

鉄シリサイド・フォトニック結晶

Iron-Silicides Photonic Crystals

前田 佳均

Yoshihito Maeda

京都大学大学院エネルギー科学研究科

Department of Energy science and technology, Kyoto University

One of typical advantages of semiconducting iron silicides may be that they have a high refractive index. We have paid attention at this point and made some efforts to study on fabrication of iron-silicides, specially β -FeSi₂, photonic crystals (PhCs) and on analysis of light propagating properties on them. Most recently we succeeded in fabrication of PhCs and demonstration of their properties. In this article, we would introduce basic properties of iron-silicide PhCs and some recent topics.

1. はじめに

これまでフォトニクスは III-V 族化合物半導体を中心に応用されてきたが、ヒ素を多用する環境への懸念、またヒ素、インジウムなど資源枯渇の問題が生まれ、それに変わり得るあたらしい半導体が必要になる。シリコン・フォトニクスを展開するための条件:環境への負荷が少ない元素であり、元素戦略上でも資源的に枯渇の心配が無い元素によって構成された光半導体がシリコン集積回路に組み合わされたときに集積回路の信号遅延、消費電力の低減などボトルネックが解消される第一歩になる。電子機器および高度情報通信機器は省電力性能や環境負荷を評価しながら、その構成要素(材料や回路など)を開発または設計することが常識化しつつある。本グループでは、環境調和型エレクトロニクス材料および省エネルギー機能素子を目指して、砒素など環境為害性元素を含まない環境調和型シリサイド・フォトニクスの開発を目標に研究を行ってきた。

現在、精力的に研究が進められているフォトニック結晶は、フォトニックバンドとそのバンドギャップを基本原理した光の波長程度の構造体で、光波の伝播を自由自在に制御できる究極の光回路を実現することができる。現在、各種の材料を用いて、光導波路、光源、高効率レーザ、演算素子など開発が進められている。われわれは、 β -FeSi₂ の屈折率が半導体中でも最大であることに着目し、それを用いたフォトニック結晶の作製プロセスとその特性の検討を行ってきた。一般にフォトニック結晶の特性は構成材料(空気を含む)の屈折率差(光学的コントラスト)によって支配される。Fig.1 に β -FeSi₂ ($n=5.6$)と GaAs ($n=3.36$)フォトニック結晶の充填率(r/a)に対する最大ギャップ-中間ギャップ比($\Delta\omega/\omega_0$)の関係を示す。この結果から明らかなように、いずれの充填率においても高屈折率の β -FeSi₂の方が GaAs よりも大きな ($\Delta\omega/\omega_0$) 比になる。フォトニック結晶の機能はバンドギャップの大小に支配されているために β -FeSi₂ は他の材料に比べてかなり有利であることがわかる。屈折率差が 2.0 以上であるフォトニック結晶を高屈折コントラスト・

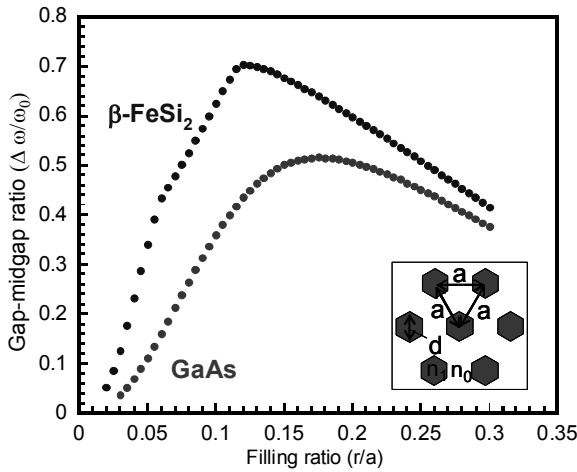


Fig.1 Gap-midgap ratio ($\Delta\omega/\omega_0$) calculated as a function of filling ratio (r/a) for both photonic crystal triangular lattices with semiconductor $\beta\text{-FeSi}_2$ ($n=5.6$) and GaAs ($n=3.36$) hexagonal columns in air ($n=1.0$).

The radius of the column $r = \sqrt{3} d/4$.

フォトニック結晶といい、バンドギャップが広く取れるために光波の制御が容易になる、光回路を縮小化できるなど優れた特性があることも我々の本研究において明らかにしている[1].

2. 鉄シリサイドのサブミクロン加工

鉄シリサイドはシリコンのサブミクロン加工で用いる SF_6 などエッチングガスによっては、ドライエッチングしにくい材料である。そこで、本研究では、鉄シリサイドのエッチングメカニズムを検討し、低圧での磁気中性放電 (NLD) プラズマによるサブミクロンのイオンエッチングプロセスを開発した。高密度プラズマによって、エッチングの進行を阻止している表面の鉄原子を衝撃プロセスによって物理的にエッチングすることによってフッ素ラジカル種によるシリコン原子の化学的エッチングと並行させることができる[2-5].

Fig.2 に各種シリサイドのエッチング速度とリフトオフプロセスで使用する Cr マスクとの選択比を示す。 $\beta\text{-FeSi}_2$ は問題なく SF_6 基ガスでエッチングでき、リフトオフによるパターン形成が可能であるが、鉄組成の大きな強磁性体 Fe_3Si はいずれも不可能であることが分かる。したがって、強磁性体 Fe_3Si フォトニック結晶にはエッチング以外のパターン形成技術の検討が必要である[2, 6].

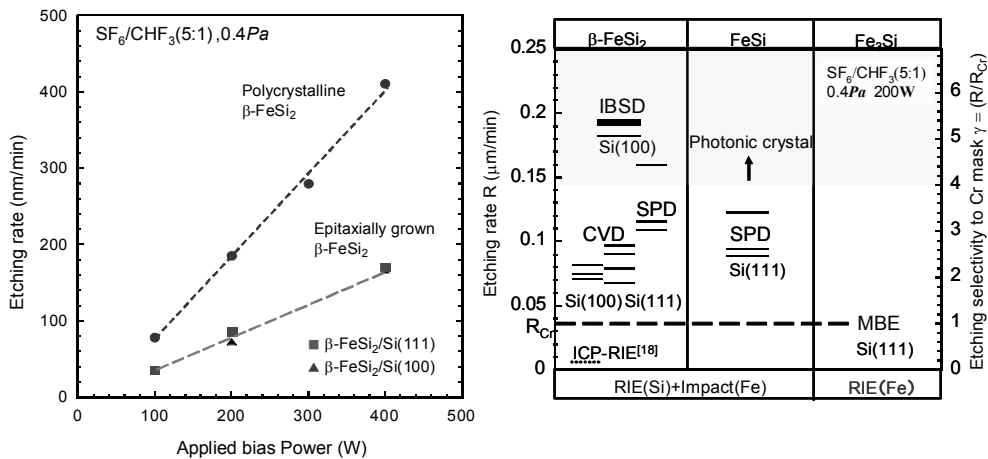


Fig.2 Etching properties of Fe-silicides films by a NLD-RIE process using a SF_6 plasma.

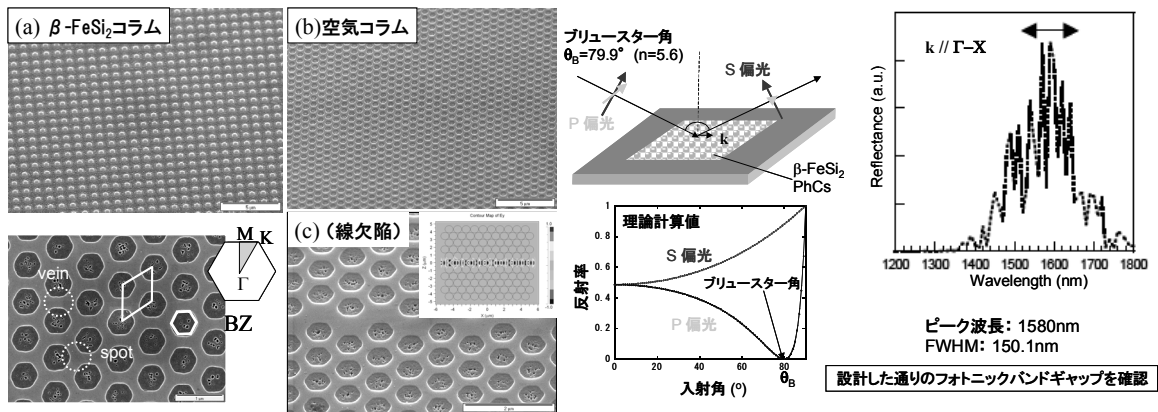


Fig. 3(left) SEM images for photonic crystals with (a) β -FeSi₂ and (b) air columns. Their lattices show (a) a square lattice and (b) triangular one, respectively. The image (c) shows linear defect which can play an optical waveguide as demonstrated in light propagation shown in the inset. The right figure of Fig.3 shows examination of a bandgap of photonic crystal by measuring a reflectance spectrum of a p-polarized light near incidence of the Brewster angle.

Fig.3 (左図) に作製した β -FeSi₂ : 2次元フォトニック結晶のSEM写真を示す. これらは通常の電子線描画, SF₆+CHF₃ 混合ガスによるエッチング, Crマスクによるリフトオフプロセスで作製された. 右図の偏光反射スペクトル (極大波長がフォトニックバンドギャップに対応する) に示すように初期に設定したフォトニック結晶の光学的特性に影響ない精度でサブミクロンパターン形成が可能であることを示せた.

3. 高次構造の作製

さらに高次のフォトニックバンド構造を作製するために色々な工夫が必要である. そのような目的で作製した様々なシリコン・テンプレートパターンを Fig.4 に示す. こうしたサブミクロンテンプレートパターン上に各種のシリサイド半導体, シリサイド強磁性体 (特にホイスラー合金: ハーフメタリック) を成膜して, エッチングを繰り返すことであたい機能性 (半導体量子ドット, プラズモン素子, 強磁性周期構造) を形成することが可能になる. エッチングの困難な強磁性体 Fe₃Si のフォトニック結晶パターンの作製にはこうしたテンプレート上への成膜とセルフ・リフトオフプロセス[6]が用いられている.

また, 一例として光のアンダーソン(Anderson)局在であるジョン(John)局在が期待できるランダムフォトニック結晶を β -FeSi₂/シリコン基板に上述したサブミクロンプロセスで作製した例を Fig.5 に示した. 表面は β -FeSi₂ のサブミクロンの非周期構造が実現できた. 光波は屈折率の大きい β -FeSi₂ ランダム表面層に閉じ込められ, その非周期性によって強い領域での光の局在が起こる. 光波の強い局在は電磁エネルギーの集中を意味するので, 外部からのエネルギーの供給の必要がなく, β -FeSi₂ の電子系との相互作用のみによる強い輻射や屈折率変調など演算の基本になる機能が期待されている.

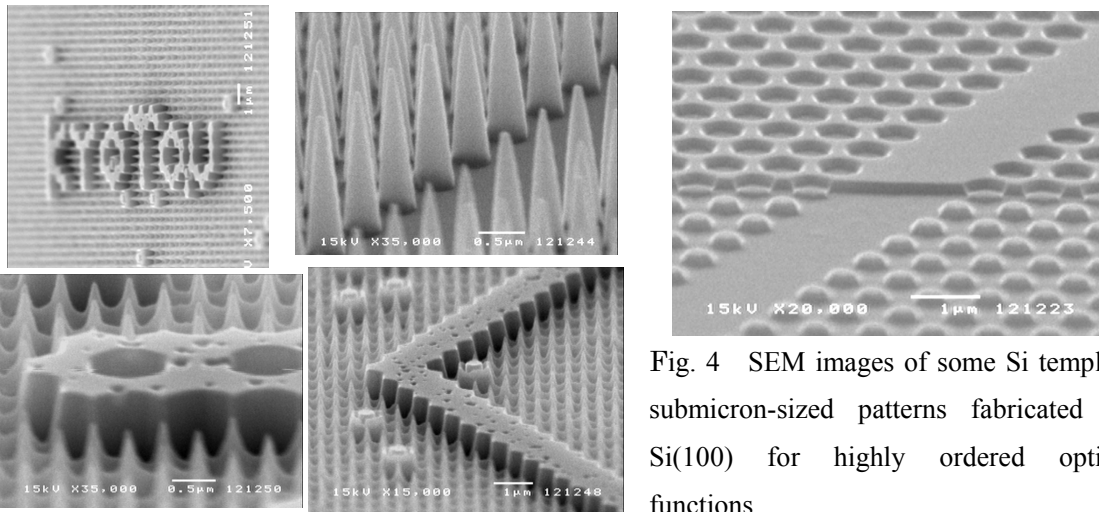


Fig. 4 SEM images of some Si template submicron-sized patterns fabricated on Si(100) for highly ordered optical functions.

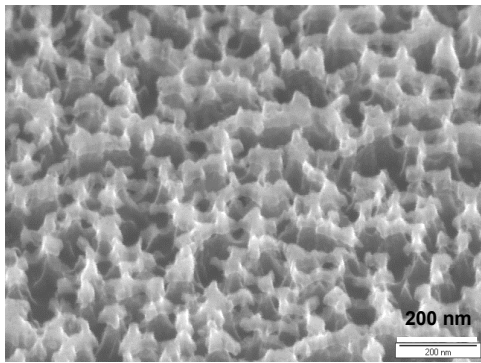


Fig. 5 SEM image of submicron random photonic patterns fabrication on β -FeSi₂/Si(100), in which *John localization* (that is *Anderson localization of light*) can be expected to takes place. The reflectance spectrum showed the minimum in a specific range of wavelength.

4. 共役反転格子パターン

屈折率差の大きなフォトニック結晶では光導波路の界面反射損失が大きく、これを避けるために屈折率の傾斜的構造による位相整合など導波路の構造が複雑になる欠点があった。そこで、共役反転格子による反射損失の大幅な低減を検討した。共役反転格子(*conjugated inversion lattices*)とは、Fig.6の例に示すように高・低屈折率材料(β -FeSi₂と空気)格子パターンが反転し、かつフォトニックバンド・ギャップ領域を共有する構造として定義できる。これは前田によって屈折率差の大きな光導波路界面での高効率入射光学系として初めて提案された。コラム幅 $w=0.87\mu\text{m}$ では、

周波数($\omega a/2\pi c=a/\lambda$)= 0.325~0.335, 0.42~0.44 の領域でバンド・ギャップが共有されている。

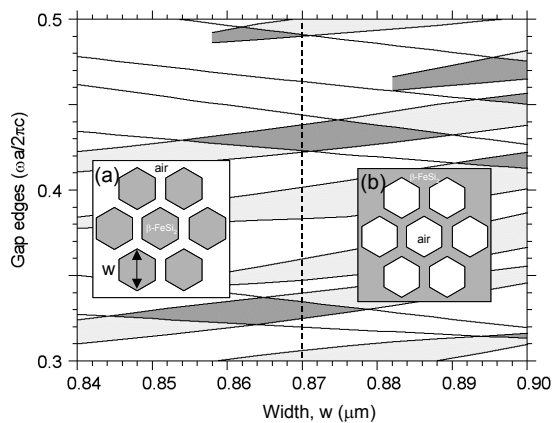


Fig.6 Gap maps for both photonic crystals with (a) β -FeSi₂ columns in air and (b) air ones in a β -FeSi₂ matrix. They have conjugated inversion lattice patterns which can join the common gap regions (darkly painted) at the column width, $w=0.87\mu\text{m}$.

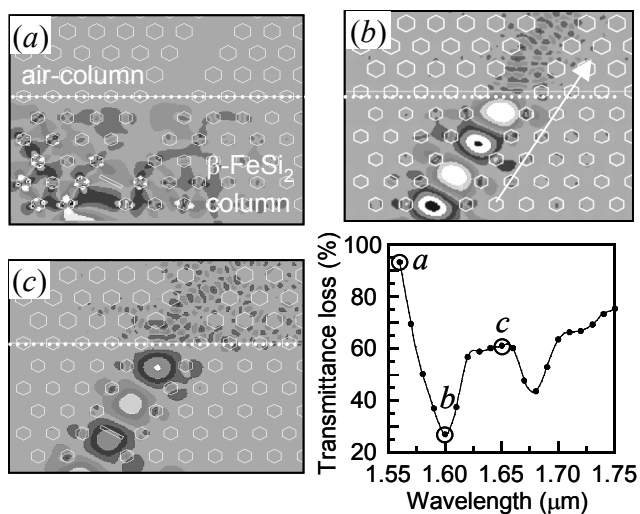


Fig.7 Simulation of propagation of a TE polarized light along waveguides fabricated in both lattices with β -FeSi₂ and air columns which have conjugated inversion symmetric structures. The transmittance loss spectrum shows the minimum loss in the case of (b), set at the conjugated inversion symmetry.

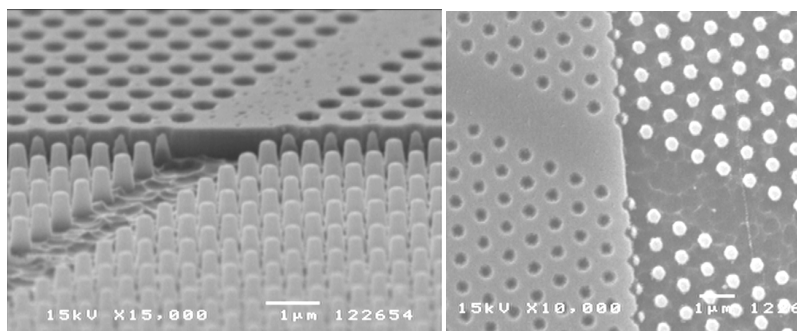


Fig.8 SEM images of an interface with the typical conjugated inversion symmetry (example).

Fig.7 に共役反転界面での光伝搬挙動を時間領域有限差分法でシミュレーションした例を示す。この共役反転条件では波長 1.6μm で空気導波路から高屈折率 β -FeSi₂ 導波路への透過損失(=100-透過率)は極小になり、光の導波効率向上に共役反転界面は効果的であることが分かった。Fig.8 に実際に作製した共役反転格子をもつフォトニック結晶導波路(1次欠陥)の界面部の SEM 写真を示す。本研究で開発したシリサイド・ドライエッチングプロセスで精度の良い加工が可能であり、共役反転格子が界面で実現してきることが分かる。

謝辞

本研究は科学研究補助金 No. 17360011 の支援によって行われた。共同研究でお世話になりました神奈川産業技術センターの秋山賢輔氏、大阪大学の寺井慶和氏、シリサイドエッチングプロセスの研究に精力的に取り組んだ今井章文氏(現、三菱電機)に感謝いたします。

[1]前田佳均: 機能材料 25 巻/第 10 号, 5-14(2005).

[2]國松俊佑ら: 電子情報通信学会技術研究報告. ED, 電子デバイス Vol.106, No.378, pp. 7-10 (ED2006-177) 2006.

[3]A. Imai et al.: Proc. of 16th International Microscopy Congress, Sep. 3-8, 2006, Sapporo.

[4]Y. Maeda: Thin Solid Films, (to be published in Aug. 2007).

[5] A. Imai et al.: Thin Solid Films, (to be published in Aug. 2007).

[6] A. Imai et al.: Materials Science and Technol. B (in press).