



Universidade Estadual de Campinas
Instituto de Física Gleb Wataghin

Iniciação Científica F 690
Relatório Final – 25/11/2005



Leonardo Castilho Couto RA: 024293

Prof. Responsável: Dr. José Joaquim Lunazzi
Orientadora: Prof. Mônica A. Cotta

RELATÓRIO FINAL DE ATIVIDADES:

**Propriedades elétricas em
nanofios semicondutores**

Bolsista: Leonardo Castilho Couto RA:024293

Orientadora: Profa. Mônica Alonso Cotta

**IFGW/UNICAMP
NOVEMBRO/2005**

1. INTRODUÇÃO

O uso de nanofios semicondutores e nanotubos de carbono na fabricação de dispositivos e circuitos podem abrir espaço para diversas aplicações na nanoeletrônica e fotônica [1]. Individualmente, nanofios de semicondutores já apresentaram características de transistores de efeito de campo (FET) [7], foto-detectores [2] e sensores bio/químicos [3]. Reunindo alguns nanofios é possível obter LEDs (light-emitting diodes) mais sofisticados [4]. Medidas de fotoluminescência, transporte elétrico e eletroluminescência em nanofios individuais mostram propriedades únicas desses nanofios para a fotônica e eletrônica, e sugerem um alto potencial de aplicações [10].

Mostraremos os primeiros resultados obtidos no processamento dos dispositivos baseados nos nanofios semicondutores, para medidas de transporte. Até agora, realizamos somente uma amostra teste como prova de princípio para os procedimentos escolhidos, realizados em colaboração estreita com o grupo de pesquisa do LME/LNLS. Foram feitas medidas corrente vs. tensão em dispositivos de dois terminais contendo um nanofio de InP não dopado. Os dispositivos foram processados em substratos de InP semi-isolante, conforme descrito a seguir. O processamento e medidas elétricas foram realizados com a infra-estrutura dos laboratórios do LPD/IFGW. Os resultados obtidos apontaram qual o melhor caminho a seguir com as próximas amostras.

2. METODOLOGIA PARA FABRICAÇÃO DO DISPOSITIVO:

A síntese de nanofios auto-sustentados baseia-se no conceito de crescimento por VLS (vapor-líquido-sólido) catalisado por nanopartículas metálicas (figura 1), desenvolvido há alguns anos [5]. Neste processo, uma nanopartícula serve como ponto de nucleação e adição de precursores para o nanofio em crescimento. Com isso torna-se possível o crescimento das estruturas, pois um catalisador comum a dois materiais

diferentes pode ser usado na obtenção de uma estrutura tipo super-rede num nanofio, através da modulação dos precursores durante o crescimento na câmara de crescimento do sistema CBE (*Chemical Beam Epitaxy*).

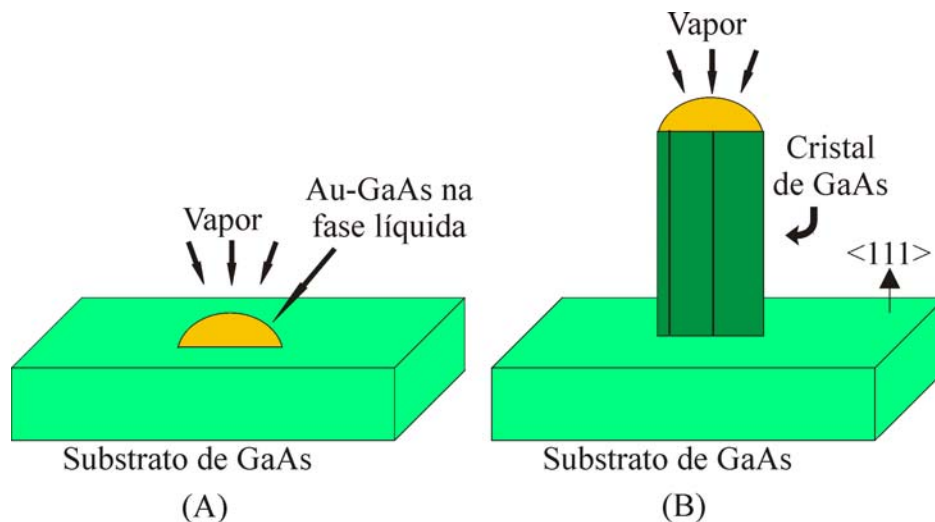


Figura 1: Esquema do mecanismo VLS. Em (A) uma camada de líquido em que o material cristalino é solúvel está situada entre o vapor e o cristal em crescimento. A superfície de líquido tem um grande coeficiente de acomodação e é, portanto, o sítio preferido para deposição. Em (B) o líquido torna-se supersaturado com o material fornecido pelo vapor, e o crescimento cristalino ocorre pela precipitação na interface sólido-líquido.

Nanofios semicondutores auto-sustentados têm sido utilizados para a construção de dispositivos em escala nanométrica [6-8]. Mais recentemente, a incorporação de múltiplas heteroestruturas nos nanofios foi obtida [9-11], aumentando assim as expectativas de aplicação dos nanofios a dispositivos eletrônicos unidimensionais, como já demonstrado no caso de diodos de tunelamento ressonante [12].

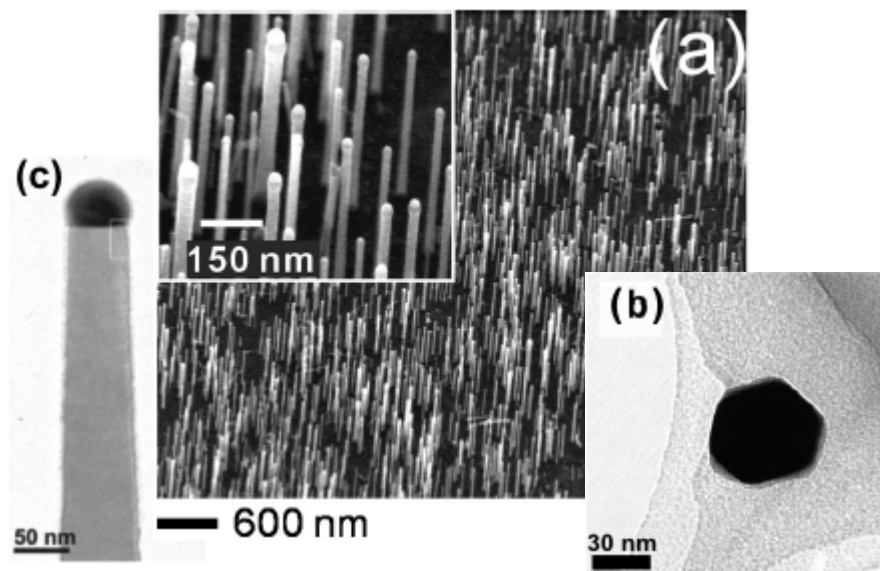


Figura 2: Imagens de microscopia eletrônica. Em (A) Amostra de fios de InP vista num ângulo de 45 graus. [13]. (B) Ponta de um nanofio de InAs $\langle 111 \rangle$ vista de cima, revelando claramente as faces laterais do nanofio [14]. (C) Imagem lateral de um nanofio de InP, mostrando uma partícula catalisadora de Au na ponta [15].

A primeira etapa do processo de fabricação do dispositivo consistiu na fotogração dos padrões para os contatos metálicos, utilizando uma máscara adaptada de outro projeto (Figura 3). A figura 4(a) esquematiza esta parte do processo, mostrando a região do resiste exposta à radiação ultra-violeta (UV). A Figura 4(b) ilustra a revelação do fotoresiste, que remove o material que não foi exposto ao UV. Nestas regiões será depositado o metal para formação do contato elétrico com o nanofio.

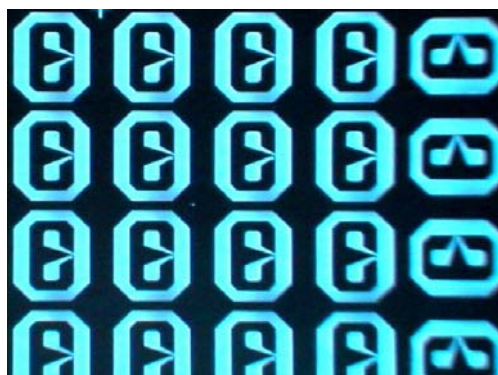


Figura 3: Imagem do microscópio ótico de parte da máscara de Ni utilizada para a fabricação dos contatos; a regiões em azul permitem a passagem dos raios UV.

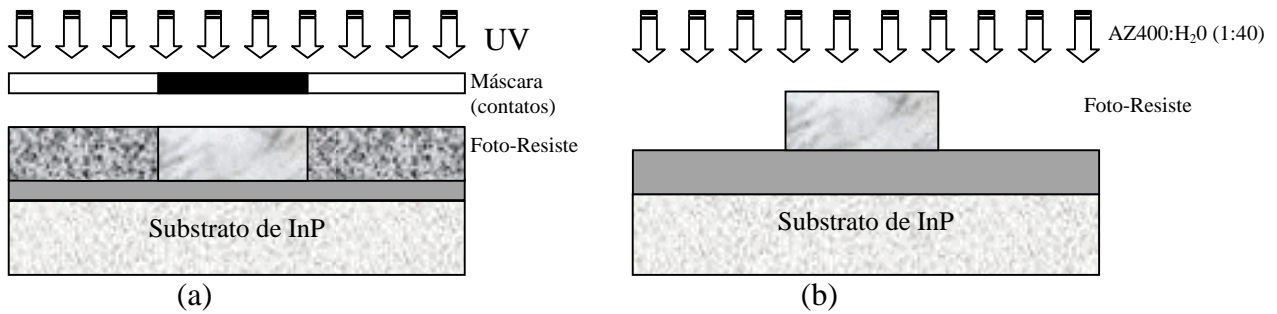


Figura 4: Início do processamento das amostras. (a) foto-gravação com a máscara. (b) revelação do foto-resiste sensibilizado. A região cinza na superfície do substrato ilustra a possível existência de uma camada de óxido depositada para agir como isolante; no caso desta amostra, porém, utilizamos o óxido nativo da superfície do substrato semi-isolante ($\rho \sim 10^7 \Omega.cm$) somente.

A metalização dos contatos elétricos foi feita por evaporação com feixe de elétrons, como esquematiza a Figura 5(a). Os metais utilizados foram Ni/Ge/Au (nesta ordem), totalizando uma espessura final de 1400Å. Para remover o metal depositado sobre o foto-resiste é utilizada acetona. Como a espessura do filme metálico é inferior à do foto-resiste, o solvente penetra por baixo do metal, que perde a sustentação e também é removido. Este processo está esquematizado na Figura 5(b).

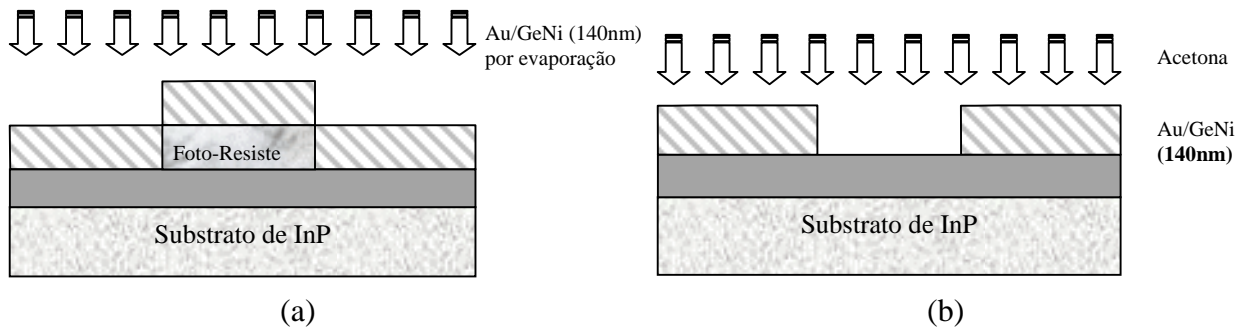


Figura 5: Final da primeira etapa do processamento da amostra. (a) evaporação convencional dos metais Au/NiGe. (b) remoção do foto-resiste restante e de parte do metal.

Após o término do processo podemos visualizar a amostra com o microscópio ótico, como mostra a Figura 6. Em nosso teste com os nanofios, somente utilizaremos dois dos *pads* metalizados para a colocação dos nanofios e obtenção da curva corrente vs.tensão.

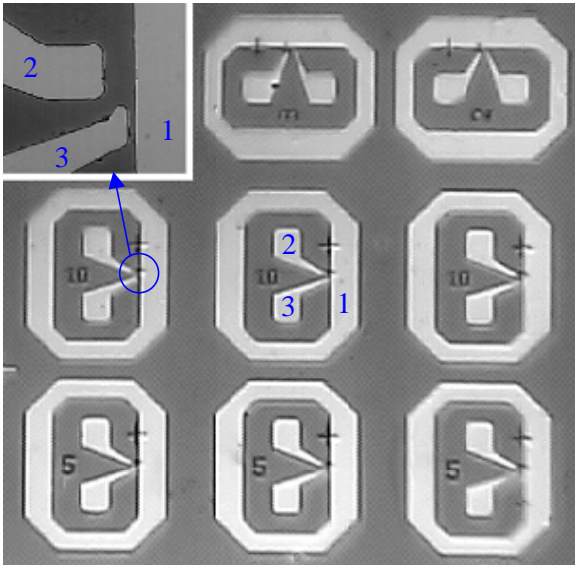


Figura 6: Imagem no microscópio ótico da amostra processada com a máscara da Figura III.1. Os contatos elétricos de Ni/Ge/Au (números 1, 2 e 3 em azul) são mais claros que a camada buffer de InP (fundo cinza). No *inset* a ampliação da região permite visualizar melhor como os três contatos estão dispostos. A distância perpendicular entre os contatos 1 e 2, utilizada para deposição do nanofio, é de $\sim 10\mu\text{m}$.

Depois desta etapa, a amostra foi então levada ao LME/LNLS para a colocação dos nanofios sobre os *pads* metálicos. Esta tarefa foi realizada com o nanomanipulador acoplado ao FEG-SEM, no LNLS, pela aluna de doutorado Denise B. Nakabayashi, sob supervisão de seu orientador, o Prof. Daniel Ugarte. A Figura 7 abaixo mostra as pontas de tungstênio posicionando um nanofio de InP sobre os contatos da amostra. Deste modo, foram fabricados 6 dispositivos com os nanofios de InP em diferentes regiões da amostra.

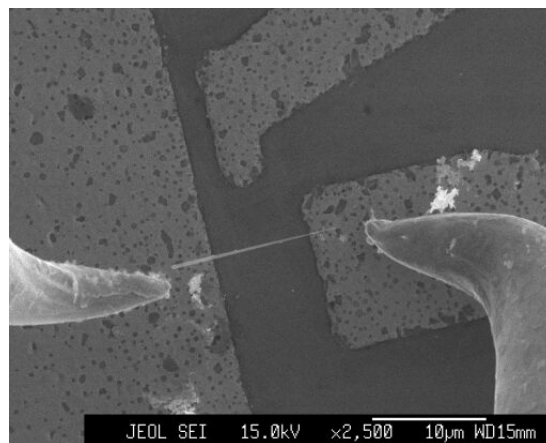


Fig. 7: Nanofio semiconductor sendo posicionado sobre a região dos contatos metálicos com o manipulador acoplado ao FEG-SEM no LME/LNLS. Podem também ser observadas as duas pontas de tungstênio utilizadas para a manipulação.

Novamente utilizando a infra-estrutura do IFGW/UNICAMP, realizamos a seguir nova etapa de fotogração, realinhando a máscara com os contatos já metalizados e eventualmente depositando cerca de 50nm da liga Au/Ge/Ni. Com isso, esperamos ‘enterrar’ a extremidade dos nanofios que se encontram sobre o contato metálico, preservando intacta a região do nanofio entre os *pads* metálicos. Deste modo, pretendemos não somente aumentar a probabilidade de formação de um bom contato ôhmico como também aumentar a adesão do nanofio à estrutura processada, melhorando a estabilidade do dispositivo.

3. TRATAMENTO TÉRMICO E MEDIDAS ELÉTRICAS

A Figura 8 mostra uma das regiões da amostra observada no microscópio ótico. Todos os 6 conjuntos de *pads* que continham nanofios foram fotografados para servir como referência, caso a amostra sofresse alguma alteração ao longo do processo de tratamento térmico. Este processo é necessário para a difusão de Ge e Ni, principalmente, na interface metal/semicondutor, criando um contato elétrico com menor resistência entre os *pads* e o nanofio.

Este procedimento encontra-se calibrado para os compostos semicondutores com os quais o LPD tem trabalhado ao longo dos anos. Normalmente utilizamos um tratamento térmico rápido, com a temperatura se mantendo em 420°C por 30 segundos, numa atmosfera de gás verde (N₂ com 2% de H₂). Contudo, nos casos convencionais, a difusão de Ge e Ni ocorre num volume de material muito maior que o do nanofio. Por este motivo, realizamos o tratamento térmico em etapas, avaliando pelas curvas corrente vs.tensão o contato obtido.

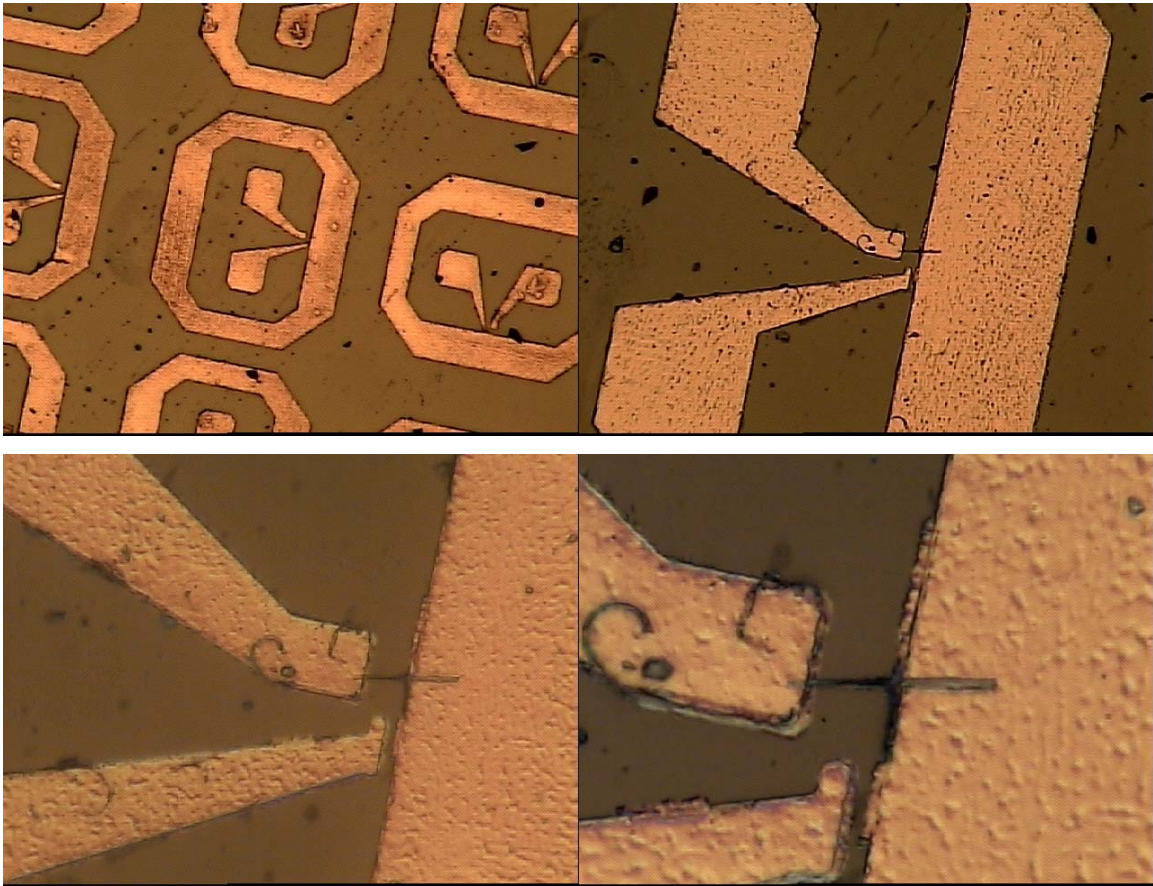


Figura 8: Fotos da amostra em um microscópio ótico com diferentes magnificações.

O primeiro tratamento térmico foi realizado a 380 °C por 30 segundos; a Figura 9 mostra as medidas elétricas realizadas na estação de pontas em conjunto com o analisador de parâmetros semicondutores HP-4145B. A estação de pontas consiste em um microscópio ótico e um medidor de corrente, conectado a duas pontas finas de tungstênio; essas pontas estão ligadas a dispositivo que permite pequenos movimentos nos três eixos separadamente. Pode-se então encostar estas pontas na amostra e, aplicando uma voltagem entre dois pontos, obter curvas como as mostradas a seguir.

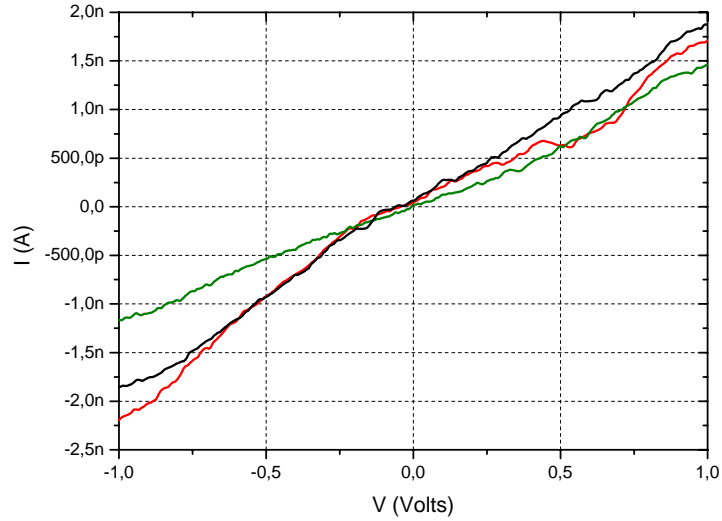


Figura 9: Curvas $I \times V$ após o primeiro tratamento térmico a 380°C, por 30 segundos em atmosfera de gás verde. As curvas referem-se a diferentes dispositivos com nanofios.

Podemos observar da Fig.9 que as curvas são não-lineares, ruidosas e apresentam resistências altas, da ordem de $G\Omega$. O tratamento térmico foi então repetido, com amostra sendo mantida a 400°C por 20 segundos.

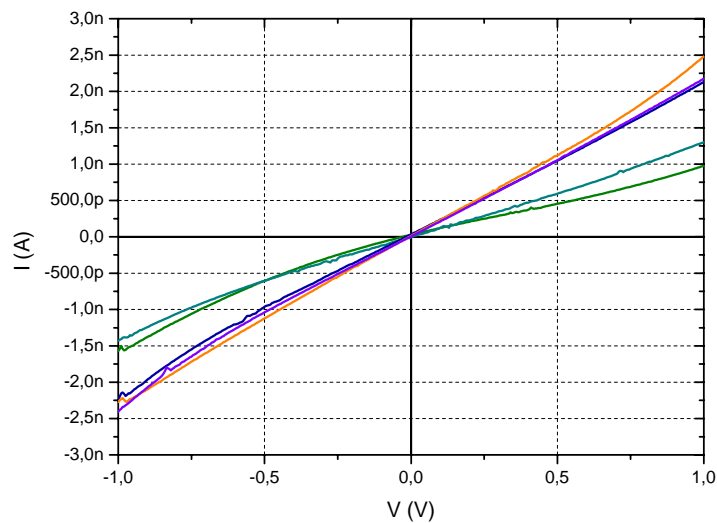


Figura 10: Curvas $I \times V$ após o segundo tratamento térmico a 400°C, por 20 segundos em atmosfera de gás verde. As curvas azuis e vermelhas referem-se a dispositivos com nanofios, enquanto as verdes estão relacionadas à corrente de fuga entre os *pads* sobre o substrato.

Neste caso, é possível notar um comportamento mais linear de algumas curvas, com um nível menor de ruído. Podemos notar na Fig.10, porém, que a corrente de fuga no substrato semi-isolante é muito alta, em comparação com os níveis de corrente observados nos dispositivos ativos, com os nanofios. Após cada etapa de tratamento térmico, o dispositivo foi levado ao microscópio ótico para verificar a integridade da amostra. Não houve mudanças visuais significativas. Com estes resultados em mãos, e sabendo que o nanofio é de InP não-dopado, preferimos não realizar outras etapas de tratamento térmico para evitar a degradação da amostra.

A figura 11 mostra a amostra final, após a solda de fios de Al nos *pads* metálicos de dispositivos e montagem da amostra no suporte adequado - estas atividades foram realizadas com a colaboração do Centro de Pesquisas Renato Archer - CENPRA, que proporcionou o uso do *wire bonder*. Foram montados dispositivos com e sem nanofios na região ativa, para a comparação das medidas elétricas.

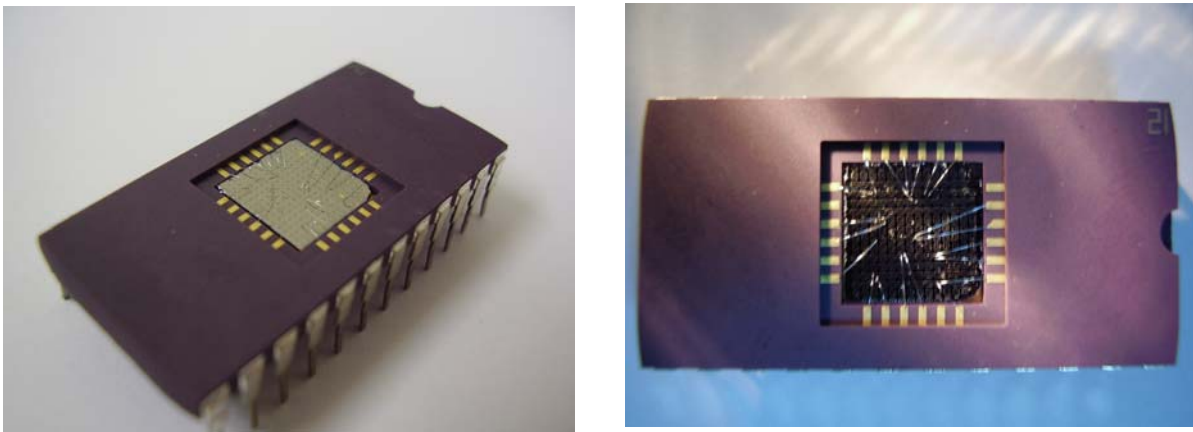


Fig.11: Configuração final da amostra montada, mostrando as soldas nos *pads* metálicos. Foram montados dispositivos com e sem nanofios na região ativa, para a comparação das medidas elétricas.

A Figura 12 mostra um conjunto de medidas elétricas a 77K em dois dispositivos com nanofios (em azul) e entre *pads* de contatos isolados (em vermelho), já na amostra montada da Figura III.9. Apesar da queda nos valores de corrente, as curvas mostraram-se mais suaves. Notamos, porém, que as características dos dispositivos com nanofios, na maior parte dos casos, mal se distingue daquelas dos *pads* isolados. Somente um dos dois dispositivos exibiu um maior nível de corrente, compatível com o obtido anteriormente,

porém ainda assim com medidas não completamente reproduzíveis. Para avaliar a razão deste comportamento, é importante diminuir a corrente de fuga pelo substrato.

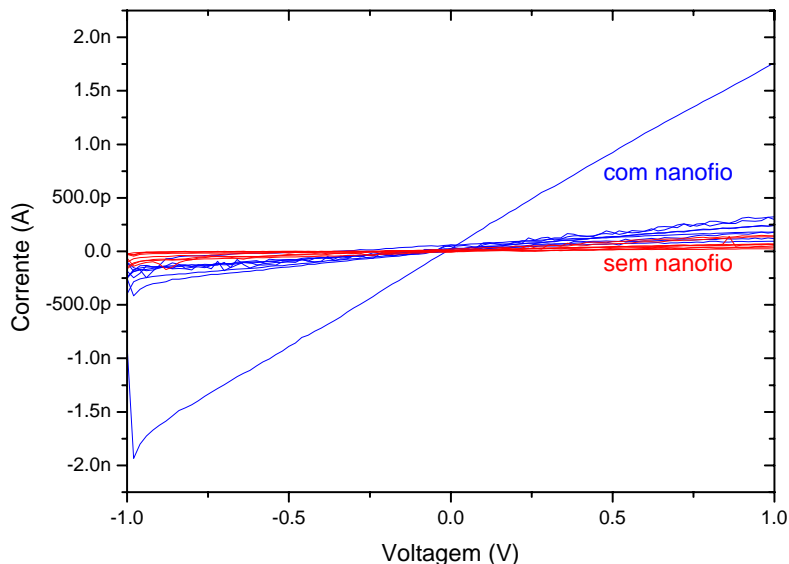


Figura 12: Medidas elétricas a 77K nos dispositivos com fios de Al soldados nos *pads* metálicos. A figura mostra medidas em dispositivos contendo nanofios na região ativa (azul) ou entre *pads* isolados (vermelho).

4. CONCLUSÕES

De forma geral, estes resultados mostraram ser viável a fabricação de dispositivos baseados em nanofios utilizando procedimentos de fotogração, metalização e a manipulação no FEG-SEM do LEM/LNLS. Contudo, para continuar a investigação, devemos proceder a alterações na estrutura da amostra. Assim, estamos preparando amostras com uma camada de dielétrico isolando os contatos metálicos do substrato – de forma a minimizar a corrente de fuga. Por outro lado, isto possibilita o uso de substrato dopado, de modo que podemos utilizar a configuração de *back gate* para as medidas elétricas. Finalmente, dentro da disponibilidade de amostras de nanofios produzidos no CBE, tentaremos utilizar aquelas que permitam a fabricação de um melhor contato ôhmico (com regiões dopadas) ou a verificação de propriedades elétricas não-lineares, como no caso de heteroestruturas.

5. REFERENCIAS

- [1]. Lieber, C. M. *Sci. Am.* **285**, 58-64 (2001)
- [2]. Wang, J. F., Gudiksen, M. S., Duan, X. F., Cui, Y. & Lieber, C. M. *Science* **293**, 1455-1457 (2001)
- [3]. Cui, Y., Wei, Q. Q., Park, H. K. & Lieber, C. M. *Science* **293**, 1289-1292 (2001)
- [4]. Duan, X. F., Huang, Y., Cui, Y., Wang, J. F. & Lieber, C. M. *Nature* **409**, 66-69 (2001)
- [5]. R.S.Wagner, em *Whisker Technology*, editado por A.P.Levitt (Wiley, New York, 1970) pp.47-119
- [6]. Cui, Y. & Lieber, C. M. *Science* **291**, 851-853 (2001)
- [7]. M.H.Huang, S.Mao, H.Feick, H.Yan, Y.Wu, H.Kind, E.Weber, R.Russo and P.Yang, *Science* **292**, 1897 (2001)
- [8]. Y.Huang, X.Duan, Y.Cui, L.J.Lauhon, K.-H.Kim and C.M.Lieber, *Science* **294**, 1313 (2001)
- [9]. M.T.Björk, B.J.Ohlsson, T.Sass, A.I.Persson, C.Thelander, M.H.Magnusson, K.Deppert, L.R.Wallenberg and L.Samuelsen, *Appl.Phys.Lett.* **80**, 1058 (2002)
- [10]. M.S.Gudiksen, L.J.Lauhon, J.Wang, D.C.Smith and C.M.Lieber, *Nature* **415**, 617 (2002)
- [11]. Y.Wu, R.Fan and P.Yang, *Nano Lett.* **2**, 83 (2002)
- [12]. M.T.Björk, B.J.Ohlsson, C.Thelander, A.I.Persson, K.Deppert, L.R.Wallenberg and L.Samuelsen, *Appl.Phys.Lett.* **81**, 4458 (2002)
- [13]. S. Bhunia, T. Kawamura and Y. Watanabe, *Appl. Phys. Lett.*, **83** 3371 (2003)
- [14]. C. Thelander, M.T. Bjork, M.W. Larsson, A.E. Hansen, L.R. Wallenberg, L. Samuelson, *Sol.Stat.Comm.* **131**, 573 (2004)
- [15]. U. Krishnamahari, M. Borgstrom, B.J. Ohlsson, N. Panev, L. Samuelson, W. Seifert, M.W. Larsson and L.R. Wallenberg, *Appl. Phys. Lett.*, **85** 2077 (2004)
- [16]. A.I.Hochbaum, R.Fan, R.R.He and P.D.Yang, *Nano Lett.* **5**, 457 (2005)
- [17]. R.Konencamp, R.C.Word and C.Schlegel, *Appl.Phys.Lett.* **85**, 6004 (2004)
- [18]. S.M.Koo, A.Fujiwara, J.P.Han, E.M.Vogel, C.A.Richter, J.E.Bonevich, *Nano Lett.* **4**, 2197 (2004)
- [19]. S. Luryi, *Appl. Phys. Lett.* **47**, 490 (1985)
- [20]. L. Samuelson, M.T. Bjork, K. Deppert, M. Larsson, B.J. Ohlsson, N. Panev, A.I. Persson, N. Skold, C. Thelander, L.R. Wallenberg, *Phys.E* **21**, 560 (2004)
- [21]. S.-W. Chung, J.-Y. Yu and J.R. Heath, *Appl.Phys.Lett.* **76**, 2068 (2000)
- [22]. J.-Y. Yu, S.-W. Chung and J.R. Heath, *J. Phys. Chem. B* **104**, 11864 (2000)
- [23]. C.Thelander, H.A.Nilsson, L.E.Jensen, L.Samuelsen, *Nano Lett.* **5**, 635 (2005)