

Laurent Massol



LES LED POUR L'ÉCLAIRAGE

Fonctionnement et performances
Critères de choix et mise en œuvre

2^e édition

DUNOD

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



Photo de couverture : © John Sturrock

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2012, 2015

5, rue Laromiguière, 75005 Paris

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-074185-4

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Avant-propos	1
Chapitre 1 : Histoire de l'éclairage : de la bougie à la LED	5
1.1 Une brève histoire de la lumière	5
1.2 La lumière : définition, nature et propagation	6
1.3 Retour sur l'évolution de la maîtrise de la lumière	8
1.4 La révolution des éclairages à semi-conducteur	19
Chapitre 2 : Méthodes de mesure de la lumière	27
2.1 Rayonnement, lumière et grandeurs associées	27
2.2 Les couleurs et le blanc	32
2.3 Autres grandeurs énergétiques et photométriques	37
2.4 Les instruments de mesure	40
Chapitre 3 : Comment fonctionne une LED ?	49
3.1 De quoi se compose une LED ?	49
3.2 Technologie d'émission – fabrication du blanc	62
3.3 L'enjeu du boîtier des LED : la dissipation thermique	67
Chapitre 4 : Les LED multipuces et les matrices de LED	75
4.1 La nécessité d'éclairer	75
4.2 LED multipuces, module COB, module de LED	76
4.3 Diversité des puces semi-conductrices implantées	84

Chapitre 5 : Les semi-conducteurs	87
5.1 Le mécanisme d'émission – théorie des bandes de valence	87
5.2 Types de semi-conducteurs	97
5.3 Méthode de fabrication	102
5.4 Évolutions récentes	109
Chapitre 6 : De la puce au boîtier	113
6.1 Packaging électronique	113
6.2 Le substrat	114
6.3 Mise en œuvre de la puce semi-conductrice	119
6.4 Technologie d'alimentation	120
6.5 Les luminophores	124
6.6 Encapsulation – boîtier des LED	131
6.7 Fabrication des LED	131
Chapitre 7 : Optiques primaires et extraction lumineuse	137
7.1 Qu'est-ce qu'une optique primaire ?	137
7.2 Description détaillée des optiques primaires	138
7.3 Méthode d'extraction lumineuse	146
Chapitre 8 : Performances des LED	151
8.1 Le pilotage en courant d'une LED	151
8.2 Tension d'alimentation des LED	157
Chapitre 9 : La maturité des différentes technologies de LED	177
9.1 Technologies disponibles pour l'émission de blanc	177
9.2 La technologie RGB	199
9.3 Maturité de la technologie LED	202
Chapitre 10 : Une grande variété d'applications	205
10.1 Balisage lumineux et « voyants lumineux »	205
10.2 Éclairage publicitaire et enseignes lumineuses	205

10.3 Rétro-éclairage d'écrans	207
10.4 Panneaux d'information et horloges	207
10.5 Éclairage et signalisation routière	208
10.6 Éclairages extérieurs	212
10.7 Éclairages architecturaux et éclairages scéniques	212
10.8 Éclairages résidentiels	214
10.9 Éclairages de bureaux et de zones de passage	214
10.10 Éclairages intérieurs, professionnels et grand public	216
10.11 Éclairage pour les voitures	223
10.12 Éclairage dans les transports en commun	225
10.13 Éclairage de machines-outils	228
10.14 Éclairages décoratifs	229
10.15 Éclairages intérieurs industriels – Entrepôts	230
10.16 Autres types d'éclairage	232
10.17 Maturité mais pas infaillibilité	236
Chapitre 11 : Évolutions récentes des technologies LED	241
11.1 Amélioration de la puce semi-conductrice et du substrat	241
11.2 Performances des luminophores	246
11.3 Méthodes d'alimentation	249
11.4 Méthodes d'extraction lumineuse	250
11.5 Densité lumineuse : évolution des boîtiers des LED	252
Chapitre 12 : Du composant à l'application d'éclairage	257
12.1 Identification des grands domaines d'application des LED	257
12.2 Choix de la technologie LED appropriée	263
12.3 Modes d'intégration et technologies associées	268
12.4 Développements récents de modules LED	275

Chapitre 13 : Marché, acteurs et perspectives	279
13.1 Avantages et inconvénients des LED comparées aux autres technologies d'éclairage	280
13.2 Le marché des LED	284
13.3 Les principaux fabricants de LED	287
13.4 Le coût total de la technologie LED	290
13.5 Prévision des performances des LED : 2015-2018	298
Bibliographie	303
Index	307

Retrouvez les compléments en ligne de cet ouvrage sur le site Dunod à l'adresse : www.dunod.com/contenus-complementaires/9782100738632

- la R&D en 2016,
- les LED de A à Z : choix et performances,
- la bibliographie augmentée,
- Guide pour la mesure des performances des LED : quels outils pour quels objectifs ?

Avant-propos

Les technologies apparaissent, se chevauchent, s'améliorent. Parfois elles coexistent quelques temps, puis les plus récentes font disparaître les précédentes. Souvent elles apportent un complément technique, des possibilités nouvelles, des fonctionnalités innovantes. Mais il est très difficile de prévoir à l'avance leur impact de façon précise.

L'ère du numérique semble avoir pris ses marques et s'être installée de façon durable dans notre civilisation, et la technologie des LED s'inscrit dans cette logique. D'ores et déjà il est légitime de se demander combien de temps mettront les LED pour pousser les technologies d'éclairage plus traditionnelles dans leurs derniers retranchements, avant qu'elles ne disparaissent comme ce fut le cas des téléviseurs à tube cathodique. À moins que l'évolution des anciennes technologies d'éclairage comme les lampes à incandescence (peu à peu interdites à la vente à cause de leur faible rendement) les oriente vers des applications plus décoratives pour lesquelles le numérique a plus difficilement sa place.

Toutefois, même si l'on pressent cette évolution et que l'on perçoit difficilement une autre issue, il serait imprudent d'être catégorique car l'acceptabilité d'une technologie et des systèmes qui l'intègrent dépend de nombreux paramètres et conditions (sociales, économiques, environnementales). Il faut ouvrir la porte aux LED mais il faut aussi leur demander de se mettre au service des utilisateurs, d'apporter de nouvelles solutions et d'atteindre de meilleures performances, avant de leur accorder une place prépondérante. Reléguer au second plan les technologies qui nous ont servi pendant des décennies, sans demander aux LED d'apporter leur contribution serait manquer de respect à ceux qui ont œuvré en leur temps pour l'amélioration de l'éclairage (au sens large) et qui eux aussi avaient été confrontés à ce type d'évolution.

Le récent prix Nobel de Physique 2014 a été décerné à trois Japonais, MM. Akasaki, Amano et Nakamura, pour leurs travaux sur la technologie LED entre 1987 et 1991. J'ai eu la chance de m'entretenir à plusieurs reprises lors de différentes conférences avec le Pr. Nakamura, avec lequel j'ai pu échanger à la fois des idées techniques et technologiques, mais aussi des idées sur l'histoire et l'origine de la LED.

C'est dans cet esprit, conscient et respectueux du passé et désirant apporter de nouvelles solutions, que j'ai écrit ce livre. Les LED ont un formidable avenir, mais elles ont aussi des limites et ne pas en être conscient, ne pas savoir quels sont leurs réelles qualités et défauts, peut aboutir à la réalisation de systèmes de piètre qualité.

L'objectif principal de ce livre est de donner des éléments de réponse précis à ceux qui désirent s'informer sur le fonctionnement des LED et sur leurs réelles performances. La plupart des données fournies ont été constatées et mesurées concrètement lors des nombreux projets auxquels j'ai participé avec mon équipe. L'important pour moi était de présenter des informations fiables que le lecteur puisse exploiter en toute confiance, mais aussi quelques prévisions, bien sûr plus incertaines, pour imaginer ce que pourront être les rendements ou les prix des LED dans les années à venir. Dans cette seconde édition, j'ai repris les éléments techniques qui ont évolué et j'ai remis au goût du jour les performances ainsi que les applications qui ont pu se développer grâce aux améliorations des technologies.

Il fallait aussi rendre cette technologie accessible à tous ceux qui n'ont pas forcément un solide bagage technique dans les semi-conducteurs, et qui sont pourtant amenés à prendre des décisions dans le choix de certains systèmes d'éclairage. Je pense en particulier aux responsables des achats au sein de grandes entreprises ou de PME-PMI, aux designers industriels, aux concepteurs lumière, aux architectes (intérieur et/ou extérieur) ou encore aux responsables marketing. À tous, ce livre apportera des éléments de réponse sur les possibilités et les perspectives dans les prochaines années, en les guidant vers une compréhension des enjeux de la technologie LED.

Il était également impératif de rentrer dans le détail pour ceux qui suivent l'évolution des LED (notamment celles de forte puissance), et qui ont besoin d'informations techniques non seulement du point de vue de la conception des LED mais aussi du point de vue de leur comportement selon les différentes conditions de fonctionnement. Ces ingénieurs et techniciens sont à l'origine de la création de systèmes d'éclairage et ils doivent choisir une technologie en bonne adéquation avec l'application finale. Cela requiert de comprendre et d'appréhender les différentes stratégies mises en œuvre par les fabricants de LED, afin de mieux cerner les capacités des composants proposés et de faire le choix le plus judicieux. Ces acteurs souvent en charge des développements dans les entreprises sont responsables de bureau d'étude, ingénieur d'application ou encore technicien, et apportent les éléments techniques à une solution client.

Remerciements

Ils orientent les designs en fonction des possibilités proposées par les LED, avec souvent une forte connotation d'évolution des produits, ce qui implique la connaissance d'éléments prévisionnels notamment en termes de performances technico-économiques.

Enfin, dans une période où les changements et les évolutions s'opèrent tous les trois à six mois, il était utile de donner aux responsables de PME des éléments technico-économiques leur permettant d'insérer cette technologie dans leur stratégie de développement. Ainsi, ils pourront grâce à ce livre avoir une bonne idée des capacités actuelles et à venir des LED, imaginer et créer des objets à proposer à leurs clients intégrant non seulement des fonctionnalités nouvelles, mais leur permettant aussi de faire évoluer leur produit.

Au fil des chapitres, nous balayons le monde des LED sans oublier quelques rappels sur la lumière et sa mesure. Comment sont faites les LED ? Quels moyens sont à mettre en œuvre pour fabriquer ces quelques millimètres carrés lumineux qui font tant parler d'eux ? Qu'est-ce qui limite leurs performances ou qui les accroît ? Où sont-elles présentes et où le seront-elles demain ? Autant de questions auxquelles ce livre apporte des réponses avec le cas échéant, des compléments d'informations pour ceux qui souhaitent aller encore plus loin, vers le monde de la recherche.

Je vous souhaite une lecture fructueuse et utile des chapitres qui vont suivre. Vous serez toujours les bienvenus pour tout commentaire, question ou suggestion sur cet ouvrage à l'adresse suivante : laurent.massol@led-development.fr

Remerciements

J'ai une pensée particulière pour mon épouse Magalie, femme sensible, discrète et forte, qui m'a suivi et soutenu dans cette formidable aventure qu'est l'écriture d'un livre ainsi que son évolution vers cette deuxième édition. Mon arme secrète, ma fille Amance qui a grandi en même temps que ce livre, m'a encouragé à apporter une petite contribution au monde de la technique pour lui préparer, à elle et à sa sœur Laurine, un monde meilleur. Marie-Claude et André, mes parents, qui j'espère seront fiers d'avoir fait de moi ce que je suis.

Je remercie sincèrement Sounil Bhosle pour son soutien et plus particulièrement pour ses conseils et son aide dans la rédaction du chapitre 2.

Je remercie également Georges Zissis et son équipe avec laquelle nous avons travaillé sur de nombreux projets techniques ; grâce à eux j'ai pu apporter ma contribution « LED » aux projets d'éclairage qui nous ont été soumis.

Enfin, je souhaite remercier tous ceux qui depuis des années me font confiance et me soutiennent, par leurs questions, leurs challenges et leurs sollicitations.



Histoire de l'éclairage : de la bougie à la LED

Ce premier chapitre commence par quelques notions simples sur la nature physique de la lumière. Il rappelle ensuite quels procédés ont été utilisés pour l'éclairage au cours des siècles depuis les techniques à base de flamme (lampes à huile, bougies...) jusqu'aux techniques actuelles. Au XIX^e siècle l'apparition de l'électricité a permis le développement successif des lampes à incandescence, des tubes fluorescents, des lampes halogènes, des lampes fluocompactes, jusqu'à l'apparition des premières LED blanches au début des années 1990.

1.1 Une brève histoire de la lumière

Afin de comprendre la difficulté d'interpréter le phénomène de la lumière, il suffit de le décrire de la manière suivante : la lumière permet de révéler les objets qui nous entourent en leur envoyant des particules énergétiques, sans masse apparente et de façon instantanée.

On se rend compte aisément que la simple évocation d'une particule de masse nulle, possédant une certaine énergie et se propageant à très grande vitesse, est difficile à concevoir.

Pendant l'Antiquité Pythagore et Euclide émettent l'hypothèse que c'est l'œil qui permet la vision en émettant un rayon spécifique. Pendant presque 2 000 ans, c'est de cette façon que nous appréhendons le phénomène, sans différencier les paramètres de la lumière (teinte, saturation et clarté), mais en l'imaginant comprise entre deux extrémités, le noir et le blanc.

D'un point de vue géométrique la lumière était considérée comme un rayon lumineux et c'est sur cette base que René Descartes (1596-1650) posa les bases de l'optique géométrique.

La théorie de l'« hétérogénéité » des rayons lumineux (Isaac Newton, 1642-1727) montrant que la lumière n'était pas définie par un seul rayon mais par un ensemble de rayons colorés, puis les hypothèses sur la nature corpusculaire de la lumière furent des avancées considérables pour son interprétation.

La théorie ondulatoire de Christian Huygens (1629-1695) quelques années plus tôt au milieu du XVII^e siècle fait une analogie avec la propagation d'une onde mécanique à la surface d'un liquide et décrit le phénomène lumineux comme une onde en opposition avec la théorie corpusculaire.

Même si Newton pose la première pierre de l'explication du phénomène de diffraction, celui des interférences constatées par Thomas Young (1793-1829) vers 1800 n'était pas encore convenablement expliqué. C'est Augustin Fresnel (1788-1827) qui permit quelques années plus tard de comprendre ce phénomène et celui de la polarisation de la lumière. Aujourd'hui encore c'est l'expérience des fentes de Young qui explique le mieux la dualité rayon/onde lumineux.

Enfin, c'est au début du XX^e siècle qu'Albert Einstein (1879-1955) décrit l'effet photoélectrique en définissant la lumière par des *photons*. Il développa et approfondit pour cela une idée initiée par Max Planck (1858-1947) sur les quanta d'énergie.

Dès lors, la description du phénomène physique qu'est la lumière était complète, et les outils scientifiques mis à la disposition des chercheurs suffisants pour permettre aux générations suivantes de continuer à décrire de nouveaux phénomènes, et d'aller plus en profondeur dans le cœur de la matière pour en découvrir sa composition.

1.2 La lumière : définition, nature et propagation

1.2.1 Définition

Le rayonnement électromagnétique présente une large plage de longueurs d'onde et la lumière constitue une petite partie de l'émission énergétique que nous connaissons actuellement. Si l'on décrit la lumière comme une onde électromagnétique (au sens de Huygens), sa place au sein de l'ensemble des ondes électromagnétiques ne représente finalement qu'une toute petite partie (figure 1.1).

Parmi les radiations décrites à ce jour, ce sont les rayons cosmiques qui ont les fréquences les plus importantes (supérieures à 10^{20} Hz) et par conséquent les longueurs d'onde les plus courtes (inférieures à 10^{-13} m, c'est-à-dire inférieures à 0,0001 nm). Puis par ordre de décroissance en fréquence viennent les émissions radioactives, les rayons X, les UV, la plage du visible, les infrarouges, les micro-ondes et, à l'autre bout de l'échelle spectrale, nous avons les ondes de transmission radio dont la longueur d'onde peut dépasser le kilomètre.

1.2 La lumière : définition, nature et propagation

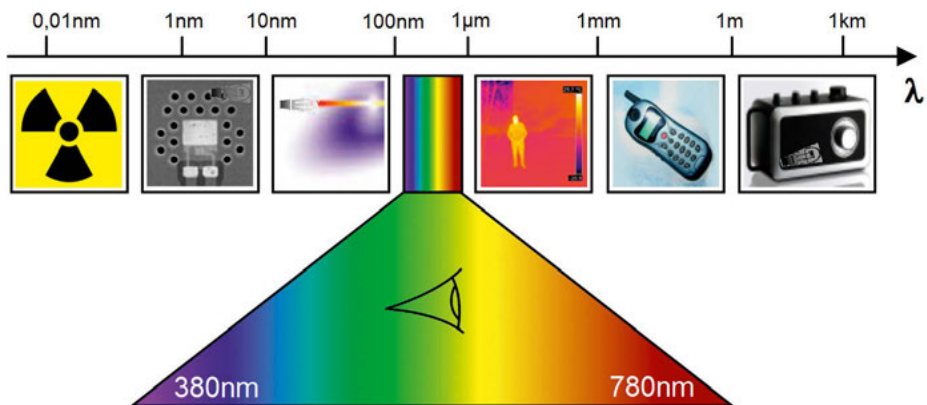


Figure 1.1 – Le spectre visible parmi l'ensemble du champ électromagnétique.

L'homme est plus ou moins sensible à toutes ces émissions électromagnétiques et son œil est sensible uniquement aux ondes lumineuses.

Ainsi, nous parlons souvent de « lumière visible », ce qui constitue un pléonasme puisque la lumière est la partie visible du rayonnement électromagnétique.

1.2.2 Nature et propagation de la lumière

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que la lumière avait été successivement décrite comme une onde puis comme une particule, mais ce n'est qu'avec Albert Einstein, vers 1916, et sa théorie de la relativité générale, suivie de celle des quanta décrits par Max Planck, que les bases de la mécanique quantique purent être posées et qu'apparut le concept de la dualité onde/particule.

Ainsi le **photon** permet la description de la lumière en tant que particule. Cette particule de masse nulle véhicule une énergie proportionnelle à la fréquence de l'onde à laquelle elle appartient. La relation qui lie cette énergie à la fréquence est la suivante :

$$E = h\nu$$

dans laquelle h est la constante de Planck, et ν la fréquence de la particule.

La théorie ondulatoire nous a fourni des outils pour décrire et expliquer la propagation de la lumière sous forme d'onde. Cette propagation a été décrite de façon précise par James C. Maxwell (1831-1879) et formalisée par les célèbres équations qui portent son nom.

Le rayonnement électromagnétique (par opposition au rayonnement corpusculaire) peut être décrit sous la forme d'une onde électromagnétique qui se décompose

en ondes dites **monochromatiques**. Ces ondes monochromatiques sont souvent représentées par un dipôle électrostatique vibrant, dépendant de deux champs, l'un électrique et l'autre magnétique.

Dans la majeure partie des cas, la propagation se fait en considérant une onde plane décrite par les deux champs, l'un électrique et l'autre magnétique, suivant un vecteur de propagation (figure 1.2).

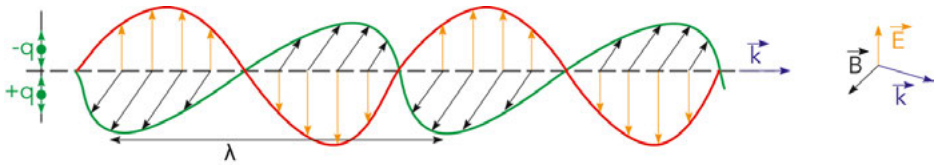


Figure 1.2 – Description de la propagation d'une onde lumineuse.

Pour traduire cette propagation en équations mathématiques, nous pouvons nous appuyer sur les équations de Maxwell et ne représenter l'onde que par un seul de ses champs (le champ électrique par exemple, ce qui se fait le plus souvent) et ainsi avoir :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi) \cdot \vec{E}_0$$

L'onde se propage suivant la direction donnée par le vecteur $\vec{k}$, et a pour amplitude $\vec{E}_0$.

La description ondulatoire de l'onde et de sa propagation, faisant intervenir les champs électriques et magnétiques, ne remet pas en cause le principe de la nature corpusculaire de la lumière.

1.3 Retour sur l'évolution de la maîtrise de la lumière

Depuis la découverte du feu par l'homme et jusqu'au milieu du XVIII^e siècle, les différentes civilisations se sont éclairées uniquement à la lumière d'une flamme.

Puis en l'espace d'un siècle sont apparues successivement toute une série de technologies telles que la lampe à incandescence, la lampe à arc, le tube fluorescent...

Il y eut d'abord Humphry Davy et Michael Faraday (son assistant), au tout début des années 1800, qui produisirent pour la première fois un arc lumineux à l'aide de deux électrodes de charbon [52].

En 1875, Henri Woodward et son partenaire Mathew Evans déposèrent un brevet décrivant la première lampe à incandescence à base de filament de carbone [54]. Trois ans plus tard, sir Joseph Wilson Swan déposa lui aussi un brevet pour l'invention d'une lampe de même type mais dont les performances étaient très moyennes.

1.3 Retour sur l'évolution de la maîtrise de la lumière

Vers 1879, un certain Thomas Edison acheta le brevet de Woodward et Evans et se lança dans une vaste campagne de tests (différents filaments dans différents environnements gazeux), ce qui lui permit d'améliorer considérablement les performances du procédé. Dans une certaine confusion, il déposa lui aussi la même année un brevet. Swan l'attaqua en justice et gagna. Edison eut entre autres l'obligation d'intégrer Swan au sein de la nouvelle compagnie créée sous le nom *Edison and Swan United Electric Company*.

Vinrent ensuite bon nombre d'améliorations de ce principe, notamment l'utilisation de matériaux différents pour le filament (tungstène), ou encore un vide d'air un peu plus poussé dans le bulbe de verre. Plus tard, l'addition de gaz supplémentaires dans le bulbe permettra d'améliorer encore ce mode d'éclairage.

Les technologies de vide d'air et de « nettoyage » des bulbes de verre ayant fait de gros progrès, il a ensuite été possible de limiter les oxydations et de remplacer cet air par des gaz ou des composés (sels). Sont alors apparues des lampes à incandescence de type **halogène**, ou encore des lampes à décharge qui recouraient à des mélanges de gaz ou à des plasmas denses.

La technologie des **tubes fluorescents** (plus communément appelés « tubes néon ») a également fait son apparition au début du xx^e siècle et elle a évolué en même temps que les ballasts¹.

Au début du xx^e siècle (en 1907 pour être précis), H. J. Round s'aperçut que le passage d'un courant asymétrique au travers d'un cristal de carbure de silicium (SiC) provoquait une émission de lumière. Vers 1923, la première électroluminescence bleue fut réalisée par la société CREE avec du carbure de silicium puis, en 1955, Rubin Braunstein découvrit l'émission infrarouge de l'arséniure de gallium (GaAs).

Mais ce n'est qu'en 1962 que Nick Holonyak (de la General Electric Corporation) mit en évidence officiellement pour la première fois une émission lumineuse issue d'un semi-conducteur [56]. En 1969, George Craford, qui avait rejoint Monsanto deux années plus tôt, réalisa la première LED jaune par un dopage d'azote.



Figure 1.3 – La première LED (1962).

1. Ballast : système ferromagnétique d'abord (« simple enroulement de cuivre ») puis électronique qui fournit l'énergie nécessaire aux lampes de type fluorescent à partir d'une tension plus faible (celle du secteur).