
3次元半導体検出器で切り拓く
新たな量子イメージングの展開

領域番号: 2508

平成 25 年度 ~ 平成 29 年度
科学研究費助成事業(科学研究費補助金)
(新学術領域研究(研究領域提案型))
研究成果報告書

令和1年8月

領域代表者 新井 康夫
(高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・特別教授)

はしがき

目に見えない X 線・赤外線・荷電粒子線等の量子線に対する測定では、量子それぞれを可視化する事が重要である。超微細画素の半導体センサによりこれら量子線データを高速・大量に取得し、2次元、3次元、さらに時間軸を加えた4次元画像として再構成を行うと、予期せぬ構造の発見や知見を得る事が可能となる。

本研究では、2種類のシリコン結晶基板を薄い酸化膜を挟んで張り合わせた Silicon-On-Insulator (SOI)ウエハを用い、高感度センサと集積回路とをピクセル内で3次的に一体化させた半導体プロセスを完成させ、革新的な放射線イメージング検出器(図 2)を開発した。この SOI ピクセル検出器は、究極の量子イメージングを実現する上で理想的な構造を有している。つまりセンサと回路が一体として半導体微細加工技術で製造され、SOI の 2 つの Si 活性層をセンサと処理回路として独立に最適化し、裏面照射により理想的な量子効率を実現できる。また2つの活性層のいずれにも能動素子を形成することができ、この 2 重活性層を利用することで、単一量子の検出と極低ノイズでの量子エネルギー計測を同時に行うデバイスなど、CCD 等の従来型デバイスでは実現できない、量子イメージングにとって理想的な新機能を持った様々な検出器を実現した。

本新学術領域研究の特徴のひとつは、このような新奇 SOI ピクセル検出器の物理的特性と最適構造の探求に於いて、学術的な興味をもつ半導体デバイス研究者と、新たなイメージング測定を求めている多分野の先端計測研究者が集まり、全く新しい形の研究開発集団として研究を行った事である。本領域研究によって、新たなデバイスの創出と、革新的な計測手法を実現する新しい融合研究領域が作られ、検出器開発技術を持った多くの若手研究者を育てた。

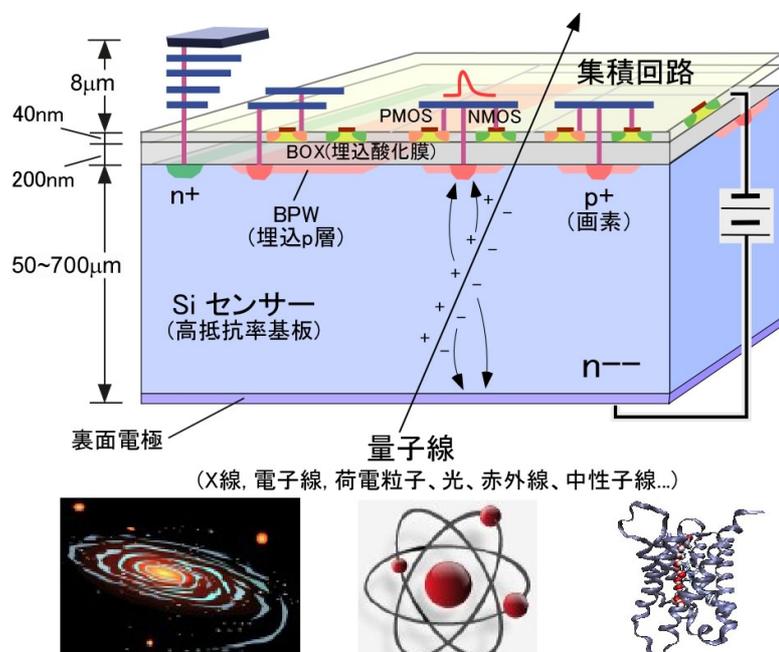


図 1. SOI ピクセル検出器の概念図。放射線により下部センサで発生した電荷は電場により上部電極に集められ、絶縁層上の集積回路により処理される。これにより宇宙から生命までのさまざま分野で使える検出器を開発し、新たな研究領域を拓いた。

研究組織

計画研究

領域代表者 新井 康夫
(高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・特別教授)

(X00: 総括班)

研究代表者 新井 康夫
(高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・特別教授)

研究分担者 三好 敏喜
(高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師)

研究分担者 幅 淳二
(高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・理事)

(A01 班: SOI 3次元ピクセルプロセスの研究)

研究代表者 新井 康夫
(高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・特別教授)

研究分担者 三好 敏喜
(高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師)

研究分担者 井田 次郎
(金沢工業大学・工学部・教授)

研究分担者 倉知 郁生
(高エネルギー加速器研究機構・先端加速器推進部・特別教授)

(A02班: SOI 技術を用いた極低ノイズ・高速イメージングデバイスの研究)

研究代表者 川人 祥二 (静岡大学・電子工学研究所・教授)

研究分担者 池辺 将之
(北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・教授)

研究分担者 香川 景一郎 (静岡大学・電子工学研究所・准教授)

研究分担者 安富 啓太 (静岡大学・電子工学研究所・助教)

(B01 班: 宇宙最初期ブラックホールの探査研究を実現する衛星搭載X線精密イメージングの開拓)

研究代表者 鶴 剛 (京都大学・理学研究科・教授)

研究分担者 森 浩二 (宮崎大学・工学部・准教授)

研究分担者 幸村 孝由 (東京理科大学・理工学部・准教授)

研究分担者 田中 孝明 (京都大学・理学研究科・助教)

研究分担者 武田 彩希 (宮崎大学・工学部・助教)

(B02 班: ダストに隠された宇宙の物質進化を暴く 極低温 SOI 赤外線イメージングの開拓)

研究代表者 和田 武彦 (宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教)

研究分担者 金田 英宏 (名古屋大学・理学研究科・教授)

研究分担者 渡辺 健太郎

(東京大学・先端科学技術研究センター・特任講師)

研究分担者 石丸 貴博

(国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員)

(C01 班: 高輝度加速器実験のための素粒子イメージング)

研究代表者 坪山 透

(高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師)

研究分担者 幅 淳二

(高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・理事)

研究分担者 原 和彦 (筑波大学 理学研究系 准教授)

研究分担者 外川 学 (大阪大学・理学部物理研究系・助教)

研究分担者 石川 明正

(高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所,准教授)

研究分担者 花垣 和則

(高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授)

研究分担者 田窪 洋介

(高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教)

研究分担者 池上 陽一

(高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師)

(C02 班: X線自由電子レーザーによる超高速ナノ構造解析用検出器)

研究代表者 初井 宇記

(理化学研究所・放射光科学総合研究センター・チームリーダー)

研究分担者 阿部 利徳

(高輝度光科学研究センター・光源基盤部門・研究員)

研究分担者 寺西 信一 (兵庫県立大学・付置研究所・特任教授)

研究分担者 工藤 統吾

(高輝度光科学研究センター・その他部局等・主幹研究員)

研究分担者 桐原 陽一

(理化学研究所・放射光科学総合研究センター・特別研究員)

(D01 班:放射光を用いた空間階層構造とダイナミクス研究のためのイメージング)

研究代表者 岸本 俊二
 (高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授)
 研究分担者 熊井 玲児
 (高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授)
 研究分担者 五十嵐 教之
 (高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・准教授)

(D02 班: 投影型イメージング質量分析による迅速で高解像度な生体内分子イメージング)

研究代表者 栗津 邦男 (大阪大学・工学研究科・教授)
 研究分担者 間 久直 (大阪大学・工学研究科・准教授)
 研究分担者 青木 順 (大阪大学・理学研究科・その他)

公募研究 (平成 26~27 年度、および平成 28~29 年度)

研究代表者 松村 彰彦 (群馬大学・重粒子線医学推進機構・助教)
 研究代表者 島添 健次 (東京大学・工学(系)研究科(研究院)・特任講師)
 研究代表者 平賀 純子 (関西学院大学・理工学部・准教授)
 研究代表者 佐々木 敏彦 (金沢大学・人間科学系・教授)
 研究代表者 小野 篤史 (静岡大学・電子工学研究所・准教授)
 研究代表者 林田 清 (大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授)
 研究代表者 石野 宏和 (岡山大学・自然科学研究科・教授)
 研究代表者 小貫 良行 (東京大学・素粒子物理国際研究センター)
 研究代表者 志村 考功 (大阪大学・工学研究科・准教授 助教)

交付決定額(配分額)

(金額単位:円)

	合計	直接経費	間接経費
平成 25 年度	235,170,000	180,900,000	54,270,000
平成 26 年度	293,280,000	225,600,000	67,680,000
平成 27 年度	286,910,000	220,700,000	66,210,000
平成 28 年度	293,930,000	226,100,000	67,830,000
平成 29 年度	272,870,000	209,900,000	62,970,000
総計	1,382,160,000	1,063,200,000	318,960,000

研究発表

【雑誌論文】

各計画研究班および公募研究の主要論文をリストします。*は Corresponding author。

A01 班

1. "Performance study of double SOI image sensors", *T. Miyoshi, Y. Arai, Y. Fujita, R. Hamasaki, K. Hara, Y. Ikegami, I. Kurachi, R. Nishimura, S. Ono, K. Tauchi, 2018 J. Inst. 13 C02005, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/02/C02005>.
2. "Diode Characteristics of a Super-Steep Subthreshold Slope PN-Body Tied SOI-FET for Energy Harvesting Applications", *Takayuki Mori; Jiro Ida; Shun Momose; Kenji Itoh; Koichiro Ishibashi; Yasuo Arai, IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2018, Vol. 6, pp. 565 – 570. DOI: 10.1109/JEDS.2018.2824344
3. "Development of monolithic pixel detector with SOI technology for the ILC vertex detector", *M. Yamada, S. Ono, T. Tsuboyama, Y. Arai, J. Haba, Y. Ikegami, I. Kurachi, M. Togawa, T. Mori, W. Aoyagi, S. Endo, K. Hara, S. Honda and D. Sekigawa, 2018_JINST_13_C01037. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/01/C01037>.
4. "SOI monolithic pixel technology for radiation image sensor", *Y. Arai, T. Miyoshi, and I. Kurachi, 2017 IEEE Electron Device Meeting (IEDM17), Invited Talk, Session 16.2, pp. 389–392. Pages: 16.2.1 – 16.2.4. DOI: 10.1109/IEDM.2017.8268401.
5. "Front end electronics of double SOI X-ray imaging sensors", *T. Miyoshi, Y. Arai, Y. Fujita, K. Hara, Y. Ikegami, I. Kurachi, K. Tauchi, T. Tsuboyama, M. Yamada, S. Ono, R. Nishimura, and R. Hamasaki, iWoRiD 2016, 2017 JINST 12 C02004, doi:10.1088/1748-0221/12/02/C02004.
6. "SOI Monolithic Pixel Detector Technology", *Y. Arai, Proceedings of Science, PoS(Vertex 2016)029.
7. "Tradeoff Between Low-Power Operation and Radiation Hardness of Fully Depleted SOI pMOSFET by Changing LDD Conditions", *I. Kurachi, K. Kobayashi, M. Mochizuki, M. Okihara, H. Kasai, T. Hatsui, K. Hara, T. Miyoshi, and Y. Arai, IEEE Trans. on Elec. Dev., Vol. 63, pp. 2293–2298, June 2016. doi 10.1109/TED.2016.2552486

A02 班

1. S. Shrestha, *S. Kawahito, H. Kamehama, S. Nakanishi, K. Yasutomi, K. Kagawa, N. Teranishi, A. Takeda, T. Go Tsuru, I. Kurachi, Y. Arai, "A Silicon-on-Insulator-Based Dual-Gain Charge-Sensitive Pixel Detector for Low-Noise X-ray Imaging for Future Astronomical Satellite Missions", Sensors 2018, 18(6), 1789, <https://doi.org/10.3390/s18061789>
2. H. Kamehama, *S. Kawahito, S. Shrestha, S. Nakanishi, K. Yasutomi, A. Takeda, T. Go Tsuru, Y. Arai, "A Low-Noise X-ray Astronomical Silicon-On-Insulator Pixel Detector Using

- a Pinned Depleted Diode Structure”, *Sensors* 2018, 18, 27; doi:10.3390/s18010027.
3. A.Takeda, T. Go Tsuru, T. Tanaka, H. Uchida, H. Matsumura, Y. Arai, K. Mori, Y. Nishioka, R. Takenaka, T. Kohmura, S. Nakashima, S. Kawahito, K. Kagawa, K. Yasutomi, H. Kamehama, and S. Shrestha, Improvement of Spectroscopic Performance using a Charge-sensitive Amplifier Circuit for an X-Ray Astronomical SOI Pixel Detector, 2015, *JINST*, 10, C06005, doi:10.1088/1748-0221/10/06/C06005
 4. M-W. Seo, *S. Kawahito, K. Yasutomi, K. Kagawa, N. Teranishi, “A Low Dark Leakage Current High-Sensitivity CMOS Image Sensor With STI-Less Shared Pixel Design,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol.61, Issue6, pp.2093 - 2097, June 2014.
 5. *M.Ikebe, “Recent progress in the technology linking sensors and digital circuits”,*IEICE Electronics Express*, Vol.11, No.3,pp.2014-2023,2014.2.10.

B01 班

1. *O. Shunichi; T. G. Tsuru; T. Tanaka, H. Uchida, A. Takeda, et al., “Reduction of cross-talks between circuit and sensor layer in the Kyoto’s X-ray astronomy SOI pixel sensors with Double-SOI wafer”, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, Vol. 831, 2016, pp. 61-64.
2. *M. Itou, T. Go Tsuru, T. Tanaka, A. Takeda, H. Matsumura, S. Ohmura, H. Uchida, S. Nakashima, Y. Arai, I. Kurachi, K. Mori, R. Takenaka, Y. Nishioka, T. Kohmura, K. Tamasawa, C. Tindall, “The first back-side illuminated types of Kyoto’s X-ray astronomy SOIPIX”, *Nucl. Instr. and Meth. A*831 (2016), pp. 55-60, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.04.012>.
3. *A.Takeda, T. Go Tsuru, T. Tanaka, H. Uchida, H. Matsumura, Y. Arai, K. Mori, Y. Nishioka, R. Takenaka, T. Kohmura, S. Nakashima, S. Kawahito, K. Kagawa, K. Yasutomi, H. Kamehama, and S. Shrestha, Improvement of Spectroscopic Performance using a Charge-sensitive Amplifier Circuit for an X-Ray Astronomical SOI Pixel Detector, 2015, *JINST*, 10, C06005, doi:10.1088/1748-0221/10/06/C06005.
4. *H. Matsumura, T. Go Tsuru, T. Tanaka, A. Takeda, Y. Arai, K. Mori, Y. Nishioka, R. Takenaka, T. Kohmura, S. Nakashima, T. Hatsui, Y. Kohmura, D. Takei, T. Kameshima, Improving charge-collection efficiency of SOI pixel sensors for X-ray astronomy, 2015, *NIM A*, 794, 255-259, doi:10.1016/j.nima.2015.05.008.
5. Investigation of charge-collection efficiency of Kyoto’s X-ray astronomical SOI pixel sensors, *XRPIX*, *H.Matsumura, T.G.Tsuru (8名中2番目), S.Nakashima, 2014, *NIM A*, 765, 183-186.

B02 班

1. H. Makitsubo, *T. Wada, H. Kataza, M. Mita, T. Suzuki, K. Yamamoto, “Fabrication and Analysis of Three-Layer All-Silicon Interference Optical Filter with Sub-Wavelength Structure toward High Performance Terahertz Optics”, *J. of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 38, pp.206-214 (2017). Doi:10.1007/s10762-016-0328-z.

2. *T. Wada, Y. Arai, S. Baba, M. Hanaoka, Y. Hattori, H. Ikeda, H. Kaneda, C. Kochi, A. Miyachi, K. Nagase, H. Nakaya, M. Ohno, S. Oyabu, T. Suzuki, S. Ukai, K. Watanabe, K. Yamamoto, “Development for Germanium Blocked Impurity Band Far-Infrared Image Sensors with Fully- Depleted Silicon-On-Insulator CMOS Readout Integrated Circuit”, J. of Low Temperature Physics 184, 217-224 (2016). Doi:10.1007/s10909-016-1522-z.
3. *K. Nagase, T. Wada, H. Ikeda, Y. Arai, M. Ohno, M. Hanaoka, H. Kaneda, S. Oyabu, Y. Hattori, S. Ukai, T. Suzuki, K. Watanabe, S. Baba, C. Kochi, K. Yamamoto, “A Demonstration of TIA Using FD-SOI CMOS OPAMP for Far-Infrared Astronomy”, J. of Low Temperature Physics 184, 449-453, (2016). Doi:10.1007/s10909-016-1551-7.
4. *M. Hanaoka, H. Kaneda, S. Oyabu, M. Yamagishi, Y. Hattori, S. Ukai, K. Shichi, T. Wada, T. Suzuki, K. Watanabe, K. Nagase, S. Baba, C. Kochi, “Development of Blocked-Impurity-Band-Type Ge Detectors Fabricated with the Surface-Activated Wafer Bonding Method for Far-Infrared Astronomy”, J. of Low Temperature Physics 184, 225-230, (2016). Doi:10.1007/s10909-016-1484-1.

C01 班

1. *M. Yamada, S. Ono, T. Tsuboyama, J. Haba, Y. Ikegami, I. Kurachi, M. Togawa, K. Hara, et al., Development of monolithic pixel detector with SOI technology for the ILC vertex detector, Journal of Instrumentation, D13(2018) C01037-C01037, DOI: 10.1088/1748-0221/13/01/C01037.
2. *S. Ono, M. Togawa, M. Yamada, T. Tsuboyama, K. Hanagaki, et al., Development of a pixel sensor with fine space-time resolution based on SOI technology for the ILC vertex detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 845(2017) 139-142, DOI: 10.1016/j.nima.2016.04.119
3. *S. Ono, M. Yamada, T. Tsuboyama, Y. Arai, I. Kurachi, M. Togawa, T. Mori, A monolithic pixel sensor with fine space-time resolution based on silicon-on-insulator technology for the ILC vertex detector, Proceedings of science, 055, 2017. DOI: 10.22323/1.287.0055
4. *M. Asano, D. Sekigawa, K. Hara, T. Tsuboyama, et al., Characteristics of non-irradiated and irradiated double SOI integration type pixel sensor, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 831(2016)315-321.DOI: 10.1016/j.nima.2016.03.095
5. *M. Yamada, Y. Arai, Y. Fujita, R. Hamasaki, Y. Ikegami, I. Kurachi T. Miyoshi, R. Nishimura K. Tauchi, T. Tsuboyama, Compensation for radiation damage of SOI pixel detector via tunneling, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 831(2016) 309-314, DOI: 10.1016/j.nima.2016.04.110

C02 班

1. “Improving charge-collection efficiency of SOI pixel sensors for X-ray astronomy”, *H. Matsumura, T.G. Tsuru, T. Tanaka, A. Takeda, Y. Arai, K. Mori, Y. Nishioka, R. Takenaka, T. Kohmura, S. Nakashima, T. Hatsui, Y. Kohmura, D. Takei, T. Kameshima, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 794 (2015) 255-259.

2. “Development of Experimental Methodology for Highly Efficient Wafer-Level Evaluation of X-Ray Radiation Effects on Semiconductor Devices”, *T. Kudo, K. Kobayashi, S. Ono, T. Watanabe, H. Kinoshita, M. Okihara, and T. Hatsui, IEEE Trans. Nuclear Science, Vol.61, Issue 3, 10.1109/TNS.2014.2321766 (2014)
3. “X-ray imaging detectors for synchrotron and XFEL sources“, *Takaki Hatsui, and Heinz Graafsma, IUCrJ, 2015, Vol. 2(3), p. 371-383. 学術雑誌 invited review

D01 班

1. *R. Hashimoto, Y. Arai, N. Igarashi, R. Kumai, Y. Lu, T. Miyoshi, R. Nishimura, Q. Ouyang, Y. Zhou and S. Kishimoto, “Evaluation of a pulse counting type SOI pixel using synchrotron radiation”, J. of Instrumentation, Vo. 12, 2017, C03061. 査読有
2. *Y. Zhou, Y. Lu, R. Hashimoto, R. Nishimura, S. Kishimoto, Y. Arai and Q. Ouyang, Synchrotron beam test of a photon counting pixel prototype based on Double-SOI technology”, Y. Zhou, Y. Lu, R. Hashimoto, R. Nishimura, S. Kishimoto, Y. Arai and Q. Ouyang, JINST 12(2017) C01037. 査読有
3. *R. Hashimoto, Y. Arai, N. Igarashi, R. Kumai, T. Miyoshi and S. Kishimoto, “Test results of a counting type SOI device for a new X-ray area detector”, AIP Conference Proceedings 1741, 040031 (2016). 査読有
4. *Ryo Hashimoto, Noriyuki Igarashi, Reiji Kumai and Shunji Kishimoto, “Application of SOI Area Detectors to Synchron Radiation X-ray Experiments”, SOIPIX2015, arXiv:1507.07732 [physics.ins-det], 2015, pp. 07732-1~6. 査読無

D02 班

1. *Y. Tachibana, Y. Nakajima, T. Isemura, K. Yamamoto, T. Satoh, J. Aoki, M. Toyoda: “High spatial resolution laser desorption/ionization mass spectrometry imaging of organic layers in an organic light-emitting diode,” Mass Spectrom. 5, A0052 (2016).
2. H. Kannen, *H. Hazama, Y. Kaneda, T. Fujino, and K. Awazu: “Development of laser ionization techniques for evaluation of the effect of cancer drugs using imaging mass spectrometry,” Int. J. Mol. Sci. 15(7), 11234-11244 (2014).
3. *間久直, 守口直輝, 藤野竜也, 栗津邦男: “マトリックス支援レーザー脱離イオン化を用いた薬剤のイメージング質量分析に向けたゼオライトによるイオン化効率の向上,” 電学誌 C 134(5), 657-663 (2014).
4. *J. Aoki, S. Ikeda, and M. Toyoda: “Observation of accumulated metal cation distribution in fish by novel stigmatic imaging time-of-flight mass spectrometer,” J. Phys. Soc. Jpn. 83(2), 023001 (2014).

公募研究

1. *Yoshihara, Y., Shimazoe, K., Mizumachi, Y., & Takahashi, H. (2017). Evaluation of double photon coincidence Compton imaging method with GEANT4 simulation. Nuclear

Instruments and Methods in Physics Research Section A, 873, 51-55.

2. *Koyama, A., Shimazoe, K., Wiest, F., Iskra, P., Ganka, T., Schneider, F. R., ... & Takahashi, H. (2017). Fabrication and characterization of a 500- μ m-pitch 64-channel silicon photomultiplier prototype. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.

3. *Shimazoe, K., Yoshihara, Y., Fairuz, A., Koyama, A., Takahashi, H., Takeda, A., ... & Arai, Y. (2016). Electron Pattern Recognition using trigger mode SOI pixel sensor for Advanced Compton Imaging. Journal of Instrumentation, 11(02), C02030.

4. *佐々木敏彦、三井真吾、新谷正義、重要部品の検査のためのリアルタイム X 線残留応力測定装置、ケミカルエンジニアリング、63 巻、pp.23-27、2018.

5. "SOIKID, SOI pixel detector combined with superconducting detector KID," *H. Ishino, A. Kibayashi, Y. Kida, Y. Yamada, Proceedings for SOIPIX2015, arXiv:1507.01326

6. 「フォノン・フォトン検出用 Kinetic Inductance Detector」*石野宏和、樹林敦子、山田要介、岡本晃範、喜田洋介、羽澄昌史、佐藤伸明、神代暁、山森弘毅、信学技報 IEICE Technical Report, SCE2014-42 (2014) 43-47

【学会等発表】

各計画研究班および公募研究の学会等における主な発表を示します。

A01 班

1. Yasuo Arai, "High Resolution SOI Pixel Detector", Dec. 11, 2017, International Workshop HSTD11 & SOIPIX2017, Invited Talk.
2. Y. Arai, "SOI monolithic pixel technology for radiation image sensor", 2017 IEEE Electron Device Meeting (IEDM17), Dec. 4-6, San Francisco, Invited Talk.
3. Y. Arai, "SOI Monolithic Pixel Detector Technology", The 25th International workshop on vertex detectors, September 26-30, 2016, La Biodola, Isola d'Elba, ITALY, Invited Talk.
4. Y. Arai, 2015.3.28-31 National Symposium on Particles, Detectors and Instrumentation, Madurai, India, Yasuo Arai, 'Radiation image sensor with Silicon-On-Insulator technology', Invited Talk.

A02 班

1. S. Shrestha, H. Kamehama, K. Yasutomi, K. Kagawa, N. Teranishi, A. Takeda, T-Go Tsuru, Y. Arai, S. Kawahito, "Event-Driven Dual-Gain Fully-Depleted SOI Based X-Ray Detector for High Energy Particle Imaging", 2017 INTERNATIONAL IMAGE SENSOR WORKSHOP, Hiroshima, Japan, 2017.6.2
2. S. Kawahito, "Highly Time-Resolved CMOS Image Sensors Using High-Speed Carrier Modulation Techniques", 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2016), Ibaraki, Japan, 2016.9.27, 招待講演
3. S. Kawahito, M-W. Seo, K. Yasutomi, K. Kagawa, N. Teranishi, "Ultra-High Sensitivity Wide

Dynamic Range Image Sensors Using High Conversion-Gain Detectors and Multiple-Sampling-Based Readout Techniques”, International Forum on Detectors for Photon Science (IFDEPS)2016, Yamanashi, Japan, 2016.2.29, 招待講演

4. H. Kamehama, K. Yasutomi, K. Kagawa, S. Kawahito, et al., “Fully Depleted SOI Pixel Photo Detectors with Backgate Surface Potential Pinning”, 2015 International Image Sensor Workshop (IISW 2015), 3.05, 2015 International Image Sensor Workshop, Vaals, The Netherlands, 2015.6.8.

B01 班

1. T. Tsuru, et al., “Spectral Performances of Kyoto’s X-ray Astronomical SOI pixel sensor in the Frame and Event-Driven Readout Modes”, SPIE Space Telescopes and Instrumentation 2016, Edinburgh, UK
2. “Kyoto’s X-ray Astronomical SOI pixel sensor - XRPIX”, T.G.Tsuru (22 名中 1 番目), in SOIPIX2015, held in Sendai, Japan, June 3-4, 2015

B02 班

1. 和田武彦、「宇宙・天文と MEMS 技術」、『共用施設から生まれるイノベーション』～ナノテクが拓く未来～(2018/3/9) 一文部科学省 平成 29 年度 微細加工ナノプラットフォームコンソーシアム シンポジウム、東京大学武田先端知ビル、2018 年 3 月 9 日 (招待講演)
2. 和田武彦、「Cryo-SOI 極低温集積回路と Ge:Ga 遠赤外線検知器を用いた 3D 積層遠赤外線イメージセンサーの開発」、TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」第 2 回 3 次元積層半導体量子イメージセンサ研究会、つくば国際会議場、2018, (招待講演)
3. 和田武彦、鈴木仁研、「SPICA の中間赤外線・遠赤外線検出器」、第 5 回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ、2015 年 12 月 7-9 日、東北大学理学研究科 青葉サイエンスホール (招待講演)
4. 天文・天体物理若手夏の学校にて赤外線センサーの開発に関する講演を行った。和田 武彦、「赤外線画像センサの基礎と開発の実際」、2014 年度第 44 回天文・天体物理若手夏の学校 (招待講演)

C01 班

1. S. Honda, Total Ionization Damage Compensations in Double Silicon-on-Insulator Pixel Sensors, TIPP 2014, 2-6 June 2014, Amsterdam, The Netherland
2. K. Hara, Initial Characteristics and Radiation Damage Compensation of Double Silicon-on-Insulator Pixel Device, VERTEX2014, 15-19 Spe. 2014, Macha Lake, The Czech Republic.
3. 「世界最高精度の放射線測定センサーを開発」、筑波大学 & KEK プレスリリース、つくばサイエンスニュース、大学ジャーナル ONLINE、オプトロニクスオンライン、www.tsukubai.ac.jp/attention-research/p201706231400.html.

C02 班

1. “シリコンX線 2次元検出器の課題と解決策”, *初井宇記、小野峻、亀島敬、工藤統語、尾崎恭介、小林和生、桐原陽一、遠茂谷誠彦、矢橋牧名, 第27回日本放射光学会年会、2015.1.12、広島市
2. *Takaki Hatsui, “X-ray Imaging Detectors at SACLA: Current Status and Future Perspectives”, (6th Ringberg Meeting on Science with FELs, Schloss Ringberg, Germany, Feb. 22nd, 2015)
3. *N. Teranishi, and T. Hatsui, “X-ray image sensors for SACLA and future Ultimate Storage Ring Light Sources”, Workshop on Active CMOS Pixel Sensors for Particle Tracking (CPIX14) (Bonn, Germany, 2014).
4. *Takaki Hatsui (invited review), “Developments of Detectors for XFEL experiments”, Workshop on Crystallography at XFEL Sources, (IUCr Congress, Montreal, Canada, August 5th, 2014)

D01 班

1. R. Hashimoto, Y. Arai, N. Igarashi, R. Kumai, T. Miyoshi and S. Kishimoto, “Test results of a counting type SOI device for a new X-ray area detector”, 8th International Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging. 2016, セストリレバンテ(イタリア).
2. 橋本 亮, 新井 康夫, 五十嵐 教之, 熊井 玲児, 三好 敏喜, 西村龍太郎, 岸本 俊二、「計数型 SOI TEG の放射光 X 線による評価 (2)」、日本物理学会、2016 年 9 月 13-16。
3. R. Hashimoto, Y. Arai, N. Igarashi, R. Kumai, T. Miyoshi and S. Kishimoto, “Test results of a counting type SOI device for a new X-ray area detector”, International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2015), 2015 年 7 月 6-10 日。

D02 班

1. H. Hazama, T. Hondo, H. Matsuoka, J. Aoki, Y. Kawai, Y. Fujita, M. Ikebe, Y. Arai, M. Toyoda, K. Awazu: “Development of a position and time sensitive ion detector MALPIX for stigmatic imaging mass spectrometry,” 2nd Workshop on SOI Pixel Detector, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, Onna, Okinawa, Japan (14 Dec. 2017).
2. Y. Fujita, Y. Arai, T. Hondo, H. Matsuoka, H. Hazama, Y. Kawai, J. Aoki, M. Toyoda, K. Awazu: “Development of a pixel ion detector for a stigmatic time-of-flight imaging mass spectrometry,” 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Hyatt Regency, Atlanta, GA, USA (25 Oct. 2017).
3. J. Aoki, Y. Kawai, Y. Fujita, H. Hazama, T. Hondo, K. Awazu, M. Toyoda, Y. Arai: “Development of a time and position sensitive ion detector for a stigmatic imaging mass spectrometer,” 64th ASMS Conference on Mass Spectrometry and Allied Topics, Henry B. González Convention Center, San Antonio, TX, USA (6 Jun. 2016).

公募研究

1. *Atsushi Ono, Atsutaka Miyamichi, Hiroki Kamehama, Keiichiro Kagawa, Keita Yasutomi, Shoji Kawahito, "Multi-band plasmonic color filters with corrugated metallic thin film," AOPC2017, Beijing, China, Jun. 4th-6th, 2017(招待講演).
2. *Atsushi Ono and Atsutaka Miyamichi, "Plasmonic Color Filter of Corrugated Metallic Thin Film," The 37th PIERS in Shanghai, Shanghai, China, Aug. 8th-11th, 2016. (招待講演)
3. 三井真吾、佐々木敏彦、SOI 検出器を用いた $\cos \alpha$ 法応力測定、平成 29 年度日本非破壊検査協会非破壊検査総合シンポジウム、2017
4. 三井真吾、佐々木敏彦、西村龍太郎、三好敏喜、新井康夫、一体型 SOI 検出器を用いたリアルタイム X 線応力測定装置の開発、日本非破壊検査協会第 10 回現場指向 X 線残留応力測定法研究委員会、2017.
5. R. Hosono, T. Shimura, et al., "Improvements of Grating-based X-ray Phase Contrast Imaging with a Microfocus X-ray Source by a SOI Pixel Detector, SOPHIAS", HSTD11 & SOIPIX2017, (Okinawa, Japan, December 10 - 15, 2017).
6. 細野 凌、志村考功、他、"マイクロフォーカス X 線源と振幅格子を用いた多波長 X 線位相イメージング-SOI ピクセル検出器による高度化-", 精密工学会 2017 年度秋季大会。
7. Background Modelling and Pixel Clustering for Low-Background Axion-WIMP Search Pilot Experiment, Alejandro Mora, 第 72 回日本物理学会年次大会, 大阪大学 2017-03/17-20.
8. SOI イメージセンサを用いた治療用炭素線測定 2015, 松村彰彦, 日本医学物理学会学術大会, 北海道大学, 2015-09/19.

【書籍】

A01 班

1. "Analog Electronics for Radiation Detection (Devices, Circuits, and Systems)", Editor Renato Turchetta, Chapter 5 'Time-to-Digital Converter', Y. Arai, ISBN-10: 1498703569, ISBN-13: 978-1498703567, CRC Press (2016/4/26).
2. "Radiation Imaging Detectors Using SOI Technology", Y. Arai and I. Kurachi, Synthesis Lectures on Emerging Engineering Technologies, Morgan & Claypool Publisher (2017/2/15), ISBN-13: 978-1627056960.

A02 班

1. 池辺将之(第 4 章担当分), 次世代自動車の運転支援システムと求められる制御技術, 第 4 章 次世代自動車の運転支援システムを実現するセンサ・カメラ・通信技術, "CMOS イメージセンサの広ダイナミックレンジ(HDR)撮像・HDR 圧縮技術", (株)技術情報協会, 2015 年 8 月 確定、総ページ数 約 500 ページ(うち 12 ページ担当)
2. Makoto Narue 編著, N.Tate, M.Ando, M.Ohtsu, S.Kawahito, 他著者 26 名, 第 6 章「Single Photoelectron Manipulation and Detection with Sub-Nanosecond Resolution in CMOS Imagers」,

pp.145-159 担当, Springer 社, 2014.

【特許】

A01 班

1. 「半導体装置の製造方法」特許第 6202515 号 (2017.9.8)
2. 「半導体装置およびその製造方法」特許番号 第 6108451 (2017.3.17)
3. 放射線被曝耐性 SOI トランジスタ, 特願 2015-199200 (2015.10.7),
4. RADIATION-DAMAGE-COMPENSATION-CIRCUIT AND SOI-MOSFET,
PCT/JP2016/079797 (2016.10.6)

A02 班

1. 半導体装置及び固体撮像装置, 川人祥二, 安富啓太, 三浦規之, 葛西大樹, 沖原将生,
特願 2018-053429, 出願日 2018 年 3 月 20 日
2. 電磁波検出素子及び固体撮像装置, 川人祥二, 安富啓太, 亀濱博紀, 特願 2014-127700,
出願日 2014 年 6 月 20 日
3. 「デジタル回路及び A/D (Analog/Digital) 変換回路並びにデジタル信号処理方法」、池辺将
之 渡辺佳織、特願 2015-093073、2015 年 4 月 30 日

【受賞】

A01 班

1. 高エネルギー加速器科学奨励会諏訪賞、「SOI 技術を使った革新的ピクセルセンサーの実
現」、新井康夫、倉知郁生。2018 年 2 月 23 日科学新聞。

C02 班

1. 高エネルギー加速器科学奨励会小柴賞、「SOI 技術を用いた広ダイナミック・レンジ X 線イメ
ージセンサーの開発」、初井宇記。2018 年 2 月 23 日科学新聞

公募研究

1. Best Presentation Award, The 4th International Symposium toward the Future of Advanced
Researches in Shizuoka University 2018, Atsutaka Miyamichi (2018 年 3 月 6 日)
2. 第 30 回高柳研究奨励賞, 浜松電子工学奨励会, 小野篤史 (2016 年 12 月 11 日)

研究成果

本領域研究では、3次元積層半導体技術を用いて、量子センサと高集積回路とを一体化した検出器を、様々な分野の研究者が連携し設計・製作・試験を行い、新たなサイエンスを切り拓くことを目的とした。特に下記のような成果を上げることが出来た。

- ・半導体放射線検出器による高エネルギー荷電粒子の飛跡位置測定において、世界で初めて 1 μm を切る精度を達成した。
- ・シリコン薄膜層を追加した Double SOI ウエハ技術の開発により、クロストークを 20 分の 1 に減少させ、放射線耐性を従来よりも 100 倍以上向上させた。
- ・新たな Pinned Depleted Diode (PDD) 構造を創出し、リーク電流を従来の 100 分の 1 以下に減少し、電荷収集効率を 100% 近くに向上させた。
- ・高ダイナミックレンジ・高精細・大面積の SOPHIAS 検出器によるカメラシステムを完成させ、XFEL SACLA、SPring-8 等の様々な実験で実用化した。
- ・センサ構造、回路の改良により XRPIX 検出器のノイズレベルを 8 電子まで減少させ、216eV (3.4%) FWHM @ 6.4 keV のエネルギー分解能を達成した。またイベント駆動型読み出しを実証し、次期 X 線衛星 FORCE への検出器候補として認められた。

以下に各研究班の成果を記します。

[計画研究]

A01: SOI 3次元ピクセルプロセスの研究

本研究班では、基本となる SOI ウエハー・プロセスの改良・開発を行い、同時に各研究班の為の相乗りプロセス (Multi Project Wafer : MPW) を主導した。各研究班からは、毎回 20 件程度の設計が集まり、大面積検出器もいくつか製作した (図 2 エラー! 参照元が見つかりません。)。またチップの厚さも用途に応じて 75 μm から 500 μm までのものまで各種製作できるようになった。さらに、PMOS と NMOS の活性化領域を一体化させる構造の工夫で、トランジスタの集積度を従来の 2 倍に向上させる等の成果をあげた。

この他、SOI 層を 2 重にした Double SOI ウエハー (図 3、特許取得) を独自に開発し、放射線耐性の向上やクロストークの削減に効果を得た。放射線照射試験では、中間 Si 層に適切なバイアスがかかることで放射線耐性を従来の 1k Gy (Si) から 100k Gy (Si) まで向上させる事が出来た (図 4)。また、中間 Si 層に高電圧をかける事で、酸化膜中にトラップされたホールを削減出来ることを実証した。クロストークに関しても中間 Si 層を入れる事で、Single SOI に比べてクロストーク量が 20 分の 1 程度まで減少することが確認された。

また、わずかなゲート電圧により電流値が大幅に変化し、究極の低消費電力トランジスタとも目

される Super Steep Transistor を SOI を使って開発し、IOT 等への幅広い応用が期待されている。

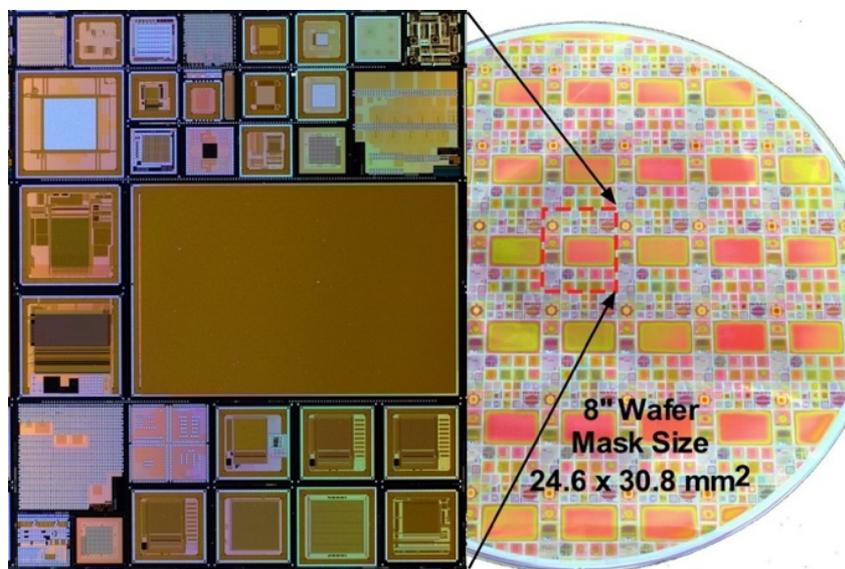


図 2.様々なチップを載せた SOI Pixel Multi Project Wafer (MPW)ランのウエハー(8インチ)。各区画に各研究班が設計した様々な検出器が載っている。

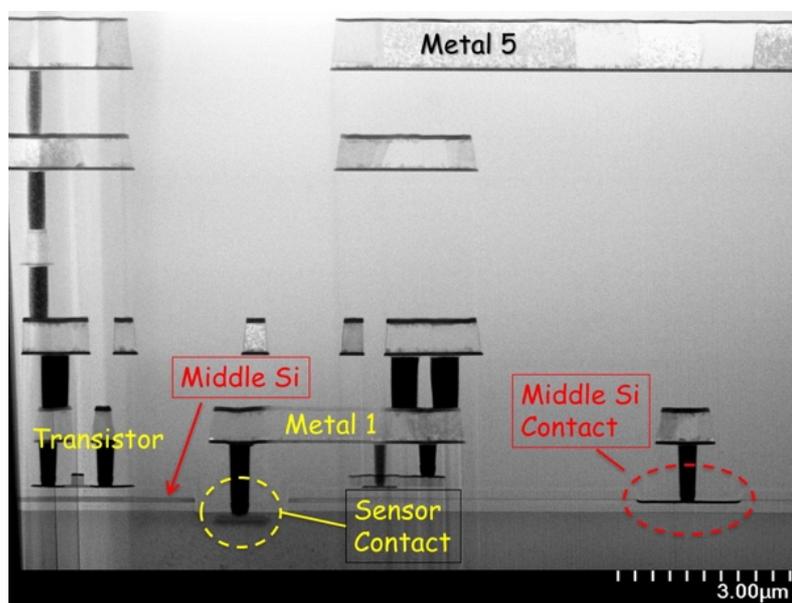


図 3. Double SOI ウエハ(特許取得)の断面構造。下部の灰色の濃い部分がセンサー部の一部。トランジスタのすぐ下に新たに Middle Si 層を挿入し、様々な改善が達成された。

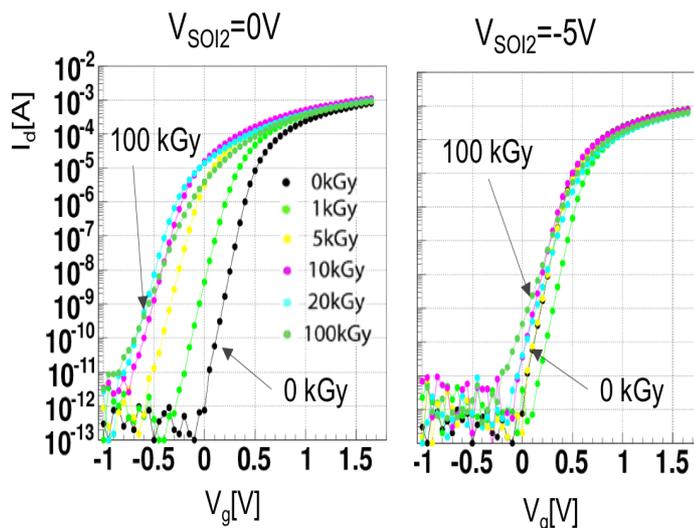


図 4. トランジスタの I_d - V_g 特性の放射線照射量による変化。(左)中間 Si 層を 0V のままにした場合。(右)中間 Si 層に -5V を印加した場合。100 kGy 照射後も、ほぼ照射前の特性を維持する事が出来た。

A02: SOI 技術を用いた極低ノイズ・高速イメージングデバイスの研究

本研究班では SOI ピクセル検出器の計測性能を格段に向上させるため回路・デバイスの要素技術開発を行った。

特に新たに考案した Pinned Depleted Diode(PDD)構造(図 5)により、バックゲート電位を固定化させながら、基板全体を空乏化して電荷検出部にキャリアを高速に導く電界を形成することができるようになった。図 6 に PDD ピクセルの電場構造を示す。絶縁層(BOX)下のセンサ部を中性化することによりリーク電流の発生が従来の 100 分の1以下に抑えられ、電荷検出部縮小化による低容量化により、従来のものより6倍以上変換利得の高い $187 \mu\text{V}/e$ を達成した。この結果、回路の工夫と合わせ、ノイズレベルを従来の 60 電子程度から 8 電子以下にまで削減させる事が出来た。

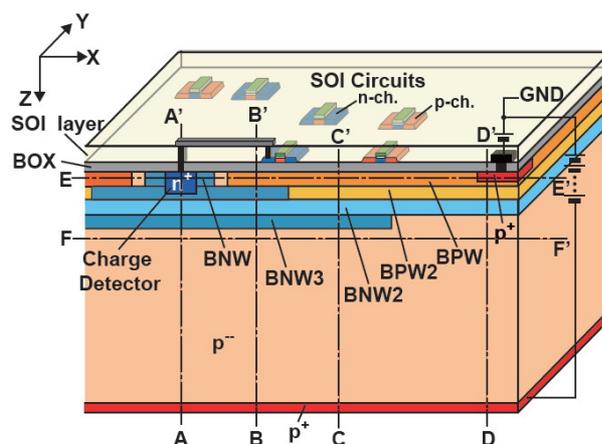


図 5. SOI-PDD 構造図の概観。センサ部への多層の埋め込み層により、発生電荷を電荷検出部に誘導すると同時に、リーク発生源である酸化膜との界面は中性化しリーク電流を抑えた。

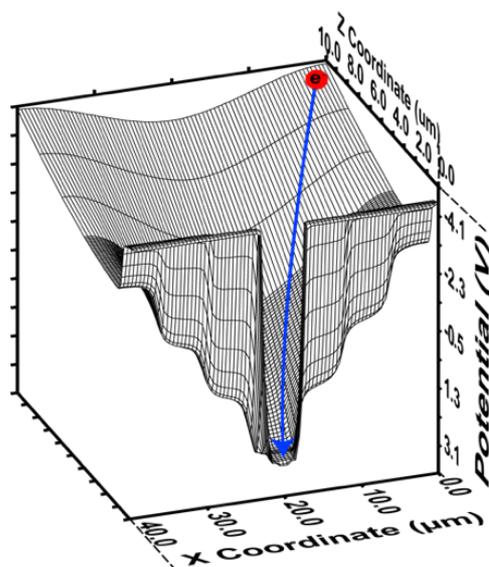


図 6. PDD 構造を持ったピクセルの電場構造。空乏層内で発生した電子は全て中心の小さな電荷検出部に集まる。

B01: 宇宙最初期ブラックホールの探査研究を実現する衛星搭載X線精密イメージングの開拓

宇宙最初期に誕生する超巨大ブラックホール「ファーストブラックホール」を探査・研究し、銀河も含めた形成と進化を読み解くことが本研究の科学的最終目標である。このため、広帯域、精密撮像、精密分光とともに、反同時計測による低バックグラウンド性能が必要であり、マイクロ秒の時間分解能を持つ X 線 SOIPIX 検出器 XRPIX の開発を行った。

最初は、小さな素子(2.4mm 角-6.0mm 角)の製作からスタートしたが、早期に当初目標のイベント駆動撮像分光に成功した。回路レイアウトの配置による電荷収集効率の改善、埋め込み P 層の小面積化および電荷有感型アンプの導入によるゲイン向上、差動増幅器の導入によるフロントエンド回路の簡素化等を行った。開発の最大の難関であった X 線のヒットを検出して読み出しを開始するイベント駆動時の分光性能劣化の原因が、回路層のデジタル回路動作によるセンサ層への干渉であることを突き止め、Double SOI 技術および PDD 構造を導入することで解決に成功した。また、衛星搭載に必要な放射線耐性を持つことも確認した。最終的に図 7 に示す XRPIX7 (15.3 x 24.6 mm²)を設計・製作した。このチップは 36 μm 角のピクセルを約 23.3 万画素持ち、X 線がヒットすると直ちにトリガー信号を出し、ヒットしたピクセルの周り 8 x 8 画素を高速に読み出すことが出来る。必要な 40keV までの広帯域性能とイベント駆動による 6.4keV X 線に対するエネルギー分解能 216eV (FWHM)を実現した(図 8)。

イベント駆動シリコンピクセル検出器で、この分光能力を発揮する検出器は他に存在せず、世界一と言える。本研究の成果を受け、XRPIX を主観測装置とする X 線天文衛星 FORCE が宇宙科学研究所のワーキング・グループとして認められ、また学会議の大型研究計画にも選定された。またこの検出器を用いた公募研究も進み、新たに 6 つのサイエ

ンス領域を切り拓いた。

稀にしか到来しない量子を検出する高時間分解能の精密撮像分光器として理想的な性能を持つ XRPIX の開発成功により、次のような新たな基礎物理学分野の創出にも繋がった；アキシオン探索、低質量暗黒物質探索、宇宙 X 線タルボ干涉計観測、弱い等価原理(重力質量と慣性質量の等価)検証。さらに宇宙観測と医学応用を統合した、電子トラック型コンプトンガンマ線カメラの研究開発も始まり、X 線撮像蛍光分析分野への応用の提案も受けた。

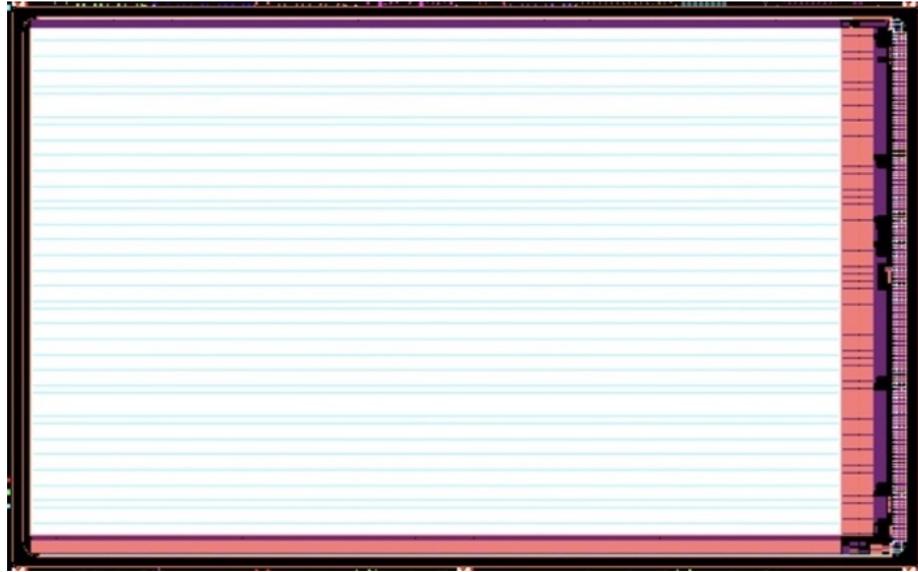


図 7. これまでで最大の面積を持つイベント駆動型 X 線ピクセル検出器 XRPIX7. 36 μm 角ピクセル、23.3 万画素(15.3 x 24.6mm² 角)。

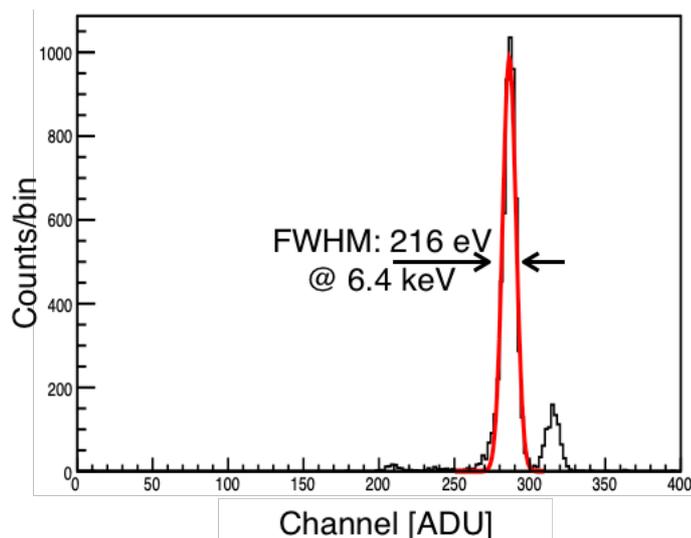


図 8. XRPIX6E でイベント駆動モードで測定した ⁵⁷Co の X 線スペクトル。トリガー型シリコン X 線ピクセル検出器として、世界最高の性能である。

B02: ダストに隠された宇宙の物質進化を暴く 極低温 SOI 赤外線イメージングの開拓

星間塵による吸収の影響を受けず、星の生成や銀河の進化を正確に評価できる遠赤外線イメージセンサーは、光赤外線天文学では極めて重要なデバイスである。このため、分子線結晶成長技術による高感度遠赤外線検出器「Blocked Impurity Band(BIB)型ゲルマニウム」と、FD-SOI CMOS プロセスを用いて開発した極低温動作読みだし集積回路(Readout Integrated Circuit; ROIC)を積層させた新たな多画素遠赤外線画像センサーの開発を行った(図 9)。

極低温で使用する際の熱膨張係数の違いの問題を、薄い GeBIB 検出器を厚い Si wafer で支持することで緩和させた。平成 29 年度にバンプ作業を行い、世界初となる 32x32 素子 BIB 型ゲルマニウム遠赤外線画像センサーを完成させた。また、気球実験用の 5x5 素子画像 BIB 型ゲルマニウム遠赤外線検出の試作も行った。シリコン基板支持型ゲルマニウム検出器の開発を行う過程で、不純物(ガリウム)濃度を従来の $1E16/cc$ から $8E16/cc$ に高めることで、有効波長を 160 ミクロンから目標の 200 ミクロンを越え 240 ミクロンまで伸長できることを実験により確認した。

検出器に関しては、ブロッキング層を薄層化した側面入射素子の開発に成功した。薄層化し効率よく光吸収層に電場が印加されるようにした結果、キャビティー無しで $1.5A/W$ と高い光電流変換効率を達成した。また Ge と Si の熱膨張係数の違いによる冷却時の破損を回避するため、シリコン保持基板の貼り付け技術も開発した。

また、これとは別に SOI のハンドルウエハ部を赤外線センサとする全く新たな検出器構造も考案し設計を行った(図 10)。

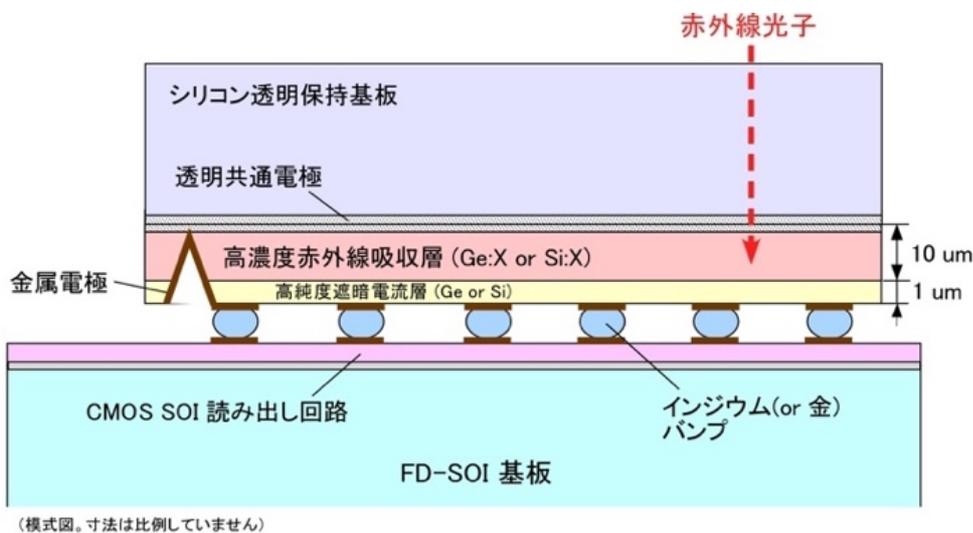


図 9. Hybrid 型赤外線イメージセンサー断面図。SOI の極低温動作による読み出し回路と、高濃度赤外線吸収層等を積層することで、高画素・遠赤外線検出器の開発を行った。

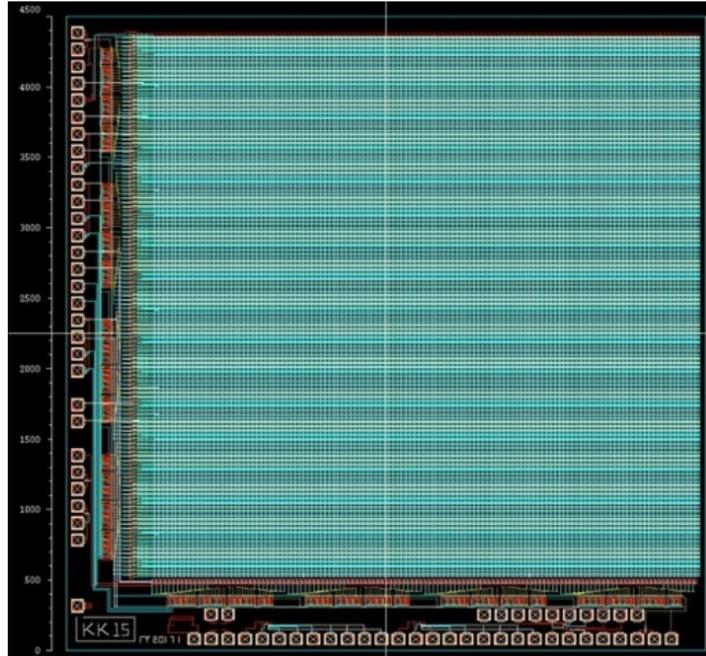


図 10. SOI のハンドルウエハ部を赤外センサとした、新しいモノリシック赤外センサ試験チップ (128x128ピクセル)。

C01: 高輝度加速器実験のための素粒子イメージング

本研究では、高エネルギービームの衝突実験で発生した、荷電粒子の崩壊点位置を高精度に測定する2次元飛跡検出器を実現することを目指した。International Linear Collider (ILC)計画等の将来実験では、薄く高成能な崩壊点検出器が必要となる。我々は Fermilab で行った高エネルギー陽子ビーム実験(図 11)において、SOI 検出器のひとつである FPIX(Fine Pixel)検出器(8 μm 角画素)により、半導体検出器による高エネルギー荷電粒子位置測定に於いて世界で初めて 1 μm を切る位置分解能 0.7 μm を得た(プレス・リリース)(図 12)。

また ILC 実験条件に合わせ開発を行った SOFIST (SOI sensor for fine measurement of space and time)検出器では、20~30 μm 角ピクセルエリア内に 2 ないし 3 つの電荷量および時間用メモリを持たせる事に成功し、モノリシック半導体検出器において世界で初めて粒子の位置・電荷量・時間の同時測定を行った(図 13)。またビーム実験においても、十分な位置・時間分解能が得られる事を実証した。これらの成果により、SOI 検出器により ILC 実験の要求に十分答えられることを世界に向けアピール出来た。



図 11. Fermilab での高エネルギー陽子ビームを用いた SOI 検出器ビーム実験の様子。FPIX, SOFIST 等の検出器を重ねて配置し、120 GeV 陽子を照射することにより、通過位置の測定を行った。

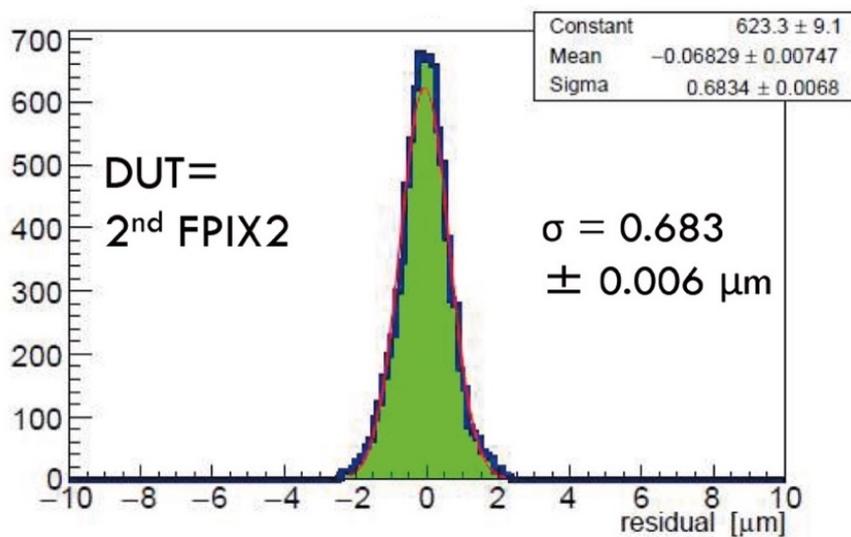


図 12. Fermilab での 120 GeV 陽子ビームを用いた SOI 検出器によるビーム通過位置の測定分解能。世界で初めて 1 μm を切る 0.7 μm 分解能を達成した。

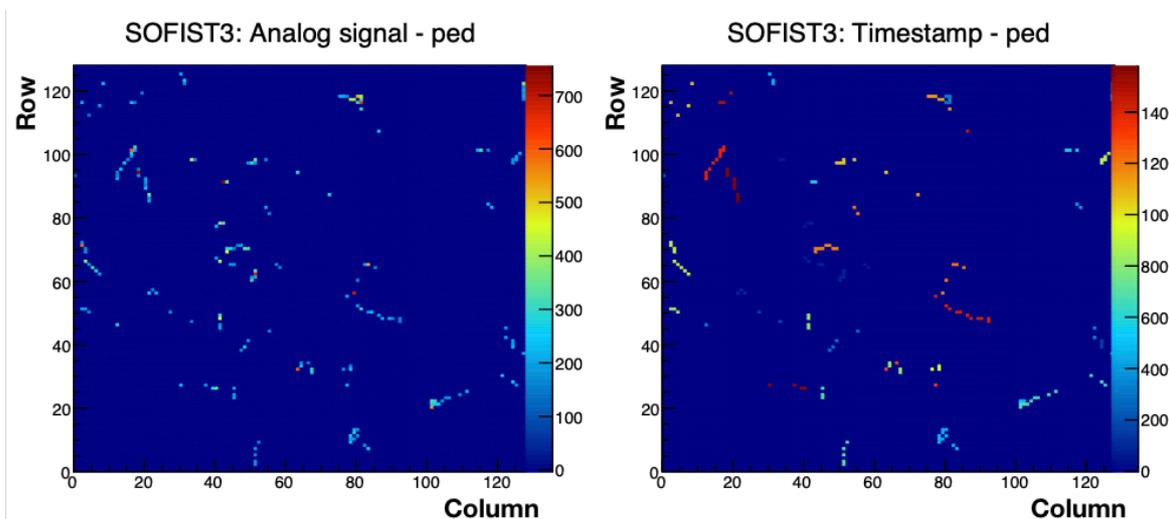


図 13. SOFIST3 検出器による電荷量(左)および時間情報(右)の同時測定。トラックの色の違いは左図では電荷量を示し、右図では時間を示している。

C02: X線自由電子レーザーによる超高速ナノ構造解析用検出器

XFEL(X-ray Free Electron Laser)実験や放射光実験では、広いダイナミックレンジと高精度画素を持つ X 線検出器が求められている。今回開発に成功した SOPHIAS (Silicon-On-Insulator PHoton Imaging Array Sensor)検出器(図 14)は、諸外国で盛んに開発されているセンサの目標性能と比較しても極めて大きなダイナミック・レンジを持ち、画素サイズも $30\ \mu\text{m}$ と小さい。全部で 190 万画素を持ち SOI 検出器としてはこれまでで最大($64.77\ \text{x}\ 26.73\ \text{mm}^2$)のものである。またピクセル面積に対するピーク信号は 185Me^- という世界最高レベルを達成した。

大面積の SOPHIAS を製造するためには、パターンを重ねながら露光する Stitching という技術を開発しなければならなかったが、企業側の協力もあり、様々な課題を解決し実現することが出来た。この経験は後に大チップ開発に取り組む他計画班にも参考となるものである。

このような性能を持った高精度検出器が他にほとんど無いことから SOPHIAS はカメラシステムとして実用化され、SPring-8 の複数の実験にも導入され使用されるようになった。結果の一例を図 15 に示す。単色 X 線用い磁区の観察が空間分解能 $50\ \text{nm}$ で磁気イメージングを行う事に成功した。

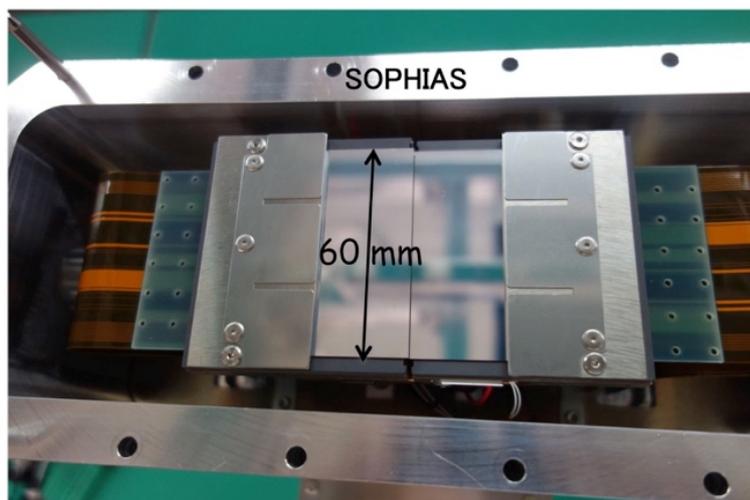


図 14. SOPHIAS センサを2枚並べたカメラシステム。

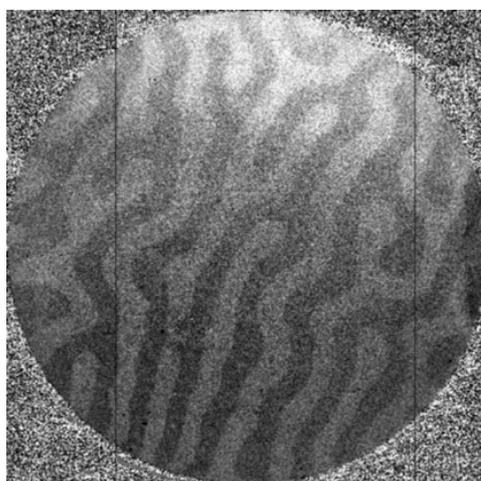


図 15. SOPHIAS 検出器による GdFeCo 合金膜 (厚さ 5 μm) の磁気イメージング。

D01: 放射光を用いた空間階層構造とダイナミクス研究のためのイメージング

本研究では、放射光 X 線を用いた機能性物質構造の外場応答とダイナミクスの研究を行う為の SOI 検出器の開発を目的とした。SOI 検出器の高精細・高機能性を利用することで、放射光実験における新たな測定手法に道を開く事が出来た。

まず入力信号を貯めていく積分型検出器では、データ読み出し速度を向上させる事で3次元 X 線 CT 撮像を可能にした。また KEK の放射光ビームラインで、世界で初めてチタン水素化物分布の三次元的可視化を行った(図 16)。これにより水素の拡散係数のより正確な評価を可能とした。まだ、分解能は十分では無いが、水素吸蔵機構のいっそう精密な理解が可能となった。この他、C02 班と連携し、SOPHIAS 検出器の評価を KEK 放射光で行い、市販検出器と比較して、X 線近接ピークの分離が良いことを示し、SOI で実現できる高精細検出器の優位性を示した。

さらに、個々の X 線量子の数を計数していくパルス計数型 SOI センサ開発も手がけ、通常分離して配置される NMOS と PMOS トランジスタを合体させる Active Merge 技術を開発し、六角形の画素サイズ $2,338 \mu\text{m}^2$ というこのクラスでは世界最小画素を持ったセンサ(CNPIX)を開発した(図 18)。CNPIX と同様の機能を持った試験チップ CPIXPTG2 を KEK 放射光において試験している様子を図 17 に示す。

データの読み出しには SEABAS という独自開発のボードを用いて行い、システムの改良を行う事で、従来の3倍以上の速度でのデータ転送(Gbit Ethernet の理論値の 97%)という高速転送を可能とした。

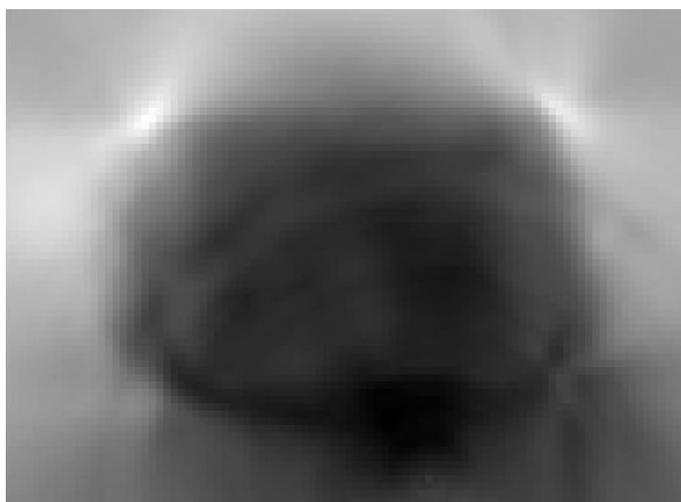


図 16. SOI 検出器を用いたチタン水素化物を含むチタン片サンプルに対する位相差イメージング(DEI 法)。

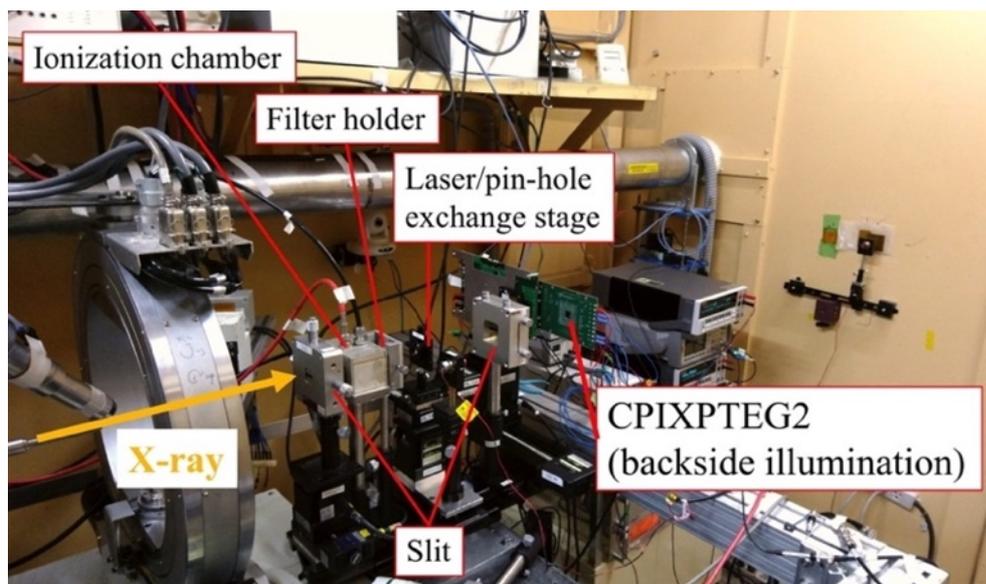


図 17. CPIXPTG2 チップの X 線ビームによる試験

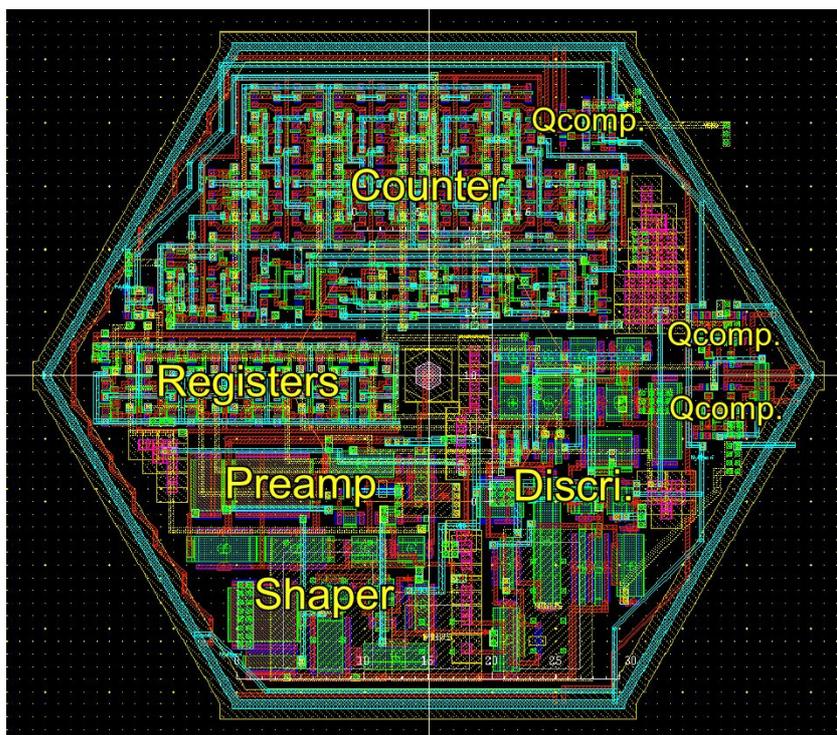


図 18. CNPIX の画素レイアウト。幅 $60\mu\text{m}$ 、高さ $52\mu\text{m}$ 、面積 $2338\mu\text{m}^2$ に図に示された各種回路を搭載した。

D02: 投影型イメージング質量分析による迅速で高解像度な生体内分子イメージング

投影型イメージング質量分析による迅速で高解像度な生体内分子イメージングの実現に向け、イオンの入射位置と到達時間の両者を同時かつ高頻度に測定可能な SOI 検出器 (MALPIX) の開発を行った。投影型イメージング質量分析装置に搭載することで、生体組織切片や細胞内における脂質、タンパク質などの生体分子や薬剤分子などの高スループットイメージングを実現することを目的とした。

図 19 のように micro-channel plate (MCP) にイオンが入射することで MCP から放出される電子群を MALPIX 表面の電極パッドで受ける構造とし、閾値を超えた時点の時刻をピクセル内メモリに記録する。試作と評価を繰り返すことで、グレイコードカウンタ、ピクセル内メモリ、および目標時間分解能 1 ns を得るための回路である time memory cell (TMC) などに見られた課題を改善した。

平成 27 年度に新たな課題として見つかった検出感度の問題について、シミュレーションや検出器の配置を見直す事で改善し、単一イオンを検出可能な感度が得られていることを確認した。平成 29 年度には、これまでの試作センサの評価結果を反映させて、 192×192 ピクセルで $13.75 \times 15.3\text{ mm}^2$ の最終試作センサ MALPIX8 (図 20)、および同センサを動作させるための回路基板、制御プログラムを作製した。これにより繰り返し 1 kHz での測定、単一イオンを検出可能な感度を有すること、目標時間分解能 1 ns での基本動作を確認し、実用化に向けた準

備をほぼ終えた。

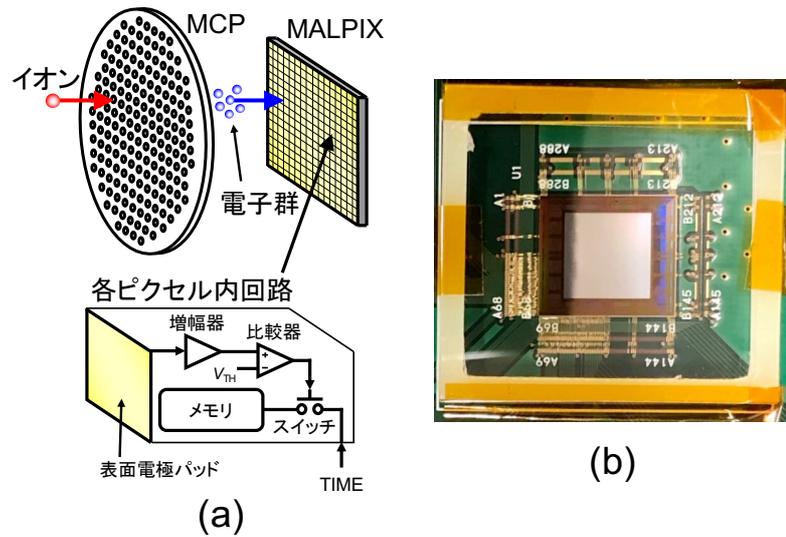


図 19. (a) MALPIX の概略図、および (b) 最終年度に製作した MALPIX8 を搭載した基板の写真。

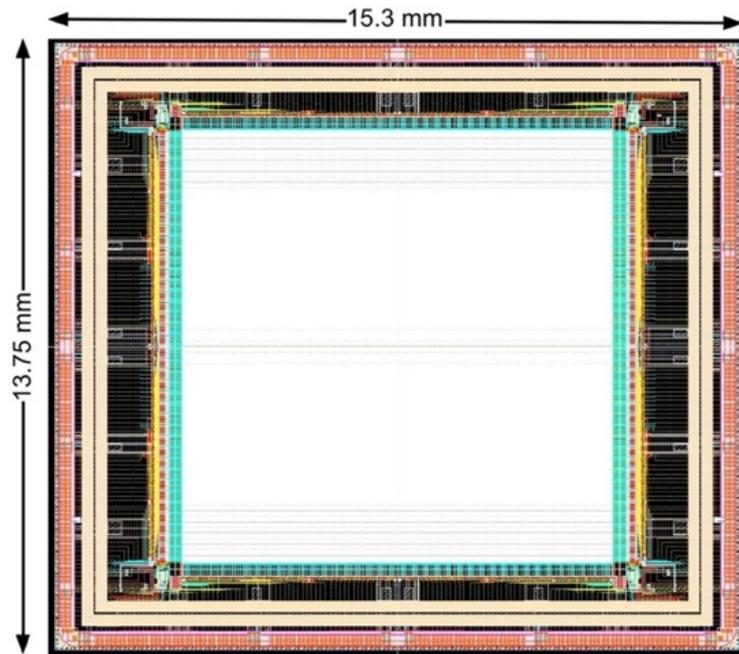


図 20. 到来イオン(電子)の位置と時間を同時に計測する MALPIX8 検出器のレイアウト。

公募研究:

公募研究として、医学応用から産業応用、さらには宇宙・素粒子実験まで、当初の目論見通り多様な研究を取り入れることが出来た。公募研究の課題は少人数で行うものが多いので、多くは計画研究班と連携し研究が行われた。これにより、ガンマ線反跳飛跡の非同期撮像の原理検証に成功 (図 21)した他、タルボ干渉計、プラズモンフィルター、PET 等、多様な研究成果が生まれた。

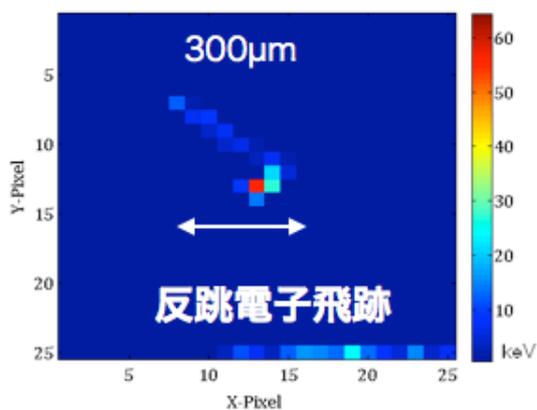


図 21.ガンマ線のコンプトン散乱による反跳電子の飛跡。

また、金属を対象とした小型で高速な X 線残留応力測定装置も開発された(図 22)。従来の装置では測定時間が 1 分以上かかり大型であることから用途が限られていたが、これを SOI 検出器により測定時間を 1 秒以下にし、直径 6cm の管内の測定も可能にするなど、大幅に小型高速化した。これにより、測定対象が飛躍的に拡大し、鉄道レールの走行疲労検査や金属製品の全数検査など実用化に向けて、多くの企業と共同研究が進み始めた。

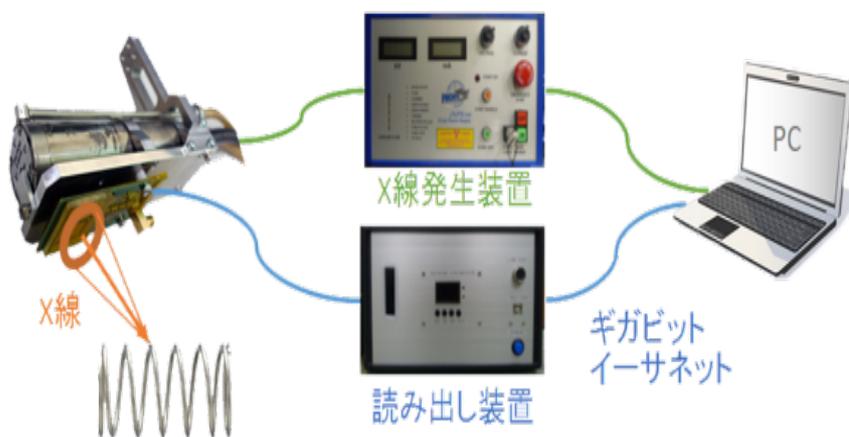


図 22. SOI 検出器を用いた X 線残留応力測定システムの概略。