



超高感度・高温度安定性ホーエル素子用 InSb系半導体ウエハ

福岡大学 理学部 物理科学科
教授 眞砂卓史

ホール素子は、非接触センサとして、今やなくてはならない磁気センサ
その材料として、InSbやInAsの薄膜・単結晶薄膜、InAs量子井戸構造
(積層体)が使われてきた

我々の研究

InAsSbの量子井戸の電子輸送特性 (SbのAs置換 10%)

極低温でも伝導電子の存在を確認
電子移動度が高く、高感度

J. Crystal Growth 311, 1711 (2009).

InAsSbの量子井戸のバンド構造計算 (SbのAs置換 0~30%)

室温から極低温まで動作するホール素子の製作
が可能なことを見出した

AIP Advances 5, 067149 (2015).

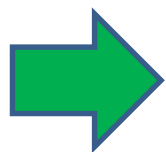
InAsSbの量子井戸のバンド構造計算 (SbのAs置換 0~100%)

高電子移動度を必要とするホール素子等のデバ
イス製作に好適と思われる組成範囲を見出した

特願2020-196657号

AIP Advances 11, 035213 (2021).

今回の特許



Introduction

ホール素子等半導体積層体の現状と課題

本技術内容

最適ウエハ構造(材料組成)の提案

特許情報等

半導体積層体の応用:

ホール素子等磁気センサ及び電子デバイス

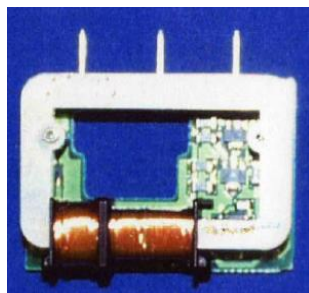
ホール素子: 磁気センサとして、応用は広い

→ 非接触電流センサにも適用可能

- **非接触**で磁気信号や電流を検出するセンサ
- **小型ホールモーターに必須**の制御用センサ
(ホールモーター: 高精度、高品質動力を実現)
- **パワーモーターの省電力化に必須**のセンサ
(環境負荷を低減: グリーンセンサ)



電子コンパス



市販の電流センサ例



小型モーター



各種位置決め、電流制御、
モーター制御

シンプルな動作原理と高信頼性 + 低コスト + 高感度・高精度

非接触磁気センサ → スイッチ、ロボテックス、セキュリティ応用

電子電機分野

高精度電子コンパス、開閉スイッチ等

動力・ロボット分野

車載用等、過酷条件での各部のモーターの回転制御

非接触電流センサ → IoT、スマートグリッド、電気機器、パワーモーター

電力分野

落雷等の危険の検出に微弱電流検出
使用量リアルタイムモニタによる切断タイムラグ軽減

IoT分野

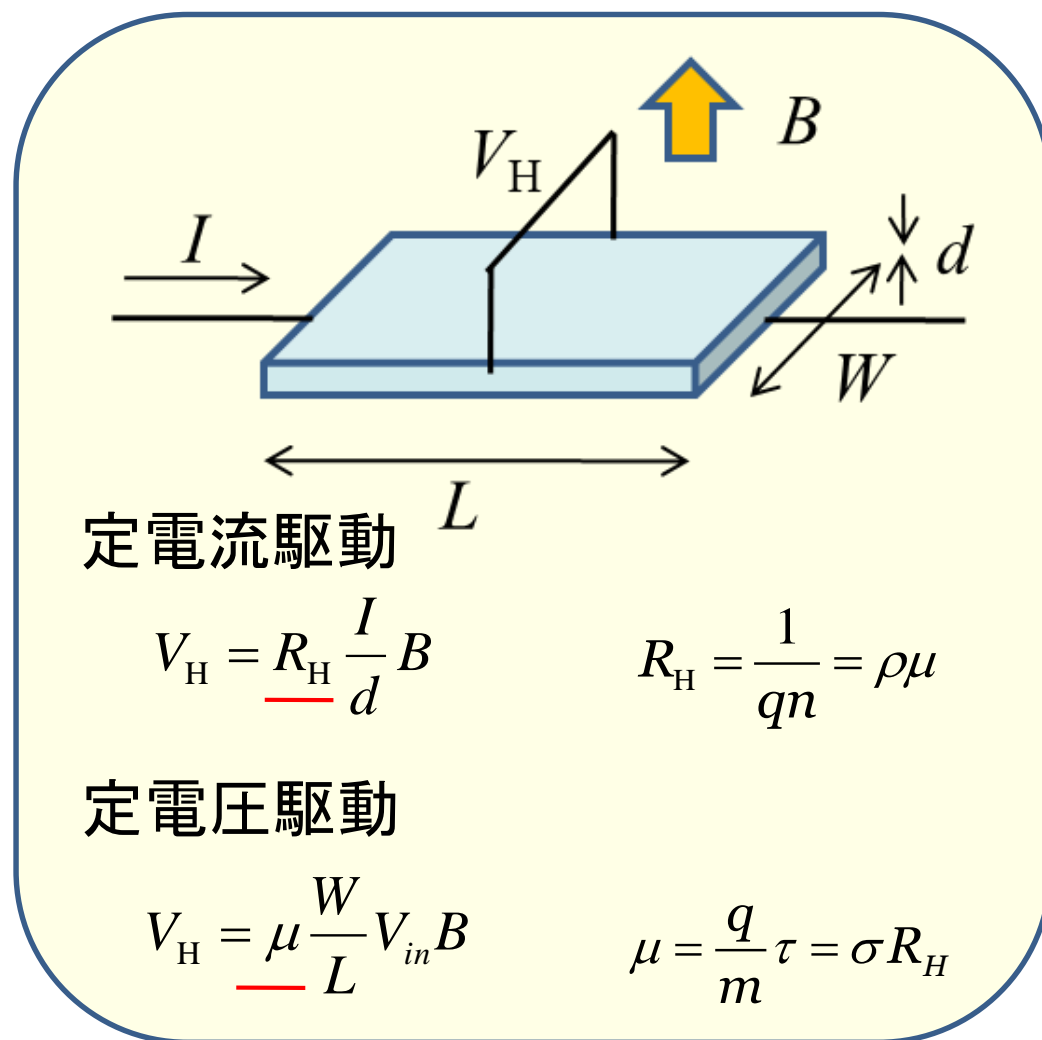
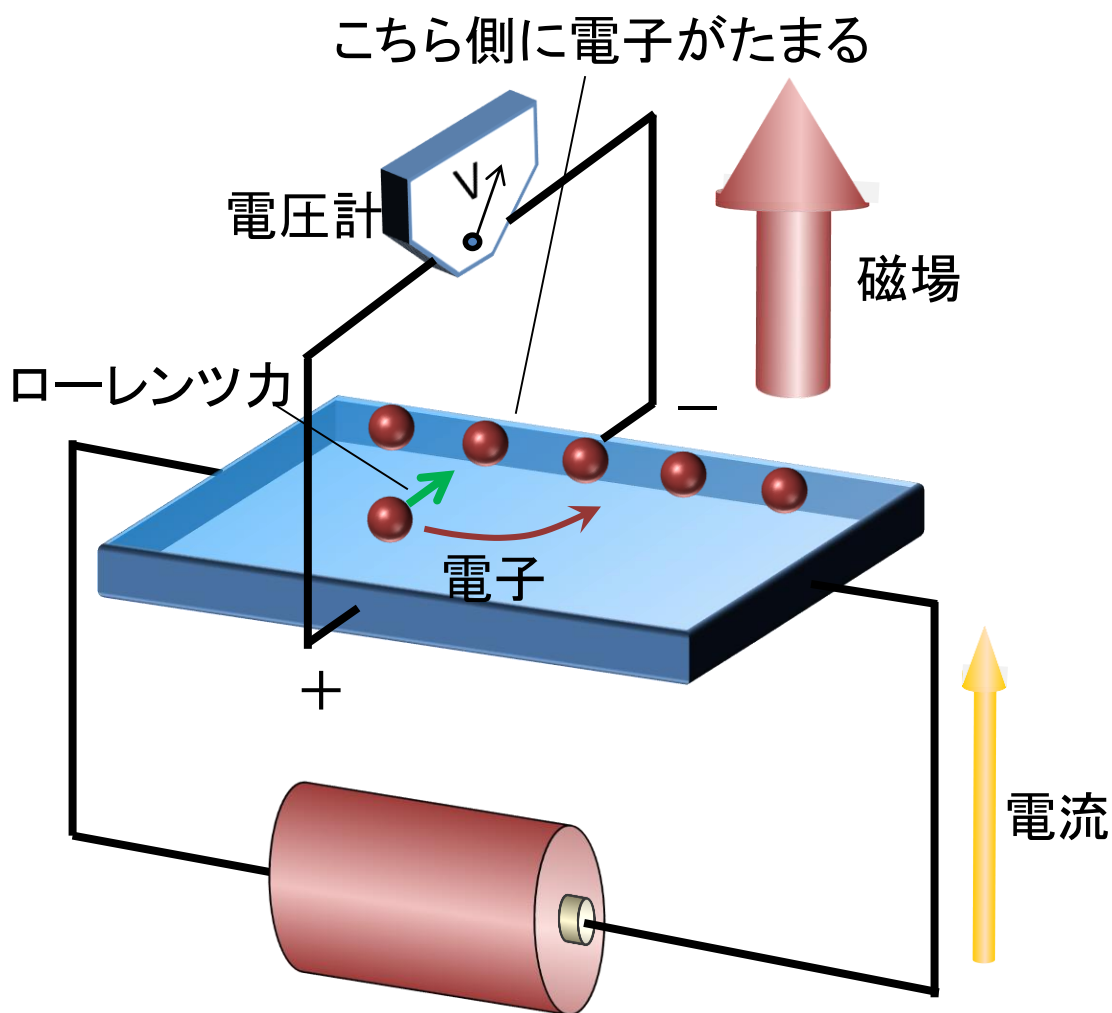
電子機器の微小電流検出による稼働状況検出、過電流計測等

鉄道分野

インバータモーターの省エネ駆動のためのモーター駆動電流の検出
信号機や転轍機などで配線のトラブルなどを検出する電流センサ

ホール素子の原理

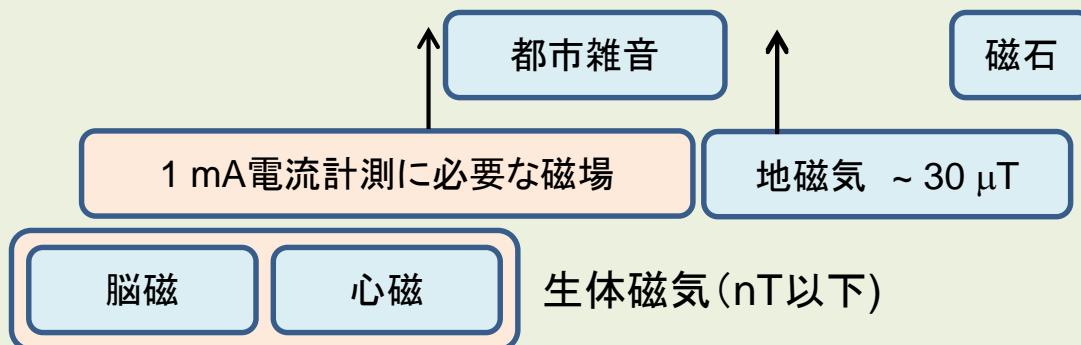
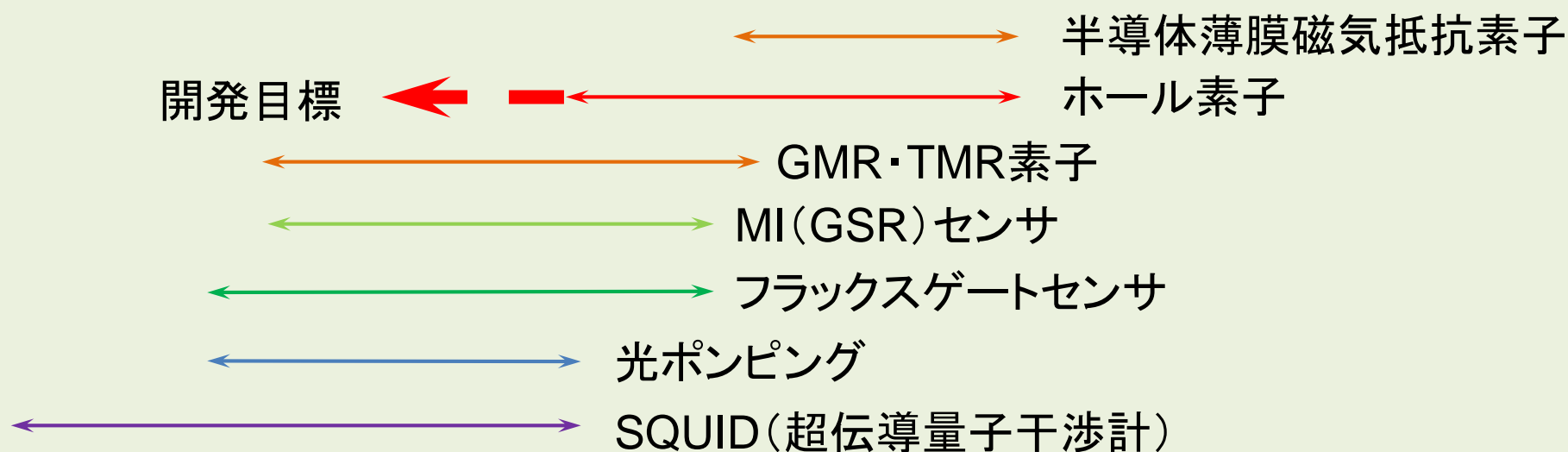
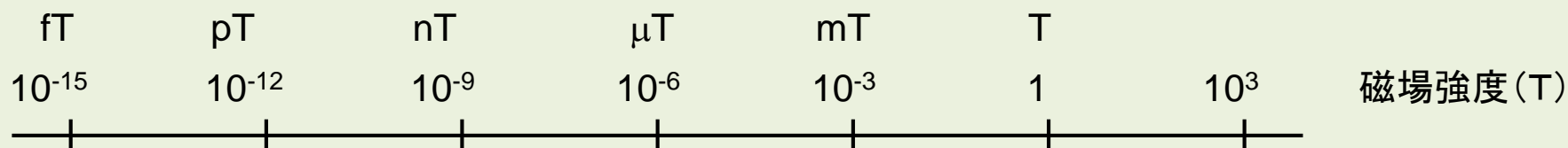
ホール素子： 磁場に対する、電圧の応答を利用した磁気センサ



移動度 μ が大きいほど高感度！

競合技術との比較(感度)

各種磁気センサの磁気感度と本研究の目指す領域

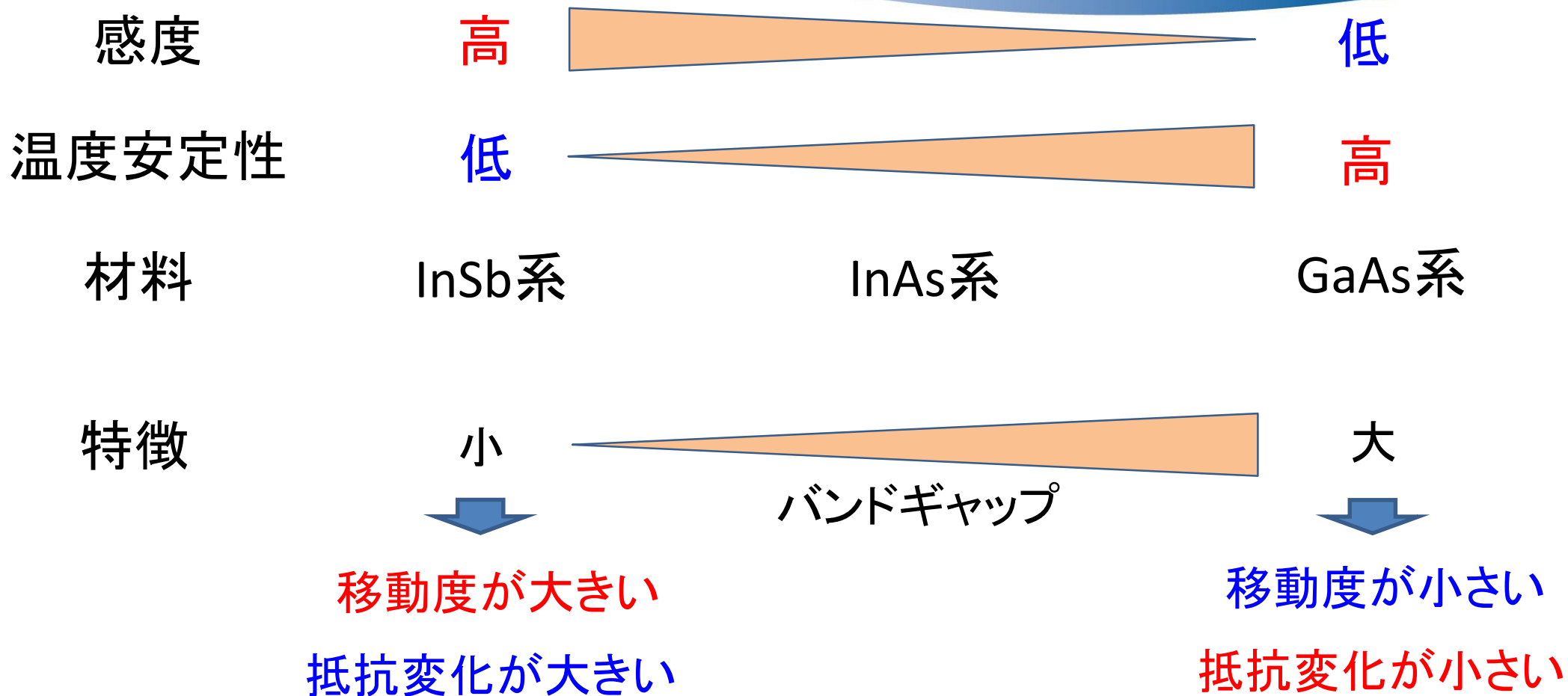


競合技術との比較(まとめ)

磁気センサ	長所	短所・他コメント
ホール素子	超小型可、高空間分解能、高磁場可、低コスト、生産性高、幅広い用途に対応可、品種も豊富	高感度InSb系は駆動温度域が狭い : 100°C程度まで
半導体薄膜磁気抵抗素子	小型可、バイアス磁界下で超高精度センサも可、汎用性、低コスト、高磁場可 (材料開発としてはホール素子と共通)	低磁界での利用が難しい リニア応答にはバイアス磁界利用
GMR・TMR素子	超小型可、高感度、生産性高、比較的 low コスト	積層膜構造が複雑 (高度な微細加工技術が必要)、線形性の問題、感度範囲が狭い
MI(GSR)センサ	高感度可能	~mmサイズ、生産性劣る、高感度になると高コスト
フラックスゲートセンサ	超高感度	~cmサイズ、空間分解能悪、移動体不向き、特殊用途
光ポンピング	超高感度	~cmサイズ、低ダイナミックレンジ、高コスト、特殊用途
SQUID	超高感度	極低温必要、装置大型化、超高コスト、研究・医療用

— 特殊用途 —

ホール素子材料:これまでの技術



ドーピング : キャリア濃度の変化の割合を抑制

→ 温度安定性改善、井戸層ドーピングだと移動度若干低下

JAP 117, 065701 (2015)

高感度と高い温度安定性を両立させたい

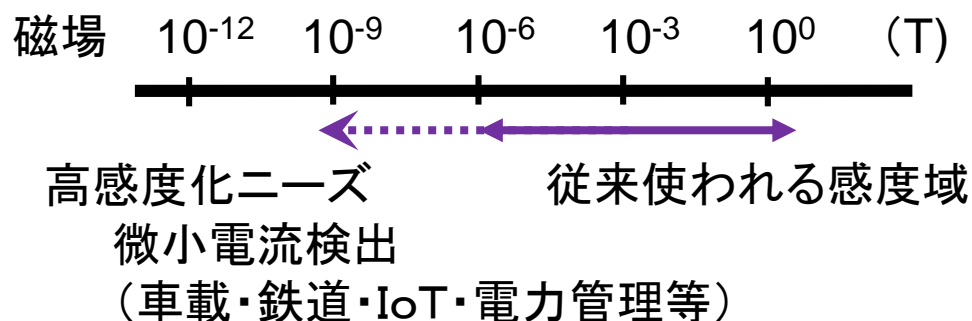
ウエハの特性改善への要望

さらなる高感度化

微小電流の非接触検出

移動度の向上

単結晶化、量子井戸化、低バンドギャップ化

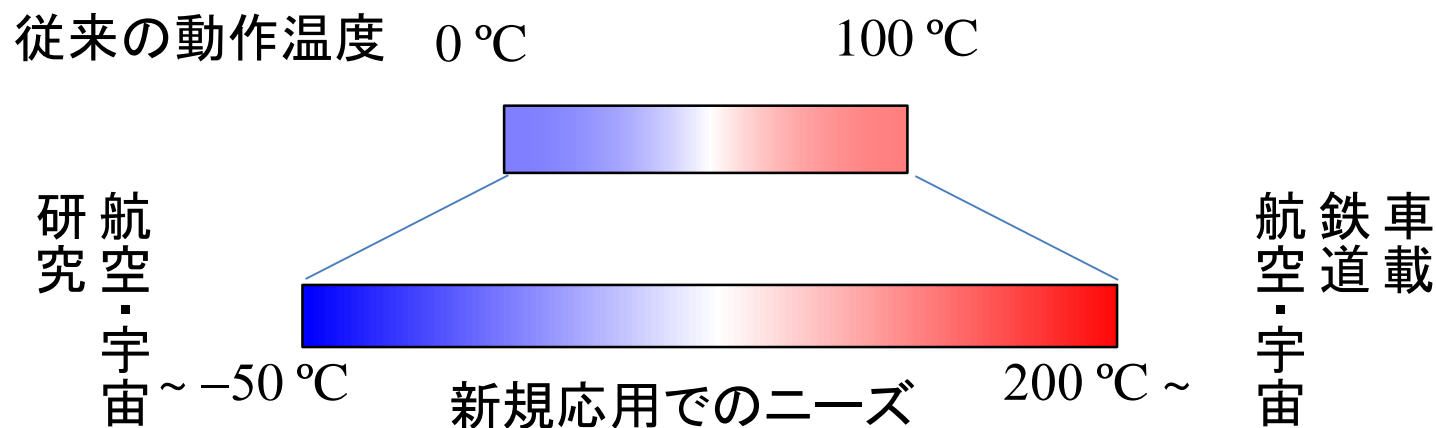


動作温度領域の拡大

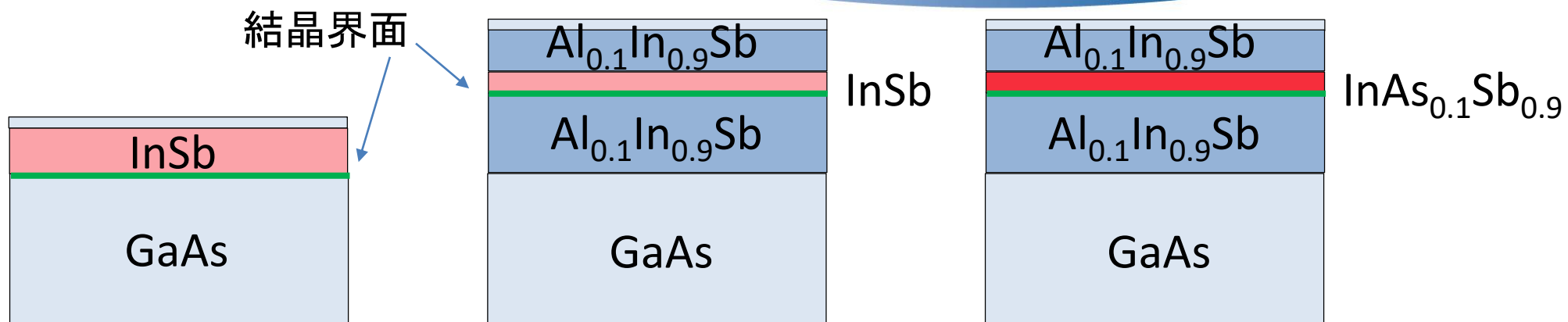
車載用途など

キャリア密度変化の抑制

ドーピング？、ワイドバンドギャップ化 ×



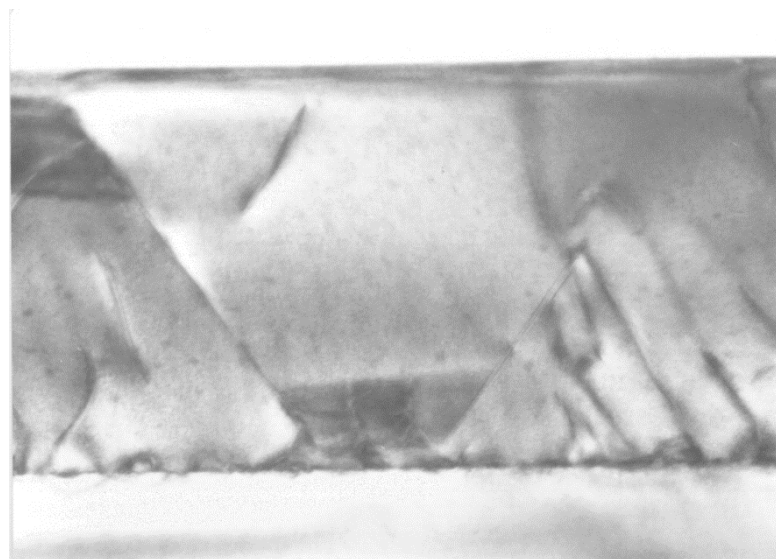
ウエハの単結晶化・量子井戸化



格子ミスマッチ 14%

0.5%

0%

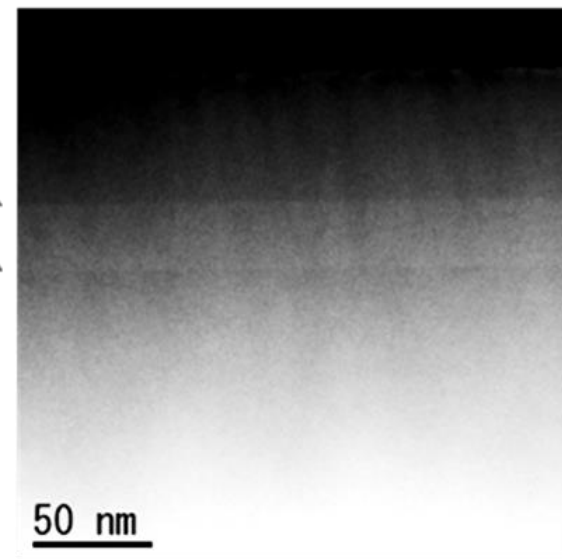
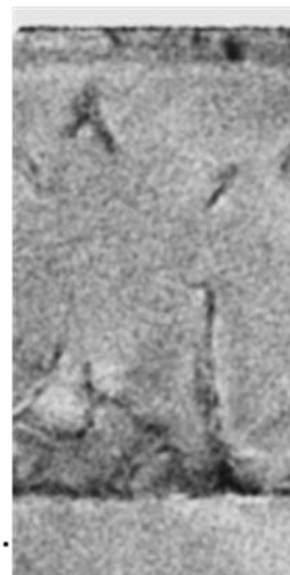


200nm

AllnSb
InAsSb=

AllnSb

GaAs sub.

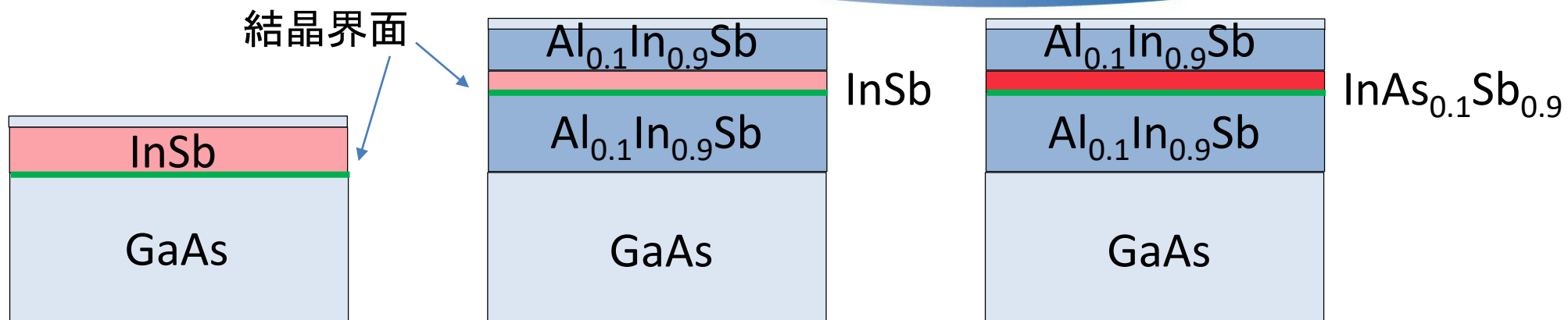


50 nm

InSb層に多数の欠陥

量子井戸層の欠陥は激減！

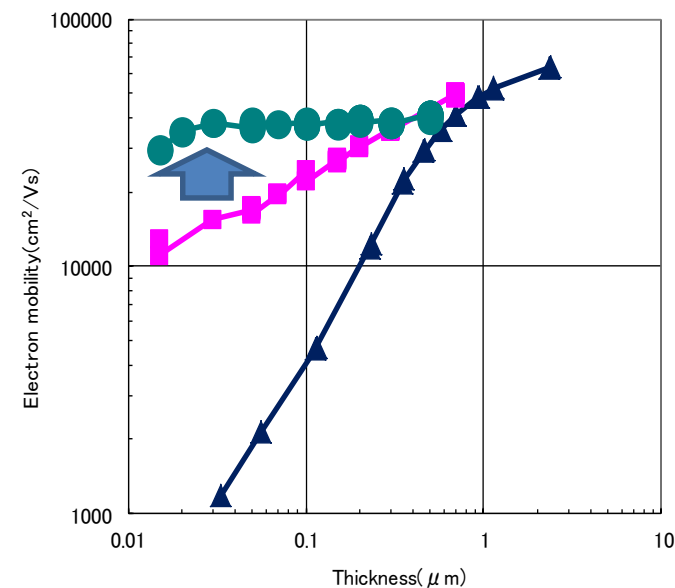
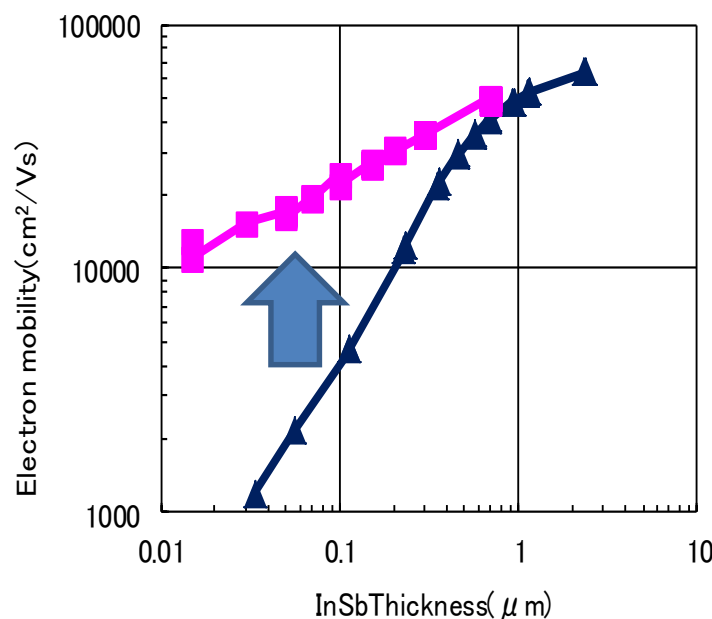
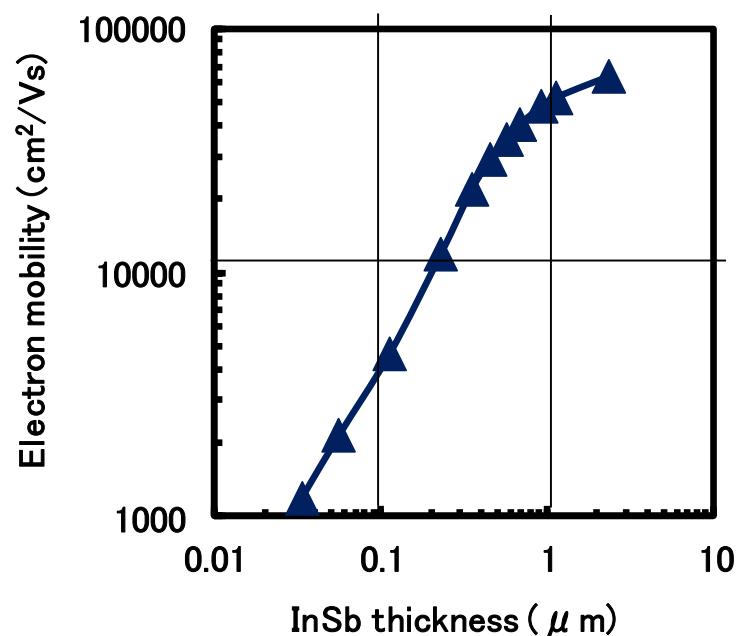
ウエハの単結晶化・量子井戸化



格子ミスマッチ 14%

0.5%

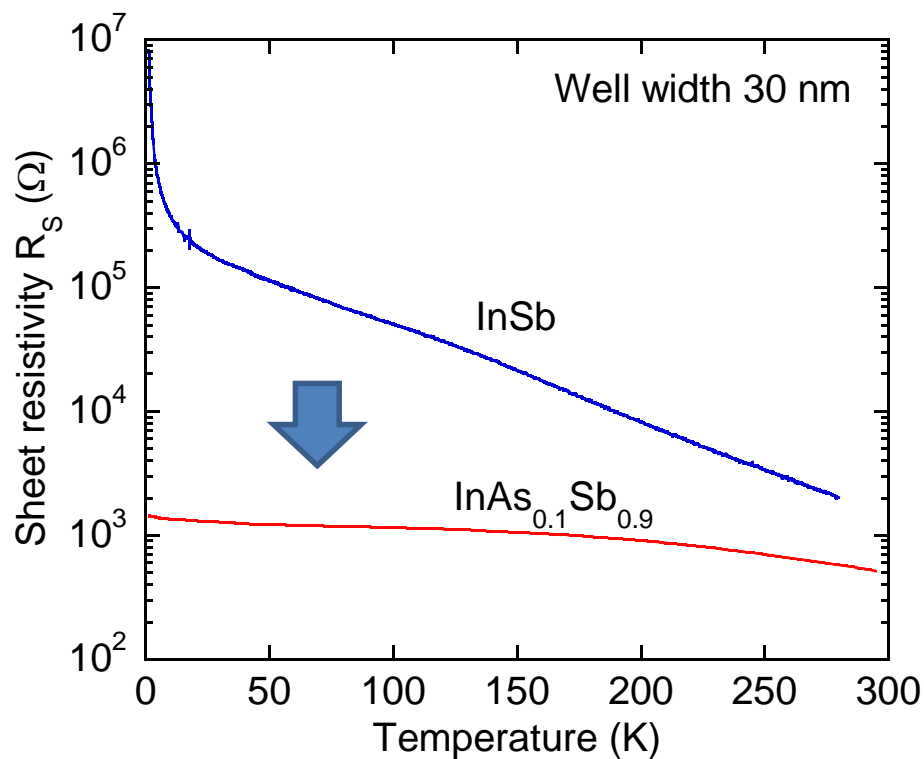
0%



移動度が大幅改善！（特に薄い膜）

InAs_{0.1}Sb_{0.9}/Al_{0.1}In_{0.9}Sb量子井戸

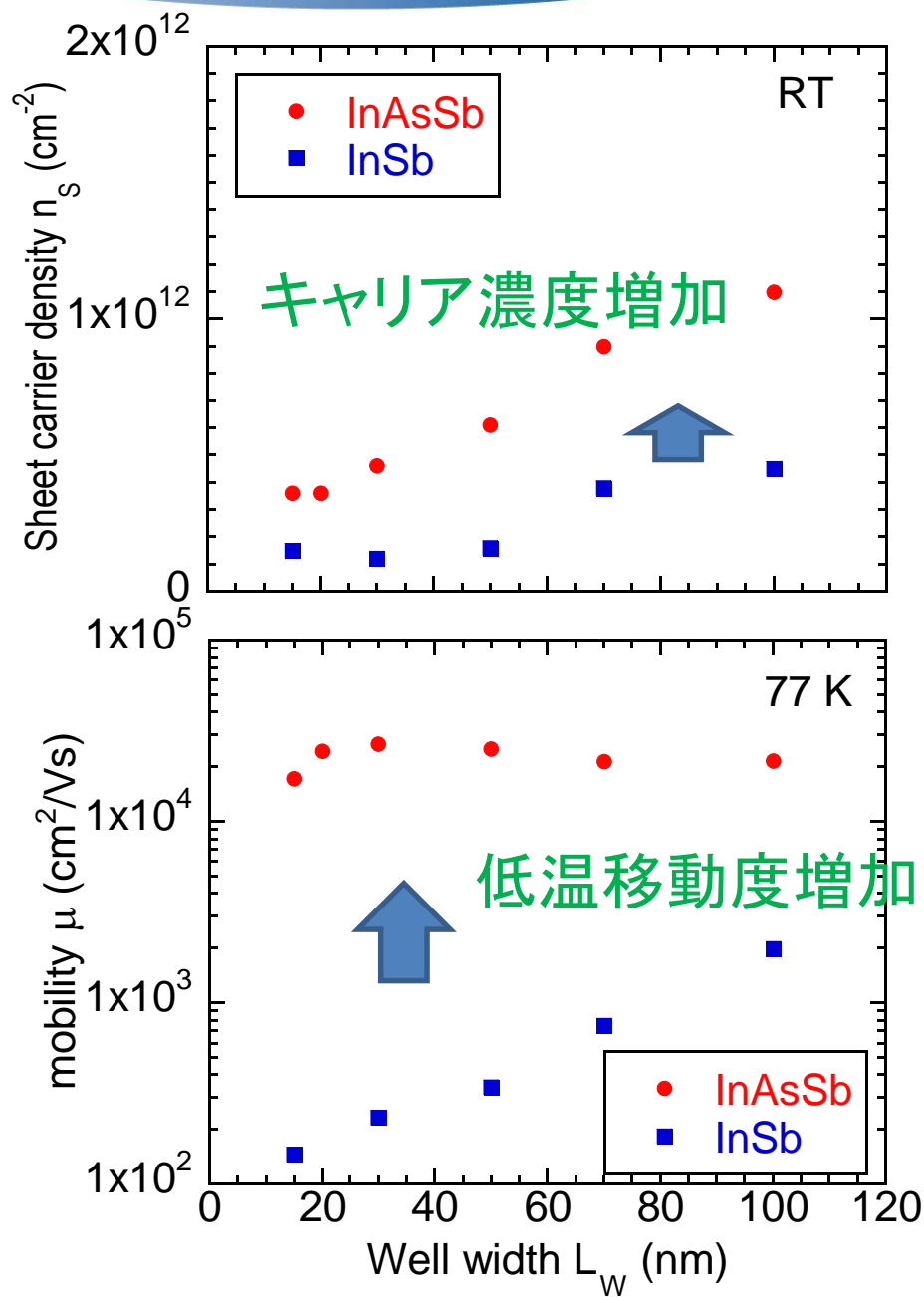
Sb→As置換効果(実験)



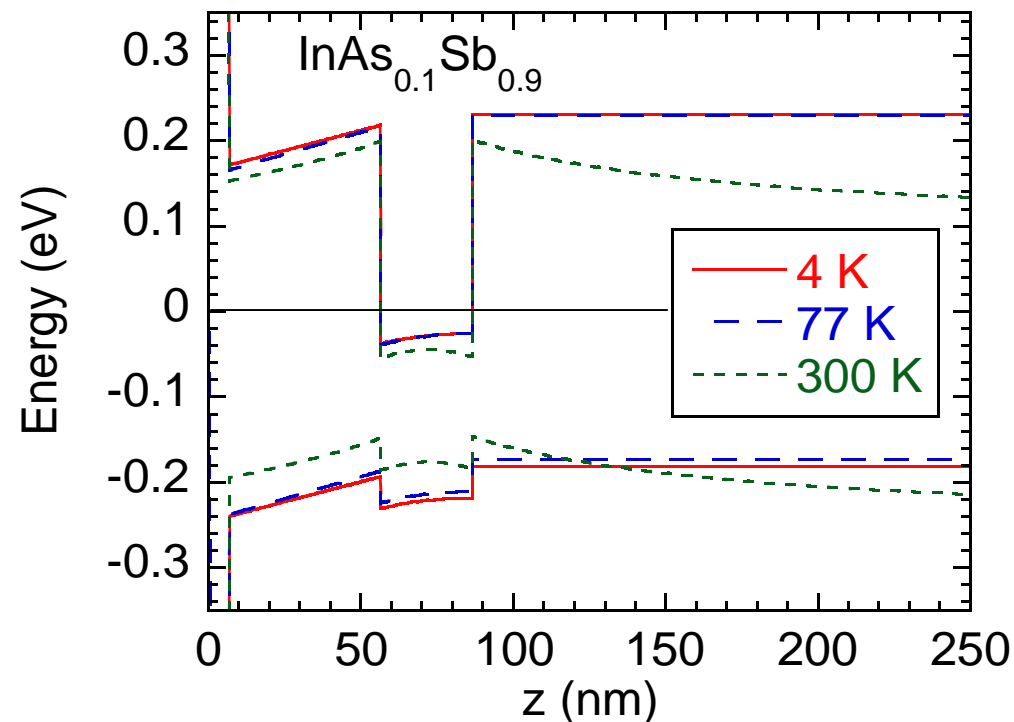
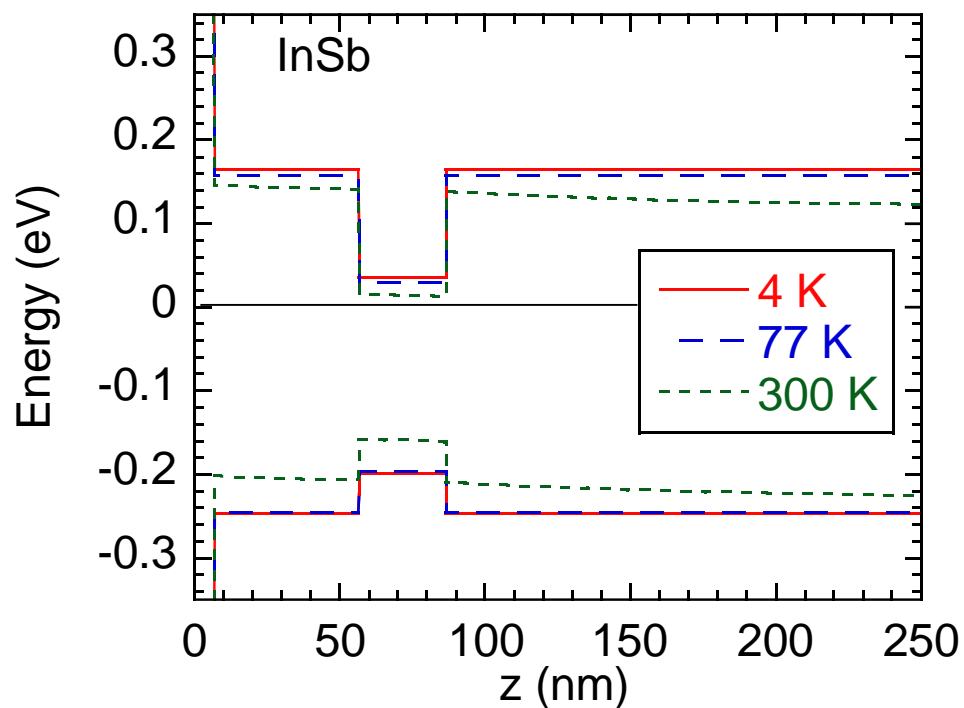
抵抗は劇的に減少
温度変化はゆるやかに

キャリア濃度、移動度が増加

AIP Advances 5, 067149 (2015).



Sb→As置換効果(バンド計算)



Type II QWに変化
井戸層の底がフェルミレベルより下になる
低温での空孔化を防ぐ・温度安定性増加

本研究内容

InAsSb/AlInSb量子井戸構造を、井戸層、障壁層の全組成範囲のバンド計算から最適条件を検討

新技術の特徴

最適な組成組み合わせ条件を提案

低温でも十分なキャリア密度の確保
移動度向上に資するバンド構造



極低温で使用可能なホールセンサ
さらなる高感度と高い温度安定性の両立

Introduction

ホール素子等半導体積層体の現状と課題

本技術内容

最適ウエハ構造(材料組成)の提案

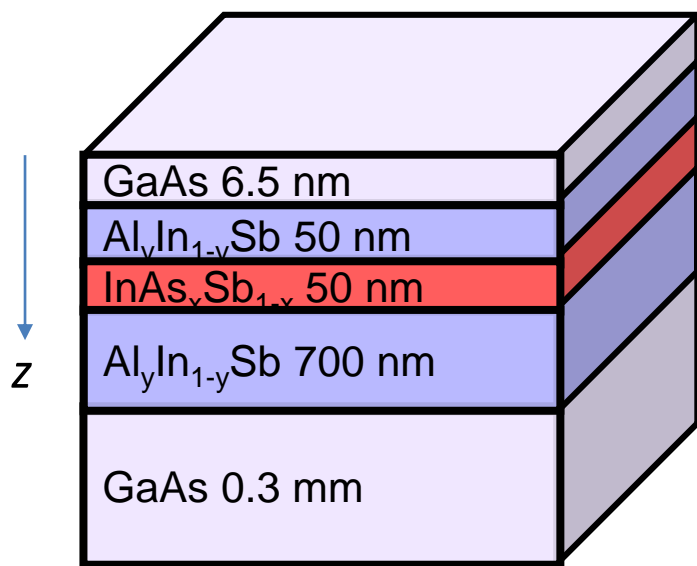
特許情報等

バンドダイアグラム計算

Poisson-Schrödinger方程式計算プログラム
Nextnano3 (<http://www.nextnano.de/>)

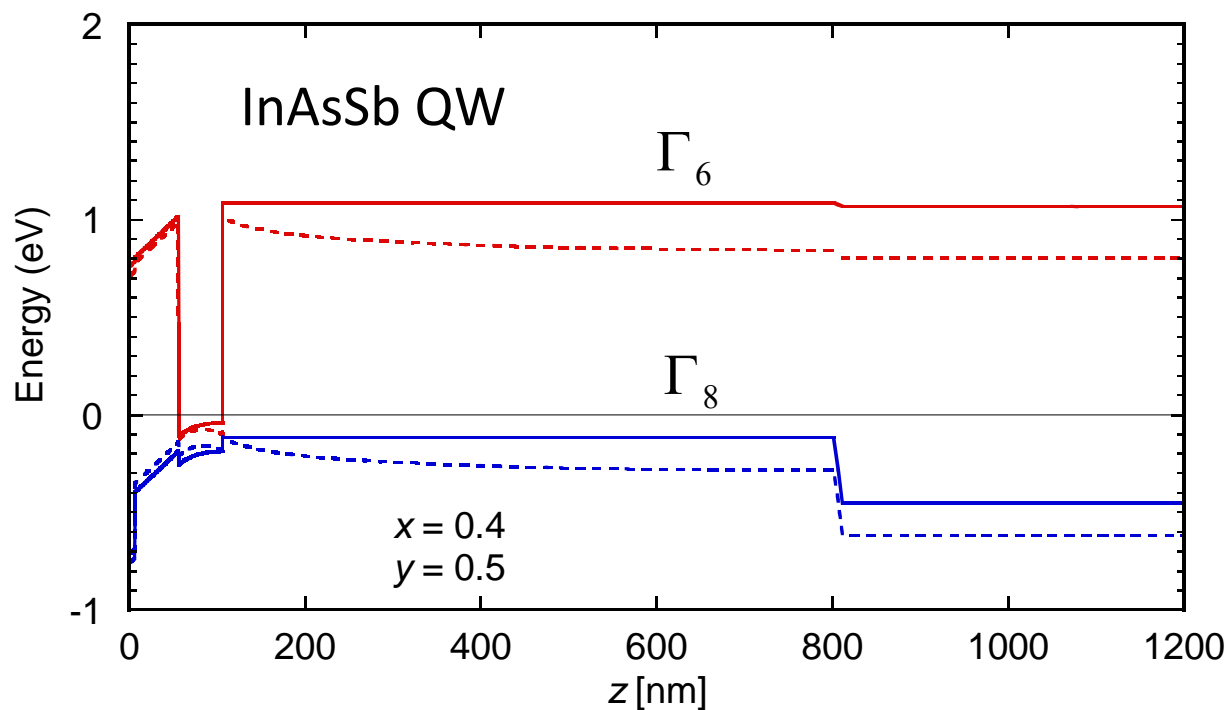
- 仮定 -

1. 下記のような積層構造
2. 表面準位はmid gapでピン止め(GaAsの表面準位)
3. ひずみは考慮にいていない



井戸層 InAs_xSb_{1-x} : 0 ≤ x ≤ 1
障壁層 Al_yIn_{1-y}Sb : 0 ≤ y ≤ 1

今回は50 nmとしてが、井戸幅は大きくても構わない



狭バンドギャップ化

バンドギャップが小さいほど、有効質量が小さくなる。

→ 移動度増大、感度向上

バンドのbowing効果

InSb

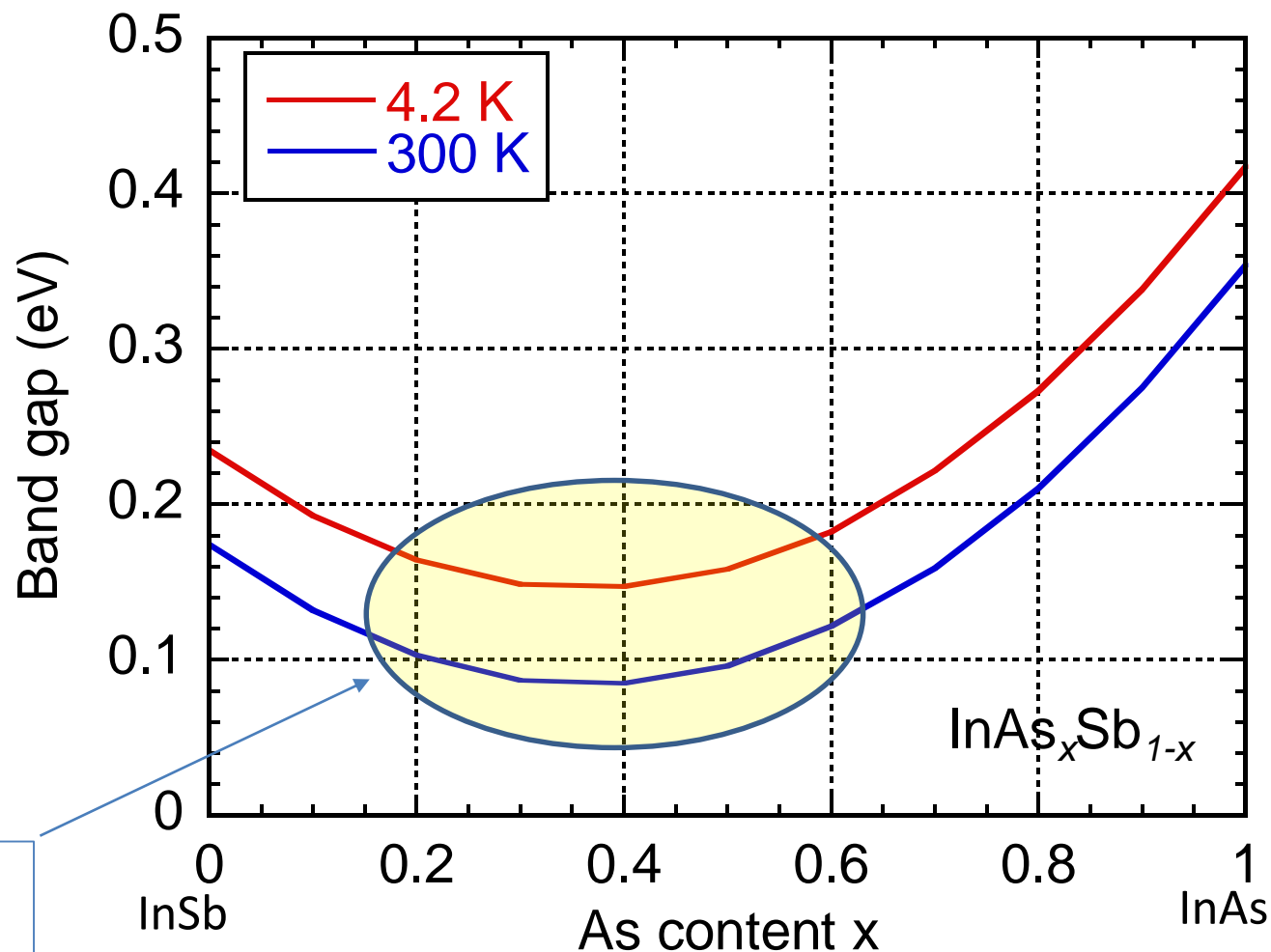


InAsSb

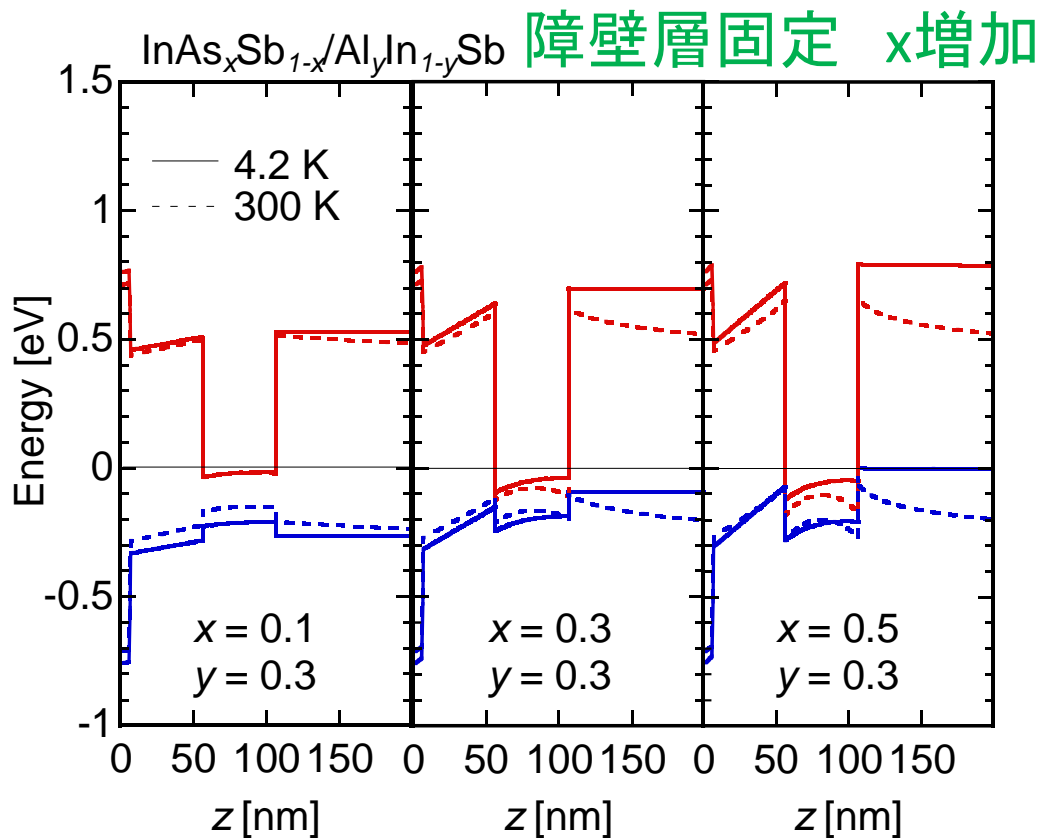
InSbより小さい
バンドギャップを
実現可能

新規材料狙い目

$0.2 \leq x \leq 0.6$ が好適



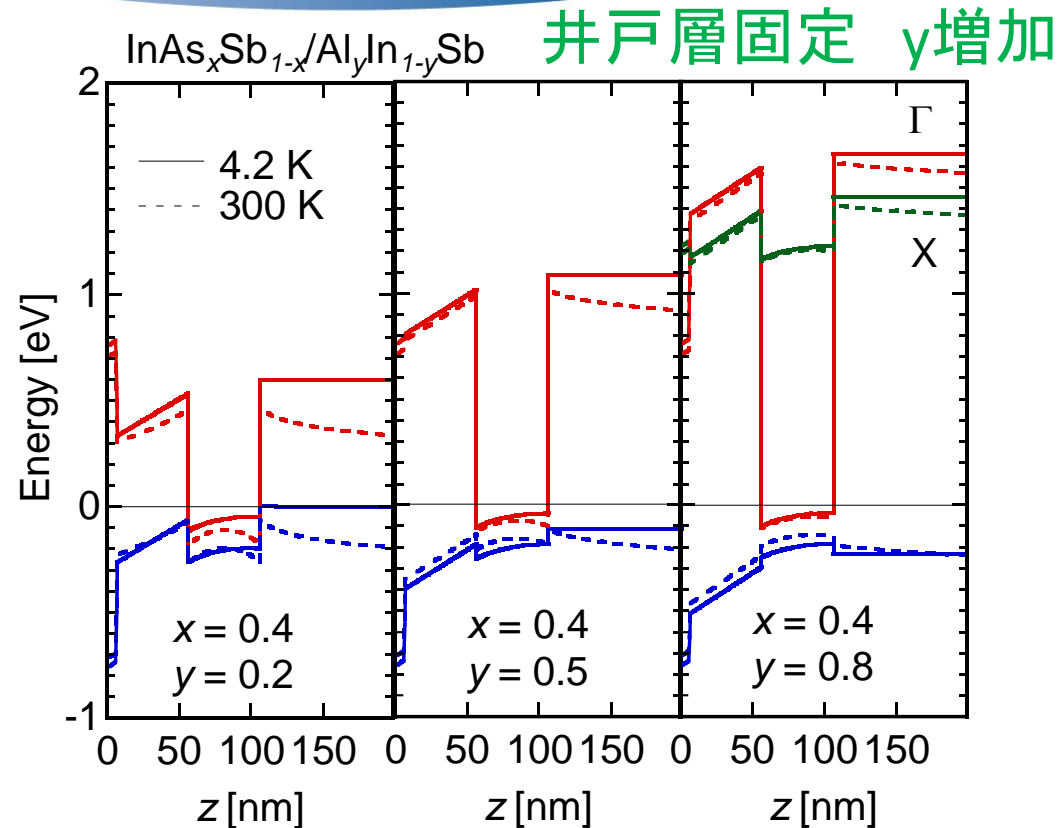
InAs_xSb_{1-x}/Al_yIn_{1-y}Sb量子井戸



InAsSb層のバンドギャップ位置が下がる。
ドーピングなしで、ドーピングの効果！



空乏化しないため、低温で使用可能。
抵抗の温度特性の安定化



バリア高さが増加。
キャリアの閉じこめ効果の増大。
界面散乱の抑制。



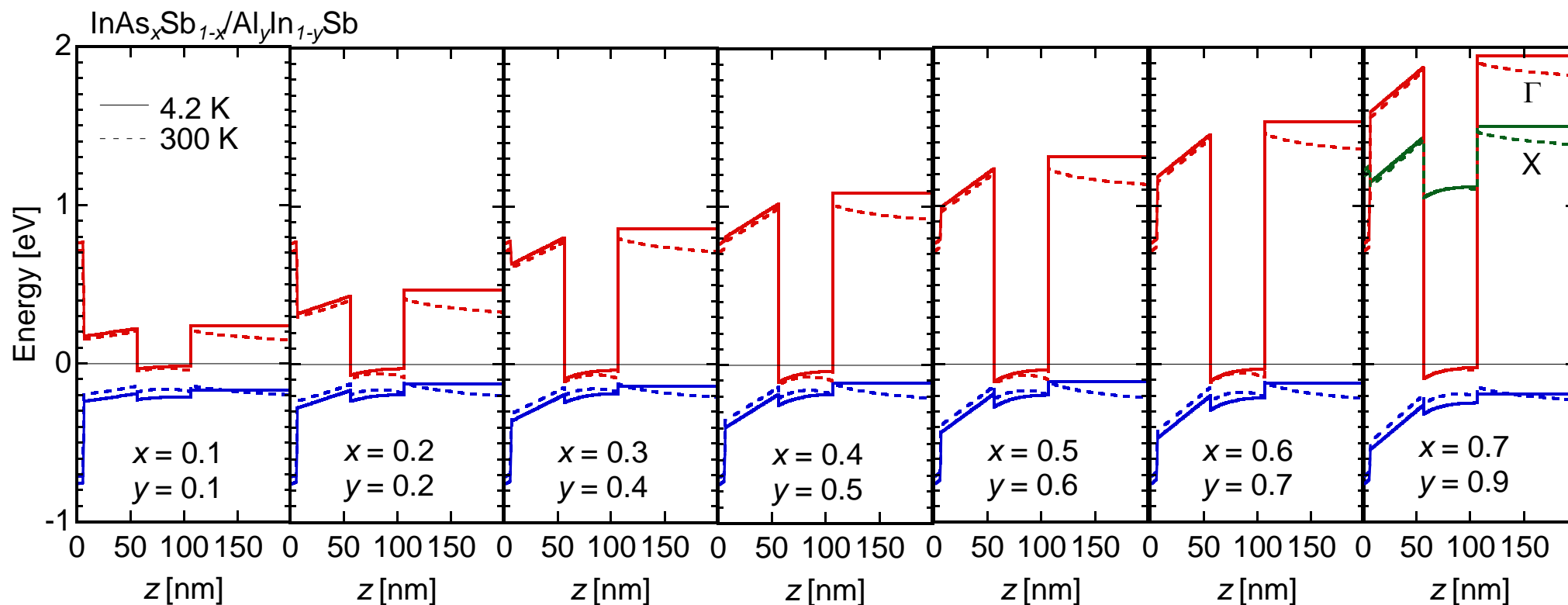
移動度の向上

格子整合 $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}/\text{Al}_y\text{In}_{1-y}\text{Sb}$ 量子井戸

$x-0.1 \leq y \leq x+0.2$ あたりが格子整合がよい。
(高品質な結晶が作れる。実用範囲)

(最適: $y \sim 1.22x$)

格子整合が良いと思われる組成の量子井戸バンドダイアグラム



バンド構造: いずれもType II
(井戸の伝導帯底が E_f より下、バリア障壁高め)



低温でも良い伝導性

井戸タイプの変化とシートキャリア密度

As content x of $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}$ @4.2 K

$\times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
0	0	0.946	2.13	4.55					
0.1	0	0.928	2.09	3.05	5.74	Broken gap			
0.2	0	0.910	2.05	2.97	4.10				
0.3	0	0.892	2.00	2.91	3.63	4.59			
0.4		0.873	1.96	2.85	3.55	4.09	4.44	4.68	
0.5			1.92	2.78	3.47	3.99	4.33	4.45	
0.6				2.71	3.38	3.89	4.22	4.33	キャリア密度減少
0.7					3.30	3.79	4.10	4.21	4.09
0.8			Type I			3.68	3.99	4.09	3.97
0.9						3.58	3.87	3.97	3.84
1							3.75	3.84	3.72

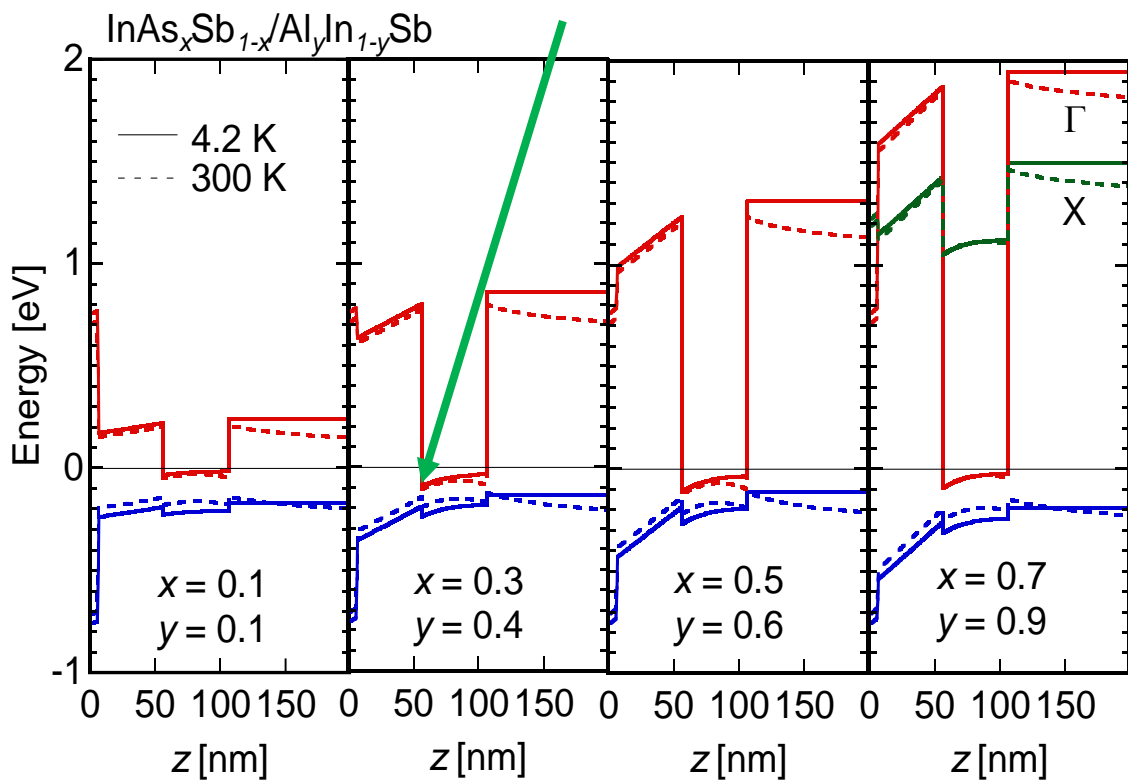
Vegard側を考えると格子整合のよい組成は、 $y \sim 1.22x$

Type II

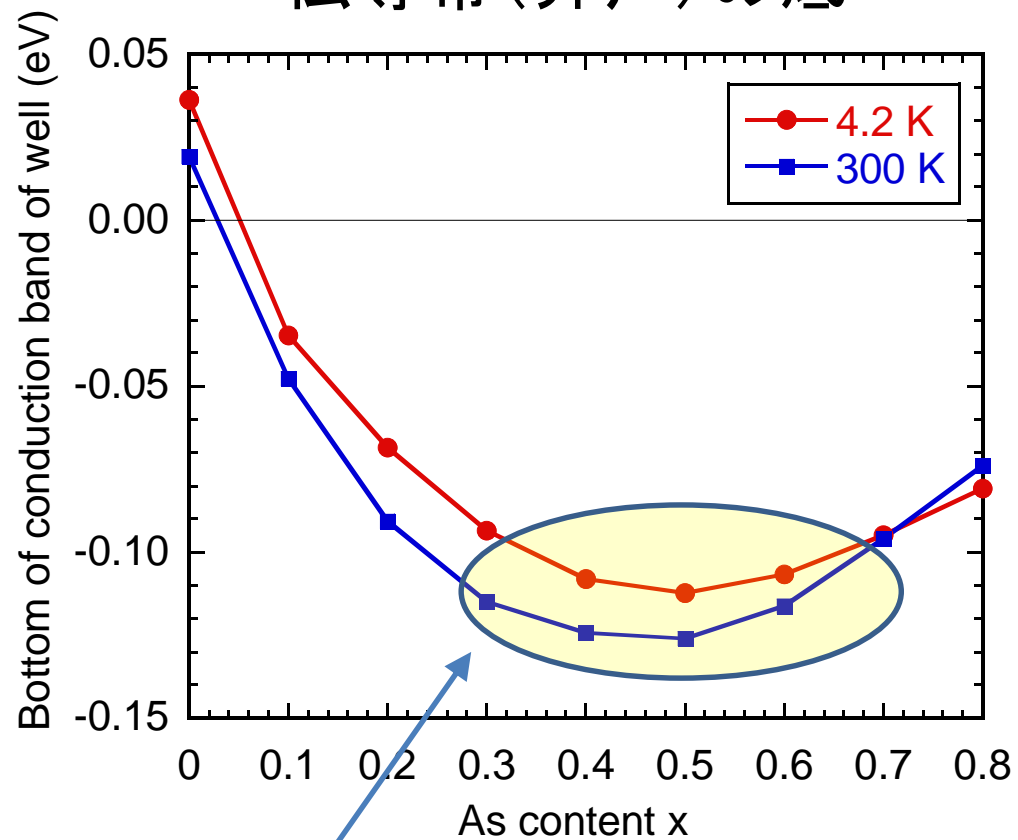
格子整合のよい領域の組成は、Type II

井戸特性検討 (格子整合量子井戸)

井戸の底の深さ



伝導帯(井戸)の底

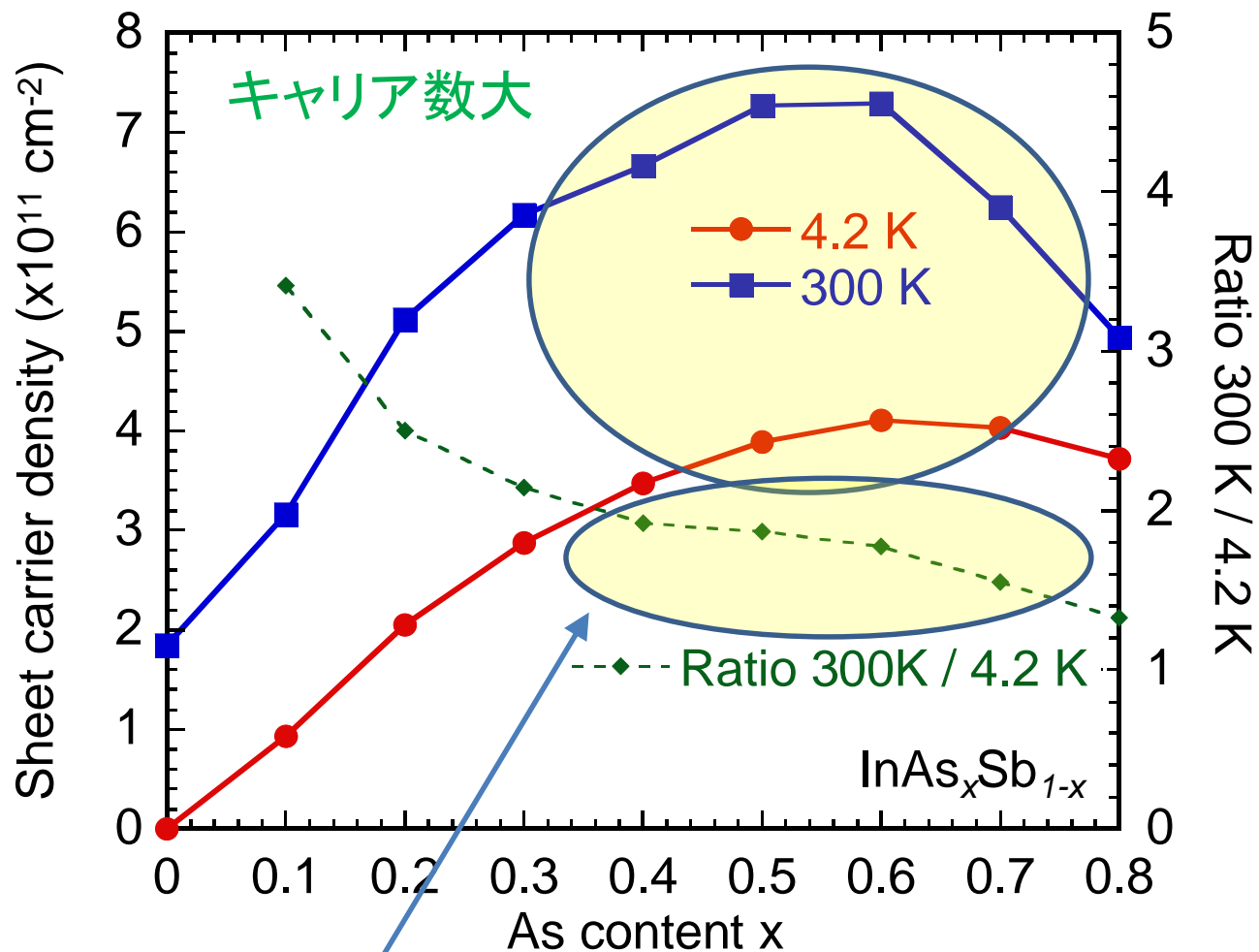


バンドがフェルミレベルより十分下。
深いほど電子がたまる。

→ キャリア密度増大に貢献

キャリア密度検討 (格子整合量子井戸)

キャリア密度の変化



キャリア数大

キャリア密度増大

→ 温度変化に強い

移動度の低温での
低下抑制にも貢献

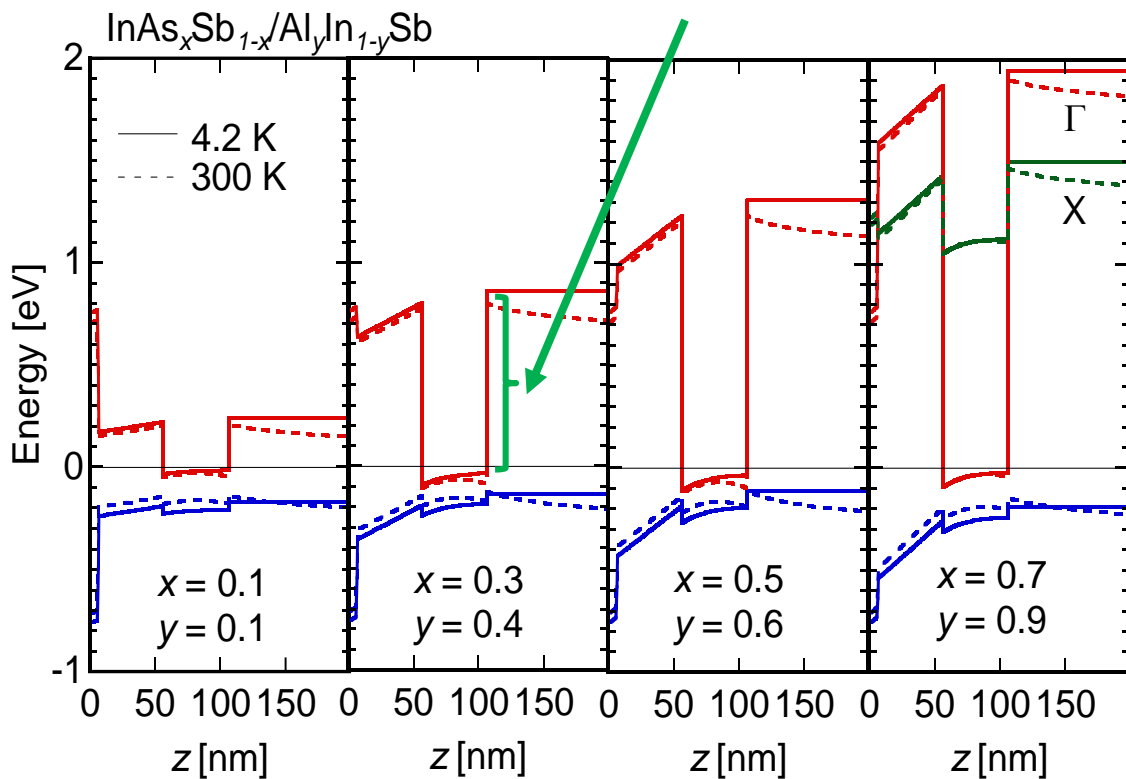
(界面トラップサイトを埋めて
界面散乱抑制)

$x \geq 0.4$ が好適

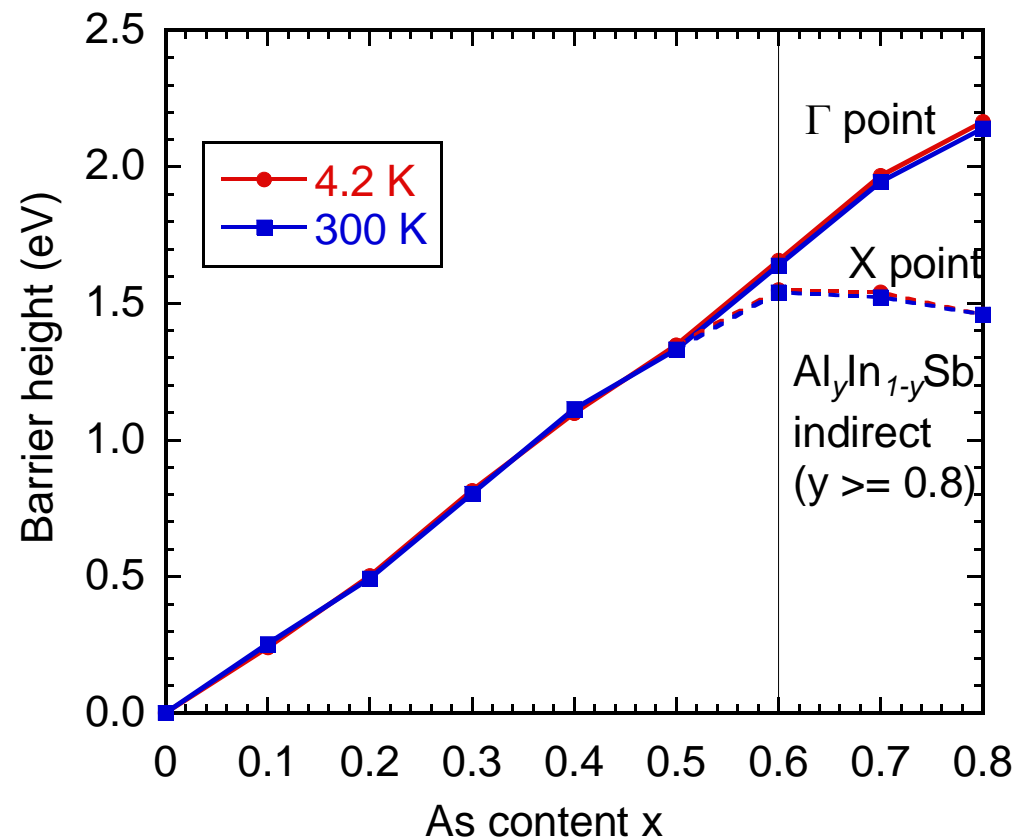
低温と室温のキャリア数変化が十分小さくなっている。

バリア高さ検討 (格子整合量子井戸)

バリア高さ



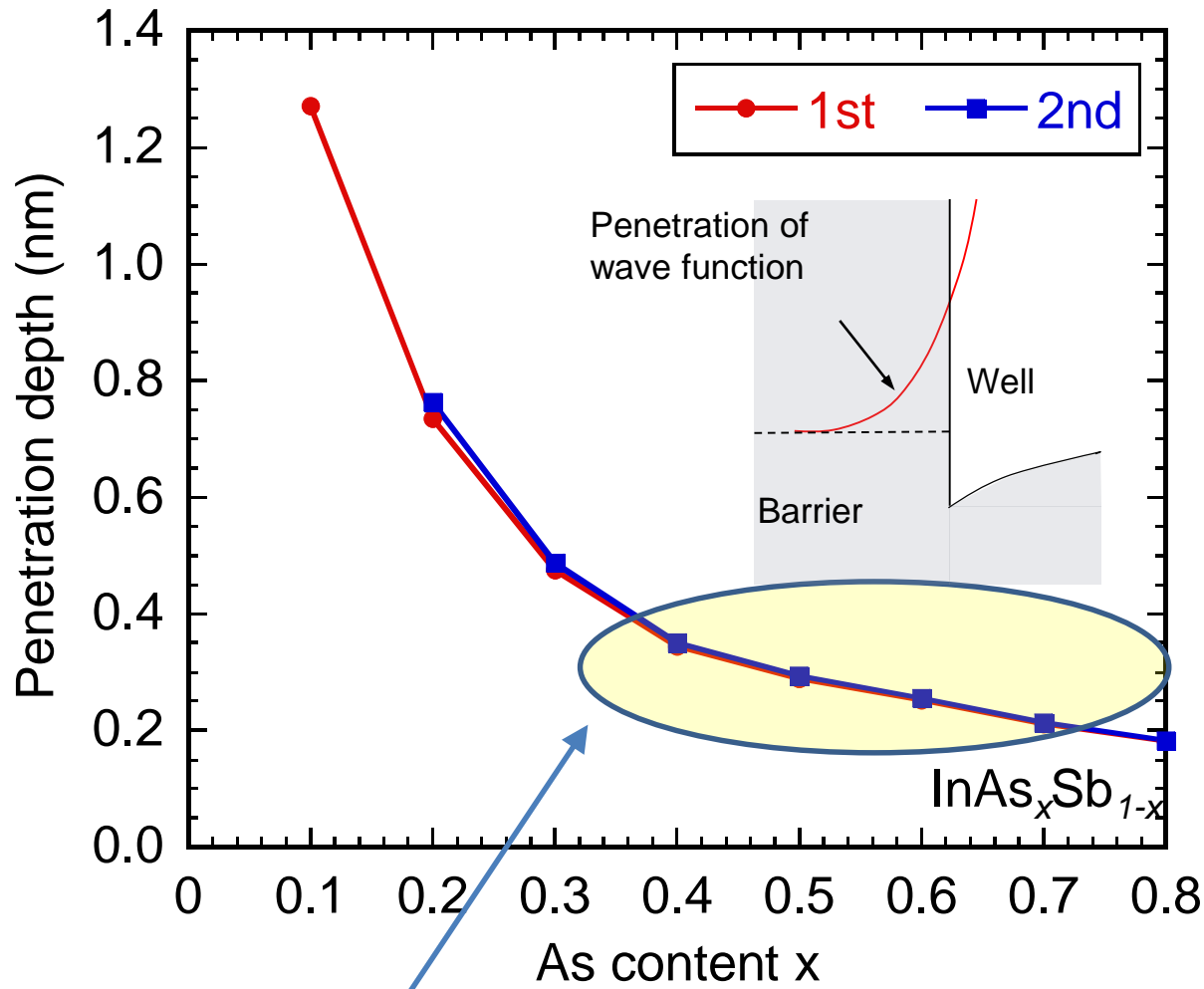
バリア高さの変化



x は大きいほど高くなる。

高い障壁層 → 障壁層でのIntrinsic電子の励起減少
(キャリア密度の温度安定性の向上)

波動関数侵入長



電子の波動関数しみこみはこの辺りで十分小さい

高い障壁層



侵入長減少



界面散乱の抑制
移動度向上に貢献

$x \geq 0.4$ が好適

InAs_xSb_{1-x}/Al_yIn_{1-y}Sb量子井戸まとめ

バンドギャップの観点(低有効質量)

$$0.2 \leq x \leq 0.6$$

キャリア密度の観点(温度特性の改善)

$$x \geq 0.4$$

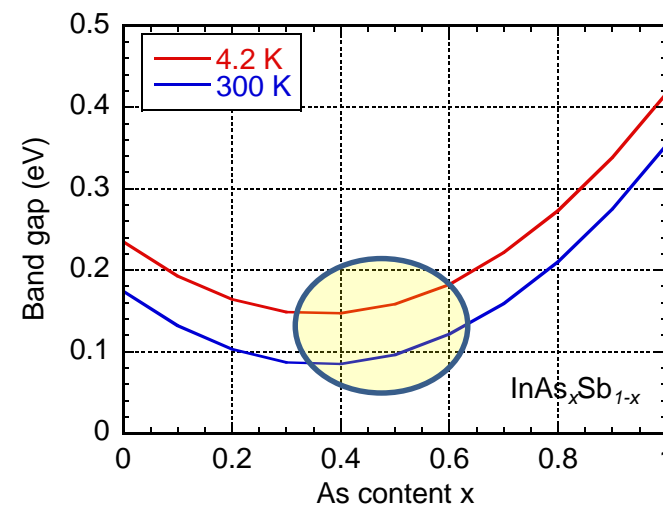
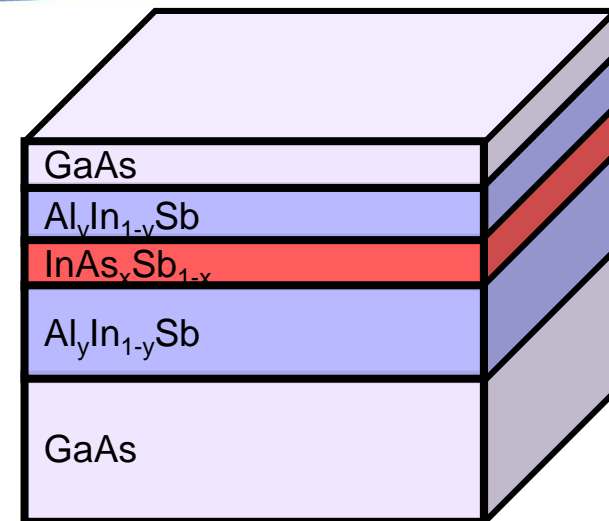
バリア高さの観点(界面散乱の抑制)

$$x \geq 0.4$$

格子整合の観点(散乱抑制)

Vegard側 $y \sim 1.22x$

$$y = x + 0.1 \quad (0.3 \leq x \leq 0.6)$$



最適組成組み合わせ

InAs_xSb_{1-x}/Al_yIn_{1-y}Sb QW

$$x = 0.4 - 0.6$$

(このときの $y = x + 0.1$)

これまでの結果から、本組成範囲のウエハを作製できれば、**従来のホール素子等のデバイスの特性を大きく向上し、応用分野が広がるのは間違いない。**

しかし、本組成範囲のウエハ作製はまだ行われていない。

実用化に向けた課題

- ウエハ作製
- 実際のウエハ特性の確認

企業への期待

- ウエハの試作
- 素子駆動方法を含めた高感度化への共同研究
- 微小電流センサへのパッケージ化の共同研究

Introduction

ホール素子等半導体積層体の現状と課題

本技術内容

最適ウエハ構造(材料組成)の提案

特許情報等

- 発明の名称 : 半導体積層体
- 出願番号 : 特願2020-196657号
- 出願人 : 学校法人福岡大学
- 発明者 : 真砂卓史、笠原健司、柴崎一郎

お問い合わせ先

福岡大学

産学官連携センター

TEL: 092-871-6631 (代表)

Fax: 092-866-2308

e-mail: sanchi@adm.fukuoka-u.ac.jp