

Apresentação

A tecnologia dos dispositivos eletroluminescentes orgânicos (*OLEDs* – *organic Light-emitting diode*) tem avançado rapidamente nos últimos 30 anos até seu estágio atual, em que alcançaram altos níveis de desempenho, incluindo alta eficiência, pureza de cor e vida útil do dispositivo. O dispositivo eletroluminescente orgânico fosforescente (*PHOLED* – phosphorescent *organic Light-emitting diode*) é um tipo de *OLED* que usa emissão fosforescente. Tanto os *OLEDs* como *PHOLEDs* o seu funcionamento é por via recombinação de éxcitons na camada emissora produzindo luz através da emissão espontânea. Em *OLEDs* com emissão fluorescente, a recombinação de éxcitons de singleto é a predominante, mas o total de éxcitons gerados no processo da recombinação, apenas 1/3 são de singleto e o resto é de tripleto. Em cambio, os *PHOLEDs* geram sua emissão a partir dos éxcitons de singleto e tripleto permitindo-lhes aumentar a eficiência interna até o 100%. A dopagem é uma estratégia importante dos *PHOLEDs* porque sua relação de concentração entre uma matriz (composto orgânico) dopada com compostos fosforescentes (pequenas concentrações) inibe o efeito de aniquilação tripleto-tripletto que é muito comum nestes compostos fosforescentes e aumenta a eficiência da eletroluminescência do *OLED*.

Em este trabalho a investigação de certos materiais fosforescentes baseados em complexos de íons de metais de transição (grupo d) ainda é uma propriedade a ser estudada para o aumento de durabilidade dos dispositivos emissores de luz azul. No caso dos complexos a base de metais de transição (grupo f) os estudos são direcionados para o aumento de sua eficiência quântica externa para o uso destes dopantes em matrizes.

Todos os estudos e pesquisas realizadas nesta tese é apresentada em 8 capítulos. Os oito capítulos são divididos da seguinte forma: O Capítulo 1 aborda os princípios básicos dos semicondutores, a história do *OLED*, os mecanismos da eletroluminescência. O Capítulo 2 descreve os princípios físicos e elétricos envolvidos no mecanismo de emissão dos *PHOLEDs* baseados nos filmes destes complexos e nos mecanismos de transferência de carga e energia entre matriz/dopante, além das propriedades dos filmes finos e os fenômenos físicos

envolvidos no crescimento e formação destes filmes, e os conceitos da determinação da eficiência. O Capítulo 3 apresenta os materiais utilizados na fabricação dos PHOLEDs, assim como os compostos orgânicos usados para a produção das diferentes camadas dos dispositivos e para a fabricação das diferentes arquiteturas de *OLEDs*. Além disso, apresenta dois novos métodos implantados na evaporadora térmica resistiva com o objetivo de otimizar a fabricação destes *OLEDs* fosforescentes. O Capítulo 4 descreve as diversas técnicas empregadas para a caracterização dos filmes e dispositivos eletroluminescentes fabricados neste trabalho. O Capítulo 5 apresenta e discute os resultados obtidos. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho. Os Capítulos 7 e 8 incluem os trabalhos (apresentações e artigos) desenvolvidos ao longo de esta tese e a bibliografia.

Objetivos gerais

- Implantação e avaliação do método de co-deposição por evaporação térmica resistiva para a produção de dispositivos eletroluminescentes que fazem uso de complexos fosforescentes como camada emissora.
- Instalação e avaliação do método de vibração do substrato para a otimização das propriedades morfológicas e de interface entre as diferentes camadas de filmes orgânicos depositados por evaporação térmica resistiva, visando o aumento do desempenho dos *OLEDs* fabricados.

Objetivos específicos

- Estudo das propriedades: i) térmica, ii) elétrica, iii) óptica, iv) morfológica e v) eletrônica de alguns dos complexos de íon de Iridio.
- Estudo das propriedades: i) óptica e iv) eletroquímica das moléculas doadoras (matrizes).
- Estudo dos tipos de transferências entre as moléculas doadoras (matriz) e os complexos com íons metálicos de transição (bloco d) ou íons de terras raras (bloco f).
- Deposição térmica resistiva dos complexos e caracterização dos filmes obtidos através das técnicas: i) espectroscópica, ii) microscópica, iii) elétrica, iv) óptica e v) eletroquímica.

- Estudo da influência das condições empregadas na produção dos filmes orgânicos a partir do método de vibração do substrato na morfologia observada através de diferentes técnicas topográficas.
- Fabricação de *PHOLEDs* a partir dos complexos analisados e caracterizados.
- Fabricação e caracterização elétrica dos *OLEDs* utilizando o método de vibração do substrato e sucessiva caracterização.
- Estudo de diferentes arquiteturas dos *OLEDs*, visando o aprimoramento do desempenho dos mesmos.
- Estudo comparativo da eficiência dos diferentes *OLEDs* usando as técnicas de co-deposição térmica e de vibração do substrato.

1 Introdução

A física do estado sólido é o ramo da física que estuda as propriedades mecânicas, térmicas, magnéticas e ópticas da matéria em forma de estado sólido e classifica os materiais em três grupos distintos: i) metais, ii) isolantes e iii) semicondutores. Sabe-se que nos metais seus elétrons livres podem se mover através da banda de condução a temperatura ambiente, o que lhes confere uma excelente condutividade. Os isolantes por outro lado, são materiais que possuem poucos elétrons livres, à temperatura ambiente convertendo-lhes resistentes ao fluxo da carga elétrica, por sua vez, possui uma *banda proibida*^{*[1]} larga, o que lhes confere péssima condutividade. Já os semicondutores, comportam-se de maneira intermediária, ou seja, os elétrons podem se transportam através da banda de valência para a banda de condução e dar início à passagem de corrente elétrica, desde que a energia suficiente seja fornecida. Na Fig.1.1 apresentamos rapidamente o diagrama de bandas de energia que diferencia destes três grupos de materiais.



Figura 1.1: Esquema de bandas de energia de um material condutor, isolante e semicondutor

* Banda proibida (em inglês “bandgap”) corresponde ao intervalo de energia entre a banda de condução e a banda de valência, onde não existem elétrons e buracos^[1].

Podemos certamente afirmar que os semicondutores são os materiais do século XX já que maior parte dos dispositivos eletrônicos utilizados no dia a dia baseia-se neles. Entre os dispositivos semicondutores mais utilizados encontra-se o diodo emissor de luz (*LED – Light-emitting Diode*), fabricados a partir de semicondutores inorgânicos como $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, GaN , etc [2]. Por sua vez, o termo “diodo emissor de luz orgânico” (*OLED – organic Light-emitting diode*) refere-se a qualquer *LED* que é composto de semicondutores “orgânicos”, ou seja, baseados em moléculas conjugadas ou polímeros conjugados [3]. Neste caso, os semicondutores orgânicos são baseados nos átomos de carbono e, tipicamente, assumem também o nome de moléculas ou polímeros conjugados.

As moléculas conjugadas ou polímeros conjugados a principal característica é a alternância das ligações simples e duplas entres os átomos de carbono adjacentes ao longo da cadeia. Alguns polímeros conjugados apresentam também anéis aromáticos em sua constituição, sendo chamados de polímeros conjugados aromáticos. Alguns exemplos estão ilustrados na Fig.1.1. O comprimento de conjugações ou tamanho de um segmento conjugado “n” é definido como o número de repetições não interrompidas de ligações simples e duplas alternadas ao longo da cadeia polimérica.

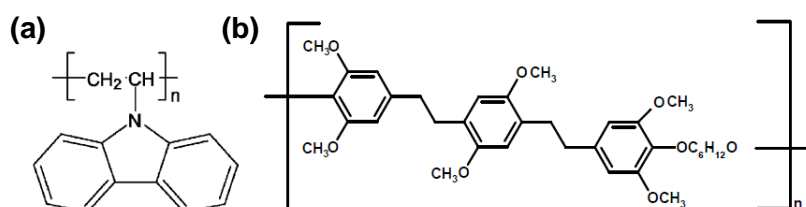


Figura 1.2: Exemplos de polímeros conjugados a) polivinilcarbazol, b) polímero tipo PPV – polifenileno vinileno.

Os polímeros conjugados apresentam alternância de ligações químicas simples (tipo sigma “ σ ”) e duplas (tipo sigma “ σ ” e tipo pi “ π ”) ao longo de sua cadeia, sendo que a ligação π é responsável pelas propriedades que tomam esses materiais candidatos potenciais para aplicações em optoeletrônica. Quando um polímero conjugado apresentam uma cadeia bastante longa os orbitais π (ligante) π^* (anti-ligante) dão origem a bandas de energia sendo que a primeira possui todos os estados eletrônicos ocupados e a segunda, todos os estados eletrônicos desocupados. Na linguagem da física do estado sólido, estas bandas são chamadas de bandas de valência e condução, respectivamente. Mais comum aos químicos é a terminologia HOMO (highest occupied molecular

orbital) e LUMO (lowest unoccupied molecular orbital) que correspondem aos limites das bandas de valência e de condução de forma muito semelhante ao observado em um semicondutor inorgânico (LED). A diferença entre a energia dos níveis LUMO e HOMO é chamada de lacuna de energia (“gap”) do semicondutor orgânico (E_g).

Dentre as vantagens dos *OLEDs*, em relação aos *LEDs* e outras tecnologias atuais estão: i) emissão intensa de diversas cores, ii) baixo custo de produção em relação às tecnologias atuais como *LCD* e plasma; iii) arquitetura que permite a aplicação em celulares e telas de computador ou televisão, iv) possibilidade de fabricação do dispositivo sobre substratos flexíveis, o que implica uma redução de peso e de espessura, v) possibilidade de utilização dos *OLEDs* em sistemas de iluminação, substituindo os sistemas atuais baseados em fontes incandescentes e fluorescentes, o que resulta em menor consumo energético.

1.1. Os OLEDs

Um diodo orgânico emissor de luz (*OLED*) é um dispositivo de estado sólido composto por diversas camadas de filmes orgânicos semicondutores entre dois eletrodos. Tipicamente um *OLED* possui uma espessura total aproximada de 100nm, como mostra a Fig.1.3.

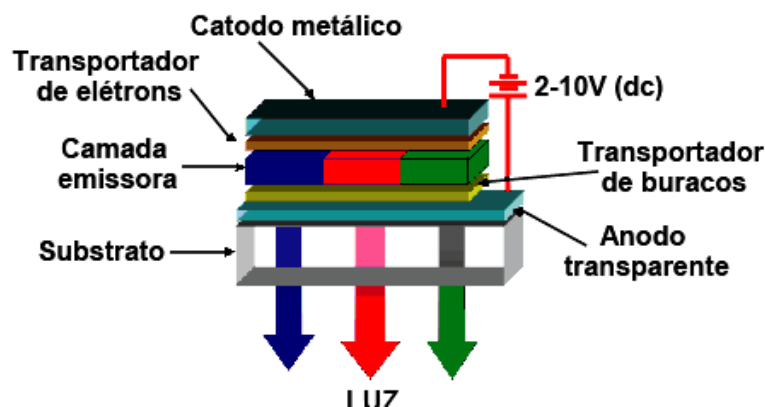


Figura 1.3: Estrutura básica do dispositivo orgânico eletroluminescente (*OLED*)

A estrutura de um *OLED* consiste de um ânodo (geralmente ITO), uma camada transportadora de buracos (*HTL* – *hole transporting layer*), uma camada emissora (*EML* – *emissive layer*), uma camada transportadora de elétrons (*ETL* – *electron transporting layer*), e um cátodo. Ao aplicar tensão em um *OLED*, portadores de carga (buracos e elétrons) são injetados, a partir do ânodo e do

cátodo, respectivamente. Estes portadores migram através das camadas de transporte de carga sob a influência de um campo elétrico e, em seguida, se recombinam na camada emissiva, formando quase-partículas, ou estados excitados altamente localizados, denominados éxcitons ^[4], os quais decaem radiativamente a partir de seu estado excitado para seu estado fundamental emitindo luz. Este processo é conhecido como eletroluminescência (*EL*) ^[5,6].

O termo “*OLED*” foi introduzido em 1987 pela Eastman Kodak, por Tang e Van Slyke, que fabricaram o primeiro dispositivo emissor de luz eficiente baseado em moléculas de baixo peso molecular ^[6,7]. O amplo desenvolvimento desta tecnologia tem reduzido a tensão de funcionamento e aumentado a eficiência dos dispositivos, iniciando uma nova era na pesquisa e produção de *OLEDs*. Em 1990 materiais eletroluminescentes poliméricos foram desenvolvidos por *Cambridge Display Technology*, cujos polímeros permitem o uso da técnica de impressão jato de tinta ^[8,9]. Além disso, os dispositivos com materiais poliméricos podem ser maleáveis ^[10], sendo adequados para telas flexíveis. Embora a qualidade da imagem de *OLEDs* poliméricos (*POLEDs* – *polymeric OLEDs*) ainda esteja longe dos parâmetros desejados, estes apresentam custos de produção menores em função da impressão jato de tinta. Em 2000, Alan Heeger, Alan MacDiarmid e Hideki Shirakawa ganharam o Prêmio Nobel de Química por seu trabalho pioneiro sobre polímeros condutores ^[11,12].

Em 1998, M. E. Thompson e S. R. Forrest utilizaram moléculas fosforescentes baseadas em íons de metais de transição (bloco d) ^[13,14]. A vantagem dos *OLEDs* fosforescentes (*PHOLED* – *phosphorescent OLEDs*) é que estes possuem a capacidade de utilizar tanto éxcitons de singleto como de tripleto em suas moléculas emissoras chegando até um 100% na eficiência interna, enquanto *OLEDs* fluorescentes somente utilizam os éxcitons singleto o que resulta numa eficiência interna limitada de 25%. O fenômeno da fosforescência é, também, observado nos complexos contendo íons de terra rara (bloco f). Embora os complexos gerem fosforescência, os mecanismos de emissão são, consideravelmente, diferentes em função do tipo de íon do complexo, por exemplo, o espectro de eletroluminescência no caso dos complexos baseados em íons metálicos do bloco d é resultante do processo de transferência de carga metal-ligante (*MLCT* – *metal-ligand charge transfer*) que possibilita a mistura de éxciton de singleto e tripleto através de um forte acoplamento spin-orbita ^[15,16]. Além disso, estes complexos apresentam bandas de emissão largas, da ordem de 50-100nm ^[16]. Por outro lado, os complexos orgânicos de terras raras principalmente os trivalentes, sofrem uma forte

blindagem pelos elétrons das subcamadas externas 5s e 5p, que faz com que os íons terras raras não sofram a influência do campo cristalino presente no interior das matrizes ou ligantes nas quais estão inseridos: Isto proporciona um caráter quase atômico às suas transições entre os níveis de energia em diferentes ambientes químicos exibindo assim linhas muito estreitas nos espectros de emissão [17,18,19].

Durante os últimos 20 anos, uma indústria completamente nova com base nas propriedades dos materiais semicondutores orgânicos foi criada. Uma variedade de tecnologias, como *OLEDs* fosforescentes (*PHOLEDs*) [3,16], *OLEDs* brancos (*WOLED – white OLED*) [3,16], *OLEDs* poliméricos (*POLEDs*) [3] e outros, têm sido utilizados para a fabricação de dispositivos baseados em semicondutores orgânicos. Pesquisas recentes de *PHOLEDs* têm sido focadas na redução de custos de produção e aumento na estabilidade dos dispositivos. Além disso, no caso dos complexos de íons metálicos do “bloco d” tem havido grandes esforços na obtenção de compostos emissores na região azul do espectro, já que os compostos atuais não apresentam estabilidade térmica suficiente para alcançar a durabilidade desejada do dispositivo. Ao mesmo tempo os estudos recentes de *PHOLEDs* baseados em complexos de íons de terra rara têm focado esforços para aumentar a eficiência de seus dispositivos.

1.2. Mecanismos de funcionamento do OLED

O *OLED* é formado por uma hetero-junção de diversas camadas de filmes finos de semicondutores orgânicos que podem ser constituídas por compostos orgânicos conjugados ou polímeros conjugados, as quais são depositadas entre dois eletrodos (Fig.1.1). Ao aplicar uma diferença de potencial (campo elétrico) nestes dispositivos é possível gerar quatro processos para obter o mecanismo de eletroluminescência (*EL*); estes processos são: (i) injeção de carga, (ii) transporte, (iii) recombinação e (iv) emissão [20]. A otimização de cada um destes processos é de fundamental importância para melhorar a eficiência do dispositivo.

1.2.1. Injeção de carga

A injeção de carga é o primeiro passo no processo da *EL*. Ao injetar portadores de carga (elétrons e buracos) nas camadas do *OLED* é preciso considerar que existe uma diferença entre a energia do eletrodo e do orbital

molecular do composto orgânico adjacente. Quando esta diferença de energia é pequena existe a probabilidade de injeção dos portadores de carga no filme semiconductor, através dos processos de tunelamento tipo Fowler-Nordheim ^[21] e/ou de emissão termiônica ^[22]. A ocorrência de um ou outro deste processo depende dos tipos de eletrodos, compostos orgânicos e arquitetura do *OLED*. Na teoria de Fowler-Nordheim quando se aplica um campo elétrico suficientemente grande no dispositivo é possível obter o fenômeno do **tunelamento** quântico dos portadores através de uma barreira de potencial triangular graças à existência de um campo elétrico na superfície do metal.

No caso da emissão termiônica os portadores utilizam energia térmica para passar por cima da barreira de potencial. Neste caso, a densidade de corrente é fortemente decrescente em função da espessura dos filmes que compõem o dispositivo. A injeção elétrica do dispositivo limitada por este tipo denomina-se **emissão termiônica**.

Na Figura 1.4 são mostrados os dois tipos de injeção de portadores que podem existir ou co-existir em um dispositivo. A otimização da injeção de portadores influi de forma determinante na escolha dos eletrodos do *OLED* para que os níveis de energia destes se encontrem o mais próximo possível dos orbitais de energia do composto orgânico adjacente.

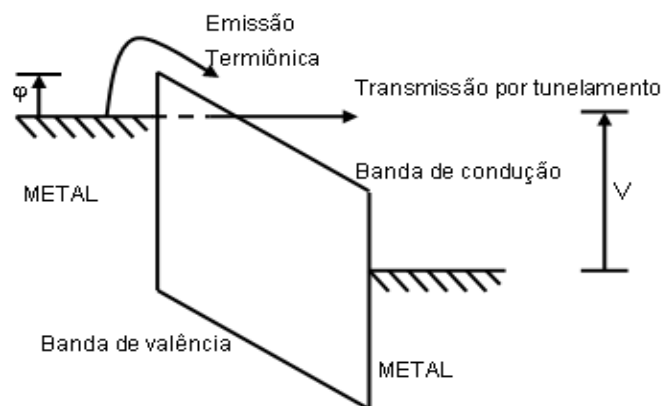


Figura 1.4: Representação da injeção por tunelamento tipo Fowler-Nordheim e injeção termiônica, em uma estrutura metal/semicondutor-intrínseco/metal, onde ϕ corresponde a altura da barreira de potencial na interface metal/semicondutor e V ao potencial elétrico aplicado entre os eletrodos.

Para estudar os processos de injeção de carga nos dispositivos é necessário determinar previamente o tipo portador de carga (elétrons/buracos), que sob tensão aplicada, será injetado majoritariamente na camada do filme

semicondutor orgânico. Caso se considere que os materiais dos dois eletrodos do dispositivo possuam uma baixa *função de trabalho*[†] (como cálcio, alumínio, lítio), a injeção de portadores de carga dos metais para o semicondutor orgânico, com aplicação de tensão, é em grande parte de **elétrons** [23].

No caso em que dois eletrodos de dispositivo orgânico possuem uma alta função de trabalho (como ouro, níquel), a injeção de portadores de carga dos metais para o filme semicondutor orgânico sob tensão aplicada é composta na maioria por **buracos** [23,24].

1.2.2. Transporte de carga

A migração dos buracos e os elétrons através das diversas camadas de filmes orgânicos componentes do dispositivo são resultado do campo elétrico aplicado. Buracos migram do ânodo carregado positivamente e elétrons do cátodo carregado negativamente em direção ao interior das diversas camadas orgânicas. Na maioria dos materiais utilizados na fabricação de *OLEDs*, a transferência intermolecular dos elétrons entre as moléculas adjacentes conduz à migração das cargas através do filme semicondutor por diferentes tipos de mecanismos, os quais são influenciados pela mobilidade dos portadores e pelo número de armadilhas presente nos materiais [25]. Os compostos de baixo peso molecular normalmente apresentam baixa mobilidade de elétrons, da ordem de 10^{-6} cm²/V.s; enquanto que a mobilidade de buracos é maior, 10^{-4} cm²/V.s [26]. A Fig.1.5 mostra os diferentes mecanismos que podem ser observados em um *OLED* através da curva logarítmica da densidade de corrente (mA/cm²) em função do campo elétrico (V/cm²) aplicado.

[†] A função trabalho (Φ) é definida como a diferença entre as energias de vácuo E_V e de E_F para um sistema, que corresponde à energia necessária para se remover um elétron da amostra, ou seja, corresponde a uma medida da barreira de potenciais que os elétrons devem superar para abandonarem o material

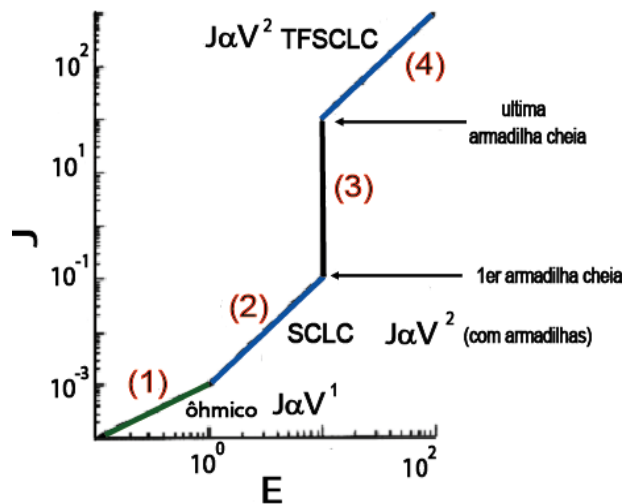


Figura 1.5: Representação do comportamento J-V para um OLED, e os respectivos tipos de transporte em cada região da curva ^[25], sendo (1) ôhmico, (2) corrente limitada por carga espacial (SCLC), (3) corrente limitada por cargas aprisionadas (TCL) e (4) corrente limitada por carga espacial livre de armadilhas (TFSLC).

Entre os mecanismos de transporte estão: (1) ôhmico, (2) corrente limitada por carga espacial (SCLC – *space charge limited current*), (3) corrente limitada por cargas aprisionadas (TCL – *trapped-charge limited current*), e (4) corrente limitada por carga espacial livre de armadilhas (TFSLC – *trap free space charge limited current*).

O transporte ôhmico ocorre quando há uma estrutura metal/semicondutor/metal sem armadilhas para os portadores de carga (elétrons e buracos). Para baixos valores de tensão, espera-se que a densidade de corrente varie linearmente com a tensão aplicada ^[25]. O regime SCLC é observado no caso da densidade de carga livre gerada termicamente em um dispositivo ser desprezível em relação à densidade de cargas injetadas e ao nível de Fermi localizado abaixo da energia das armadilhas. Neste caso, se formará excesso de carga nas proximidades do eletrodo, chamada de carga espacial, que limitará a corrente do dispositivo. A densidade de corrente neste modelo é proporcional a V^2 e é dada pela Lei de Mott-Gurney ^[27-30]. O regime TCL é observado ao aumentar a tensão aplicada no dispositivo, quando o nível de Fermi move-se em direção ao nível do orbital molecular de mais baixa energia (LUMO – *lowest unoccupied molecular orbital*) devido ao aumento da densidade de elétrons injetados. De esta forma, as armadilhas que estão abaixo do nível de Fermi são preenchidas, reduzindo a quantidade de armadilhas vazias e aumentando a mobilidade efetiva dos elétrons. Neste regime a densidade de

corrente é regida por uma lei de potência ^[31]. O regime *TFSCLS* é observado com o incremento da tensão aplicada, quando a densidade de portadores torna-se suficientemente grande para que todas as armadilhas estejam ocupadas. Novamente a dependência da densidade de corrente com a tensão é quadrática, mas a mobilidade é maior que no caso da *SCLC* ^[31].

1.2.3. Recombinação e emissão

Ao recombinarem-se elétrons e buracos em filmes orgânicos formam quase-partículas neutras denominadas éxcitons de Frenkel ^[32,33]. Os éxcitons por serem quase-partículas, possuem spin e, de acordo com a mecânica quântica, estes éxcitons são formados por 25% éxcitons com spin total $S=0$, denominados éxcitons singleto (anti-simétricos), e 75% de éxcitons com spin total $S=1$, denominados éxcitons de tripleto (simétrico) ^[34,35] (Fig.1.6). Na fluorescência a regra da conservação do spin somente permite decaimentos radiativos dos estados da mesma multiplicidade de spin, ou seja, singleto/singleto ou tripleto/tripletto ^[36]. Dessa forma, quando os éxcitons relaxam radiativamente dentro das camadas do *OLED*, a eficiência máxima no *OLED* fabricado será só de 25% ^[37]. No entanto, nos últimos anos tem sido dada ênfase à identificação de novos materiais fosforescentes que violem a regra de conservação do spin (transições proibidas) ^[15,16,38,39], gerando o decaimento radiativo do estado tripleto para o singleto. Existem alguns mecanismos que permitem que a regra de simetria de spin seja quebrada, tais como o acoplamento spin-órbita ou o acoplamento com estados vibracionais ^[36, 40,41].

O acoplamento spin-órbita, por exemplo, combina estados de singleto e tripleto e possui uma dependência que varia com a quarta potência de Z (onde Z é o número atômico), de forma que este efeito torna-se mais pronunciado em complexos baseados em íons de metais de transição (bloco d) como Os, Ru, Pd, Pt, Ir ou Au ^[15,16,41,42]. Já no caso do acoplamento com estados vibracionais resultam as transições intraconfiguracionais dos elétrons *4f*, fazendo com que os complexos à base de terra rara apresentem decaimentos não permitidos ^[38,39]. Portanto, é possível encontrar novos compostos cuja emissão seja proveniente de transições de estados de tripleto e que possuam uma eficiência quântica interna ($EQI = \eta_{int}$)[‡] de 100%.

[‡] Eficiência quântica interna ($EQI = \eta_{int}$) é definida pela razão entre o número de fótons produzidos pelo dispositivo e o número de cargas injetadas ^[20].

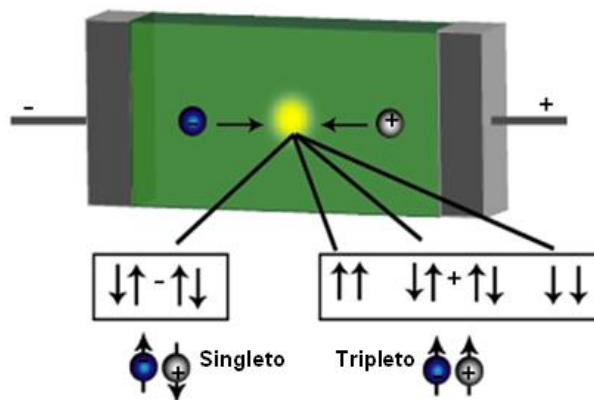


Figura 1.6: Representação da recombinação de cargas que resultam em éxcitons de caráter singleto e/ou tripleto dependendo da molécula emissora ^[16].

A regra de spin pode ser alterada se a recombinação não ocorre de forma estatisticamente controlada, ou no caso do estado excitado gerado não corresponder a um estado puro de singleto ou estado puro do tripleto ^[43]. Esta última situação é bastante comum dentro dos complexos contendo átomos pesados ^[16], como ocorre no acoplamento spin-órbita que consegue a mistura dos estados de singleto e tripleto através do cruzamento inter-sistemas (*ISC – intersystem crossing*) ^[16], resultando em decaimentos radiativos a temperatura ambiente desde os estados de tripleto. Ao empregar somente moléculas com alta eficiência no tripleto (fosforescência), a eletrofosforescência tem um decaimento radiativo do tripleto pequeno, dificultando sua observação à temperatura ambiente ^[16]. A maioria dos trabalhos publicados na literatura ^[15,44,45] mostra que para melhorar a eficiência quântica externa (*EQE*)[§] dos *OLEDs*, existe a necessidade de utilizar os compostos fosforescentes como dopantes (baixas concentrações) numa matriz orgânica.

1.3. Matrizes e dopantes

Com o intuito de aumentar a eficiência quântica externa (*EQE*) dos *OLEDs*, muitos artigos recentes apresentam a utilização de uma matriz dopada com um composto emissor ^[15,44,45]. Os principais motivos do uso da matriz nos *PHOLEDs* são: i) diminuição da concentração de centros fosforescentes do dopante, para reduzir o efeito da aniquilação tripleto-tripletto na camada emissora ^[15,16]; ii)

[§] Eficiência quântica externa (*EQE*) corresponde à relação entre o número total de fótons emitidos pelo dispositivo e o número de elétrons injetados ^[30].

aumento da estabilidade elétrica, iii) aumento da estabilidade química, iv) aumento da estabilidade térmica e v) aumento da estabilidade eletroquímica ^[16].

Os compostos fosforescentes de forma geral não apresentam boa condutividade ^[3,16]. Além disso, como descrito anteriormente, o composto denominado “matriz” deve possuir um estado tripleto de alta energia para prevenir a perda de transferência de energia entre duas moléculas de compostos fosforescentes e assegurar o confinamento de éxcitons de tripleto nas moléculas do composto fosforescente (dopante) ^[46-48].

Os dados da literatura mostram que a classe principal de compostos orgânicos que cumpre as condições específicas de matriz no caso dos complexos à base de íons de metais de transição é o grupo dos carbazóis, com os quais é possível obter *EQE* da ordem de 60-80% ^[46]. No caso dos complexos de terras raras ainda não existe uma definição de tal classe de materiais para a matriz, mas alguns estudos indicam que o mesmo grupo auxilia no aumento da condução de portadores nos complexos lantanídeos, aumentando significativamente sua *EQE* ^[16].