

Suy ngẫm từ “Hiện tượng Nakamura”

GS TRẦN TRÍ NĂNG

Đại học Minnesota, Mỹ



GS.TS Shuji Nakamura (Đại học California, Santa Barbara - UCSB, Mỹ) được cộng đồng khoa học xem như một “trụ cột lớn” đã đưa đến sự thành công của các sản phẩm thương mại blue LEDs (light emitting diodes) và blue LDs (laser diodes) dựa trên GaN. Những linh kiện bán dẫn này đang được dùng trong nhiều lĩnh vực khác nhau, chẳng hạn kỹ thuật tồn trữ quang học dựa trên tia blue LDs (blue-ray optical storage) như blue-ray disc, HD-DVD [1], LED TV, bảng hiển thị LED

[hình 2], đèn chiếu sáng ngoài trời [hình 3], y khoa, tín hiệu giao thông, laser printers, laser displays và lọc nước (water purification). Trong bài viết này, chúng tôi xin mạo muội gọi sự thành công của ông là “Hiện tượng Nakamura” bởi nó đi ngược lại với mô hình tiến thân thông thường: ông tốt nghiệp tại một đại học nhỏ, làm việc tại một hãng nhỏ ở một thành phố nhỏ, không liên kết với các trường đại học và hãng lớn, nghiên cứu hầu như một mình với phần lớn thiết bị tự lắp đặt... Kết quả thí nghiệm là người bạn dẫn dắt ông vượt qua nỗi tuyệt vọng và “mớ bòng bong” mà ông phải đối diện hàng ngày. Ông đã đạt được những thành tựu liên quan đến linh kiện bán dẫn mà những “cây đại thụ” về “high tech” như Sony, Matsushita, Stanley Electric, Sharp, Sanyo, Sumitomo, Toshiba, NEC, Hewlett-Packard, Xerox và Philips đã bỏ rất nhiều tiền bạc và công sức nhưng không thể thực hiện được. Chỉ trong 6 năm sau khi lấy bằng tiến sĩ ở Đại học Tokushima (Nhật Bản), ông được bầu vào Viện Hàn lâm khoa học Mỹ (2000). Năm 2002, ông nhận giải Benjamin Franklin (từng được trao cho Max Planck, Albert Einstein, Stephen Hawking). Năm 2006, ông được nhận giải Millennium Technology - giải thưởng lớn nhất trong lĩnh vực công nghệ với số tiền thưởng 1 triệu Euros. Với đà phát triển về kỹ thuật blue light như hiện nay, chúng tôi nghĩ chuyện lĩnh giải Nobel của ông là rất có thể trong vòng 10 năm tới. Nhìn lại con đường GS Nakamura đã đi, chúng ta không chỉ hiểu hơn về sự thành công của ông mà còn rút ra được nhiều điều bổ ích, đặc biệt với các nhà khoa học trẻ.

Con đường khai phát LEDs và blue LDs

LEDs dựa trên chất bán dẫn GaN lần đầu tiên được nghiên cứu bởi TS J.I. Pankove và cộng sự tại Công ty RCA ở Mỹ vào đầu thập niên 70 của thế kỷ XX [3], nhưng không thể thương mại được vì chất lượng p-type GaN chưa tốt. Ít nhất có ba vấn đề cần phải giải quyết để có thể thành công trong việc chế tạo sản phẩm GaN LEDs: (1) p-type doping; (2) nhiệt đối lưu (thermal convection) ở nhiệt độ sinh trưởng màng mỏng cao (khoảng 1.000°C) vì dùng phương pháp MOCVD và (3) sự điều hợp mạng tinh thể (lattice-matching) thích hợp với vật nền (substrate). Hiện tại hầu hết dùng vật nền làm bằng sapphire có độ điều hợp mạng tinh thể với GaN cao, khoảng 15%.

Đầu năm 1990, GS Isamu Akasaki (Đại học Nagoya, Nhật Bản) và cộng sự đã tình cờ khám phá ra phương pháp chế tạo p-type GaN với chất lượng tốt bằng cách chiếu xạ Mg-doped GaN với tia điện tử từ kính hiển vi điện tử [4], tuy nhiên phương pháp này không thích hợp trong việc sản xuất hàng loạt và cơ cấu vật lý chưa được hiểu rõ. Để giải quyết vấn đề này, GS Nakamura đã đưa ra giải pháp nung Mg doped GaN trong môi trường khí nitơ sạch ở 400°C và đã

thành công trong việc chế tạo p-type GaN với chất lượng tốt, giúp blue GaN LEDs [1] có độ sáng rất cao, có thể thương mại hóa [5]. Để giải quyết vấn đề nhiệt đối lưu ở 1.000°C, GS Nakamura khai thác hệ thống MOCVD với hai dòng khí (two flow MOCVD). Trong hệ thống này, nguồn chất khí phụ (auxiliary stream of gases) như $N_2 + H_2$ thổi thẳng góc với vật nền đẩy các chất khí phản ứng (reactant gases) trong nguồn khí chính (primary stream of gases) $TMG + NH_3 + H_2$ về phía vật nền và kết quả là màng mỏng GaN với chất lượng tốt được tạo thành. GS Akasaki và GS Nakamura đã triển khai được kỹ thuật chế tạo lớp đệm (buffer-layer technologies) để tạo GaN với mật độ khiếm khuyết (defect density) thích hợp [6, 7].



Hình 1: Blue LEDs

Năm 1993, GS Nakamura đã khai phát thành công blue-green, white LEDs và blue LDs dựa trên nhóm III nitride. Ngày 12.12.1995, blue LDs phát sáng ở nhiệt độ phòng ra đời [8-10]. Đây được xem như một khám phá rất quan trọng trong lĩnh vực khoa học vật liệu trong vòng 30 năm nay vì tia laser phát sáng ở nhiệt độ phòng thay vì ở nhiệt độ thấp. Trong 6 tháng, tuổi thọ (lifetime) của blue LDs ở nhiệt độ phòng đã nhảy vọt từ 300 giờ đến vài ngàn giờ và cuối năm đó, ông ta đã đạt LD's với tuổi thọ 10.000 giờ, một điều kiện cần thiết cho sản phẩm bán được trên thị trường.

Xin hồi tưởng lại con đường ông đã đi:

Sau khi học xong đại học và cao học về ngành điện tử vào năm 1977 và 1979 ở Đại học Tokushima, GS Nakamura muốn theo đuổi ngành chuyên môn ở những hãng lớn như Sony hoặc Toshiba, nhưng vì hoàn cảnh gia đình và điều kiện kinh tế, ông

đành “miễn cưỡng” ở lại Shikoku. Thấy hướng dẫn ông giới thiệu ông đến làm cho hãng Nichia ở Anan. Trước đó ông hoàn toàn không biết hãng này lớn nhỏ ra sao và chuyên về lĩnh vực nào. Nichia lúc bấy giờ có 200 nhân viên với tiền thu nhập hàng năm khoảng 30 triệu USD qua việc buôn bán phosphor và bắt đầu muốn tiến vào thị trường LEDs. Phòng R&D của hãng lúc bấy giờ có GS Nakamura, 1 quản lý và 1 người làm marketing. Công việc đầu tiên của ông là nghiên cứu tinh thể GaP dùng trong việc chế tạo red và yellowish-green LEDs. Vì là hãng nhỏ, ông được nhiều tự do và ít phải “va chạm”. Sau này ông thú nhận “Nếu lúc đó tôi đi làm cho hãng lớn như Sony thì ở đó sẽ có rất nhiều chuyên gia giỏi. Chắc chắn tôi sẽ phải thông qua họ những gì định làm”[11].

Trong gần 10 năm đầu ở Nichia, ông khai phát được ba

sản phẩm (tinh thể GaP, tinh thể GaAs và tinh thể GaAlAs). Trong 3 năm đầu, ông dùng phương pháp Horizontal Bridgman để sản xuất tinh thể gallium phosphide. Lúc đó phòng thí nghiệm cũng vừa là văn phòng của ông. Luyện gallium (Ga) và phosphor (P) nóng chảy ở nhiệt độ 1.500°C trong lò hydrogen-oxygen và phản ứng trong một phòng chứa chân không. Lúc đó, ông chẳng những phải lắp đặt lò mà còn phải hàn thạch anh, một công việc tương đối khó và cần nhiều kỹ năng. Mỗi ngày, ông dùng hết khoảng hai bình chứa oxygen và hydrogen. Cứ khoảng 3 lần một tháng, bộ phận thạch anh bị nứt, dẫn oxygen vào và phản ứng với photphor, gây ra phản ứng nổ. Chuyện này luôn xảy ra lúc 5h chiều, khi mọi người bắt đầu ra bãi xe (cách phòng thí nghiệm 150 m). Khói dày màu trắng phát ra từ phía cửa sổ của văn phòng ông. “Lúc đầu người ta còn đến hỏi chuyện gì xảy ra thế? Ông vẫn còn sống sao? sau đó vài lần chẳng còn ai quan tâm đến việc này nữa” - ông kể lại. Mỗi khi có nổ là ông xịt nước vào lò để giữ cho phosphor khỏi bắt cháy. Sau khi khói bay đi hết, ông lại ngồi viết báo cáo... Cuối cùng ông cũng chế tạo được tinh thể gallium phosphide (GaP) với chất lượng tốt tương đương với sản phẩm của những hãng khác trên thị trường. Điều không may là, mặc dù chất lượng sản phẩm tương đương nhau, nhưng khách hàng thường có khuynh hướng thích mua GaP từ những hãng lớn có tên tuổi hơn nên rất cuộc Nichia chỉ bán được 10.000 USD/tháng. Trong giai đoạn này, ông vừa làm công tác nghiên cứu vừa làm “salesman” vì người lo phần marketing không biết gì về sản phẩm. Thất vọng, người quản lý kinh doanh đề nghị Nichia thử



Hình 2: bảng hiển thị LED ở Dallas Cowboys New Stadium. 21,6 m x 48 m với 10,5 triệu LEDs [Mitsubishi Electric Diamond Vision] [2]

chế tạo tinh thể gallium arsenide (GaAs) dùng trong LEDs. Thế nên, từ năm 1983, ông bắt đầu nghiên cứu GaAs. Cũng vẫn kinh nghiệm như lúc làm việc với GaP, có điều khác hơn là lần này khi cái lò bị nổ, chất rỉ ra là arsenic oxide, một chất độc hại. Vì thế, ông dời phòng lab tới một phòng biệt lập với văn phòng. Ông đợi sau khi khói tan hết rồi mặc “bộ đồ của phi hành gia” với mặt nạ phòng hơi độc đi vào phòng lab lo công việc lau chùi [12].

Từ năm 1985, Nichia quyết định tham gia vào thị trường LEDs. Nakamura đã tự chế tạo hệ thống LPE (liquid-phase epitaxy - thường dùng để chế tạo màng mỏng LED). Sau một thời gian, ông đã thành công trong việc chế tạo red và infrared LEDs bằng cách chế tạo gallium aluminium arsenide trên vật nền GaAs. Chất lượng của LEDs do ông chế tạo ngang hàng với sản phẩm của Sanyo, Sharp, Stanley, Panasonic, Toshiba và những hãng khác tại Nhật Bản.

Tuy nhiên, cũng giống như những lần trước đó, khách hàng không tin tưởng “chất lượng lâu dài” của sản phẩm từ một hãng nhỏ như Nichia nên doanh thu từ mặt hàng này không cao. Thất vọng, ông đề nghị với người quản lý nghiên cứu về blue LEDs vì ông nghĩ đây là tương lai của kỹ nghệ quang điện tử và là sản phẩm đặc thù cho những hãng như Nichia. Lúc đó, người quản lý phụ trách R&D của ông trả lời: “Anh khủng sao? Tất cả những hãng lớn và các trường đại học trên thế giới chưa thể làm được chuyện này. Sao anh nghĩ anh có thể thực hiện được ở một hãng nhỏ như chúng ta?”. Không thuyết phục được người quản lý, tháng 1.1988, ông đến gặp ông Nobuo Ogawa, CEO, chủ hãng Nichia với đề nghị: 3,3 triệu USD để nghiên cứu về LEDs và 1 năm làm việc tại Đại học Florida (Mỹ) để học về hệ thống chế tạo màng mỏng MOCVD (methaloorganic chemical vapor deposition). Đây là lần đầu tiên sau 10 năm làm

việc ở Nichia ông dám “liều” như vậy vì có thể ông sẽ bị sa thải với quyết định táo bạo này và vì từ trước ông chỉ là một “yes man” không bao giờ dám đòi hỏi điều gì về thiết bị, đề tài và tiền nghiên cứu. Ông rất ngạc nhiên khi ông Ogawa đồng ý với tất cả yêu cầu của ông vì có lẽ ông này biết GS Nakamura là người có tài. Khi mọi chuyện được như ý, GS Nakamura lại bắt đầu với những khó khăn mới.

Chuyển đi tới Đại học Florida ban đầu dường như không thuận lợi vì phòng thí nghiệm của GS nơi ông làm việc phải chuyển nhượng cả 3 hệ thống MOCVD sang phòng nghiên cứu của một GS khác cùng trường và chỉ còn những bộ phận để có thể làm một bộ máy MOCVD khác. Nakamura đã được “vinh hạnh” giao lắp đặt chiếc máy này từ đầu. Vì không có bằng PhD và không có bài viết nào đăng trên các tạp chí chuyên môn, người ta xem ông như một kỹ sư chứ không phải là một người nghiên cứu [11]. Ông làm việc 7 ngày một tuần, 16 giờ mỗi ngày. Sau 10 tháng, ông đã hoàn thành bộ máy MOCVD. Ông tâm sự: “điều quan trọng nhất tôi học được ở Đại học Florida là cấp bằng PhD và viết các bài báo chuyên ngành rất quan trọng cho người nghiên cứu ở Mỹ [12]”. Với kinh nghiệm lắp đặt MOCVD thu nhập được lúc ở Đại học Florida, ông có thể chuyển đổi nhanh chóng hệ thống MOCVD với một dòng chất khí sang hệ thống với hai dòng chất khí, giúp ông thành công trong việc chế tạo blue LED’s với độ sáng rất cao chưa từng thấy trước đây.

Vào năm 1989, có hai chất bán dẫn có thể dùng trong việc chế tạo blue LEDs và LDs là ZnSe và nhóm III nitride. Khi đó hầu hết các phòng nghiên cứu tại Nhật Bản và

trên thế giới đều dồn năng lực tập trung nghiên cứu ZnSe. Sự chú trọng càng tăng lên nhanh vào năm 1991, khi một nhóm nghiên cứu ở 3M thành công trong việc chế tạo blue-green LEDs lần đầu tiên trên thế giới sau bao năm chờ đợi và đã thổi một luồng sinh khí mới cho cộng đồng chuyên môn [13, 14]. Nhưng LEDs dựa vào ZnSe hoạt động tốt ở nhiệt độ nito hoá lỏng và chỉ phát tia sáng liên tục khoảng một phút ở nhiệt độ phòng. Trong bối cảnh đó, GS Nakamura đã chọn GaN vì “sợ sự cạnh tranh” và muốn có cơ hội viết được nhiều bài báo trong tạp chí chuyên môn.

Ông tự khai phá nhóm III nitride mà không dùng những phương pháp thông thường. Ông mua một hệ thống MOCVD bán trên thị trường để chế tạo màng mỏng GaN. Nhưng hệ thống này chỉ có một dòng chất khí và khó có thể chế tạo màng mỏng trên vật nền. Ông tự phát triển một hệ thống mới mà ông gọi là two-flow MOCVD dựa vào kinh nghiệm học được khi ở Đại học Florida. Trong hệ thống này, chất khí phản ứng được thổi vào song song với vật nền, kiểm chế được nhiệt độ đối lưu lớn khi các tinh thể được tạo thành ở nhiệt độ 1.000°C. Với hệ thống này, ông có thể chế tạo tinh thể GaN crystal với độ di động 200, kỷ lục thế giới lúc bấy giờ, mặc dù mật độ lệch mạng tinh thể vẫn còn cao, khoảng $10^{10}/\text{cm}^3$. Với hệ thống two-flow MOCVD này, ông có thể chế tạo LEDs với độ chiếu sáng gấp 100 lần sản phẩm blue LEDs dựa trên SiC trên thị trường lúc bấy giờ và với tuổi thọ từ 50.000 đến 100.000 giờ. Ông đã làm được điều mà những người khác nghĩ là không tưởng.

Sau khi ông quyết định rời Nichia, đã có trên 10 trường đại học ở châu Âu và Mỹ, cùng nhiều



Hình 3: quảng trường Time Square - New York thấp sáng với đèn LEDs

hãng lớn muốn nhận ông. Cuối cùng vào năm 2000, ông chọn Đại học California và hiện là Giám đốc của Trung tâm Chiếu sáng và hiển thị, chủ trì nhiều chương trình nghiên cứu về vật liệu nitride. Ông cũng sáng lập hãng Soraa cùng với hai đồng nghiệp ở UCSB vào năm 2008. Hãng này được Khosla Ventures và NEA tài trợ và có cơ sở tại thung lũng Silicon và UCSB.

Đôi điều rút ra

Kiên trì và độc lập trong nghiên cứu

Ở một hãng nhỏ không đủ nhân sự, tài chính và thiết bị, GS Nakamura đã làm việc rất nhiều để hoàn thành những điều ông muốn thực hiện. Khi ở Mỹ, ông còn có biệt danh là “Slave Nakamura” vì ông làm việc 16 giờ/ngày, 7 ngày/tuần để lắp đặt MOCVD, một hệ thống ông sẽ cần trong việc nghiên cứu LEDs khi trở về Nhật Bản. Trong thời gian 10 năm đầu tiên ở Nichia, ông đọc rất nhiều sách, tài liệu khoa học, bằng sáng chế liên quan đến ngành chuyên môn. Nhưng sau đó ông quyết định không đọc nhiều sách,

tài liệu nữa vì nghĩ làm như thế chỉ “bất chước” người ta mà thôi chứ không thể “sáng tạo” được. Ông rất chủ động từ những công việc như lắp đặt, bảo trì, chạy máy đến phân tích và tùy thuộc vào kết quả thí nghiệm để hoạch định bước đi kế tiếp của mình.

Chuyên gia không có nghĩa là lúc nào cũng đúng

Có những người làm công tác khoa học thường đi theo khuynh hướng chung của mọi người và vì thế đôi khi mất cơ hội tìm được điều mới lạ. Một số không ít những người gọi là “chuyên gia” lấy ý tưởng từ sách vở, hội nghị và ít có kinh nghiệm về đề tài chuyên môn. Thêm vào đó, ở nhiều hãng, thành phần lãnh đạo thường thích “đi theo chiều gió”, nghe theo những chuyên gia hàng đầu và chọn hướng đi an toàn để sau này nếu “rủi”, thất bại vẫn còn lý do để bào chữa. Trở lại trường hợp của GS Nakamura, các chuyên gia đều nghĩ nghiên cứu GaN cho blue LEDs và LDs là “không thể” vì bề mặt và góc cạnh của vật liệu này rất gồ ghề. Ai ngờ đâu sau này GS Nakamura tìm ra chính tính chất gồ ghề đã giúp GaN có một độ sáng tốt khác thường.

Làm cho hãng nhỏ cũng lợi

Trong trường hợp của GS Nakamura, làm ở hãng nhỏ không phải là điều không hay. Mặc dù là một hãng nhỏ, nhưng Nichia có truyền thống làm những nghiên cứu “không theo thời”. Sự thành công của hãng này trong việc thương mại hoá phosphor là một ví dụ điển hình. Ngoài ra, ở hãng nhỏ ông có thể làm được một số điều ông muốn và đôi khi đi ngược lại với hướng đi chung của hãng, trong đó có việc viết các bài báo khoa học gửi đăng trên các tạp chí quốc tế. Trong khoảng thời gian từ 1991 đến 1999, ông đã

viết 146 bài báo, 6 quyển sách, 10 chương sách. Ông đã có 68 bằng sáng chế tại Nhật Bản, 13 bằng sáng chế tại Mỹ và nhiều đơn sáng chế đã nộp. Với thành tích này, Đại học Tokushima đã trao cho ông học vị tiến sĩ vào năm 1994.

Trong khi đó, ở những hãng lớn như 3M hay Sony, cơ cấu quản lý có thể buộc các nhà nghiên cứu theo xu hướng, hoặc định hướng mang tính chiến lược của hãng thay vì để cho họ tự do với các nghiên cứu riêng lẻ. Thành công của Nakamura trong việc chế tạo blue LEDs và LDs với chất lượng tốt là một ví dụ. Chính GS Nakamura đã thú nhận: “Điều may mắn của tôi là được làm việc ở một hãng nhỏ và ít bị làm phiền” [15].

Hướng đi cho sinh viên và công tác giáo dục

Làm việc ở các hãng “start-up”: một số sinh viên xuất sắc ở Mỹ sau khi tốt nghiệp thích đi làm việc ở những “start-up” để thực hiện “American dream”. Dĩ nhiên sự thiếu thốn phương tiện và tài chính sẽ đòi hỏi sinh viên phải làm mọi chuyện từ A đến Z nhưng chính vì thế mà họ có cơ hội học hỏi được nhiều kinh nghiệm, từ kỹ thuật đến kinh doanh (trường hợp của GS Nakamura, mặc dù ông đến làm ở Nichia một cách miễn cưỡng nhưng Nichia là một “start-up” từ năm 1956, và ông Nobuo Ogawa đã tạo lập ra hãng này với tinh thần sáng tạo và thành công với lượng phosphor chiếm một nửa thị trường của thế giới).

Mở hãng “start-up”: một số GS ở một số đại học Mỹ thường có hãng riêng, dùng thiết bị và sinh viên để thực hiện các nghiên cứu. Nếu thành công, hãng sẽ trả tiền bản quyền sáng chế cho nhà trường và thuê sinh viên vào

làm nhân viên hay làm chủ hãng. Hướng đi này có lợi cho trường, cho GS và cho sinh viên vì mọi người đều có “động lực” để làm việc “hết mình”.

Cần vài thay đổi ở cấp đại học: theo thiển nghĩ của tôi, đại học là nơi hun đúc óc sáng tạo, khả năng suy nghĩ và phân tích, kiến thức cơ bản và tinh thần tuân theo quy luật. Đại học không phải là nơi để giáo dục “tù chương”. Cấp bằng đại học chỉ là bước đầu tiên và sự thành công sẽ tùy thuộc rất nhiều vào khả năng và nỗ lực của mỗi cá nhân sau này. Ở cấp đại học, sinh viên của ta nên dành năm cuối để làm đề án tốt nghiệp như phần lớn các đại học ở Mỹ hiện đang làm. Sinh viên nên có cơ hội tự mình thiết kế và thực hiện kế hoạch của mình. Có như vậy mới có thể học hỏi được nhiều hơn, nhất là trong lĩnh vực khoa học thực nghiệm, và mới thấy thích điều mình làm, từ đó óc sáng tạo sẽ bắt đầu manh nha. Về điều kiện nhận vào đại học hay cao học, song song với thành tích học, nhà trường cũng nên xét khả năng sáng tạo, óc phân tích và kinh nghiệm “tay nghề” của sinh viên.

Nói tóm lại sự thành công hiếm có của GS Shuji Nakamura về lĩnh vực blue LED’s và blue LD’s đã cho chúng ta một số vấn đề để suy ngẫm: (1) yêu thích điều mình làm và không để bị “cuốn theo chiều gió” theo những quan điểm và ý kiến của chuyên gia; (2) kiên trì làm việc hết sức mình “mưu sự tại nhân, thành sự tại thiên”; (3) khó khăn nào cũng có con đường vượt qua và đôi khi khó khăn này là “bàn đạp” tốt để con người nhảy xa và cao hơn trong những điều họ muốn làm; (4) đừng nên câu nệ nhiều về hãng lớn, trường lớn. Phần lớn sự thành công của một người, nhất là những người

làm công tác khoa học - kỹ thuật, tùy thuộc vào cá nhân của họ. Để kết thúc bài viết này, chúng tôi xin trích dẫn ở đây một đoạn trong bài nói chuyện của GS Nakamura với sinh viên tại California vào năm 2007: “Điều mà tôi đã làm được chúng tôi rằng, bất cứ người nào với một số ít kinh nghiệm nghiên cứu, không có hợp tác với đại học hay hãng xưởng khác vẫn có thể một mình đạt được thành công đáng kể khi người ấy làm nghiên cứu ở một lĩnh vực mới mà không bị ràng buộc nhiều với những ý tưởng và kiến thức ước định” ■

Tài liệu tham khảo

- [1] S. Nakamura: in a talk to high school students, 2007, CA S. Nakamura. Materials Science and Engineering B50 (1997) 277-284.
- [2] <http://stadium.dallascowboys.com/assets/pdf/mediaVideoBoardRelease.pdf>
- [3] J. Pankove et al. RCA Rev. 32, 383 (1971).
- [4] H. Amano et al. J. Lumin. 4041, 121 (1988).
- [5] S. Nakamura et al. Jpn. J. Appl. Phys. 31, 1258 (1992).
- [6] H. Amano et al. Appl. Phys. Lett. 48, 353 (1986).
- [7] S. Nakamura: Jpn. J. Appl. Phys. 30, L1705 (1991).
- [8] S. Nakamura et al. Jpn. J. Appl. Phys. 30, L1998 (1991), ibid. 34, L797 (1995).
- [9] S. Nakamura et al. ibid. 35, L74 (1996).
- [10] S. Nakamura et al. ibid. 35, L217 (1996).
- [11] S. Nakamura: Commomorative lecture at the 21st Honda Prize awarding ceremony, Nov. 17, 2000. Tokyo.
- [12] S. Nakamura : ISAP International, vol.1, January 2000.
- [13] M. Haase et al. Appl. Phys. Lett. 63, 25 Oct. 1993.
- [14] M. Haase et al. US patent 5,291,507.
- [15] Opto & Laser Europe May 2002