

# パワー半導体ダイヤモンド単結晶の シンクロトロンX線トポグラフィー観察

佐賀大学 グリーンエレクトロニクス研究所 嘉 数 誠



# パワー半導体ダイヤモンド単結晶の シンクロトロンX線トポグラフィー観察

嘉数 誠

佐賀大学グリーンエレクトロニクス研究所

佐賀大学大学院工学系研究科

## Physical Properties and Device Figures of Merit

Material	$E_G$ (eV)	$E_{BR}$ (MV/cm)	$v_{sat}$ ( $\times 10^7$ cm/s)	$\mu$ (cm $^2$ /Vs)	$\epsilon_r$	$\lambda$ (W/cmK)
Diamond	5.45	>10	1.5 (e) 1.05 (h)	~ 4500 (e) ~ 3800 (h)	5.7	22
SiC	3.27	3.0	2 (e)	~ 900 (e) ~ 120 (h)	9.7	4.9
GaN	3.4	2.5	1-2.5 (e)	~ 2000 (e)	8.9	1.5
GaAs	1.4	0.4	1-2 (e)	~ 8500 (e) ~ 400 (h)	12.9	0.55
Si	1.1	0.3	1 (e)	~ 1400 (e) ~ 450 (h)	11.7	1.3

Johnson's Figure of Merit  
(RF power device capability)

$$JFM = \left( \frac{E_{BR} \cdot v_{sat}}{2\pi} \right)^2$$

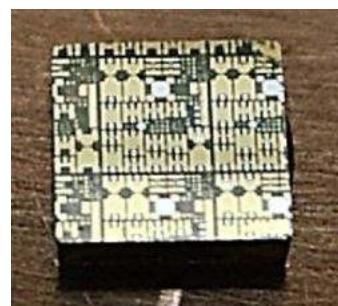
$$\frac{Diamond}{SiC} = 2.8$$

## High RF power performance of diamond MOSFETs

- Exceptional electrical and thermal properties

$E_{BR} > 10 \text{ MV/cm}$ ;

Thermal conductivity =  $22 \text{ Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$

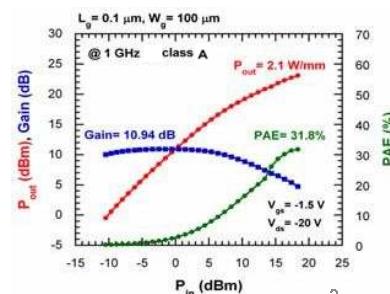
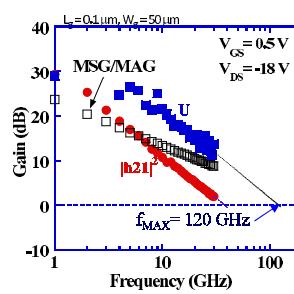
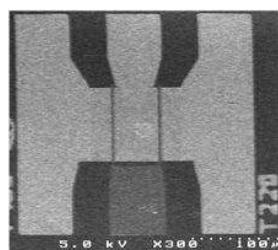


- H-terminated diamond FETs:

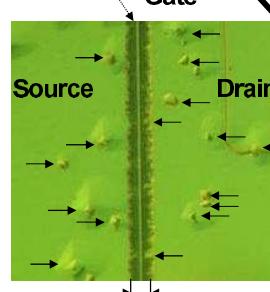
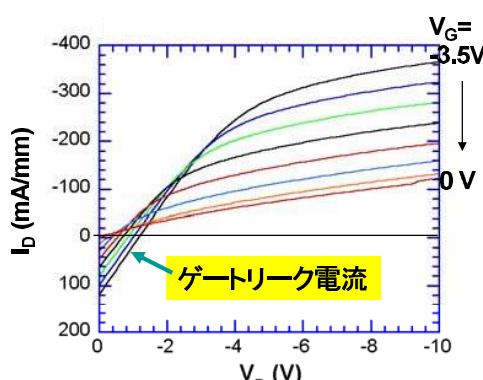
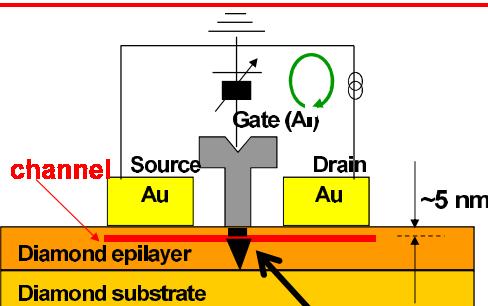
$f_T = 45 \text{ GHz}$ ;  $f_{MAX} = 120 \text{ GHz}$ ;  $P_{out} = 2.1 \text{ W/mm}$  @ 1 GHz

K. Ueda, M. Kasu et al., Electron Device Lett. 27 (2006) 570.

M. Kasu et al., Electron. Lett. 41 (2005) 1249.



## 研究目的- 結晶欠陥によるリーク電流



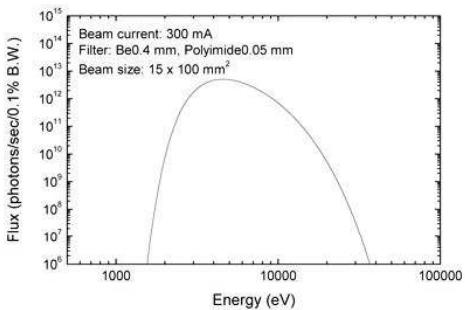
結晶欠陥はグラファイト層をもつため、電気抵抗として働く



M. Kasu et al. Diamond and Related Materials, 13 (2004) 226

## シンクロトロン放射光施設

### 九州シンクロトロン光研究センター、ビームライン BL09A



最大光子エネルギー 4 keV  
ビーム寸法 100 mm(w)×15 mm(h)



## シンクロトロン光をX線トポグラフィーに用いるメリット

### (1) 高輝度

(光子フラックス,  $10^8\sim10^{11}$  photons/s,  
実験室X線の $10^2\sim10^5$  倍)

### (2) 高い単色性

(X線光子エネルギー幅が狭い  
 $\Delta E/E \sim 10^{-4}\sim10^{-3}$ , 0.001~0.01 倍)  
→ 結晶内の内部歪に高感度  
→ 像の鮮明度の向上

### (3) X線光子エネルギーの変化が可能

→ 広い範囲から回折条件を選択できる



## シンクロトロンX線トポグラフィー観察条件

SAGA-LS, beamline BL09A

X-ray photon energy ranged from 4.5 to 25 keV

単色 X線、白色X線

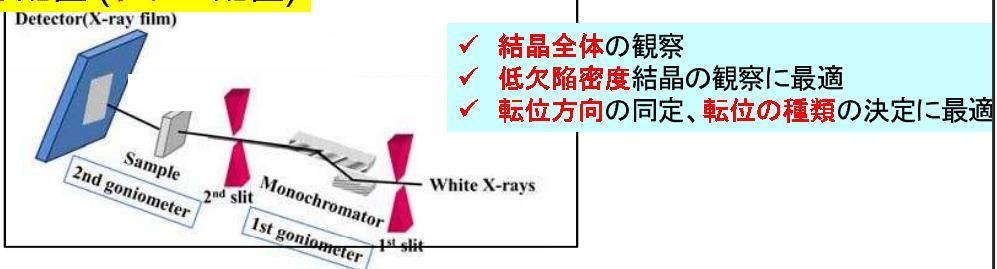
Bragg配置(反射像)、Laue 配置(透過像)

X-ray film (D2 film, Agfa)



## X線トポグラフィー測定配置

### 透過配置(ラウエ配置)

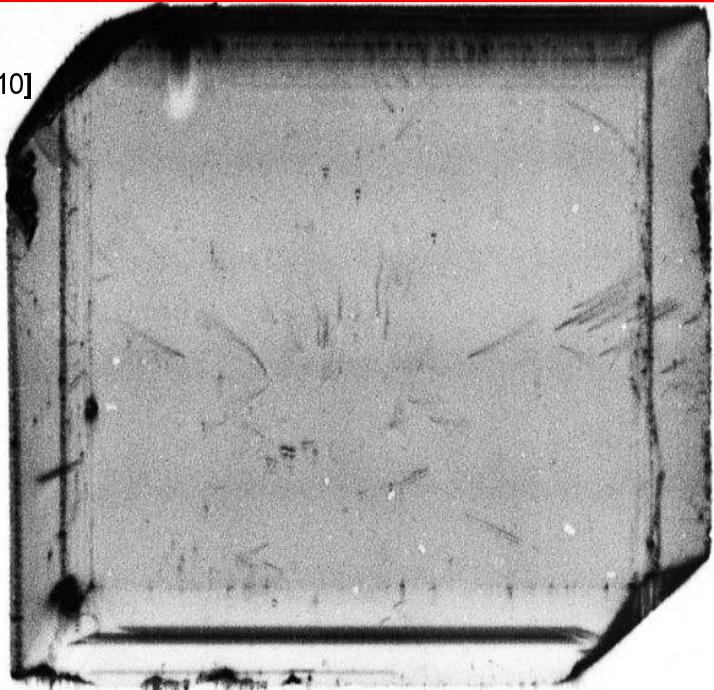
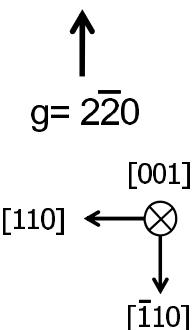


### 反射配置(ブレッカ配置)



## X-ray topography image, $g= 2\bar{2}0$

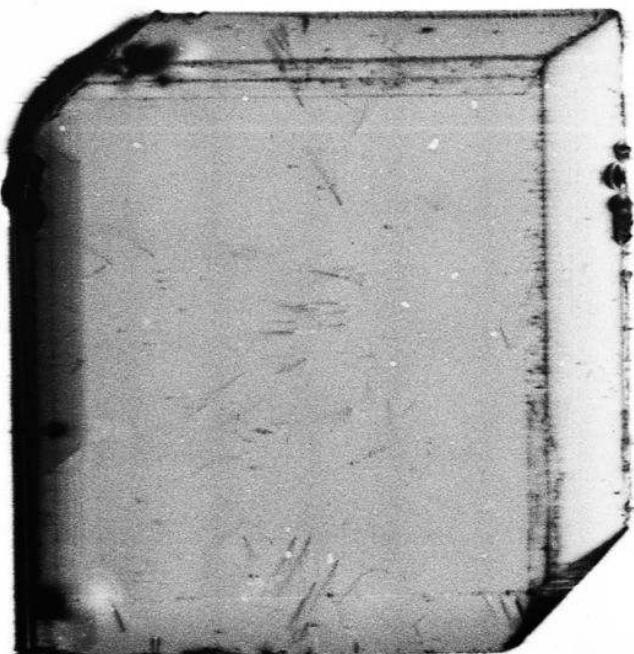
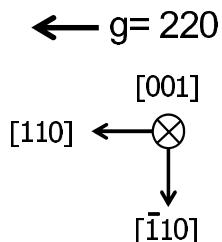
Monochromatic x-ray  
Projection image  
Inclined at 14.0° towards [-110]



X-ray photon energy, 11.71 keV  
X-ray wavelength, 1.06 Å  
Incident angle, 24.4°  
Reflection angle, 50°

## X-ray topography image, $g= 220$

Monochromatic x-ray  
Projection image  
Inclined at 14.0° towards [110]

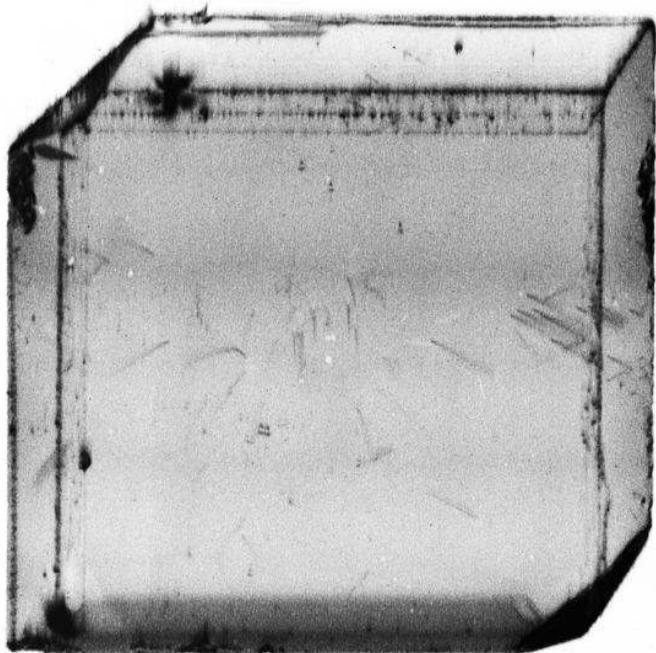


X-ray photon energy, 11.71 keV  
X-ray wavelength, 1.06 Å  
Incident angle, 24.4°  
Reflection angle, 50°

## X-ray topography image, $g = \bar{2}20$

Monochromatic x-ray  
Projection image  
Inclined at  $14.0^\circ$  in [1-10]

$g = \bar{2}20$   
↓  
[001]  
[110] ←⊗  
↓  
[−110]

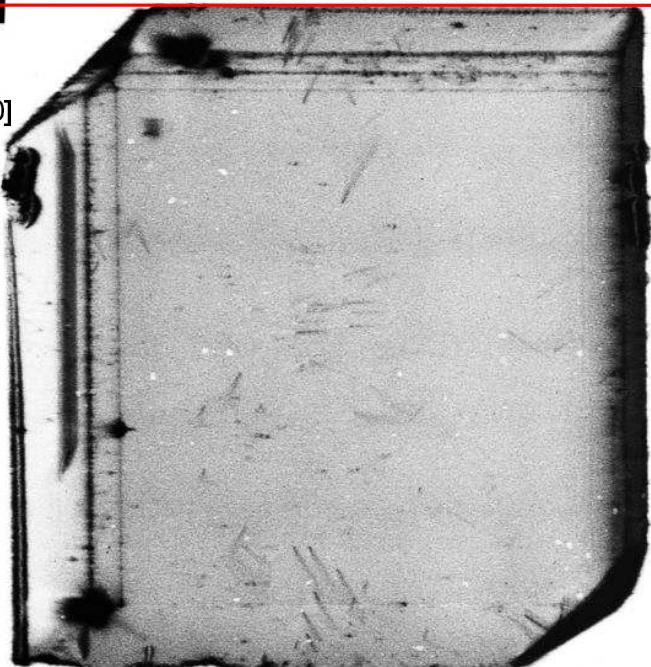


X-ray photon energy, 11.71 keV  
X-ray wavelength, 1.06 Å  
Incident angle,  $24.4^\circ$   
Reflection angle,  $50^\circ$

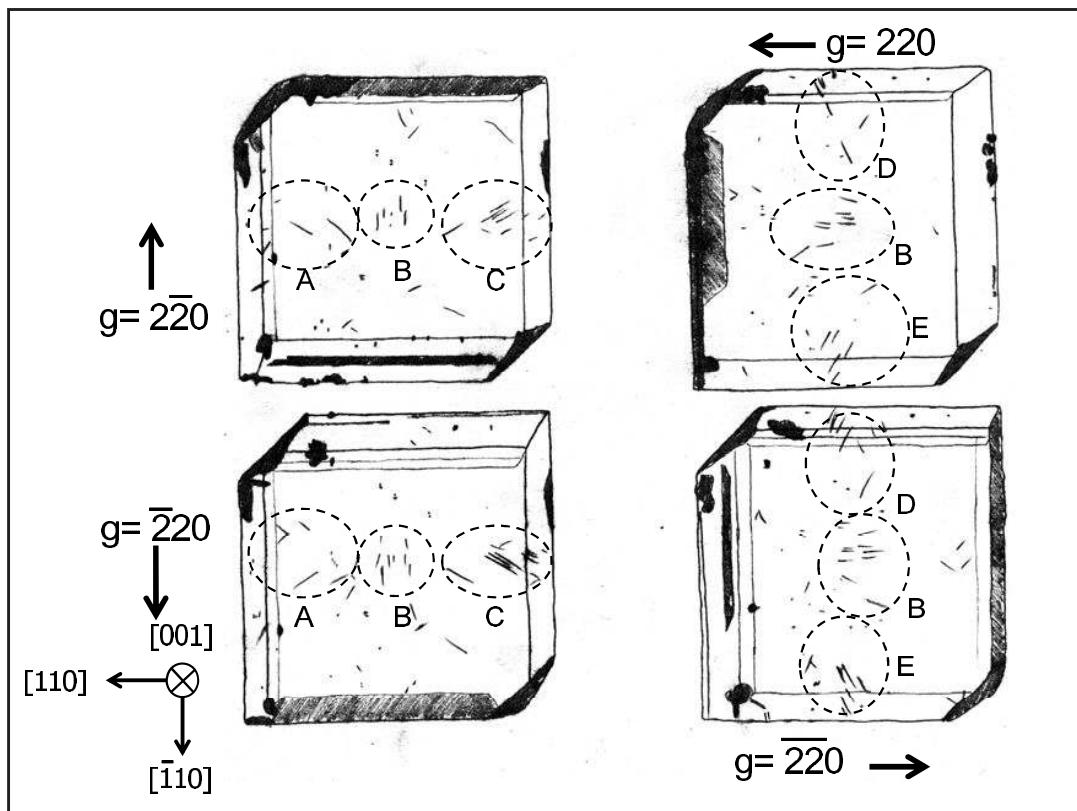
## X-ray topography image, $g = \bar{2}\bar{2}0$

Monochromatic x-ray  
Projection image  
Inclined at  $14.0^\circ$  towards [-1-10]

$g = \bar{2}\bar{2}0 \rightarrow$   
[001]  
[110] ←⊗  
↓  
[110]



X-ray photon energy, 11.71 keV  
X-ray wavelength, 1.06 Å  
Incident angle,  $24.4^\circ$   
Reflection angle,  $50^\circ$



### バーガーズベクトル( $b$ )の同定方法 $g \cdot b$ 消滅則

電子線回折原理より

$g \cdot b = 0$ の場合, 像が消滅

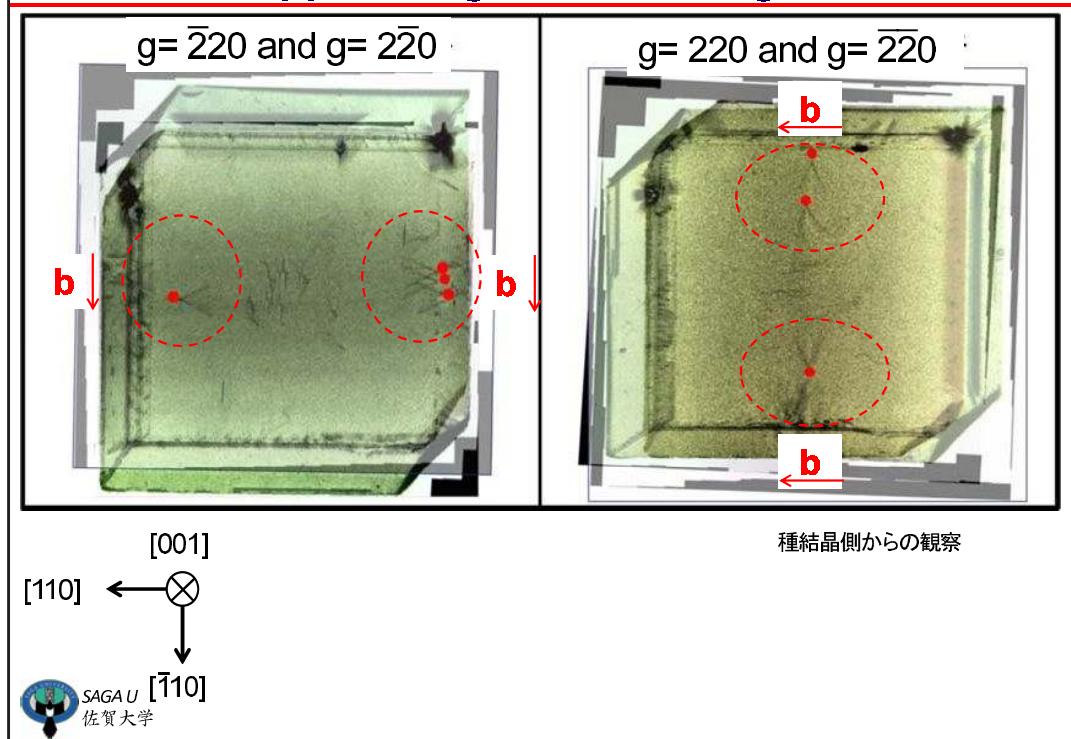
$g \cdot b \neq 0$ の場合, 像が見える

( $g$ :回折ベクトル,  $b$ :バーガーズベクトル)



Group	$g$	Image contrast	$b$	Growth sector	$t$	Dislocation type
A	$\bar{2}20$	visible				
	$2\bar{2}0$	invisible				
	$\bar{2}20$	visible	$\frac{a}{2}[\bar{1}10]$	(111)	$[111]$ $\sim[3\bar{3}1]$	edge
	$\bar{2}20$	invisible				
B	$\bar{2}20$	visible				
	$2\bar{2}0$	invisible	$\frac{a}{2}[\bar{1}10]$	(001)	$[001]$	edge
	$\bar{2}20$	visible	$\frac{a}{2}[110]$	(001)	$[001]$	edge
	$\bar{2}20$	invisible				
C	$\bar{2}20$	visible	$\frac{a}{2}[101]$ or $\frac{a}{2}[\bar{1}01]$ or			
	$2\bar{2}0$	visible	$\frac{a}{2}[011]$ or $\frac{a}{2}[0\bar{1}1]$ ?	(001)	$[001]$	mixed
	$\bar{2}20$	visible	$\frac{a}{2}[\bar{1}10]$	(\bar{1}\bar{1}1)	$[\bar{1}\bar{1}1]$ $\sim[3\bar{3}1]$	edge
	$\bar{2}20$	invisible				
D	$\bar{2}20$	invisible				
	$2\bar{2}0$	visible	$\frac{a}{2}[110]$	(1\bar{1}1)	$[1\bar{1}1]$ $\sim[3\bar{3}1]$	edge
	$\bar{2}20$	invisible				
	$\bar{2}20$	visible				
E	$\bar{2}20$	invisible				
	$2\bar{2}0$	visible	$\frac{a}{2}[110]$	(\bar{1}11)	$[\bar{1}11]$ $\sim[3\bar{3}1]$	edge
	$\bar{2}20$	invisible				
	$\bar{2}20$	visible				

### Overlapped image of different $g$ vectors



## 結論

- ✓ 高温高圧合成ダイヤモンド単結晶をラウエ配置でX線トポグラフィー観察を行った。
- ✓ 転位密度は(001) 成長セクター領域で $15 \text{ cm}^{-2}$  であった。
- ✓ (001)成長セクターでは、転位の方向は[001] であり、  
 $\mathbf{b}=a/2[1\bar{1}0]$  または $a/2[\bar{1}10]$ の刃状転位と  
バーガーズベクトル不明の混合転位と同定された。
- ✓ (111)成長セクターでは、転位の方向が[111] ~[331]の範囲内で、  
 $\mathbf{b}= a/2[\bar{1}10]$ の刃状転位と同定された。

