

Díodos emissores de luz e iluminação

Katharina Lorenz¹, José Gonçalves Marques¹, Teresa Monteiro²

¹ Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Campus Tecnológico e Nuclear, Estrada Nacional 10, 2695-066 Bobadela LRS Portugal

² Departamento de Física e I3N, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal

lorenz@ctn.tecnico.ulisboa.pt

Resumo

Os díodos emissores de luz (LED, acrónimo de *Light Emitting Diode*) são fontes de luz baseados em materiais semicondutores, que apresentam uma elevada eficiência, longo tempo de vida e elevada robustez. O desenvolvimento, nos últimos 20 anos, de LED azuis muito eficientes, abriu a possibilidade de utilizar estes dispositivos na geração da designada luz branca, os “LED brancos”, que já começaram a entrar nas nossas casas e que vão certamente revolucionar as tecnologias de iluminação nos próximos anos. Este artigo dá uma breve introdução ao desenvolvimento e funcionamentos dos LED e à sua utilização para a iluminação em geral.

Introdução

A iluminação tem estado intimamente ligada ao desenvolvimento humano e à industrialização, desde a invenção do fogo até ao desenvolvimento da lâmpada elétrica de filamento incandescente por Thomas Edison. Quando a Terra é vista do espaço, o brilho à noite é máximo nas zonas urbanizadas, que não coincidem sempre com as zonas mais habitadas, como se pode constatar na fotografia da NASA mostrada na Fig. 1. Um dos objetivos da iniciativa “Ano Internacional da Luz”¹ é, precisamente, a sensibilização para o facto de, ainda hoje, vastas regiões habitadas do mundo não disporem de eletri-



Fig. 1 - A Terra à noite, vista do espaço. (© NASA [1])

¹ *International Year of Light and Light-based Technologies (IYL 2015)*: Iniciativa de um vasto grupo de sociedades científicas promovida pela UNESCO - <http://www.light2015.org/>

cidade e, conseqüentemente, de iluminação. A iluminação de residências, empresas e espaços públicos corresponde a cerca de 15 % do consumo atual de eletricidade na Europa [2]. O desenvolvimento de dispositivos emissores de luz mais eficientes é assim uma prioridade elevada na investigação em física de materiais e premente para as indústrias do setor. Os díodos emissores de luz (LED, acrónimo de *Light Emitting Diode*) baseados em nitreto de gálio (GaN) e, em particular, na sua liga ternária de nitreto de gálio com índio, InGaN, mostraram já o seu extraordinário potencial neste domínio, sendo efetivamente as fontes de luz visível mais eficientes no mercado. O grande impacto social, ambiental e económico destes dispositivos foi reconhecido pelo Comité do Prémio Nobel da Física, que atribuiu este prémio em 2014 aos investigadores Isamu Akasaki, Hiroshi Amano e Shuji Nakamura pela invenção de LED azuis eficientes, que possibilitou o desenvolvimento atual na geração de luz branca para a iluminação, baseada em materiais inorgânicos de estado sólido [3].

Como funciona um LED?

Os LED são dispositivos optoelectrónicos que transformam energia eléctrica em luz. O processo é contrário ao mecanismo físico de uma célula solar que permite a conversão de luz solar em energia eléctrica. No caso de um LED, por injeção eléctrica, observa-se recombinação ótica. De uma forma simplificada, a estrutura de um LED pode ser discutida com base nos mecanismos de um díodo normal, nomeadamente considerando uma junção p-n de semiconductor, sujeita a uma tensão direta. Um semiconductor cristalino possui um conjunto de propriedades baseadas nos eletrões de valência dos átomos que o constituem, entre as quais a modificação dos níveis de energia atómicos dos átomos individuais em bandas de energia bem definidas (devido à presença de N átomos na rede), designadas por “banda de valência” e “banda de condução” e que possuem estados de energia que podem ser ocupados por eletrões. Estas bandas estão separadas entre si por uma região proibida de energias para eletrões, E_g , correspondendo ao hiato

energético do semiconductor (do inglês *bandgap energy*) e que varia de material para material, podendo ser entendido como uma impressão digital de um dado semiconductor. Estes materiais, quando intencionalmente dopados com elementos externos aos átomos constituintes da rede, de maior ou menor valência que estes, são ditos tipo-n ou tipo-p, uma vez que os primeiros doam facilmente eletrões para a banda de condução e os segundos geram défice de eletrões da banda de valência (lacunas). Numa junção p-n de um semiconductor em equilíbrio, regiões tipo-n e tipo-p estão em contacto através da junção, a designada junção metalúrgica, e a assimetria na densidade de portadores resulta na difusão de portadores através da junção, criando uma zona de depleção de carga que, por seu lado, induz um campo eléctrico nas proximidades da junção metalúrgica. Quando uma tensão direta é aplicada através da junção p-n, junção fora do equilíbrio, são injetados eletrões e buracos através da região de depleção. Estes portadores minoritários em excesso podem recombinar-se radiativamente com os portadores maioritários, dando lugar à emissão de luz (fotões), ou seja, à observação de eletroluminescência. A recombinação pode ser de natureza intrínseca, ou seja, entre as bandas de condução e valência (normalmente observada nos designados semicondutores de hiato energético direto) ou extrínseca (envolvendo impurezas externas no material). Este procedimento está na base da operação dos LED. Deste modo, e na maior parte dos casos, o hiato de energia do semiconductor determina a cor dos LED.

Uma breve história do LED

A emissão de luz por um material sólido quando excitado por uma fonte eléctrica foi observada pela primeira vez no início do século XX [4]. O fenómeno foi designado eletroluminescência, reconhecendo que o processo que levava à emissão de luz era fundamentalmente diferente do processo de incandescência. A eletroluminescência ocorre à temperatura ambiente, enquanto uma lâmpada incandescente emite luz quando o seu filamento é aquecido a muito alta temperatura (tipicamente acima de 750 °C) até começar a brilhar. O primeiro caso de eletroluminescência foi observado num semiconductor com largo hiato de energia, o carboneto de silício (SiC), que se verificou emitir luz azul. Contudo, este é um semiconductor com hiato energético indireto, logo muito ineficiente para processos de emissão de luz. Apesar de ter sido o primeiro material utilizado para o fabrico de LED, nun-

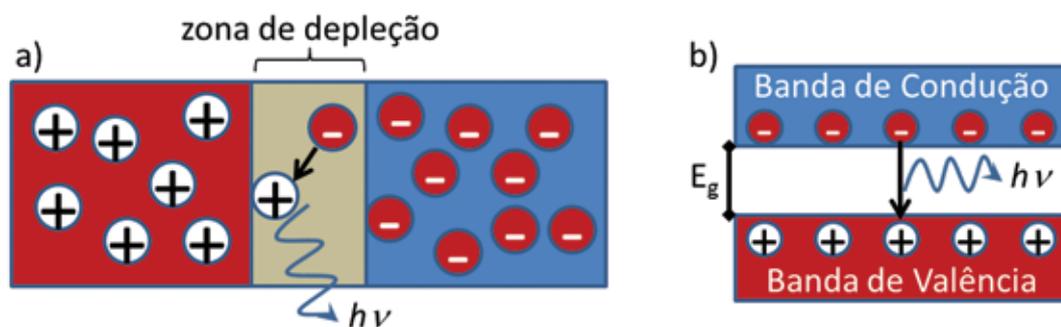


Fig. 2 - a) Esquema de um díodo que consiste numa junção p-n de semiconductor. Na zona de depleção, eletrões da banda de condução recombinam-se radiativamente com lacunas da banda de valência, emitindo um fóton. b) Diagrama simplificado da estrutura de bandas eletrónicas de um semiconductor. A energia do fóton emitido na recombinação banda a banda corresponde ao hiato de energia E_g do semiconductor.

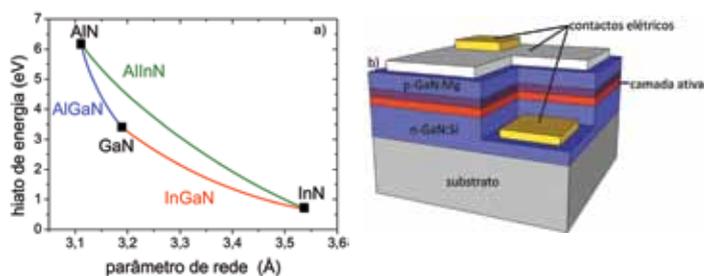


Fig. 3 - a) Hiato energético dos semicondutores III-N GaN, InN e AlN e dos seus compostos ternários em função do parâmetro de rede. É possível variar o hiato energético destes semicondutores adaptando a composição das ligas, sintonizando a cor de emissão dos LED. b) Esquema de um LED baseado em semicondutores III-N. A estrutura consiste em camadas crescidas por epitaxia num substrato, geralmente Al_2O_3 cristalino. As camadas tipo n e p são realizadas por dopagem de GaN com Si e Mg, respetivamente. A luz do LED surge da camada ativa que consiste num ou mais poços quânticos de InGaN. A composição e espessura (~1-5 nm) destas camadas ultrafinas de InGaN determinam a cor emitida do LED. O contacto elétrico do lado-p é geralmente realizado por uma camada condutora transparente à luz seguido por um contacto metálico pequeno.

ca conseguiu atingir as eficiências dos semicondutores III-V² desenvolvidos na segunda metade do século XX.

O desenvolvimento de LED e lasers eficientes na gama espectral do infravermelho e vermelho à base de ligas de AlGaInAs e AlGaInP possibilitou uma vasta gama de aplicações como, por exemplo, comandos à distância, lâmpadas de sinalização, bem como leitores e escritores de DVD. No fim dos anos 60 surgiram no mercado LED verdes à base de GaP:N, sendo que nestes a recombinação radiativa possui uma natureza extrínseca (deve-se à impureza de azoto na rede do fosfeto de gálio, GaP) [4]. Para complementar a emissão nas três cores primárias e, a partir da mistura destas cores, conseguir todas as cores no espectro visível, por exemplo, para um ecrã à base de LED, só faltava o LED azul.

Nos anos 70 começou uma primeira vaga de investigação nos semicondutores III-V, em que o elemento do grupo V é o azoto e, em particular, no nitreto de gálio, GaN. No entanto, apesar de uma década de trabalho intenso, pouco progresso foi conseguido, sobretudo devido à dificuldade em crescer filmes de GaN de boa qualidade bem como em encontrar um dopante eficiente de tipo-p neste material [4]. Poucos continuaram a apostar no GaN até ao início dos anos 90, altura em que Akasaki, Amano e Nakamura encontraram soluções para estes problemas fundamentais, iniciando uma nova vaga de investigação em nitretos que se mantém à atualidade. O desenvolvimento de LED e lasers azuis à base de nitretos semicondutores possibilitou, por exemplo, o novo formato de disco Blu-ray, capaz de armazenar cerca de 5 vezes mais informação que um disco DVD, bem como os designados “LED brancos” à base de materiais inorgânicos, atualmente utilizados em iluminação.

Os semicondutores III-N (GaN, InN e AlN, assim como os compostos ternários e quaternários de AlInGaIn) são semicondutores com hiato direto possibilitando aplicações optoelectrónicas eficientes. Através da sua composição é

possível controlar o valor do hiato energético, desde 0,7 eV para o InN, até 6 eV para o AlN (ver Fig. 3(a)). Apesar de ser teoricamente possível obter emissão numa gama espectral muito vasta, do infravermelho até ao ultravioleta, até agora só os LED azuis atingiram uma eficiência comparável com a dos vermelhos. Na Fig. 3(b) mostra-se um esquema de um LED azul típico, composto por camadas epitaxiais de GaN, tipos n e p, que formam o díodo de junção, bem como pela designada “camada ativa”, que consiste em uma ou mais camadas ultrafinas de InGaN separadas por GaN (poços quânticos simples ou múltiplos, QW ou MQW). É nestas camadas de InGaN, nos poços quânticos, que os eletrões e buracos preferencialmente se recombinam radiativamente, emitindo luz azul.

Os “LED brancos” para a iluminação

Branco é uma cor acromática (uma cor sem cor) que consiste na sobreposição de todas as frequências do espectro visível. O termo “LED branco” utilizado no dia-a-dia é uma escolha infeliz, uma vez que não existe nenhum LED que emita luz branca. Um LED emite luz de uma cor bem definida que depende do hiato de energia do semicondutor em que é baseado.

Existem duas soluções tecnológicas para transformar a luz monocromática dos LED em luz branca (Fig. 4). A solução utilizada na maioria dos designados “LED brancos” disponíveis no mercado consiste em acoplar um LED azul de InGaN/GaN a uma camada de um material luminescente (vulgarmente designado por *phosphor*). Este material luminescente que reveste o LED azul absorve parte da radiação do mesmo e emite luz amarela. A mistura das bandas de emissão azul e amarela é interpretada como luz branca pelo olho humano (Fig. 4(a)). Como material luminescente são normalmente utilizadas matrizes óxidas dopadas com lantanídeos. No entanto, o processo de absorção e conversão de luz de alta frequência para luz de baixa frequência está sujeito a perdas, as quais limitam a eficiência deste tipo de LED. Uma tecnologia potencialmente mais eficiente combina três LED a emitir no vermelho, verde e azul (RGB), cuja mistura também resulta em luz branca (Fig. 4(b)). Contudo, enquanto os LED azuis e vermelhos apresentam uma eficiência quântica

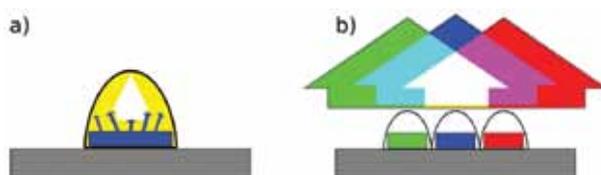


Fig. 4 - Representação esquemática das duas estratégias para produzir “luz branca” utilizando LED: a) Aproximação que considera um LED azul revestido por um material luminescente que emite na gama amarela. b) Aproximação que utiliza três LED que emitem no vermelho, verde e azul (RGB). A sobreposição das bandas de luminescência é percebida como branco ao olho humano [5]. (© WILEY)

² Semicondutores III-V são compostos feitos de elementos dos grupos III (Al, Ga, In) e V (N, P, As) da tabela periódica dos elementos.

acima dos 90 % (isto é, mais de 90 % da energia elétrica é efetivamente transformada em luz), a eficiência dos LED verdes é reduzida, uma questão que é conhecida como o problema do hiato verde (ou *green gap*). O desenvolvimento de LED verdes mais eficientes é assim um dos temas mais abordados pela investigação atual na área dos semicondutores, assim como a procura de emissão de luz branca em amostras monolíticas baseadas em GaN [6, 7].

A introdução de lâmpadas LED no mercado coincidiu praticamente com a entrada em vigor de novas regras na União Europeia sobre a marcação de lâmpadas (Regulamento n.º 874/2012, de 12 de julho). Com efeito, as lâmpadas incandescentes eram apenas caracterizadas pela sua potência e não pelo seu fluxo luminoso. Com a introdução das lâmpadas CFL (*Compact Fluorescent Lamp*), passaram a ser indicadas a potência da nova lâmpada e a de uma lâmpada incandescente emitindo a mesma quantidade de luz, para ilustrar a redução de consumo. Atualmente, é indicado o fluxo luminoso em lúmen (lm) e a potência da lâmpada. Como referência, uma lâmpada incandescente de 75 W emitia 1100 lm, correspondendo a cerca de 15 lm/W; para lâmpadas de baixa potência este valor era menor, tipicamente 12 lm/W. As melhores lâmpadas LED disponíveis comercialmente estão tipicamente no intervalo 100 a 120 lm/W, tendo-se já conseguido protótipos com 300 lm/W [2].

Nas lâmpadas LED disponíveis comercialmente, os LED estão geralmente dispostos de forma linear, quadrangular ou circular. Na Fig. 5, mostra-se uma lâmpada com casquilho E14 (casquilho dito de Edison, em homenagem ao seu inventor, com 14 mm de diâmetro) completa e depois de removido o difusor de luz, expondo dez LED dispostos de forma circular. Esta lâmpada de 400 lm tem um consumo de apenas 5,5 W a 220 V, correspondendo a 73 lm/W, ou seja, cerca de cinco vezes mais luz que uma lâmpada incandescente. Neste modelo, os dez LED estão montados em série e o conjunto é alimentado com 150 V, em corrente contínua. Esta tensão é obtida a partir dos 220 V em corrente alterna num pequeno circuito montado entre o casquilho convencional e os LED. Para a eficiência global da lâmpada LED, contribui assim não só o modelo de LED utilizado, mas também o conversor de corrente alterna para corrente contínua.

Conclusão

A utilização de “LED brancos” centrou-se até recentemente em aplicações de nicho, como a retroiluminação de *écrans* em monitores, televisões e telemóveis, nos faróis de automóveis ou ainda em semáforos, onde o pequeno tamanho e a robustez, em combinação com uma intensidade elevada, apresentam vantagens óbvias comparativamente a outras fontes de luz. A queda dos preços na



Fig. 5 - Lâmpada com casquilho E14 completa e depois de removido o difusor de luz, expondo dez LED dispostos de forma circular.

produção de LED nos últimos anos, o aumento significativo da sua emissão de luz por watt, em conjunto com os preços elevados de eletricidade e um aumento da consciência do público e dos governos perante problemas de sustentabilidade energética, prepararam o caminho para uma utilização de LED na iluminação geral em grande escala. Cerca de 135 anos depois da invenção da lâmpada incandescente por Thomas Edison, estamos perante uma nova revolução na iluminação. Nos próximos 20 anos, os LED substituirão a maior parte das lâmpadas convencionais, abrirão o caminho para uma poupança significativa de eletricidade e trarão soluções de iluminação acessíveis a regiões menos desenvolvidas do mundo. Podem assim contribuir para uma gestão energética mais sustentável e uma distribuição de recursos mais justa no futuro. Esperemos que seja um futuro iluminado.

Referências

1. <http://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=79765> (acedido em 04-11-2015).
2. G. Zissis, P. Bertoldi, European Commission JRC Science and Policy Report "2014 Update on the Status of LED market", doi: 10.2790/756893.
3. "The Nobel Prize in Physics 2014". Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014. Web. 7 Nov 2015. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/
4. E. Fred Schubert, "Light Emitting Diodes", 2ª edição, Cambridge University Press, 2006, ISBN 978-0-521-86538. <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/>
5. K. P. O'Donnell, M. Auf der Maur, A. Di Carlo, K. Lorenz, "It's not easy being green: Strategies for all-nitrides, all-colour solid state lighting", Phys. Status Solidi RRL 6, 49-52 (2012).
6. N. Ben Sedrine, T. C. Esteves, J. Rodrigues, L. Rino, M. R. Correia, M. C. Sequeira, A. J. Neves, E. Alves, M. Bockowski, P. R. Edwards, K.P. O'Donnell, K. Lorenz and T. Monteiro, "Photoluminescence studies of a perceived white light emission from a monolithic InGaN/GaN quantum well structure", Scientific Reports 5, 13739 (2015).
7. M.A. Sousa, T.C. Esteves, N. Ben Sedrine, J. Rodrigues, M.B. Lourenço, A. Redondo-Cubero, E. Alves, K.P. O'Donnell, M. Bockowski, C. Wetzel, M.R. Correia, K. Lorenz, T. Monteiro, "Influence of nitrogen implantation and thermal annealing on the optical properties of green emitting InGaN/GaN multiple quantum wells", Scientific Reports 5, 09703 (2015).



Katharina Lorenz doutorou-se em Física na Universidade de Bona, Alemanha, em 2002. Nesta altura iniciou o trabalho nos semicondutores III-N com um estudo sobre a dopagem de GaN por implantação iónica. Presentemente é Investigadora Auxiliar no Instituto Superior Técnico e membro do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear deste instituto. A sua área de especialização é a aplicação de técnicas nucleares na caracterização e modificação de materiais funcionais. Em particular, estuda heteroestruturas e nanoestruturas de semicondutores para aplicações na eletrónica e optoelectrónica.



José Gonçalves Marques doutorou-se em Física (Física Nuclear) na Universidade de Lisboa, em 1996. Presentemente é Investigador Principal com Agregação no Instituto Superior Técnico e membro do Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares deste Instituto. É ainda Vice-Presidente do Instituto Superior Técnico, sendo responsável pela gestão do Campus Tecnológico e Nuclear. Os seus interesses atuais de investigação são o estudo e caracterização de defeitos criados por radiação em materiais, em particular em nitreto de gálio.



Teresa Monteiro doutorou-se em Física (Matéria Condensada) na Universidade de Aveiro, em 1993. Na atualidade, é Professora Associada com Agregação da Universidade de Aveiro, docente do Departamento de Física e membro do Laboratório Associado I3N. O seu domínio de especialização é a caracterização óptica de materiais de largo hiato (em volume, filmes finos e nanoestruturas) de interesse para optoelectrónica e bio-aplicações. Os seus primeiros trabalhos em nitretos do grupo III datam de 1996.