

PREMIO NOBEL PER LA FISICA 2014 "nuova luce per illuminare il mondo"

assegnato a

Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, Shuji Nakamura

"for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources"

di Mario Guzzi*



* Dipartimento Scienza dei Materiali - Università degli Studi di Milano Bicocca



L'Accademia Reale Svedese delle Scienze ha assegnato il Premio Nobel per la Fisica 2014 a Isamu Akasaki (1929 - ...), Hiroshi Amano (1960 - ...) della *Nagoya University* in Giappone e a Shuji Nakamura (1954 - ...) della *University of California* a Santa Barbara negli Stati Uniti «per l'invenzione di diodi emettitori di luce blu efficienti che ha portato a sorgenti di luce bianca luminose e a risparmio energetico».

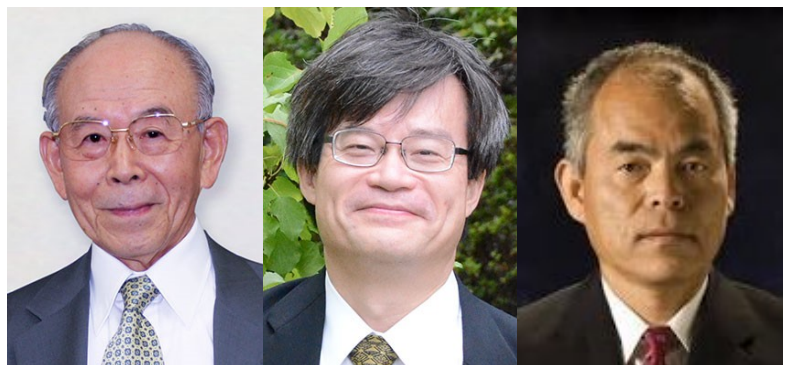
L'Accademia Reale Svedese delle Scienze ha così scelto di premiare un'invenzione con un carattere fortemente applicativo che si prevede avrà un significativo impatto

sullo sviluppo economico e sociale. Il comunicato stampa con cui è stato dato l'annuncio dell'assegnazione del Premio ha un titolo significativo *Nuova luce per illuminare il mondo* e illustra bene la motivazione di questa scelta: «I vincitori di quest'anno sono premiati per aver inventato una sorgente di luce efficiente dal punto di vista energetico e rispettosa dell'ambiente, cioè il diodo emettitore di luce (*Light-Emitting Diode* - LED) blu.

Nello spirito di Alfred Nobel, il Premio riconosce un'invenzione di grandissimo beneficio per l'umanità; mediante l'utilizzo dei LED blu può essere prodotta luce bianca in un modo nuovo. Con l'avvento delle lampade a LED disponiamo ora di un'alternativa di maggior durata e più efficiente delle vecchie sorgenti di luce».

I primi passi verso la realizzazione dei LED

Allo scopo di capire queste motivazioni, è utile ripercorrere brevemente le tappe dello sviluppo e delle applicazioni dei LED. È una storia molto lunga, iniziata più di cent'anni fa e strettamente intrecciata



Isamu Akasaki (1929 - ...), Hiroshi Amano (1960 - ...) della *Nagoya University* in Giappone, Shuji Nakamura (1954 - ...) della *University of California* a Santa Barbara

a quella dello studio dei semiconduttori e dei dispositivi a semiconduttore.

Nei primi anni del XX secolo un collaboratore inglese di Guglielmo Marconi, Henry J. Round (1881 - 1966), osservò emissione di luce visibile a seguito del passaggio di corrente in una struttura rettificante realizzata con Carburo di Silicio (SiC, chiamato anche *carborundum*) o con altri materiali; materiali diversi emettevano luce di colori diversi.

Tra il 1923 e i primi anni Quaranta uno scienziato russo poco noto, ma con una produzione scientifica di indubbio interesse nel campo della fisica dei semiconduttori, Oleg Vladimirovich Losev (1903 - 1942), non solo osservò emissione di luce da diodi di Ossido di Zinco e di Carburo di Silicio a seguito di passaggio di corrente, confermando così i risultati di Round, ma studiò in dettaglio il fenomeno, ne propose un'interpretazione con gli strumenti teorici allora a disposizione e ne intravvide le applicazioni.

Al termine della seconda guerra mondiale si avviò, principalmente negli Stati Uniti, un'intensa attività di ricerca su materiali e dispositivi a semiconduttore con lo scopo, tra l'altro, di sostituire i tubi a vuoto presenti nei circuiti elettronici, poco affidabili e il cui funzionamento richiedeva un elevato consumo di energia, con dispositivi a semiconduttore. Questa attività portò, tra l'altro, nel 1947, presso i Laboratori della *Bell Telephone*, all'invenzione del transistor, che nel 1955 valse il Premio Nobel per la Fisica a William Bradford Schokley (1910 - 1989), John Bardeen (1908 - 1991) e Walter Houser Brattain (1902 - 1987); nell'anno successivo, sempre negli stessi Laboratori, W.B. Schokley sviluppò e pubblicò la teoria della giunzione p-n.

Negli anni Cinquanta si ebbe un altro momento di svolta nella storia dello sviluppo dei LED con l'acquisizione di capacità e competenze tecniche per crescere e drogare in modo controllato i cosiddetti *composti III-V*, semiconduttori composti costituiti da elementi della III colonna (Alluminio, Gallio, Indio) e della V colonna (Arsenico, Fosforo, Antimonio) della Tavola Periodica. Infatti, i composti III-V, grazie alle caratteristiche della loro struttura a bande, possono emettere luce in modo più efficiente degli altri semiconduttori conosciuti all'epoca. Inoltre, la possibilità di realizzare leghe di composti III-V, e quindi di modulare il *gap* tra banda di conduzione e banda di valenza, permette di sintonizzare la lunghezza d'onda, cioè il colore, della luce emessa.

Lo sviluppo di tecniche innovative per la crescita di materiali semiconduttori e per la preparazione dei dispositivi basati su di essi, le cosiddette tecniche epitassiali nelle loro diverse versioni, portò presto alla realizzazione e a un'ampia diffusione di dispositivi commerciali. Infatti, queste tecniche epitassiali hanno permesso l'ottimizzazione delle eterostrutture necessarie per la realizzazione di diodi e soprattutto lo sviluppo e la realizzazione di strutture a confinamento quantistico (buche quantiche) utilizzando le quali è possibile confinare elettroni e lacune in regioni di spazio di volume molto piccolo dove l'emissione di luce, a seguito della ricombinazione elettrone-lacuna, può avvenire con elevata efficienza.

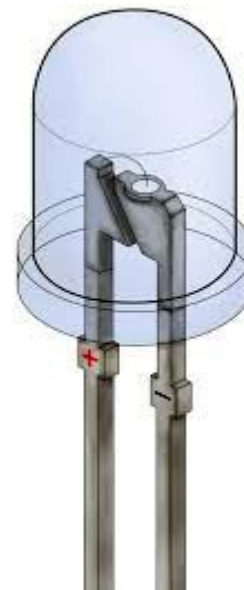
Nel 2000 Zores Ivanovic Alferov (1930 - ...) e Herbert Kroemer (1928 - ...) vinsero il Premio Nobel per la Fisica «per lo sviluppo delle eterostrutture a semiconduttore utilizzate nell'elettronica ad alta velocità e nell'optoelettronica» e «per il lavoro di base nella tecnologia dell'informazione e della comunicazione».

Sviluppo e applicazioni dei LED

Il primo dispositivo emettitore di luce rossa, in particolare luce coerente, fu inventato nel 1962 da Nick Holonyak Jr. (1928 - ...), ricercatore dei laboratori della *General Electric*. La realizzazione del dispositivo con una lega III-V (Fosforo-Arseniuro di Gallio) permise di ottenere un dispositivo operante nel visibile analogo a quelli infrarossi basati su Arseniuro di Gallio già noti. Questo risultato stimolò un'intensa attività tesa da una parte al miglioramento dei materiali e delle strutture per ottenere dispositivi sempre più efficienti e dall'altra a sviluppare sorgenti con lunghezze d'onda, cioè colori, differenti. A questo sforzo parteciparono molti laboratori di Università e molti laboratori industriali.

Le applicazioni dei LED sono ormai molto diffuse. Solo per citare alcuni degli utilizzi principali di questi emettitori di luce, e limitandoci agli emettitori di luce non coerente, ricordiamo i telecomandi a infrarossi, le lampadine spia presenti in molte apparecchiature industriali e domestiche, i dispositivi luminosi per autoveicoli e per cicli e motocicli, la retroilluminazione di schermi a cristalli liquidi, i semafori stradali.

L'utilizzo dei LED anche per l'illuminazione di ambienti domestici si è prospettata inte-



Un diodo emettitore di luce montato nel suo contenitore plastico. Sono visibili i due terminali per l'alimentazione del LED. La struttura a semiconduttore che emette luce è montata sull'elettrodo negativo all'interno di una cavità riflettente che raccoglie la luce emessa nelle diverse direzioni e la invia nella direzione voluta. È visibile anche il sottile filo che porta corrente tra l'elettrodo positivo e il diodo.

ressante fin dagli inizi del loro sviluppo. Basta ricordare che Holonyak Jr. in un articolo del febbraio 1963 predisse che i LED avrebbero gradualmente sostituito le lampade a incandescenza via via che la loro qualità e la loro efficienza fossero migliorate.

Nuove sorgenti di luce blu

Si dovette però attendere circa mezzo secolo per vedere realizzata la previsione di Holonyak. I semiconduttori e le leghe III-V hanno però una struttura a bande in cui la distanza in energia tra elettroni in banda di conduzione e lacune in banda di valenza è tale per cui dispositivi basati su di essi possono generare solamente luce nella regione del visibile, dal verde al rosso, e del vicino infrarosso.

Per l'illuminazione di ambienti di vita e di lavoro è importante disporre di sorgenti luminose che producano luce il cui spettro approssimi quello della luce naturale, o quantomeno contenga tutte le componenti spettrali, o colori, di questa. Questo è realizzato dalle lampadine a incandescenza e in parte anche dalle lampade a fluorescenza. Le caratteristiche cromatiche, cioè il colore, dell'emissione dei LED ha costituito per anni il limite al loro utilizzo per illuminazione. Infatti i LED emettono luce in ristrette bande di lunghezza d'onda (cioè di colori ben definiti) determinate dall'*energy gap* del semiconduttore. Quindi sorgenti LED possono essere utilizzate per illuminazione solamente se si dispone contemporaneamente di più sorgenti tali per cui la combinazione dei colori emessi approssima la luce ambiente. Dunque per questa importante applicazione è necessario disporre anche di sorgenti LED operanti nel blu. Infatti, un materiale fosforescente eccitato con luce blu del LED emette luce negli intervalli spettrali verde e rosso; questa luce, combinata con la luce blu della sorgente primaria, appare bianca. In alternativa, possono essere utilizzati contemporaneamente più LED che emettono luce di colori complementari (rosso, verde e blu).

Si è quindi sviluppato un intenso sforzo per lo sviluppo di LED blu, che ha visto coinvolti ricercatori di molti paesi. L'attività si è concentrata sullo sviluppo di tecniche per la crescita e il drogaggio di materiali le cui caratteristiche e la cui qualità fossero adatte allo scopo. Infatti, come sopra brevemente tratteggiato, la fisica della giunzione p-n e dell'emissione di luce da semiconduttori era ben consolidata.

La produzione di luce blu implica l'utilizzo di materiali semiconduttori caratterizzati da un *energy gap*, cioè una differenza di energia tra elettroni in banda di conduzione e lacune in banda di valenza, maggiore di quello dei materiali III-V utilizzati per i LED rossi e verdi. La scelta si orientò quindi su diversi semiconduttori composti con queste caratteristiche (SiC, GaN e ZnSe i principali), concentrandosi però rapidamente sul Nitruro di Gallio (GaN) e successivamente su Nitruro di Alluminio (AlN).

La possibilità di utilizzare GaN venne seriamente considerata già verso la fine degli anni Cinquanta da ricercatori dei laboratori della *Philips* di Eindhoven in Olanda, ma fin da allora apparve chiaro che prima era necessario acquisire competenze e tecnologie per preparare materiali di qualità cristallografica adeguata e per drogarli in modo controllato, così da poter realizzare le giunzioni p-n necessarie alla costruzione dei LED. Infatti le conoscenze e le tecniche ormai consolidate nel caso dei composti III-V più maturi, principalmente arseniuri e fosfuri, non potevano essere semplicemente trasferite al caso dei nitruuri, principalmente a causa della diversa struttura cristallina; i nitruuri infatti cristallizzano nella struttura della wurtzite, mentre i fosfuri e gli arseniuri in quella della zincoblenda.

E proprio su questi due rilevanti aspetti, la cui soluzione richiese tempi lunghi, entrano in gioco i vincitori del premio Nobel di quest'anno.

Isamu Akasaki e Hiroshi Amano, grazie all'utilizzo di nuove tecniche di crescita epitassiale sviluppate negli anni Settanta, riuscirono a produrre nel 1986 campioni di GaN con buona qualità cristallina e con buone proprietà ottiche.

Il problema del controllo del drogaggio di GaN, in particolare del drogaggio di tipo p, trovò una positiva soluzione tra la fine degli anni Ottanta e gli inizi degli anni Novanta da Amano e Akasaki i cui risultati sperimentali furono spiegati da Nakamura e collaboratori. I primi LED blu con buona intensità furono proposti agli inizi degli anni Novanta.



Tre LED di colori differenti



Isamu Akasaki (1929 -) - Professore Emerito presso la Nagoya University e Direttore del Centro di Ricerca sui Nitruuri Semiconduttori della Meijo University di Nagoya in Giappone



Hiroshi Amano (1960 -) - Professore presso la Nagoya University in Giappone

Si passò quindi alla crescita e al drogaggio di tipo p di leghe, principalmente Nitruro di Gallio e Alluminio (AlGaN) e Nitruro di Indio e Gallio (InGaN), allo scopo di produrre eterogiunzioni, che furono realizzate agli inizi degli anni Novanta sia dal gruppo di ricerca di Akasaki che da quello di Nakamura.

Questo è stato un passaggio cruciale per lo sviluppo di LED blu di interesse pratico. Infatti l'attività di ricerca e sviluppo svolta precedentemente sui LED visibili e infrarossi aveva mostrato che è necessario utilizzare strutture a confinamento quantico per realizzare dispositivi con efficienza elevata.

In sintesi Amano, Akasaki e Nakamura, riuscendo a crescere Nitruro di Indio, Nitruro di Gallio e Nitruro di Alluminio e loro leghe con qualità cristallina elevata e drogaggio controllato hanno reso disponibili alla comunità scientifica tutti i «mattoni» necessari per realizzare diodi emettitori di luce blu efficienti.

Verso una nuova tecnologia dell'illuminazione

Come dice il comunicato stampa che ha annunciato l'assegnazione del Premio, Amano, Akasaki e Nakamura hanno così dato il via a una trasformazione fondamentale della tecnologia dell'illuminazione. Infatti LED rossi e verdi erano noti da tempo, ma senza luce blu non si sarebbero potute produrre sorgenti LED di luce bianca.

L'importanza di questo risultato sta nel fatto che una sorgente a LED produce un'intensità luminosa (misurata in lumen - lm) per unità di potenza elettrica consumata (misurata in watt - W) nettamente superiore alle altre sorgenti disponibili. I più recenti risultati raggiunti danno per i LED 300 lm/W, da confrontare con 16 lm/W per le lampade a incandescenza e con i circa 70 lm/W dei tubi fluorescenti; quindi il risparmio energetico è evidente.

Il comunicato stampa evidenzia inoltre che, dal momento che circa un quarto del consumo mondiale di elettricità è destinato a scopi di illuminazione, i LED contribuiscono significativamente al risparmio delle risorse energetiche. Si riduce anche il consumo di materiale, in quanti la vita dei LED è di circa 100.000 ore, da confrontare con le circa 1.000 ore delle lampade a incandescenza e le circa 10.000 ore dei tubi fluorescenti.

È stata quindi premiata un'invenzione di carattere fortemente applicativo e di grande impatto nella vita di tutti i giorni. Questa scelta sottolinea ancora una volta che l'Accademia Reale Svedese delle Scienze riconosce e premia sia scoperte di carattere fondamentale sia invenzioni di carattere applicativo con rilevante valore per lo sviluppo economico e per il benessere dell'umanità.

Infatti, solo per citare alcuni esempi, tra i Premi Nobel degli ultimi dieci anni troviamo la «scoperta teorica di un meccanismo che contribuisce alla nostra comprensione dell'origine della massa delle particelle subatomiche» (Englert e Higgs nel 2013), la «scoperta dell'accelerazione dell'espansione dell'Universo attraverso lo studio delle lontane supernovae» (Perlmutter, Schmidt e Riess nel 2011), «la scoperta del meccanismo della rottura spontanea di simmetria nella fisica subatomica» (Nambu nel 2008) e «la scoperta della libertà asintotica nella teoria dell'interazione forte» (Gross, Politzer e Wilczek nel 2004) insieme ai «pionieristici esperimenti riguardanti il materiale bi-dimensionale grafene» (Geim e Novoselov nel 2010), alla «invenzione di un circuito semiconduttore per la raccolta di immagini - il CCD» (Boyle e Smith nel 2009), al «pionieristico progresso riguardante la trasmissione di luce in fibre ottiche per la comunicazione» (Kao nel 2009) e alla «scoperta della magnetoresistenza gigante» (Fert e Grünberg nel 2007).

Concludendo, è interessante osservare che l'assegnazione dei Premi Nobel per la Fisica 2014 testimonia quanto siano strettamente intrecciati avanzamento scientifico e sviluppo tecnologico in un'area fortemente dinamica quale è la Scienza dei Materiali.¹

Mario Guzzi (Dipartimento Scienza dei Materiali - Università degli Studi di Milano Bicocca)

Note

¹ Chi fosse interessato ai temi di cui si è brevemente discusso sopra, può trovare utili approfondimenti e un'ampia bibliografia a questi due link:

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/popular.html

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/advanced.html

Il primo fornisce informazioni introduttive e il secondo informazioni più avanzate.



Shuji Nakamura (1954 -) - Professore presso l'University of California a Santa Barbara negli Stati Uniti

