

## SiC結晶を用いたパラメトリックX線放射源の放射収量に関する研究

## Study on the Radiation Yield of Parametric X-ray Sources Using SiC Crystals

○王智豪<sup>1</sup>, 早川恭史<sup>2</sup>, 高橋由美子<sup>3</sup>, 境武志<sup>2</sup>\*Zhihao Wang<sup>1</sup>, Yasushi Hayakawa<sup>2</sup>, Yumiko Takahashi<sup>3</sup>, Takeshi Sakai<sup>2</sup>

Abstract : The radiation yields of parametric X-ray radiation (PXR) from 3C-SiC, and 4H-SiC crystals were investigated by numerical simulation. While Si crystals have been employed as the PXR radiator of the practical PXR source at Nihon University, it is prone to thermal damage under intense electron-beam irradiation. Since SiC crystals have high heat resistance, they are one of the promising candidates of future PXR radiators. The theoretical calculations show that the PXR yield using 4H-SiC(004) is superior to the yield using Si or 3C-SiC crystals. The results suggest the possibility of compact and durable PXR sources utilizing SiC crystals.

## 1. パラメトリックX線放射

パラメトリックX線放射(PXR:Parametric X-ray Radiation)は、相対論的荷電粒子が結晶内を通過する際に、結晶内周期ポテンシャルとの相互作用で発生するコヒーレント放射である。発生するX線のエネルギーが用いる結晶の面間隔と、電子速度と結晶面の角度で決まり、電子エネルギーに依存しないという特徴がある。本研究では、PXRの放射源として3C-SiC(立方晶系)、および4H-SiC(六方晶系)を用いた際のPXR特性を理論計算で調べた。これらの結晶は、格子定数や構造因子の違いにより回折条件が異なり、放射強度やX線エネルギーに差異を示すことが期待される。

## 2. PXRが従う運動学と光子収量の空間分布

PXRという現象において次のようなエネルギー・運動量保存則が成り立ち[1],

$$E = E' + \hbar\omega \quad \mathbf{p} + \hbar\mathbf{g} = \mathbf{p}' + \frac{\hbar\omega}{c}\boldsymbol{\Omega} \quad (1)$$

となる。ここで $E, E', \mathbf{p}, \mathbf{p}'$ はそれぞれ散乱前後の電子エネルギーと運動量、 $\hbar\omega$ は放出されるPXRのエネルギーである。PXRのエネルギーは、 $\frac{\hbar\omega}{c} \ll |\mathbf{p}|$ の場合には近似的に

$$E = \hbar\omega \approx \hbar \left( \frac{\omega}{c} \boldsymbol{\Omega} - \mathbf{g} \right) \cdot \frac{\mathbf{p}c^2}{E} = \frac{\hbar c |\mathbf{g} \cdot \mathbf{v}|}{c - \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\Omega}} = \frac{\hbar c}{2d \sin \theta} \quad (2)$$

となる[1]。ここで $\mathbf{v}$ は入射電子の速度であり、 $\mathbf{g}$ と $\boldsymbol{\Omega}$ は逆格子ベクトルと放射方向の単位ベクトルである。また、 $d = 2\pi/|\mathbf{g}|$ で、 $\theta$ は $\mathbf{v}$ と $\mathbf{g}$ のなす角である。方向 $\boldsymbol{\Omega}$ にPXRが放出される微分断面積は、

$$\frac{dN}{d\boldsymbol{\Omega}} = \sum_{|\mathbf{g}| \neq 0} \frac{e^2 \omega L |\chi(\omega)|^2}{2\pi \hbar \varepsilon^3 \mathbf{v} (c - \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\Omega})} \times \frac{\left| \frac{\omega}{c} \boldsymbol{\Omega} \times \left( \frac{\omega}{c^2} \mathbf{v} + \mathbf{g} \right) \right|^2}{\left\{ \left| \frac{\omega}{c} \boldsymbol{\Omega}_\perp - \mathbf{g}_\perp \right|^2 - \left( \frac{\omega}{v} \right)^2 \left[ \gamma^{-2} + \left( \frac{v}{c} \right)^2 (1 - \varepsilon) \right] \right\}^2} \quad (3)$$

となる[1,2,3]。ここで、 $\frac{dN}{d\boldsymbol{\Omega}}$ は立体角あたりに放射される光子数、 $L$ は結晶の厚さ、 $\chi(\omega)$ は結晶の周波数依存感受率、 $\boldsymbol{\Omega}_\perp$ と $\mathbf{g}_\perp$ はそれぞれ $\mathbf{g}$ と $\boldsymbol{\Omega}$ の結晶面に垂直な成分、 $\gamma$ はローレンツ因子、 $\varepsilon$ は媒質の誘電率である。本研究では、式(1)~(3)に基づく理論計算シミュレーションを通じてSiC結晶のPXR放射収量を評価し、従来のSi結晶の場合と比較した。

## 3. 3C-SiC、4H-SiC結晶をPXR放射源に用いた場合の理論計算

広く結晶材料として用いられるSi結晶はPXR放射源としても使われており、日大電子線利用施設の2結晶型PXR線源にも採用され、実績がある。しかしながら、電子ビーム照射に伴う損傷の問題があり、より耐久性の高い結晶をPXR放射源に用いることが求められている。SiC結晶は熱耐久性が高く化学的にも安定な材質と知られており、Si結晶に代わるPXR放射源として期待がもてる。

SiC 結晶には数種類の結晶形があることが知られており, Si 結晶のダイヤモンド構造に似た閃亜鉛鉱型構造の 3C-SiC と六方晶系の 4H-SiC が代表的である. 発生する PXR の特性は放射源となる結晶の構造と結晶面に強く依存することから, PXR 放射源に 3C-SiC 結晶および 4H-SiC 結晶を用いた場合に得られる X 線のエネルギーと光子数を理論式に基づいて数値計算を行った.

計算は 2 結晶型 PXR 発生装置を用いることを想定したもので, 1 番目の結晶に 100MeV の電子を照射することで PXR 放射源とし, 2 番目の結晶で回折することで輸送される光子収量を, 第 2 結晶における回折曲線として計算したものである.

Figure 1 は第 1 結晶の Bragg 角に相当する  $\theta$  が  $15^\circ$  のときの各結晶面の光子収量を比較したものである. ここで結晶構造に依存して PXR の放射が生じない禁制の面があり, Table 1 に放射の有無をまとめている. ここで○は放射あり, ×は禁制を意味している. Si と結晶構造が似ている 3C-SiC においても, 異種元素で構成されることから禁制となる面に違いが生じている. さらに, 日大の PXR 発生装置がカバーできる Bragg 角の範囲が  $5.5^\circ - 30^\circ$  であるため, この角度範囲で発生可能な X 線エネルギー範囲と光子収量を Fig.2 にプロットし結晶の種類と結晶面での違いを比較した. この結果からは, 4H-SiC の (004) 面における最大放射収量は, Si の(111)や(220)面, および 3C-SiC の(111)や(220)面で得られる放射収量よりも高い強度を示している.

#### 4. まとめ

本研究では, 結晶の Bragg 条件, 結晶構造因子, Darwin 曲線を考慮し, 複数の結晶面について PXR の理論計算を行った結果, SiC 特有の結晶構造によって従来の Si とは異なる放射特性が得られることを明らかにした. 特に 4H-SiC の (004) 面では Si(111) や 3C-SiC(111) を上回る収量が示され, SiC が PXR 発生において独自の有利な特性を有することが示唆された.. SiC 結晶は材質として熱耐性が高く電子ビームによる損傷リスクが低くなり, 加えて化学的にも安定であるので, PXR を発生させる結晶として極めて有用であると考えられる.

今後の課題としては,, Debye-Waller 因子を考慮に入れて Si と SiC の温度依存の違いや電子ビーム照射による加熱で放射収量が減衰する様子を詳しく調べる事が挙げられる. また, PXR の偏光特性を詳細に理解し, 応用の可能性を検討することも重要な課題となる. 本研究で得られた理論的知見を実験的に検証することが不可欠であり, 4H-SiC(004) 結晶を日大 PXR 線源で試験するための準備を進めている.

#### 5. 参考文献

- [1] 早川恭史「日本大学電子線利用施設に(LEBRA)におけるパラメトリック X 線源開発」,「加速器」,Vol.6,No.2, pp166-177, 2009.
- [2] H.Nitta “Kinematial theory of parametric X-ray radiation”, Physics Letters A, Vol.158, pp270-274, 1991
- [3] A.V.Shchagin, V.I.Pristupa and N.A.Khizhnyak “fine structure o parametric X-ray radiation from relativistic electrons in a crystal”, Physics Letters A, Vol.148,No.8,9,3, September 1990.

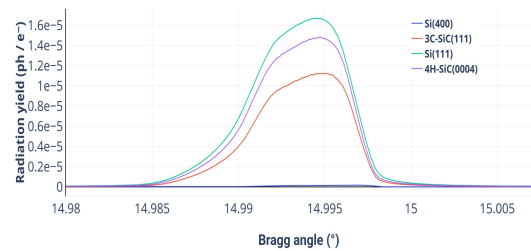


Figure 1. Radiation yield of Si, 3C-SiC, and 4H-SiC crystal planes as functions of the second crystal angle at the first Bragg angle of  $15^\circ$ .

Table 1. Comparison of the presence/absence of PXR radiation on each crystal plane.

結晶面	Si	3C-SiC	4H-SiC
(222)	×	○	×
(111)	○	○	×
(220)	○	○	○
(110)	×	×	○
(004)	○	○	○

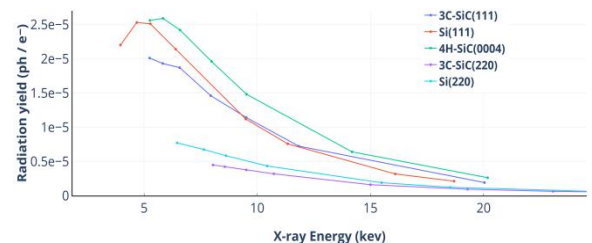


Figure 2. Plot of the maximum PXR yields as the functions of the X-ray energy corresponding to the Bragg angle range from  $5.5^\circ$  to  $30^\circ$ .