

単一原子制御への挑戦

－ERM決定論的（Deterministic）ドーピングのご紹介－

産業技術総合研究所

品田 賢宏

takahiro.shinada@aist.go.jp

目次

1. 決定論的 (deterministic) ドーピングとは何か

- 歴史を少し
- ドーピングからみたトランジスタ開発
- ここまできた単一原子制御

2. ITRSでの位置付け

3. 単一イオン注入技術

4. 適用事例

4.1 Beyond CMOS : シリコン応用「単一ドーパントトランジスタ」

4.2 More-than-Moore : ダイヤモンド応用「単一原子センサ」

4.3 EHS : 「細胞機能修飾」

5. まとめ

ドーピングの歴史

ドーピングによる精密な電気的特性制御

イオン注入による不純物ドーピングのトランジスタへの本格的応用
(Mostek社, 1970年)

参考)

トランジスタの発明 (Shockley, Bardeen, Brattain, 1947年)

US特許「イオン照射による半導体デバイス形成」(Shockley, 1954年)

集積回路の発明 (1958年)

世界初の商用集積回路4004 (Intel, 1971年)

トランジスタ微細化を牽引

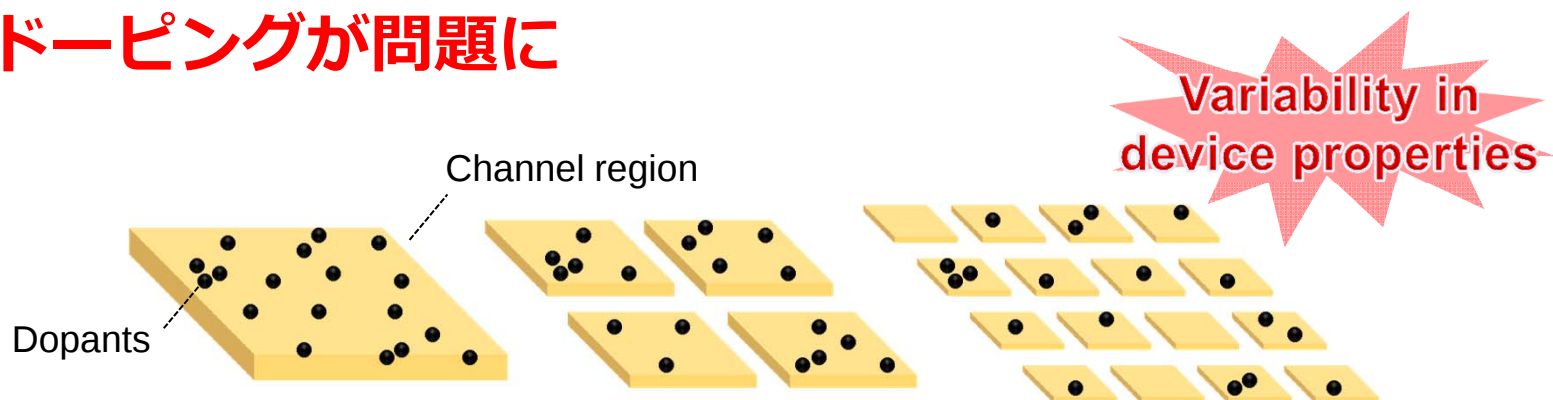
短チャネル効果(SCE)抑制

極浅接合(USJ)形成

閾値電圧(V_{th})制御 (チャネル、poly Siゲート)

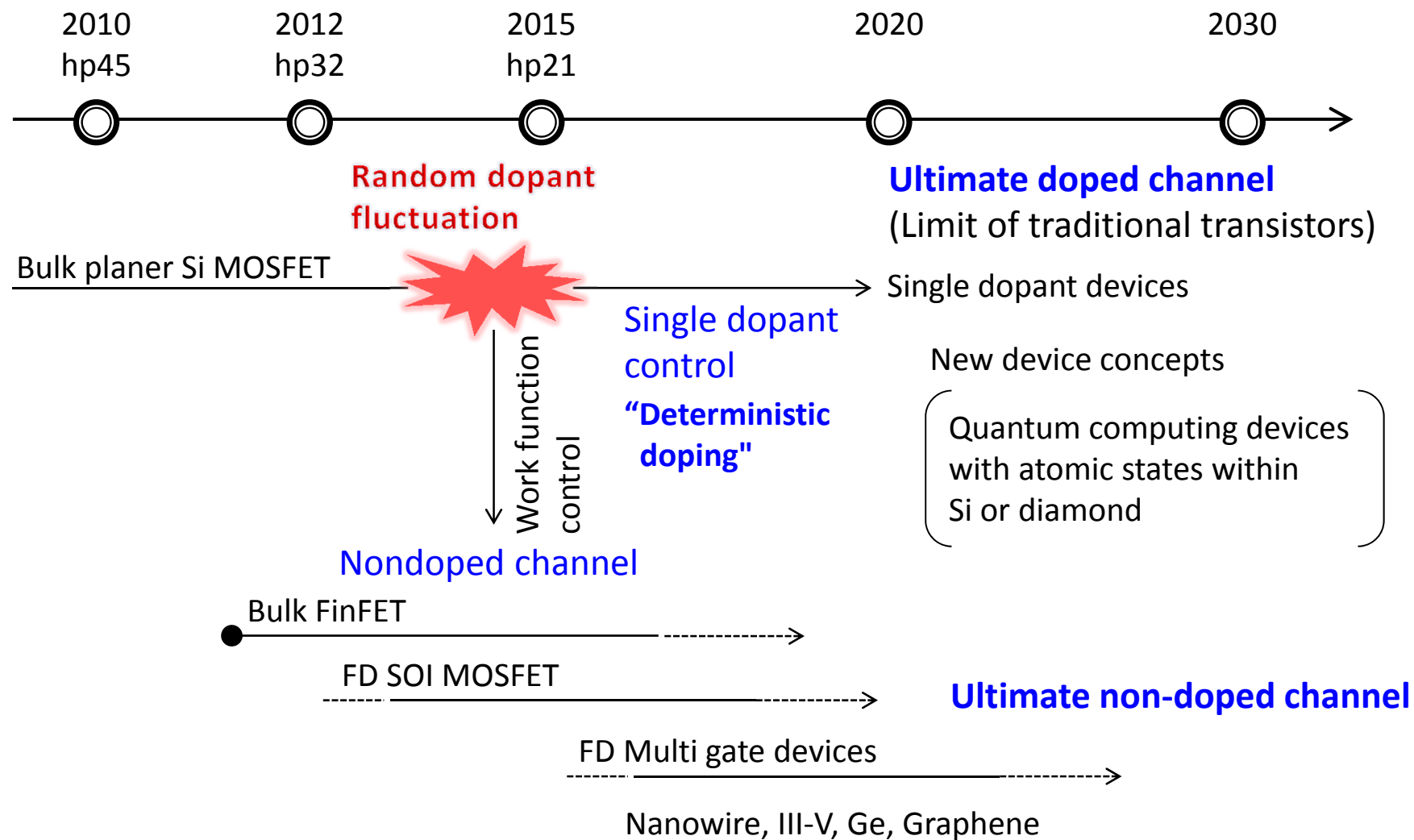
ドーパントゆらぎ

徹底的な微細化が進展した故の障害
いまドーピングが問題に



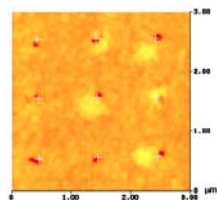
<i>YEAR OF PRODUCTION</i>	<i>2010</i>	<i>2012</i>	<i>2015</i>		<i>2020</i>
<i>Physical gate length: L_g [nm] (HP/LSTP)</i>	27/32	22/27	17/17		10.7/10.7
<i>Channel doping [cm^{-3}]</i>	4×10^{18}	5×10^{18}	7.5×10^{18}		NOT known
<i>Ave. No. of dopants: $\bar{N}$ (Assumption: $t=x_j$, $W_g=L_g$)</i>	35/41	23/28	16/16		< 1

ドーパントゆらぎと新デバイス開発

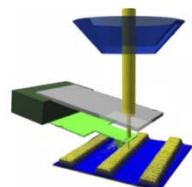


単一原子制御の取り組み

Ordered dopant arrays

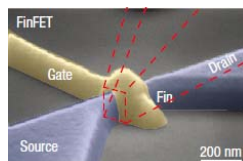


Shinada, Nature 2005

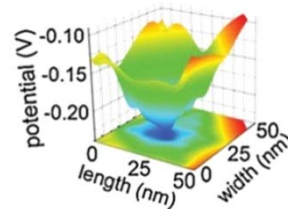


Persaud, Schenkel
JVSTB 2005

Transport through single dopant

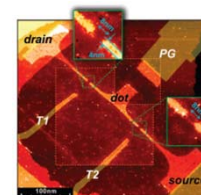


Lansbergen, Rogge
Nature Physics 2008



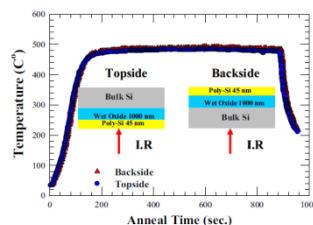
Tabe, Phy. Rev. B 2010

Atomistic transistor



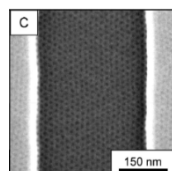
Simmons,
Nano Letters 2009

Low temperature anneal

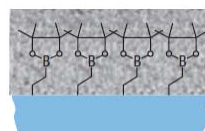


Lee, IEDM2009

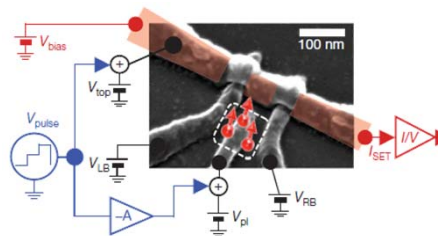
Patterning & doping via DSA



Bosworth,
Ober, ACS NANO 2008



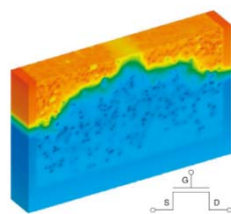
Single donor spin readout



Morello, Dzurak, Nature 2010

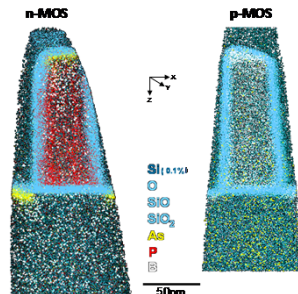
Ho, Javey, Nature Materials 2008

3D simulation



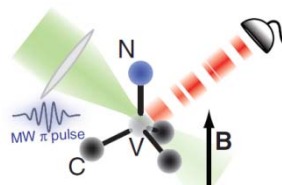
Roy, Asenov
Science 2005

3D atom probe



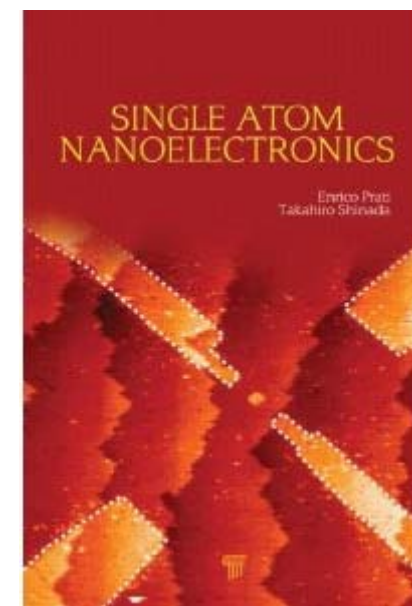
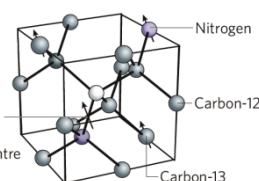
Inoue, Ultramicroscopy 2009

Single NV spin readout



Nuemann, Jelezko
Science 2010

Hanson, Awschalom
Nature 2008



Pan Stanford Publishing
(2013.4)

ITRSにおけるdeterministicドーピング



- ERM co-chairのHerr氏（元SRCディレクター、現米国JSNN大学教授）と共にeワークショップ開催（2008年11月）。
- ITRS ERM 2009年版で初めてコンセプトが示される。
- ERMチャプターでFEPのためのdeterministicドーピングの位置付け。
- 2ndワークショップ（2010年11月）開催。
Deterministicドーピングコンセプトの共有と2年間の進展調査。
Difficult challengesの特定。
- ITRS 2011年版アップデート。
- 3rdワークショップ（2012年1月）開催。参加者13名。
2年間の進展調査。
Conformalドーピングを追加。
- ITRS 2013年版アップデート。

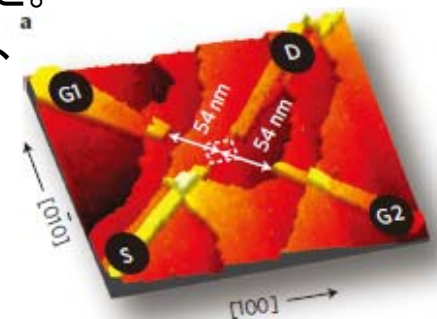
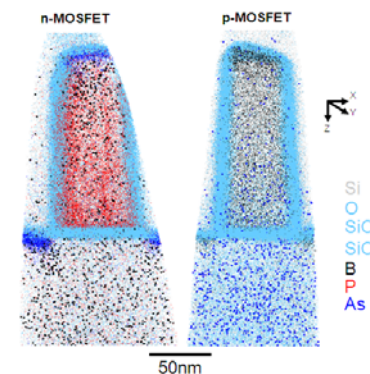
Deterministicドーピング

❖ 定義

- ◆ ドーパント集合体の制御から、個々のドーパント制御をディレクションすること。
- ◆ 原子スケールの精度でドーパントを導入し、適切にアクティベートすること。
- ◆ ドーパントばらつき、ゲート仕事関数、極浅接合、ドーパント分布の制御、新原理デバイスの実証、低消費電力化に資すること。

❖ 2013年版アップデート

- ◆ **単一ドーパントランジスタ動作実証** (Fuechsle, Simmons, *Nature Nanotech* 2012, Prati, Shinada, *Nature Nanotech* 2012)。
- ◆ **高温動作化** ~150K (Hamid, Tabe, *PRB* 2013)。
- ◆ 3次元対応 **Monolayerドーピング** (Ang, *IEDM* 2011)
- ◆ **低温マイクロ波アクティベーション** (Lee, *IEDM* 2012)。
- ◆ 3Dアトムプローブ (Inoue, *Microscopy Today* 2012)、**KFM** (Anwar, Tabe, *APL* 2011)による **単一ドーパントの可視化**。

Fuechsle, *Nature Nanotech* 2012Inoue, *Microscopy Today* 2012

❖ 技術的課題

- ◆ ERD: 高温動作 (300K~400K)、インターコネク、ナノコンタクト、スケールアップ。
- ◆ FEP: DSA活用ドーピング、アクティベーションのミリ秒化、低温化、均一性、スループット、3次元対応。
- ◆ Metrology: 単一ドーパントの存在、位置、電子状態の評価、非破壊。

単一イオン注入技術

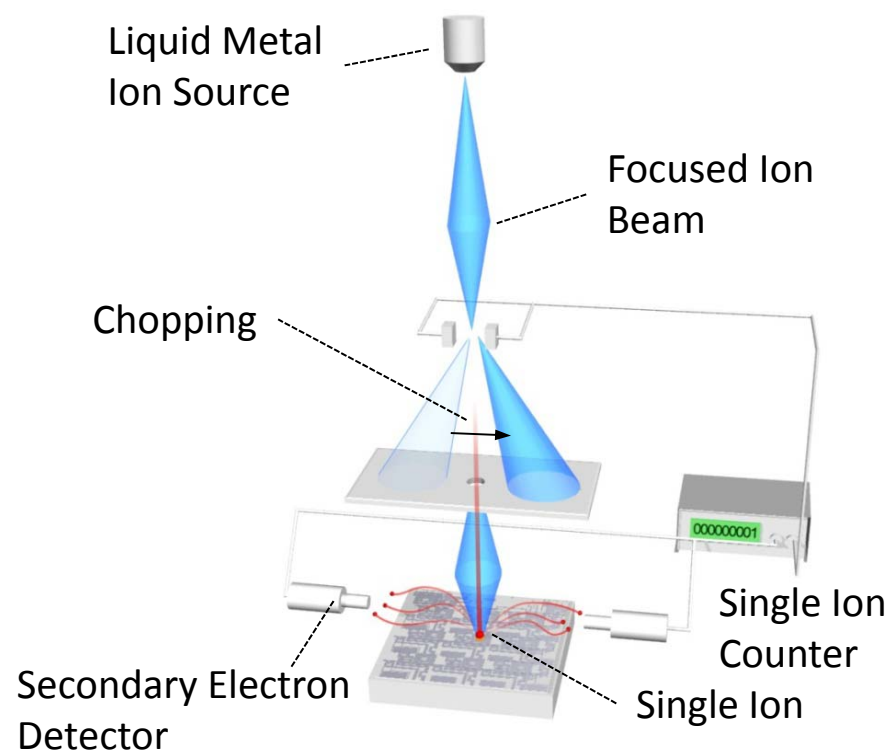
Ohdomari, *Proc. 1st Int. Symp. Control of Semiconductor Interfaces*, 223 (1994).

Matsukawa, *Appl. Surf. Sci.* **117/118**, 677 (1997).

Shinada, *J. Vac. Sci. & Technol B* **16**, 2489 (1998).

Key technologies:

- (1) **Extract** single-ion by chopping focused ion beam;
- (2) **Detect** single-ion by detecting secondary electrons and drain current change.



スペック

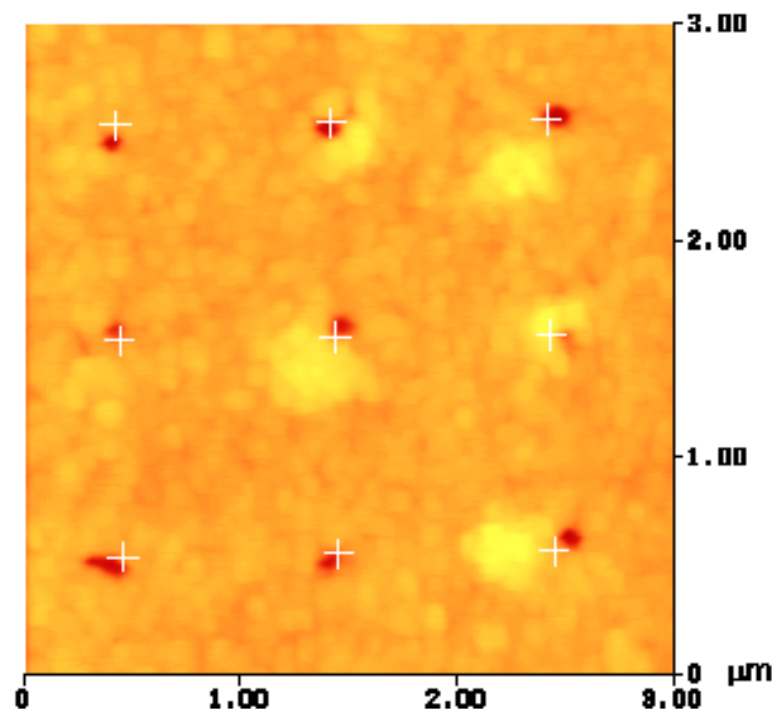
T. Shinada, et al., *J. Vac. Sci. & Technol B* **16**, 2489 (1998).

T. Shinada, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**, 3419 (1999).

T. Shinada, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, L287 (2002)

T. Shinada, et al., *Nanotechnology* **19**, 345202 (2008).

M. Hori, T. Shinada, et al., *APEX* **4** (2011).



Atomic force microscope (AFM) image of etch-pits created by single-ion incidence

Ion species	B, Si, P, Ni, Cu, Ga Ge, As, Pd, Pt, Au
Ion source type	Liquid metal ion source
Energy	30keV (single charge) 60keV (double charge)
Beam diameter	< 20nm
Aiming precision	~ 50nm w/ probability of 50%
Controllability of dopant atom number	
Detecting secondary electrons by applying substrate bias	100%
Detecting the transistor channel current	100%

適用事例① Beyond CMOS

シリコンへの決定論的ドーピングによる量子物性制御

Deterministic-doped Silicon Devices and Their Quantum Transport

**T. Shinada^{1,*}, M. Hori¹, K. Kumagai¹, F. Guagliardo²,
G. Ferrari², Y. Ono³, E. Prati⁴**

¹ Waseda University

² Politecnico di Milano

³ NTT Basic Research Laboratories,

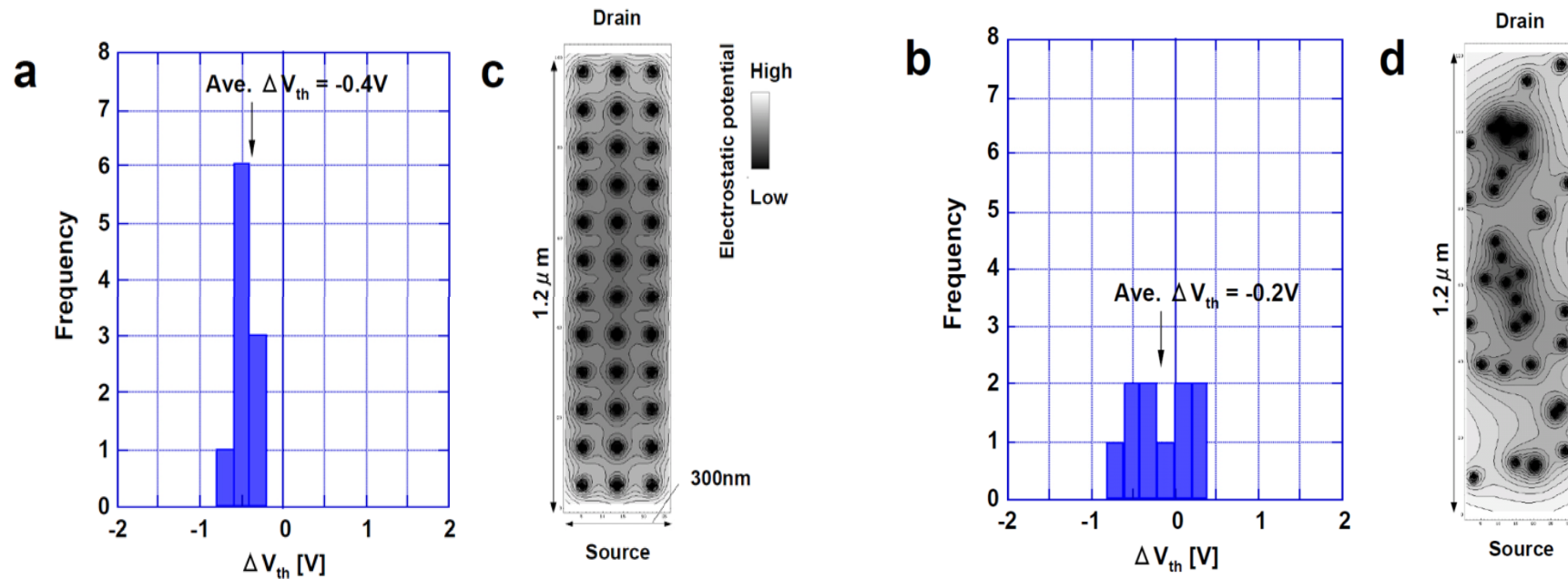
⁴ Laboratorio MDM, IMM, Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

*takahiro.shinada@aist.go.jp, **enrico.prati@mdm.imm.cnr.it

ドーパント規則配列

T. Shinada, et al., *Nature* **437**, 1128-1131 (2005)

Control of not only dopant atom “number” but also “its position” is essential.



ORDERED distribution

RANDOM distribution

■ **Features:** (1) V_{th} fluctuation of devices with ordered dopant array become narrower than that of random doping. (2) Average V_{th} of ordered array is lower than that of random dopant distribution.

プロセスフロー

○ Fabrication of samples

P-doped n-type (100) silicon-on-insulator (SOI) substrate

Initial channel doping concentration: $<1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,
 $L_g=200, 500\text{nm}$, $W=100\text{nm}$, $t_{\text{SOI}}=90\text{nm}$

Highly P-doped n-type source/drain

Accumulation-mode n-type transistor operation

○ Single-ion implantation

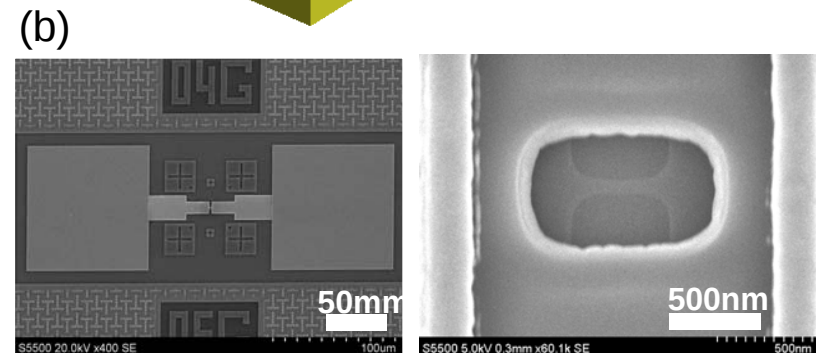
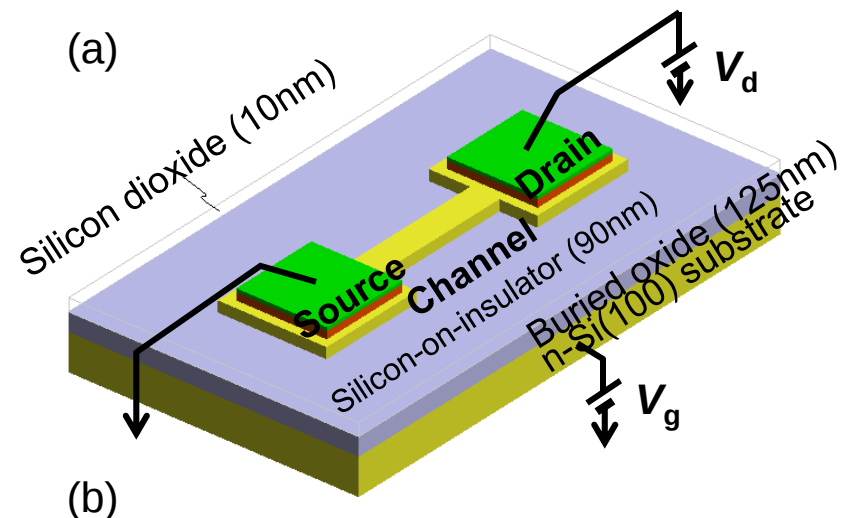
Phosphorus, 60keV

Number of dopants: 2 per dot

○ Rapid thermal anneal

at 900°C , 1min

○ V_g - I_d measurement at 4K – 20K



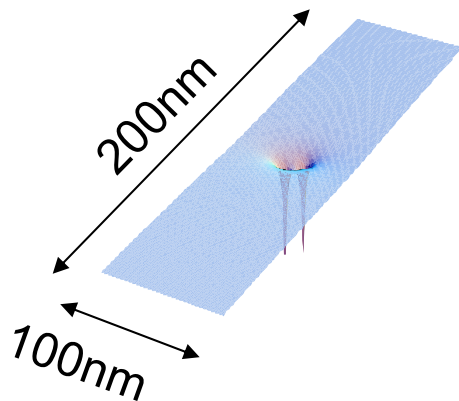
ドーパント1次元配列

T. Shinada, et al., *IEDM* 2011

E. Prati, T. Shinada, et al., *Nature Nanotechnology* 2012

Sample 1

Single dot device



Total no.
of donors:

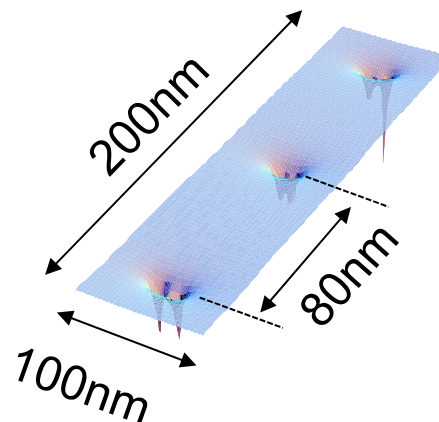
2

Probable distance
between donors:

Isolated

Sample 2

Three dot device

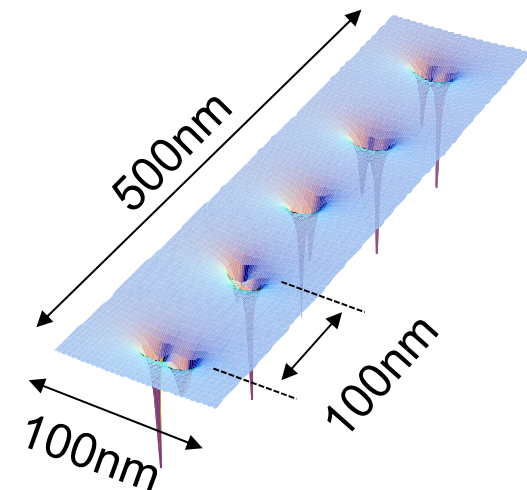


6

Overlap ~ 80nm

Sample 3

Five dot device



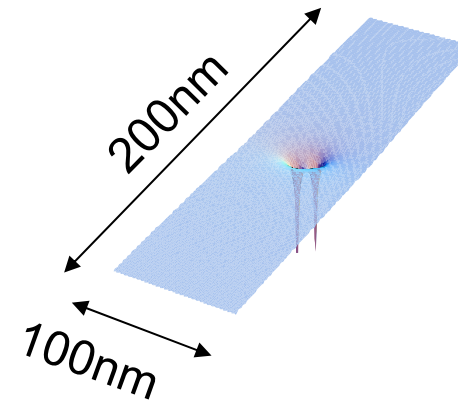
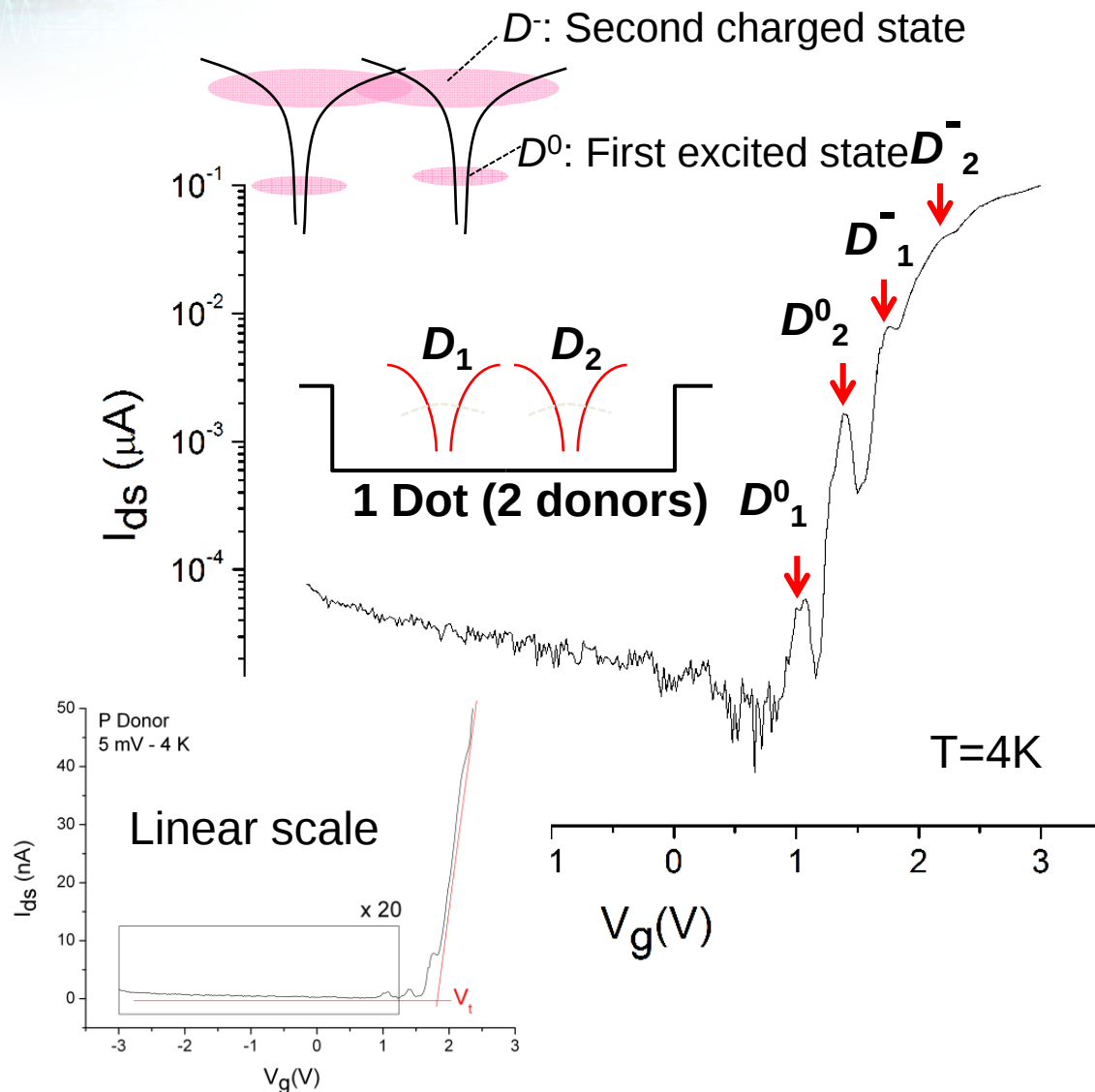
10

Adjacent~100nm

Note: Aiming accuracy of 50nm with probability of 50 percent.

2 ドーパントデバイス特性

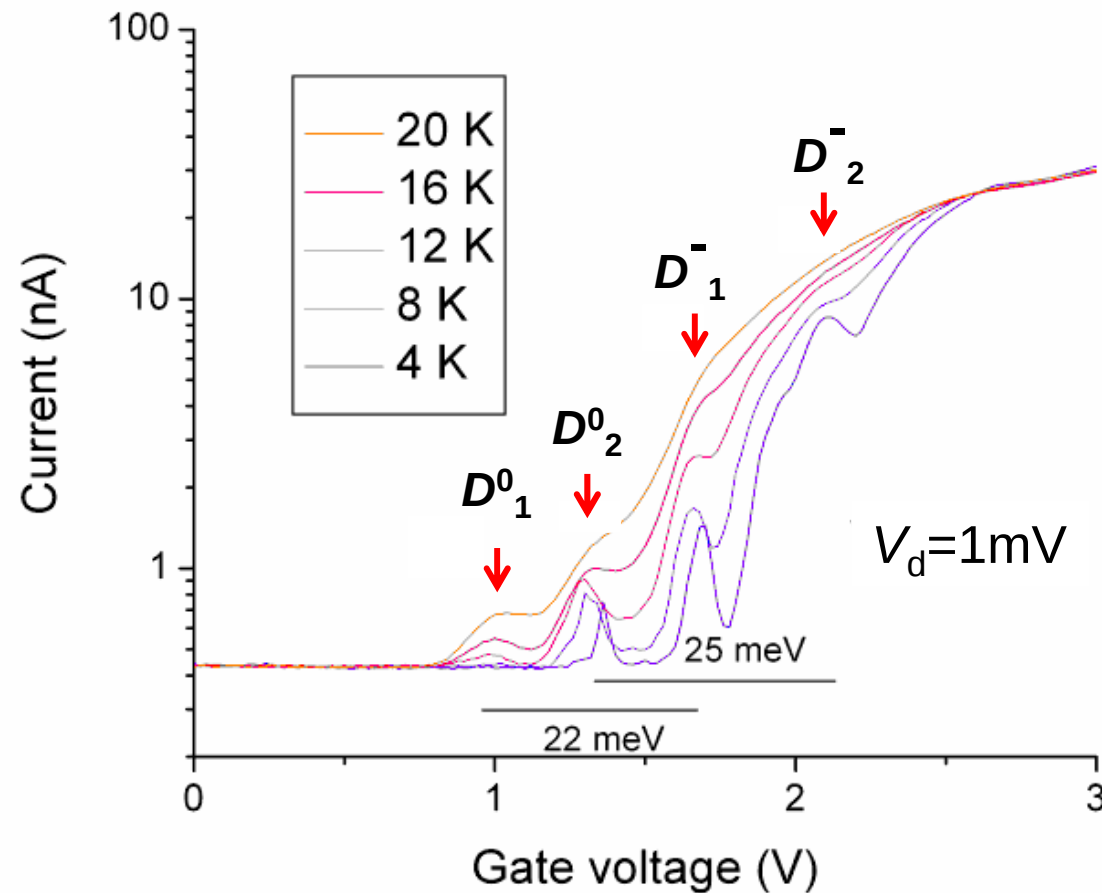
T. Shinada, et al., *IEDM* 2011



- Isolated Coulomb blockade peaks;
- No other peaks above the fourth
- Number of the peaks coincides with double of number of dopants.

温度依存性

T. Shinada, et al., *IEDM* 2011



- Charging energy:
22 meV
(between D_1^0 and D_1^-)
25 meV
(between D_2^0 and D_2^-)
- The effect of isolated electron is broadened by the temperature.

適用事例②More-than-Moore

ダイヤモンドへの決定論的ドーピングによる量子物性制御

**Fabrication of the ordered array of optical centers
in diamond by low energy ion implantation**

A. Komatsubara¹, S. Tamura¹, T. Tanii¹, T. Teraji²,
S. Onoda³, T. Yamamoto³, T. Ohshima³,
C. Müller⁴, B. Naydenov⁴, L. McGuinness⁴, F. Jelezko⁴,
T. Shinada^{5,*}, J. Isoya^{6,**}

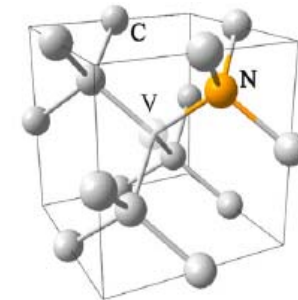
¹ Waseda Univ., ² NIMS, ³ JAEA, ⁴ Ulm Univ., ⁴ AIST, ⁵ Tsukuba Univ.

*takahiro.shinada@aist.go.jp, ** isoya.junichi.fw@u.tsukuba.ac.jp

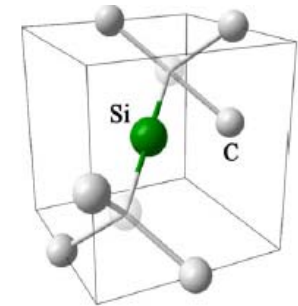
研究背景

- Single-photon sources in diamond:
 - a generator of qubits for quantum information processing at room temperature
 - a tool for interacting with individual spins
- The conventional methods:
 - arraying quantum dots of III-V compounds
 - forming optical centers in diamond
- Si-V centers:
 - high brightness and narrow peak
 - compatible for the near-infrared optical communication

NV



Si-V



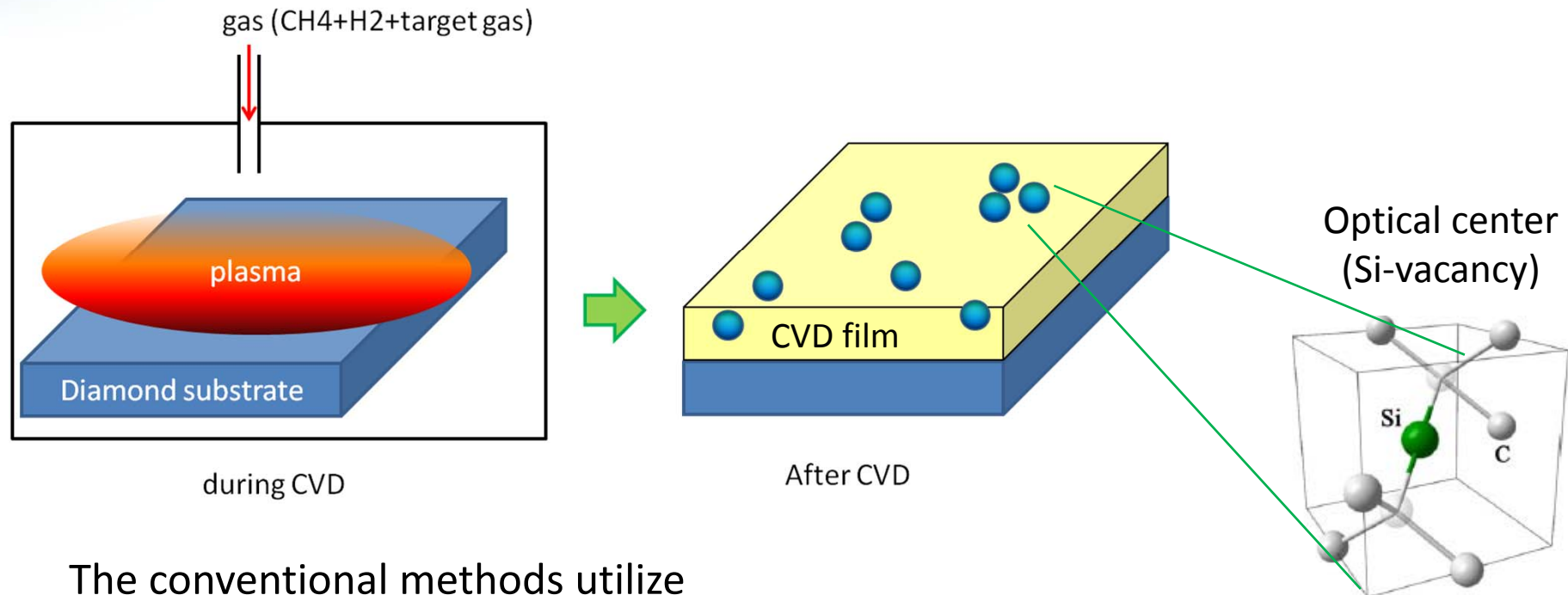
Optical center as a single photon source	ZPL [nm]	HWHM[nm]	Lifetime [ns]	Debye-Waller factor
(NV) ⁻	638	-	11.6	0.04
(Si-V) ⁻	738	5	1.2	0.8
(Si-V) ⁰	946	-	-	-

C. Kurtsiefer et al., *Phys. Rev. Lett.* **85** 290(2000)
 A. Beveratos et al., *Phys. Rev. A* **64** 061802(2001)

C. Wang et al., *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **39** 37(2006)
 T. Gaebel et al., *New J. Phys.* **6** 98(2004)

従来のNVセンター形成法

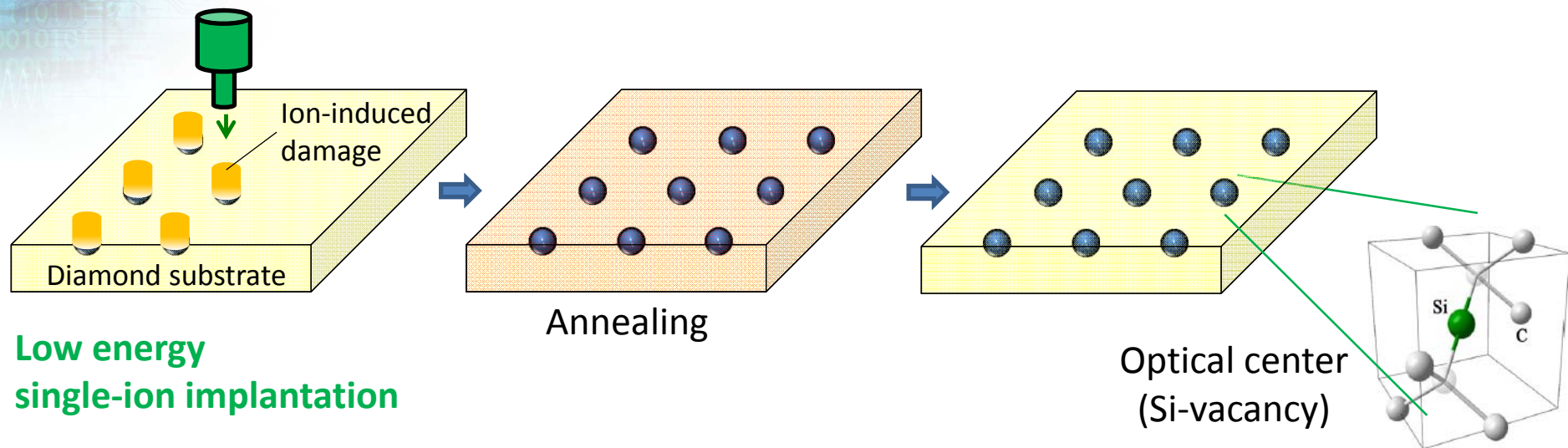
Conventional method



The conventional methods utilize individual Si-V centers incidentally formed during the CVD process.

- > **poor controllability in the position of the formed Si-V centers**
- > **low applicability to device fabrication and quantum operation**

実験フロー



1. Substrate:

homoepitaxial diamond (100) grown on HTHP crystal (100), 1b
by microwave plasma CVD

2. Single-Ion Implantation:

Ion species : Si Acceleration Energy : 60 keV

The number of ions per spots 2, 10, 50, 100, 1000

Distance between spots : 500 nm, 1, 2, 5 μ m

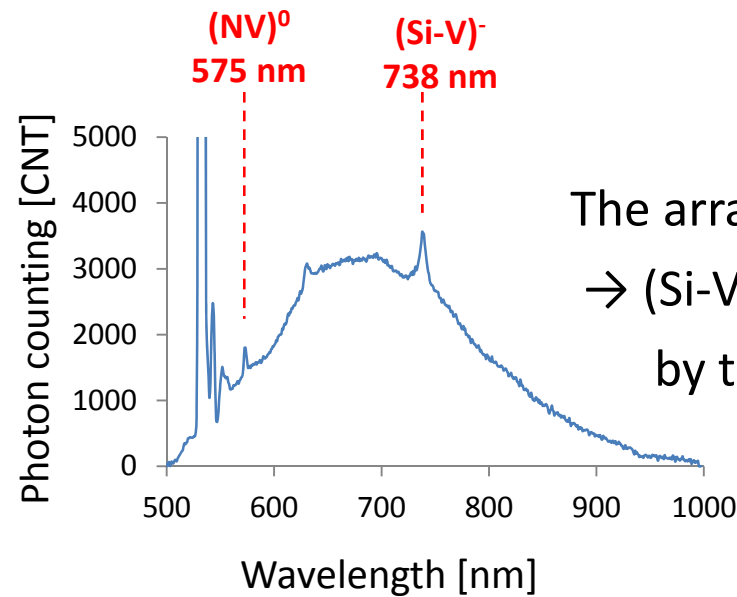
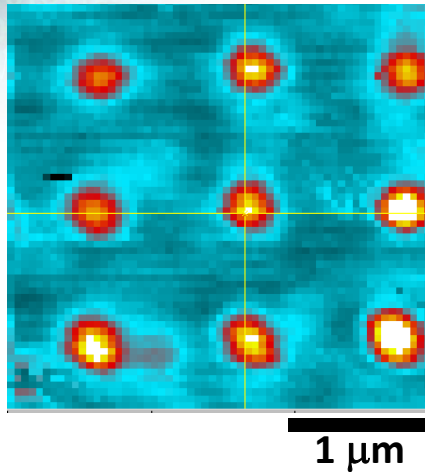
3. Annealing at 1000 °C for 30 min in 10% H₂ forming gas

4. Photo luminescence measurement by confocal microscopy

Excitation laser : 532 nm

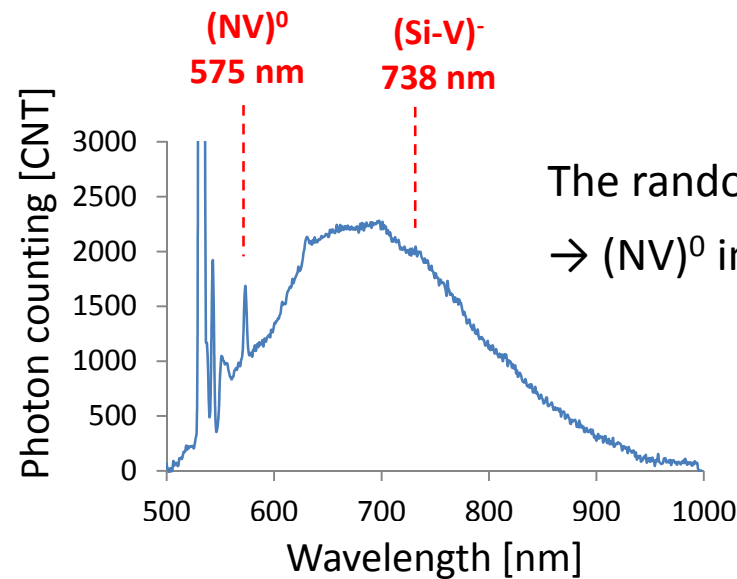
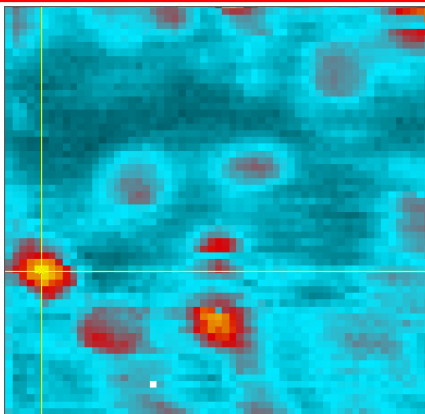
SiVセンター

Near the surface



The array of luminescence
→ $(Si-V)^-$ induced
by the ion implantation

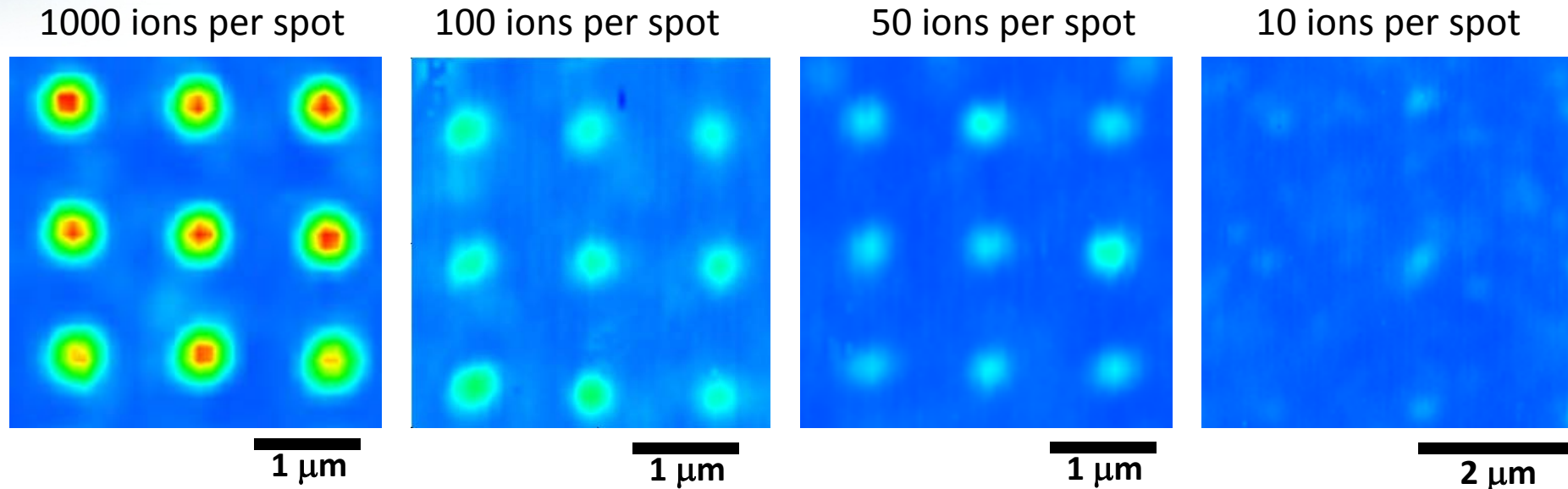
1 μm deep the surface



The randomly distributed luminescence
→ $(NV)^0$ in the background

Siイオン個数依存性

The number of implanted Si ions per spot



The photoluminescence intensity decreases with decreasing number of implanted ions.

- This indicates that the number of Si-V centers decreases with decreasing number of implanted ions
- This suggests that the single-photon sources can be created by reducing the number of implanted ions
 - ⇒ Future work

研究領域：素材・デバイス・システム融合による
革新的ナノエレクトロニクスの創成

研究課題名：炭素系ナノエレクトロニクスに基づく 革新的な生体磁気計測システムの創出

研究代表者： 東京工業大学大学院理工学研究科 電子物理工学専攻
波多野 睦子

東京工業大学 大学院理工学研究科	松澤 昭教授，岩崎 孝之助教
大阪大学 基礎工学研究科 物質創成専攻	<u>水落 憲和</u> 准教授，鈴木 義茂教授
	森下 弘樹助教，田嶋 俊之助教
京都大学物質-細胞統合システム拠点	<u>原田 慶恵</u> 教授，吉成 洋祐准教授
筑波大学数理物質系	<u>白石 賢二</u> 教授， <u>初貝 安弘</u> 教授，都倉 康弘教授
産業技術総合研究所	ナノエレクトロニクス研究部門 <u>品田 賢宏</u>
	エネルギー技術研究部門 <u>牧野 俊晴</u> ，山崎 聡
ルネサスエレクトロニクス(株)	<u>波多野 雄治</u> ，沖高 毅則，上野 淳， 有田 順一，北古賀 亨

研究課題要旨

背景

ダイヤモンド中の窒素-空孔複合体（NVセンター：固体で唯一、常温大気中で単一スピンを操作・検出可能）の高感度・高空間分解能磁気センサの実現への期待。

目的

常温でSQUIDに匹敵する感度を有し、かつ高空間分解能な2次元磁気イメージセンサシステムの実現。

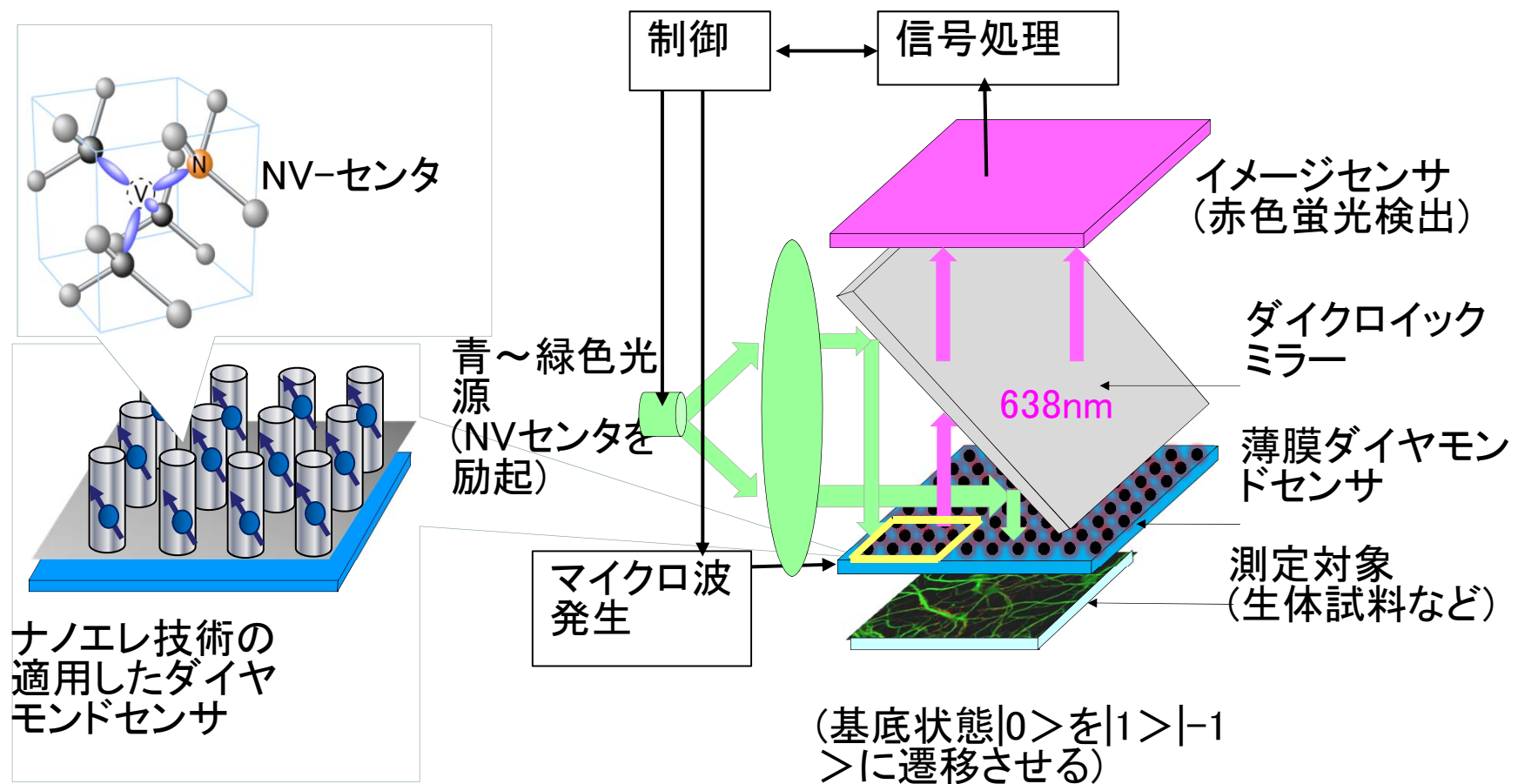
生体及び細胞計測への適用可能性を検証。

要素技術

- ① 室温で発現する特異な物理現象の解明とセンサ材料・デバイス設計指針の提案
- ② 高感度磁気センサアレイデバイスの実現
- ③ 炭素系ナノスケールのプロセス技術構築
- ④ 微弱信号検出方式提案と信号処理技術
- ⑤ モジュール化とデモ機試作
- ⑥ 試作モジュールの医用生体磁気計測適用の可能性検討、生物試料計測

ダイヤモンド磁気センサプロトモジュール

デモ機のスペックナノTの磁気感度と $\sim 10 \mu\text{m}$ の分解能のある常温・大気中の磁気計測システム。



適用事例③ESH

生きた細胞へのドーピングによる細胞機能修飾

Functional modification of live cells by deterministic ion irradiation

T. Shinada^{1, 2,*}, Y. Sakaguchi³, H. Goke², T. Akimoto⁴

¹ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

² Consolidated Research Institute for Advanced Science and Medical Care, Waseda University (ASMeW)

³ Graduate School of Science and Engineering, Waseda University

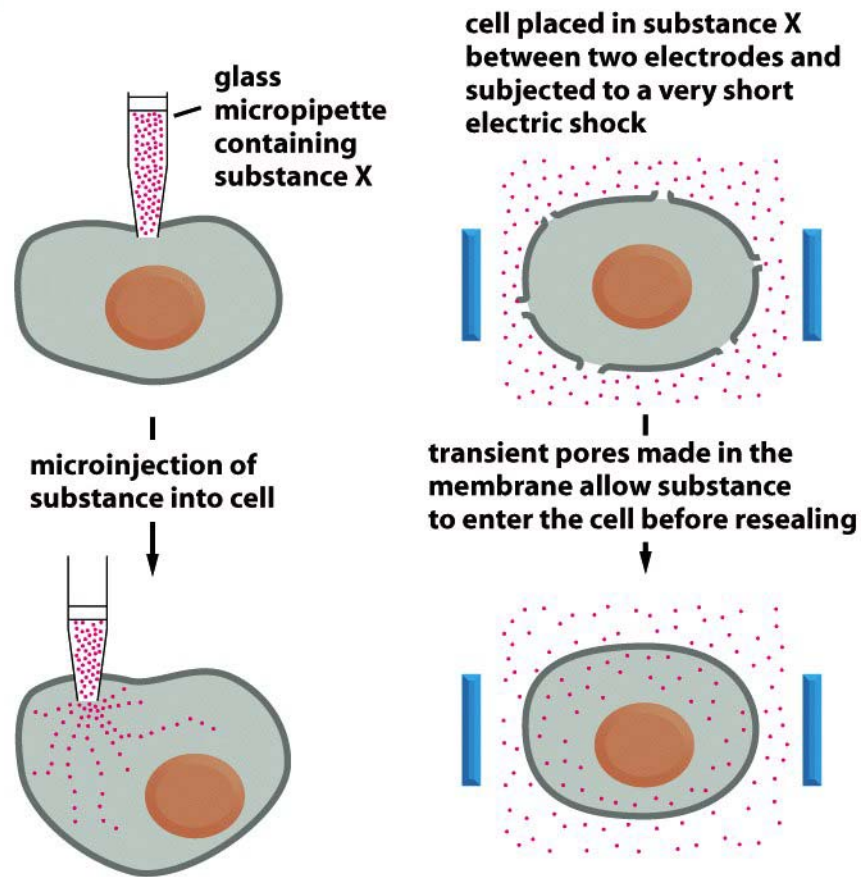
⁴ Graduate School of Medicine, University of Tokyo

* takahiro.shinada@aist.go.jp

細胞機能修飾

Key technologies in cell biological studies:

Introduction of membrane-impermeant substances into living cells

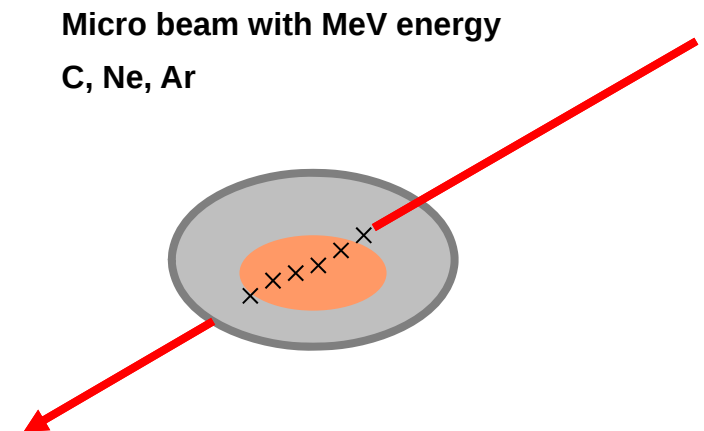


Microinjection

Electroporation

Source: Molecular Biology of THE CELL, 5th ed.

Work in Progress - Do not publish



Induce mutations and chromosomal aberrations based on the assumption that bombardment with high-energy ions disrupts the deoxyribonucleic acid (DNA) structure

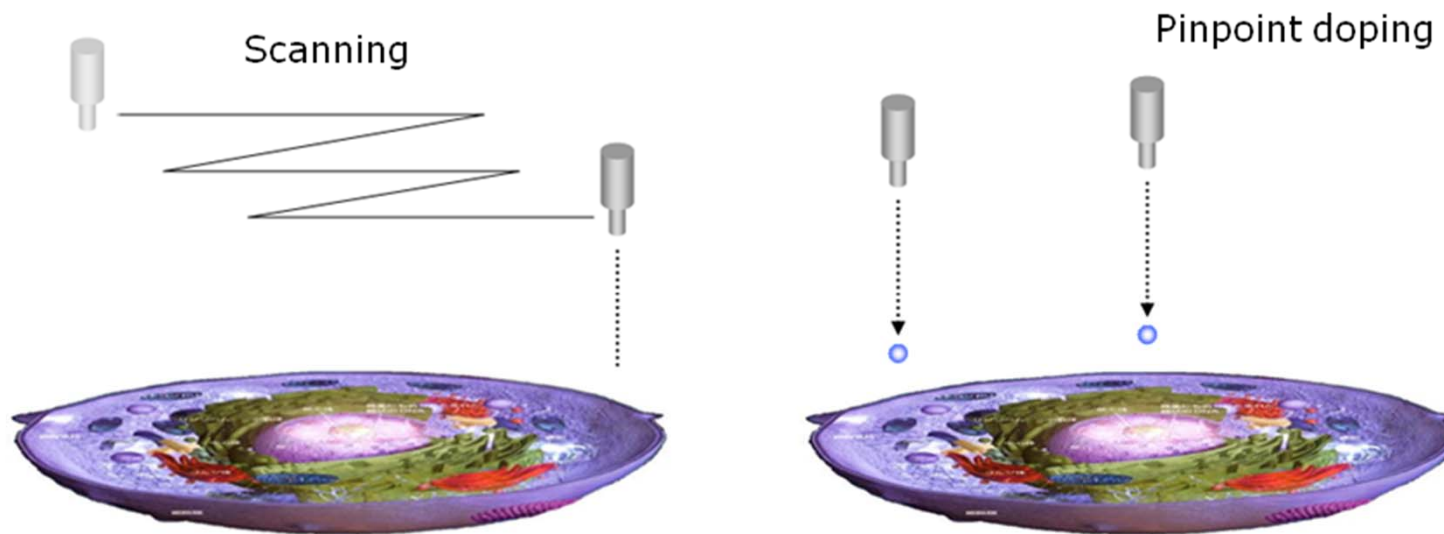
High energy ion beam

研究目的

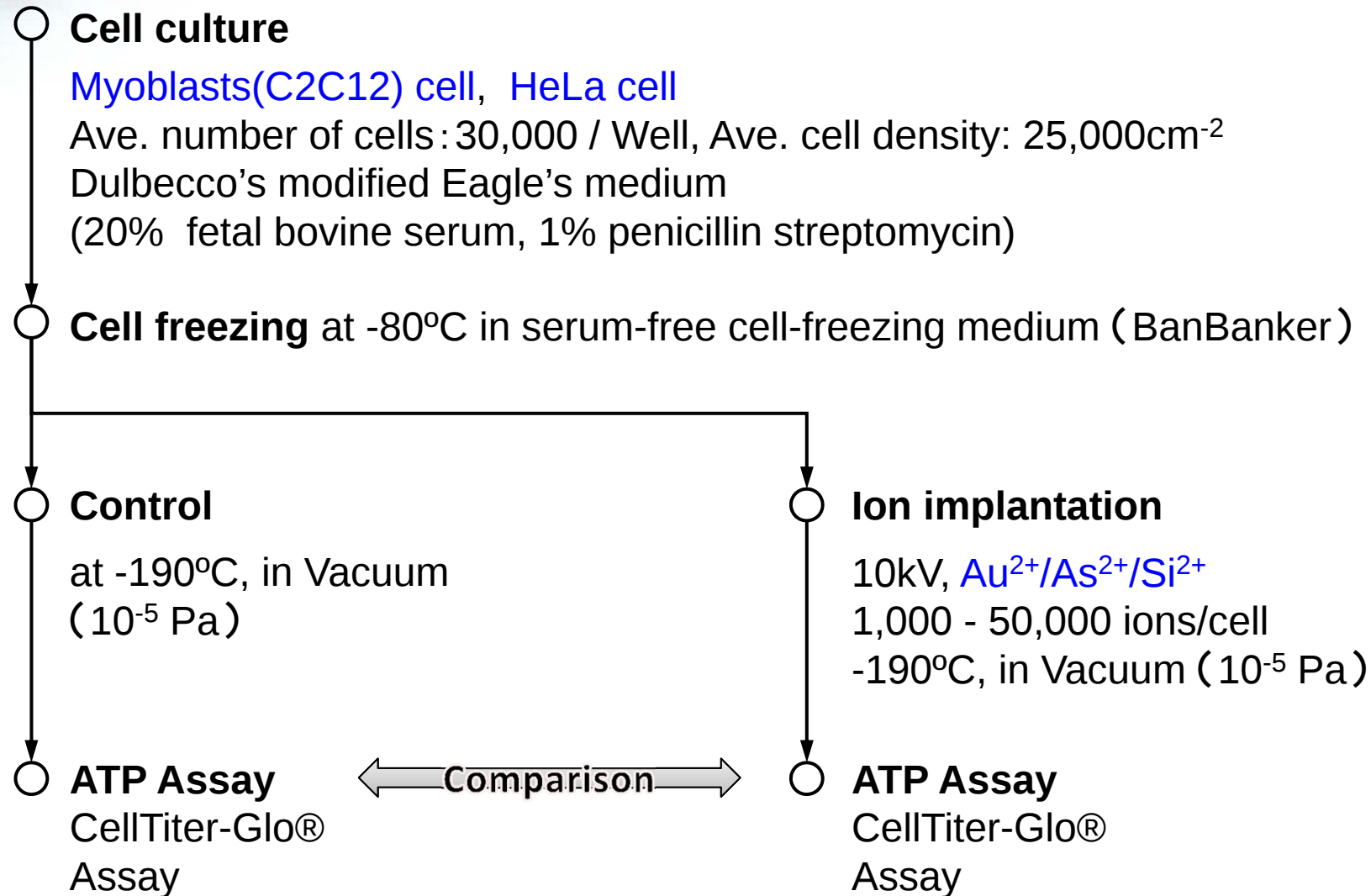
Develop the ion implantation method for modifying the function of live cells

Investigate the influence of dopants on cell viability quantitatively

Explore for an element that is effective for therapy and diagnosis



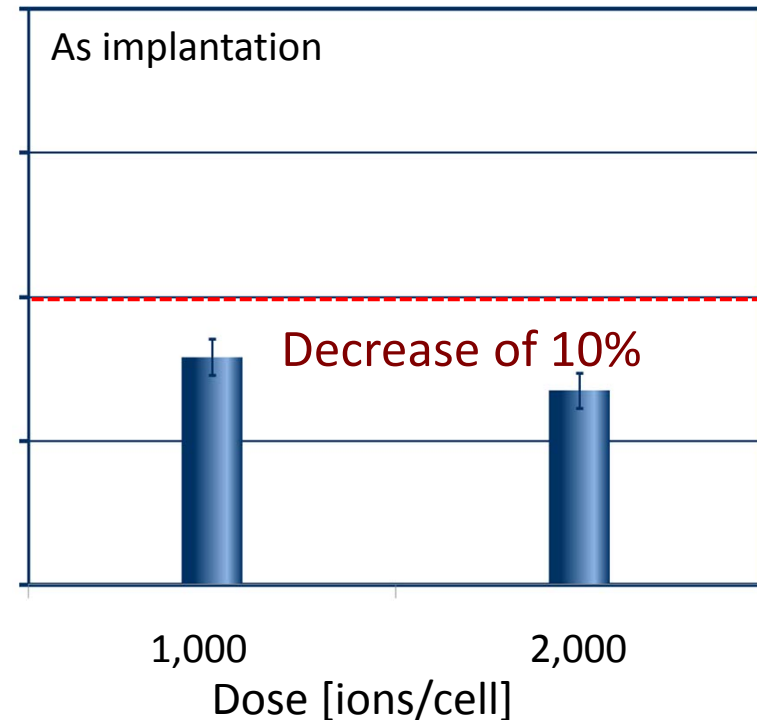
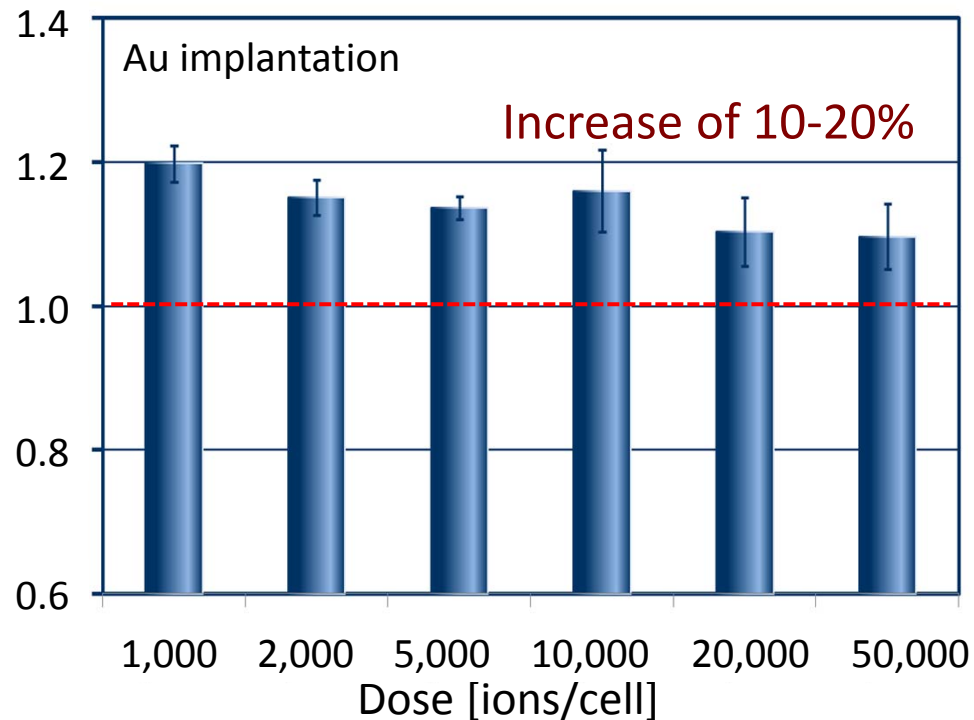
実験フロー



細胞活性への影響

T. Shinada, et al., *Biotechnol Bioeng* 2011

Cell viability normalized by control data



	Myoblast cells (C2C12)	Cancer cells (HeLa)
Si	In progress	ATP: 2 – 2.5 times higher
As	ATP: Decrease of 10 – 20%	ATP: Decrease of 10 – 40%
Au	ATP: Increase of 10 – 20%	ATP: Increase of 20 – 40%

まとめ

- ERM Deterministicドーピングコンセプトの紹介。
- Deterministicドーピング法としての単一イオン注入技術の現状を紹介。単一イオン入射検出率100%達成。照準精度およびスループット改善が課題。
- Beyond CMOS : PおよびAsドナーをチャネル中に1次元に配列したdeterministicドーピングデバイスを試作。低温において量子輸送現象を観測。高温動作化が課題。
- More-than-Moore : Siイオンを低エネルギーでダイヤモンド表面に規則的に照射。Si-V発光センターの規則配列に確認。収率評価と向上が課題。
- ESH : イオン注入法による細胞機能修飾を確認。微量元素の細胞への直接導入可能に。
- 単ドーパントデバイスの原理実証、ダイヤモンド中の単一発光センター評価、イオン注入法のバイオ応用を議論。

Evolution of Extended CMOS

