

Mobilidade eletrônica e viabilidade do 4H-SiC para a indústria de semicondutores

Electron mobility and feasibility of 4H-SiC for the semiconductor industry

DOI:10.38152/bjtv4n3-002

Recebimento dos originais: 17/06/2021

Aceitação para publicação: 27/07/2021

Clóves Gonçalves Rodrigues

Doutor em Ciências pelo Instituto de Física Gleb Wataghin, Unicamp, SP, Brasil

Instituição: Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC Goiás

Endereço: Av. Universitária, n. 1440, CP 86, Setor Universitário, Goiânia-GO, 74605-010

E-mail: cloves@pucgoias.edu.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é determinar os efeitos do tipo de dopagem e da orientação do campo elétrico aplicado na mobilidade eletrônica do semicondutor SiC na fase 4H, conhecido como 4H-SiC. Este semicondutor tem se mostrado de grande interesse tecnológico, principalmente pela possibilidade de sua aplicação em condições extremas de operação, tais como: altas temperaturas, altas tensões, altas pressões, altos níveis de radiação eletromagnética. Para alcançar os objetivos deste trabalho foi utilizado um ensemble estatístico para sistemas fora do equilíbrio, conhecido como Método do Operador Estatístico de Não Equilíbrio. Este método tem sido aplicado com muito êxito em materiais semicondutores. Aqui neste trabalho foi obtido que a maior mobilidade ocorre quando o campo elétrico é aplicado perpendicularmente ao eixo cristalográfico c do semicondutor 4H-SiC. Verificou-se também que a dopagem mais eficiente é a dopagem tipo n .

Palavras-chave: Semicondutor, Carbetto de silício, 4H-SiC, Mobilidade eletrônica.

ABSTRACT

The objective of this work is to determine the effects of the doping type and the orientation of the electric field applied on the electronic mobility of the SiC semiconductor in the 4H phase, known as 4H-SiC. This semiconductor has shown to be of great technological interest, mainly due to the possibility of its application in extreme operating conditions, such as: high temperatures, high voltages, high pressures, high levels of electromagnetic radiation. To achieve the objectives of this work, a statistical ensemble for out-equilibrium systems was used, called the Non-Equilibrium Statistical Operator Method. This method has been applied with great success in semiconductor materials. In this work it was obtained that the greatest mobility occurs when the electric field is applied perpendicular to the crystallographic axis c of the semiconductor 4H-SiC. It was also found that the most efficient doping is n -type.

Keywords: Semiconductor, Silicon carbide, 4H-SiC, Electron mobility.

1 INTRODUÇÃO

Um semicondutor de grande interesse tecnológico atual é o Carbeto de Silício (SiC), também chamado de *carborundum*. O cristal SiC pode ser produzido com diferentes formas cristalinas. Inúmeras aplicações eletrônicas e optoeletrônicas tem sido propostas com base nas propriedades eletrônicas e ópticas básicas do SiC. Existem cinco aplicações primárias de materiais à base de SiC: 1) microestruturas, 2) dispositivos opto-eletrônicos, 3) eletrônicos de alta temperatura, 4) eletrônicos rígidos de radiação e 5) dispositivos de alta potência e alta frequência. As aplicações de microestruturas incluem máscaras de raios-X e estruturas micro-usinadas, como diafragmas de alto-falantes e ferramentas especiais de micro-aplicação. Aplicações optoeletrônicas incluem substratos para a família de dispositivos de nitretos-semicondutores, LEDs (diodos emissores de luz), detectores de ultravioleta, células solares, memórias SiC, inversores SiC, etc. Devido à grande largura de banda dos SiC, quase todos os dispositivos fabricados em SiC podem ser considerados para aplicações em altas temperaturas. Sabe-se que a eletrônica de reatores nucleares, sistemas militares e capacidade de sobrevivência de eletrônica de espaço profundo são muito melhorados com o emprego do SiC. A condutividade térmica e a alta mobilidade de campo dos SiC permitem maior densidade de potência e operação de alta frequência.

O objetivo deste trabalho é determinar o efeito do tipo de dopagem e da orientação da direção de aplicação do campo elétrico, na mobilidade eletrônica do semicondutor SiC na fase 4H. O cristal semicondutor SiC na fase 4H é chamado simplesmente de 4H-SiC. O trabalho está assim estruturado: na Seção 2 é apresentado um histórico sobre a origem e o desenvolvimento do semicondutor SiC; na Seção 3 é feita uma rápida explicação sobre o que são semicondutores dopados tipo *p* e tipo *n*; na Seção 4 é mostrada a metodologia utilizada no presente trabalho e na Seção 5 os resultados; a Seção 6 se destina a comentários finais e por fim as Referências as quais trazem alguns artigos científicos históricos e atuais sobre o semicondutor SiC.

2 O SEMICONDUTOR CARBETO DE SILÍCIO (SiC)

A tecnologia de semicondutores pode ser considerada há pelo menos 150-200 anos atrás, quando cientistas e engenheiros que moravam nas margens ocidentais do Lago Victoria produziam aço-carbono feito de cristais de ferro em vez de sinterização de partículas sólidas (Henisch, 1968). A sinterização é o processo por meio do qual se produz um bloco de *sínter*. *Sínter* é um material obtido pela aglomeração de pequenas partículas de minério de ferro, sob alta temperatura, misturadas a fundentes (calcário e dolomita) e ao coque. Desde então, o Silício e materiais à base de silício têm desempenhado um papel importante no desenvolvimento da moderna tecnologia de dispositivos semicondutores.

O primeiro trabalho pioneiro em Carbetto de Silício como material semiconductor pode ser atribuído à empresa Marconi no ano de 1907 (Round, 1907) quando observaram o fenômeno de *eletroluminescência* pela primeira vez no SiC. A *eletroluminescência* é um fenômeno óptico e elétrico durante o qual um material emite luz em resposta a uma corrente elétrica que o atravessa. Por quase 50 anos, o trabalho da empresa Marconi pareceu passar despercebido. Em 1955, Lely (1955) desenvolveu um processo de sublimação usando uma cavidade de crescimento que produzia plaquetas bastante puras de SiC. Os cristais individuais foram dimensionados aleatoriamente e tinham uma forma essencialmente hexagonal. No entanto, o processo não forneceu controle sobre a nucleação e orientação dessas plaquetas. A partir daí o interesse pelo SiC como material semiconductor pode ser melhor descrito como uma montanha-russa com muitos picos e vales.

A primeira conferência internacional sobre SiC foi realizada em Boston, Massachusetts, no ano de 1959. Mais de 500 cientistas participaram da conferência e 46 artigos foram apresentados. Em 1968 e 1973, duas outras Conferências Internacionais foram realizadas, a de 1973 foi em Miami Beach. Daí, por quase dez anos as pesquisas sobre o SiC nos EUA e em todo o mundo passou por outro vale, exceto na então URSS, onde o esforço de pesquisas sobre o SiC permaneceu razoavelmente constante. O pouco interesse pelo SiC nesta década foi causado pela falta de progresso no crescimento de cristais de SiC com boa qualidade (Campbell, 1982). No início da década de 1980 Nishino (1980) e Powell (Nishino, 1983) deram uma grande contribuição ao renovado interesse pelo SiC com o desenvolvimento do crescimento heteroepitaxial do SiC sobre o silício. Logo em seguida este desenvolvimento foi então replicado por Sasaki et al. (1984), Liaw e Davis (1985) e Harris et al. (1986). Estes resultados levaram a três Workshops sobre o SiC organizados pela North Carolina State University (nos anos de 1986, 1987 e 1988) e a quatro Conferências Internacionais de SiC co-patrocinadas pela Howard University e pela Universidade de Santa Clara, além de workshops anuais de SiC no Japão, e uma conferência internacional de semicondutores de alta temperatura. Além disso houve a formação de várias empresas de SiC, produtos à base de SiC e novas soluções sólidas de SiC, observando-se, então, um renovado interesse geral neste material semiconductor.

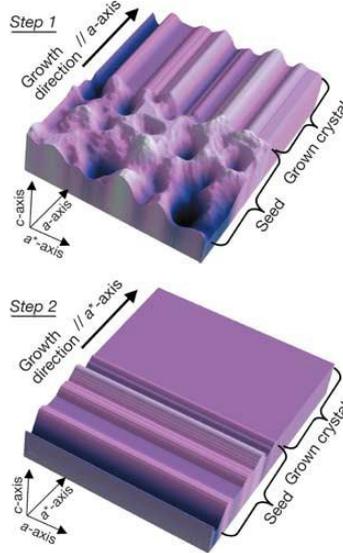
Pesquisas sobre o SiC no Japão também estavam na mesma montanha-russa. Os trabalhos realizados nos anos de 1960 no Japão foi centrado em torno da física básica de estado sólido e do crescimento de cristais e na década de 1970 a pesquisa sobre SiC quase desapareceu completamente. Na década de 1980, o SiC retornou em grande parte devido ao projeto patrocinado pelo Ministério do Comércio Internacional e Indústria (MITI) sobre *circuitos integrados endurecidos para condições extremas*, liderado pelo “Electrotechnical

Laboratory”. Em 1984, a “*Society of SiC*” foi organizada e tornou-se a “*Society of SiC e Related Bandgap Semiconductors*” (Sociedade do SiC e de Semicondutores de Gap Largo Relacionados). A sociedade tem uma reunião anual e o Instituto de Ciência Espacial e Astronáutica (ISAS) organizou uma reunião anual de Eletrônica de Alta Temperatura. A partir de 1990 os tópicos na pesquisa de SiC no Japão passaram a ser micro-tubos em wafers, controle de politipos em epitaxia, análise de superfície de camadas epitaxiais, aplicação de dispositivos de energia, simulação de dispositivos, e outros (Tajima, 1994).

A partir do ano de 1994 a taxa e o número de publicações científicas que tratam a respeito do SiC cresceram significativamente até os dias atuais. Nos últimos anos muitas novas equipes de pesquisa se envolveram na pesquisa de SiC nos EUA, Europa, Ásia, Japão e Rússia. Atualmente o esforço relativo de pesquisa de semicondutores com o SiC é várias vezes maior que no passado, e claro, o seu nível de financiamento hoje é também várias ordens de magnitude maior.

A Figura 1 ilustra de forma esquemática a produção de cristais de carbeto de silício através do crescimento de uma amostra inicial (*semente*) de SiC pelo deslocamento na estrutura do SiC crescida perpendicularmente ao eixo cristalográfico c do cristal. Este método foi proposto na década de 2000 por Nakamura e colaboradores (2004) na “Toyota Central R&D Laboratories” localizada na cidade de Nagakute na província de Aichi no Japão. Este método criado por Nakamura et al. (2004) foi pioneiro por reduzir a quantidade de falhas e defeitos na estrutura cristalina do SiC permitindo a produção de substratos que promoveram o desenvolvimento de dispositivos SiC de alta potência, reduzindo as perdas de energia dos sistemas elétricos resultantes. Assim, além de ter o domínio sob a produção de um composto muito mais eficiente, os cientistas conseguiram produzi-lo de forma mais pura.

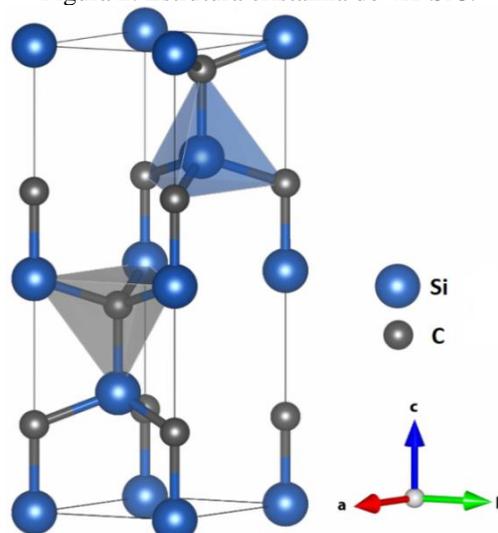
Figura 1. Esquema de crescimento de um cristal de SiC.



Fonte: (Inovação, 2020).

O carbeto de silício (SiC) pode se formar em muitas estruturas cristalinas distintas conhecidas como *politipos* (Izhevskiy, 2000), com alguns dos mais comuns sendo o 3C-SiC, o 4H-SiC e o 6H-SiC. Entre os vários politipos de SiC, o 4H-SiC (veja Figura 2) foi reconhecido como o material mais atraente para operação em dispositivos eletrônicos de alta potência, alta frequência e alta temperatura devido a seu maior gap e maior mobilidade de portadores que o de outros politipos (Takahashi, 2006). O 4H-SiC possui propriedades de transporte anisotrópicas. Esta anisotropia está associada à simetria hexagonal, que faz com que as massas efetivas dos portadores (elétrons e buracos) difiram significativamente entre orientações paralelas ao eixo cristalográfico c do cristal, e aquelas ao longo do plano basal perpendicular ao eixo c .

Figura 2. Estrutura cristalina do 4H-SiC.



Fonte: Joshua, 2020.

Salientamos que para desenvolver dispositivos eletrônicos de alto desempenho, além de otimizar as etapas de fabricação, é necessário um bom conhecimento das propriedades de transporte. Como exemplo, a mobilidade de portadores é uma propriedade muito importante, afetando o desempenho do dispositivo. Dependendo do dispositivo em específico, a mobilidade dos portadores, será mais interessante ao longo do eixo cristalográfico c ou perpendicular ao mesmo. Em particular, a mobilidade de portadores ao longo do eixo cristalográfico c é extremamente importante em dispositivos de potência verticais como os diodos Schottky (Roccaforte, 2003).

3 DOPAGEM TIPO N E TIPO P

Os elétrons livres e buracos de um semicondutor são chamados de portadores de carga elétrica, pois é através deles que se realiza qualquer transporte de carga elétrica de um ponto para outro do material semicondutor. Em um semicondutor puro o número de elétrons livres de condução é igual ao número de buracos.

A densidade de portadores de carga em um cristal semicondutor pode ser controlada mediante a adição de impurezas na rede cristalina. Essas impurezas são átomos com valência maior ou menor que o átomo que forma a rede cristalina do cristal semicondutor puro. Este processo de adição de impurezas é denominado de *dopagem*. A dopagem pode ser do tipo n ou do tipo p .

Nos semicondutores tipo n , ou seja, que contém impurezas doadoras, o número de elétrons é muito maior que nos semicondutores puros. Além disso, o número de buracos é bem menor, pois com o excesso de elétrons, os buracos têm mais oportunidades de se recombinarem de forma bem mais fácil. Já nos semicondutores dopados do tipo p , contendo impurezas aceitadoras, ocorre o oposto: como a concentração de buracos é maior que a concentração de elétrons livres, o número de elétrons livres de condução é bem menor que no semicondutor puro.

4 METODOLOGIA

Uma importante propriedade de transporte dos semicondutores é a mobilidade elétrica μ , definida como a velocidade de deriva dos portadores de carga (elétrons ou buracos) no estado estacionário, v , dividida pelo valor da intensidade do campo elétrico aplicado E , ou seja: $\mu = v/E$. A velocidade dos portadores de carga para o semicondutor 4H-SiC submetido a um campo elétrico e dopado tipo n e tipo p foi obtida (Vasconcelos, 2019a; Vasconcelos, 2019b) utilizando um ensemble estatístico para sistemas fora do equilíbrio, conhecido como Método do Operador Estatístico de Não Equilíbrio (Luzzi, 2018). Este método tem sido aplicado com muito êxito em materiais semicondutores

(Rodrigues, 2007, 2008, 2009, 2012, 2017, 2021), (Pereira, 2021).

Como o semicondutor 4H-SiC possui propriedades anisotrópicas temos dois valores para a mobilidade elétrica: uma quando o campo elétrico é aplicado paralelamente ao eixo cristalográfico c , e outra quando o campo elétrico é aplicado perpendicularmente ao eixo c do cristal.

5 RESULTADOS

Tendo sido determinada a velocidade dos portadores de carga nas duas direções (paralela e perpendicular ao eixo cristalográfico c) do cristal semicondutor 4H-SiC (Vasconcelos, 2019a; Vasconcelos, 2019b), apresentamos nesta seção uma comparação da mobilidade para o caso do semicondutor 4H-SiC dopado tipo p ou tipo n , quando o campo elétrico é aplicado na direção paralela ao eixo cristalográfico c ou quando o campo elétrico é aplicado na direção perpendicular ao eixo cristalográfico c do cristal semicondutor 4H-SiC.

A Tabela 1 mostra uma comparação das mobilidades do semicondutor 4H-SiC em temperatura ambiente (25°C) em diferentes situações. Nota-se que a mobilidade eletrônica para a situação em que o semicondutor é dopado tipo n é maior que quando a dopagem é do tipo p . Esta maior mobilidade é porque os portadores de carga no 4H-SiC dopado tipo n possuem uma massa efetiva menor que os portadores quando a dopagem é do tipo p . Verifica-se também que a mobilidade eletrônica do 4H-SiC é maior quando o campo elétrico é aplicado perpendicularmente ao eixo cristalino c do cristal semicondutor. A maior mobilidade nesta direção específica do 4H-SiC se deve ao fato que os portadores de carga tem uma massa efetiva maior na direção do eixo cristalino c em comparação com a direção perpendicular ao eixo cristalográfico c . Os resultados mostram que para dispositivos que necessitem de uma alta mobilidade, o semicondutor 4H-SiC dopado tipo n , com o campo elétrico aplicado perpendicularmente ao eixo cristalográfico c , seria então o mais viável. Destaca-se que quanto maior a mobilidade de um material semicondutor maior será a rapidez de operação de um dispositivo eletrônico que tem como base este material semicondutor.

Tabela 1 Mobilidades obtidas neste trabalho para o 4H-SiC.

Campo Elétrico	Dopado tipo n	Dopado tipo p
Perpendicular ao eixo c	3467 cm ² /V.s	584 cm ² /V.s
Paralelo ao eixo c	2566 cm ² /V.s	131 cm ² /V.s

Fonte: o autor.

A Tabela 2 mostra a mobilidade conhecida de portadores de carga de alguns dos semicondutores mais utilizados comercialmente: o silício (Si) e o germânio (Ge). Os valores apresentados na Tabela 2 são também para temperatura ambiente (25°C). Comparado ao Si e ao Ge verifica-se que o semicondutor 4H-SiC (veja Tabela 1) seria tecnicamente viável em relação à mobilidade, visto que possui valores de mobilidade próximos ou até melhores (conforme a situação) que os semicondutores Si e Ge.

Tabela 2 Mobilidade de portadores nos semicondutores Si e Ge.

Semicondutor	Dopado tipo n	Dopado tipo p
Si	1350 cm ² /V.s	480 cm ² /V.s
Ge	3600 cm ² /V.s	1800 cm ² /V.s

Fonte: Kittel, 1996.

Em relação à comparação com os semicondutores Si e Ge outro ponto deve ser levado em consideração: o semicondutor 4H-SiC destaca-se por poder ser utilizado em condições extremas de operação, tais como: altas temperaturas, altas tensões, altas pressões, altos níveis de radiação eletromagnética. Isto se deve em grande parte à sua alta rigidez mecânica e ao seu gap largo. Por outro lado, os semicondutores Si e Ge têm suas aplicações limitadas ou mesmo impossibilitadas nestas condições extremas.

6 COMENTÁRIOS FINAIS

É extremamente importante do ponto de vista de aplicações em dispositivos eletrônicos comparar as propriedades de diferentes direções de um material em particular. Uma direção pode ser mais conveniente que a outra em alguma aplicação tecnológica, sendo mais atrativa para certas aplicações em determinados dispositivos. No presente trabalho foi verificado que a maior mobilidade eletrônica para o semicondutor 4H-SiC ocorre quando o campo elétrico é aplicado perpendicularmente ao eixo cristalográfico *c* do cristal semicondutor. Verificou-se também que a dopagem mais eficiente para o semicondutor 4H-SiC é a dopagem tipo *n*. Assim, os resultados aqui obtidos para o semicondutor 4H-SiC mostram que a dopagem tipo *n* aliada com o campo elétrico aplicado perpendicularmente ao eixo cristalográfico *c* do cristal semicondutor seria, então, o mais viável para dispositivos que necessitem de uma alta mobilidade. Destaca-se que quanto maior a mobilidade maior será a rapidez de operação do dispositivo eletrônico baseado em materiais semicondutores.

REFERÊNCIAS

CAMPBELL, R. B. (1982). Whatever happened to silicon carbide. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IE-29, 2, 124.

HARRIS, G. L.; JACKSON, K. H.; FELTON, G. J.; OSBOURNE, K. R.; FEKADE, K.; SPENCER, M. G. (1986). Low-pressure growth of single-crystal silicon carbide. *Materials Letters*, 4, 2, 77.

HENISCH, H. K.; ROY, R. (1968). *Proceedings International Conference on Silicon Carbide*. Ed. Pergamon Press. Pennsylvania, USA.

INOVAÇÃO, 2020. Disponível em: <<https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010110040827>>. Acessado em: 11 de abril de 2020.

IZHEVSKYI, V. A.; GENOVA, L. A.; BRESSIANI, J. C.; BRESSIANI, A. H. A. (2000). Review article: silicon carbide. structure, properties and processing. *Cerâmica*, 46, 297.

JOSHUA, 2020. Disponível em: <<https://www.joshuataillon.com/project/silicon-carbide>>. Acessado em: 11 de abril de 2020.

KITELL, C. (1996) *Introduction to solid state physics*. 7ª edição. Ed. John Wiley e Sons. New York, USA.

LELY, J. A. (1955). Darstellung von einkristallen von silicium carbid und beherrschung von art und menge der eingebauten verunreinigungen. *Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft*, 32, 229.

LIAW, P.; DAVIS, R. F. (1985). Epitaxial growth and characterization of β -SiC thin films. *Journal of The Electrochemical Society*, 132, 642.

LUZZI, R.; VACONCELLOS, A. R.; RAMOS, J. G.; RODRIGUES, C. G. (2018). Statistical irreversible thermodynamics in the framework of Zubarev's nonequilibrium statistical operator method. *Theoretical and Mathematical Physics*, 194, 4.

NAKAMURA, D.; GUNJISHIMA, I.; YAMAGUCHI, S.; ITO, T.; OKAMOTO, A.; KONDO, H.; ONDA, S.; TAKATORI, K. (2004). Ultrahigh-quality silicon carbide single crystals. *Nature*, 430, 1009.

NISHINO, S.; HAZUKI, Y.; MATSUNAMI, H.; TANAKA, T. (1980). Chemical vapor deposition of single crystalline β -SiC films on silicon substrate with sputtered SiC intermediate layer. *Journal of The Electrochemical Society*, 127, 12, 2674.

NISHINO, S.; POWELL, J. A.; WILL, H. A. (1983). Production of large-area single-crystal wafers of cubic SiC for semiconductor devices. *Applied Physics Letters*, 42, 5, 460.

PEREIRA, M. C. B.; RODRIGUES, C. G. (2021). Comparativo da mobilidade eletrônica do arseneto de gálio com outros semicondutores. *Brazilian Journals of Business*, 3, 2, 1853-1860.

ROCCAFORTE, F.; VIA, F. L.; RAINERI, V.; MANGANO, F.; CALCAGNO, L. (2003). Temperature dependence of the c-axis mobility in 6H-SiC Schottky diodes. *Applied Physics Letters*, 83, 4181.

RODRIGUES, C. G. (2007). Electron transport in GaN(ZB) and AlN(WZ). *Journal of Materials Science*, 42, 396-400.

RODRIGUES, C. G. (2008). Ultrafast transport transient in photoexcited ZnSe. *The European Physical Journal. Applied Physics*, 41, 201-204.

RODRIGUES, C. G. (2009). Influence of the concentration, temperature and electric field intensity on the electron mobility in n-doped zinc sulphide. *European physical journal B*, v.72, 405-408, 2009.

RODRIGUES, C. G. (2012). Nonlinear electronic transport behavior in Indium Nitride. *Materials Chemistry and Physics*, 137, 317-322.

RODRIGUES, C. G. (2017). Ultrafast transport transient in n-doped ZnS in wurtzite and zincblende phases. *Condensed Matter*, 2, 12.

RODRIGUES, C. G. (2021). Hot carrier dynamics of photoinjected plasma in indium nitride. *European physical journal B*, 94, 82.

ROUND, H. J. (1907). A note on carborundum, *Electrical World*, 19, 309.

SASAKI, K.; SAKUMA, E.; MISAWA, S.; YOSHIDA, S.; GONDA, S. (1984). High-temperature electrical properties of 3C-SiC epitaxial layers grown by chemical vapor deposition. *Applied Physics Letters*, 45, 72.

TAJIMA, M. (1994). Processing of wide band gap semiconductors. *Trans. of 2nd International High Temperature Electronics Conference*, 1, I-29.

TAKAHASHI, K.; YOSHIKAWA, A.; SANDHU, A. (2006). *Wide bandgap semiconductors*. Ed. Springer. Berlin, Germany.

VASCONCELOS, J. L.; RODRIGUES, C. G.; LUZZI, R. (2019a). Anisotropic hole drift velocity in 4H-SiC. *Materials Science and Engineering B*, 249, 114426.

VASCONCELOS, J. L.; RODRIGUES, C. G.; LUZZI, R. (2019b). Study of electron transport in 4H-SiC by using nonequilibrium statistical ensemble formalism. *Brazilian Journal of Physics*, 49, 494.