シリコン超薄膜の電流注入発光

斎　藤　慎　一

Electro-Luminescence from Ultra-Thin Silicon

Shin-ichi SAITO

Silicon nano-structures are known to emit light due to quantum mechanical confinement effects, but previous silicon based light-emitting devices are limited by the tunneling barrier of the passivating silicon-dioxide and resulting low carrier injection efficiencies. We have proposed a lateral structure of a light-emitting-diode in which carriers are directly injected to an ultra-thin silicon. The device was fabricated in a conventional silicon process line, and the electro-luminescence from the device was observed in an infrared region, which might be applicable to the on-chip optical interconnection in the future.

Key words: silicon photonics, quantum confinement, lateral carrier injection, light-emitting transistor

ポーラス Si[1] やナノ結晶 Si[2] などの一次元またはゼロ次元の低次元シリコン構造で，発光することは従来から知られている（図 1）．これは，シリコン（Si）のバルク物性が量子閉じ込め効果によってナノ領域で変貌を遂げることを示している．LSI における Si デバイスの寸法もナノ領域にスケーリングされつつあるため，今後，発光特性を有する Si ナノ構造を高度な微細加工技術で制御よく作製できるようになる可能性がある．

しかしながら，その発光機構は未だ完全に解明されているわけではない．これは，Si/SiO_2 というきわめて単純かつ研究し尽くされた系でも，ナノ領域では研究の宝庫であるという好例である．効率のよい Si 発光素子を開発するためには，理論的予言と実験的検証を繰り返しながら発光機構を物理的に解明し，有効な開発指針を得ることが重要と思われる． 関連する文献は膨大な量に及び，必ずしもコンセンサスが得られているわけではないが，1 章で筆者らの見解と最近のデータについて紹介する．

発光機構が完全には解明されていないものの，発光特性は年々向上しつつある．これまでに報告された外部量子効率の世界最高記録は，電流注入発光（electro-luminescence; EL）で 1.1% でありディスプレー用途への適用目安である 1% を突破した[3]．また，フォトルミネセンス（photo-luminescence; PL）では，外部量子効率 23% もの値が報告されている[4]．PL の外部効率が EL より 1 桁以上大きいことは，電流注入方式に改善の余地が残されていることを示唆している．

Si ナノ構造への電流注入を考えるうえで，その表面状態が重要になると思われる．シリコンの表面は酸化されやすく，表面には酸化膜（SiO_2）が形成される．たとえば，単純にシリコンのサイズをすべての方向に小さくした量子ドットを考えると，その周囲はすべて酸化膜で覆われてしまう．酸化膜はバンドギャップ（8〜9 eV）の大きい絶縁体であるため，Si 量子ドットへのキャリヤー注入はトンネルを介した非効率的なものになる．つまり，シリコンを発光させるためには，低次元閉じ込め構造が必要となるが，閉じ込め構造を形成するとキャリヤーも注入しにくくなるというジレンマがある．筆者らは，このジレンマを解消するため，量子井戸構造に直接電極が接続されているデバイス構造を考案し，水平方向への電流注入によって発光現象を確認したので報告する．

1.　量子閉じ込め効果

Canham によって陽極酸化したポーラス Si[1] の可視発

（株）日立製作所中央研究所（〒185-8601 国分寺市東恋ケ窪 1-280）　E-mail: shinichi.saito.qt@hitachi.com

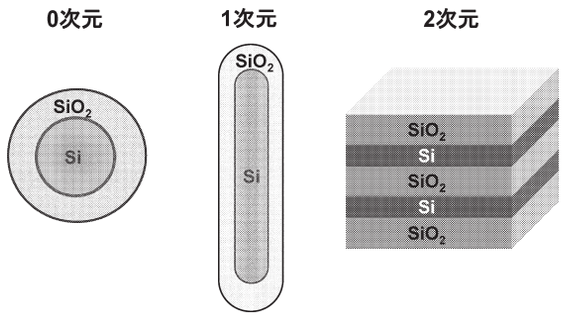

図1　量子閉じ込め効果によって発光が期待できる低次元シリコン構造の例．量子ドット（ゼロ次元），ナノワイヤー（一次元），および，量子井戸超格子（二次元）のいずれにおいても，シリコンの表面は二酸化シリコンによって被覆されている．

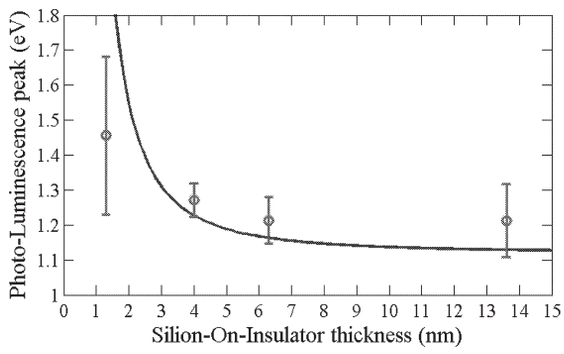

図2　量子閉じ込め効果によるバンドギャップの上昇．極薄単結晶シリコン層の膜厚ばらつきが大きいため，エラーバーが大きくなっている．実線は有効質量近似による計算結果[8]．

光が報告された際にも，その発光機構は量子閉じ込め効果と推定された[1,2]．しかし，何をもって量子閉じ込め効果とよぶかは必ずしも明確ではない．広義にとらえれば，図1に示したような低次元ナノ構造で生じる現象をすべて量子閉じ込め効果とよべそうであるが，これでは，どのような条件でシリコンが効率よく発光するのか明確でない．ここで問題にしている条件とは，ナノ構造体の具体的大きさのスケール，結晶の面方位，表面の原子状態，など系が単純にもかかわらず枚挙にいとまがない．そこで，より具体的な構造を想定したバンド計算が行われた．なかでも，Si（100）方向へ伸びた一次元ナノワイヤー[5]や，Si（100）を表面とする二次元の単結晶薄膜[6]では，バンド構造が直接遷移型になることが報告されており，サイズを小さくするにつれて振動子強度が指数関数的に増大することが示されている．実際，silicon-on-insulator (SOI) 基板を酸化して薄膜化すると，膜厚を薄くするほど発光強度が増大し[7–9]，同時に，PL の発光のピーク波長が高エネルギー側にブルーシフトし，量子閉じ込め効果による実効的バンドギャップの増大が確認された（図2）．これは，Si(100) を表面の面方位として薄膜化すると，バルクでは六重縮退だった伝導帯の谷のうち2つが Γ 点に射影されることで理解できる[8]．(111) や (110) などの面では，伝導帯の谷底は Γ 点に射影されないため，効率よい発光が期待できない[8]．

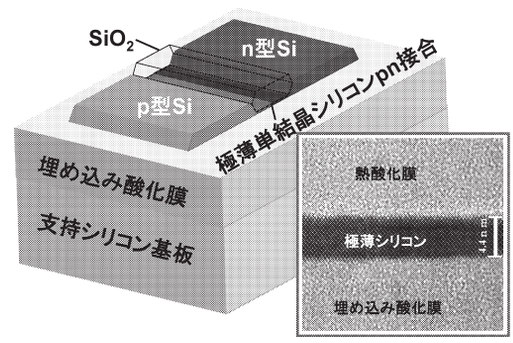

図3　極薄シリコン発光ダイオードの模式図．透過型顕微鏡による断面写真によると，素子作製後も単結晶シリコンの結晶構造が保持されている．

2.　極薄膜 Si への水平直接電流注入

提案デバイス構造を図3に示す[8,9]．デバイスの幅は100 μm であり，長さは10 μm である．発光層となる極薄 SOI の膜厚は，最も薄いもので4.4 nm である．SOI 層の薄膜化には局所酸化法を用いた．これは通常の LSI 工程では素子分離に用いられる方法であり，薄膜化しない部分にあらかじめシリコン窒化膜をフォトリソグラフィーとドライエッチングによってパターニングし，シリコン窒化膜に覆われていない部分を選択的に酸化する技術である．熱酸化プロセスというシリコンプロセスで最も制御性が高いプロセスのひとつを用いることによって，シリコンがすべて消費される寸前まで制御してシリコンを酸化し，シリコン極薄膜を形成した．薄膜化していない部分には高濃度に不純物が注入された拡散層電極を形成し，シリコン薄膜に直接電流注入できる構造を作製した．

3.　発 光 特 性

電流注入による発光の様子を図4に示す．この観測に用いた素子の極薄シリコン膜厚は8.9 nm であり，素子に印加した順方向電圧 V_{pn} は3.5 V とした．発光像によると，極薄シリコンからの発光強度が強く，SOI 層の膜厚の厚い領域からの発光はほとんどないことがわかる．これは，バルクシリコンでは発光強度がきわめて弱く，極薄シリコンにすると発光強度が強くなることから理解できる．実際，発光によって CCD が観測した光子の数をカウントしたところ，極薄シリコンからの発光強度は厚いシリコンからの発光と比べて数桁大きいことが明らかになった．また，フィルターを入れて発光の分光をしてみたところ，波

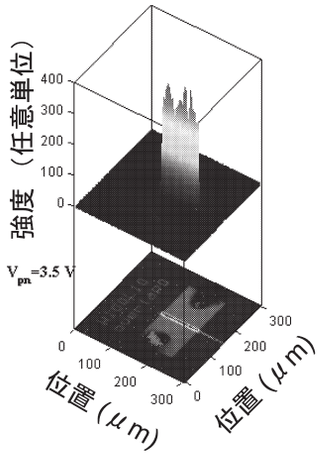

図4　極薄シリコン発光ダイオードからの電流注入発光の様子．中央の極薄シリコン部からのみ発光し，厚いシリコン電極からの発光は観測できない．

長が約1000 nm付近での発光強度が最も高く，波長500 nm付近ではほとんど発光が存在しないことも明らかになった．これは，発光が極薄シリコンのバンドギャップに起因した再結合による発光であり，運動エネルギーの大きいホットエレクトロンなどの輻射による発光ではないことを示している．

単結晶シリコンのサイズを部分的に制限することによって，量子閉じ込め効果を出現させつつ，酸化膜を介さずに直接電流注入可能な構造について紹介した．提案したデバイス構造は平面構造であるため，通常のシリコンプロセスを用いた加工を施すことができる．また，CMOS（complementary metal-oxide-semiconductor）との混載も容易である．ただし，発光機構のより正確な解明，高速応答の可否や電流注入型シリコンレーザー実現の可能性など，研究課題は山積している．

文　　献

1) L. T. Canham: “Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers,” Appl. Phys. Lett., **57** (1990) 1046-1048.
2) L. Pavesi and D. J. Lockwood (eds.): *Silicon Photonics. Topics in Applied Physics 94* (Springer, Berlin, 2004).
3) B. Gelloz and N. Koshida: “Electroluminescence with high and stable quantum efficiency and low threshold voltage from anodically oxidized thin porous silicon diode,” J. Appl. Phys., **88** (2000) 4319-4324.
4) B. Gelloz, A. Kohima and N. Koshida: “Highly efficient and stable luminescence of nanocrystalline porous silicon treated by high-pressure water vapor annealing,” Appl. Phys. Lett., **87** (2005) 031107.
5) T. Ohno, K. Shiraishi and T. Ogawa: “Intrinsic origin of visible light emission from silicon quantum wires: Electronic structure and geometrically restricted exciton,” Phys. Rev. Lett., **69** (1992) 2400-2403.
6) M. Nishida: “Theoretical study of luminescence enhancement in oxidized Si(001) ultrathin film,” Phys. Rev. B, **58** (1998) 7103-7112.
7) Y. Takahashi, T. Furuta, Y. Ono, T. Ishiyama and M. Tabe: “Photoluminescence from a silicon quantum well formed on separation by implanted oxygen substrate,” Jpn. J. Appl. Phys., **34** (1995) 950-954.
8) S. Saito, D. Hisamoto, H. Shimizu, H. Hamamura, R. Tsuchiya, Y. Matsui, T. Mine, T. Arai, N. Sugii, K. Torii, S. Kimura and T. Onai: “Electro-luminescence from ultra-thin silicon,” Jpn. J. Appl. Phys., **45** (2006) L679-L682.
9) S. Saito, D. Hisamoto, H. Shimizu, H. Hamamura, R. Tsuchiya, Y. Matsui, T. Mine, T. Arai, N. Sugii, K. Torii, S. Kimura and T. Onai: “Silicon light-emitting transistor for on-chip optical interconnection,” Appl. Phys. Lett., **89** (2006) 163504.

(2007年8月8日受理)