

ナノテクノロジーにもとづく 量子コンピュータ開発

伊藤公平

Kohei M. Itoh

慶應義塾大学物理情報工学科
科学技術振興事業団 戦略的創造研究推進事業

共同研究者

慶大理工 阿部英介, 松本佳直, 東北大通研 大野裕三, 大野英男,
スタンフォード大 山本喜久, 新潟大工学部 佐々木進

平成15年2月3日 第一回ナノテクノロジー総合シンポジウム (JAPAN NANO 2003)

発表内容

1. 量子コンピュータ研究の現状
2. $15 \times 3 \times 5$ の素因数分解
3. 量子コンピュータのいくつかの例
4. 全シリコン量子コンピュータ
All-Silicon Quantum Computer
5. まとめ

なぜ注目されるか？

量子力学の根幹を試す実験

量子系のコンピュータシミュレーション

暗号技術に密接に関連

秘密鍵 二人だけで鍵を共有する
鍵を管理すれば安全!
どうやって鍵を送るか？

公開鍵 情報発信者は施錠鍵をもつ
情報受信者が開錠鍵をもつ
 $14593 \times 27961 = 408034873$

秘密鍵

公開鍵

量子コンピュータのメリット

超並列演算が可能

- 一度に大量のデータを処理できる
Nキュビットで2^N通りの状態を取りうる
- 全ての計算経路を同時に実行できる

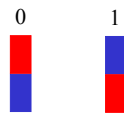


因数分解, データベース検索が高速に行える

その他の計算は？

スピン量子ビット

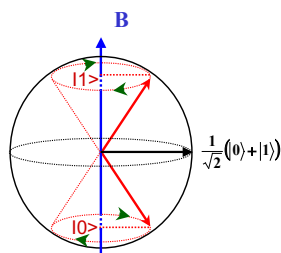
古典力学的磁石



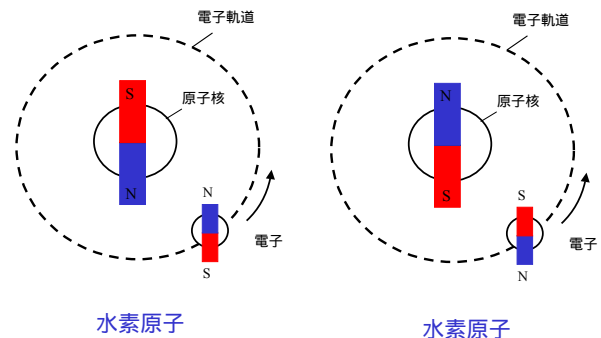
古典的 0 nor 1 (error)

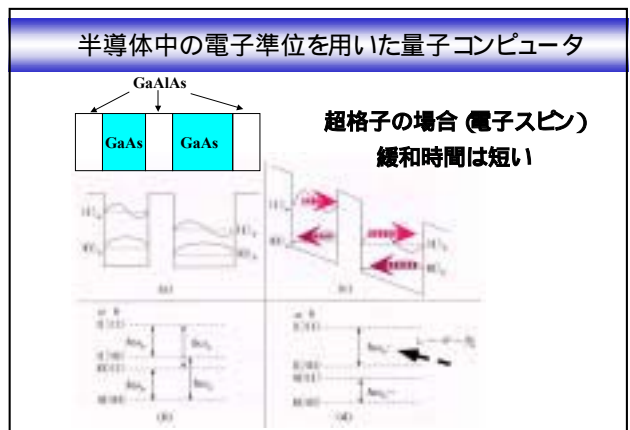
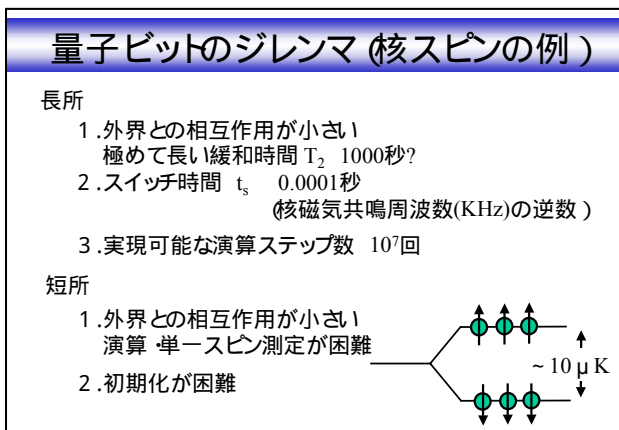
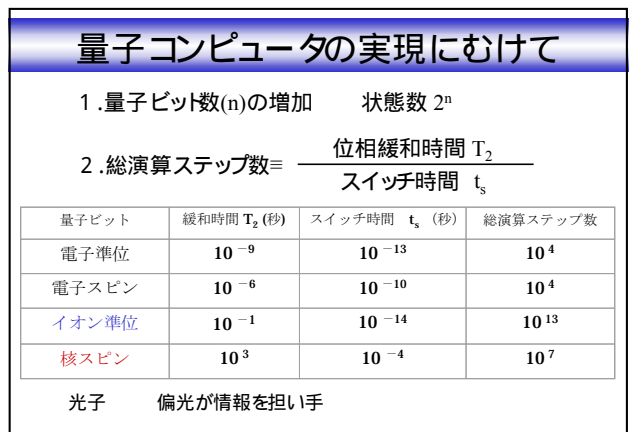
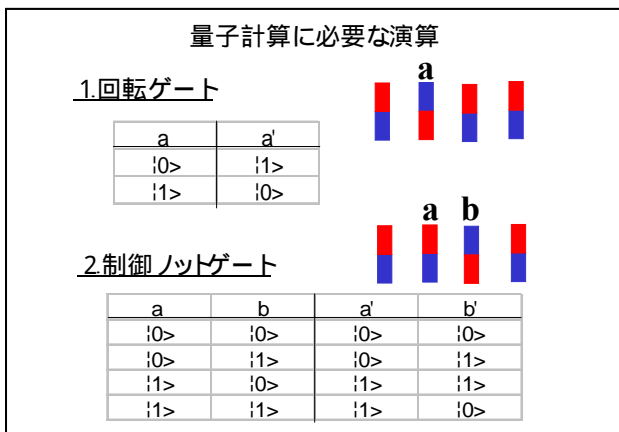
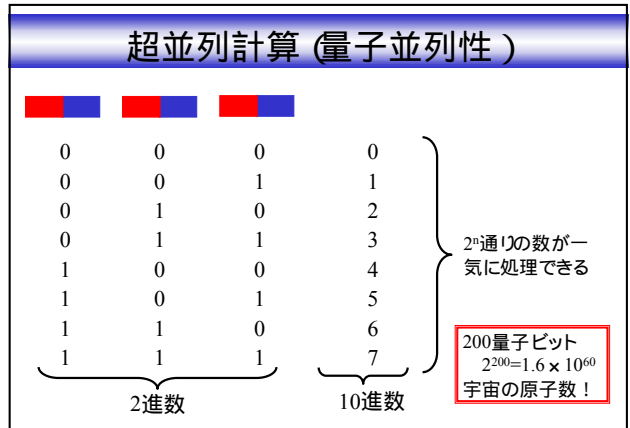
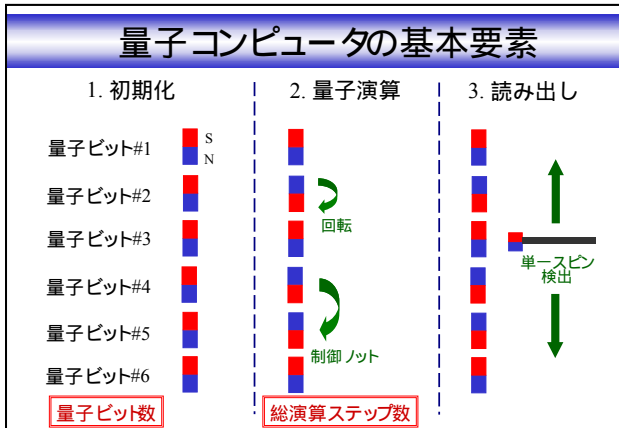
量的には0と1が半分の確率

量子力学的スピン

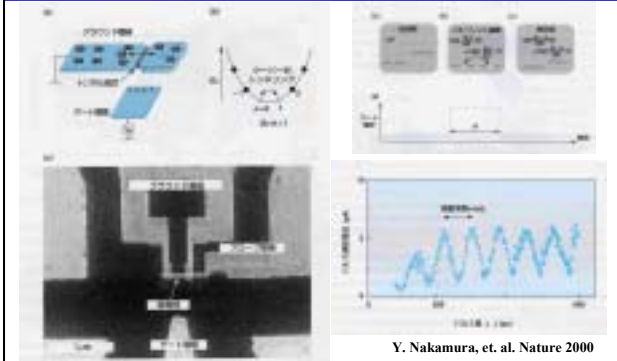


量子ビットの候補-電子と原子核のスピン

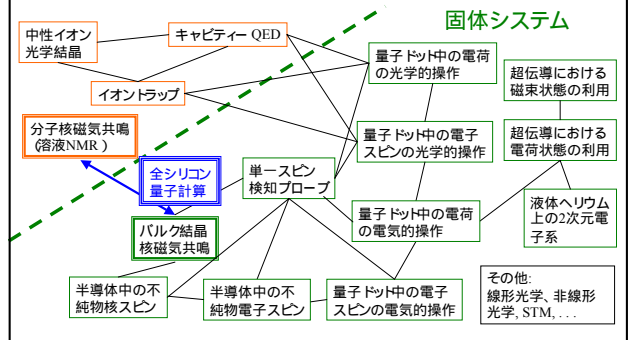




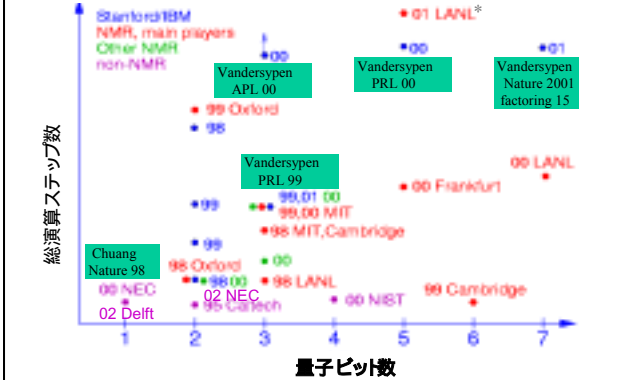
クーパー対箱量子ビット



実験による量子コンピュータの実現



量子ビット操作最前線



2. 素因数分解の計算 (15=3×5の場合)

確定的モデル $15 \div 2, 15 \div 3, 15 \div 4 \dots$ をつづけ
割り算の答えとあまりを求める

確率的モデル (乱数でためす)
 $F_n = m^n \pmod{N}$ m^n を N で割ったあまり
を求める

$F_n = 2^n \pmod{15}$ 例として $N=15, m=2$ を選ん
だ場合を考える

確率的計算

$$F_n = 2^n \pmod{15}$$

$N=15, m=2$	こたえ
$F_0 = 2^0 \div 15$ のあまり	1
$F_1 = 2^1 \div 15$ のあまり	2
$F_2 = 2^2 \div 15$ のあまり	4
$F_3 = 2^3 \div 15$ のあまり	8
$F_4 = 2^4 \div 15$ のあまり	1
$F_5 = 2^5 \div 15$ のあまり	2
$F_6 = 2^6 \div 15$ のあまり	4
$F_7 = 2^7 \div 15$ のあまり	8

周期 $r=4$

$$m^{r/2} + 1 = 2^{4/2} + 1 = 5$$

$$m^{r/2} - 1 = 2^{4/2} - 1 = 3$$

古典的計算機内での処理

$$F_n = 2^n \pmod{15}$$

F_n	$2^n \pmod{15}$	レジスター 1(n)	レジスター 2 $2^n \pmod{15}$
F_0	1	0000	0001
F_1	2	0001	0010
F_2	4	0010	0100
F_3	8	0011	1000
F_4	1	0100	0001
F_5	2	0101	0010
F_6	4	0110	0100
F_7	8	0111	1000

本当はレジスター1を一気に作りたい

量子計算では $F_n = 2^n \pmod{15}$

10進 2進ばい量子情報

F_n	$2^n \pmod{15}$
F_0	1
F_1	2
F_2	4
F_3	8
F_4	1
F_5	2
F_6	4
F_7	8

レジスタ 1(n) レジスタ 2 $2^n \pmod{15}$

0000	×	0001	2^0
0001	×	0010	2^1
0010	×	0100	2^2
0011	×	1000	2^3
0100	×	0001	2^0
0101	×	0010	2^1
0110	×	0100	2^2
0111	×	1000	2^3

レジ1を一気につけて、レジ2に組みあつた状態を作る

量子計算では $F_n = 2^n \pmod{15}$

レジスタ 1(n) レジスタ 2 $2^n \pmod{15}$

0000	×	0001	2^0
0001	×	0010	2^1
0010	×	0100	2^2
0011	×	1000	2^3
0100	×	0001	2^0
0101	×	0010	2^1
0110	×	0100	2^2
0111	×	1000	2^3

フーリエ変換

分子磁気共鳴 (溶液NMR)

1. 核スピン量子ビット

2. 疑純粋状態を利用した初期化

3. RFを利用した量子操作

4. 多状態の平均測定

5. 極めて長い位相緩和時間

N. A. Gershenfeld and I. Chuang, *Science* 275, 350 (1997)
 D. G. Cory, A. F. Fahmy, and T. F. Havel, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 94, 1634 (1997)

Kaneの量子コンピュータモデル

Ref. B. Kane, *Nature* 393, 133 (1998)

絶縁膜 A-ゲート J-ゲート

シリコン

制御用高周波電磁場 (1-100T)

^{31}P ($I=1/2$) のエネルギー状態

$|1\rangle$ E=g H

$|0\rangle$

T=100mK

キュビット ^{31}P ($I=1/2$) イオンの核スピン

ゲート操作 : A-ゲート, J-ゲートで操作

全シリコン量子コンピュータ誕生の背景

溶液NMR量子計算 固体 (不純物) 量子計算

N. A. Gershenfeld and I. Chuang, *Science* 275, 350 (1997)
 D. G. Cory, A. F. Fahmy, and T. F. Havel, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 94, 1634 (1997)

B. E. Kane, *Nature* 393, 133 (1998)
 R. Vrijen, et al., *Phys. Rev. A* 62, 012306 (2000)
 G.P. Berman, G. D. Doolen, P. C. Hammel, and V. I. Tsifrinovich, *Phys. Rev. B* 61, 14694 (2000).

長所: 多状態の平均測定, 作製が容易, 核スピンの利用

短所: 集積化が困難 (10量子ビットが限界), 初期化が困難

長所: 集積化が可能, 低温化による効率的な初期化, 核スピンの利用

短所: 単一スピンの抽出が必要, 作製が困難

全シリコン量子コンピュータ

半導体同位体工学

シリコン Si
ゲルマニウム:Ge

半導体同位体工学

伊藤公平、固体物理、1998年33巻965頁

安定同位体			
²⁸ Si	92.2%	⁶⁹ Ga	60.1% 3/2
²⁹ Si	4.7%	⁷¹ Ga	39.9% 3/2
³⁰ Si	3.1%	⁷⁵ As	100% 3/2
(核スピン)			
⁷⁰ Ge	20.5%		
⁷² Ge	27.4%		
⁷³ Ge	7.8%		
⁷⁴ Ge	36.5%		
⁷⁶ Ge	7.8%		
(核スピン)			

安定同位体を利用した
核スピン制御

²⁹Si 核スピン量子計算

²⁹Si nuclear spin quantum computer

全シリコン量子コンピュータの構成

- ²⁹Si (核スピン1/2) 量子ビット
- 急磁場勾配による各量子ビットへのアクセス
- 初期化：低温化と光による偏極核スピン生成
- 演算：核磁気共鳴法に基づく核スピン量子操作
- 読み出し核磁気共鳴プローブ法 (MRFM) の開発

Phys. Rev. Lett. 2002

読み取り技術 (カンチレバー) 慶應・スタンフォード

S/N比と初期化率の関係

N: カンチレバーに対する熱雑音

$$F_{\min} = \sqrt{4kk_B T B / \omega_0 Q}$$

S: 一原子面によって発生する力:

$$F(t) = M_z(r, t) \frac{\partial B_z}{\partial z}$$

核スピンの磁化率:

$$M_z = \gamma \hbar I N \left[\left(\frac{1+P}{2} \right)^n - \left(\frac{1-P}{2} \right)^n \right]$$

P = 初期化率
N = 細線コピ-数
n = 量子ビット数

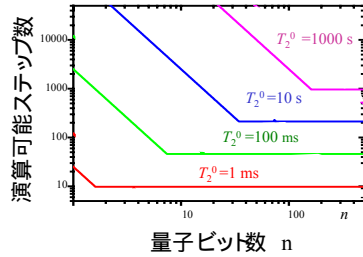
位相緩和時間と演算可能ステップ数

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \langle \delta B_x(t) \delta B_x(0) \rangle dt = \left(\langle \delta B_x^2 \rangle + \langle \delta B_y^2 \rangle + \langle \delta B_z^2 \rangle \right) / (r^3)^2$$

DC spectral density of local fluctuating field Second Moment due to residual dipolar couplings

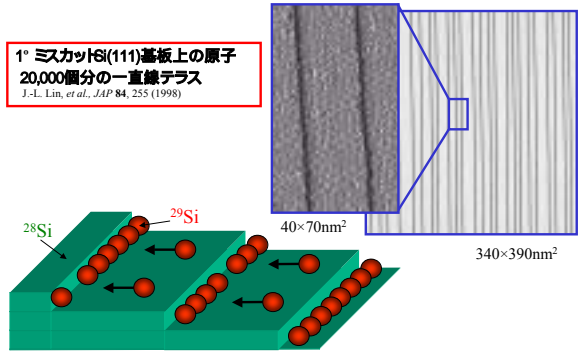
位相緩和の原因:
 カンチレバーの揺らぎ
 磁性不純物との相互作用
 核スピン間の双量子相互作用

位相緩和時間
 測定が必要

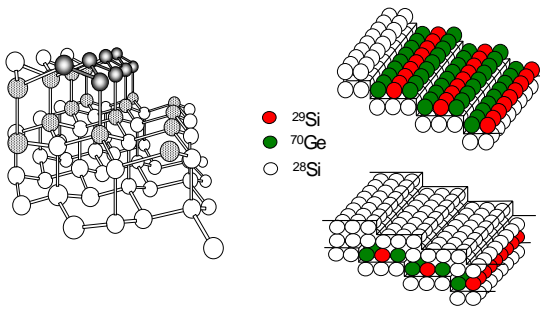


²⁹Si単一原子細線の作製法

1° ミスカットSi(111)基板上の原子
 20,000個分の一直線テラス
 J.-L. Lin, et al., *JAP* 84, 255 (1998)



²⁹Si同位体細線



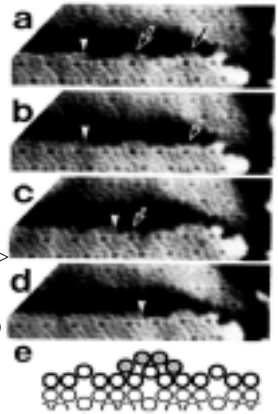
Row-by-row growth

The step-flow growth was observed as the appearance of new adatoms at the edge

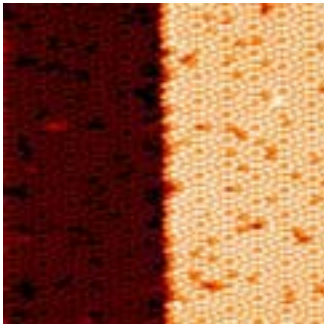
Short rows are thermally diffused to form a longer row which is energetically stable

$T_{sub} = 350$
 Growth rate $0.8 \times 10^{-2} BL/min$

T. Hasegawa, et al., *Phys. Rev. B* 48, 1943 (1995).



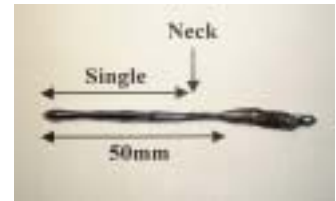
慶應における進展



半導体同位体工学の現状

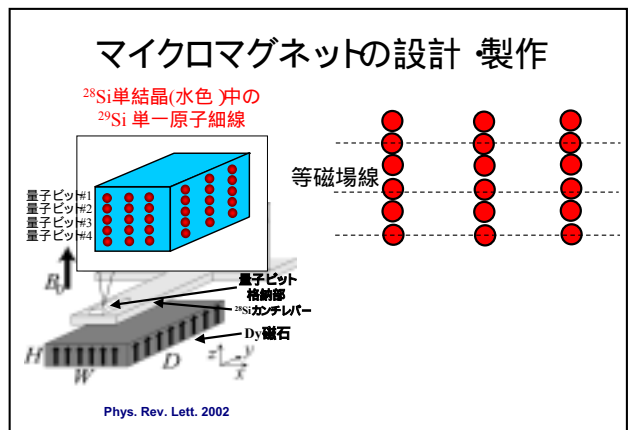
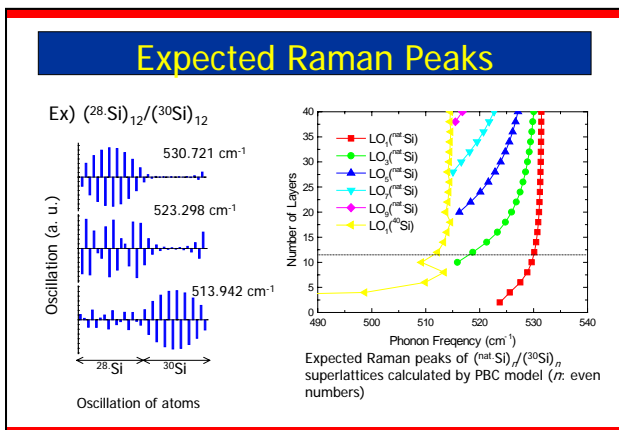
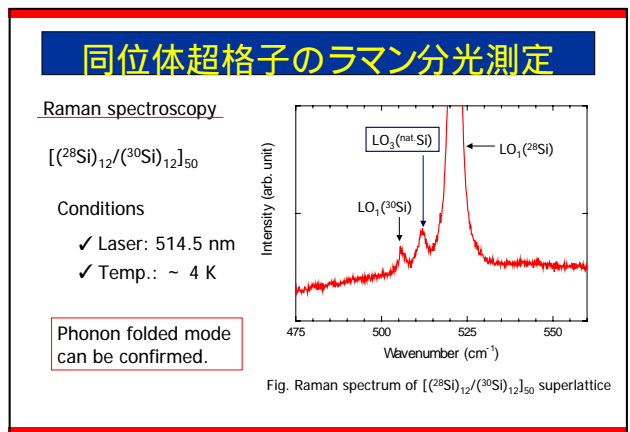
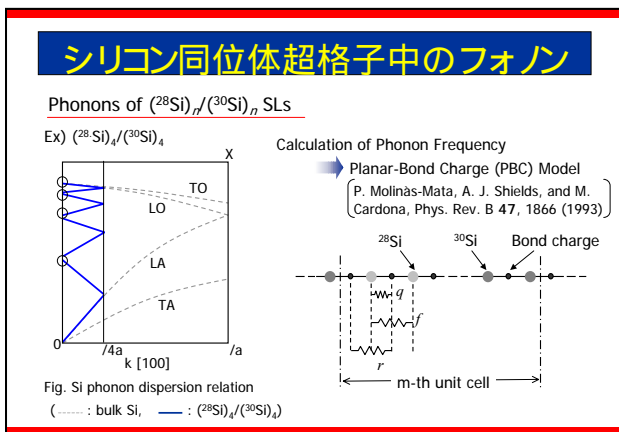
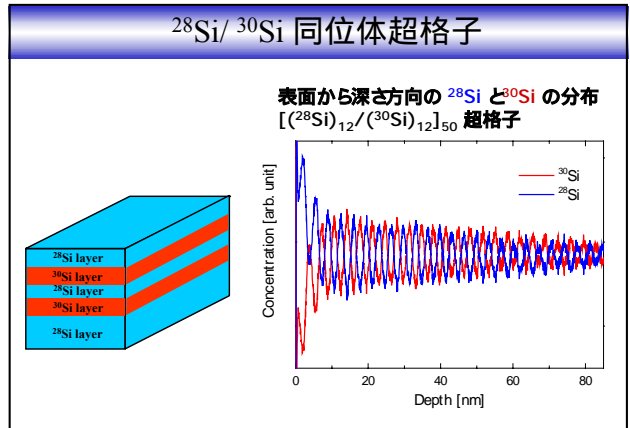
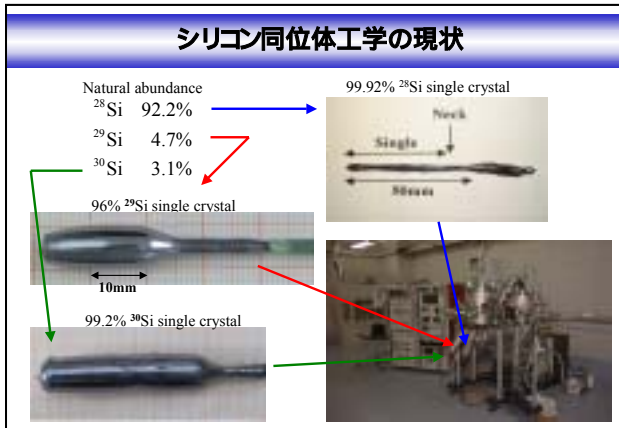


99.92% ²⁸Si single crystal

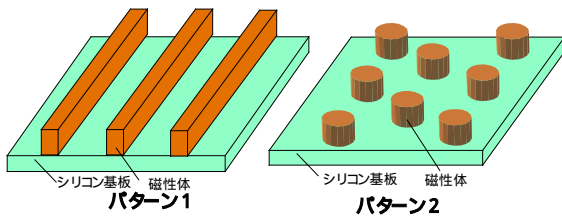


J. Mater. Res. 8, 1341 (1993)

Jpn. J. Appl. Phys. 38, L1493 (1999)



マイクロマグネットデザイン



課題 高磁場勾配と面内均一性の両立

まとめ

- 1.量子コンピュータはいつできますか？ ➡もうできてます！？
- 2.役に立ちますか？ ➡ できてみたらわかります
- 3.なぜ量子コンピュータの研究をするのですか？ ➡ 量子とナノテクノロジーは切っても切れない仲だからです

Materials science とPhysicsの融合

http://www.appi.keio.ac.jp/Itoh_group/