

# Pěstování GaN na safíru pomocí mezivrstvy deponované při nízkých teplotách a realizace GaN typu p s využitím dopování Mg s následným ozářením elektronovým svazkem o nízké energii

Přednáška u příležitosti udělení Nobelovy ceny za fyziku za rok 2014

© 2014 Nobel Foundation

## Hiroshi Amano

Department of Electrical Engineering and Computer Science, Venture Business Laboratory, Akasaki Research Center, Nagoya University, Japonsko

Toto je osobní historie jednoho z japonských výzkumníků podílejících se na vývoji metody pěstování GaN na safírovém substrátu, který vydláždil cestu k realizaci chytrých televizních a zobrazovacích systémů využívajících modré svítivé diody (LED). Nejvýznamnější práce byly provedeny ve druhé polovině osmdesátých let minulého století. Přednáška popisuje autorovu práci na tomto vývoji a postupu, kterým se etablovala technologie umožňující pěstování GaN a realizaci GaN typu p.

### Motivace k zahájení výzkumu modrých LED

Abychom vysvětlili modré svítivé diody (LED – *Light Emitting Diodes*), stojí za to ukázat příklad, jak změnilly naše životy. Přenosné herní tablety a chytré telefony jsou velmi dobře známá zařízení, zejména u mladých lidí. První přenosný herní přístroj byl uveden na trh v roce 1979 [1] a mobilní telefony jsou komerčně dostupné od roku 1984 [2]. Avšak až do začátku devadesátých let byly všechny displeje herních přístrojů a mobilních telefonů jednobarevné. A tak je třeba zdůraznit, že mladší generace dnes může užívat herní zařízení a mobilní telefony s plně barevnými displeji, protože se objevily modré LED. Dnešní aplikace modrých LED se však neomezují na displeje. V kombinaci s luminofovy mohou modré LED fungovat jako zdroje bílého světla [3] a mohou se také používat v běžném osvětlení.

Dovolte mi, abych v tomto úvodu stručně vysvětlil, proč jsem se začal zajímat o vývoj modrých LED. Dvě gigantické firmy spojené s počítači, Microsoft a Apple, založili krátce po sobě Bill Gates s Paulem Allenem v roce 1975 [4] a Steve Jobs se Stephenem Wozniakem v roce 1976 [5]. Trh pro počítače, zejména „osobní počítače“ (PC) od té doby mimořádně rychle expandoval [6]. V době, kdy byly tyto firmy založeny, používaly se téměř ve všech displejích klasické vakuové obrazovky („Braunovy trubice“), podobně jako u televizních přístrojů. K použití v přenosných počítačích byly však Braunovy trubice příliš velké. A jejich užití u te-

levizních přijímačů znamenalo, že televizory jsou příliš objemné pro malé japonské domy. A tak mě velmi vzrušilo, když jsem objevil, že mezi tématy disertačních prací, která vypsala Akasakiho laboratoř Nagojské univerzity v roce 1982, jsou modré LED na bázi nitridů. Napadlo mě, že bych mohl přispět ke zlepšení kvality života lidí tím, že bych pomohl při realizaci plochých televizorů k zavěšení na stěnu a elegantních počítačových systémů, což by znamenalo, že bych změnil svět. V té době jsem si však neuvědomoval obtížnost tohoto úkolu.

### Obtížnost realizace výkonné modré LED na bázi GaN

Snažíme-li se vypěstovat objemné krystaly GaN z roztoku, potřebujeme velmi vysoké tlaky a teploty, podobně jako při růstu diamantů, dokonce snad ještě vyšší [7, 8]. A tak musíme použít chemickou reakci k tomu, abychom tlak a teplotu potřebné k pěstování GaN snížili. Musíme také použít substráty z jiných materiálů. K syntéze GaN jsme jako zdroj dusíku užívali amoniak [9], protože molekuly dusíku jsou inertní a s kovovým galliem [Ga] aktivně nereagují. Při teplotách kolem 1 000 °C, při nichž lze syntetizovat GaN, je amoniak velmi aktivní, což velmi silně omezuje okruh materiálů použitelných jako vhodný substrát.

Jedním z nejslibnějších materiálů pro substrát je safír, protože je při vysokých teplotách stabilní a s amoniakem nereaguje tak silně [10]. Nezávažnějším problémem

Nobelova cena  
za fyziku 2014





Hiroshi Amano  
Foto: Alexander  
Mahmoud

u safíru je však velký rozdíl mřížkových konstant ve srovnání s GaN: až 16 % pro každou rovinu (0001). Obecný názor většiny badatelů je, že pro heteroepitaxní růst by rozdíl mřížkových konstant (*mismatch*) neměl být vyšší než několik málo procent [11], takže rozdíl 16 % by měl růst téměř znemožnit.

V roce 1971 vyvinul profesor Jacques Pankove první modré LED na bázi GaN. Byly to struktury typu MIS (*Metal-Insulator-Semiconductor*) připravené epitaxním růstem z hydridové plynné fáze (HVPE – *Hydride Vapor Phase Epitaxy*), což zahrnovalo chemickou reakci Ga a chlorovodíku, čímž vznikl GaCl a amoniak [12]. V té době se věřilo, že je nemožné vypěstovat GaN typu p, a to z důvodů autokompensace (*self-compensation*) [13]. Autokompensace znamená, že při dopování akceptorem (jako příměsí) se generuje stejný počet dusíkových vakancí, které dopované kompenzují.

Další důvod, proč je tak obtížné připravit jasné modré LED, souvisí s citlivostí lidského oka. Odezva lidského oka na čistě modré světlo činí pouhých 3 % ve srovnání se žlutozeleným světlem o vlnové délce 555 nm [14].

### Rozpočet naší laboratoře v polovině osmdesátých let a problémy s pěstováním GaN na safírovém substrátu

Vraťme se zpět na začátek osmdesátých let minulého století. Profesor Isamu Akasaki zahájil svůj výzkum nitridů v roce 1967 [15] ve výzkumném ústavu firmy Matsushita (MRIT – *Matsushita Research Institute Tokyo*), nyní Panasonic, a to studiem práškového AlN. Potom jeho skupina začala pěstovat GaN pomocí epitaxe z molekulárních svazků (MBE – *Molecular Beam Epitaxy*) a pozorovat jeho katodoluminiscenci. Potom však skupina přešla na metodu HVPE a podařilo se jí koncem sedmdesátých let připravit modré LED typu MIS s konfigurací typu „obráceného čipu“ (*flip-chip*) [16]. Bohužel však se v MRIT ke konci sedmdesátých let rozhodli projekt modrých LED na bázi GaN ukončit, a tak profesor Akasaki v roce 1981 přešel na Nagojskou univerzitu. K jeho laboratoři jsem se připojil jako student v roce 1982.

S přípravou modrých LED typu MIS pomocí HVPE byl problém: rychlost růstu byla tak vysoká, že bylo obtížné regulovat tloušťku izolační vrstvy v MIS struktuře. Proto nebylo možné regulovat pracovní napětí. Profesor Akasaki si také všiml problémů při pěstování GaN pomocí MBE. Proto se rozhodl k přípravě GaN použít metalorganické epitaxe z parní fáze (MOVPE – *Metal Organic Vapor Phase Epitaxy*). V té době byl však rozpočet naší laboratoře nedostatečný [17]. Také tehdy neexistoval žádný komerčně dostupný systém MOVPE, navržený speciálně pro pěstování GaN. Proto nebylo možné takový systém koupit. A tak magisterský student o dva roky starší než já vyvinul první reaktor MOVPE vertikálního typu [18]. Rychlost průtoku byla v té době tak nízká, že jsme nemohli pěstovat GaN s použitím vodíku jako nosného plynu. Snažil jsem se představit si charakter toku při použití reakce mezi  $\text{TiCl}_4$  a  $\text{H}_2\text{O}$  a zjistil jsem, že rychlost průtoku nebude dostatečná, pokud za nosný plyn zvolím vodík.

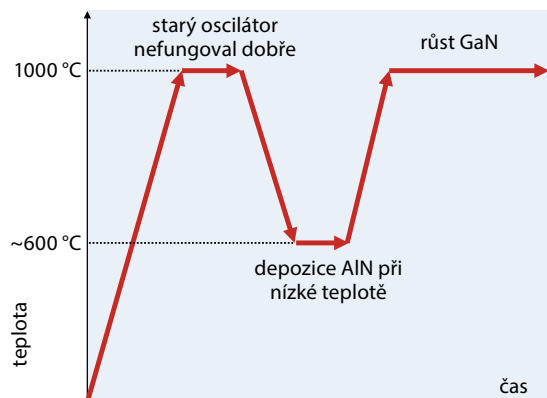
V roce 1984 nastoupil do laboratoře profesora Akasakiho nový doktorand, nyní Dr. Yasuo Koide, a pustil se do výzkumu AlGaIn a AlN, zatímco já jsem se sou-

středil na pěstování GaN. Ze zkušenosti jsem věděl, že průtok bude nedostatečný, použiji-li staré konfigurace trubek přivádějících plyn do reaktoru, a tak jsem všechny přívodní trubice spojil do jedné a zvýšil tím rychlost průtoku z několika cm/s na více než 4 m/s [19]. Pak jsem úspěšně vypěstoval GaN na safírovém substrátu, i když jsem použil vodík jako nosný plyn, ačkoli byl povrch vrstvy dost hrubý a její kvalita velmi nízká.

O pěstování GaN jsem se mnohokrát snažil. Měnil jsem teplotu růstu, rychlost průtoku zdrojových a nosných plynů a také ostatních parametrů. Kvalitní GaN s hladkým povrchem se mi však vypěstovat nepodařilo. Problém velkého neprizpůsobení mřížkových konstant (16 %) byl pro magisterského studenta příliš velký. A tak uplynuly dva roky bez jakéhokoli úspěchu.

### Mezivrstva deponovaná při nízké teplotě

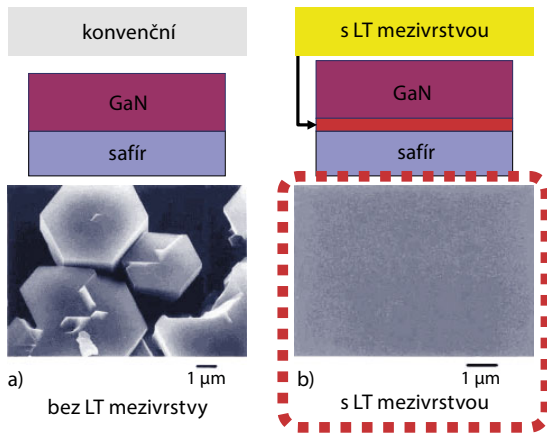
V únoru 1985 jsem již byl téměř u konce svých magisterských studií. Spolu s jedním zahraničním studentem jsme se rozhodli nastoupit od dubna do programu doktorského studia. Zatímco všichni ostatní japonští studenti odjeli po promoci na výlet, prováděl jsem osamělé experimenty. V té době pěstoval Dr. Koide nitridy obsahující hliník, jako např. AlN a AlGaIn, kdežto já jsem se věnoval GaN. Když jsme porovnávali povrch krystalů obsahujících hliník s mým GaN, zdál se povrch jeho krystalů hladší. Proto mě napadlo, že k efektivnímu růstu GaN s lepší morfologií povrchu by mohl být jako substrát použit AlN. A tak jsem se pokusil vypěstovat na safírovém substrátu nejprve tenkou vrstvu AlN, a pak teprve pokračovat s růstem GaN. V té době jsem věděl, že teplota pro epitaxi AlN by měla být vyšší než 1 200 °C. Poněvadž však starý oscilátor nefungoval dobře, nedařilo se mi takové teploty dosáhnout. Náhle jsem si vzpomněl na jednu diskusi v laboratoři. Dr. Sawaki, tehdy ještě docent, vysvětloval proces růstu fosfidu boru (BP) na křemíku (Si) [20], kde neprizpůsobení mřížek dosahuje hodnoty 16 %. Vysvětloval účinnost průtoku fosforu jako zdrojového plynu těsně předtím, než začne růst BP, a zmínil se o tom, že atomy fosforu zřejmě působí jako nukleační centra. A tak jsem si představil, že kdybych přidal malé množství AlN při nízké teplotě, mohla by se tak vytvořit nukleační centra. Sekvenci teplot v procesu pěstování ukazuje obr. 1. Obvykle jsem se během růstu díval do reaktoru, abych na substrátu viděl případné interferenční



**Obr. 1** Sekvence teplot podložky při pěstování GaN na safírovém substrátu za použití nízkoteplotní mezivrstvy AlN.

Nobelova cena  
za fyziku 2014





**Obr. 2** Snímky vrstvy GaN na safíru (0001) z rastrovacího elektronového mikroskopu: a) bez mezivrstvy, b) s mezivrstvou AlN deponovanou při nízké teplotě (LT).

obrazec, čímž jsem mohl kontrolovat, zda zdrojový plyn správně přitéká. Tehdy jsem byl však unaven a na interferenční obrazec jsem se zapomněl podívat. Když jsem vyňal vzorek z reaktoru a spatřil, že má dokonale hladký povrch a je také dokonale průhledný, řekl jsem si: „Ach, udělal jsem chybu! Zapomněl jsem přidat trimethylgallium!“

Pak jsem se však nad tím ještě zamyslel a uvědomil si, že jsem žádnou chybu neudělal.

A tak jsem zkontroloval povrch Nomarskiho mikroskopem a zjistil, že se mi podařilo vypěstovat atomárně hladkou vrstvu GaN, jak ji ukazuje obr. 2. Podle návrhu profesora Akasakiho jsem vyhodnotil další vlastnosti, jako např. kvalitu krystalu, optické a elektrické vlastnosti, a všechny byly lepší než v mých předchozích zprávách. Tento proces je znám pod názvem „technologie nízkoteplotní mezivrstvy“ (*low-temperature deposited buffer layer technology*) a použilo ji již mnoho badatelů po celém světě [21–37].

### Realizace GaN typu p

Dalším naším úkolem byla příprava GaN typu p. Mnohokrát jsem pěstoval GaN dopované zinkem, ale všechny vzorky byly buď typu n, nebo měly velmi nízkou vodivost. V roce 1987, v rámci svého doktorandského programu, jsem pozoroval velmi ostrou excitonovou emisi ze zinkem dopovaného GaN pěstovaného na *c*-ploše a *a*-ploše safíru při kryogenních teplotách [22]. Také jsem měřil deformační potenciál GaN. Výsledky mě vzrušily a snažil jsem se je prezentovat na podzimní výroční konferenci Japonské společnosti pro aplikovanou fyziku, která se konala na Nagojské univerzitě. Překvapilo mě však, že na mé prezentaci byli jen čtyři lidé: předsedající, prof. Akasaki, ještě jeden člověk a já. V té době se ostatní badatelé zajímali o jiné polovodičové sloučeniny, jako např. GaAs a ZnSe, kdežto zájemci o GaN byli v menšině. V roce 1988, během své stáže v rámci doktorandského programu, jsem také zjistil, že se zinkem spojená modrá emise se nevratně zesílí během měření katodoluminescence, jak ukazuje obr. 3 [38]. A tak jsem tento proces nazval „ozáření nízkooenergetickým elektronovým svazkem“ (LEEBI – *Low-Energy Electron Beam Irradiation*). Avšak ani po aplikaci LEEBI se vodivost typu p v GaN dopovaném zinkem nepozorovala. Tento efekt již dříve publikovali ruští vědci [39].

V roce 1989 jsem nastoupil jako vědecký pracovník do Akasakiho laboratoře na Nagojské univerzitě. Když jsem pročítal učebnici „*Bonds and Bands in Semiconductors*“, kterou napsal Dr. J. C. Phillips [40], zaujal mě jeden zvláště zajímavý graf. Ukazoval, že k aktivaci akceptorů je Mg vhodnější než Zn. Zdroj hořčíku, bis-Cp<sub>2</sub>Mg, byl však příliš drahý. A tak jsem poprosil profesora Akasakiho, abych si mohl nějaké menší množství koupit. Laskavě mi to povolil a po několika měsících čekání na dodávku jsem mohl s Matsuhirem Kitem, svým kolegou (tehdy magisterským studentem), v laboratoři pěstovat mnoho hořčíkem dopovaných vzorků.

Zde bych se chtěl zmínit o průkopnické práci Dr. H. P. Marusky [41], který byl tehdy studentem na Stanfordské univerzitě. Jemu se podařilo vyrobit první fialovou LED typu MIS na světě, a to s použitím GaN dopovaného Mg.

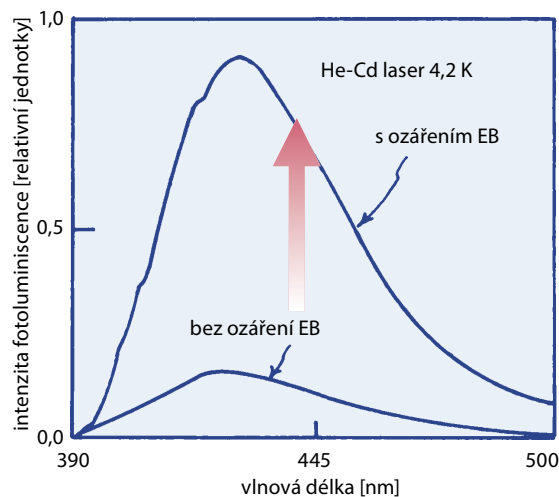
Všechny naše GaN vzorky dopované Mg měly bezprostředně po přípravě vysoký odpor. Avšak po aplikaci metody LEEBI vykazovaly některé z nich chování typu p, pokud byly měřeny metodou horké sondy. Věděl jsem, že horké sondy nejsou tak spolehlivé a nikdo by nevěřil, že máme vzorky typu p. A tak pan Kito vzal tyto vzorky na měření Hallova jevu, a my jsme nakonec poznali, že jsme připravili první GaN typu p na světě. Také jsme vyrobili ultrafialové LED s p-n přechodem, jak ukazuje obr. 4 [42–45]. Brzy nato použila metodu LEEBI také skupina Dr. Shujiho Nakamury [46, 47]. V roce 1992 oznámil Dr. Nakamura, že GaN lze připravit prostým tepelným žíháním [48]. Dnes používají tepelné žíhání téměř všechny společnosti zabývající se výrobou LED.

Mechanismus vodivosti typu p zahrnuje desorpci vodíku poblíž akceptorů Mg, jak ukazuje obr. 4, na což poprvé upozornil profesor J. A. Van Vechten [49] a co experimentálně potvrdil Dr. Nakamura [48].

### Pokusy o pěstování InGaN

Dalším naším důležitým úkolem byla realizace modré mezipásové emise. A tak jsme se snažili vypěstovat InGaN. Bylo to však také velmi obtížné a nám se podařilo připravit InGaN pouze s koncentrací In menší než 1,7% [50].

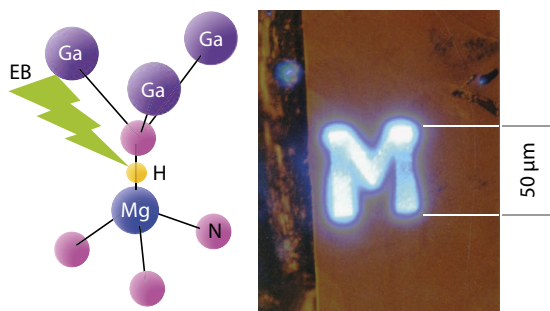
V roce 1989 ohlásila skupina Dr. Takashiho Matsuo-ky úspěšnou přípravu InGaN při mimořádně vysoké



**Obr. 3** Změna intenzity modré fotoluminiscence vyvolaná ozářením vzorku GaN dopovaného Zn elektronovým svazkem (EB).

Nobelova cena  
za fyziku 2014





**Obr. 4** Schematické znázornění aktivace vodíkem pasivovaného Hf v GaN [48] a obrázek elektroluminescence LED, v níž byla elektronovým svazkem ozářena pouze plocha odpovídající písmenu „M“ [41].

dávce amoniaku současně s použitím dusíku jako nosného plynu [51]. Také ohlásili modrofialovou fotoluminiscenci (PL) při 77 K, což ukazovalo na zabudování india do mřížky. Při pokojové teplotě bylo možné pozorovat žlutou emisi spojenou s hlubokými hladinami. Mechanismus zabudování india do InGaN objasnil pomocí termodynamické analýzy profesor Akinori Koukita a kol. [53, 54].

A nakonec, spojením technologie pěstování vysoce kvalitních krystalů s použitím mezivrstvy deponované při nízké teplotě a technologie pěstování typu p a InGaN, se firmě Nichia Corporation v roce 1993 podařilo poprvé na světě vyrobit a dát do prodeje modré LED s dvojitou heterostrukturou na bázi InGaN [55]. V roce 1995 [56] tam také vyrobili LED s jedinou kvantovou jámou, což je velice důležitá technologie pro zvýšení účinnosti nitridových LED, protože velmi úzká kvantová jáma dobře potlačuje kvantový Starkův jev [57], což zvyšuje pravděpodobnost přechodu [58].

### Příspěvek modrých LED na bázi InGaN k úsporám energie

Na závěr mi dovolu, abych vysvětlil, jak mohou přispět LED na bázi InGaN ke zlepšení energetické situace, zejména v Japonsku. Mnoho lidí si pamatuje velké zemětřesení na východě Japonska a havárii jaderných elektráren v roce 2011. V současnosti v Japonsku není v činnosti žádný ze 48 jaderných generátorů elektrické energie [59]. Před rokem 2011 bylo 30 % elektřiny v Japonsku vyrobeno v jaderných reaktorech. A tak musíme najít cestu, jak se přizpůsobit ztrátě 30 % výrobní kapacity Japonska. Ministerstvo energetiky Spojených států amerických (*US Department of Energy*) předpovědělo, že do roku 2030 bude ve Spojených státech 70 % osvětlení nahrazeno systémy založenými na LED, což bude znamenat snížení spotřeby elektrické energie o 7 % [60]. V případě Japonska se očekává, že průnik osvětlovacích systémů založených na LED bude mnohem rychlejší. Jedna japonská výzkumná společnost předpověděla, že do roku 2020 bude 70 % obecných osvětlovacích soustav nahrazeno osvětlením na bázi LED [61].

A co je ještě důležitější, umíme vyvinout a nabídnout kompaktní osvětlovací systémy mladší generaci, zejména dětem v odlehklých oblastech bez přístupu k elektřině. Obrázek 5 ukazuje snímek Země v noci, který poskytla NASA [62]. S použitím osvětlovacích systémů na bázi LED spolu se solárními panely a bateriemi budou děti moci číst knihy a studovat večer a i v noci, jak ukazují vložené snímky v obrázku 5.

Na závěr bych se chtěl obrátit na mladší výzkumníky. Když jsme připravili nízkoteplotní mezivrstvu, byl jsem pětadvacetiletým magisterským studentem, a když jsme poprvé připravili GaN typu p, bylo mi osmdvacet let. Ovšemže jsem byl velmi šťastný, že jsem se mohl věnovat výzkumu pod vynikajícím vedením profesora Akasakiho a mnoha významných kolegů. V současnosti jsou možnosti a financování výzkumu mnohem lepší než byly v osmdesátých letech minulého století. A tak bych rád viděl mladou generaci, jak se pokouší zabývat se tématy, která výrazně přispějí ke zlepšení kvality lidských životů. Tak si bude moci mladá generace vyvinout pro sebe mnohem lepší svět.

### Poděkování

K lidem, kterým bych rád poděkoval, patří: Isamu Akasaki, Nobuhiko Sawaki, Kazumasa Hiramatsu, Shigeru Tamura, Atsushi Shimizu, Yasuo Koide, Kenji Itoh, Takahiro Kozawa, Masahiro Kito, Kouichi Naniwae; bývalí studenti Akasakiho laboratoře na Nagojské univerzitě Satoshi Kamiyama, Tetsuya Takeuchi a Motoaki Iwaya; bývalí studenti Akasakiho a Amanovy laboratoře na Meijo University Masahito Yamaguchi, Yoshio Honda, Guangju Ju, Kaddour Lekhal a Siyoung Bae; studenti Amanovy, Yamaguchiho a Hondovy laboratoře na Nagojské univerzitě Aki Eguchi, Masako Yasui, Yoko Tatsumi, Tomoko Hosoe, Michinari Hamaguchi, Hideyo Kunieda, Yoshihito Watanabe, Yasuo Suzuoki a Seiichi Matsuo; zaměstnanci Nagojské univerzity Koichi Ota, Naoki Shibata, Nobuo Okazaki, Katsuhide Manabe, Michinari Sassa, Hisaki Kato, Masahiro Kotaki a Tadashi Arashima; zaměstnanci Toyoda Gosei, Masafumi Hashimoto, Akira Hirano, Masamichi Ipponmatsu, Cyril Pernot, Hidemasa Tomosawa a Toshihiko Kai a zaměstnanci UVCR a Nikkiso.

Nakonec bych rád vyjádřil upřímnou vděčnost svým rodičům Yoshiko a Tatsujimu Amano, svému bratru Takashimu Amano, a své rodině Kasumi, Aya a Mitsuru Amano.

*Přeložil Ivan Gregora*

### Literatura

- [1] [http://gaming.wikia.com/wiki/History\\_of\\_handheld\\_game\\_consoles](http://gaming.wikia.com/wiki/History_of_handheld_game_consoles)
- [2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Mobile\\_phone](http://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_phone)
- [3] P. Schlotter, R. Schmidt, J. Schneider: *Appl. Phys.* A64, 417 (1997).
- [4] <http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/5085630.stm>
- [5] <http://www.notablebiographies.com/Ho-Jo/Jo-Jobs-Steve.html>



**Obr. 5** Snímek Země v noci (NASA [61]).



[6] <http://www.maximizingprogress.org/2012/03/platform-wars-history-of-emergent.html>

[7] S. Porowski, I. Grzegory: *J. Cryst. Growth* **178**, 174 (1997).

[8] F. P. Bundy, H. T. Hall, H. M. Strong, R. H. Wentorf: *Nature* **176**, 51 (1955).

[9] W. C. Johnson, J. B. Parsons: M. C. Crew: *J. Phys. Chem.* **36**, 7 (1932).

[10] H. P. Maruska, J. J. Tietjen: *Appl. Phys. Lett.* **15**, 327 (1969).

[11] Například: F. C. Frank, J. H. van der Merwe: *Proc. R. Soc. London, Ser. A* **198**, 205 (1949).

[12] J. I. Pankove, E. A. Miller, D. Richman, J. E. Berkeyheiser: *J. Lumin.* **4**, 63 (1971).

[13] Například: G. Mandel: *Phys. Rev. A*, **134**, 1073 (1964).

[14] Například: photopic  $V(\lambda)$  modified by Vos (1978), <http://www.cvl.org/>. Copyright © 1995–2015 Color and Vision Research Labs.

[15] I. Akasaki, M. Hashimoto: *Solid State Commun.* **5**, 851(1967).

[16] Y. Ohki, Y. Toyoda, H. Kobayashi, I. Akasaki: *Inst. Phys. Conf. Ser.* **63**, 479 (1982).

[17] Například: <http://www.mext.go.jp/english/whitepaper/1302651.htm>

[18] M. Hashimoto, H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki: *J. Cryst. Growth* **68**, 163 (1984).

[19] H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, Y. Toyoda: *Appl. Phys. Lett.* **48**, 353 (1986).

[20] T. Nishinaga, T. Mizutani: *Jpn. J. Appl. Phys.* **14**, 753 (1975).

[21] H. Amano, I. Akasaki, K. Hiramatsu, N. Koide, N. Sawaki: *Thin Solid Films* **163**, 415 (1988).

[22] H. Amano, K. Hiramatsu, I. Akasaki: *Jpn. J. Appl. Phys.* **27**, L1384 (1988).

[23] I. Akasaki, H. Amano, Y. Koide, K. Hiramatsu, N. Sawaki: *J. Cryst. Growth* **98**, 209 (1989).

[24] H. Amano, T. Asahi, I. Akasaki: *Jpn. J. Appl. Phys.* **29**, L205 (1990).

[25] K. Hiramatsu, H. Amano, I. Akasaki, H. Kato, N. Koide, K. Manabe, *J. Cryst. Growth* **107**, 509 (1991).

[26] K. Hiramatsu, S. Itoh, H. Amano, I. Akasaki, N. Kuwano, T. Shiraishi, K. Oki: *J. Cryst. Growth* **115**, 628 (1991).

[27] N. Kuwano, T. Shiraishi, A. Koga, K. Oki, K. Hiramatsu, H. Amano, K. Itoh, I. Akasaki: *J. Cryst. Growth* **115**, 381 (1991).

[28] S. Nakamura: *Jpn. J. Appl. Phys.* **30**, 1620 (1991).

[29] H. Murakami, T. Asahi, H. Amano, K. Hiramatsu, N. Sawaki, I. Akasaki: *J. Cryst. Growth* **115**, 648 (1991).

[30] J. N. Kuznia, M. A. Khan, D. T. Olson, R. Kaplan, J. Freitas: *J. Appl. Phys.* **73**, 4700 (1993).

[31] S. T. Kim, H. Amano, I. Akasaki, N. Koide: *Appl. Phys. Lett.* **64**, 1535 (1994).

[32] T. Sasaoka, T. Matsuoka: *J. Appl. Phys.* **77**, 192 (1995).

[33] Y. M. Le Vaillant, R. Bisaro, J. Oliver, O. Durand, J. Y. Duboz, S. Ruffenach-Clur, O. Briot, B. Gil, R. L. Aulombard: *Mater. Sci. Eng.* **B50**, 32 (1997).

[34] M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Yamaguchi, C. Wetzel, H. Amano, I. Akasaki: *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**, L316 (1998).

[35] Y. M. Le Vaillant, R. Bisaro, J. Olivier, O. Durand, J-Y Duboz, S. Ruffenach-Clur, O. Briot, B. Gil, R. L. Aulombard: *J. Cryst. Growth* **189/190**, 282 (1998).

[36] Y. Kobayashi, T. Akasaki, N. Kobayashi: *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**, L1208 (1998).

[37] T. Ito, K. Phtsuka, K. Kuwahara, M. Sumiya, Y. Takano, S. Fuke: *J. Cryst. Growth* **205**, 20 (1999).

[38] H. Amano, I. Akasaki, T. Kozawa, K. Hiramatsu, N. Sawaki, K. Ikeda, Y. Ishii: *J. Lumin.* **40–41**, 121 (1988).



Hiroshi Amano při své nobelovské přednášce v Aule Magně Stockholmské univerzity, 8. prosince 2014.

[39] G. V. Sagarin, S. K. Obyden, M. V. Chukichev, S. J. Popov: *J. Lumin.* **31 & 32**, 684 (1984).

[40] J. C. Phillips: *Bonds and Bands in Semiconductors*. 1<sup>st</sup> edition, Academic Press 1973.

[41] H. P. Maruska, W. C. Rhines, D. A. Stevenson: *Mater. Res. Bull.* **7**, 777 (1972).

[42] H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu I. Akasaki: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28**, L2112 (1989).

[43] H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu, I. Akasaki: *J. Electrochem. Soc.* **137**, 1639 (1990).

[44] I. Akasaki, H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu: *J. Lumin.* **48 & 49**, 666 (1991).

[45] I. Akasaki, H. Amano, H. Murakami, M. Sassa, H. Kato, K. Manabe: *J. Cryst. Growth* **128**, 379 (1993).

[46] S. Nakamura, M. Senoh, T. Mukai: *Jpn. J. Appl. Phys.* **30**, L1708 (1991).

[47] S. Nakamura, N. Iwasa, M. Senoh, T. Mukai: *Jpn. J. Appl. Phys.* **31**, 1258 (1992).

[48] S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, N. Iwasa: *Jpn. J. Appl. Phys.* **31**, L139 (1992).

[49] J. A. Van Vechten, J. D. Zook, R. D. Horning, B. Goldenberg: *Jpn. J. Appl. Phys.* **31**, 3662 (1992).

[50] T. Kozawa: Master's Thesis, Nagoya University, 1987.

[51] T. Matsuoka, H. Tanaka, T. Sasaki, A. Katsui: *Inst. Phys. Conf. Ser.* **106**, 141 (1990).

[52] N. Yoshimoto, T. Matsuoka, T. Sasaki, A. Katsui: *Appl. Phys. Lett.* **59**, 2251 (1991).

[53] A. Koukitu, N. Takahashi, T. Taki, H. Seki: *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, L673 (1996).

[54] A. Koukitu, T. Taki, N. Takahashi, H. Seki: *J. Cryst. Growth* **197**, 99 (1999).

[55] S. Nakamura, M. Senoh, T. Mukai: *Jpn. J. Appl. Phys.* **32**, L8 (1993).

[56] S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa, S. Nagahama: *Jpn. J. Appl. Phys.* **34**, L797 (1995).

[57] H. Amano, I. Akasaki: *Ext. Abst. Int. Conf. Solid State Devices and Materials*, V-7, 683 (1995).

[58] T. Takeuchi, S. Sota, M. Katsuragawa, M. Komori, H. Takeuchi, H. Amano, I. Akasaki: *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, L382 (1997).

[59] [http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/nuclear/001/pdf/001\\_02\\_001.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pdf/001_02_001.pdf) (v japonštině)

[60] U.S. Department of Energy: *Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications*, Jan. 2012, (2012) 4. Dostupné z WWW: [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl\\_energy-savings-report\\_jan-2012.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_energy-savings-report_jan-2012.pdf)

[61] Fuji Chimera Research Institute, Inc.: 2014 LED Related Market Survey 41 (2014).

[62] <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/NightLights/page3.php>

Nobelova cena  
za fyziku 2014

