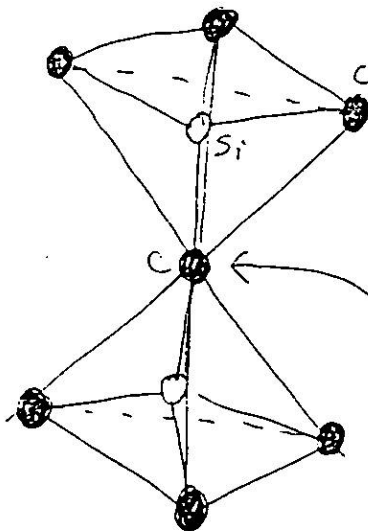


「Si 基板上に成長させたβ-SiCに関する2.3の話題」

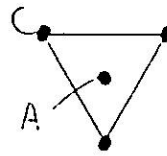
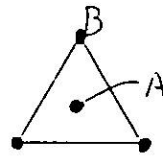
[1]: Introduction

①: SiCとは?

SiとCの組成比が1:1の化合物。多数の結晶構造を持つ → poly type^{*}
 硬い (モース硬度9), ⇒ 緑色の研磨材
 燃えない ⇒ 耐火材, ヒータ
 薬品に耐えない ⇒ 室温で酸, アルカリには全くと言っていいほど
 耐えない。
 熔融アルカリ ($T > 400^\circ\text{C}$ のSiCは溶ける)



* poly type: 結晶多形



→ 二はAとす

← この図から見て, Cの位置に注目すると (炭素)

あとB, C 2通りの入り方が許される。

結晶構造は A, B, C の組合せで決まる。

例 2H (wurzite)

ABAB ---

6H

ABCACB ---

3C (zincblende)

ABC ---

15R

ABC BAC ABAC BC ACB

(和語訳です)

H: Hexagonal 六角晶

C: cubic 立方晶

R: rhombohedral 菱面体晶

(単位格子が六角柱)

(単位格子が立方体)

(単位格子が菱面体)

平衡六角体?

ABCC 等は禁止

② 半導体としてのSiC

E_g : β-SiC 2.2 eV

$\mu_e \approx 1000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$

α-SiC $\geq \frac{24}{24}$ 3.0 eV

$\mu_e \approx 600 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$

3C以外

α -SiC (¹¹¹6H-SiC) $\Rightarrow$ 青色発光ダイオード $\leftarrow E_g$ 大, μ わりヒス
 β -SiC $\Rightarrow$ 高温デバイス $\leftarrow$ 熱伝導良い
 高出力デバイス $\leftarrow$ 飽和電子ドリフト速度
 大電高出力デバイス $\leftarrow$ 絶縁破壊電界大

③ 結晶成長 問題点: いい基板がない, 成長温度が高い

Si (ダイヤモンド構造) $a_0 = 357 \text{ \AA}$
 β -SiC (zinc blende) $a_0 = 356 \text{ \AA}$ 格子不整合 2.0%

Si 上に SiH_4 (シラン) } 流して温度上げると SiC は できんか.
 C_2H_2 $\uparrow$ ガス $\leftarrow$ C_{sp^2} C_{sp^3} の SiC しかできない.

だまにない. 炭化ハーフ層 を 作ると 何故 か 単結晶の β -SiC が
 できる.

$\rightarrow$ 原料をカスで供給 (熱エネルギー 等 により反応を促進させる方法)
 CVD (Chemical Vapor Deposition, 化学気相成長法) 装置
 $\rightarrow$ 構成 図1 キャリアガス H_2 , 原料 SiH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , CH_4 トーレンスガス B_2H_6 有機 Al

成長プロセス 図2

- 1) 基板エッチング
- 2) 炭化 Si 基板表面を炭化して SiC にする.
- 3) CVD

Prof. Matsumi は「texture structure」と呼ぶ。よく考えたい表現だ。 3

②「APDは何故できるか? 何故できないか?」——直角に交わる

Si(100)上に成長させてβ-SiCの表面にはよく「くさび形を組合せたチノ」なモロロジ- (morphology: 結晶等の表面に見える模様, 凹凸) が見られる。これは主に Antiphase Domains という結晶欠陥に由来する。

Def: AntiPhase Domains (略APD, APDはAvalanche Photo Diodeの略がある)

Zinc blende 結晶について定義する。Zinc blende結晶は夫々外面心立方構造を持つ2つのsub-latticeを持つ。正常な結晶では1つのsub-latticeには1種類の原子のみが居る。何らかの原因により、1つの結晶内で原子の居るsub-latticeが入れ替わっている領域が存在する時、APD構造がある。存在するとかいっ。領域と領域の境界を AntiPhase Boundary (APB) と呼ぶ。APBは同種結合により成り立っている。

→ APDは結晶欠陥つまり結晶の病気で。

症例: ダイアモンド構造の上にZinc blende構造の結晶を成長させた時によく見られる。GaAs/Ge, GaAs/Si, GaP/Si, InP/Si, SiC/Si 等がよく知られている。APDは化合物結晶特有の病気で diamond/Zinc blende では全く問題にならない。成長基板が(111), (211)ではAPDはできず(100), (110)ではできるという報告がある。Homoepitaxyでは報告例は無い(?)
(同じ位の上には結晶成長もした。)

症状: 成長層表面がHomoepitaxyの場合と比べて凹凸が激しくなる。APBはAnti-site 欠陥の集合と考えられるので電気的光学的性質にも影響を及ぼす。移動度の減少、少数キャリア拡散長の低下, PL (Photo luminescence) 強度の低下等が報告されている。deep level の形成も DLTS 法により確認されている。

転移号にF2

検出: APBは同種結合を含むためエッチング速度が凡ゆる結晶と異なる。↑通常速い。GaAsやSiCに対しては濃酸KOHによるAPB検出が一般的である。この際エッチ液も同時に検出できるので評価に用いられる。EBIC (Electron Beam Induced Current) による検出も報告されている。

治療: (100)基板上での成長では、[011]方向で基板表面を傾けることにより避けられる。(211)基板上での成長がGaAs, GaPの場合は有効であるという報告もある。

その他: APBはCuAu合金等金属結晶では古典的な存在であり、透過電顕による検出等の研究がよく知られている。半導体結晶で注目され始めたのは

"Anti phase Domain structures in GaP and GaAs epitaxial layers grown on Si and Ge" K. Morizane J. Crystal Growth 38 (1977) 249 以降である。

「APDは何故できるか?」何故できないか?

図6~図9 に理想的な場合の zincblende/diamond の界面の結晶配列を示す。基板表面の成長第一層に注目する。

(100), (111) Cのみ

(110), (211) Si, C 両方含む。

(100), (111) の場合

APDができないための仮定 Kromer et al.

①基板表面が完全にフラット又は偶数原子層のステップのみ。

奇数 : は禁止

② Zincblendeを構成する2つの原子 基板との結合し易さに大きな差がある。

↓

基板表面の成長第一層は片方の原子でのみ構成される。

①, ②を満たせばAPDはできる。

(100)について考える。

GaAs/Si } (100) からの面 ⇒ 普通は APD できる。
SiC/Si } (表面処理により)

(100)から[011]へ傾ける ⇒ APD できる。

(100)から[001]へ傾ける ⇒ APD できる。

Si 基板は (100) からの (100) からの [001] へ傾けた状態では奇数原子層のステップ (100) からの [001] へ傾けると偶数原子層のステップからできている。

と考えてよい。

これで①は解決 ②はじうだるう。

もしも②を満たしていなければどんな場合にもAPDはできる。

だから③は満たしているはずだ。

SiとSiCの界面は「炭化」により作られている。

炭化はSiが外拡散してきてSiC表面でCと っついてSiCになると言われている。そこで大胆な解釈をしよう。

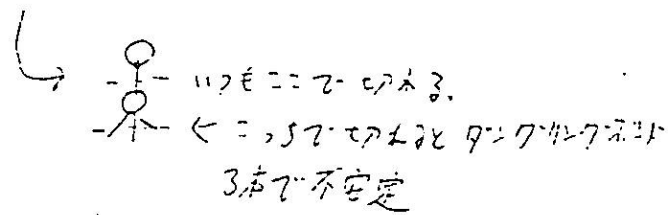
(1) Si表面にCのみの成長第一層からできる。Si表面にGaAsが分解できたCが附着すると考えても良い

(2) その後Siの外拡散が殆ど SiCからできる。

どんなSi基板を扱っていても成長第一層はCのみと考える。ただしSiの外拡散による地盤沈下、格子不整合は問題の簡略化のため考えない。

とすると

- (100) → 表面のステップの様子のみによ、APDの有無は決まる。
- (111) → APDはできない。Si(111)は偶数ステップしかないと考えている。
- (110), (211) → いづれもAPDはできる



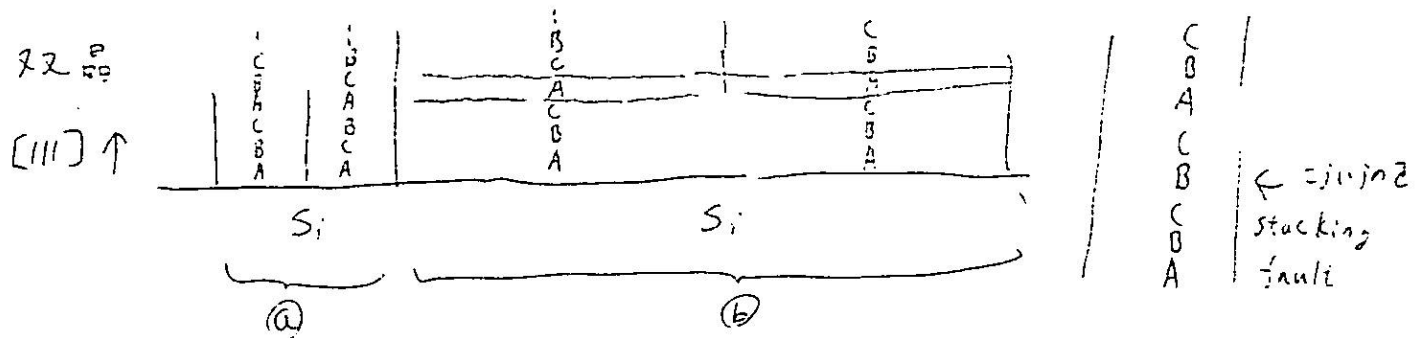
実験結果は

- (100) → Si基板による。
- (111) → APDに閉じている？ 単結晶(双結晶でいいのか)は不明。
- (110) } 単結晶でできる
- (211) }

矢の解釈をきつければ実験手帳だ！
cf. p6

と、2月は一致している。

(110)や(211)では Si 表面に一層の層かできてしまっているため、後の結晶成長が大きく阻害されてしまっている。

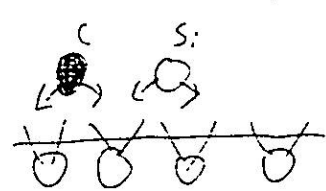


(111)面では (a), (b) とはさかたかたないか。ど、さかの状態かできやすい。

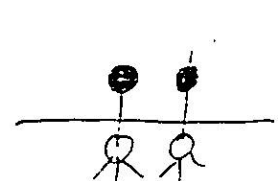
よって SiC の成長させるのに 2温度法 がある。

- 低温で SiC を結晶を薄く成長 (CVD) 1st step
- 高温で SiC を成長 (CVD) 2nd step

これは (100) では X, (111) は O 何故か？



(100) 高温にした時多結晶中の Si と C の再配置が起る。この時、Si と C のどっちも基板との結合し易さの違いがなく適当に近所とく、つく。すると APD ができる。単結晶はできない。

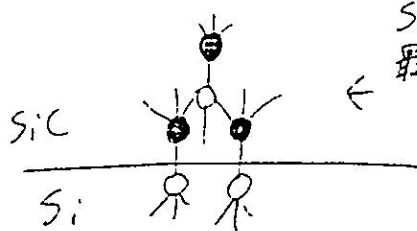


(111) では基板 Si が一本手を出している。SiC の Si 面と勘違いして C はかり加く、ついで成長がすすむ。

逆はどうか。Si/SiC は E.P.L. 2 温度法でできている。

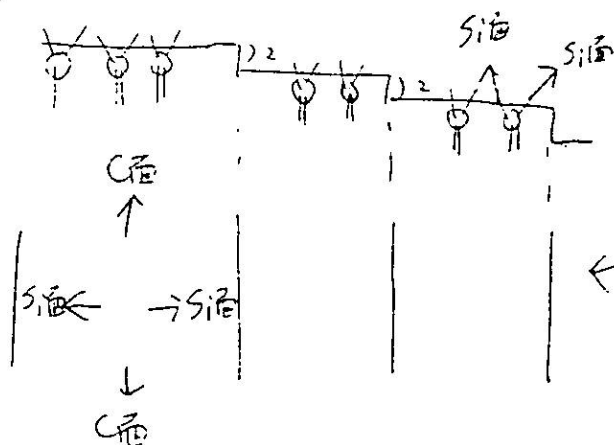
「成長第一層はCのみ」を表わける証明 2つ.

① (111) 面上の SiC は Si 面かである。



Si がほちけき上に伸びているのか Si 面 逆は C 面
最初 1 層 C かてきれば、必然的に Si 面かである。

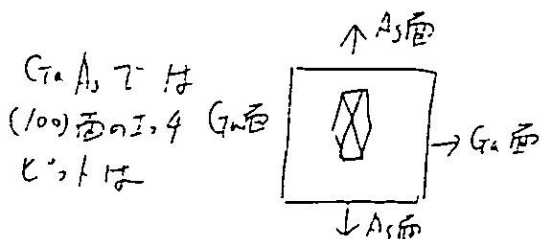
②



Si (100) で [011] に傾けたものの表面は
左図のF) に steep 直交な方向にキズ
2 本出ていると言われている。

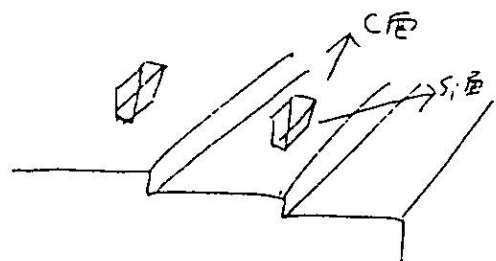
成長第一層が C 層であるのと
同じように成長層の Si 面と C 面上から
見ると左図のようになる。

GaAs では As 面 か Ga 面 よりも化学的に活性である。 — (A)



左図のF) 形状のものかである。 — (B)

SiC では (100) 面の 4 方向と Si 面, C 面との向き関係は知られていない。



実際に左図のF) な向きにできる。
(B), (A) を用いて Si 面, C 面の向きを定めると
左図のようになる。
これは上の仮定と一致する。

以上 結晶成長関係の話題でした。

私は「結晶成長の研究」をやっているのではなくて

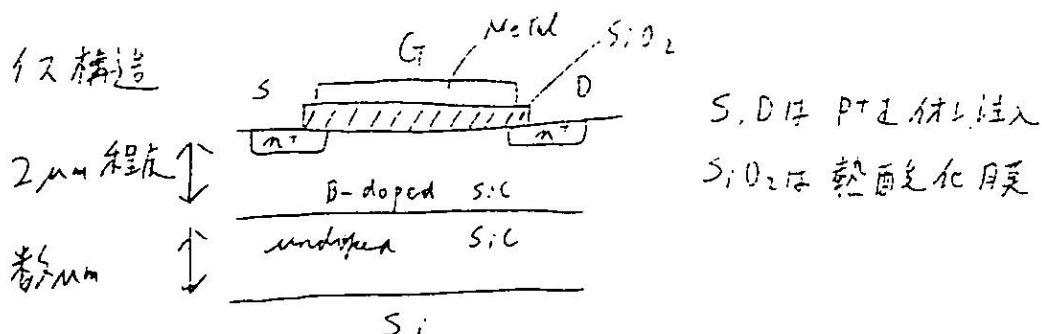
「SiCという半導体材料」の研究をやっているのです。

そこで

[3] (秘) デバイス製作計画

① デバイス型式: MOS 反転型 (nチャンネル) FET

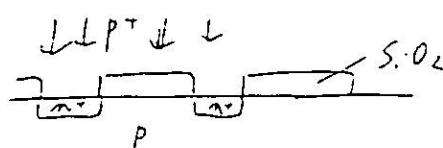
② デバイス構造



③ 製作プロセス

(1) SiO₂ 堆積 (光CVD)

(2) マスク1: イチレク



小図23

(3) イオン注入: P+

(4) マスク2: マーク保護して イチレク (SiO₂ とする)

(5) Ar 雰囲気中でアニール

(6) 熱酸化 (ゲート酸化膜)

(7) マスク3: ゲート以外の酸化膜除去, (イチレク)

(8) マスク4: S, D, G 電極作製 (イチレク または リソオフ)

(9)

(10) Ohmic電極 アロイ

④ 各プロセスの検討

(1) イオン注入マスク用 SiO₂ 堆積

注入イオンの分布は次式で表わせる。

$$N_i = \frac{N_s}{\sqrt{2\pi} \langle \Delta R_p \rangle} \exp \left(-\frac{(z - \langle R_p \rangle)^2}{2 \langle \Delta R_p \rangle^2} \right)$$

N_s : 注入イオンの面密度

z : 深さ, $\langle R_p \rangle$: 標準射影距離 $\langle \Delta R_p \rangle$: 標準偏差

SiO₂ の場合 P⁺ 100 keV で $\langle R_p \rangle = 983 \text{ \AA}$, $\langle \Delta R_p \rangle = 326 \text{ \AA}$ である。 (図 24-a)

100 keV なら 5000 \text{ \AA} 程度は充分である。

(2) イレ片入

(注入量 と $\begin{cases} P=-1\text{L} & \text{温度} \\ P=-1\text{L} & \text{時間} \end{cases}$ を決定するリットルから)。

この程度の深さの場合が得られたら充分か定かでない。

方針: 使用可能な最大加速電圧 $\rightarrow$ 接合の深さを得る。

+

低い加速電圧

$\rightarrow$ ohmic を取り易くする

例: 図 24-1b1 (c)

$P=-1\text{L}$ は
IR 加熱炉 フルパワー ($\approx 1100^\circ\text{C}$?) + 60min Ar 雰囲気
こゝでなければ CVD 装置中でも、と温度を上げてやる。

$P=-1\text{L}$ 条件の最適化をするはずだが

$\downarrow \downarrow \downarrow \downarrow P^+$

B-doped

B-doped SiC: 全面 P^+ を注入して Hall 測定するのからいいで (え)。

(3) 熱酸化

普通 1050°C, 6hr, dry O_2

炉を二つにしてもいいから 1100°C, 2hr 程度でできるだろう。

(4) ohmic 電極

Au 系の電極はアロイすると、凝縮し易いのでフロー測定に向かない。

Ni 系中心に考える。この場合には Ni_3C に Fe リバラーンが形成する。

アロイが必要ないなら AuTe でリフトオフできる。

(Au も使える?)

Sales ポイント

- ① n-channel 反転型 MOS FET (μm).
- ② B-doped SiC は $10^4 \sim 10^7$ 程度の拒絶率を得た。
P-n 接合が整流性を受けつつもコンダクタンスの変化が観測できる。
- ③ B-doped 層は拒絶率から考え $10^{14} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ と考えられている。
turn-on 電圧が低くなる。

問題点

- ① B-doped p-SiC が反転するか否か全く？
- ② イオンの注入は参考になる報告例はあるが、まだ全く未経験である。
- ③ B は E_v が大きいので温度上昇により急速に P が増加する。
室温では動作しても高温では動作しないかもしれない。

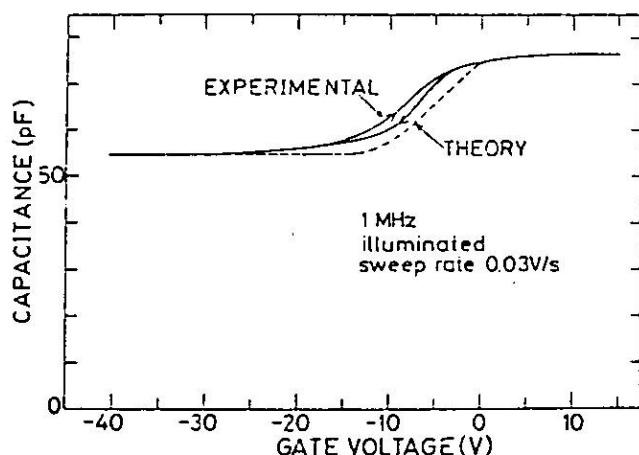


Fig. 4. Inversion characteristics of the MOS diode under the illuminated condition. The solid and broken lines represent the experimental result and theoretical curve, respectively.

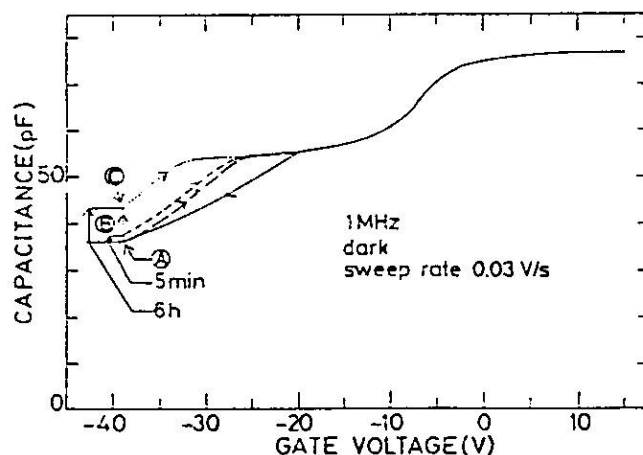


Fig. 3. The capacitance change of the MOS diode while the gate voltage was kept at about -40 V .

λ 74 β-SiC MOS 特性

↑
光有

↑
光無

E_g が大きく少数キャリアの生成速度が遅いので、光照射により、少数キャリアが生成した。

○ 図25 アルトープキアリ密度と電子移動度の関係

○ Bドーピング

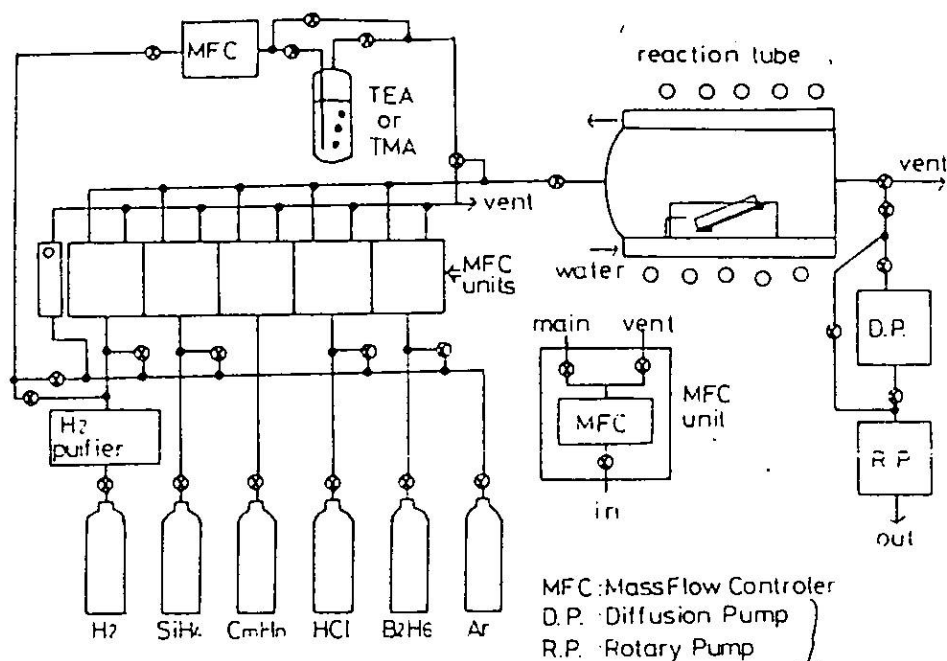
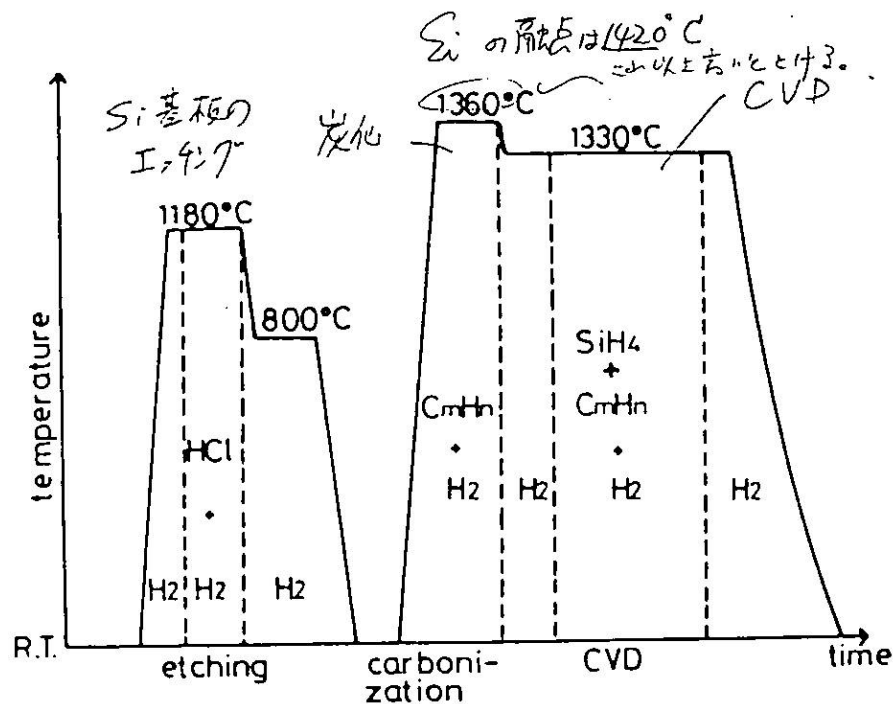
BをドーピングすることによりP形SiCが得られる。しかしその転移率は非常に高い。 cf. 図26

以前/例では B-doped β -SiCの Hall測定で温度特性が測定できたことがある。(図27)

その時の結果から $E_a = 420 \text{ meV}$, 従来のPLでは $E_a = 735 \text{ meV}$ であり、またしても非常に E_a が大きい。これは値が低くは得られなないので実用的価値は低い。(cf. 図28)

Alが比較的少ない(い、でも PLでは $E_a = 260 \text{ meV}$, Hall測定からは $110 \sim 160$ 程度)アクセプタとして知られている。以前 TMA, TEA を用いてドーピングを行、たこと 10^{19} cm^{-3} 近くまでドーピングできた。(図29)

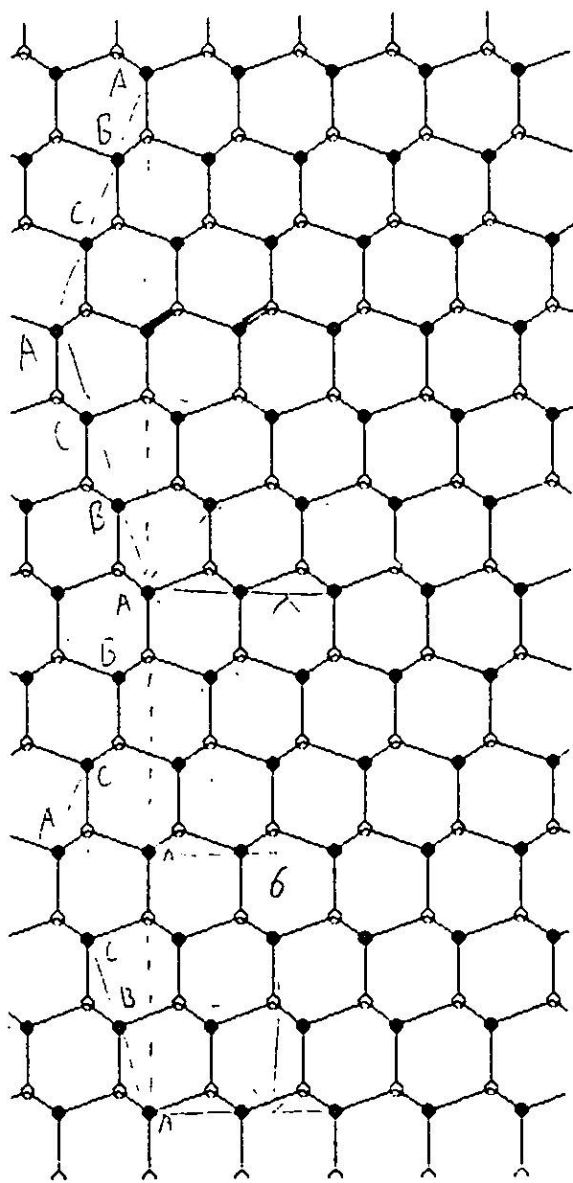
図2



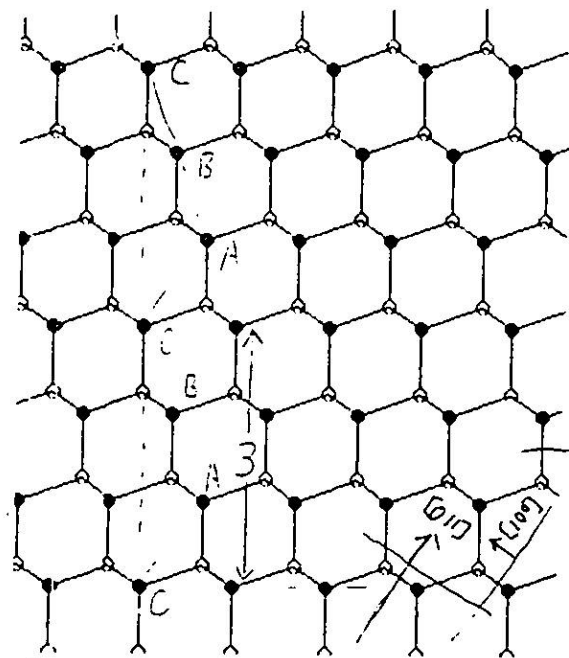
CVD装置の構成

図1

MFC: Mass Flow Controller
D.P.: Diffusion Pump
R.P.: Rotary Pump
(精密流量調節計)

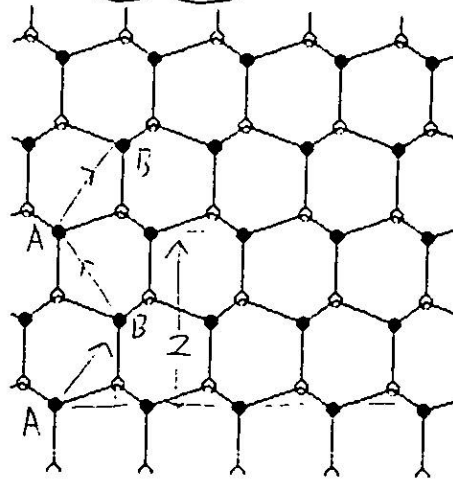


↑ 6H-SiC ABCACB --- [3]



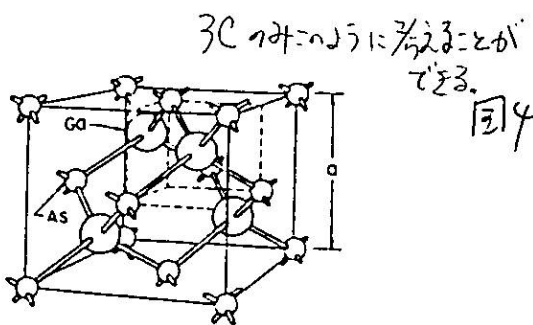
↑ 3C-SiC, β-SiC
ABCABC ---

断片
← 3C
(110)面に
相当

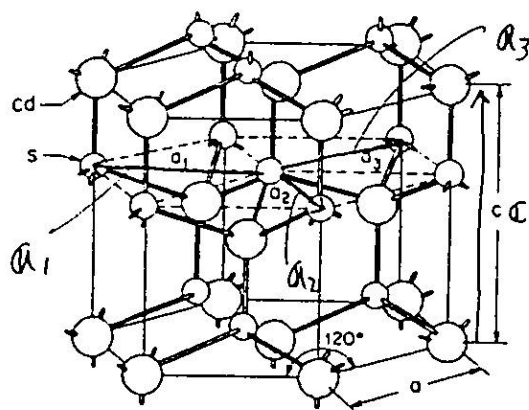


← 2H-SiC
ABAB ---

↑ [0001]
⊗ [100]



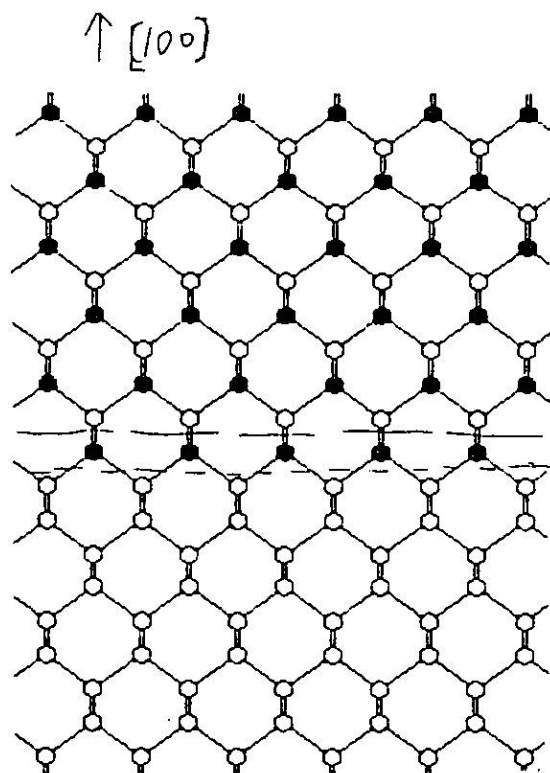
ZINCBLÉNDE 閃亜鉛鉱
(GaAs, GeP, etc)



[5]

注: 今日はこの年の絵かきさんでくるのでこゝで落しはけ木をさかして

断面は全て $[01\bar{1}]$ (以後も同じ)



● 炭素
○ Si

成長第一層
Cの4

interface

図6

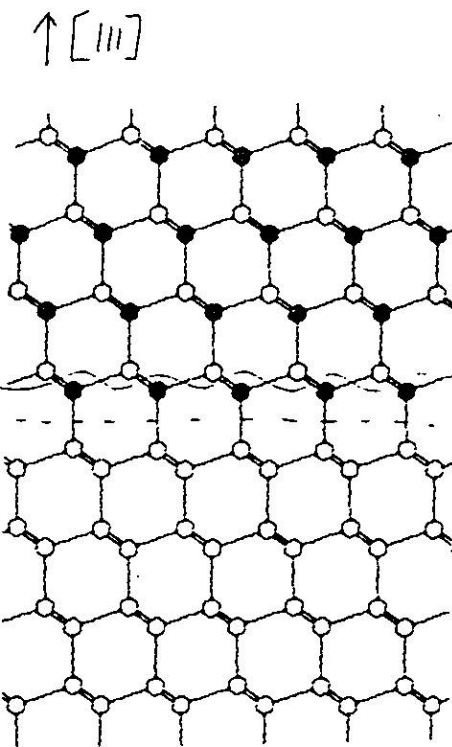


図7

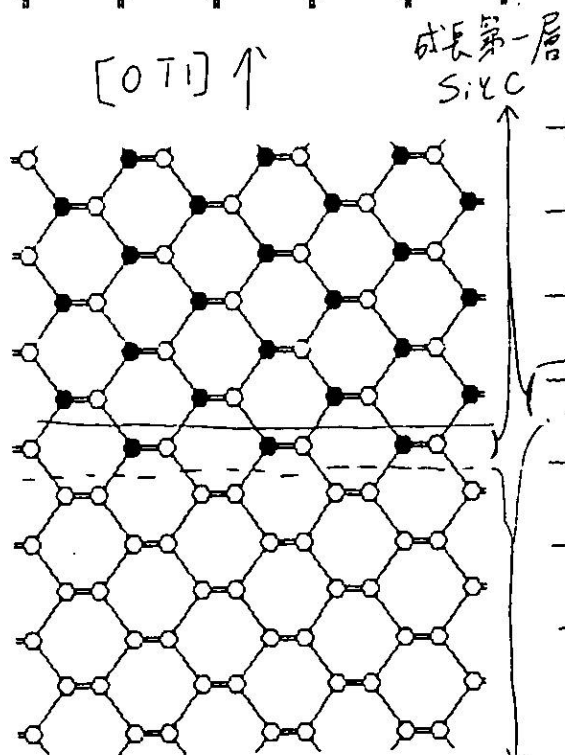


図8

interface

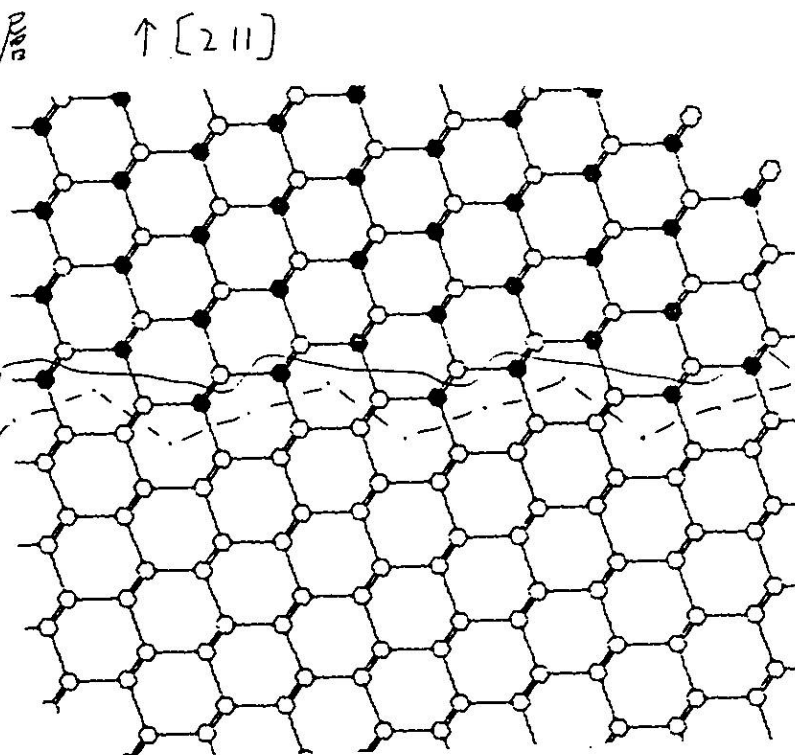
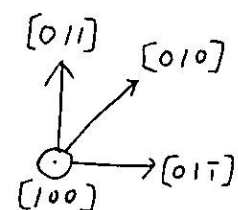
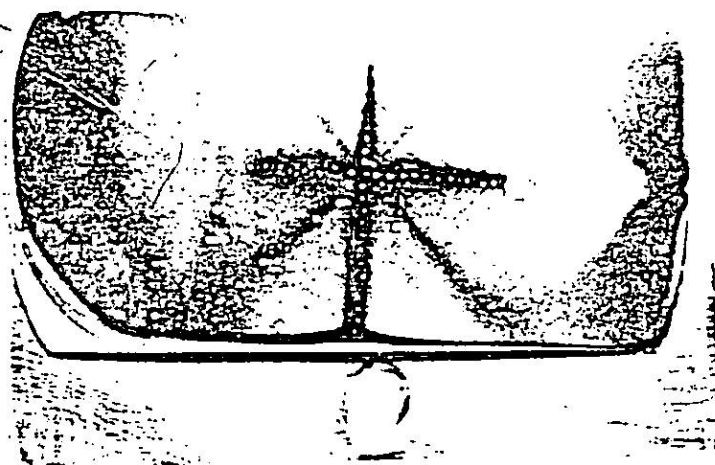


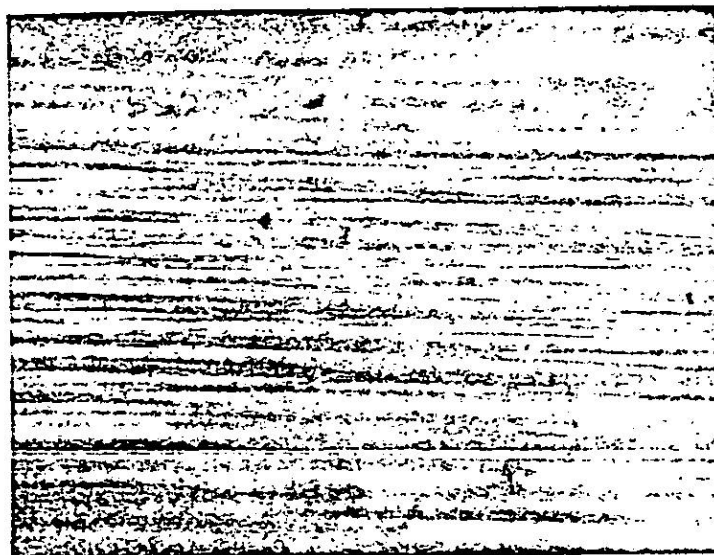
図9

図10



球面研磨SiC
上に成長した
SiC

図11



[011] 方向
4°傾いた

↓
= SiC 成長

中心 (100) SiC 相

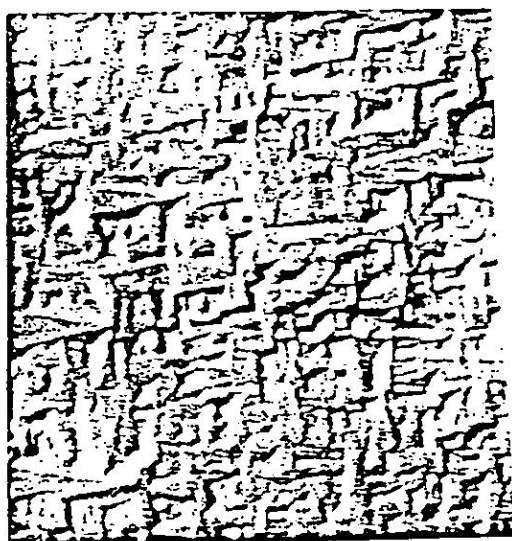
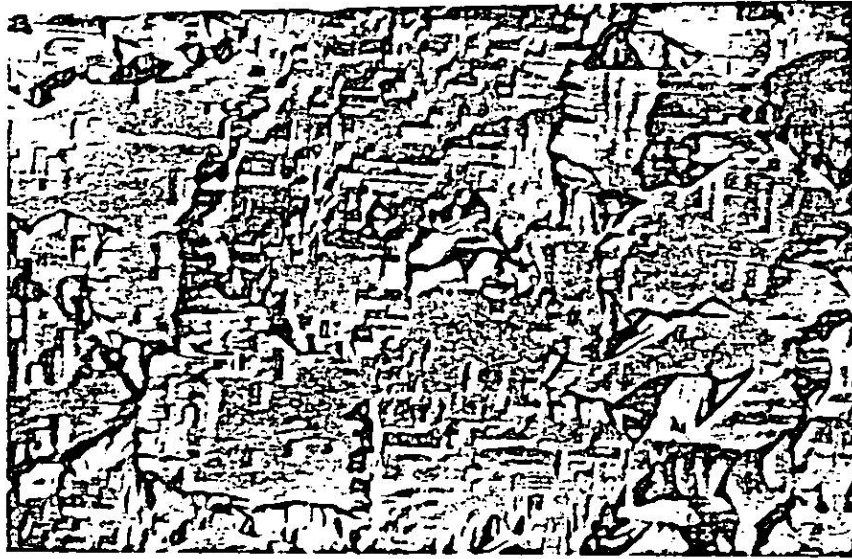


図12

[010] 方向に傾いた場合



図13



← APBか
見えてる。

図14

→ 傾いた杓

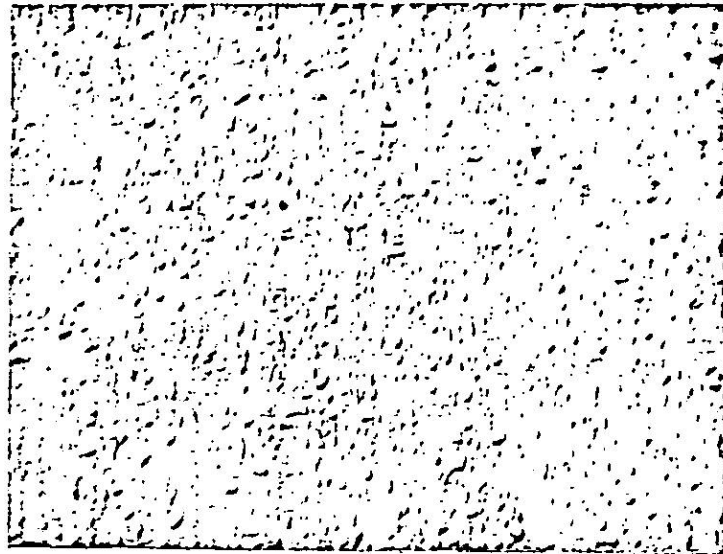
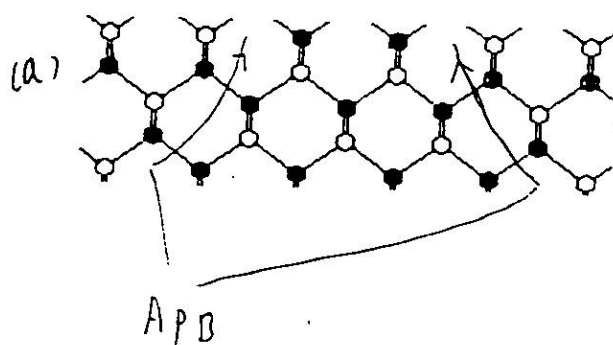
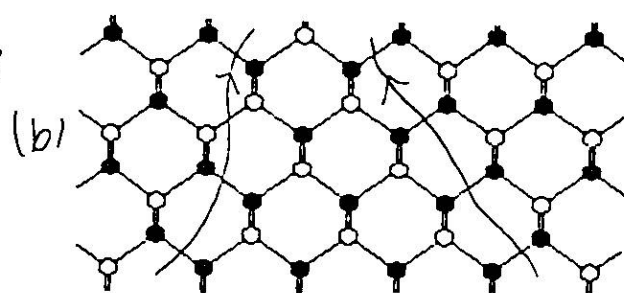
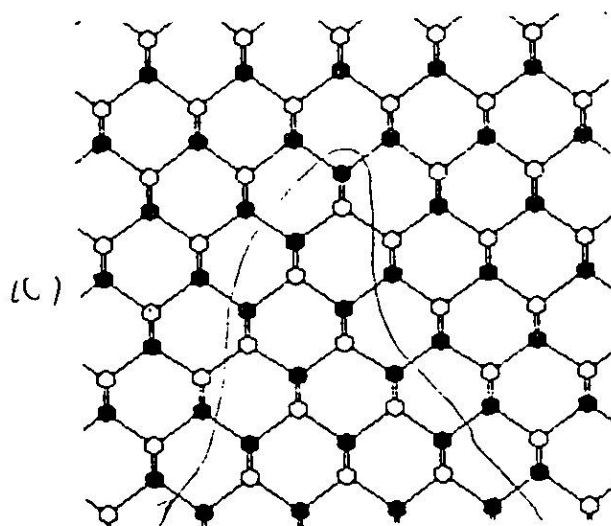
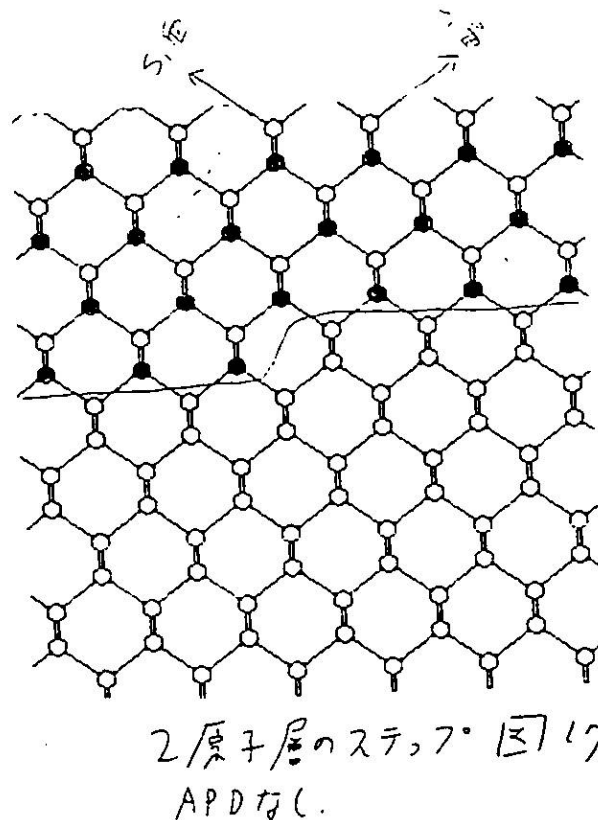
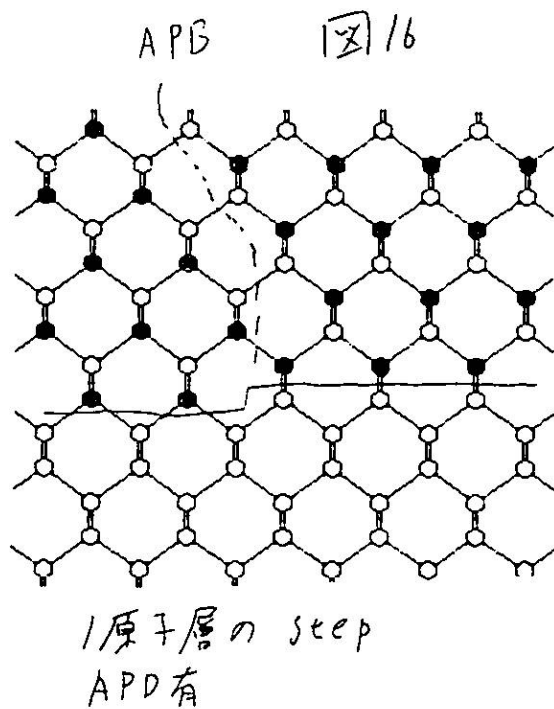


図15

↑ 心眼で見れば

◇ エ-42, fか
二ノ口風に似てる。



(カキ)APDのやり方.

③ ストック上には伊ひさん

二つの境界上とAPDが減少・減少のとき
APBが消失するようになるのでAPDがその
状態から出発してAPDが少なくていくつたところ
無理でよい。(注:実際のAPBは三次元の面です)

[illegible]

② 運ぶ(A, B)に $\frac{1}{2}$ した

① APBは適当に橋を造る
 ながさ5cmに伸びる。



面の RHEED 入射 $\langle 110 \rangle$ 方向

光入射 (110)

↑ 面の正上 (0°)

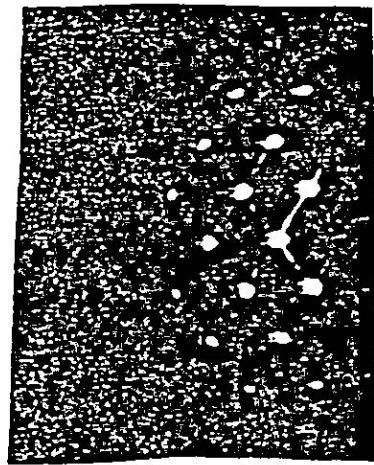
↑ 上半分 (45°)

↓ 下半分

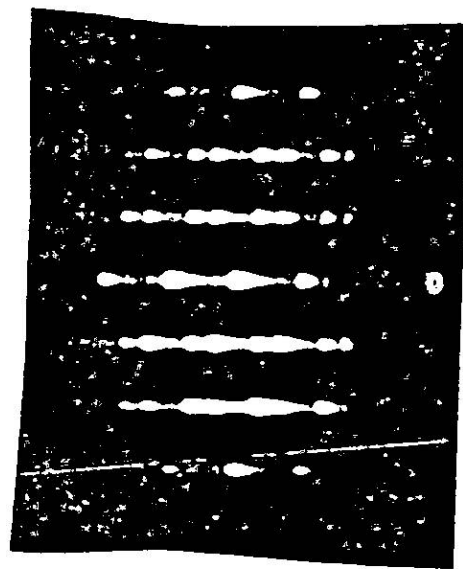
図 20

炭化タングステンの RHEED 入射

図 21



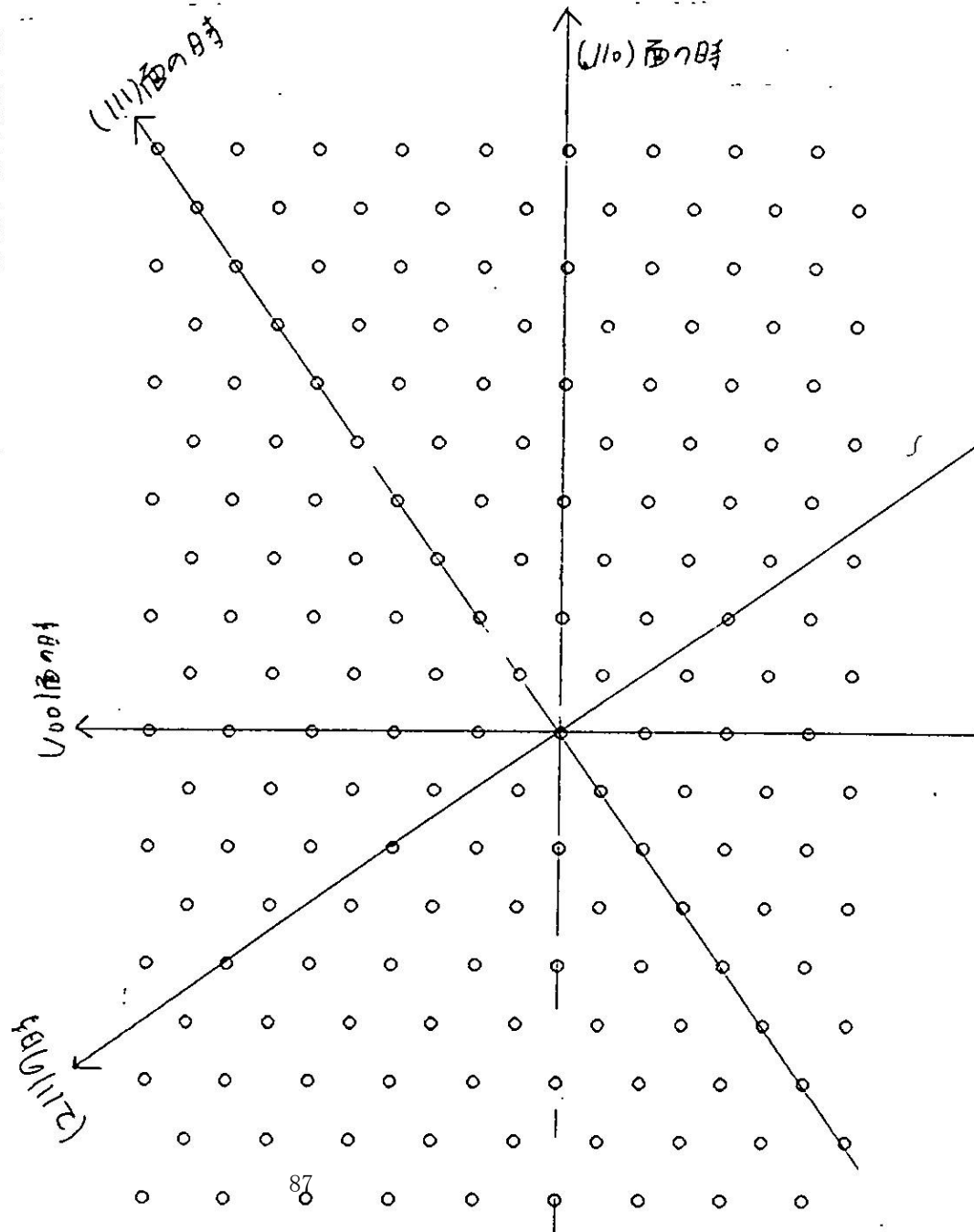
(100)



(111)

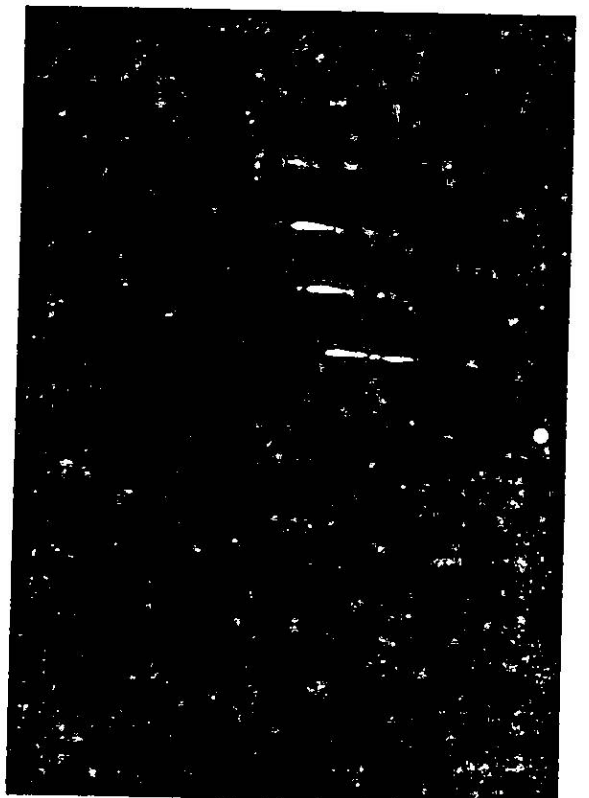


(211)





成良/厚
RHEED 1109-1



(111)

$\left. \begin{array}{l} h3c6 \\ h4v \\ [110] \end{array} \right\} \begin{array}{l} h4v \\ [110] \end{array}$

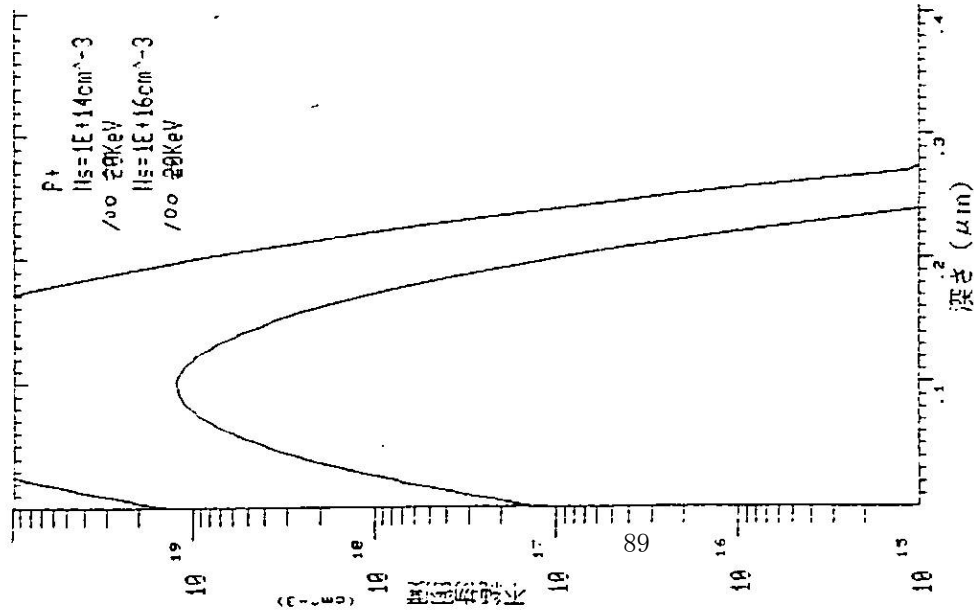


$\left. \begin{array}{l} (011) \\ (211) \end{array} \right\} \begin{array}{l} (111) \\ (112) \end{array}$
 CVD SA

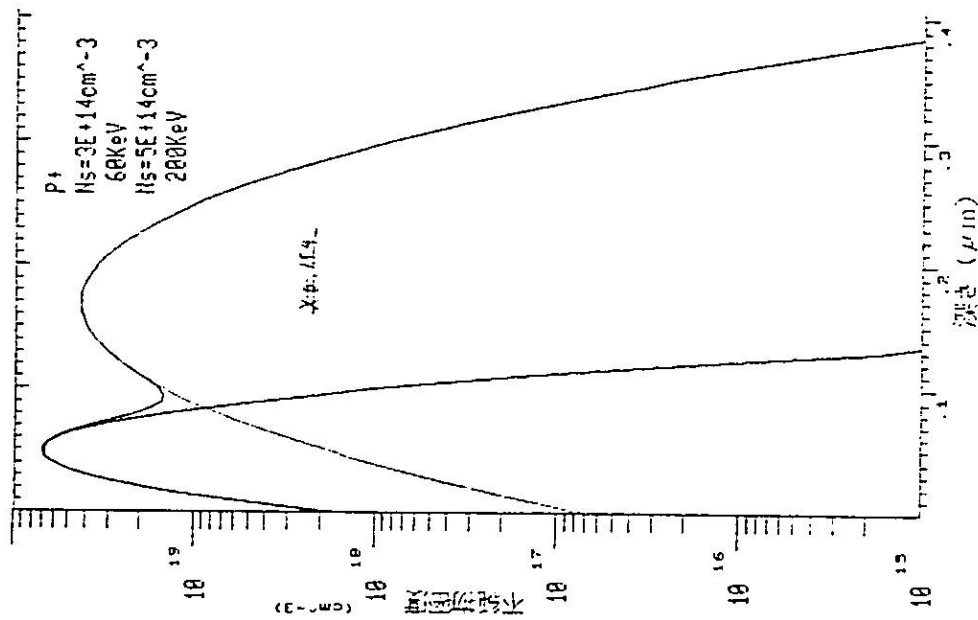


(100)

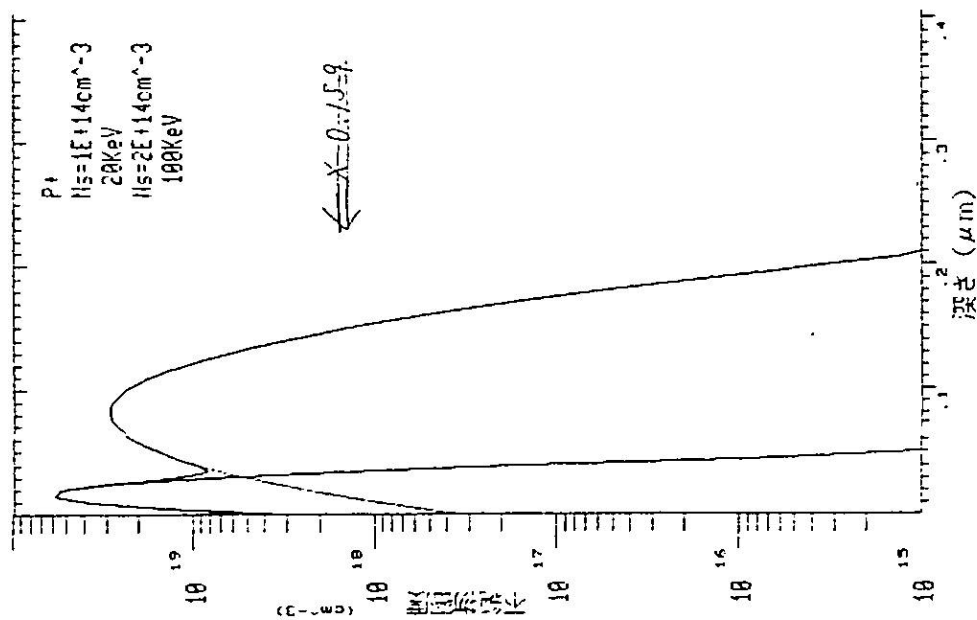
14x 22



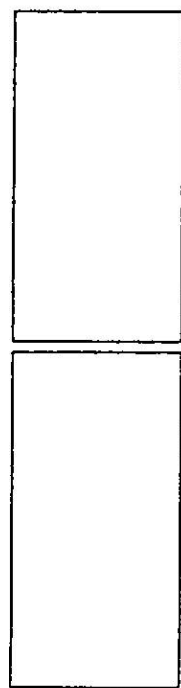
$\uparrow$
 SiO_2 m.i.i.
 (a)



12724
 (b)



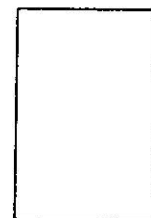
(c)



マスク1 (保護用)



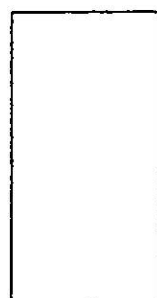
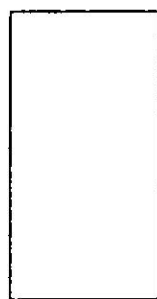
マスク2 (マスク保護)



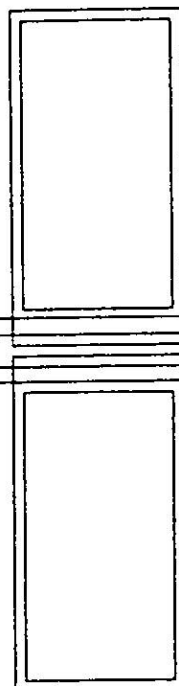
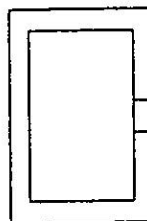
(リットロ化用膜)



マスク3

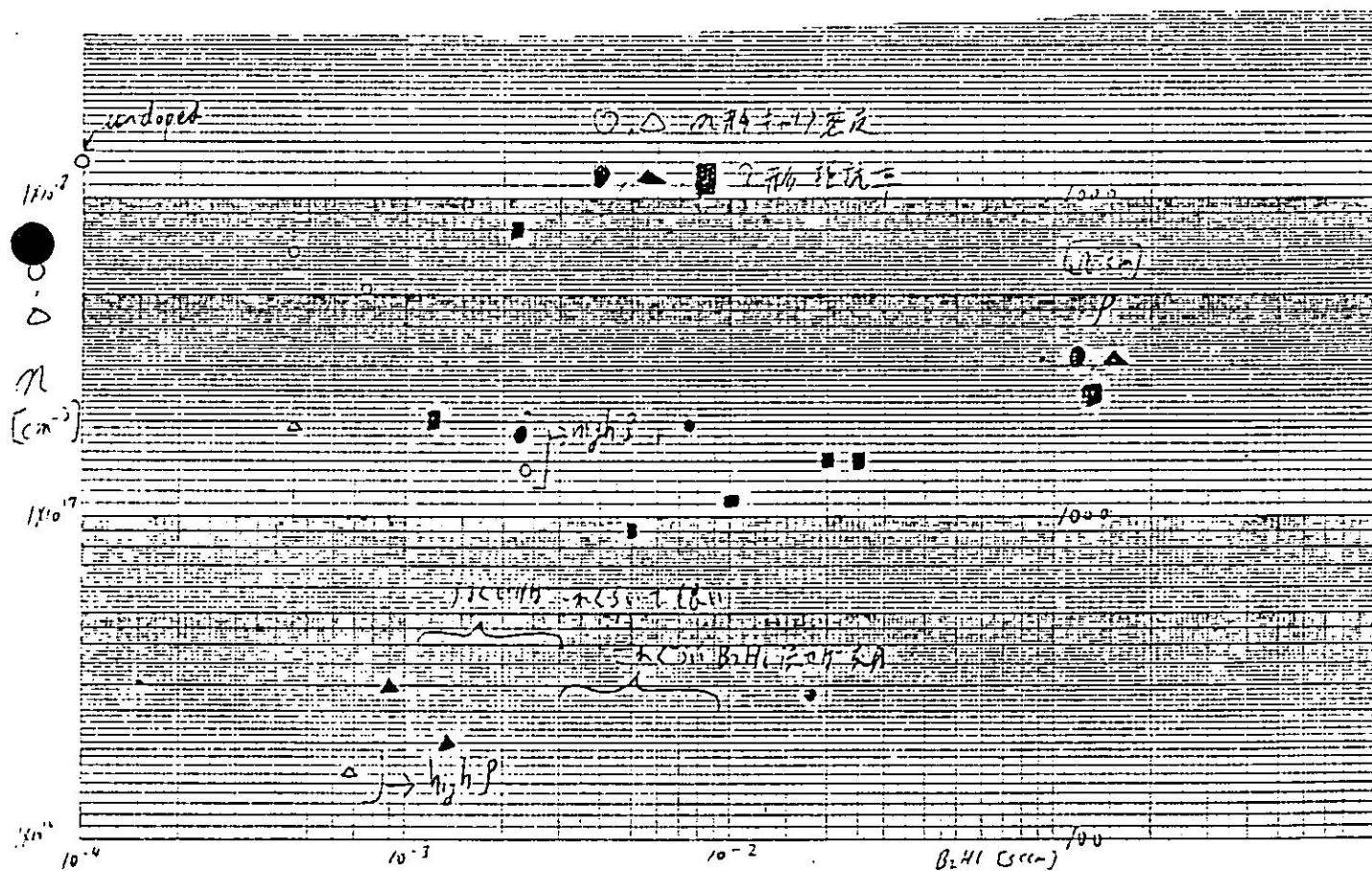
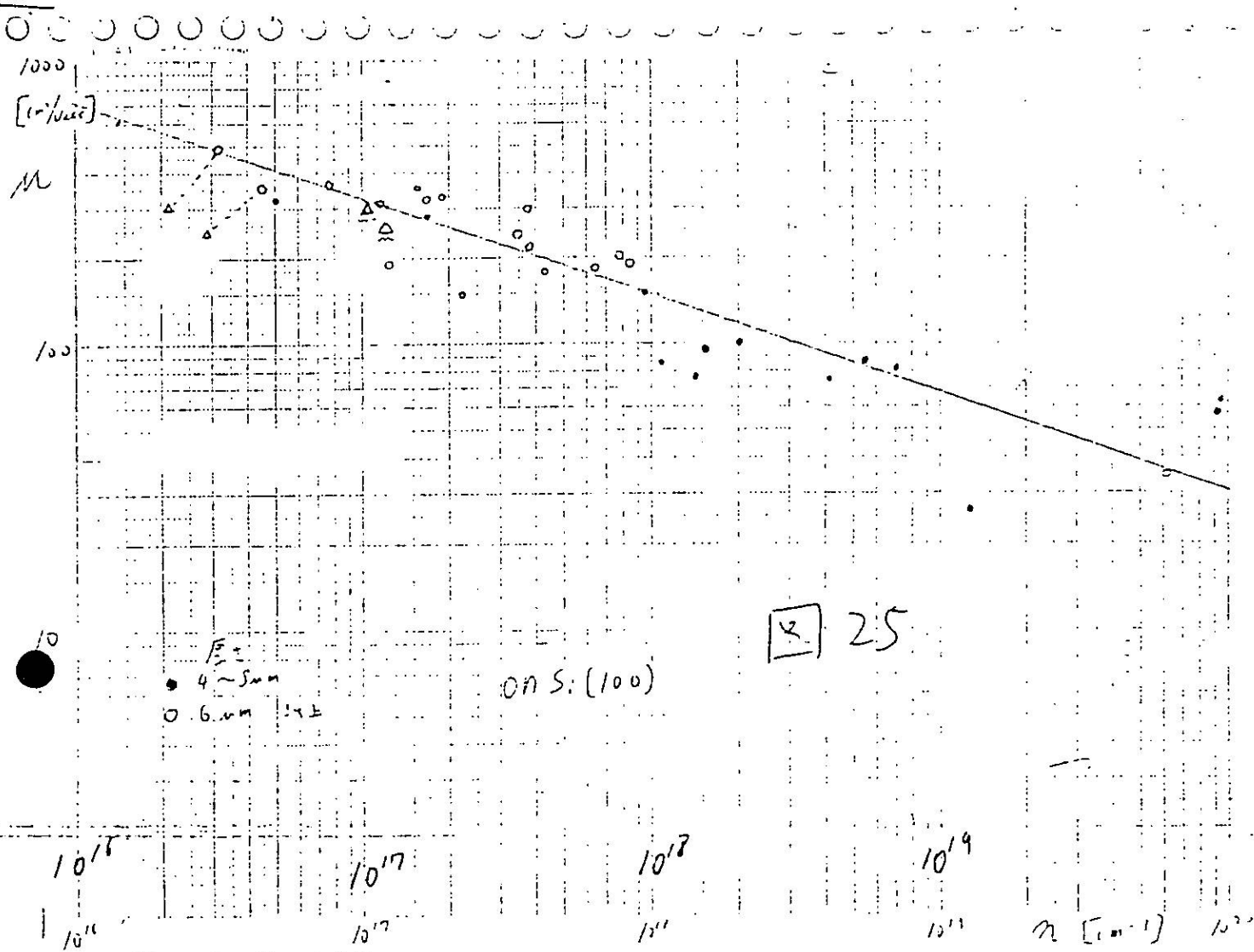


マスク4



全マスク合成図

図23



28⁰¹

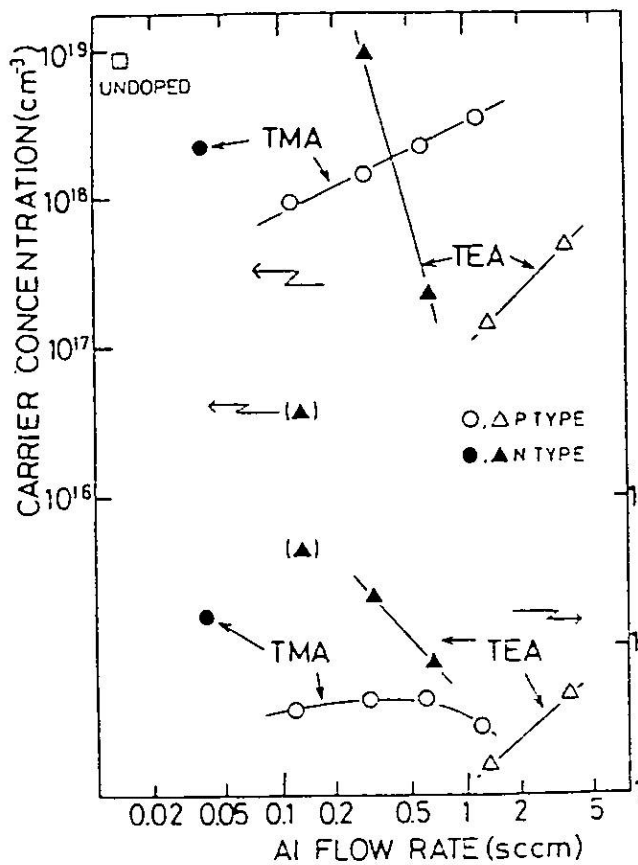


図29

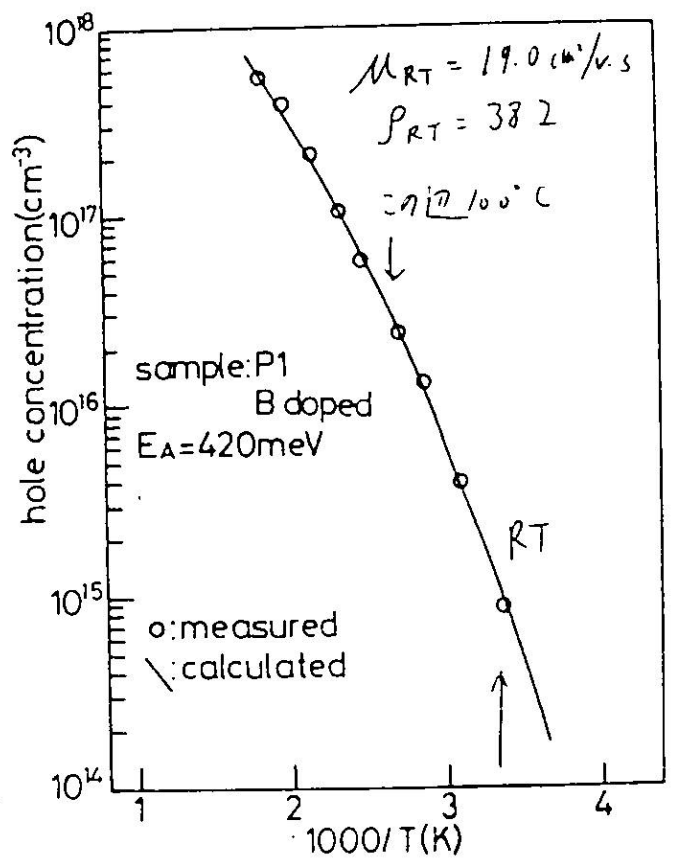


図27

E_a
 $N_a \downarrow$
Nd 3E17

	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1
1E 16	2.1 E17	2.1 E17	2.1 E17	2.1 E17	2.1 E17	2.1 E17	2.1 E17	2.1 E17	2.1 E17	2.1 E17
3E 16	1.9 E17	1.9 E17	1.9 E17	1.9 E17	1.9 E17	1.9 E17	1.9 E17	1.9 E17	1.9 E17	1.9 E17
1E 17	1.4 E17	1.4 E17	1.4 E17	1.4 E17	1.4 E17	1.4 E17	1.4 E17	1.4 E17	1.4 E17	1.4 E17
3E 17	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
1E 18	1.5 E17	6.1 E15	1.3 E14	2.7 E12	3.3 E10	---	---	---	---	---
3E 18	4.1 E17	2.2 E16	5.8 E14	1.8 E13	2.1 E11	2.1 E9	---	---	---	---
1E 19	9.2 E17	7.8 E16	1.7 E15	3.7 E13	7.7 E11	1.3 E10	---	---	---	---
3E 19	1.7 E18	1.6 E17	3.4 E15	1.1 E14	2.3 E12	4.6 E10	---	---	---	---
1E 20	3.3 E18	3.8 E17	1.7 E16	3.8 E14	7.9 E12	1.6 E11	1.8 E9	---	---	---
3E 20	6.8 E18	7.6 E17	4.8 E16	1.1 E15	2.4 E13	4.9 E11	7.9 E9	---	---	---
1E 21	1.1 E19	1.4 E18	1.3 E17	3.8 E15	8.8 E13	1.6 E12	3.2 E10	---	---	---
3E 21	1.9 E19	2.6 E18	2.8 E17	1.1 E16	2.4 E14	4.9 E12	1.8 E11	---	---	---
1E 22	3.5 E19	3.8 E18	6.1 E17	3.4 E16	7.9 E14	1.6 E13	3.4 E11	4.7 E9	---	---
3E 22	6.2 E19	8.8 E18	1.1 E18	8.9 E16	2.3 E15	4.9 E13	1.8 E12	1.9 E10	---	---

↑ η 74

--- は
計算 $T=5$

RTに合わせた P 密度 図28

TMA (14 x400 μ Li = 74)
TEA (14 I400 μ Li = 74)