

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	p型ナノ結晶3C-SiC:Hエミッタを用いたヘテロ接合型結晶Si太陽電池に関する研究
Title(English)	Study of heterojunction crystalline silicon solar cells using p-type nanocrystalline cubic silicon carbide emitter
著者(和文)	浜下大輔
Author(English)	Daisuke Hamashita
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9457号, 授与年月日:2014年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小長井 誠,岩本 光正,山田 明,中川 茂樹,宮島 晋介,田中 誠
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9457号, Conferred date:2014/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	電子物理工学	専攻	申請学位 (専攻分野)： 博士 (工学)
学生氏名： Student's Name	浜下 大輔		指導教員 (主)： 小長井 誠
			指導教員 (副)：
			Academic Advisor(sub)

### 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

近年、化石燃料の燃焼により引き起こされる環境及び資源問題に世界の注目が集まっている。特に日本では、2011年3月に発生した東日本大震災によりほとんどの原子力発電所が現在も停止しており、エネルギー需給に問題が生じている。このような状況において、2012年7月から開始された再生可能エネルギー固定買取制度を背景に様々な自然エネルギー、特に太陽光発電の急速な導入が進んでいる。その中でも、結晶 Si 太陽電池は太陽電池市場の 90%程度を占めており、今後もその優位性が続くと思われる。また、将来的に太陽光発電においてグリッドパリティを実現するためには、高効率化及び低コスト化の両立が不可欠である。

現在、結晶 Si 太陽電池において市場の大部分を占めているのは p 型 Si 基板であるが、バルクの品質に起因したキャリアライフタイムの低下が問題となっている。これに対し、n 型 Si 基板は光劣化及びキャリアライフタイムの低下に繋がる B-O 複合体が少ないため、更なる高効率化が見込める。また、低コスト化には薄型 Si 基板の利用が有効であり、プロセス温度が比較的低温であるプラズマ CVD を用いたヘテロ接合の形成により高効率化も可能である。しかし、光入射側に存在する p 型エミッタ内部での光吸収損失が短絡電流及び変換効率を妨げている。そこで、バンドギャップ 2.2eV かつ低い光吸収係数を有する水素化ナノ結晶立方晶シリコンカーバイド (nc-3C-SiC:H) に着目し、ドーピング制御を行うことで p 型エミッタとして太陽電池へ応用することを検討した。

この材料は既存の材料と比べてバンドギャップが大きいことから、太陽電池へ応用する上で界面でのバンドオフセットにより少数キャリアである正孔の輸送を妨げ、曲線因子を低下させる恐れがある。そこで、p 型 nc-3C-SiC:H エミッタを用いた際に太陽電池特性へ与える影響について、シミュレーションを行なった。その結果、p 型 nc-3C-SiC:H のキャリア濃度の向上、及びパッシベーション膜のバンドギャップの低減 (<1.93eV) を両立させることで、正孔の輸送を妨げることなく変換効率の更なる向上が達成可能であることを明らかにした。

続いて、不純物混入の少ない超高周波プラズマ CVD 法を用いて p 型 nc-3C-SiC:H 薄膜 (< 30 nm) を作製し、電気的・光学的特性の改善を試みた。その結果、特に高い水素希釈比・プラズマ投入電力・製膜圧力において品質の高い結晶が作製され、電気的・光学的特性を大きく改善することに成功した。また、光学的に評価することが困難であった p 型ナノ結晶 3C-SiC:H 薄膜の結晶性評価において、Conductive-AFM 法を新たに提案し、測定を行なった。その結果、アモルファス成分とナノ結晶成分の電気特性の差を利用して結晶化率を推定することに成功した。

ところが、高い電気的特性を有する p 型 nc-3C-SiC:H を用いて太陽電池を作製したところ、製膜時に発生する多量の原子状水素により界面特性が大きく劣化し、開放電圧が 300mV と従来の半分程度に制限されてしまうことが判明した。そこで、原子状水素によるエッチング耐性があるアモルファスシリコンカーバイド (a-Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>:H) をパッシベーション膜として応用することを目指した。その結果、炭素含有量 3 - 6%にて界面欠陥密度を大きく低減することに成功し、膜厚 5 nm においても表面再結合速度 6.8 cm/s を達成した。この結果は、a-Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>:H 薄膜が高いパッシベーション効果を有していることを示している。

最後に、上記の p 型エミッタ及びパッシベーション膜をヘテロ接合 n 型結晶 Si 太陽電池に応用した。その結果、p 層の電気的特性の向上により曲線因子を改善することに成功した。特に、p 層の製膜速度向上及びパッシベーション膜の膜厚増加により、p 層製膜時に発生する原子状水素によるエッチングの影響を抑制出来ることを明らかにした。この結果、パッシベーション膜の挿入前後において、開放電圧を 302mV から 648mV へと飛躍的に向上させることに成功した。更に、400-600nm の短波長域において、従来の p 型アモルファスシリコンを超える内部量子効率が得られることをデバイスレベルで実証することに成功した。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻 : Department of	電子物理工学	専攻	申請学位 (専攻分野) : Academic Degree Requested	博士 (工学)
学生氏名 : Student's Name	浜下 大輔		指導教員 (主) : Academic Advisor(main)	小長井 誠
			指導教員 (副) : Academic Advisor(sub)	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

A heterojunction crystalline silicon (c-Si) solar cell is one of the promising structures with high conversion efficiency. However, there is a serious problem of light absorption loss in the wavelength range from 400 to 600 nm in a heterojunction emitter of p-type hydrogenated amorphous silicon. This thesis focuses on the application of the p-type hydrogenated nanocrystalline cubic silicon carbide (nc-3C-SiC:H) with more excellent electrical and optical properties to a heterojunction emitter of n-type c-Si solar cell. This is the first report to fabricate the p-type nc-3C-SiC:H/ n-type c-Si heterojunction solar cells with i-type hydrogenated Si-rich amorphous silicon carbide (a-Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>:H) passivation layer by very high frequency plasma enhanced chemical vapor deposition (VHF-PECVD).

In order to investigate the effect of p-type emitter with wider bandgap, a simulation model for an heterojunction n-type c-Si solar cell using an p-type nc-3C-SiC:H emitter was developed. Using this model, it was found that these parameters affect valence band offset and electrical field at p/n interface, which is critical for hole carrier transportation. According to these results, Al-doped p-type nc-3C-SiC:H thin films were deposited by VHF-PECVD at a low substrate temperature less than 400 °C. A high dark conductivity of  $5.7 \times 10^{-3}$  S/cm was obtained for 27-nm-thick film by improving the crystalline volume fraction and carrier activation of the films with high H<sub>2</sub>/MMS ratio. However, there is a serious problem that the Si surface is unintentionally etched by atomic hydrogen before the deposition, and then, the  $V_{oc}$  of a c-Si solar cell was limited. In order to solve this problem, a-Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>:H was inserted as a protective layer with high passivation effect and durability for atomic hydrogen etching. After inserting the i-a-Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>:H layer between p-type nc-3C-SiC:H and n-type c-Si, the  $V_{oc}$  and conversion efficiency of a c-Si heterojunction solar cell were improved from 302 mV to 648 mV and from 6.88 % to 17.0 %, respectively. A high internal quantum efficiency of 0.87 at a wavelength of 400 nm was also achieved with an optimum i-a-Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>:H layer thickness.

備考 : 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).