

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18721

研究課題名（和文）日本発の異種半導体常温接合による広帯域X線ガンマ線・光赤外線一体型撮像素子の開発

研究課題名（英文）Development of Wide-band X-ray gamma-ray and optical-infrared integrated imaging devices by Japan's Original Surface-Activated Wafer Bonding Technology

研究代表者

鶴 剛（Tsuru, Takeshi）

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：10243007

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：SiとGeの半導体結晶の接合技術「常温SAB」を用いて、0.5-100keVの広帯域X線・ガンマ線と、0.3-1.8 $\mu\text{m}$ の可視光・近赤外線を一気に観測可能な「Si-Ge一体型撮像素子」の開発研究を行った。Si-Ge単素子をSABでプロセスし、3つのアニーリング条件からベストの素子に対し光反応を評価した。その結果、Siは吸収しない赤外線による光電流を観測し、Si-Geの基本コンセプトを確認できた。次に撮像素子のプロセス上の課題として、Si側にX線SOI素子を利用し、接合時にGeチップのエッジを丸くする必要性を明らかにした。今後この改良を行うことでSi-Ge撮像素子が完成すると期待している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はSi-Ge一体型撮像素子への第1歩であり、その実現は下記の意義がある。現状のSi以外の素材の2次元ピクセル撮像素子は全てバンプボンディングを介して2次元ASICで読み出す。これは複雑・高価で性能に限界がある。Si-Ge一体型は、自然な結晶接合を利用するので、安価で構造も強固である。ピクセルサイズや読み出しノイズなどの性能は、ベースのSi素子で決まり、高性能化が見込める。Ge以外も接合可能である。これは米国が独占している近赤外線領域では極めて重要である。低コストが重要な社会実装でも本研究の応用が見込める。例えば太陽光の影響がない赤外線TOFによる距離計測などに応用可能だろう。

研究成果の概要（英文）：We have developed a Si-Ge integrated imaging device that can observe broadband X-rays and gamma-rays in the 0.5-100 keV range, and optical and near-infrared light in the 0.3-1.8  $\mu\text{m}$  range at once by adopting the room-temperature Surface Activate Bonding (SAB) technique for Si-Ge semiconductor crystals. The photoresponse of the best devices was evaluated under three annealing conditions. The basic concept of Si-Ge was confirmed by successful observation of photocurrent by infrared light, which is not absorbed by Si. We clarified issues in bonding and assembling the imaging device by using an X-ray SOI sensor as the Si side. We expect that this improvement will complete the Si-Ge image sensor in the future.

研究分野：天文学

キーワード：ゲルマニウム撮像素子 異種半導体常温接合 X線撮像素子 赤外線撮像素子

## 1. 研究開始当初の背景

現在、軌道上にある X 線天文衛星用の撮像素子は X 線 CCD であり、今後 X 線 CMOS も実用化されていく。これらはファノ限界に近い高い分光性能や、ピクセルサイズ  $\sim 30\mu\text{m}$  の空間分解能を誇る。しかし X 線検出部の素材は Si なので観測可能な X 線帯域は 20keV 以下に留まる。これ以上は原子番号の大きい素材が必要となる。CdTe や CdZnTe(CdTe/CZT)が「ひとみ」や NuSTAR で実用化されているが、ピクセルサイズは大きく ( $>100\mu\text{m}$ )、分光性能も Si に遠く及ばない。この原因は 2 つある。1 つはファノ限界等の CdTe/CZT の物性的性質である。もう 1 つは読み出しである。バンプボンディングを介して ASIC で読み出すので、ピクセルサイズが大きくなる。結果、20keV を境に別々の撮像素子が必要となり、20keV 以上は不十分な撮像分光となる。この状況を打開するために、本研究、すなわち「Si-Ge 一体型撮像素子」の開発を構想した。

## 2. 研究の目的

本研究は一体型素子で 0.5-100 keV の広帯域の X 線を一気に撮像分光可能な「Si-Ge 一体型撮像素子」を開発する(図 1)。X 線検出部として厚いゲルマニウム(Ge)層を、読み出し部にシリコン(Si) CMOS 回路層を持つ。両者は半導体結晶として接合されている。Ge 層で吸収された X 線による信号電荷は、途中で失われることなく Si 回路層に運ばれ、読み出される。光電吸収の断面積は原子番号の 4 乗に比例するので、原子番号の大きい Ge は Si より 1 桁大きい質量光電吸収断面積を持つ。それでいて、バンドギャップやファノノイズは小さく、Si よりも分光性能に優れる。Ge はまさに広帯域 X 線観測に最適である。一方、Ge 自身でアンプ回路を構成することは難しい。そこでその役割を Si 層の高速低雑音 CMOS 回路が果たす。ピクセルサイズは Si 側で決まるので  $10\mu\text{m}$  以下の高精細も可能である(硬 X 線では現状 CdTe-DSD の  $70\mu\text{m}$  が最小)。X 線検出と信号読み出しを、それぞれ最適な半導体で行う「いいとこ取り」である。

これにより CCD が開拓した 0.5-10keV 帯域を、本 Si-Ge 一体型撮像素子で一気に 100keV までに拡大させ(図 2)、広帯域の精密撮像分光観測を必要とするサイエンスを開拓する。たとえば、超新星残骸において、0.5-2 keV の O, Ne, Mg-K 輝線、6keV の Fe-K 輝線、そして 70-80 keV の Ti-44 核ガンマ輝線を一気に観測することが可能となり、元素合成量や爆発メカニズムの解明が飛躍的に進む。また、小さいピクセルを活かし、符号化マスクと組み合わせれば、INTEGRAL 衛星を遥かに超える高分解能ガン

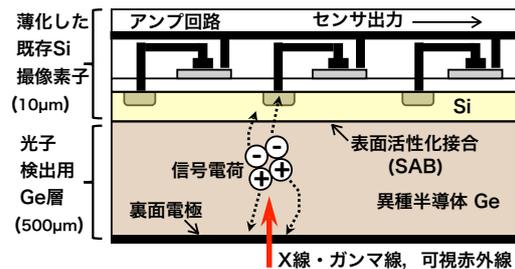


図 1: 本研究が開発する Si-Ge 一体型撮像素子。読み出しに利用する既存の Si CMOS 撮像素子を  $10\mu\text{m}$  まで薄化し、光子検出用の厚い Ge 層を異種半導体接合技術である「常温 SAB」で接合させる。感度の高い Ge で検出した信号電荷を、高精細ピクセルで高速低雑音の Si 回路で読み出す、いいとこ取りの撮像素子である。

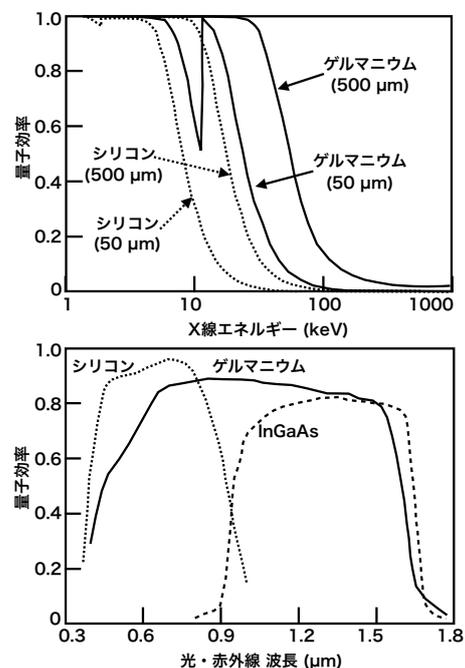


図 2: X 線・ガンマ線(上)および、光赤外線(下)に対する量子効率。

マ線撮像分光が実現できる。例えば、空間及びドップラー速度の精密3次元マッピングを行い、銀河中心領域の 511keV 対消滅線の起源に迫る。

以上の状況は、同じ Si を用いる光赤外観測にも当てはまる(図2)。現状の Si を素材にする CCD や CMOS の帯域は 0.9 $\mu\text{m}$  に留まるが、Ge を検出部に用いることで 1.7 $\mu\text{m}$  までの近赤外を含む広帯域光赤外検出器が実現できる。

この Si-Ge 一体型撮像素子の実現の鍵は、Si と Ge の半導体結晶の接合技術である。その答えは図3の「表面活性化手法による常温ウエハ接合技術(常温 SAB)」にある。近年著しく発展している日本独自の技術である[表面科学 38, 72, 2017; JJAP 57, 04FA02, 2018]。本研究ではこの技術を応用し、「Si-Ge 一体型撮像素子」を開発することが目的である。

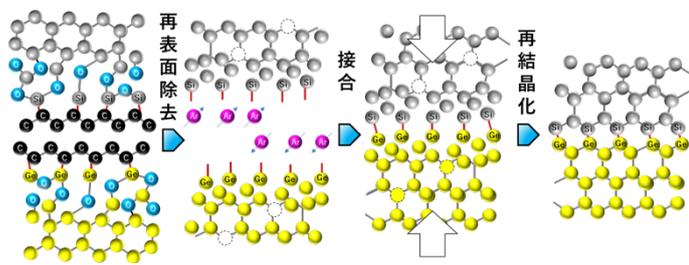


図3: 超高真空中にて物質再表面の汚染層・酸化層を除去し(左), 活性な新生面を露出させる(中左), 次に圧力を掛けながら新生面どうしを接触させることで(中右), 異種素材であっても原子レベルの結合を得る(右)。

### 3. 研究の方法

従来、異種半導体接合は従来2つの方式が開発されている。Si ウェハ上に Ge をエピタキシャル成長させる英国の「Ge-on-Si」では、受光素子の開発に成功しているが、製造可能な Ge 厚が非常に薄い(~1 $\mu\text{m}$ )。日本のフュージョンボンディングは、厚い Ge 層が可能だが、高温アニーリングが必要で Si-Ge 界面に酸化膜層が残るので、科学計測用の撮像素子の実現は難しい。

対して本常温 SAB は上記の欠点がない。電気的特性や Si-Ge 界面の接合状態は優れ [JSPE 2015 [https://doi.org/10.11522/pscjspe.2015S.0\\_315](https://doi.org/10.11522/pscjspe.2015S.0_315)], 分担者の和田による Si-Ge 接合ウェハを用いる遠赤外線検出器の試作結果も良好である [J. Low Temp. Phys. 184, 217, 2016].

この常温 SAB を適用し、Si-Ge 一体型撮像素子を実証することが本研究の具体的な目標である。それには以下の3つの課題を解決する必要がある。

#### (1) Si-Ge 接合界面の格子欠陥から発生する暗電流の抑制

暗電流は X 線や可視赤外線による信号電荷と区別が難しく、読み出しノイズ源となる。

#### (2) Si-Ge の接合界面での電荷再結合による信号電荷損失の抑制

信号電荷損失は X 線分光性能の劣化や、可視赤外での検出感度の低下を引き起こす。

#### (3) Si と Ge の熱膨張率の違いによる熱ゆがみの抑制

極低温動作時にバイメタル効果が発生し、面積の大きな素子の実現に懸念が残る。

(1)と(2)は Si と Ge の接合界面の問題である。図3の再表面除去の酸化膜除去工程で Ar スパッタするため、素材の結晶性が乱れ、アモルファス層が発生する。このアモルファス層を最小化し、理想的な界面電気特性を得るプロセスを開発する。Ar スパッタと表面活性化と、再結晶化における接合後のアモルファス層を除去するアニーリング工程の条件出しが鍵である。(3)は Ge 層に対して Si 層を十分薄くすることで解決する。Ge の収縮に Si が負け、一緒に結晶が縮ませることで、バイメタル効果を抑える。同様の結晶ストレスが掛かる湾曲 Si 検出器が、加速器実験用に開発されている。従って、この方法は有望だと考えている。

## 4. 研究成果

### □ Si-Ge 撮像素子のコンセプトの確認と Si-Ge 接合部の品質の改善

2022 年度に単素子の Si-Ge 素子をプロセスした。Si 側チップは P 型高不純物濃度の Si ウェハに P 型エピタキシャル層を 6 $\mu\text{m}$  程度形成し、2.5mm のアイランドをメサエッチで作った。Ge 側チップとして、N 型の中濃度 Ge ウェハにオーミックコンタクトをとるため片面にイオン注入とアニーリングにより N<sup>+</sup>層を形成し、ウェハから切り出した。この Si チップと Ge チップを SAB プロセスで接合し、続いて界面回復アニーリングと Si と Ge の両側への電極形成を行った。接合の品質改善には界面回復アニーリングが鍵を握るので、その条件出しとして「アニーリングなし」、「200 $^{\circ}\text{C}$  30 分」、「400 $^{\circ}\text{C}$  30 分」の 3 つを実施した。

それぞれの条件のサンプルに対して、プローバ・半導体パラメータ測定器による I-V 特性の評価を行った。「アニーリングなし」および「200 $^{\circ}\text{C}$  30 分」では逆バイアス下で大きなリーク電流が観測されたが、「400 $^{\circ}\text{C}$  30 分」では 2-3 桁の削減と、さらに PN 接合特性が得られた。そこで「400 $^{\circ}\text{C}$  30 分」が最適条件と判断した。

次に「400 $^{\circ}\text{C}$  30 分」チップを用い逆バイアスでの光反応を評価した。可視光には反応しない一方で、Si は吸収しない 1.31 $\mu\text{m}$  の IR レーザー光を Si 側から照射したところ、逆方向電流の増加が観測された (図 4)。これは Ge 側で空乏層が形成され、そこで光電流が発生したことを意味する。以上から「Si と Ge を SAB 接合することで、Si では検出できない IR 光の検出可能な広帯域撮像素子を実現できる」とした基本コンセプトの正しさを確認できた。

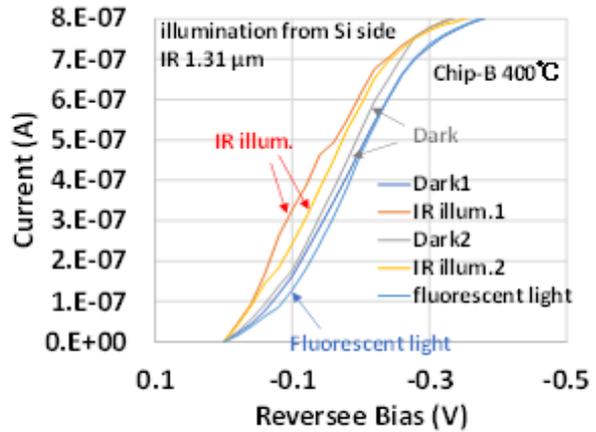


図 4: 「400 $^{\circ}\text{C}$  30 分」素子の逆バイアス電流特性。Si 側から 1.31 $\mu\text{m}$  の IR 光を入射させることで、電流が増加した。これは Ge 空乏層内で IR 光を吸収し、光電流を発生させたことを意味する。

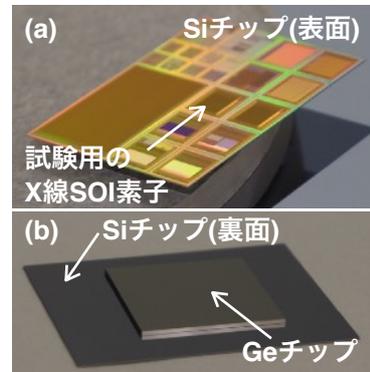


図 5: 常温 SAB 接合をした Si-Ge 素子

### □PDD-TEG 2 を用いた Si-Ge ピクセルアレイの試作と評価

2023 年 3~4 月に産総研で SAB 接合を行った (図 5)。それに続き、宇宙研で評価を行った。図 6 は空乏層を形成するために印加する電圧 (以下、空乏化電圧) と暗電流の関係である。当初、空乏化電圧が Si-Ge 界面に到達する 40V 付近で、暗電流が増加すると予想していた。しかし、それに対応する暗電流の「段」は見られなかった。続いて赤外線レーザー (波長 1.31 $\mu\text{m}$ ) を照射したが、光電流の増加は観測されなかった。この結果は、Si 中は空乏層が伸びていくのに、Si-Ge 接合面に到達するが、それ以上 Ge 側には伸びていかないと解釈可能である。

検討の結果、Si 表面側の側壁付近に形成した

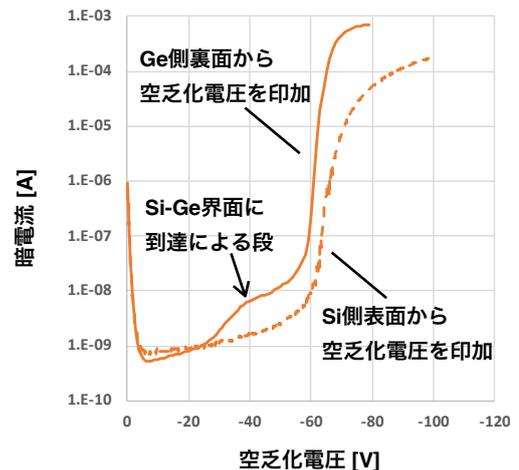


図 6: Si-Ge 素子の空乏化電圧と暗電流

P+から空乏化電圧を印加したことが原因だと考えた. この表面からの空乏化電圧印加は Si 単体の SOIPIX や X 線 CCD 等でも行われる一般的な方法である. Si の表面側から印加した空乏化電圧は, 素子の側壁近くの中性領域を通じて素子の裏面側に到達する. しかし Si-Ge 素子では, Si 側の側壁付近の中性領域から Ge 側の側壁を通じて Ge 裏面 P+に通じる経路がなく, その結果, 空乏化電圧が印加できないのである(図 7 上).

この問題は Ge 側裏面に直接空乏化電圧を印加すれば解決できる(図 7 下). その結果, 40V 付近で暗電流が段状に増加し, より高い電圧領域では Ge 側に空乏層が伸びたことを示唆している. 40V ~60V の暗電流は Ge バルク発生電流で, 60V の急激な増加は Ge 裏面からの暗電流と考えられる.

### □Si-Ge 撮像素子の実装プロセスの課題

SOI 撮像素子と Ge チップを使用し, 接合や組み立てプロセスを実施した. その結果, 以下の課題を発見した.

Si チップと Ge チップから Si-Ge 撮像素子のプロセスは, SAB 接合, ダイシング, 組み立て (パッケージへの接着とワイヤボンディング) の 3 段階である. まず, SAB 接合プロセスで Si 側にクラックが発生した (図 8). これは薄く大きな Si チップに厚く小さい Ge チップを接合したため, Ge チップ端が Si に傷を付けたことが原因だと考えている. 次のダイシングも困難にぶつかり, 割れも発生した. スクライブラインの参照の必要性から, Ge 側が下で Si 側が上の状態で, Si 側にダイシングソーを当てることになる. その結果 Ge チップ端から片持ち状態の Si 側に強いストレスがかかり, 割れ等が発生するのである. 一方で, 組み立ては問題がなかった. ただクラックのため動作はできなかった.

今回の試作から, 以下の改善を行うこととした. Si チップ側を小さくし, Ge 側を大きくする. また, Si 側の厚みを現在の 150 $\mu\text{m}$  から厚くし, 機械的に Si チップを強くする. Si の役割は読み出しなので薄いほうが望ましいが, それ以前にまずは動作させることが先決で, 薄くするのはその次の開発段階に行うこととする. 一方で, Si 側が厚くなると, 全体の空乏化電圧も高くなる. 今後, 高比抵抗の SOI ウェハを入手し, 本研究に投入することを考えている.

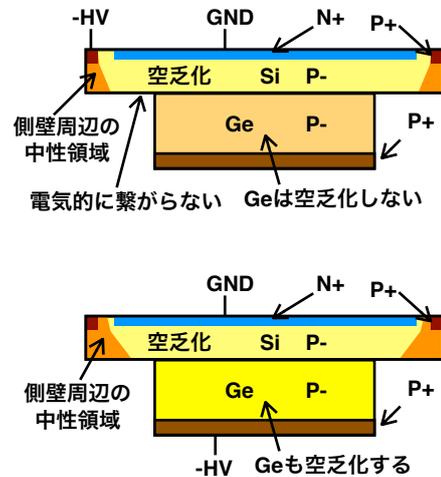


図 7: [上] Si 表面側から空乏化電圧 (-HV)を印加する方法. Si 側壁からは Ge 側裏面へは空乏化電圧を印加できないので, Ge は空乏化しない. [下] Ge 裏面から空乏化電圧を印加することで, Ge 側も空乏化が可能になる.

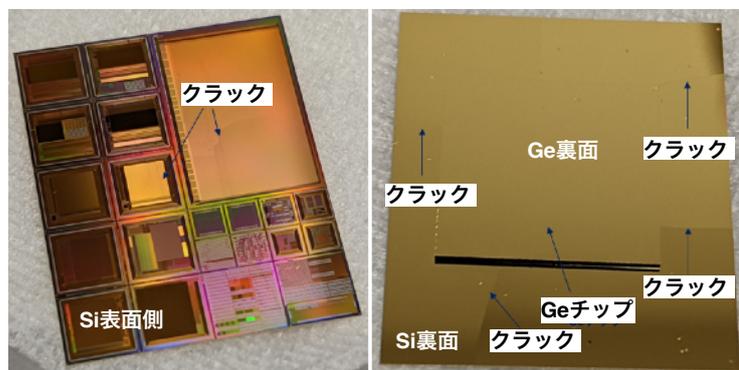


図 8: Si チップに発生したクラック. Si 表面側[左]. Si および Ge 裏面側[右]. SAB 接合後に裏面に Ni/Au 蒸着を行うため金色になる. そのため, 写真上では Si と Ge の区別が分かりにくくなっている.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Matsuda Masamune, Uchida Hiroyuki, Tanaka Takaaki, Yamaguchi Hiroya, Tsuru Takeshi Go	4. 巻 940
2. 論文標題 Discovery of Year-scale Time Variability from Thermal X-Ray Emission in Tycho's Supernova Remnant	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 105 ~ 105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac94cf	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kayama Kazuho, Tanaka Takaaki, Uchida Hiroyuki, Tsuru Takeshi Go, Sudoh Takahiro, Inoue Yoshiyuki, Khangulyan Dmitry, Tsuji Naomi, Yamamoto Hiroaki	4. 巻 74
2. 論文標題 Spatially resolved study of the SS433/W50 west region with Chandra: X-ray structure and spectral variation of non-thermal emission	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1143 ~ 1156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac060	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Koshiba Yosuke, Uchida Hiroyuki, Tanaka Takaaki, Amano Yuki, Sano Hidetoshi, Tsuru Takeshi Go	4. 巻 74
2. 論文標題 High-resolution X-ray study of supernova remnant J0453.6-6829 with unusually high forbidden-to-resonance ratio	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 757 ~ 766
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tsunomachi Shun, Kohmura Takayoshi, Hagino Kouichi, Kitajima Masatoshi, Doi Toshiki, Aoki Daiki, Ohira Asuka, Shimizu Yasuyuki, Fujisawa Kaito, Yamazaki Shizusa, Uchida Yuusuke, Shimizu Makoto, Itoh Naoki, Arai Yasuo, Miyoshi Toshinobu, Nishimura Ryutaro, Tsuru Takeshi G., Kurachi Ikuo	4. 巻 12191
2. 論文標題 Proton radiation damage tolerance of wide dynamic range S01 pixel detectors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 12191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2629771	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hagino Kouichi, Hayashida Mitsuki, Kohmura Takayoshi, Doi Toshiki, Tsunomachi Shun, Kitajima Masatoshi, Tsuru Takeshi G., et al.	4. 巻 8
2. 論文標題 Single event tolerance of x-ray silicon-on-insulator pixel sensors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 0 46001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.8.4.046001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mori Koji, Tsuru Takeshi G., et al.	4. 巻 12181
2. 論文標題 A broadband x-ray imaging spectroscopy in the 2030s: the FORCE mission	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 1218122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2628772	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Mori Koji, Tomida Hiroshi, Nakajima Hiroshi, Okajima Takashi, Noda Hirofumi, Tanaka Takaaki, Uchida Hiroyuki, Hagino Kouichi, Kobayashi Shogo B., Suzuki Hiromasa, Yoshida Tessei, Murakami Hiroshi, Uchiyama Hideki, Nobukawa Masayoshi, Nobukawa Kumiko K., Yoneyama Tomokage, Matsumoto Hironori, Tsuru Takeshi G. et al.	4. 巻 12181
2. 論文標題 Xtend, the soft x-ray imaging telescope for the x-ray imaging and spectroscopy mission (XRISM)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 121811T
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2626894	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kitajima Masatoshi, Hagino Kouichi, Kohmura Takayoshi, Hayashida Mitsuki, Oono Kenji, Negishi Kousuke, Yarita Keigo, Doi Toshiki, Tsunomachi Shun, Tsuru Takeshi G., et al.	4. 巻 8
2. 論文標題 X-ray radiation damage effects on double-SOI pixel detectors for the future astronomical satellite FORCE	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 26007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.8.2.026007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計30件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 田中 優貴子, 松永 海, 成田 拓仁, 天野 雄輝, 佳山 一帆, 内田 裕之, 鶴 剛 (京都大), 田中 孝明(甲南大), 岡 朋治(慶應義塾大)
2. 発表標題 巨大分子雲 Sgr B2 からの He-like 鉄輝線放射と高速度コンパクト雲
3. 学会等名 日本天文学会 2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佳山 一帆, 鶴 剛, 内田 裕之 (京都大学), 田中 孝明 (甲南大学), 須藤 貴弘 (オハイオ州立大学), 井上 芳幸 (大阪大学), Dmitry Khangulyan (立教大学), 辻 直美 (神奈川大学), 山本 宏昭 (名古屋大学)
2. 発表標題 Chandra 衛星およびXMM-Newton 衛星の観測を用いた SS 433/W50 における 粒子加速の研究
3. 学会等名 日本天文学会 2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中孝明 (甲南大学), 内田裕之 (京都大学), 佐野栄俊 (岐阜大学), 鶴剛 (京都大学)
2. 発表標題 超新星残骸 RX J1713.7 - 3946 南西部の衝撃波速度の測定
3. 学会等名 日本天文学会 2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林翔悟 (東理大), 鈴木寛大 (甲南大), 森浩二 (宮大, ISAS/JAXA), 富田洋 (ISAS/JAXA), 中嶋大 (関東学院大, ISAS/JAXA), 林田清, 野田博文 (阪大), 鶴剛 (京大), 他 XRISM/Xtend チーム
2. 発表標題 X 線分光撮像衛星 (XRISM) 搭載軟 X 線撮像装置 (Xtend) の開発の現状 (8)
3. 学会等名 日本天文学会 2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮 啓太郎, 寺田裕太, 金丸善朗, 楠康平, 大塚芳徳, 横須晴彦, 米丸若菜, 森浩二 (宮崎大学), 青木悠馬, 信川久実子 (近畿大学), 筆本脩介, 信川正順 (奈良教育大学), 内田裕之, 鶴剛 (京都大学), 他 XRISM/Xtend チーム
2. 発表標題 XRISM 搭載軟X線撮像検出器 SXI のフライト用 CCD 素子の地上較正試験における分光性能の評価
3. 学会等名 日本天文学会 2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大塚芳徳, 金丸善朗, 宮 啓太郎, 楠康平, 横須晴彦, 米丸若菜, 森浩二 (宮崎大学), 信川久実子 (近畿大学), 信川正順 (奈良教育大学), 内田裕之, 鶴剛 (京都大学), 他 XRISM/Xtend チーム
2. 発表標題 XRISM 搭載軟X線撮像検出器 SXI のイベント検出アルゴリズムのパラメタ決定
3. 学会等名 日本天文学会 2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青木悠馬, 信川久実子(近畿大), 信川正順(奈良教育大), 金丸善朗, 宮崎啓太郎, 楠康平, 森浩二 (宮崎大), 富田洋(JAXA), 中嶋大(関東学院大), 松本浩典, 野田博文, 林田清(大阪大), 鶴剛, 他 XRISM/Xtend チーム
2. 発表標題 X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 CCD 検出器における Goffset のシミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会 2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森浩二, 武田彩希 (宮崎), 村上弘志 (東北学院), 寺田幸功 (埼玉), 鶴剛, 他 FORCE WG
2. 発表標題 軟X線から硬X線の広帯域を高感度で撮像分光する衛星計画 FORCE の現状 (14)
3. 学会等名 日本天文学会 2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋爪大樹, 須田祐介, 深澤泰司 (広島大学), 鶴剛 (京都大学), 武田彩希 (宮崎大学)
2. 発表標題 SOI 技術を用いた新型 X 線撮像分光器の開発 53:MeV ガンマ線観測への応用 に向けた SOI ピクセル検出器の基礎特性評価
3. 学会等名 日本天文学会 2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩切卯月, 森浩二, 武田彩希, 西岡祐介, 行元雅貴, 石田辰徳, 泉大輔 (宮崎大学), 鶴剛, 内田裕之, 天野 雄輝, 佳山一帆, 松田真宗 (京都大学), 倉知郁生 (ディーアンドエス), 新井康夫 (KEK), 幸村孝由, 土 居俊輝, 角町駿, 武居悠貴, 清水真 (東京理科大学), 萩野浩一 (関東学院大学), 田中孝明 (甲南大学)
2. 発表標題 SOI 技術を用いた新型 X 線撮像分光器の開発 54 : PDD 構造を有する X 線SOI-CMOS 検出器 XRPIX の TID 効果測定試験
3. 学会等名 日本天文学会 2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鶴 剛, 内田裕之, 上ノ町水紀, 池田智法, 佳山一帆, 松田真宗, 天野雄輝(京都大), 森浩二, 武田彩 希, 西岡祐介, 行元雅貴, 石田辰徳, 泉大輔, 岩切卯月(宮崎大), 幸村孝由, 他
2. 発表標題 SOI 技術を用いた新型 X 線撮像分光器の開発 55:現在の到達点と今後の開発
3. 学会等名 日本天文学会 2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上峻, 榎戸輝揚 (京大), 野津湧太 (コロラド大/東工大), 岩切涉 (千葉大), 前原裕之, 行方宏介 (NAOJ), 本田敏志 (兵庫県立大) 他
2. 発表標題 史上最大の恒星フレアの NICER とせいめい望遠鏡によるX線・H 線観測
3. 学会等名 日本天文学会 2023春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 成田拓仁, 内田裕之, 吉田敬, 鶴剛(京都大学), 田中孝明(甲南大学)
2. 発表標題 星周物質の X 線精密分光解析による超新星残骸 RCW 103 の親星推定
3. 学会等名 日本天文学会 2023春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中優貴子, 内田裕之, 松永海, 成田拓仁, 天野雄輝, 佳山一帆, 鶴剛, 前田啓一 (京都大), 田中孝明 (甲南大), 岡朋治 (慶應義塾大), 竹川俊也 (神奈川大)
2. 発表標題 超新星残骸 G0.61+0.01 におけるジェット状爆発の観測的証拠の発見
3. 学会等名 日本天文学会 2023春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松永海, 内田裕之, 成田拓仁(京都大学), 榎谷玲依(慶應義塾大学), 鶴剛(京都大学)
2. 発表標題 超新星残骸 G359.0 - 0.9 の X 線解析による親星の質量制限
3. 学会等名 日本天文学会 2023春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 信川久美子 (近大), 森浩二 (宮崎大, ISAS/JAXA), 富田洋 (ISAS/JAXA), 中嶋大 (関東学院大, ISAS/JAXA), 野田博文, 林田清 (阪大), 他 XRISM/Xtend チーム
2. 発表標題 X 線分光撮像衛星 (XRISM) 搭載軟 X 線撮像装置 (Xtend) の開発の現状 (9)
3. 学会等名 日本天文学会 2023春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森浩二, 武田彩希 (宮崎大), 村上弘志 (東北学院大), 他 FORCE WG
2. 発表標題 軟X線から硬X線の広帯域を高感度で撮像分光する衛星計画 FORCE の現状 (15)
3. 学会等名 日本天文学会 2023春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 橋爪大樹, 須田祐介, 深澤泰司 (広島大学), 鶴剛 (京都大学), 武田彩希 (宮崎大学)
2. 発表標題 SOI 技術を用いた新型 X 線撮像分光器の開発 56:MeV ガンマ線観測への応用 に向けた SOI ピクセル検出器の基礎特性評価 (2)
3. 学会等名 日本天文学会 2023春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 泉大輔, 森浩二, 武田彩希, 西岡祐介, 行元雅貴, 石田辰徳, 岩切卯月, 川島陸斗, 眞方恒陽 (宮崎大学), 鶴 剛 他
2. 発表標題 SOI 技術を用いた新型X線撮像分光器の開発 57 : PDD 構造を持つ大面積X線 SOI-CMOS 検出器 XRP1X の性能評価
3. 学会等名 日本天文学会 2023春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 永井悠太郎, 榎戸輝揚, 内田裕之, 鶴剛(京都大学)
2. 発表標題 降着駆動型 X 線パルサーの軟 X 線超過放射と低電離鉄輝線の系統的な解析
3. 学会等名 日本天文学会 2023春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名	Hornschemeier, Ann ; Mori, Koji ; Tsuru, Takeshi ; Nakazawa, Kazuhiro ; Ueda, Yoshihiro ; Tanaka, Takaaki ; Watanabe, Shin ; Ishida, Manabu ; Matsumoto, Hironori ; Awaki, Hisamitsu ; Okajima, Takashi ; Zhang, William ; Yukita, Mihoko ; Williams, Brian
2. 発表標題	A hard X-ray complement to Athena: The prospect of hard X-ray astronomy in the 2030s and the FORCE mission
3. 学会等名	AAS High Energy Astrophysics Division meeting #19 (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	Takeshi Go Tsuru, Hiroyuki Uchida, Kazuho Kayama, Yuki Amano, Koji Mori, Ayaki Takeda, Yusuke Nishioka, Masataka Yukumoto, Kira Mieda, et al.
2. 発表標題	Recent progress in development of trigger-output event-driven x-ray astronomy SOI pixel sensors
3. 学会等名	SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, 2022, Montr_al, Qu_bec, Canada (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	内田裕之, 萩野浩一, 野田博文, 林田清, 富田洋, 森浩二, 中嶋大, 田中孝明, 鶴剛, 松本浩典, 岡島崇, 吉田鉄生, 米山友景, 石田学, 前田良知, 村上弘志, 山内誠, 廿日出勇, 信川正順, 信川久実子, 幸村孝由, 小林翔悟, 鈴木寛大, 平賀純子, 内山秀樹, 山岡和貴, 尾崎正伸, 堂谷忠靖, 常深博, 水野恒史, 他 XRISM/Xtend チーム
2. 発表標題	X線分光撮像衛星XRISM搭載軟X線撮像装置Xtendの開発の状況 (9)
3. 学会等名	日本物理学会 第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	中澤知洋, 森浩二, 村上弘志, 久保田あや, 小林翔悟, 幸村孝由, 萩野浩一, 高橋忠幸, 馬場彩, 小高裕和, 寺田幸功, 榎戸輝揚, 内山泰伸, 佐藤寿紀, 石村康生, 北山哲, 谷津陽一, 藤田裕, 石田学, 渡辺伸, 山口弘悦, 中嶋大, 古澤彰浩, 信川正順, 太田直美, 鶴剛, 他 FORCE WG
2. 発表標題	広帯域X線の高感度観測衛星 FORCE : 高精度の姿勢決定系の検討と汎用天文台としての位置づけ
3. 学会等名	日本物理学会 第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年	2023年

1. 発表者名 加賀谷美佳, 片桐秀明, 加藤凌, 東城直美, 武田彩希, 島添健次, 鶴剛, 田中孝明, 上ノ町水紀, Lan Zhang
2. 発表標題 SOIPIX を用いたsub-MeVガンマ線観測用の電子飛跡検出型コンプトンカメラの開発
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木寛大, 小林翔悟, 森浩二, 富田洋B, 中嶋大, 林田清, 野田博文, 内田裕之, 他 XRISM/Xtend チーム
2. 発表標題 X線分光撮像衛星XRISM搭載軟X線撮像装置Xtendの開発の状況 (10)
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中澤知洋, 森浩二, 村上弘志, 久保田あや, 小林翔悟, 幸村孝由, 高橋忠幸, 馬場彩, 小高裕和, 谷本敦, 寺田幸功, 榎戸輝揚, 内山泰伸, 佐藤寿紀, 石村康生, 北山哲, 谷津陽一, 藤田裕, 石田学, 渡辺伸, 山口弘悦, 中嶋大, 萩野浩一, 古澤彰浩, 信川正順, 太田直美, 鶴剛, 他 FORCE WG
2. 発表標題 広帯域X線の高感度観測衛星 FORCE : 2022年秋におけるミッション提案の現状
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武田彩希, 森浩二, 西岡祐介, 行元雅貴, 石田辰徳, 岩切卯月, 泉大輔, 川島陸斗, 眞方恒陽, 鶴剛, 内田裕之, 上ノ町水紀, 天野雄輝, 佳山一帆, 松田真宗, 島添健次, 高橋浩之, 幸村孝由, 角町駿, 土居俊輝, 武居悠貴, 清水真, 田中孝明, 鈴木寛大, 萩野浩一, 新井康夫, 倉知郁生
2. 発表標題 宇宙X線観測向けSOIピクセル検出器の面積化におけるアナログ信号応答の改良
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 幸村孝由, 北島隼正, 角町駿, 土居俊輝, 武居悠貴, 清水真, 萩野浩一, 鶴剛, 内田裕之, 上ノ町水紀, 天野雄輝, 佳山一帆, 松田真宗, 森浩二, 武田彩希, 西岡祐介, 行元雅貴, 石田辰徳, 岩切卯月, 泉大輔, 川島陸斗, 眞方恒陽, 田中孝明, 鈴木寛大, 新井康夫, 倉知郁生
2. 発表標題 宇宙X線観測向けSOIピクセル検出器の放射線耐性の評価
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松田真宗, 藤井俊博, 鶴剛, 池田智法, 天野雄輝, 佳山一帆, 岩崎啓, 上ノ町水紀, 身内賢太郎, 小貫良行, 井上慶純, 武多昭道
2. 発表標題 新型ピクセル型シリコン検出器による極低バックグラウンド環境での太陽アクシオン探査
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 中村 文隆、鶴 剛、長田 哲也、藤沢 健太、梅村 雅之、福江 純	4. 発行年 2022年
2. 出版社 日本評論社	5. 総ページ数 384
3. 書名 放射素過程の基礎	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	和田 武彦  (Wada Takehiko)  (50312202)	国立天文台・JASMINEプロジェクト・准教授   (62616)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	松前 貴司  (Matsumae Takashi)  (10807431)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・ 製造領域・主任研究員    (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関