半導体ナノワイヤを用いた シリコン基板上発光素子に関する研究

Light Emitting Devices Using Nanowires Formed on Si Substrates

H24助自68

代表研究者 本 久 順 一 北海道大学 大学院情報科学研究科 情報エレクトロニクス専攻 教授
Junichi Motohisa Professor, Division of Electronics for Informatics,
Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

We investigated the design and growth of nanowires (NWs) to realize highly-efficient light emitters having large Q-factors on Si substrates. To find a design principle for NWs with large Q-factors, resonance wavelength in finite-length NWs was calculated using finite-difference time-domain (FDTD) simulation. It was confirmed that the NWs could exhibit cavity modes with very large Q-factors. It was also found that the resonance wavelength followed the propagation constant $\beta(\lambda)$ in a NW with infinite length, and the cavity mode was understood by the hybridized one of whispering gallery modes in a cylinder and longitudinal modes of a Fabry-Perot cavity. This enable us to predict the required size of NWs for a given wavelength, and diameter about 700 nm was obtained for GaAs NWs with resonance wavelength $\sim 850\text{nm}$. To facilitate the formation of thick nanowires on Si substrates, we proposed the two-step growth of NWs in selective-area metal-organic vapor phase epitaxy (SA-MOVPE), where a vertical growth of NWs was applied as a first step on the substrates partially covered with SiO_2 mask, followed by the lateral growth to enlarge the diameter of NWs. The control of the growth direction was achieved by manipulating the growth conditions. By investigating the characteristics of the lateral growth, GaAs NWs with diameter larger than 700nm was successfully grown by SA-MOVPE. The photoluminescence measurement was performed on grown NWs and it was found that the emission intensity of thicker NWs after lateral growth was much stronger than that before the lateral growth. The enhancement of the emission intensity is much larger than the increment of the volume of NWs. Moreover, the thicker NWs exhibited multiple PL peaks, which suggested the formation of cavity modes with sufficiently large Q-factors. Strong emission of InGaAs quantum well in core-shell heterostructure nanowires was also confirmed.

研究目的

様々な光素子をシリコン基板上で形成し、それらによる光集積回路やCMOS集積回路技術との融合を図るシリコンフォトニクスは近年脚光を浴びているテーマの1つである。これまで既に細線導波路や、受光素子、光変調器な

ど、数多くの光素子がSiによって実現されてきたが、最大の問題点は発光素子にある。これまでもSi基板上に発光素子を実現する手法は多く報告・提案されているが、これらのうちIII-V族化合物半導体をSi基板上に成長する方法は、大量生産に向けており今後チップ内部での光配線などでは特に有力な手法となると考

えられる。しかし、一般にSiとIII-V族化合物半導体とは格子定数および熱膨張定数の差が大きく、また非極性の材料に極性の材料を形成するという問題もあり、高品質のIII-V化合物半導体の形成が非常に困難である。この問題点を回避するため、研究代表者は半導体ナノワイヤに着目した。半導体ナノワイヤは断面寸法が数10nmから数100nmの微細な細線状の半導体結晶であり、断面寸法の微小さのため、格子定数のミスマッチの影響を受けずに良好な結晶品質のナノワイヤが形成可能である。これまでも研究代表者のグループは、有機金属成長(MOVPE)法による選択成長によってSi基板上にInAsおよびGaAsナノワイヤの形成に成功しており、さらにInAs系については縦型トランジスタ、GaAs系に関してはコアシェル型ヘテロ構造を利用した発光ダイオード(LED)の作製にも成功している。また成長方向を適切に制御することによって、コアシェルヘテロ構造(図1)など様々な半導体ヘテロ構造を含むナノワイヤの形成に成功している。しかしナノワイヤでは1発光素子あたりの電流を小さくすることは可能であるが、単純な微細化では表面非発光再結合による損失が重大な問題となり、また、一般には共振器体積を小さくすると損失も増大する(Q値が減少する)ため、単純な微細化のみでは高効率な発光素子を実現するのは不可能であり、逆にある程度の寸法が必要となる。本研究では、Si基板上に形成した半導体ナノワイヤを用いた発光素子、特にレーザーを実現することを最終的な目的として、特に、結晶品質を維持しつつ最適な共振器構造を設計・実現することを目的とする。

概要

様々な光素子をシリコン基板上で形成し、それらによる光集積回路やCMOS集積回路技

術との融合を図るシリコンフォトニクスは近年脚光を浴びているテーマの1つであり、そこでの問題点の一つはシリコン基板上に発光素子を実現することである。その方法の1つとして、III-V族化合物半導体をSi基板上に成長する方法があるが、両者の材料的性質が異なるため高品質の薄膜構造の形成が非常に困難となっている。この問題点を回避するため、研究代表者は格子定数のミスマッチの影響を受けずに良好な結晶品質の構造が可能なナノワイヤを利用し、Si基板上にInAsおよびGaAsナノワイヤやそれを利用した縦型トランジスタや発光ダイオードの形成に成功している。本研究ではそのようなナノワイヤの利点を活かしつつ、高効率の発光素子、特にSi基板上のレーザーの実現に向け、最適な共振器構造を設計・実現することを目的として研究を行った。まず、大きな共振器Q値を実現するために必要なナノワイヤの断面寸法を得るための指針を明らかにするため、時間領域有限差分法を用いて電磁場解析を行い、共振器の共振波長が、ナノワイヤを導波路として考えた場合の伝搬定数を波数として考えたファブリペロ共振器的な共振モードとして定まることを明らかにした。この結果をもとに、与えられた目的波長と、必要なナノワイヤの寸法との関係を導くとともに、実際にナノワイヤ共振器が高いQ値を持ちうることをシミュレーションにより確認した。そして、有機金属気相選択成長法を用いた2段階成長、すなわち最初の成長で縦方向に長く直径の小さなナノワイヤを成長した後、成長条件を変化させてナノワイヤを横方向成長させることにより、目的のサイズと合致する断面寸法の大きなナノワイヤを形成することに成功した。そのナノワイヤを低温顕微フォトルミネセンス測定により評価したところ、横方向成長前の試料と比較し、横方向成長させたナノワイヤでは発光強度

が著しく増加し、これは非発光性再結合の寄与が減少したことに加えて、共振器モードが明瞭となって発光強度が増加したことによると考えられる。また、コアシェル型ヘテロ構造ナノワイヤの形成とその発光特性の評価を行い、品質の良好なナノワイヤを得る見通しを得た。

－以下割愛－