diodes used in a gigabit optical wireless data link," *Nature Communications*, vol. 11, no. 1, p. 1171, 2020.
- [26] T. Lu and F. Chen, "Multiwfn: a multifunctional wavefunction analyzer.," *Journal of computational chemistry*, vol. 33, no. 5, pp. 580-592, 2012.
- [27] B. Carlson, G. D. Phelan, W. Kaminsky, L. Dalton, X. Jiang, S. Liu and A. K.-Y. Jen, "Divalent osmium complexes: Synthesis, characterization, strong red phosphorescence, and electrophosphorescence," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 124, no. 47, p. 14162–14172, 2002.
- [28] P. A. Haigh, Z. Ghassemlooy, H. L. Minh, S. Rajbhandari, F. Arca, S. F. Tedde, O. Hayden and I. Papakonstantinou, "Exploiting Equalization Techniques for Improving Data Rates in Organic Optoelectronic Devices for Visible Light Communications," *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, vol. 30, no. 19, pp. 3081-3088, 2012.
- [29] P. Haigh, Z. Ghassemlooy, I. Papakonstantinou and S. Rajbhandari, "Online Artificial Neural Network Equalization for a Visible Light Communications System with an Organic Light Emitting Diode based Transmitter," in *PROCEEDINGS OF THE 2013 18TH EUROPEAN CONFERENCE ON NETWORK AND OPTICAL COMMUNICATIONS AND 2013 8TH CONFERENCE ON OPTICAL CABLING AND INFRASTRUCTURE (NOC-OC&I)*, 2013.
- [30] P. A. Haigh, Z. Ghassemlooy and I. Papakonstantinou, "1.4-Mb/s White Organic LED Transmission System Using Discrete Multitone Modulation," *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, vol. 25, no. 6, pp. 615-618, 2013.
- [31] P. Haigh, Z. Ghassemlooy, S. Rajbhandari and I. Papakonstantinou, "Visible Light Communications Using Organic Light Emitting Diodes," *IEEE COMMUNICATIONS MAGAZINE*, vol. 51, no. 8, pp. 148-154, 2013.
- [32] P. A. Haigh, Z. Ghassemlooy, I. Papakonstantinou and H. L. Minh, "2.7 Mb/s With a 93-kHz White Organic Light Emitting Diode and Real Time ANN Equalizer," *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, vol. 25, no. 17, pp. 1687-1690, 2013.
- [33] H. Chun, C. Chiang, A. Monkman and D. O'Brien, "A Study of Illumination and Communication using Organic Light Emitting Diodes," *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, vol. 31, no. 22, pp. 3511-3517, 2013.
- [34] P. Q. Thai, N. T. Thanh, S. Shigeru, J. Liu and Z. Wende, "127.5 kbps transmission using OLED with 7 kHz 3dB modulation bandwidth in visible light communication system," in *2015 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED TECHNOLOGIES FOR COMMUNICATIONS (ATC)*, Ho Chi Minh, VIETNAM, 2015.
- [35] P. Q. Thai, N. X. Lin, S. Shigeru, J. Liu and Z. Wende, "Investigation on visible light communication system using OLED with dimming support," in *2015 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, Ho Chi Minh, VIETNAM, 2015.

- [36] P. Thai, "Real-Time 138-kb/s Transmission Using OLED With 7-kHz Modulation Bandwidth," *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, vol. 27, no. 24, pp. 2571-2574, 2015.
- [37] B. Gulbahar and S. Sencan, "Wireless Internet Service Providing for 5G with Hybrid TV Broadcast and Visible Light Communications," in *2017 Wireless Days*, Porto, PORTUGAL, 2017.
- [38] X. Li, H. Chen, S. Li, Q. Gao, C. Gong and Z. Xu, "Volterra-based nonlinear equalization for nonlinearity mitigation in organic VLC," in *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Valencia, 2017.
- [39] T.-J. Liu and F.-L. Jeng, "An Optical Channel Based on Illumination to Link Home Devices," in *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)*, Taiwan, 2018.
- [40] P. d. Souza, N. Bamiedakis, K. Yoshida, P. P. Manousiadis, G. A. Turnbull, I. D. Samuel, R. V. Penty and I. H. White, "High-Bandwidth Organic Light Emitting Diodes for Ultra-Low Cost Visible Light Communication Links," in *2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Univ Politehnica Bucharest, Cent Lib, Bucharest, ROMANIA, 2018.
- [41] H. Chen and Z. Xu, "OLED Panel Radiation Pattern and Its Impact on VLC Channel Characteristics," *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 1-10, 2018.
- [42] H. Chen, Z. Xu, Q. Gao and S. Li, "A 51.6 Mb/s Experimental VLC System Using a Monochromic Organic LED," *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 1-12, 2018.
- [43] G. Aggarwal, X. Dai, R. Saatchi, R. Binns and A. Sikandar, "Experimental Demonstration of Single-Channel EEG Signal Using 32×32 Pixel OLED Screen and Camera," *Electronics*, vol. 8(7), no. 734.
- [44] E. López-Fraguas, B. Arredondo, C. Vega-Colado, G. Pozo, M. Najafi, D. Martín, Y. Galagan, J. M. Sánchez-Pena, R. Vergaz and B. Romero, "Visible Light Communication system using an organic emitter and a perovskite photodetector," *Organic Electronics*, vol. 73, p. 292–298, 2019.
- [45] Z. N. Chaleshtori, S. Zvanovec, Z. Ghassemlooy, H. B. Eldeeb and M. Uysal, "Coverage of a shopping mall with flexible OLED-based visible light communications," *OPTICS EXPRESS*, vol. 28, no. 7, pp. 10015-10026, 2020.
- [46] Heile, Dr. Robert F., "<https://mentor.ieee.org/802.15/file/08/15-08-0656-01-0vlc-par-document.pdf>," 2010. [Online]. Available: <https://mentor.ieee.org/802.15/file/08/15-08-0656-01-0vlc-par-document.pdf>. [Accessed 17 October 2019].
- [47] H. Haas, "Wireless data from every light bulb," 2011.
- [48] "Li-Fi Consortium <https://lifi.co/>," 2019.
- [49] A.-M. Cailean, M. Dimian and A. Done, "Enhanced design of visible light communication sensor for automotive applications: Experimental demonstration of a 130 meters link," in *2018 Global LIFI Congress (GLC)*, Paris, 2018.
- [50] S. Avătămăniței, A. Căilean, C. Beguni, M. Dimian and V. Popa, "Analysis Concerning the Usage of Visible Light Communications in Automotive Applications: Achievable Distances vs. Optical Noise," in *2020 International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, 2020.
- [51] J. Shi, X. Huang, Y. Wang and N. Chi, "Real-time bi-directional visible light communication system utilizing a phosphor-based LED and RGB LED," in *2014 Sixth International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Hefei, 2014.
- [52] L. -M. Cosovanu, E. Zadobrischi and M. Dimian, "Optical amplification on automotive VLC applications," in *2020 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Sinaia, Romania, 2020.
- [53] K. Yang, J. Song, Y. Chen and B. Lin, "Secondary light distribution design for LED street light," in *2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics*, Dalian, 2011.

- [54] S. Babadi, R. Ramirez-Iniguez, T. Boutaleb and T. Mallick, "An optimisation of a freeform lens design for LED street lighting," in *2016 International Conference for Students on Applied Engineering (ICSAE)*, Newcastle upon Tyne, 2016.
- [55] S. Babadi, R. Ramirez-Iniguez, T. Boutaleb and T. Mallick, "Freeform lens design for uniform rectangular illumination," in *2016 IEEE Photonics Conference (IPC)*, Waikoloa, 2016.
- [56] M. S. Islim, S. Videv, M. Safari, E. Xie, J. J. D. McKendry, E. Gu, M. D. Dawson and H. Haas, "The Impact of Solar Irradiance on Visible Light Communications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 12, pp. 2376-2386, 15 June 2018.
- [57] Transportation, Toronto, "Recommendation, Design Recommendation for Traffic Signal Installation, TTR 801.320," 2012.
- [58] Local Transport Note, "The Installation of Traffic Signals and Associated Equipment," Ireland, 1998.
- [59] Transport, West Sussex County Council Highways, "Traffic Signal Installation Standards," 2019.
- [60] W. M. Middleton and M. E. V. Valkenburg, Eds., "Reference Data for Engineers," in *Radio, Electronics, Computer, and Communications*, Newnes, 2002, pp. 23-24.
- [61] E. Zadobrischi, L. Cosovanu, S. Avătămăniței and A. Căilean, "Complementary Radiofrequency and Visible Light Systems for Indoor and Vehicular Communications," in *2019 23rd International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Sinaia, 2019.
- [62] I. Stefan and H. Haas, "Hybrid Visible Light and Radio Frequency Communication Systems," in *2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall)*, Vancouver, 2014.
- [63] D. A. Basnayaka and H. Haas, "Design and Analysis of a Hybrid Radio Frequency and Visible Light Communication System," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 10, pp. 4334-4347, October 2017.
- [64] S.-H. Yu, O. Shih, H.-M. Tsai, N. Wisitpongphan and R. D. Roberts, "Smart automotive lighting for vehicle safety," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, pp. 50-59, December 2013.
- [65] A. Cailean, B. Cagneau, L. Chassagne, S. Topsu, Y. Alayli and J. Blosseville, "Visible light communications: Application to cooperation between vehicles and road infrastructures," in *2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2012.
- [66] A.-M. Căilean, B. Cagneau, L. Chassagne, M. Dimian and V. Popa, "Novel Receiver Sensor for Visible Light Communications in Automotive Applications," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 8, pp. 4632-4639, August 2015.
- [67] S.-A. Avătămăniței, A.-M. Căilean, E. Zadobrischi, A. Done, M. Dimian and V. Popa, "Intensive Testing of Infrastructure-to-Vehicle Visible Light Communications in Real Outdoor Scenario: Evaluation of a 50 meters link in Direct Sun Exposure," in *2019 Global LIFI Congress*, Paris, 2019.
- [68] A.-M. Căilean and M. Dimian, "Toward Environmental-Adaptive Visible Light Communications Receivers for Automotive Applications: A Review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 9, pp. 2803-2811, May 2016.
- [69] 3. 5G, "Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; 5G; Release description; Release 15 (3GPP TR 21.915 version 15.0.0 Release 15)".
- [70] European Commission, "Towards 5G," 2019.
- [71] M. B. Rahaim and T. Little, "Toward practical integration of dual-use VLC within 5G networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 4, pp. 97-103, August 2015.
- [72] L. Feng, R. Q. Hu, J. Wang, P. Xu and Y. Qian, "Applying VLC in 5G Networks: Architectures and Key Technologies," *IEEE Network*, vol. 30, no. 6, pp. 77-83, November-December 2016.

- [73] M. Ayyash, H. Elgala, A. Khreishah, V. Jungnickel, T. Little, S. Shao, M. Rahaim, D. Schulz, J. Hilt and R. Freund, "Coexistence of WiFi and LiFi toward 5G: concepts, opportunities, and challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 2, pp. 64-71, February 2016.
- [74] "OLED Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2023-2032 (<https://www.precedenceresearch.com/oled-market>)," Precedence Research, 2023.
- [75] R. Mertens, "OLED for the Automotive Market," 2023.
- [76] J. Park, "Speedup of Dynamic Response of Organic Light-Emitting Diodes," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 19, pp. 2873-2880, 2010.
- [77] A. Done and L.-M. Cosovanu, "Development of Visible Light Communication System for Automotive Applications Based on Organic Light Emitting Diode Panels," in *2020 International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, Suceava, Romania, 2020.
- [78] L. -M. Cosovanu, E. Zadobrischi, M. Dimian and E. Plascencia, "Unified Road Infrastructure Safety System using Visible Light Communication," in *2020 28th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Belgrade, Serbia, 2020.
- [79] O'Halloran, Joe, "BMW Group gears up with G+D Technology eSIM for connected cars," *Computer Weekly*, [Online]. Available: <https://www.computerweekly.com/news/252513655/BMW-Group-gears-up-with-GD-Technology-eSIM-for-connected-cars>.
- [80] IDEMIA, "eSIM for in-car infotainment systems," 2021. [Online]. Available: <https://www.idemia.com/wp-content/uploads/2021/12/esim-consumer-for-automotive-idemia-brochure-122021.pdf>.
- [81] THALES, "Seamless vehicle connectivity management with automotive-grade eSIM," 2022. [Online]. Available: <https://www.thalesgroup.com/en/markets/digital-identity-and-security/iot/industries/automotive/eSIM>.
- [82] Militano, Francesco, "eSIM: Driving global connectivity in the automotive industry," Ericsson, 2020. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/blog/2020/9/esim-driving-global-connectivity-in-the-automotive-industry>.
- [83] L. -M. Cosovanu, "Extending VLC Safety applications using mixed technologies and microservices," in *EIRP Proceedings*.
- [84] H. Haas, "LiFi is a paradigm-shifting 5G technology," *Reviews in Physics*, vol. 3, p. 26–31, 2018.
- [85] C. Darlene Storm, "UK researchers shatter world record by hitting 5G speeds of 1Tb per second," 2015.
- [86] D. Reilly, A. Taleb-Bendiab, "A service-based architecture for in-vehicle telematics systems," in *Proceedings 22nd International Conference on Distributed Computing Systems*, 2002.
- [87] A. Cailean, B. Cagneau, L. Chassagne, V. Popa and M. Dimian, "A survey on the usage of DSRC and VLC in communication-based vehicle safety applications," in *2014 IEEE 21st Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT)*, Delft, 2014.
- [88] J. Song, K.-H. Kim, E. Kim, C.-K. Moon, Y.-H. Kim, J.-J. Kim and S. Yoo, "Lensfree OLEDs with over 50% external quantum efficiency via external scattering and horizontally oriented emitters," *Nature Communications*, vol. 9, no. 3207, 2018.
- [89] S. Negi, P. Mittal and B. Kumar, "In-Depth Analysis of Structures, Materials, Models, Parameters, and Applications of Organic Light-Emitting Diodes," *JOURNAL OF ELECTRONIC MATERIALS*, vol. 49, no. 8, pp. 4610-4636, 2020.