

FERRAMENTA PARA TESTE DE CIRCUITOS VLSI UTILIZANDO UM MICROSCOPIO ELETRÔNICO

C. ORELLANA HURTADO*

SUMARIO

Este trabalho apresenta a princípio de funcionamento, descrição, principais técnicas de medida e aplicações de uma ferramenta de testes de circuitos VLSI usando um microscópio eletrônico de varredura aliado ao fenômeno do contraste por tensão. Esta ferramenta nos permite fazer uma análise pictográfica das imagens contrastadas correspondentes aos níveis de tensão na superfície do circuito. Também, podemos usar o feixe eletrônico como uma ponteira para medida de sinais internos de alta frequência. Finalmente são apresentados resultados experimentais de testes de circuitos efetuados no Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação da UFRGS.

ABSTRACT

This paper presents the functioning principle, description, measurement techniques and applications of a VLSI circuits testing tool using a scanning electron microscope (SEM). This tool is based in the effect of voltage contrast. It allows pictorial analysis of the images contrast. Electron beam, can be used the measurement of high frequency signals in internal voltages nodes. Finally, some I.C. tests made at the Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação of the UFRGS are described.

* Engenheiro Eletrônico (UFRGS, 1982); aluno do Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Caixa Postal 1501 - 90.000 - Porto Alegre - RS - Brasil.

O crescente aumento do grau de integração de circuitos VLSI, assim como o aprimoramento de novas tecnologias visando aumentar a velocidade de propagação dos sinais e diminuição da potência consumida, faz-se necessário o desenvolvimento de equipamentos de teste mais versáteis e eficientes do que as ponteiros mecânicas. Na fase de desenvolvimento de um circuito integrado, medidas de sinais internos são sempre necessárias. É prática comum a introdução de ponteiros mecânicos, que em contato com as linhas metálicas, permitem obter em um osciloscópio as formas de onda dos sinais correspondentes.

O uso de ponteiros mecânicos nos traz um problema aparente: o risco de danificar o circuito. Mas, a principal limitação no uso destas ponteiros é a capacitância parasita inserida pela mesma. Esta capacitância pode introduzir erros na medida ou, ainda pior, pode causar o mau funcionamento do circuito. A tendência, como já mencionamos, do aumento dos fatores de integração (lei de Moore) nos permite conceber circuitos mais complexos tanto na sua estrutura como no seu funcionamento, tornando-se absolutamente necessária a medida das formas de onda dos sinais internos ao Circuito. Também, como consequência desta maior integração, teremos a diminuição das dimensões geométricas dos elementos e portanto, a diminuição das capacitâncias dos nodos internos. Isto torna mais evidente a limitação do uso das ponteiros mecânica-, no que tange ao seu posicionamento e a influência da capacitância parasita nas medidas.

O uso do SEM (scanning electron microscope) como ferramenta de testes, além de se apresentar como uma alternativa ao uso das ponteiros, nos permite a visualização dos níveis de tensão na superfície do circuito. Isto é, podemos fazer uma análise pictográfica através das imagens contrastadas da superfície. As principais vantagens da ferramenta SEM em relação as ponteiros mecânicas são:

- O feixe de elétrons pode ser posicionado precisamente sobre qualquer ponto da superfície, permitindo retirar sinais de elementos tais como: trilhas, transistores, contato, etc...
- O teste com o feixe é não destrutivo. A baixa energia de aceleração dos elétrons e a pequena corrente do feixe 10nA /ORE 84/ não causam danos de radiação. Não existe a chance de danos mecânicos.
- Rápido posicionamento do feixe. O posicionamento das ponteiros requer muito cuidado e é lento.
- A baixa capacitância apresentada pelo feixe 10E-17F /LUK 82/ nos permite a medida de sinais variando em alta frequência e não afeta o funcionamento

namento normal do circuito.

- Permite a medida de vários sinais em paralelo.

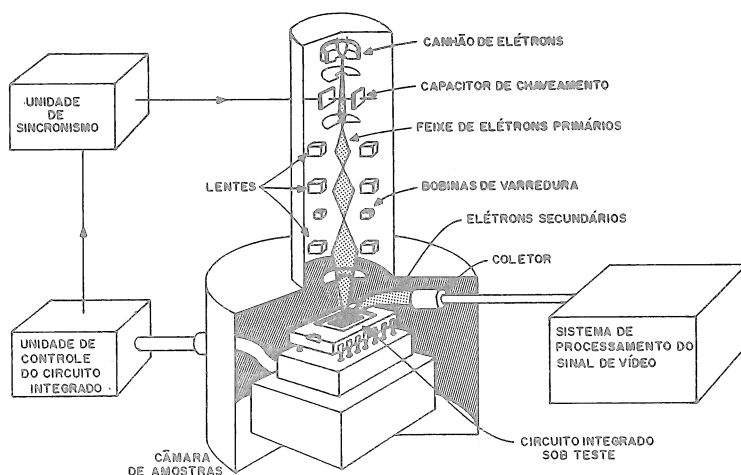


Fig. 1 - Ferramenta

2. FERRAMENTA

A configuração básica da ferramenta é um microscópio eletrônico de varredura (SEM). Podemos imaginar o sistema de observação do microscópio como sendo um circuito fechado de TV para observação da topografia de amostras. Desta forma, podemos visualizar a imagem da superfície da amostra no terminal de vídeo do equipamento. As partes que compõem o sistema de observação são: o sistema de varredura de feixe eletrônico e coletor, a câmara de amostras (estado de vácuo), a unidade de sincronismo e o sistema de vídeo. Através de chaves manuais no painel podemos controlar cada uma destas partes. O feixe é gerado no filamento e acelerado pelo canhão de elétrons. Depois de passar por estágios de condensação e alinhamento, o feixe é direcionado pelas bobinas de varredura de forma a varrer uma área retangular da amostra linha por linha; a frequência de varredura é determinada por uma base de tempo previamente escolhida. A superfí-

cie atingida pelo feixe emite elétrons secundários, estes são detectados por um coletor de elétrons. O coletor esta opticamente acoplado a um fotomultiplicador, cuja saída está ligada a um estágio amplificador por onde o sinal passa antes de entrar no sistema de vídeo, onde o mesmo modula a grade de brilho do vídeo, obtendo assim, a imagem da amostra. O microscópio também pode funcionar no modo ponto, quando temos o feixe eletrônico livre do sistema de varredura, podendo posicioná-lo através de chaves manuais X e Y. As principais modificações para adaptar um microscópio a nossas aplicações são:

- Suporte de amostras adequado a colocação de um chip em funcionamento
- Atuação no feixe eletrônico para o chaveamento do mesmo
- Atuação no sistema de varredura para automatização do posicionamento do feixe.

Na figura 1 vemos a configuração completa da ferramenta. O teste de um CI inicia com a colocação do mesmo dentro da câmara de amostras, excitação das entradas a partir do bloco de controle, e posterior retirada de informação (imagem ou sinal) via feixe eletrônico.

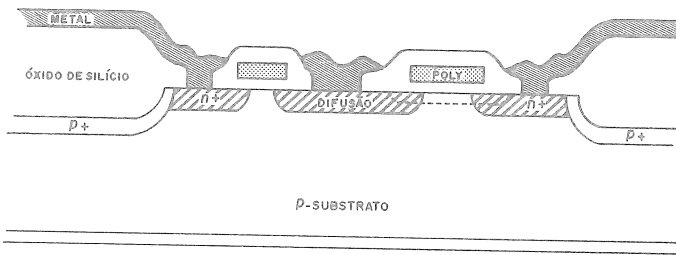


Fig. 2 - Vista de perfil de um inversor NMOS

3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Dentro da câmara do microscópio eletrônico a superfície da amostra em observação é varrida pelo feixe de elétrons primários altamente energizados. A colisão destes com a superfície gera a emissão de elétrons secundários. Estes elétrons emitidos (secundários) são altamente sensíveis a campos eletrostáticos e são quase que totalmente coletados pelo campo formado ao redor do coletor. Cada ponto da imagem é proporcional ao número de elétrons secundários emitidos por cada ponto varrido pelo feixe. Os

contrastes das imagens mostram basicamente características da topografia da superfície. Na observação normal de uma amostra, a carga da superfície devido a chuva de elétrons, ocasiona a perda dos contrastes da imagem. Evita-se o problema com a deposição de uma camada fina de alumínio, de tal forma a podermos ligar a superfície a tensão mais positiva do sistema. Assim, para efeitos de análise da topografia, os contrastes observados nas imagens devem-se principalmente aos relevos da amostra. Para uma distribuição de diversas tensões na superfície, observamos imagens contrastadas segundo esta mesma distribuição: estamos então, diante da ocorrência do fenômeno do CONTRASTE POR TENSÃO.

O princípio deste fenômeno está na formação de pequenos campos elétricos ao redor das regiões polarizadas. Estes campos sobrepõem-se ao campo gerado pelo coletor (+250V) anulando seu efeito. Desta forma, os elétrons emitidos de regiões polarizadas com tensões diferentes da massa são submetidos a ação destes pequenos, mas atuantes campos elétricos, ocasionando um retardo dos elétrons até o coletor. Os elétrons emitidos de regiões da superfície ligados a massa são quase que totalmente coletados. Assim, como dissemos anteriormente, o sinal obtido na saída do amplificador de vídeo é proporcional ao número de elétrons coletados de cada ponto da superfície e portanto, ao nível de tensão destes pontos.

A topografia de um circuito integrado é composto por elementos tais como: interconexões, contatos, resistores, capacitores, transistores, etc ... Estes elementos são formados por diversas camadas de semicondutor, isolante e metal, como vemos na figura 2. A distribuição de tensões na superfície de um circuito integrado MOS digital é caracterizado pela existência de dois níveis referenciais de tensão 0V e 5V correspondendo aos níveis lógicos "0" e "1". A figura 3 mostra as linhas equipotenciais formados segundo a distribuição de tensões e a geometria do circuito. Os elétrons secundários emitidos das trilhas em 0V, deparam-se com um campo extrator através do qual chegam rapidamente ao coletor; já que os elétrons emitidos das trilhas em 5V passam por um campo de retardo antes de chegarem ao coletor ou são forçados a ficarem ao redor da trilha. Deste modo, obtemos um sinal proporcional que gera uma imagem contrastada no vídeo, com partes claras e escuras correspondendo aos níveis de tensão 0V e 5V respectivamente. As tensões entre 0V e 5V correspondem a partes cinzas de intensidade proporcional ao valor da tensão nesta região do circuito.

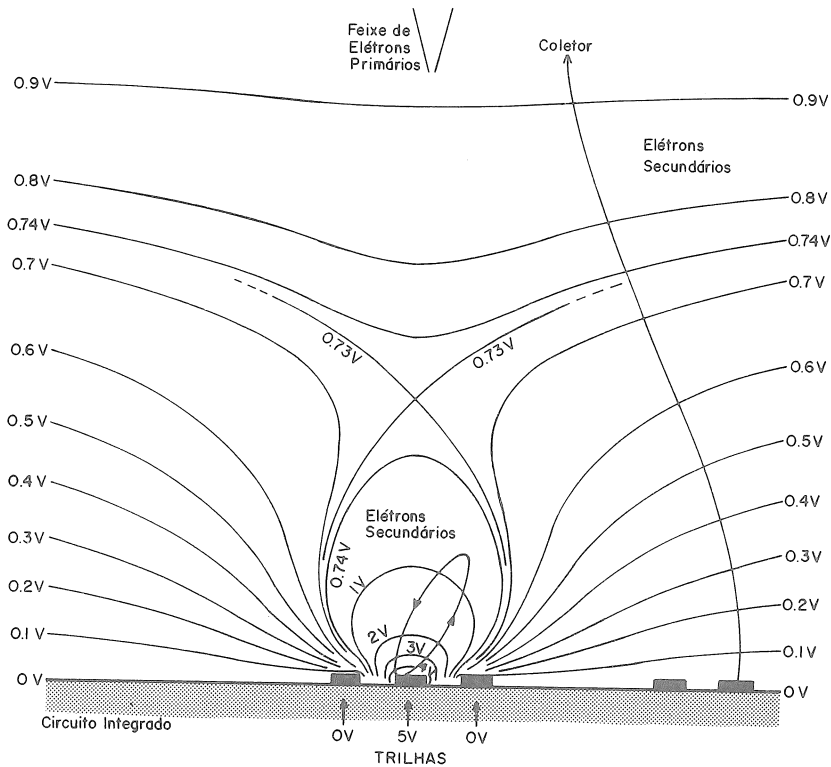


Fig. 3 - Linhas equipotenciais ao redor do circuito /FAZ 81/

4. FORMAS DE ANÁLISE E OBSERVAÇÃO

Há duas formas de análise e observação de CI's: estática e dinâmica. A análise estática realiza-se considerando uma situação estável dos estados de tensão do circuito em funcionamento. A obtenção de informações sobre os níveis de tensão na superfície é feita usando técnicas de medida que utilizam o feixe eletrônico contínuo. A varredura ao longo da superfície, ou posicionamento em um ponto do circuito, nos permite obter informações na forma de imagens contrastadas ou medidas quantitativas respectivamente. A análise e observação dos resultados nos permitem concluir sobre a correta polarização do circuito, linhas interrompidas ou em curto, identificação de elementos, identificação de caminhos de propagação de sinais.

A análise dinâmica realiza-se sob sinais dinâmicos do circuito em funcionamento. Desta forma podemos estudar circuitos funcionando na sua frequência de operação normal. As técnicas aplicadas para obtenção de informações utilizam o feixe eletrônico chaveado. A varredura ou posicionamento do feixe na superfície possibilitam obter informações na forma de imagens ou formas de onda. A análise e observação destes resultados nos permite concluir sobre o diagrama de tempos, obtenção de diagramas de estado, retardos e transição de sinais.

5. CHAVEAMENTO DO FEIXE

O chaveamento do feixe eletrônico é realizado com a mesma frequência de operação do circuito em teste ou múltiplo desta, o mesmo nos permite a análise e medida de sinais variando em alta frequência 1GHZ /HOS 78/. A implementação do chaveamento é feito através de um capacitor de placas como na figura 1 ou pelo canhão de elétrons /LUK 82/. Na figura 4 mostramos um sinal periódico sendo amostrado pelo feixe na transição, assim, através de sucessivas amostragens obtemos um sinal proporcional com a informação desta transição. A informação pode-se mostrar na forma de imagens ou formas de ondas, segundo a técnica de medida usada.

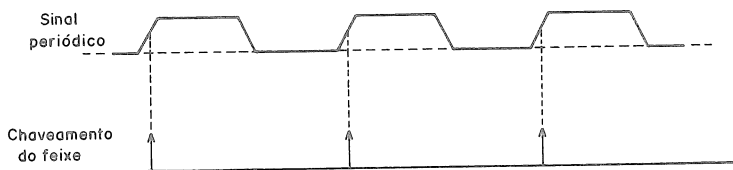


Fig. 4 - Chaveamento do feixe

6. TÉCNICAS DE MEDIDA

6.1 Contraste por Tensão Estática - RECORD

Esta é uma técnica simples e fácil de realizar. Aplica-se tensões DC nas entradas do circuito, estas resultam em uma distribuição interna de tensões e finalmente obtemos uma fotografia da superfície do circuito contendo os contrastes por tensão. A mesma é obtida através de uma câmera fotográfica acoplada ao sistema de vídeo do microscópio eletrônico. Na figura 5 podemos ver a fotografia da superfície de um circuito MOS com os

contrastes por tensão no metal, partes escuras indicando tensão 5V e partes claras 0V. O tempo de exposição ao feixe eletrônico é de 5s a 100s, tempo durante o qual o feixe varre a superfície do circuito linha por linha até completar um quadro. Através desta técnica a carga rápida da camada de óxido é evitada e consequentemente as fotografias obtidas mostram os contrastes por tensão característicos.

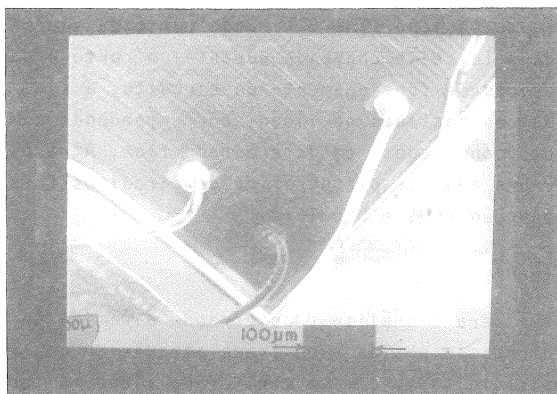


Fig. 5 - Contraste por tensão do C8748 (LAMM-UFRGS)

6.2. Contrastes por Tensão Estática - TV

Esta técnica nos permite obter no vídeo uma imagem com os contrastes característicos correspondendo a distribuição de tensões na superfície do circuito. A polarização da superfície do circuito é feita pela aplicação de tensões DC nas suas entradas. Também podemos aplicar sinais periódicos de baixa frequência ($<1\text{Hz}$), para possibilitar o acompanhamento visual da mudança de contrastes, assim, poderemos ver a imagem da superfície com os contrastes fixos caracterizando tensões estáticas e mudança destes contrastes nas regiões onde existirem sinais variáveis. A imagem contrastada obtida no vídeo é como na figura 5. O problema enfrentado quando da aplicação desta técnica é a perda rápida dos contrastes da imagem, isto devido a carga da camada de óxido do circuito (overglass). A varredura constante do feixe carrega a camada de óxido. Para evitar este problema procura-se um balanceamento da corrente do feixe. O balanceamento é obtido pela escolha de uma aceleração de tensão ótima /WOL 79/, ou também, pela retirada da camada de óxido. A técnica pode-se aplicar em circuitos MOS e bipolar. Um circuito integrado MOS RAM não poderia ser analisado com esta técnica pois a frequência mínima de operação do cir-

6.3 Técnica Estroboscópica

Esta técnica permite a análise e medida de sinais internos de alta frequência. Nesta técnica o chaveamento do feixe é realizado em sincronismo com a frequência de funcionamento do circuito. Para entender o princípio estroboscópico, podemos imaginar, por exemplo, uma haste girando com um período T , ao mesmo tempo uma luz piscando com o mesmo período ou T/n (n sendo inteiro), então observaremos a figura da haste não em movimento e sim fixa em alguma posição /SMI 81/. Cada ponto da superfície do circuito é amostrada pelo feixe chaveado durante um curto espaço de tempo em relação ao período de funcionamento do circuito, assim, teremos a formação das imagens contrastadas no vídeo, correspondendo a distribuição de sinais periódicos "congelados" em determinada fase. Através desta técnica podemos fazer uma análise pictográfica de circuitos funcionando na sua frequência de operação (MOS e bipolar).

6.4 Voltage CODING

Esta técnica serve para a análise e observação dinâmica de CI's em funcionamento. A informação obtida é mostrada através de uma representação gráfica dos sinais digitais, com um monitor de vídeo. A técnica baseia-se na varredura do feixe chaveado ao longo de uma linha na direção Y do circuito, ao mesmo tempo, o sinal de vídeo correspondente a esta linha é distribuída na tela do vídeo em ambas as direções, obtemos assim, um gráfico dos sinais nas trilhas varridas pelo feixe, como na figura 6. A sequência de barras escuras e claras representa uma sequência de níveis lógicos variando ao longo do tempo na respectiva trilha, desta forma, podemos observar o estado lógico de um conjunto de trilhas. Exemplo, podemos observar os gráficos dos sinais em um barramento de dados ou endereços de um processador. O chaveamento do feixe é realizado em sincronismo com a frequência de funcionamento do circuito. A varredura do feixe ao longo do eixo Y do circuito pode ser realizado em qualquer frequência.

6.5 Técnica de Amostragem

Esta técnica permite a análise e observação de sinais digitais de alta frequência $> 10\text{MHz}$. Estes sinais não poderiam ser medidos por equipamentos tradicionais de medida devido a sua limitada largura de banda e a problemas causados pelas capacitâncias parasitas dos cabos. A técnica consiste na amostragem do sinal usando o feixe eletrônico. Conseguimos isto

através do chaveamento do feixe em uma frequência que é múltipla de frequência de operação do circuito. Desta forma, o sinal de um ponto qualquer do circuito é amostrado em fases diferentes, obtendo-se em cada amostragem o nível de tensão associado, que servirá para reconstruir a forma de onda deste sinal, como mostramos na figura 7. A frequência do sinal reconstruído é n vezes menor (n valor inteiro entre 100 e 1000) /LUK 82/, possibilitando a análise do sinal por equipamentos cuja largura de banda é limitada. Para aplicação desta técnica é necessário a retirada da camada de óxido do circuito, de forma a usar uma corrente e aceleração de elétrons mínima. Existe a possibilidade de realizar a medida de sinais em pontos cobertos pela camada de óxido. Para isto aplica-se tensões de aceleração de elétrons da ordem de 10KV de forma a criar um canal de condutividade na camada de óxido (isolante) e assim retirar a informação do ponto /PEN 49/.

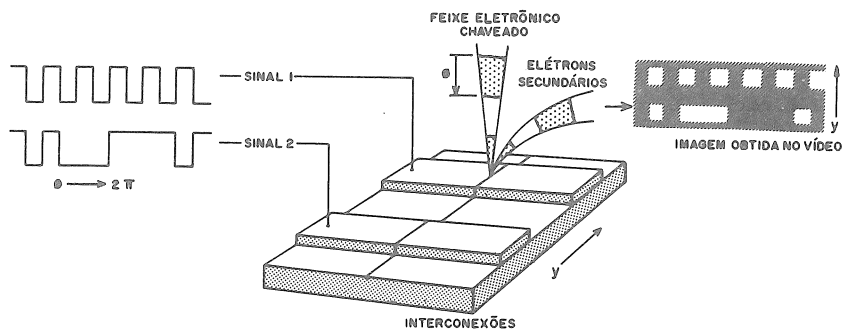


Fig. 6 - Voltage coding /FAZ 81/

6.6 Técnica MULTICANAL

Esta técnica nos permite a análise e medida de sinais periódicos em vários pontos do circuito ao mesmo tempo. O feixe de elétrons chaveado é posicionado em vários pontos sequencialmente, retirando de cada um a informação do sinal neste ponto, o sinal composto obtido na saída do amplificador do SEM é injetado em um analisador lógico, onde poderemos observar o timing de vários sinais como na figura 8. O número máximo de sinais a ser medidos ao mesmo tempo é determinado pelo número de canais do analisador lógico. Esta mesma análise, se fosse feita através de ponteiras mecânicas, além de nos trazer riscos de dano mecânico e problemas de capacitâncias parasitas, precisaríamos de várias ponteiras.

7. APLICAÇÕES

7.1 Caracterização de Materiais

O SEM nos permite o estudo das características físico-químicas de semicondutores utilizados na fabricação de CI's. O feixe eletrônico induz correntes nos materiais atingidos. A análise destas correntes permitem concluir sobre os parâmetros físicos dos materiais.

7.2 Depuração de Protótipos

A visualização dos contrastes por tensão nas imagens nos possibilitam formas de depuração nunca antes imaginados, através das imagens podem detectar defeitos do processo de fabricação, bem como erros de projeto e serve também para controle de qualidade de circuitos. A inspeção pode ser realizado visual ou automaticamente, o processo automático se realiza através de processamento de imagens. Nas fig. 10 a 15 - vemos uma sequência de fotografias mostrando a descoberta e localização de um defeito devido a erro de projeto, o circuito testado foi uma pastilha contendo estruturas para análise de tecnologia, a estrutura oscilador em anel (cadeia de inversores) não funciona. A figura 9 mostra a topografia da estrutura sem polarização, na figura 10 observamos a estrutura com as linhas de alimentação polarizadas e a cadeia de inversores como uma sequência de pontos claros e escuros indicando estado lógico "0" e "1" respectivamente, esta sequência é interrompida na oitava linha (descoberta), através de sucessivas ampliações observamos que o problema é um transistor defeituoso (localização). Retirando a polarização da estrutura podemos ver na figura 14 o transistor defeituoso em detalhe e na figura 15 um transistor em bom estado. As fotografias foram obtidas no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálise (LAMM-UFRGS).

7.3. Análise de Falhas

A observabilidade do teste via SEM é muito bom, assim, a detecção de falhas, geração de padrões de falhas, obtenção de dicionário de falhas é realizado dispondo dos inúmeros pontos internos do circuito aos quais temos acesso.

7.4 Engenharia Reversa

A obtenção de esquemas elétricos de circuitos desconhecidos é muito importante para compreensão do seu funcionamento. Pode ser realizado manualmente pela observação das imagens do circuito ou automaticamente através de um sistema extrator de circuitos.

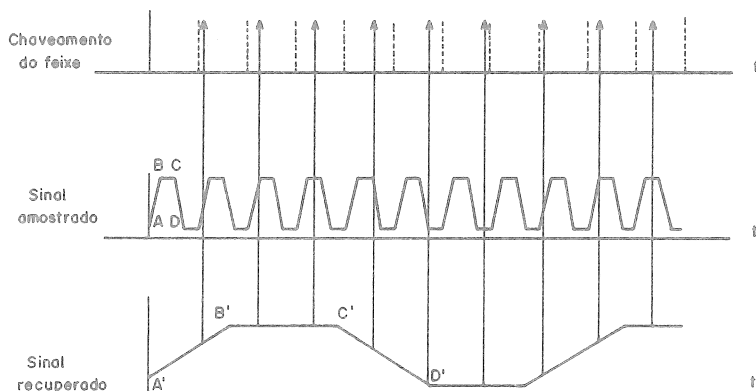


Fig. 7 - Amostragem do sinal

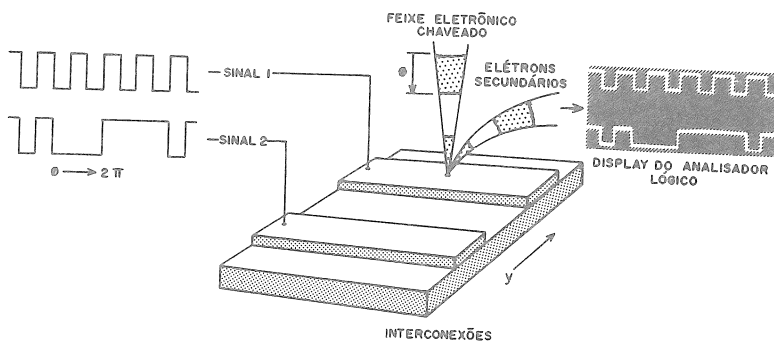


Fig. 8 - Multicanal /FAZ 81/

8. CONCLUSÃO

A definição desta ferramenta foi realizada como parte dos estudos preliminares para implementação da mesma. A implementação de uma ferramenta de testes usando o microscópio está sendo levada a cabo pelo Grupo de Microeletrônica do PGCC - UFRGS; como parte das primeiras experiências foram feitos testes em diversos circuitos e alguns são apresentados neste artigo. A chamada dos primeiros chips concebidos pelo grupo marcará o início da etapa de testes e depuração dos protótipos: a ferramenta SEM nos capacitará para tais empreendimentos.

9. AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Altamiro Amadeu Suzim (PGCC-UFRGS) pela idéia inicial do trabalho e orientação no decorrer deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Ricardo Reis (PGCC-UFRGS) pelas críticas, sugestões e fornecimento de material bibliográfico.

Ao Prof. Tiaraju Wagner (PGCC-UFRGS) pelas discussões e ajuda na implementação.

Ao Prof. Dr. Francisco Kiss (Departamento de Metalurgia-UFRGS) pelas facilidades concedidas na utilização dos recursos e sugestões.

Ao Sr. Sérgio Zin (Departamento de Metalurgia-UFRGS) pelos ensinamentos da área de microanálise.

Ao Prof. P. Jespers (Louvain-La Neuve, Bélgica) pelo fornecimento de pastilha de teste.

Ao pessoal da equipe de Arquitetura de Computadores do Laboratório TIM 3 (techniques de l'Informatique, des Mathématiques, de la Microélectronique et de la Microscopie quantitative) do Instituto IMAG-França pela bibliografia fornecida.

10. BIBLIOGRAFIA

- /BAI 82a/ BAILLE, G. & LAURENT, J. Présentation d'un outil d'aide à la mise au point de circuits intégrés VLSI prototypes. Imag réport, Grenoble, Mars, 1982.
- /BAI 82b/ BAILLE, G. et alii. Analyse de défaillances de VLSI par microscopie électronique. Imag réport, Grenoble, Juin 1982.
- /BER 83/ BERGER-SABBATEL, G. & COURTOIS, B. E-beam testing strategies for VLSI. Imag report, Grenoble, Mai 1983.
- /COU 82/ COURTOIS, B. Debugging VLSI using SEM. Imag report Grenoble, Sep. 1982.

- /FAZ 81/ FAZEKAS, Peter et alii. Scanning electron beam probes VLSI chips. Electronics, New York, 54(14):105-12, July 14, 1981.
- /FEU 78/ FEURBAUM, H. Quantitative Measurement with High Time Resolution of Internal Wave forms on MOS RAM's Using a Modified Scanning Electron Microscope. IEEE Journal of Solid - State Circuit, New York, 13(3):319-25, June, 1978.
- /GOL 77/ GOLDSTEIN, J.I. et alii. Practical Scanning Electron Microscopy. Plenum Press, New York, 1977.
- /GON 78/ GONZALES, A.J. & POWELL, M.W. Resolution of MOS one-transistor, dynamic RAM bit failure using SEM atroboscopic techniques. Journal Vacuum Science Technology, 15(3):1043-6, May/Jun. 1978.
- /HOS 78/ HOSOKAWA, T. et alii. Gigahertz stroboscopy with the scanning electron microscope. Rev. Sci. Instrum., 49(9):1293-9, Sept. 1978.
- /LAU 83/ LAURENT, J. & COURTOIS, B. Définition et Utilisation d'un outil de tests de VLSI par faisceau d'électrons. Imag report, Grenoble, Mai 1983.
- /LUK 82/ LUKIANOFF, G.V. et alii. Electronics Beam Testing of VLSI Dynamic RAM's. Electronics Test, London, 5(6):46-56, Jun. 1982.
- /OAT 69/ OATLEY, C. W. Isolation of potencial contrast in the SEM. Journal Phys. E.: Sci. Instrum., London, 2:742-4, 1969.
- /ORE 84/ ORELLANA, C. Estudo preliminar de uma ferramenta de testes de CI's baseado no SEM. Porto Alegre, PGCC da UFRGS, 1984. (Trabalho individual).
- /PEN 49/ PENSACK, L. Conductivity induced by electron bombardment in thin insulation films. Phys. Rev., 75:472-8, 1949.
- /PLO 68/ PLOWS, G. S. & NIXON, W.C. Stroboscopic scanning electron microscopy. Journal of Scientific Instruments, London, 1(2):595-600, 1968.
- /SMI 81/ SMITH, K. Modified SEM depicts operation of dense chips. Electronics, New York, 54(13):73-4, June 30, 1981.
- /WOL 79/ WOLFGANG, E. et alii. Electron - Beam Testing of VLSI Circuits. IEEE Transactions on electron devices, New York, 26(4):549-59, April 1979.

Fig. 9 - Fotografia do oscilador sem alimentação mostrando as características topográficas (LAMM-UFRGS)

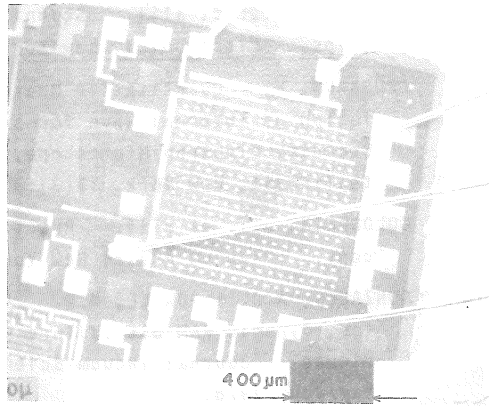


Fig. 10 - Fotografia do oscilador com alimentação mostrando o contraste por tensão nas linhas de alimentação (LAMM-UFRGS)

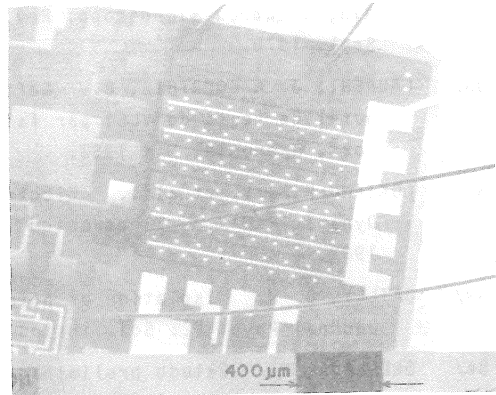


Fig. 11 - Fotografia do oscilador com alimentação mostrando a sequência de partes claras e escuras interrompida. (LAMM-UFRGS)

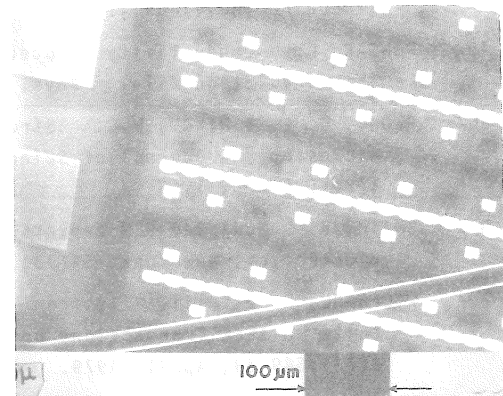


Fig. 12 - Fotografia do oscilador com alimentação mostrando o defeito (transistor defeituoso) (LAMM-UFRGS)

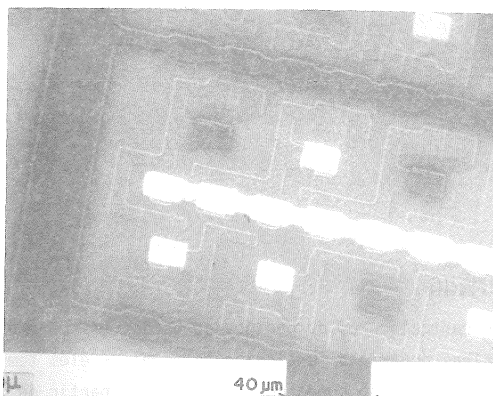


Fig. 13 - Fotografia do oscilador sem alimentação mostrando o transistor defeituoso (LAMM-UFRGS)

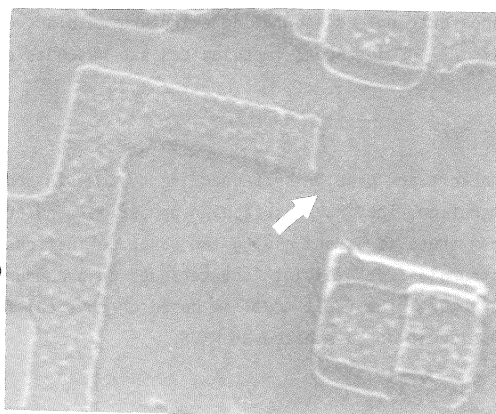


Fig. 14 - Fotografia do oscilar sem alimentação mostrando transistor em bom estado (LAMM-UFRGS)

