

República Federativa do Brasil
Ministério do Desenvolvimento, Indústria
e do Comércio Exterior
Instituto Nacional de Propriedade Industrial

(21) BR 10 2012 016903-7 A2



(22) Data de Depósito: 10/07/2012

(43) Data da Publicação: 30/06/2015
(RPI 2321)

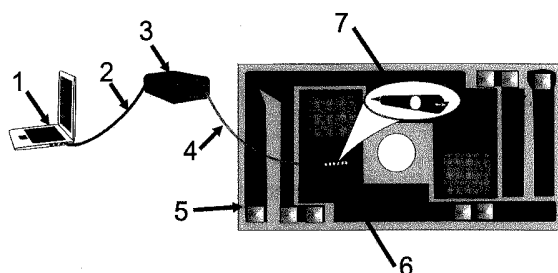
(54) **Título:** MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DE JUNÇÃO DE DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES ATRAVÉS DE MEDIDA DIRETA, EMPREGANDO REDE BRAGG EM FIBRA ÓTICA

(51) **Int.Cl.:** G01K11/32

(73) **Titular(es):** UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

(72) **Inventor(es):** JEAN CARLOS CARDOZO DA SILVA, JOÃO PAULO BAZZO

(57) **Resumo:** MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DE JUNÇÃO DE DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES ATRAVÉS DE MEDIDA DIRETA, EMPREGANDO REDE BRAGG EM FIBRA ÓTICA. Este invento refere-se a um novo método para monitorar a temperatura de junção de dispositivos semicondutores através de medida direta. O sistema permite medir a temperatura de junção do semicondutor em operação, através de um sensor ótico instalado no interior do dispositivo, em contato direto com a pastilha semicondutora. O princípio de funcionamento do sistema consiste no emprego de uma rede Bragg em fibra ótica como sensor de temperatura. Algumas características de sensor, como tamanho reduzido, baixo tempo de resposta e imunidade eletromagnética, favorecem a sua utilização para esta aplicação. Essas características permitem realizar medidas confiáveis mesmo no ambiente ruidoso e limitado em espaço no interior do dispositivo. Os resultados obtidos contribuem para identificação dos parâmetros térmicos do dispositivo, facilitando a elaboração de modelos térmicos confiáveis para simulação computacional do aquecimento da temperatura de junção. O sistema é composto por um computador equipado com software para aquisição das medidas em tempo real (1), comunicação TCP/IP (2) entre o computador e um interrogador ótico (3) utilizado para interpretar as medidas do sensor ótico (7), uma fibra ótica (4) com uma rede de Bragg gravada (7), um módulo IGBT (5) com acesso para instalação do sensor sobre a pastilha semicondutora que forma o IGBT (6).



MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DE JUNÇÃO DE DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES ATRAVÉS DE MEDIDA DIRETA, EMPREGANDO REDE BRAGG EM FIBRA ÓTICA.

5 A presente invenção refere-se um novo método para monitorar a temperatura de junção de dispositivos semicondutores em operação. Diferente de outros métodos encontrados na literatura, o monitoramento da temperatura de junção é realizado de forma direta, empregando um sensor a fibra baseado em rede de Bragg em contato com a superfície da pastilha semicondutora do
10 dispositivo. Esse método pode trazer uma grande contribuição para fabricantes de semicondutores e projetistas de sistemas de processamento de energia, pois a temperatura de junção tem forte influência no desempenho desses dispositivos.

Nos últimos anos, dispositivos semicondutores de potência, em especial os
15 IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors), vêm sendo largamente utilizados em várias aplicações industriais como inversores de frequência para acionamentos de motores elétricos, em sistemas propulsores de veículos elétricos e híbridos e em sistemas de geração de energia. Para atender a demanda de potência de tais aplicações, avanços tecnológicos em termos de
20 materiais e técnicas de fabricação têm possibilitado o desenvolvimento de dispositivos semicondutores de potência capazes de operar com frequências de comutação e densidades de correntes cada vez mais elevadas, tornando as variações de tensão e corrente elétrica através dos mesmos cada vez maiores. Isso tem um impacto direto no desempenho dinâmico dos dispositivos,
25 afetando as perdas de potência e a temperatura de operação dos mesmos, pois as perdas são dissipadas na forma de calor.

A alta velocidade de comutação associada aos elementos parasitas (capacitância e indutâncias parasitas) do circuito, pode gerar oscilações nas formas de onda de tensão e corrente durante a transição entre os estados de
30 bloqueio (turn-off) e entrada em condução (turn-on) do semicondutor. Essas

oscilações podem provocar um aumento das perdas de potência no semicondutor. O aumento excessivo das perdas provoca o aquecimento do mesmo, vindo a afetar o desempenho do semicondutor. Normalmente, o desempenho dinâmico do semicondutor é prejudicado com o aumento em sua
5 temperatura de operação. As variações térmicas alteram alguns parâmetros do semicondutor como, por exemplo, os tempos de comutação e picos de tensão e corrente. Esses fenômenos térmicos influenciam diretamente o semicondutor, alterando as formas de onda de corrente e tensão do dispositivo, aumentando ou reduzindo as perdas, dependendo da tecnologia e da temperatura de
10 operação do mesmo. Assim, a análise do desempenho dispositivo semicondutor deve estar sempre associada à temperatura de junção para se projetar dispositivos e circuitos cada vez mais eficientes.

Atualmente, a tendência pelo aumento da eficiência dos conversores de energia motivou o desenvolvimento diferentes técnicas para estimação de da
15 temperatura de junção dos semicondutores de potência, sendo muitas delas focadas em IGBTs. Porém, monitoramento da temperatura de junção do semicondutor torna-se complicado, pois a pequena área de contato (na ordem de milímetros), os rápidos tempos de transição (na ordem nanossegundos) e a interferência eletromagnética gerada pelas altas frequências de comutação (na
20 ordem de kilohertz), inviabilizam o uso de sensores térmicos convencionais. Alguns autores consideram impraticável realizar essa medição de forma direta (MARTIN et al., 2004) (SHEN et al., 2006) (FUJII et al., 2008). Uma alternativa frequentemente adotada tem sido o monitoramento da temperatura na superfície do dissipador e o uso da estimação do aquecimento da junção do
25 semicondutor através de cálculo térmico utilizando-se os valores da resistência térmica do dissipador e do semicondutor. Porém, esse método é considerado complexo e pode gerar erros percentuais que variam de 10% a 20% entre os valores medidos e calculados. Outros estudos são realizados através de simulações com modelos, que apesar de apresentar resultados satisfatórios,
30 exigem um conhecimento aprofundado das características térmicas dos materiais que compõe o dispositivo. De fato, essas limitações motivam

pesquisas por equipamentos ou técnicas que possam realizar a medição de forma direta, ou obter as características térmicas precisas para elaboração de modelos confiáveis.

Diante das dificuldades descritas, foi proposto um novo método para monitorar a temperatura de junção de dispositivos semicondutores em operação. Diferente de outros métodos encontrados na literatura, o monitoramento da temperatura de junção é realizado de forma direta, empregando um sensor ótico a fibra baseado em rede de Bragg em contato com a superfície do semicondutor que constitui o IGBT. Algumas características desse sensor favorecem sua utilização para esta aplicação, dentre elas pode-se destacar: o tamanho e peso reduzido, alta sensibilidade térmica, e baixo tempo de resposta (na ordem de microssegundos), e principalmente a imunidade eletromagnética. O pequeno diâmetro da fibra, na ordem de micrômetros, permite a instalação do sensor em pequenas áreas de contato, não influenciando no funcionamento do dispositivo. Desta forma, a rede de Bragg pode ser posicionada em contato direto com a superfície do IGBT, permitindo monitoramento em tempo real da temperatura de junção, com boa sensibilidade e imunidade às interferências eletromagnéticas provocadas pelas elevadas taxas de variação de tensão e corrente através do semicondutor. Quando o IGBT é acionado, ocorrem variações na temperatura de junção, provocadas pela dissipação térmica das perdas geradas pela condução e chaveamento de corrente elétrica. As informações dos picos de temperatura são interpretadas por uma unidade de medição para sensores a fibra ótica, que transmite as informações para a tela de um computador, além de armazená-las em um banco de dados. Os dados coletados podem ser utilizados para identificar os parâmetros térmicos da estrutura do IGBT, facilitando a elaboração de um modelo térmico IGBT.

A invenção será descrita a seguir através da apresentação das figuras que contribuem para compreensão do método elaborado.

A Figura 1 mostra uma visão geral do sistema de monitoramento desenvolvido e todos os componentes envolvidos.

A Figura 2 mostra as formas de onda de tensão e corrente do IGBT potência dissipada e variação da temperatura de junção medida pelo sensor 5 ótico.

A Figura 3 mostra a curva de impedância térmica do IGBT obtida através das medições realizadas pelo sensor ótico.

A Figura 4 mostra o modelo térmico para simular o aquecimento do IGBT.

A Figura 5 mostra uma comparação entre os resultados medidos e 10 simulados aplicando um pulso único de 20 segundos no IGBT.

A Figura 6 mostra uma comparação entre os resultados medidos e simulados aplicando uma sequência de pulsos de 500 milissegundos no IGBT.

A Figura 1 mostra o posicionamento do sensor e o sistema para 15 monitoramento da temperatura de junção através de medida direta. O sensor é instalado removendo a parte superior do módulo (5) e fixando a rede de Bragg (7) sobre a pastilha que semicondutora do IGBT (6) através de um óleo mineral, com a finalidade de melhorar a condutividade térmica entre o sensor e o IGBT. As medidas de temperatura são transmitidas através da fibra ótica (4) para um interrogador ótico (3). O interrogador ótico transmite as informações 20 para um microcomputador (1) através de comunicação TCP/IP (2). O microcomputador dispõe de um software desenvolvido em Labview®, que permite mostrar as medidas em tempo real além de armazená-las em banco de dados.

A Figura 2 mostra um exemplo de resultado obtido com o sistema de 25 medição. Nesse teste o IGBT conduz uma corrente elétrica contínua I_c de 1,4 A. A condução de corrente elétrica I_c associada com a tensão V_{ce} de 1,4 V provoca uma dissipação de potência de 1,98 W, mantida durante 20 segundos (intervalo de 4 a 24 segundos), sendo que ao mesmo tempo a temperatura de

junção foi monitorada pelo sensor ótico. A curva da variação de temperatura ΔT_J mostra o aquecimento gerado pela dissipação de potência, onde a variação máxima foi de 1,26 °C. O teste mostra que mesmo para pequenas variações o sensor é capaz de monitorar a temperatura.

- 5 A Figura 3 mostra o resultado da curva da impedância térmica Z_{th} da estrutura do IGBT (6). Essa curva é obtida utilizando dos resultados da Figura 2, relacionando a potência dissipada com a variação de temperatura monitorada pelo sensor ótico (7), de acordo com a Equação 1. Através da curva da impedância térmica podem-se obter parâmetros térmicos da estrutura
- 10 do IGBT, como resistência e capacitância térmica. Esses parâmetros são úteis para elaboração de modelos térmicos. De acordo com a equação 2, as características térmicas da estrutura podem ser obtidas fazendo um ajuste matemático da função $Z_{th}(t)$, onde o valor máximo será a resistência térmica R_{th} , dada em °C/W, e as constantes de tempo determinam a capacitância
- 15 térmica em J/°C, através da Equação 3. O melhor ajuste encontrado foi o exponencial crescente de segunda ordem, onde os valores obtidos foram $R_{th} = 0,65$ °C/W, $\tau_1 = 0,74$ e $\tau_2 = 6,33$, e conseqüentemente $C_{th1} = 1,13$ J/°C e $C_{th2} = 9,73$ J/°C. Por fim, a curva $Z_{th}(t)$ pode ser representada pela Equação 4.

$$Z_{th} = \frac{\Delta T_J}{P} \quad (1)$$

$$Z_{th} = R_{th} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{R_{th} C_{th}} \right) \right) \quad (2)$$

$$C_{th} = \tau / R_{th} \quad (3)$$

$$z_{th}(t) = \left(\frac{R_{th}}{2} \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{R_{th}C_{th1}} \right) \right) \right) + \left(\frac{R_{th}}{2} \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{R_{th}C_{th2}} \right) \right) \right) \quad (4)$$

A Figura 4 apresenta o modelo térmico de segunda ordem obtido através da Equação 4, que pode ser utilizado para simular o aquecimento da junção do IGBT. Nesse modelo a potência dissipada é representada por uma fonte de corrente, e a variação de temperatura é a diferença de potencial entre fonte de corrente e os componentes que representam a impedância térmica. Os resistores representam a resistência térmica R_{th} da estrutura do IGBT e capacitores a capacitância térmica C_{th} . O formato em segunda ordem pode ser justificado fazendo uma comparação com o modelo proposto por CIAPPA et al., 2005, onde a estrutura do IGBT é também representada por um modelo de segunda ordem. A diferença é que, como a impedância térmica foi obtida por medida direta, ou seja, entre a estrutura e o sensor, consideram-se apenas as características do IGBT, podendo desprezar as camadas formadas por outros materiais que compõe o módulo, como solda, cobre e encapsulamento.

A Figura 5 mostra uma comparação entre os resultados medidos pelo sensor (6) e simulados com o modelo térmico (Figura 4), aplicando o mesmo teste apresentado na Figura 2. Como pode ser observado, existe uma grande conformidade entre a simulação e a resposta obtida pelo sensor ótico, caracterizando um modelo confiável para estimar o aquecimento na junção do IGBT em função da potência dissipada.

A Figura 6 mostra outra comparação entre resultados medidos e simulados aplicando um teste dinâmico, com uma sequência de pulsos de 500 milissegundos. Pode-se notar que mesmo alterando os parâmetros do teste, os resultados do modelo térmico são muito semelhantes à resposta do sensor, onde o erro máximo é de aproximadamente $\pm 0,02$ °C, o que representa um erro percentual de apenas $\pm 0,3$ % (aproximadamente). Os outros modelos,

elaborados através de técnicas que utilizam sensores convencionais medindo a temperatura do dissipador, apresentam erros mínimos entre 5% e 10% (SHEN et al., 2006) (BRUCKNER et al., 2007).

REINVINDICAÇÕES

1. “MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DE JUNÇÃO DE DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES ATRAVÉS DE MEDIDA DIRETA,
5 EMPREGANDO REDE BRAGG EM FIBRA ÓTICA” é um sistema caracterizado por conter um sensor ótico em rede de Bragg (7) instalado no interior do encapsulamento (5) do dispositivo, em contato direto com a pastilha que forma o semicondutor (6); e por permitir monitoramento da temperatura em tempo real, durante a operação do dispositivo, através de um interrogador ótico (3)
10 conectado a um computador com um software de aquisição de sinais (1).

2. Processo de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por utilizar um módulo IGBT (5) com a acesso ao interior do dispositivo para instalação de uma rede de Bragg em fibra ótica (7) fixada através de um óleo mineral, com a finalidade de melhorar a condutividade térmica entre o sensor e o
15 semicondutor.

3. Processo de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por utilizar um interrogador ótico (3) com comunicação TCP/IP (2) para interpretar as variações do comprimento de onda da rede Bragg e converte-las em variações de temperatura.

20 4. Processo de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por utilizar um software que permite mostrar as medidas do interrogador ótico (3) em tempo real na tela do computador (1) além de armazená-las em banco dados.

5. Processo de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por manter o IGBT em estado de condução por um período determinado e monitorar o aquecimento gerado em sua estrutura de forma direta (sensor ótico em contato com o IGBT) (Figura 2), com a finalidade de obter a curva de impedância térmica (Figura 3).
25

6. Processo de acordo com a reivindicação 5, caracterizado por utilizar a curva de impedância térmica (Figura 3) para obter os parâmetros térmicos do IGBT (resistência e capacitância térmica) (Equação 4).

5 7. Processo de acordo com a reivindicação 6, caracterizado por utilizar os parâmetros térmicos para elaborar um modelo térmico de segunda ordem (Figura 4), que pode ser utilizado para simular o aquecimento gerado da estrutura do IGBT e função da potência dissipada (Figuras 5 e 6).

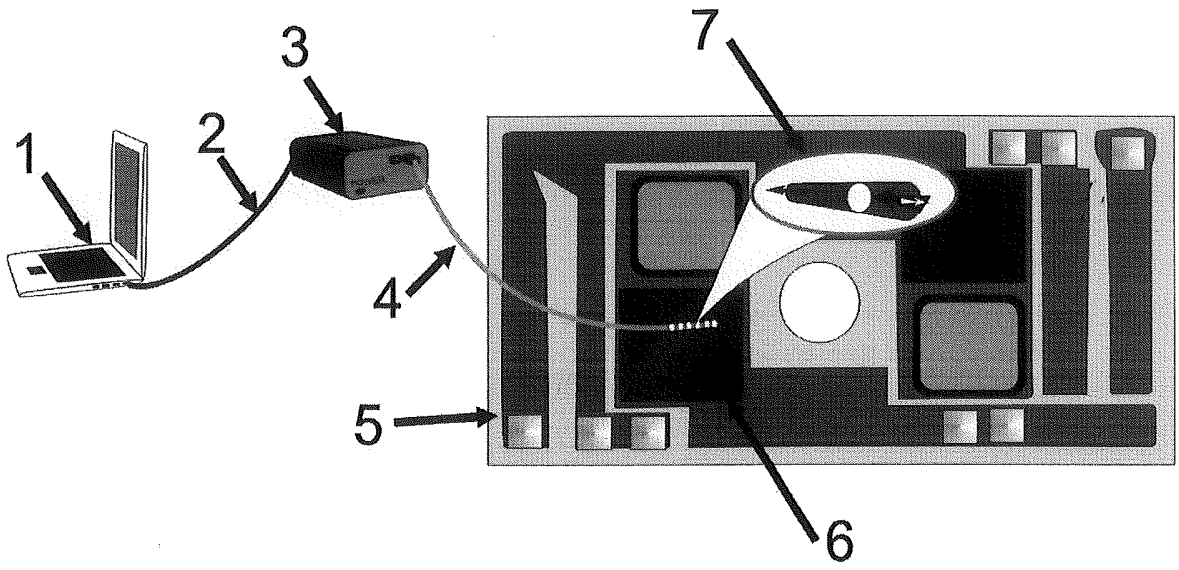


Fig. 1

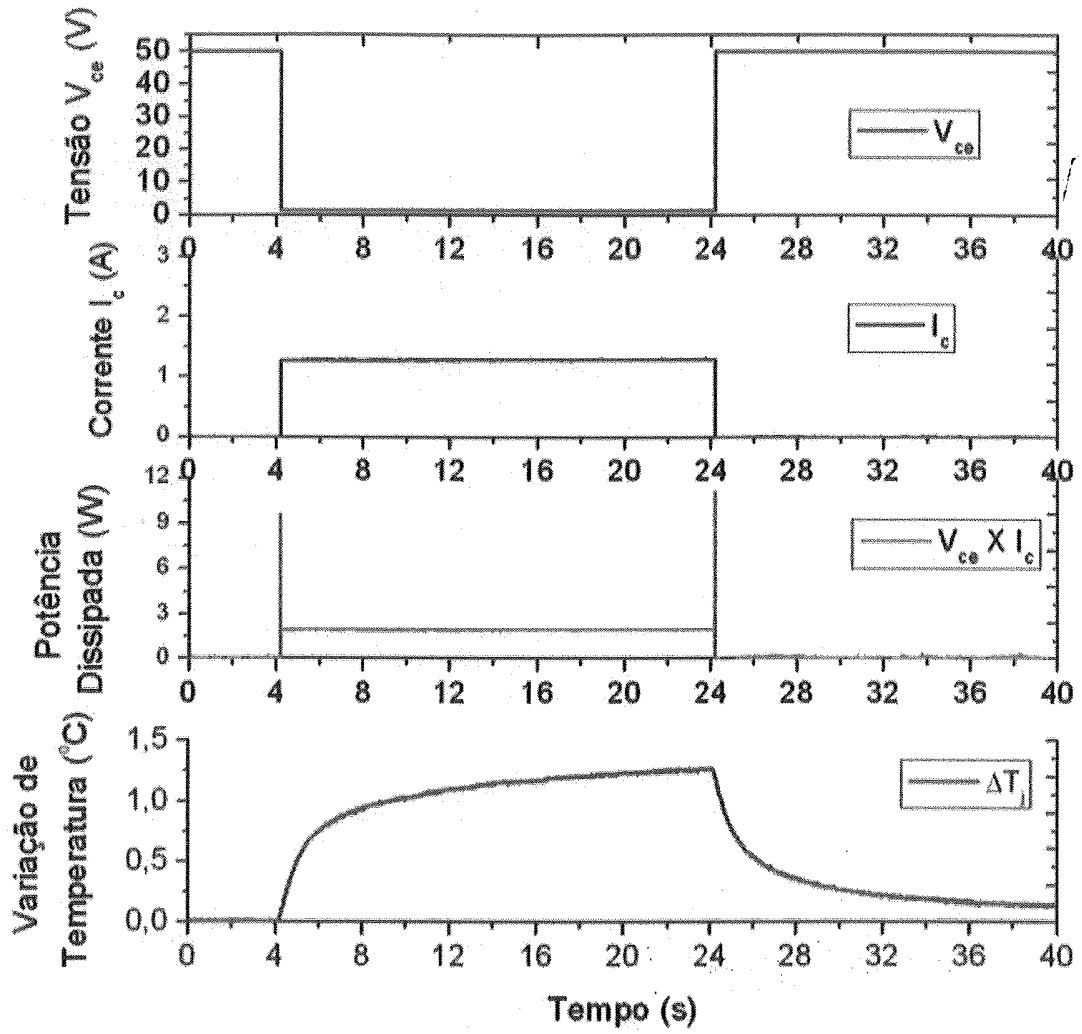


Fig. 2

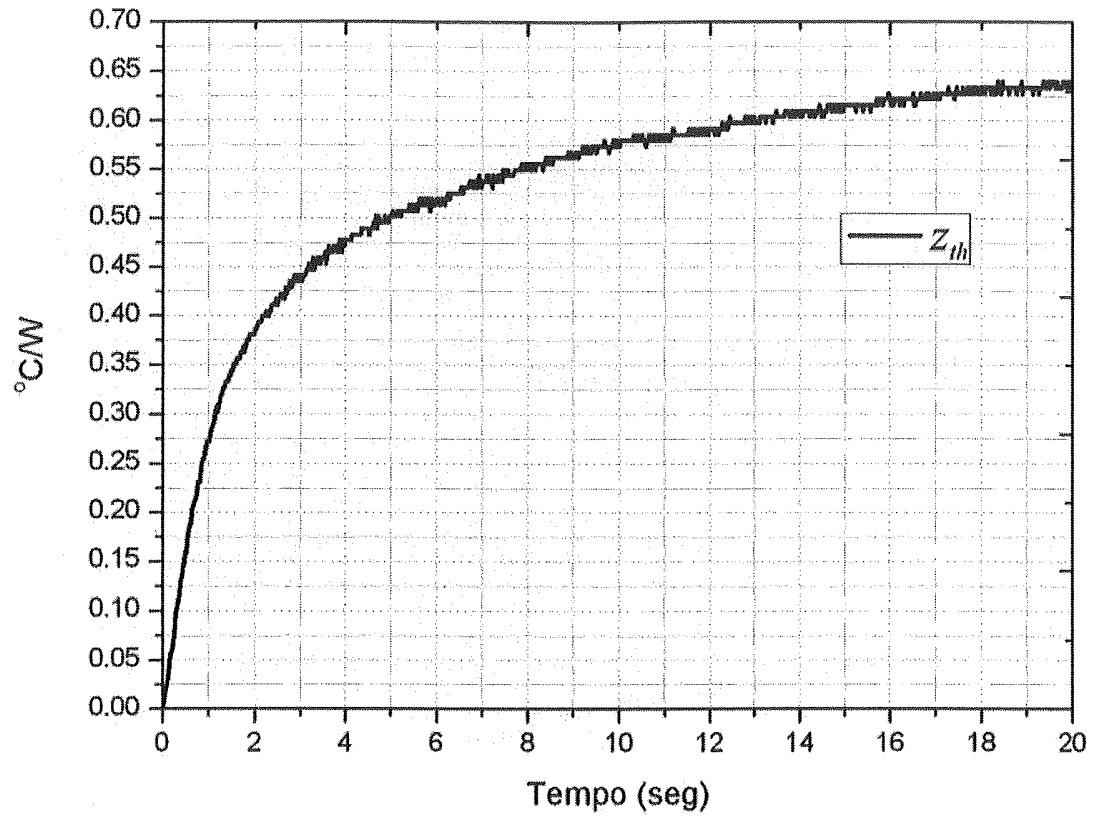


Fig. 3

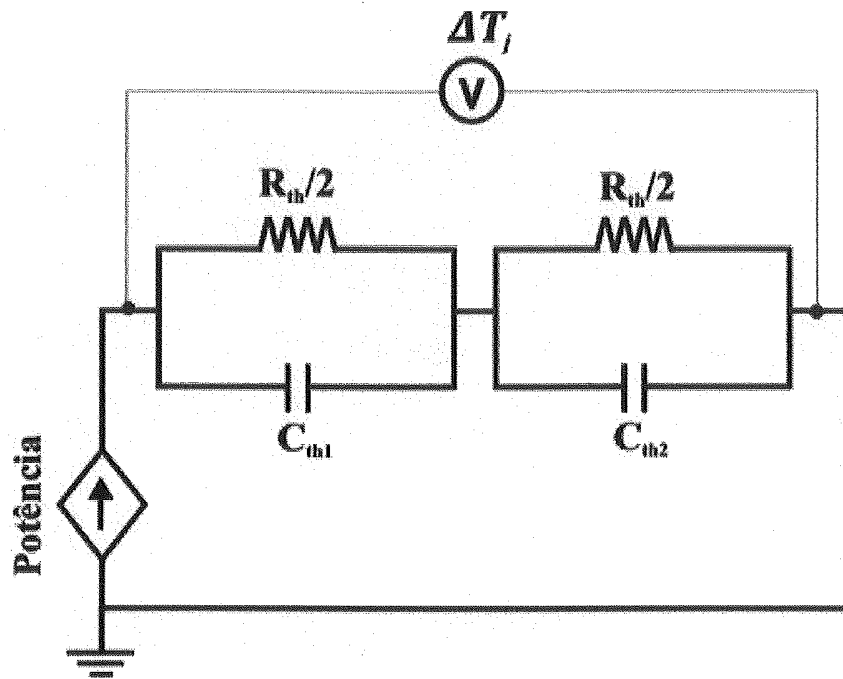


Fig. 4

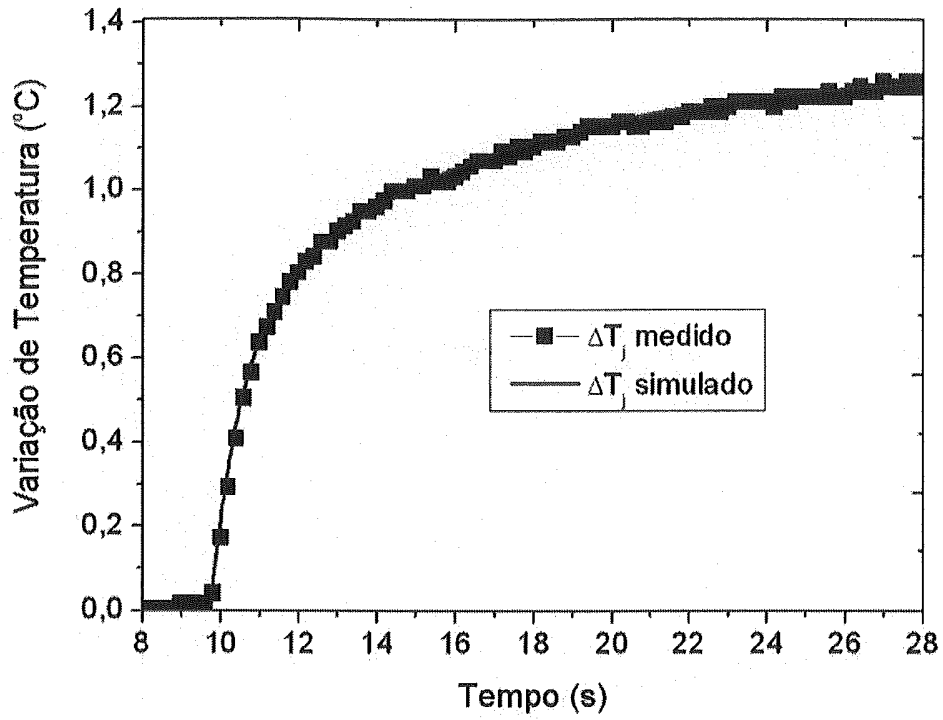


Fig. 5

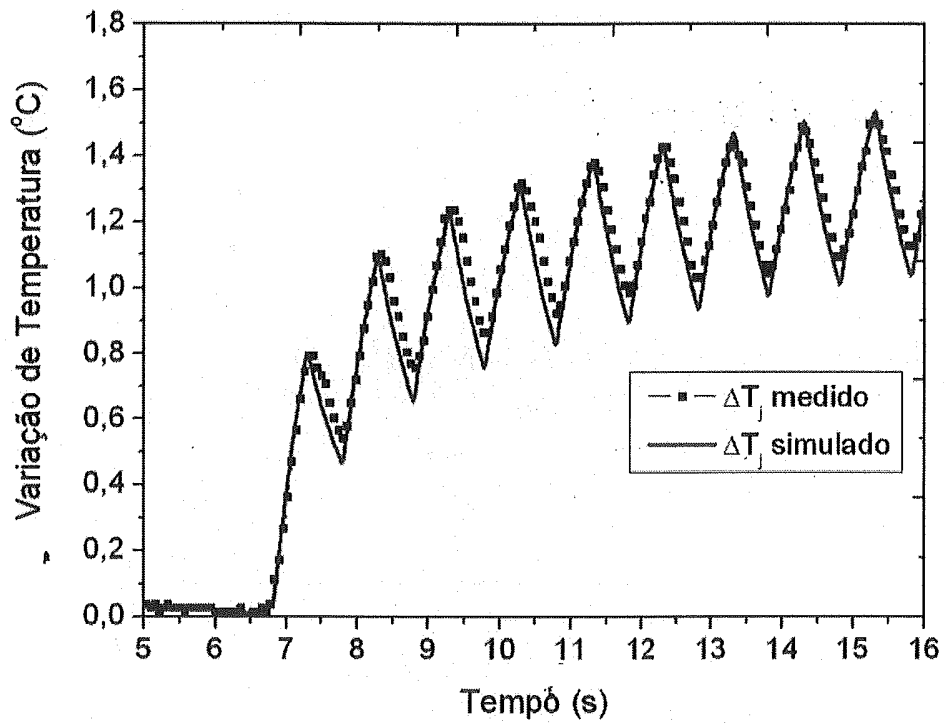


Fig. 6

RESUMO

Patente de invenção: **“MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DE JUNÇÃO DE DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES ATRAVÉS DE MEDIDA DIRETA, EMPREGANDO REDE BRAGG EM FIBRA ÓTICA”**.

5 Este invento refere-se a um novo método para monitorar a temperatura de junção de dispositivos semicondutores através de medida direta. O sistema permite medir a temperatura de junção do semicondutor em operação, através de um sensor ótico instalado no interior do dispositivo, em contato direto com a pastilha semicondutora. O princípio de funcionamento do sistema consiste no
10 emprego de uma rede Bragg em fibra ótica como sensor de temperatura. Algumas características de sensor, como tamanho reduzido, baixo tempo de resposta e imunidade eletromagnética, favorecem a sua utilização para esta aplicação. Essas características permitem realizar medidas confiáveis mesmo no ambiente ruidoso e limitado em espaço no interior do dispositivo. Os
15 resultados obtidos contribuem para identificação dos parâmetros térmicos do dispositivo, facilitando a elaboração de modelos térmicos confiáveis para simulação computacional do aquecimento da temperatura de junção.

O sistema é composto por um computador equipado com software para aquisição das medidas em tempo real (1), comunicação TCP/IP (2) entre o
20 computador e um interrogador ótico (3) utilizado para interpretar as medidas do sensor ótico (7), uma fibra ótica (4) com uma rede de Bragg gravada (7), um módulo IGBT (5) com acesso para instalação do sensor sobre a pastilha semicondutora que forma o IGBT (6).