



## COMPARAÇÕES TECNOLÓGICAS ENTRE OS DETECTORES SEMICONDUTORES DE SILÍCIO E PEROVSKITA DE HALETO

De Cicco, Enzo F. T.<sup>1</sup>, Azevedo, Ary M. de<sup>1</sup>, Nunes, Wallace V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia, Praça Gen. Tibúrcio, 80 - Urca, Rio de Janeiro - RJ

**Palavras-Chave:** Detectores semicondutores, silício, perovskita de haleto, alta resistividade, radiação ionizante.

### RESUMO

Os detectores de radiação semicondutores são fundamentais em diversas aplicações, desde a pesquisa científica até o setor médico e industrial, graças à sua capacidade de fornecer alta precisão e confiabilidade em suas leituras. Este artigo apresenta uma revisão abrangente sobre os mais recentes avanços no desenvolvimento e nas aplicações desses dispositivos, com ênfase entre os detectores de silício e as perovskita de haleto. Os detectores de silício, amplamente conhecidos por sua maturidade tecnológica, continuam a ser a escolha preferida em várias áreas devido à sua eficiência comprovada e à facilidade de integração em processos de produção em larga escala. Recentemente, filmes de perovskita de haleto têm se destacado como uma tecnologia emergente, oferecendo não apenas flexibilidade, mas também um custo de produção reduzido, o que os tornam ideais para aplicações inovadoras, como dispositivos portáteis e vestíveis. Detectores feitos com materiais de alta resistividade, por sua vez, estão proporcionando um avanço significativo na detecção de radiação de baixa energia, melhorando a precisão de medição. A metodologia adotada neste estudo baseou-se em uma revisão detalhada de publicações científicas recentes, com foco nas inovações tecnológicas e nas tendências de desenvolvimento. Os resultados indicam que a evolução contínua desses detectores está impulsionada pela necessidade de dispositivos mais sensíveis e com maior resolução. Finalmente, o artigo explora as principais áreas de aplicação desses dispositivos, destacando também os desafios futuros e as perspectivas para o setor de semicondutores no contexto da detecção de radiação.

### 1. INTRODUÇÃO

Os detectores de radiação têm uma importância central em diversos campos de estudo e aplicações práticas, como na física de partículas, medicina nuclear, e em processos industriais avançados. Esses dispositivos são fundamentais para medir e analisar radiações ionizantes, que variam desde partículas subatômicas até fótons de alta energia. Dentro dessa categoria de detectores, os semicondutores têm se destacado por seu desempenho superior em termos de sensibilidade e precisão, além de sua capacidade de operar em ambientes extremos, onde outros detectores podem falhar [1] [5].

Paralelamente, surgem os detectores de perovskita de haleto, que têm atraído atenção nos últimos anos devido às suas propriedades excepcionais. As perovskitas de haleto, compostas por uma estrutura cristalina específica que se forma naturalmente em rochas ígneas máficas e ultramáficas, estão ganhando espaço como materiais promissores para a detecção de radiação. Esses materiais têm a capacidade de absorver eficientemente raios X e radiação gama, além de permitir a fabricação de dispositivos leves, flexíveis e com menor custo. Outra vantagem importante é sua operação em temperatura ambiente, eliminando a necessidade de sistemas de resfriamento, o que facilita seu uso em dispositivos portáteis e vestíveis, com grande potencial nas áreas de segurança e medicina [6] [10].



Este estudo busca investigar e comparar esses dois tipos de semicondutores – o silício e a perovskita de haleto –, explorando suas vantagens e limitações com o uso de ambos em detectores de radiação. A análise abrange os desafios de implementação e os benefícios que cada um desses materiais pode trazer para o futuro da detecção de radiação em diferentes contextos.

## 2. METODOLOGIA

O referido estudo foi conduzido através de uma revisão bibliográfica sistemática sobre detectores de radiação semicondutores, com ênfase nos avanços tecnológicos recentes e suas aplicações práticas. A revisão abrangeu publicações científicas, artigos de periódicos especializados, revisados por pares, relatórios técnicos e livros na área de detecção de radiação, buscando compreender sua evolução e as principais inovações e tendências emergentes no campo dos semicondutores, principalmente nas últimas décadas.

### 2.1. PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS

A coleta de dados envolveu a pesquisa em bases de dados acadêmicas como IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink e Google Scholar, utilizando termos-chave como "semicondutores de radiação", "detectores de silício", "perovskitas de haleto" e "detector de alta resistividade". Foram priorizados estudos publicados entre 2003 e 2024, com ênfase em publicações relevantes que trouxessem contribuições significativas ao campo dos semicondutores. Adicionalmente, referências clássicas como *Radiation Detection and Measurement* de Knoll (2010), *Semiconductor Detector Systems* de Spieler (2005), *Measurement and Detection of Radiation* de Tsoufanidis e Landsberger (2015), e *Compound Semiconductor Radiation Detectors* de Owens e Peacock (2004) foram consultadas para fornecer uma base teórica sólida, que fundamentam as discussões e abastecem um estudo aprofundado, necessário, sobre os detectores semicondutores considerando também seu contexto histórico.

### 2.2. CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Foram incluídos na revisão artigos que abordam inovações tecnológicas, como novos materiais semicondutores, avanços nos métodos de fabricação, e melhorias na sensibilidade dos detectores e aplicações emergentes. Estudos que apresentassem revisões gerais sem foco em inovação ou que não trouxessem contribuições técnicas substanciais foram excluídos. A revisão se limitou a estudos revisados por pares, que apresentassem dados empíricos e relevantes, garantindo a confiabilidade das fontes consultadas. (Royal Society of Chemistry, MDPI, Frontiers).

### 2.3. ANÁLISE DOS DADOS

Os dados coletados foram avaliados qualitativa e quantitativamente. A análise qualitativa consistiu na identificação de tendências e categorização dos avanços tecnológicos em três áreas principais: detectores de silício, detectores baseados em perovskita de haleto, e detectores de alta resistividade. A análise quantitativa foi realizada através da comparação de desempenho entre diferentes tipos de detectores, considerando fatores como resolução energética, eficiência de detecção, e capacidade de operação em diferentes condições ambientais. (SpringerLink, Royal Society of Chemistry).



### 3. RESULTADOS

A revisão revelou diversas tendências emergentes no campo dos detectores de radiação semicondutores. Esses avanços indicam uma clara evolução e seu uso como tecnologias consolidadas. Os detectores de silício continuam a ser aprimorados, com melhorias contínuas em sua eficiência e sensibilidade, consolidando sua posição como uma tecnologia madura e amplamente utilizada [1] [5].

As inovações em perovskita de haleto têm mostrado um potencial promissor, especialmente devido às suas propriedades excepcionais, como alta eficiência de detecção de radiação e flexibilidade. Esses materiais emergentes estão abrindo novas possibilidades de aplicação, particularmente em detectores de radiação de alta precisão [7] [8].

Além disso, os detectores de alta resistividade estão ganhando destaque por sua capacidade de operar em condições extremas e oferecer alta resolução. Esses semicondutores avançados estão impulsionando a sensibilidade e a precisão dos dispositivos, expandindo suas aplicações em áreas como a medicina, a segurança e na pesquisa científica [4] [6].

#### 3.1. AVANÇOS NOS DETECTORES DE SILÍCIO

Os detectores de radiação de silício têm passado por avanços significativos, impulsionados pelas propriedades únicas do silício que melhoram a eficiência e precisão na detecção de radiação. As perturbações na estrutura cristalina do silício criam poços potenciais que capturam os portadores de carga, como elétrons e buracos [5]. A probabilidade de captura desses portadores é determinada pela seção transversal de captura, e o tempo que eles permanecem presos antes de serem reemitidos dependerá da intensidade da perturbação na rede cristalina [2].

A seção transversal de captura é uma medida que quantifica a probabilidade de um portador de carga (como um elétron ou um buraco) ser capturado por um defeito ou impureza na rede cristalina de um material semicondutor [4]. Em termos simples, ela representa a “área efetiva” que um defeito apresenta para capturar um portador de carga que passa por perto. Quanto maior a seção transversal de captura, maior a probabilidade de captura do portador de carga.

Em relação ao tempo que um portador de carga permanece preso em um defeito antes de ser reemitido na banda de condução (para elétrons) ou na banda de valência (para buracos) é influenciado pela intensidade da perturbação na rede cristalina. Perturbações mais intensas (ou defeitos mais profundos) resultam em tempos de aprisionamento mais longos, pois a energia necessária para liberar o portador de carga é maior. Em contraste, perturbações mais fracas (ou defeitos rasos) resultam em tempos de aprisionamento mais curtos [6] [7].

Por tais características, esses estados de captura são classificados em dois tipos: estados rasos, com energias de ligação em torno de 0,1 eV, e estados profundos, com energias de ligação em torno de 1 eV. A presença de defeitos de captura na camada epitaxial pode reduzir a eficiência na coleta de cargas geradas pela radiação incidente. Isso ocorre porque os eventos contínuos de captura e liberação retardam o fluxo de cargas, dificultando a coleta completa durante o tempo de integração do sinal [1] [10].

Embora impurezas e defeitos na matriz cristalina geralmente não se propaguem para camadas homoepitaxiais (devido a sua natureza cristalina de qualidade muito alta), deslocamentos de parafuso, como micro tubos, podem causar falhas precoces nos diodos. Deslocamentos de parafuso são um tipo específico de defeito cristalino que ocorre em materiais sólidos. Eles são chamados assim porque a distorção no cristal se assemelha a uma linha helicoidal, semelhante a um parafuso [3] [8]. Esses deslocamentos são importantes na física dos materiais porque influenciam as propriedades mecânicas e a deformação dos cristais. Defeitos de nível profundo eletricamente ativos surgem principalmente durante o crescimento do material semicondutor, mas



também podem se formar durante o processamento por implantação de íons e/ou irradiação do detector [6] [7].

Os detectores de silício então continuam a ser amplamente utilizados devido à sua alta resolução energética e capacidade de discriminar diferentes tipos de radiação. Formados a partir de junções np, esses detectores são essenciais em aplicações que requerem precisão, como na espectroscopia de raios X. A sua maturidade tecnológica e a sua capacidade de integração em processos de fabricação em larga escala também são excelentes vantagens que influenciam em seu uso como detectores [1] [3].

Avanços recentes têm focado na melhoria da resposta temporal e na redução de ruídos, o que possibilitaria o uso desses detectores em aplicações que exijam precisão extrema. Além disso, melhorias nos processos de dopagem e novas configurações de junção PN têm contribuído para o aumento da eficácia desses dispositivos [2] [4]. Esses avanços na compreensão e mitigação dos defeitos em detectores de silício têm permitido o desenvolvimento de dispositivos mais eficientes e precisos, essenciais para aplicações em diversas áreas, como a dosimetria de radiação e a detecção de partículas carregadas.

### 3.2. INOVAÇÕES EM PEROVSKITAS DE HALETO

As perovskitas de haleto são compostos que possuem uma estrutura cristalina específica, conhecida como estrutura de perovskita, que pode ser descrita pela fórmula geral ABX. Nessa estrutura, 'A' e 'B' são cátions de diferentes tamanhos, e 'X' é um ânion haleto (como cloro, bromo ou iodo) [7]. As perovskitas de haleto combinam cátions orgânicos e inorgânicos, como metilamônio, chumbo ou estanho, e halogênios. Essas combinações resultam em materiais com propriedades optoeletrônicas excepcionais, como alta absorção de luz, mobilidade de portadores de carga e uma banda proibida ajustável [9].

Detectores baseados em filmes de perovskita de haleto emergiram como uma tecnologia promissora devido às suas propriedades únicas, como flexibilidade, baixo custo e alta eficiência. Desde 2015, esses materiais vêm sendo explorados em aplicações variadas, incluindo sensores e detectores de radiação ionizante. Conforme Tsoulfanidis e Landsberger (2015), o desenvolvimento de filmes finos e espessos de perovskita tem permitido a fabricação de aparelhos flexíveis, que são ideais para aplicações em dispositivos portáteis e vestíveis, algo que não seria possível em relação aos detectores de silício devido a sua rigidez limitando sua aplicação nesse tipo de dispositivo [3] [5]. Esses detectores apresentam alta sensibilidade e podem operar em temperaturas ambientes, o que os torna atraentes para aplicações em ambientes extremos.

Recentemente, avanços significativos foram feitos na estabilidade e eficiência dos detectores de perovskita. Pesquisas têm focado na melhoria da estabilidade térmica e ambiental desses materiais, utilizando aditivos e técnicas de encapsulamento para prolongar a vida útil dos dispositivos. No entanto, desafios como a toxicidade do chumbo presente nas perovskitas e a degradação sob exposição prolongada à luz e umidade ainda precisam ser superados para a comercialização em larga escala [7] [10].

Enquanto os detectores de perovskita de haleto oferecem vantagens significativas em termos de flexibilidade e custo, os detectores de silício e de alta resistividade continuam a ser preferidos em aplicações que exigem alta precisão e resolução energética. A escolha do material depende, portanto, das necessidades específicas da aplicação, seja ela voltada para dispositivos portáteis e vestíveis ou para ambientes que exigem alta precisão e estabilidade.



### 3.3. DETECTORES DE ALTA RESISTIVIDADE

Os detectores de alta resistividade têm mostrado avanços significativos em termos de sensibilidade e resolução, especialmente na detecção de radiação de baixa energia. De acordo com Owens e Peacock (2004), materiais semicondutores como o carbeto de silício (SiC) e o telureto de cádmio (CdTe) oferecem maior resistência à radiação e melhoram a precisão da detecção em ambientes com alta radiação de fundo [6]. Esses detectores são essenciais em aplicações que exigem a detecção de sinais muito fracos, onde a redução de ruídos é crítica (SpringerLink, Royal Society of Chemistry).

Por outro lado, os detectores de alta resistividade, como os de germânio hiper puro (GeHp), são conhecidos por sua excelente resolução energética, o que os torna ideais para a identificação precisa de radionuclídeos. Esses detectores são frequentemente utilizados em ambientes que exigem alta precisão, como em instalações nucleares e laboratórios de pesquisa [7]. No entanto, sua produção é mais complexa e cara, e eles geralmente requerem resfriamento para operar eficientemente, o que pode limitar sua aplicabilidade em algumas situações.

## 4. CONCLUSÃO

O estudo detalhou os avanços recentes no desenvolvimento de detectores de radiação semicondutores, com ênfase em inovações em detectores de silício, perovskitas de haleto e detectores de alta resistividade. A análise revelou que a evolução dos detectores semicondutores está intimamente ligada ao desenvolvimento de novas aplicações que demandam maior sensibilidade e resolução [3].

Os detectores de radiação baseados em perovskitas de haleto representam uma inovação significativa no campo da detecção de radiação, oferecendo vantagens como flexibilidade, baixo custo e alta eficiência [7]. Desde 2015, esses materiais têm sido explorados em diversas aplicações, incluindo sensores e detectores de radiação ionizante, destacando-se por suas propriedades optoeletrônicas excepcionais e capacidade de operar em temperaturas ambientes.

Comparados aos detectores de silício, que são amplamente utilizados devido à sua alta resolução energética e capacidade de discriminar diferentes tipos de radiação [1] [3], os detectores de perovskita de haleto oferecem uma alternativa mais flexível e econômica. No entanto, os detectores de silício continuam a ser preferidos em aplicações que exigem alta precisão, como na espectroscopia de raios X [2] [6].

Entre outros motivos, os detectores de silício permanecem como uma tecnologia madura e confiável, amplamente utilizada devido à sua eficiência e capacidade de fabricação em larga escala. As melhorias contínuas nos processos de fabricação e o desenvolvimento de novas técnicas de dopagem [1] [2], têm aumentado a eficiência desses dispositivos em diversas aplicações. Os detectores baseados em perovskita de haleto, surgem como uma alternativa promissora principalmente por sua flexibilidade, baixo custo e capacidade de operação em condições adversas [3] [9].

Finalmente, os detectores de alta resistividade, demonstram ser essenciais em aplicações onde a detecção de precisão de sinais fracos é crítica, combinando alta sensibilidade e resistência à radiação [4]. Os detectores de alta resistividade, como os de germânio hiper puro (GeHp), são conhecidos por sua excelente resolução energética e são ideais para a identificação precisa de radionuclídeos. Apesar de sua produção ser mais complexa e cara, e geralmente requererem resfriamento para operar eficientemente, esses detectores são essenciais em ambientes que exigem alta precisão, como instalações nucleares e laboratórios de pesquisa [5] [6].

Os avanços recentes na estabilidade e eficiência dos detectores de perovskita, bem como os esforços para superar desafios como a toxicidade do chumbo e a degradação sob exposição prolongada à luz e umidade, indicam um futuro promissor para esses materiais. A escolha do



material ideal para detectores de radiação dependerá das necessidades específicas da aplicação, seja ela voltada para dispositivos portáteis e vestíveis ou para ambientes que exigem alta precisão e estabilidade [9] [10].

Os detectores semicondutores estão em uma trajetória de crescimento e inovação contínua, com novas tecnologias e materiais sendo desenvolvidos para atender às constantes demandas da ciência, da medicina e da indústria. Em resumo, enquanto os detectores de perovskita de haleto oferecem vantagens significativas em termos de flexibilidade e custo, os detectores de silício e de alta resistividade continuam a desempenhar um papel crucial em aplicações que exigem alta precisão e resolução energética [6] [9]. Entende-se que o futuro desses dispositivos parece promissor e a contínua pesquisa e desenvolvimento nesses materiais, prometem avanços tecnológicos que beneficiarão uma ampla gama de aplicações no futuro, com o potencial de transformar ainda mais a maneira como detectamos e analisamos radiação em diferentes contextos [7] [9].

## AGRADECIMENTOS

Expressa-se os mais sinceros agradecimentos à CAPES pelo apoio financeiro que tornou o presente trabalho possível. Aos professores Ary Machado de Azevedo e Wallace Vallery Nunes, por suas valiosas orientações, conhecimentos e incentivos ao longo desta jornada. Também se agradece ao Instituto Militar de Engenharia (IME) por fornecer os recursos e o ambiente acadêmico de excelência que permitiram o desenvolvimento deste estudo.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Knoll, G. F. (2010). Radiation Detection and Measurement. 4ª ed. John Wiley & Sons.
- [2] Spieler, H. (2005). Semiconductor Detector Systems. Oxford University Press.
- [3] Tsoulfanidis, N., & Landsberger, S. (2015). Measurement and Detection of Radiation. 4ª ed. CRC Press.
- [4] Owens, A., & Peacock, A. (2004). Compound Semiconductor Radiation Detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A.
- [5] Carminati, M., Giacomini, G., & Ninkovic, J. (2022). Silicon radiation detectors: Status and perspectives. *Frontiers in Physics*. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2022.1038377/full>. Acesso em: 27 ago. 2024.
- [6] DE NAPOLI, Marzio. Development of Silicon Carbide Detectors for Applications in Space and Medical Physics. *Frontiers in Physics*, v. 10, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2022.898833/full>. Acesso em: 27 ago. 2024.
- [7] PAN, Wanting; WEI, Haotong; YANG, Bai. Halide Perovskite-Based Radiation Detectors for High-Energy Photon Detection: Current Progress and Future Perspectives. *Frontiers in Chemistry*, v. 8, 2020. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/chemistry/articles/10.3389/fchem.2020.00268/full#B64>. Acesso em: 27 ago. 2024.
- [8] LIU, Runkai; LI, Feng; ZENG, Fang; ZHAO, Rubin; ZHENG, Rongkun. Halide perovskite x-ray detectors: Fundamentals, recent progress, and applications. *APL Reviews*, v. 11, n. 2, 2024. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/apr/article/11/2/021327/3295665/Halide-perovskite-x-ray-detectors-Fundamentals>. Acesso em: 07 set. 2024.
- [9] TAN, Yimei; MU, Ge; CHEN, Menglu; TANG, Xin. Halide perovskite films for ionizing radiation detection. *Coatings*, v. 13, n. 1, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-6412/13/1/211>. Acesso em: 07 set. 2024.
- [10] FALSINI, Naomi; UBALDINI, Alberto; CICONI, Flavio; RIZZO, Antonietta; VINATTIERI, Anna; BRUZZI, Mara. Halide Perovskites for High-Energy Radiation Detection: A Review of Recent Advances and Future Outlooks. *Sensors*, v. 23, n. 10, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/10/4930>. Acesso em: 07 set. 2024.