

Reflectance spectrum properties of DBR and microcavity porous silicon

Young-You Kim and Han-Jung Kim[†]

Department of Physics, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

(Received September 29, 2009)

(Revised November 5, 2009)

(Accepted November 6, 2009)

Abstract In this paper, we made three kinds of porous silicon samples (single layer, distributed Bragg reflector, and microcavity) by electrochemical etching *p*-type silicon substrate. And then, we investigated their reflectance spectrum properties. We found that the number of fringe patterns and the maximum reflectivity of porous silicon multilayer increased compared with a porous silicon single layer. In addition, we can observe that the DBR (distributed Bragg reflector) porous silicon has a full-width at half-maximum about 33 nm which is narrower than the porous silicon single layer and porous silicon microcavity.

Key words Porous silicon, Single layer, Multilayer, DBR, Microcavity, Reflectance spectrum

Distributed Bragg Reflector, Microcavity 구조를 갖는 다공질규소의 반사율 스펙트럼

김영유, 김한중[†]

공주대학교 물리학과, 공주, 314-701

(2009년 9월 29일 접수)

(2009년 11월 5일 심사완료)

(2009년 11월 6일 게재확정)

요약 본 연구에서는 *p*형 단결정 규소 기판을 에칭시켜 다층구조를 갖는 DBR 및 Microcavity 다공질규소를 제작하고, 그 반사율 스펙트럼을 조사하였다. 그 결과 다층구조를 갖는 다공질규소의 반사율 스펙트럼에서 프링지 패턴의 수는 단일층 다공질규소의 경우보다 상대적으로 많았으며, 특정 파장에서 반사율은 90% 이상으로 나타났다. 그리고 DBR 다공질규소에서 최대 반사율 봉우리의 FWHM 값은 33 nm로 매우 좁게 나타났다.

1. 서론

단결정 규소 기판의 표면을 전기화학적으로 에칭시켜 얻어진 다공질규소(porous silicon)는 Canham에 의해 가시광 영역의 강한 PL(photoluminescence)현상이 보고[1]된 이후 기초 물성과 응용 가능성 대한 여러 연구 결과들이 발표되고 있다. 다공질규소는 나노 크기의 미세공(pore)과 규소 결정체(crystalline)로 이루어져 있으며, 가시광 영역의 PL현상과 프링지 패턴(fringe pattern) 등의 독특한 구조적·광학적 특성을 가지고 있다[1, 2]. 최근에는 발광다이오드[4], 태양전지[5], 광도파관[6], 센서[7-10] 등으로의 응용연구에 관심이 집중되고 있다.

다공질규소를 이용한 응용소자 개발에 대한 여러 연구가 이루어지고 있으나 아직까지 실용화하지 못하고 있는 실정이다. 다공질규소를 응용소자로 이용하기 위해서는 공기 중에서의 낮은 안정성, PL 스펙트럼 최대 봉우리의 파장값 조절의 어려움과 낮은 발광 효율 등 해결되어야 한다. 최근에는 다층(multilayer)의 다공질규소를 제작하여 이러한 문제점들을 해결해 보려는 여러 연구들이 국내·외에서 활발히 진행되고 있다.

Pavesi는 에칭 조건을 변화시켜가며 제작한 다층 다공질규소를 이용하여 반사율 스펙트럼 주 봉우리의 파장값과 반사율을 조절할 수 있음을 보고[11]한 바 있으며, Araki는 다층의 다공질규소를 이용하여 PL의 특성을 향상시킬 수 있다[12]고 보고한 바 있다. 최근에는 국내 연구진에 의해 Microcavity 구조를 갖는 다공질규소를 제작하여 PL 스펙트럼의 FWHM(full-width at half-maximum)을 크게 줄일 수 있음을 보고한 바 있다[13].

[†]Corresponding author

Tel: +82-41-850-8480

Fax: +82-41-850-8489

E-mail: rlagkswnd@kongju.ac.kr

그러나 아직까지 PL 스펙트럼 최대 봉우리의 파장값 조절 및 PL의 효율을 증가시킬 수 있는 명확한 방법은 개발되지 못하고 있다.

본 연구는 *p*형 단결정 규소 기판을 습식 에칭(wet etching)시켜 DBR(distributed Bragg reflector) 및 Microcavity 구조를 갖는 다공질규소를 제작하여 다층구조를 갖는 다공질규소의 제작 방법을 실험적으로 구현하고, 제작한 다공질규소의 반사율 스펙트럼을 조사하였다.

2. 실험

다공질규소는 Fig. 1에서 보는 것처럼 백금(Pt) 판을 음극으로, 붕소(B)가 첨가된 *p*형(100) 단결정 규소 기판(Nilaco, 500440)을 양극으로 하여 HF-Ethanol 용액이 들어 있는 테플론 셀(teflon cell) 안에 넣어 정전류전원장치(Hokuto Denko, HA 301)와 함수발생기(Hokuto Denko, HB 105)를 이용하여 전류밀도와 에칭시간을 변

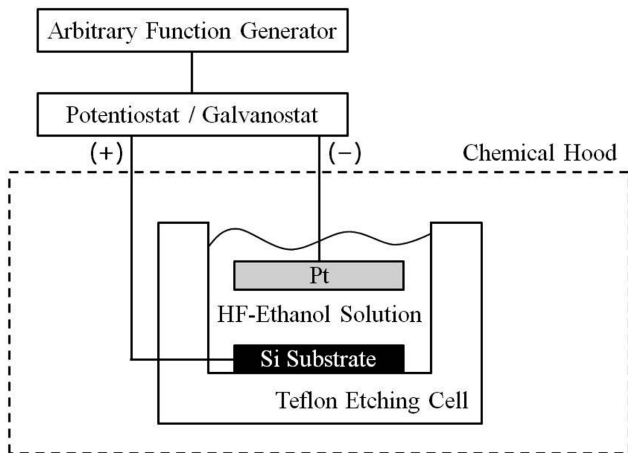


Fig. 1. The apparatus for the production of porous silicon.

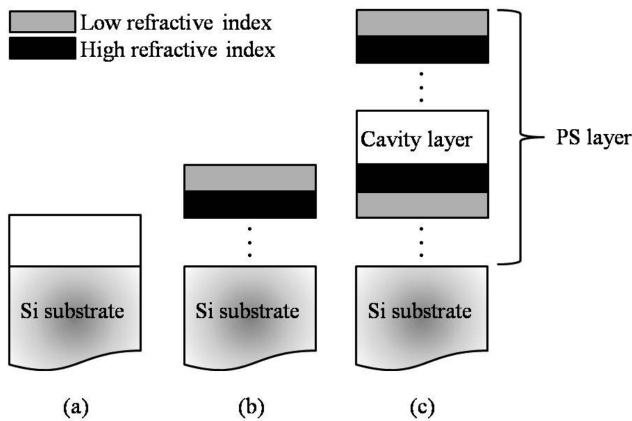


Fig. 2. The structure of (a) single layer, (b) DBR, and (c) microcavity porous silicon.

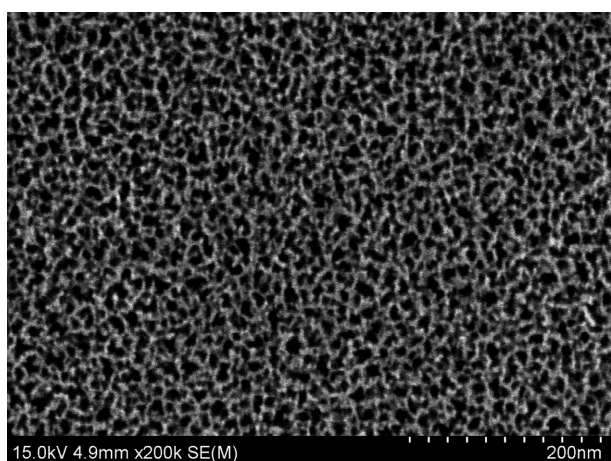
화시켜가며 제작하였다. 에칭에 사용한 HF-Ethanol 용액의 농도는 10%이었으며, 이 용액은 순도 49.0%의 HF와 99.9%의 Ethanol을 혼합하여 제작하였다. 단결정 규소 기판에서 에칭을 통해 다공질규소가 형성되는 부분의 면적은 1.0 cm²이었으며, 그 외 나머지 부분은 테플론 재질의 테이프로 감싸 HF-Ethanol 용액 속에서 에칭되는 것을 막았다.

다공질규소는 Fig. 2에서 보는 것처럼 단일층, DBR, Microcavity 구조로 제작하였으며, 이 때 단일층 다공질규소의 제작조건은 전류밀도 100 mA/cm², 에칭시간 21.30 s로 하였다. 그리고 DBR 구조의 다공질규소는 전류밀도와 에칭시간은 각각 83.0 mA/cm², 3.48 s 및 25.0 mA/cm², 4.00 s로 하여 저굴절률과 고굴절률을 갖는 층을 10주기가 되도록 Fig. 2(b)에서 보는 것처럼 다층으로 설계하였다. Microcavity 구조의 경우 Fig. 2(c)에서와 같이 앞에서 제작한 다층 다공질규소를 저굴절률과 고굴절률을 갖는 층을 15주기 되도록하여 상부와 하부의 브래그 반사경으로 하고, 그 사이에 Fig. 2(a)와 같은 단일층을 캐비티층(cavity layer)으로 두고 설계하였다. 이렇게 제작된 다공질규소는 10분 동안 초순수로 세척한 후, 상온에서 1시간 동안 건조하였다. 그리고 DBR과 Microcavity와 같은 다층구조를 갖는 다공질규소의 고굴절률과 저굴절률 층의 미세공의 크기는 다층상태로는 측정에 어려움이 있어 각각의 같은 조건으로 별도의 단일층을 제작하여 측정하였다.

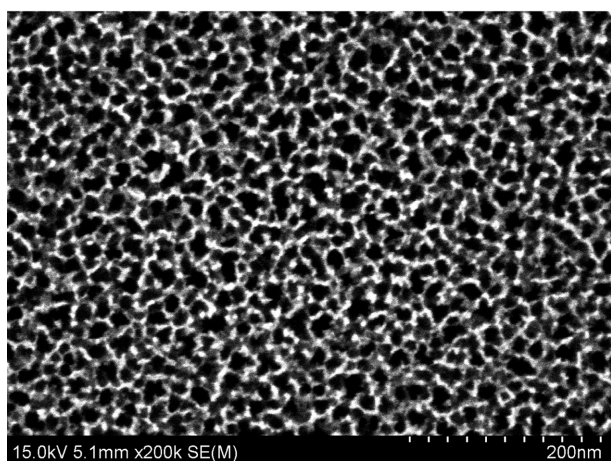
다공질규소의 표면과 단면의 모습은 주사전자현미경(JEPL, JSM-6335F와 PHILIPS, XL30SFEG)을 이용하여 관찰하였으며, 반사율 스펙트럼은 UV/VIS Spectrophotometer(Shimadzu, UV-3101PC)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

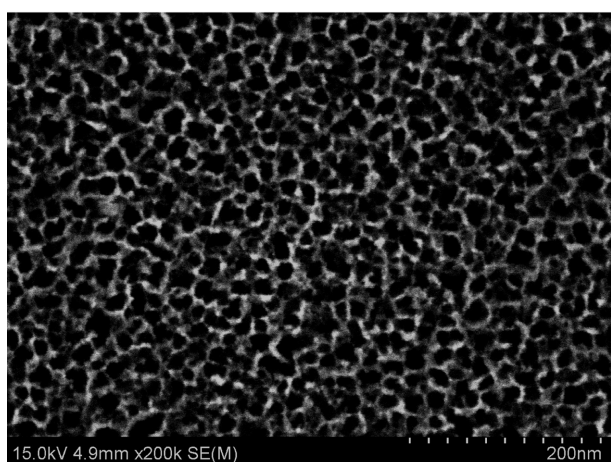
Fig. 3은 단결정 규소 기판을 HF-Ethanol 속에서 에칭시켜 제작한 단일층, DBR, Microcavity 구조를 갖는 다공질규소의 표면을 주사전자현미경으로 찍은 사진이다. 그림에서와 같이 다공질규소 표면에는 단일층(Fig. 3(a))의 경우 직경이 10~20 nm, DBR(Fig. 3(b))에서는 15~40 nm, Microcavity(Fig. 3(c))에서는 20~60 nm의 크기를 갖는 미세공과 20 nm 이내의 좁은 폭을 갖는 잔류 규소 골격(skeleton)이 무수히 존재하고 있는 것으로 나타났다. DBR 및 Microcavity 구조의 고굴절률층의 미세공의 크기는 직경이 10~20 nm, 저굴절률층에서는 20~30 nm로 나타났다. 다층 다공질규소의 미세공의 크기는 단일층보다 크게 나타났는데 이것은 에칭시간이 단일층 제작 때 보다 길어 미세공의 크기가 표면에서부터 커지기 때문이다.



(a)



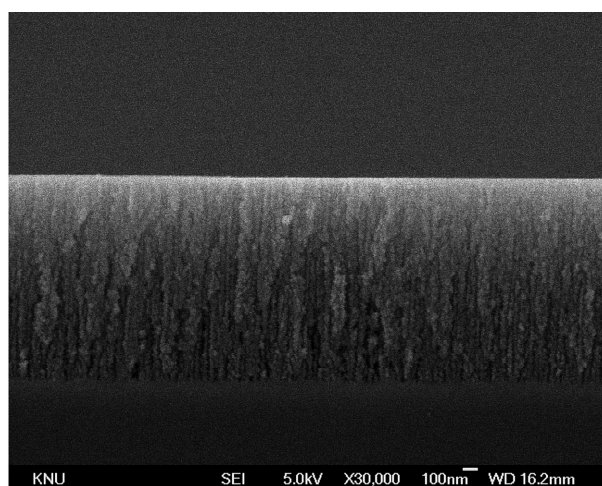
(b)



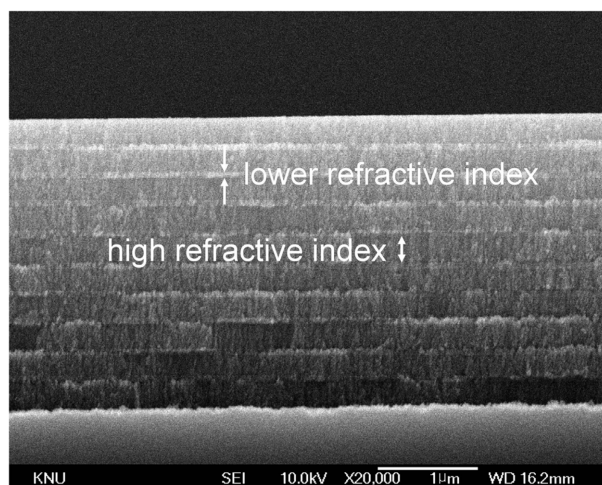
(c)

Fig. 3. Surface image of (a) single layer, (b) DBR, and (c) microcavity porous silicon produced by wet etching.

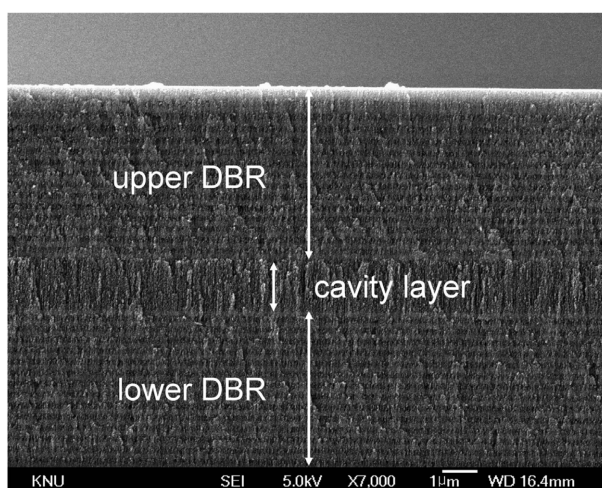
Fig. 4는 단일층, DBR, Microcavity 구조를 갖는 다공질규소의 단면을 주사전자현미경으로 찍은 사진이다. 그림에서와 같이 각 층의 두께는 단일층(Fig. 4(a))에서는 약 1.35 μm , DBR(Fig. 4(b)) 구조에서는 약 2.95 μm ,



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Cross-sectional image of (a) single layer, (b) DBR, and (c) microcavity porous silicon on the silicon substrate.

Microcavity(Fig. 4(c)) 구조에서는 약 10.45 μm 로 나타났다. 이 때 다층구조의 고굴절률층의 두께는 약 250 nm,

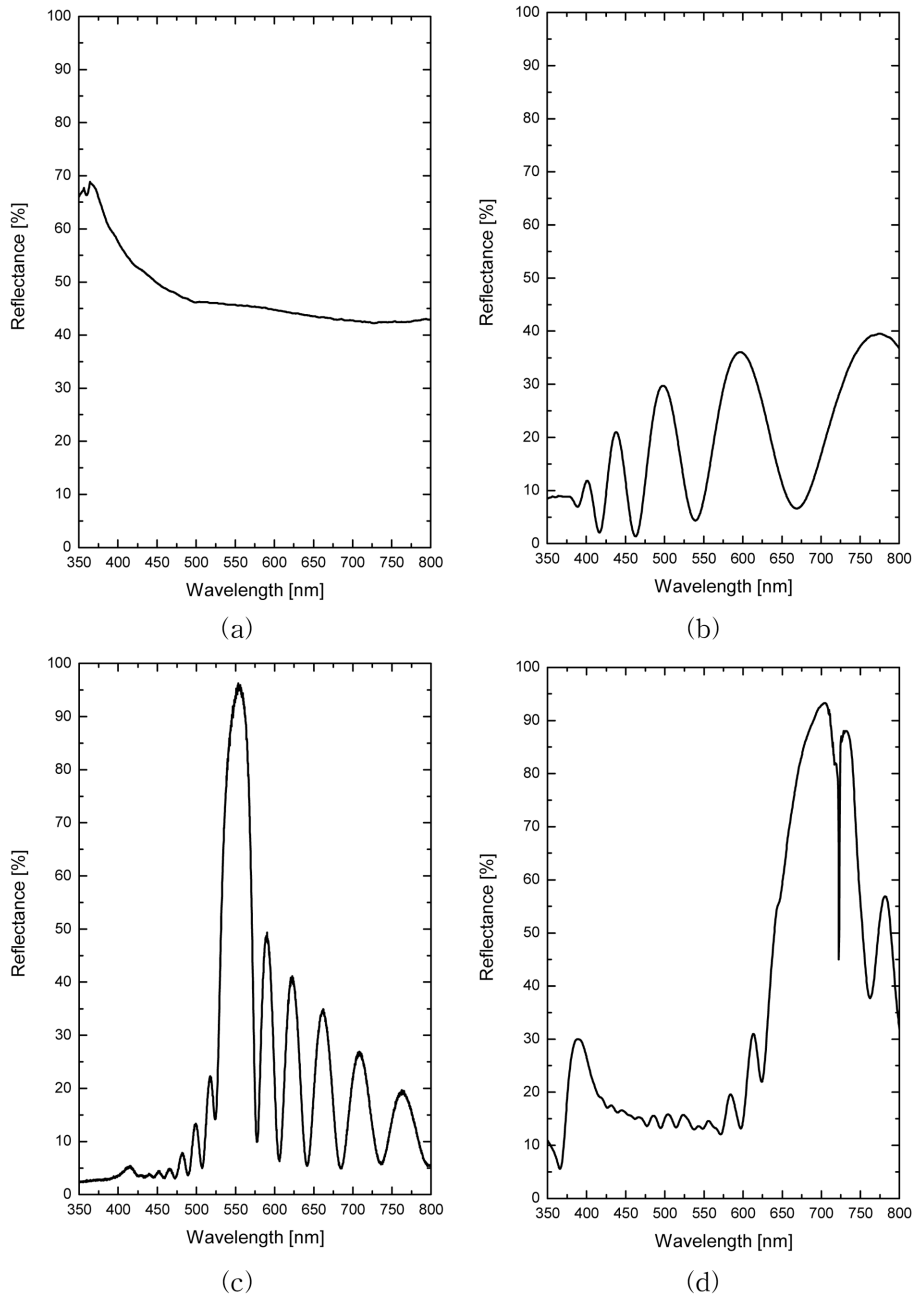


Fig. 5. Reflectance spectrum of (a) silicon substrate, (b) single layer, (c) DBR, and (d) microcavity porous silicon.

저굴절률층의 경우 약 50 nm 이었다. DBR과 Microcavity와 같은 다층구조에서는 각 층 사이 경계면의 균일한 정도가 굴절률, 광학적 두께 등과 같은 광학적 특성에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있는데[14], Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)에서와 같이 본 연구에서 제작한 다층 다공질구조의 각 층 사이 경계면은 아주 균일한 것으로 나타났다.

Fig. 3과 Fig. 4에서와 같이 다공질구조의 미세공의 형태는 깔때기(funnel) 모양의 주머니(saccate) 모습을 갖는 것으로 나타났다. 그리고 전류밀도와 에칭시간을 조절하

여 굴절률이 서로 다른층으로 구성된 다층구조를 다양하게 제작할 수 있었다.

Fig. 5는 단일층, DBR, Microcavity 구조를 갖는 다공질구조의 반사율 스펙트럼을 나타낸 것이다. 단결정 구조에서는 Fig. 5(a)에서 보는 것처럼 파장이 길어질수록 반사율이 약 70%에서 40% 정도로 서서히 감소하는 단순로운 스펙트럼을 나타내는 반면, 다공질구조에서는 파장에 따라 반사율이 변하는 사인과 형태의 프린지 패턴을 나타내었다. 그리고 Fig. 5(b)-5(d)에서와 같이 DBR과 Microcavity에서는 단일층 보다 더 많은 수의 프린지

패턴이 나타났으며, 특정 파장에서 최대 반사율이 90% 이상이었다. 이 값은 단일층에서의 최대 반사율이 40% 이내인 것과 비교하면 아주 크게 나타났다. 이와 같이 다층 구조에서 프린지 패턴의 수가 많이 나타나는 것은 각 층 사이의 경계면에서 반사된 빛이 보강 및 상쇄 간섭을 일으키기 때문으로 해석할 수 있다. 또한, Microcavity 다공질규소의 경우 Fig. 5(d)에서와 같이 722 nm에서 반사율이 50% 정도 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 최대 반사율을 갖는 봉우리의 FWHM 값은 Fig. 5(c)에서와 같이 DBR 구조에서 33nm로 아주 좁게 나타났다. 이 값은 광발광성 나노 입자의 FWHM 값 20~30 nm[15, 16]와 비교해도 큰 차이가 없는 아주 좋은 특성을 나타냈다. 이상에서와 같이 다공질규소를 반사경이나 광학 필터 등의 응용소재로의 개발을 위해서는 DBR이나 Microcavity와 같은 다층 구조가 더 효과적일 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구는 DBR 및 Microcavity의 다공질규소를 제작하고, 제작한 다공질규소의 반사율 스펙트럼을 조사하였다. 그 결과 다층 다공질규소에서 상대적으로 많은 수의 프린지 패턴을 나타내었으며, 특정 파장에서 최대 반사율이 90% 이상으로 나타났다. 다층구조에서 프린지 패턴의 수가 많은 것은 각 층 사이의 경계면에서 반사된 빛이 서로 보강 및 상쇄 간섭을 일으키기 때문으로 해석하였다. 그리고 DBR 다공질규소의 경우 최대 반사율을 갖는 봉우리의 FWHM 값은 33 nm로 좁게 나타났는데 이 값은 광발광성 나노 입자의 FWHM과 비교해도 큰 차이가 없었다. 이상으로부터 DBR 및 Microcavity의 다층구조를 갖는 다공질규소는 반사경이나 광학필터 등으로의 응용이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2007학년도 상반기 공주대학교 연구년 연구비로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] L.T. Canham, "Silicon quantum wire array fabrication

by electrochemical and chemical dissolution of wafers", *Appl. Phys. Lett.* 57 (1990) 1046.

- [2] L.T. Canham, "Properties of Porous Silicon", L.T. Canham, Ed. (IEE Inspec, London, 1997) p. 83.
- [3] L.T. Canham, T.I. Cox, A. Loni and A.J. Simons, "Progress towards silicon optoelectronics using porous silicon technology", *Applied Surface Science* 102 (1996) 436.
- [4] K.D. Hirschman, L. Tsybeskov, S.P. Duttagupta and P.M. Fauchet, "Silicon-based light-emitting devices integrated into microelectronic circuits", *Nature* 384 (1996) 338.
- [5] C.S. Solanki, R.R. Bilyalov, J. Portmans, J. Nijs and R. Mertens, "Porous silicon layer transfer processes for solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 83 (2004) 101.
- [6] H. Fil, M. Christophersen, J. Carstensen and G. Hassw, "Formation and application of porous silicon", *Materials Science and Engineering R39* (2002) 93.
- [7] Y.-Y. Kim, S.-K. Lee, H.-J. Kim, S.-H. Park, E.-J. Ahn and K.-W. Lee, "Fabrication of a porous-silicon-based ethanol sensor", *SAEMULLI* 51 (2005) 243.
- [8] C. Baratto, G. Faglia, G. Sberveglieri, Z. Gaburro, L. Pancheri, C. Oton and L. Pavesi, "Multiparametric porous silicon sensors", *Sensors* 2 (2002) 121.
- [9] I. Ferreira, E. Fortunato and R. Martins, "Ethanol vapour detector based in porous a-Si:H films produced by FW-CVD technique", *Sensors and Actuators B* 100 (2004) 236.
- [10] Y.-Y. Kim, H.-J. Kim and K.-W. Lee, "The potential for alcohol-containing gas sensors based on DBR porous silicon", *J. Korean Phys. Soc.* 55 (2009) 415.
- [11] L. Pavesi, "Porous silicon dielectric multilayers and microcavities", *La Rivista del Nuovo Cimento* 20 (1997) 1.
- [12] M. Araki, H. Koyama and N. Koshida, "Optical cavity based on porous silicon superlattice technology", *Jpn. J. Appl. Phys.* 35 (1996) 1041.
- [13] Y.-Y. Kim, J.-H. Jeon, E.-J. Ahn and K.-W. Lee, "Photoluminescence resonance properties of a porous silicon microcavity", *SAEMULLI* 44 (2002) 224.
- [14] M.G. Berger, M. Thonissen, R. Arens-Fischer, H. Munder, H. Luth, M. Arbtzen and W. Theiss, "Investigation and design of optical properties of porosity superlattices", *Thin Solid Films* 255 (1995) 313.
- [15] M. Bruchez, M. Moronne, P. Gin, S. Weiss and A.P. Alivisatos, "Semiconductor nanocrystals as fluorescent biological labels", *Science* 281 (1998) 2013.
- [16] S. Jang, Y. Koh, J. Kim, J. Park, C. Park, S.J. Kim, S. Cho, Y.C. Ko and H. Sohn, "Detection of organophosphates based on surface-modified DBR porous silicon using LED light", *Materials Letters* 62 (2008) 552.