

X線トポグラフィによる SiC 結晶評価

山口博隆

産業技術総合研究所

シリコンカーバイド (SiC) は次世代のパワーエレクトロニクス材料として有望視されており、我が国でも国家プロジェクトとして、その実用化を目指した研究開発が進められている。このような SiC に対する期待はその物性値によるものであるが、現在のシリコン (Si) を材料としたものに比べて、低損失・高効率な素子の実現が見込まれている。このような機運が高まって十余年を経た現在、バルク結晶やエピタキシャル膜の成長技術も格段の進歩を遂げてきた。

しかし、基板結晶は一定程度の欠陥を含んでおり、これに起因した素子特性の不良や信頼性の低下が問題になる。そのため、欠陥の形態やその素子特性などへの影響を明らかにする必要がある。そのために、非破壊的評価が可能な X 線トポグラフィは有用な手法である。われわれは、これまで放射光単色 X 線を利用した X 線トポグラフィによって欠陥評価を進めてきた。おもに Photon Factory を利用してきたが、昨年度から九州シンクロトロン BL15 を利用している。試料は 3 インチ系ウェーハであり、低角入射の非対称反射を利用して、おもにウェーハ上面の欠陥を評価する。回折条件は、 $\bar{1}\bar{1}28$ あるいは $\bar{1}108$ および、それらに等価な反射において、X 線波長を 0.15 nm 付近で調整して適当な観察深さを設定した。ウェーハ上の欠陥 (おもに転位) は、光学顕微鏡や走査型電子顕微鏡による表面形状評価、フォトルミネッセンスイメージング、あるいは電気特性の評価と比較解析される。

これまでの研究の展開と現在の研究課題について述べる。

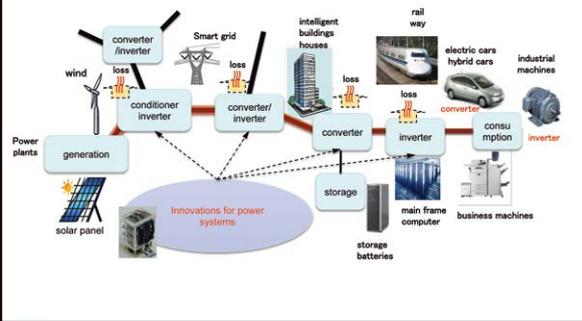
X線トポグラフィによるSiC結晶評価

山口博隆
産業技術総合研究所
先進パワーエレクトロニクス研究センター

X線トポグラフィによるSiC結晶評価

1. パワーエレクトロニクスとSiC
2. X線トポグラフィ
3. キラー欠陥の探索
4. 今後の展開

電力の流れとパワーエレクトロニクス



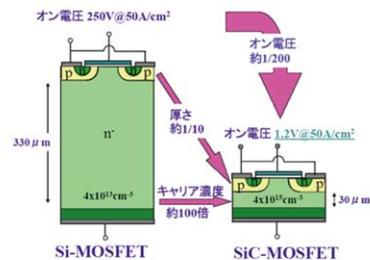
半導体の物性値 (室温)

物質	Si	GaAs	4H-SiC	GaN	Diamond	
バンドギャップ (eV)	1.1135	1.428	3.02	3.39	5.47	
遷移型	ID	D	ID	D	ID	
結晶構造	Diamond	ZB	Hex.	WZ	Diamond	
熱伝導度 (W/cmK)	1.51	0.54	4.9	1.3	20.9	
移動度 (cm ² /Vs)	電子	1500	8500	1000	900	1800
	正孔	450	420	120	400	1600
誘電率	ε(0)	11.9	12.91	9.66/10.03	9.5/10.4	5.93
	ε(∞)	11.6	11.10	6.52/6.70	5.35/5.35	5.76
飽和ドリフト速度 (cm/s)	1x10 ⁷	2x10 ⁷	2.7x10 ⁷	2x10 ⁷	2x10 ⁷	
絶縁破壊電界 (MV/cm)	0.3	0.65	3.5	2.6	5.6	
真性半導体温度 (K)	600	850	1400	2000	3000	
性能指数	M _J	1	19	990	550	2500
	M _K	1	0.52	5.8	1.5	32
	M _{RON}	1	53	890	340	3900
	M _{HF}	1	14	13	9.1	50

半導体の物性値 (室温)

物質	Si	GaAs	4H-SiC	GaN	Diamond	
バンドギャップ (eV)	1.1135	1.428	3.02	3.39	5.47	
遷移型	ID	D	ID	D	ID	
結晶構造	Diamond	ZB	Hex.	WZ	Diamond	
熱伝導度 (W/cmK)	1.51	0.54	4.9	1.3	20.9	
移動度 (cm ² /Vs)	電子	1500	8500	1000	900	1800
	正孔	450	420	120	400	1600
誘電率	ε(0)	11.9	12.91	9.66/10.03	9.5/10.4	5.93
	ε(∞)	11.6	11.10	6.52/6.70	5.35/5.35	5.76
飽和ドリフト速度 (cm/s)	1x10 ⁷	2x10 ⁷	2.7x10 ⁷	2x10 ⁷	2x10 ⁷	
絶縁破壊電界 (MV/cm)	0.3	0.65	3.5	2.6	5.6	
真性半導体温度 (K)	600	850	1400	2000	3000	
高速・電力素子	M _J	1	19	990	550	2500
高速・高集積素子	M _K	1	0.52	5.8	1.5	32
高耐圧素子	M _{RON}	1	53	890	340	3900
高周波素子	M _{HF}	1	14	13	9.1	50

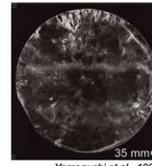
SiをSiCで置き換えると.....



SiCの利点

- Siに比べて：ワイドギャップ、絶縁破壊電界が大きい
→ パワーデバイス利用、高温動作
- GaN、Diamondに比べて：ウエハの大口径化が進展
→ 量産化有利
- GaN、Diamondに比べて：熱酸化膜 (SiO₂) が使える
→ MOSFET

結晶評価のためのX線トポグラフィー



Yamaguchi et al., 1999

非破壊かつ広視野 結晶評価法 (X線回折顕微鏡)

結晶欠陥によるX線回折強度コントラスト

転位 (貫通転位、基底面転位)
マイクロバンプ、ポリタイプ・・・

1997~ 実験室X線トポグラフィーによる結晶評価

1998 超低損失電力素子技術開発

2002~ SRX線トポグラフィーによる結晶評価 (@PF)

2006 低損失高密度インバータ実用化研究

2010 低炭素社会を実現する新材料パワー半導体PJ

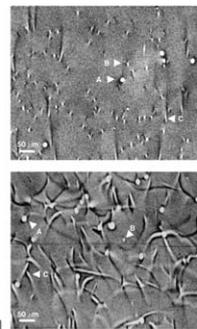
2011~ SAGA-LSの利用

SiCの課題

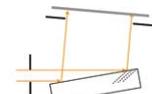
高い結晶欠陥密度 素子特性・信頼性への影響

- 欠陥の形態と生成原因の解明
- 各種欠陥の素子特性・信頼性への影響の解明
- 欠陥評価技術の確立

シンクロトロンX線トポグラフィー



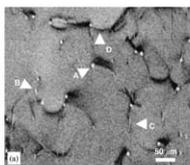
[1120]



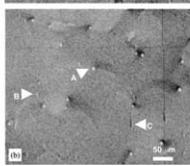
$$\vec{g} = \bar{1}\bar{1}28$$

$$\lambda = 1.45 \sim 1.54 \text{ \AA}$$

シンクロトロンX線トポグラフィー

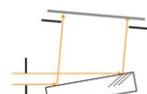


$$\lambda = 1.541 \text{ \AA}$$



$$\lambda = 1.455 \text{ \AA}$$

[1120]



$$\vec{g} = \bar{1}\bar{1}28$$

$$\lambda = 1.45 \sim 1.54 \text{ \AA}$$

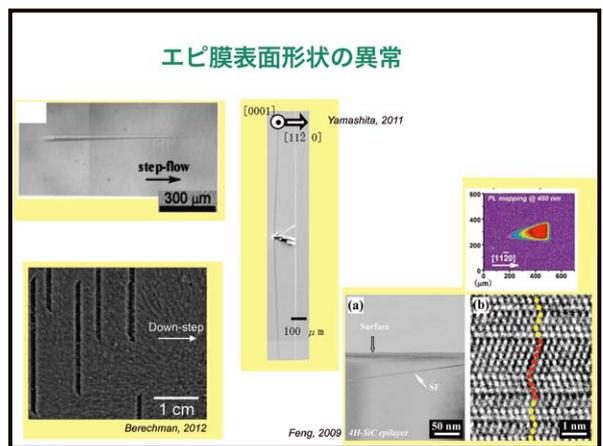
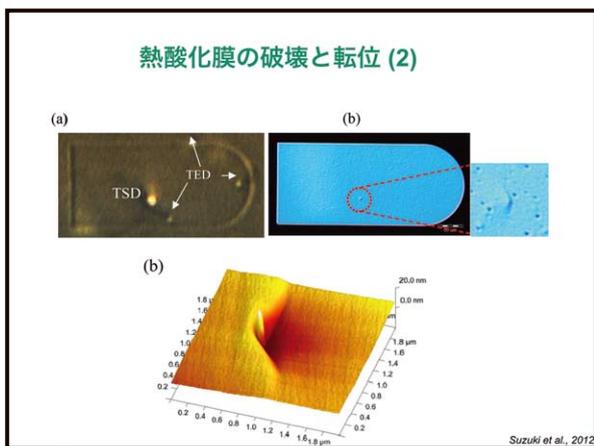
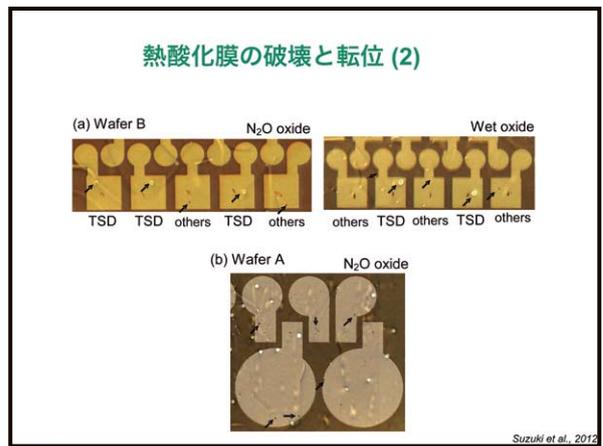
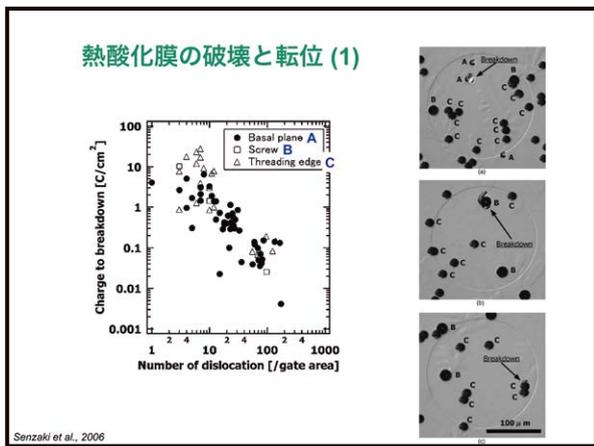
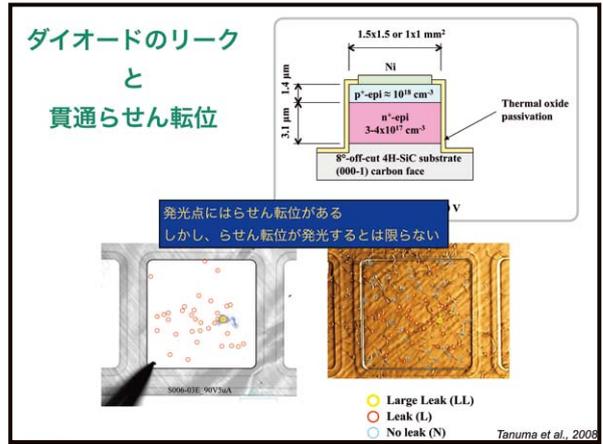
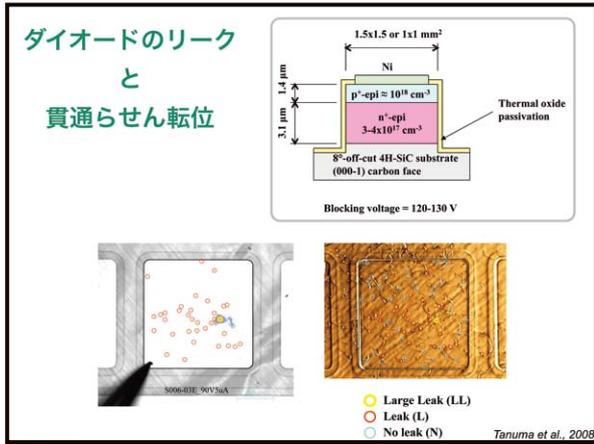
キラール欠陥の探索

各種欠陥の素子特性や信頼性への影響を明らかにする

X線トポグラフによる転位の評価

評価用素子 (TEG) の作製
p-n diodes, MOS capacitors etc.

評価 - 不良箇所の特定
emission microscopy
TDDB (time-dependent dielectric breakdown)



まとめ

シンクロトロンX線トポグラフィーによる非破壊かつ広視野な結晶欠陥評価によってSiCの欠陥およびその素子特性に与える影響を調べてきた。結晶品質の向上とともに、評価の対象は変化し、焦点はより明確になっていくものと思われる。

本発表は、NEDO事業「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」の成果を含んでいる。