

## GISAXSによる埋もれた半導体 ナノドット構造の解析 Structure analysis of semiconducting nanodots with cap layers

奥田浩司、久野啓志、加藤真行、落合庄治郎(京大院工)  
宇佐見憲隆、中嶋一雄(東北大金研) 田淵雅夫(名大VBL)  
H.Okuda, K.Kuno, M.Kato, S.Ochiai (Kyoto Univ.)  
N.Usami,K.Nakajima,(Tohoku U.) ,M.Tabuchi (Nagoya U)

目的: GeおよびInAsナノドットの構造評価をGISAXSによっておこなう。  
→ 埋めこむことによる形態変化、とくに組織安定性や界面安定性の評価  
@ BL15A (9' IICCD + IP)

## 半導体ナノドットの構造 : 成長中、キャップ層形成中に構造 が変化している

- Ge nanodots case  
→ Morphological change during growth of cap layer (ただし、確認・報告例は大きなドットに限られる。)
- <=> No apparent intermixing at low-temperature growth. (が明確な定量結果の報告もない)

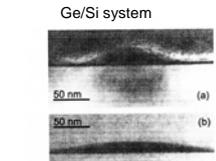


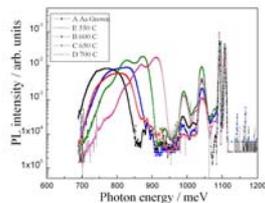
FIG. 1. Dark-field cross-section TEM images of (a) a freestanding island and (b) an overgrown Ge island with Si. The Ge deposition was 6.3 ML.  
X-TEM and PL(20K) by Schmidt et al.(APL77, 2000)

⇔effect of post annealing / (diffusion of Ge) ?

i.e., bulk diffusion is still fast enough for nanostructure?

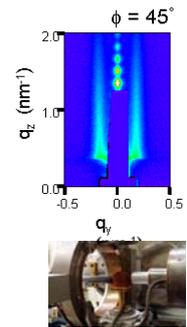
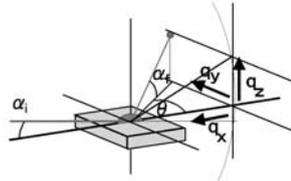
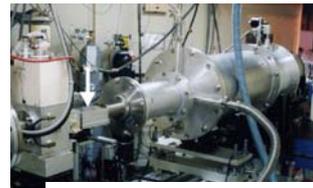
## キャップ層をもつ半導体ナノドットの非破壊解析

- \* キャップ層成長中に構造は変化するか？ (薄いキャップ層をもつナノドット構造の非破壊解析)
- \* キャップ層形成後の熱処理による構造変化を評価する。
- \* 熱処理、成長方法と物性値 (PL発光波長など)との関係を理解する



PL spectrum changes by post annealing.  
Photoluminescence results of the present sample at 10 K

## 実験方法(PF15A, SP8-13XU)

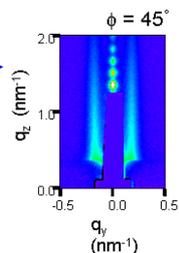
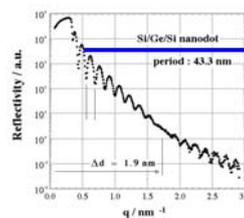


## GISAXS強度解析

強度解析に必要な評価方法は？

- => ナノドット構造のスケールと光学条件による。
- \* BAのメリット: 構造と散乱強度の対応が直接的。  
ただし、BAで取り扱って良いか、という条件検討が必要。  
(妥当性の検証には動力学補正項の計算の裏づけが必要)
- \* DWBAのメリット: 直接GISAXSパターンと対応のつく強度プロファイルを得ることが出来る。  
ただし、反射率の動学的な取り扱いと摂動が有効な膜の構造には制限がある。(ほとんど完全な膜)
- => 簡単な検討よりqzの大きな領域でBAを前提とした解析をおこなう。  
次にDWBAによる検証をおこなう。

## ボルン近似による解析

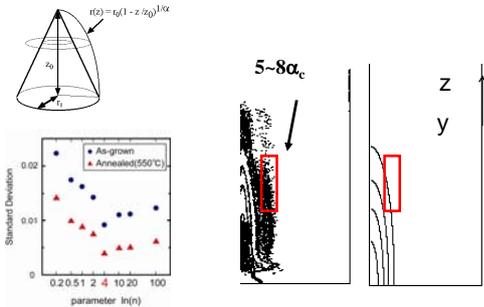


入射角  $\alpha_i \sim 0.25-0.5^\circ$

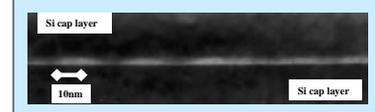
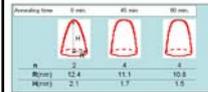
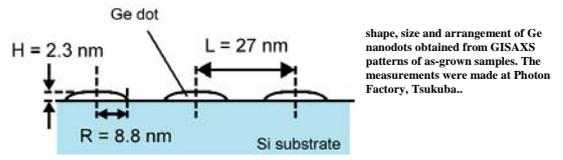
- 反射率が2桁落ちる領域である
- 動力学補正項がYonedaライン近傍以外で無視できると期待される。

### BAによる形状解析

入射方向を面内で変化させても強度に変化はない  
→ 非ファセット形状



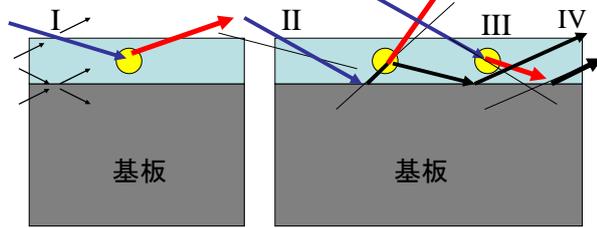
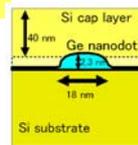
### GISAXSのBAによる形状解析結果



Bright-field image of cross-sectional TEM of as-grown Ge nanodots. The shape of the nanodot was a flat dome, with a radius of about 10 nm in-plane and about 2 nm in height.

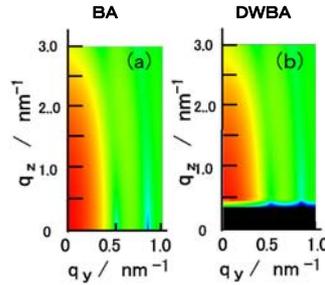
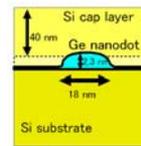
### 散乱強度分布の検討(DWBA)

- 反射率で得られた膜構造、BAで得られたドット構造をもとにDWBAによるモデル計算をおこなう。

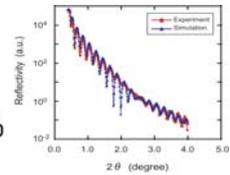


### 計算結果 I

単一ナノドットに対するBA/DWBAパターン ( $\alpha_i = 0.48^\circ$ )



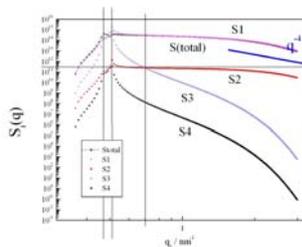
$\sigma$ : 表面 0.45 nm  
Cap/Dot 1.2 nm  
Dot/Sub 0.85 nm



### 計算結果 散乱強度

$$A(q, k_i, k_f) = -k_0^2(1 - n^2) \frac{e^{ik_0 r}}{4\pi r} \int d\vec{r}' A^0(r', -k_f) F(r') A^0(r', k_i)$$

- 散乱強度換算後の各部分散乱波の強度レベルの比較。
- 全散乱強度はS1(一回散乱波)で大部分説明されることが分かる。また、ラフネスの影響がどのように現れるかも明瞭。



### まとめ

- Siキャップに埋め込まれたGeナノドットの界面の詳細解析のため、BAに基づく形態解析と反射率解析をもとにDWBA解析をおこなった。
- 反射率から予想した高qzでのBAによるGISAXS解析の妥当性がより定量的に検証された。
- 多重散乱補正項に対する界面粗さの寄与がより明確となり、アニールに伴う形態変化の評価など、形状と界面が同時に変化する場合の効果の分離についての知見が得られた。