

Juliana Alves Martins

**Aplicação e caracterização de poucas camadas de
Dissulfeto de Molibidênio na produção de transistores
de efeito de campo**

Belo Horizonte

Setembro de 2012

Juliana Alves Martins

**Aplicação e caracterização de poucas camadas de Dissulfeto de
Molibidênio na produção de transistores de efeito de campo**

Dissertação de Mestrado apresentada à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Como requisito parcial para a obtenção do título de

MESTRE EM FÍSICA

Orientador: Rodrigo Gribel Lacerda

Co-orientador: Evandro Augusto de Moraes

Belo Horizonte

Setembro de 2012

Dedico essa dissertação à minha família,
Por tornarem cada dia da minha vida especial.
Amo muito todos vocês!!!!!!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por todos os momentos bons e de crescimento que ele me proporcionou e, principalmente, por ter colocado em minha vida pessoas que contribuísem grandiosamente com a minha jornada.

De todas as pessoas que eu tenho que agradecer, sem dúvidas o Júnio, meu MARIDÃO, é a mais importante delas. Foi ele quem acreditou em mim desde o primeiro dia que me conheceu. Se hoje estou no meio acadêmico e prestes a iniciar o doutorado em física é graças a ele, que é uma pessoa maravilhosa, compreensiva, amorosa, incentivadora, que me apoia e que acredita no meu potencial. Sou imensamente grata a Deus por ter colocado na minha vida o melhor professor de história que já tive e, que sem dúvidas alguma, é a pessoa mais inteligente que conheço. Xuxu, não existem palavras que descrevam o meu amor por você!!!!

Agradeço à minha mãe Nilza, ao meu pai Jocimar e aos meus irmãos Stefânia, Daniel e Michael. Foram eles quem me deram uma excelente base familiar e são eles os grandes responsáveis por ter me tornado a pessoa que sou hoje. Também agradeço em especial minha tia Márcia, pois foi ela a primeira pessoa que me mostrou esse mundo de conhecimentos, no qual estou me aventurando e tentando deixar minha contribuição. Agradeço a todos os tios, tias, primos e avós por todos os momentos juntos. Perdoem-me por não citar o nome de todos, mas a família é grande!!!!!!

Agradeço à Mariinha e ao Seu Rodolfo que além de sogros são verdadeiros pais para mim. Seus conselhos, afagos e os tão famosos Sermões da Montanha do Seu Rodolfo, contribuíram para que eu ampliasse o meu mundo e a forma de amar a todos que fazem parte da minha família. Também não posso me esquecer dos meus cunhados Juliano, Juliana e Eduardo e dos meus sobrinhos Rafael e Vitória que me proporcionaram momentos de muita farra. À minha tia Dora e à Vó Tereza por serem tão prestativas e amorosas e ao meu tio Chiquinho que não perde uma oportunidade de me sacaniar!!!!!!

Agradeço a todos os professores que contribuíram para a minha formação, desde a primeira série até a pós. Com certeza tem um pouquinho de todos vocês em mim. Em especial agradeço ao Rodrigo, por ter aceitado me orientar e pela ajuda na construção dessa dissertação. MUITO OBRIGADO!

Agradeço a todos os companheiros de laboratório, Thiago, o outro Tiago, Viviany, Sérgio, Dayana, Érick, Welisson, Luciana, Eudes, Samuel, Alisson, Lígia, Além, Ive e aos professores André Ferlauto e Luiz Orlando. Todos vocês foram muito importante na construção desse trabalho e contribuíram diretamente para a realização do mesmo.

Agradeço aos amigos que fiz durante o curso, Enderson, Matoso, Márcio, Ariana, Campolina (que também se chamada Tiago), Léo doidão e tantos outros. Principalmente à Jordana e Ingrid as quais me incentivaram sempre, e que carregou no meu coração.

Obrigada aos órgãos financiadores CAPES, CNPq, INCT/Carbono e Fapemig, que possibilitaram verbas para a pesquisa e idas a eventos. Em relação às medidas, agradeço ao Centro de Microscopia da UFMG e ao professor Bernardo Neves pelas medidas de AFM, ao professor Flávio Plentz pelas medidas de fotoluminescência, ao laboratório de Espectroscopia Raman e ao Pádua.

E, finalmente, o meu grande agradecimento ao Evandro, que me ensinou tudo que sei sobre a fabricação de transistores de efeito de campo. Foi ele quem esteve comigo passo a passo desse trabalho, me ajudando na construção do mesmo. Evandro, essa dissertação também é sua!!!!!!!

A todos que mencionei e aos que por acaso me esqueci, os meus MUITO
OBRIGADO!!

Sumário

1 – Introdução	pág.: 1
1.1 – Introdução	pág.: 2
2 – Dissulfeto de Molibdênio	pág.: 4
2.1 – Introdução	pág.: 5
2.2 – O Dissulfeto de Molibdênio	pág.: 5
2.3 – Estrutura eletrônica do Dissulfeto de Molibdênio	pág.: 7
2.4 – Métodos de Produção.....	pág.: 11
2.4.1 – Microesfoliação Mecânica.....	pág.: 12
2.4.2 – Esfoliação Química.....	pág.: 13
2.4.3 – Deposição química na fase vapor (CVD).....	pág.: 15
3 – Transistores de Efeito de campo	pág.: 17
3.1 – Introdução.....	pág.: 18
3.2 – Transistores.....	pág.: 18
3.3 – Capacitores MOS.....	pág.: 20
3.3.1 – Modo de operação dos capacitores MOS.....	pág.: 20
3.3.2 – Tensão limiar.....	pág.: 24
3.4 – O Transistor de Efeito de Campo.....	pág.: 26
3.4.1 – Características $I_D \times V_{DS}$	pág.: 28
3.5 – Transporte elétrico.....	pág.: 33

4 – Técnicas experimentais.....	pág.: 36
4.1 – Introdução.....	pág.: 37
4.2 – Caracterização das Amostras.....	pág.: 37
4.2.1 – Microscopia Óptica.....	pág.: 37
4.2.2 – Microscopia de Varredura por Sonda – Microscopia de Força Atômica (AFM).....	pág.: 39
4.2.3 – Espectroscopia Raman.....	pág.: 42
4.2.4 – Fotoluminescência.....	pág.: 43
4.3 – Fabricação do Transistor de Efeito de Campo.....	pág.: 45
4.3.1 – Processo de litografia.....	pág.: 45
4.3.1.1 – Litografia Eletrônica.....	pág.: 45
4.3.1.2 – Litografia óptica.....	pág.: 49
4.3.2 – Deposição de filmes finos.....	pág.: 51
4.4 – Medidas elétricas.....	pág.: 53
5 – Resultados Experimentais.....	pág.: 56
5 – Resultados Experimentais.....	pág.: 57
5.1 – Identificação de poucas camadas do MoS ₂	pág.: 57
5.2 – Caracterização Elétrica.....	pág.: 69
5.2.1- Estudo dos Contatos Elétricos em Bulk de MoS ₂	pág.: 69
5.2.2- Caracterização dos Transistores de Efeito de Campo de MoS ₂	pág.: 74
5.2.2 – A - Resultados para o bulk de MoS ₂	pág.: 75
5.2.2 – B - Resultados para Duas e Três Camadas de MoS ₂	pág.: 78

5.2.2 – C - Discussão dos Resultados para o Bulk e Poucas Camadas de MoS ₂	pág.: 81
5.3 - Medidas Preliminares de Fotocorrentes.....	pág.: 85
6 – Conclusão.....	pág.: 87
6.1- Conclusão.....	pág.: 88
7 – Referências Bibliográficas.....	pág.: 90
7.1- Referências Bibliográficas.....	pág.: 91

Lista de Figuras

- 2.1: Foto do mineral molibdnita (retirado de 5).....pág.: 6
- 2.2: Representação tridimensional da estrutura do MoS₂. A espessura de 0,65 nm da monocamada também pode ser visualizada (retirada de 7).....pág.: 7
- 2.3: Representação da estrutura do MoS₂. Em (a) tem-se a estrutura atômica do MoS₂ vista lateralmente e por cima. A célula unitária está delineada e possui três átomos na base. As constantes de rede $|a| = |b|$, c e os parâmetros de estrutura interna estão indicados. A estrutura consiste de Mo (esfera vermelha) e S (esfera cinza) localizados nos cantos dos hexágonos vistos por cima. (b) A correspondente Zona de Brillouin com as direções de simetria (retirada de 18). (c) Representação prismática trigonal do MoS₂ (retirada de 19) e em (d) uma representação contendo os parâmetros de rede (retirada de 19 e 20). Em (c) e (d) os círculos preenchidos representam os átomos de molibdênio enquanto que os círculos vazios representam os átomos de enxofre; os números indicados entre os átomos são as distâncias intra e entre camadas dos átomos de Mo-Mo, S-S e Mo-S.....pág.: 9
- 2.4: Estrutura de banda simplificada do bulk de MoS₂, mostrando o fundo da banda de condução c_1 e o topo das bandas de valência v_1 e v_2 . A e B são as transições de gap direto e I é a transição de gap indireto (retirada de 12).....pág.: 11
- 2.5: Dissulfeto de Molibdênio esfoliado micromecanicamente sobre um substrato de SiO₂, em torno de 300 nm de óxido. Imagens óticas com menor (a) e maior (b) magnitude. À medida que a espessura diminui a coloração se torna mais transparente, saindo do amarelo (dezenas de camadas) indo para o verde- azulado até se tornar cinza transparente (para monocamada).....pág.: 13
- 2.6: Em (a) é apresentado uma fotografia de um filme de MoS₂ flutuando em água (imagem de cima) e depositada em uma placa de vidro (imagem de baixo). Em (b) a fotografia do filme colocado em um pedaço de garrafa PET e em (c) Imagem de AFM de um filme com espessura média de 1,3 nm. O filme consiste de regiões que são monocamadas misturadas a outras de mais camadas (retirada de 17).....pág.: 14
- 2.7: Esquema de um sistema de CVD utilizado na preparação de amostras de MoS₂ (adaptada de 25).....pág.: 15

2.8: Imagens contendo o filme de MoS ₂ obtido no processo de CVD. Em (a) Uma região onde está localizado mono e poucas camadas é selecionada. Em (b) a mesma região transladada. Ao lado mapas de intensidade dos picos de Raman caracterizam o número de camadas (retirada de 25).....	pág.: 16
3.1: Esquema de um transistor de efeito de campo (FET) contendo os terminais fonte, dreno e porta (retirada de 31).....	pág.: 19
3.2: Esquema de um capacitor MOS contendo um semiconductor do tipo p (retirada de 32).....	pág.: 20
3.3: Diagrama de energia no capacitor MOS para valores diferentes do potencial aplicado entre a porta e o semiconductor tipo p. Em (a) tem-se $V_G=0$; em (b) $V_G<0$; em (c) $V_G>0$ e em (d) $V_G>>0$ (retirada de 30).....	pág.: 21
3.4: Diagrama de energia no capacitor MOS para valores diferentes do potencial aplicado entre a porta e o semiconductor. Na Figura à esquerda é mostrado um capacitor de acumulação ($V_G<0$); na posição central um capacitor de depleção ($V_G>0$) e à direita um capacitor de inversão ($V_G>>0$) (retirada de 33).....	pág.: 24
3.5: Diagrama de energia no Si-p próximo à interface do óxido em um capacitor MOS com $V_G > V_{th}$ (retirada de 30).....	pág.: 25
3.6: MOSFET tipo depleção de canal n e substrato dopado tipo-p, (adaptada de 34).....	pág.: 27
3.7: MOSFET tipo acumulação de canal n (adaptada de 34).....	pág.: 27
3.8: MOSFET modo acumulação de canal-n. (a) com $V_G < V_{th}$ e (b) com $V_G > V_{th}$ (retirada de 35).....	pág.: 28
3.9: Seção transversal com os respectivos gráficos de $I_D \times V_{DS}$ quando $V_G > V_{th}$ para (a) valores de V_{DS} pequenos; (b) valores altos de V_{DS} ; (c) $V_{DS} = V_{DS(sat)}$ e (d) $V_{DS} > V_{DS(sat)}$ (retirada de 35).....	pág.: 29
3.10: famílias de curvas $I_D \times V_{DS}$ para um MOSFET modo acumulação de canal-n (retirada de 35).....	pág.: 31
3.11: Características de $I_D \times V_G$ do MOSFET tipo depleção de canal n mostrando a tensão limiar V_{Th} e a corrente de saturação I_{DSS} (retirada de 36).....	pág.: 32

3.12: famílias de curvas $I_D \times V_{DS}$ para um MOSFET modo depleção de canal-n (retirada de 35).....	pág.: 33
3.13: Obtenção da tensão V_{Th} a partir das medidas de $I_D \times V_G$. A tensão V_{Th} é obtida pela projeção da curva, enquanto que a transcondutância pode ser encontrada através da inclinação (retirada de 35).....	pág.: 34
4.1: Esquema de um microscópio óptico. Em destaque, estão os elementos que o compõe (retirada de 38).....	pág.: 38
4.2: Foto do microscópio óptico do laboratório de nanomateriais do departamento de Física da Universidade Federal de Minas Gerais. As letras em vermelho destacam em A o monitor do computador acoplado ao microscópio, B o microscópio óptico e C o aparelho de espectroscopia Raman.....	pág.: 39
4.3: Diagrama de funcionamento de um AFM mostrando seus principais itens (retirada de 42).....	pág.: 40
4.4: Gráfico da força em função da distância que separa a amostra da sonda. Também podem ser visualizados os modos de operação do AFM de acordo com o tipo de força presente na interação (retirada de 43).....	pág.: 41
4.5: Espalhamento Raman e Rayleigh de uma excitação à frequência ν_0 . Pode-se observar a transição do fóton do estado fundamental a um estado virtual (retirada de 45).....	pág.: 43
4.6: Recombinação banda-banda. Em (a) excitação, em (b) relaxação e em (c) recombinação de portadores (retirada de 46).....	pág.: 44
4.7: Marcas de alinhamento usadas no processo de litografia por feixe eletrônico.....	pág.: 47
4.8: Exemplo de uma máscara de contatos desenhada no programa designCAD.....	pág.: 48
4.9: Esquema do processo de litografia por feixe de elétrons. Em (a) inicialmente é depositado um filme de PMMA, em (b) a amostra é levada ao microscópio eletrônico onde um padrão previamente desenhado, é gravado no PMMA pelo feixe de elétrons, em (c) o PMMA é revelado expondo áreas do substrato, em (d) é feita a deposição de um filme fino e em (e) o PMMA é removido (retirado de 50).....	pág.: 49
4.10: Esquema de um sistema de evaporação térmica (retirada de 50).....	pág.: 52

4.11: Etapas da fabricação do dispositivo. (a) Identificação de poucas camadas de MoS₂ com a ajuda de um microscópio óptico. (b) Deposição do resiste e alinhamento para o início do processo de litografia eletrônica. (c) Resultado da litografia após a deposição de filmes finos e (d) um zoom feito de (c) para que se tivesse melhor visualização do floco de MoS₂.....pág.: 53

4.12: (a) Foto do aparato experimental usado durante as medidas elétricas. (b) Diagrama do aparato experimental mostrado em (a). (c) Visualização dos micromanipuladores na estação de prova. (d) Circuito de medida de um transistor de efeito de campo de uma camada de MoS₂. Os círculos em azuis na estrutura do MoS₂ representam os átomos de enxofre e os círculos em vermelho os átomos de molibdênio (adaptada de 6).....pág.: 54

5.1: Mapa do contraste óptico como função do comprimento de onda da luz e da espessura da camada de SiO₂ do substrato. Figura retirada de 53.....pág.: 58

5.2: Imagens de poucas camadas de MoS₂ sobre o substrato de 300 nm de SiO₂, obtidas através de um microscópio óptico. Em (a) é mostrado um degradê da coloração verde- azulada. Os círculos preto, vermelho, verde e azul escuro mostram, nessa ordem, o contraste referente à diminuição do número de camadas do material e o círculo alaranjado mostra um bulk de MoS₂ . Já em (b) pode-se perceber uma coloração mais transparente, círculo rosa, que corresponde a uma camada e uma coloração amarela que corresponde a várias camadas do material.....pág.: 59

5.3: Imagens de poucas camadas de MoS₂ sobre o substrato de 300 nm de SiO₂, obtidas através do tratamento no software Image J. Em (a) e (b) tem-se a imagem fornecida pelo canal R. O traço em vermelho indica o local em que foi realizada a análise de contraste. Em (c) e (d) tem-se os gráficos de valores de cinza em função da distância, dos locais indicados em (a) e (b) respectivamente. Os valores ao lado das setas indicam a diferença dos tons de cinza entre o substrato e a amostra.....pág.: 60

5.4: (a) Espectro Raman do bulk e da monocamada do MoS₂ sobre o substrato de SiO₂. À esquerda são mostrados os dois modos ativos do Raman: E¹_{2g} e A_{1g}, para os quais círculos amarelos representam os átomos de enxofre e círculos pretos representam os átomos de molibdênio. (b) Gráfico do número de camadas do MoS₂ em função da posição dos picos E¹_{2g} e A_{1g} visíveis em Raman. O eixo vertical à esquerda exibe o valor da frequência dos picos, enquanto que o eixo vertical à direita mostra a diferença de valor entre eles (retirada de 56 e 57).....pág.: 61

- 5.5: (a) Contém curvas do Espectro Raman obtidas para cada região das amostras mostradas na Figura 5.2. As cores das curvas são referentes às esferas colocadas sobre o local onde foi realizada a medida, como apresentado na Figura 5.2, de forma que cada linha corresponde a um número de camada diferente. (b) Contém o gráfico do número de camadas do MoS₂ em função da posição dos picos E¹_{2g} e A_{1g}. O eixo vertical à esquerda exibe o valor da frequência dos picos, enquanto que o eixo vertical à direita mostra a diferença de valor entre eles.....pág.: 62
- 5.6: Imagens e perfis obtidos por AFM de poucas camadas de MoS₂ sobre o substrato de 300 nm de SiO₂. Em (a) tem-se uma monocamada, em (b) duas camadas, em (c) três camadas, em (d) quatro camadas e em (e) cinco camadas.....pág.: 64
- 5.7: Estrutura de banda do MoS₂. (a) bulk, (b) quatro camadas, (c) bicamada e (d) monocamada. As setas pretas indicam a transição de menor energia (retirada de 59).....pág.: 65
- 5.8: (a) Imagem de monocamada utilizando um microscópio óptico com detector de luminescência. A seta aponta o local onde se localiza a monocamada. (b) A mesma imagem mostrando a monocamada e MoS₂ de multicamadas que estão em volta dela.....pág.: 66
- 5.9: Espectro de fotoluminescência do MoS₂. Em (a) é mostrado o espectro de fotoluminescência desde monocamadas até o bulk, destacando o local onde ocorrem os picos. Em (b) é feito um zoom na região entre 550 a 730 nm, para se ter melhor visualização das curvas referentes a 2, 3, 4 e 5 camadas.....pág.: 68
- 5.10: Curvas de I_{SD} x V_{SD} para diferentes tensões de porta, V_G, para amostras de bulk de MoS₂ feitas com contatos Ti/Au. (a) e (b) foram obtidos da amostra 1. Os contatos foram feitos com 3nm de Ti e 40 nm de Au. A amostra possui 6 contatos diferentes, sendo (a) a medida realizada entre os contatos 1 e 3 e (b) a medida entre os contatos 1 e 5. (c) Amostra 2, os contatos foram feitos com 10nm Ti e 50nm de Au. (d) Amostra 3, os contatos são de 1nm de Ti e 50 nm Au. (e) Amostra 4, contatos de 5 nm de Cr e 50 nm de Au.....pág.: 71
- 5.11: Curvas de I_{SD} x V_{SD} para diferentes tensões de porta, V_G, para amostra feita com contatos de 40 nm de Au.....pág.: 72
- 5.12 (a) Curvas de I_{SD} x V_{SD} para diferentes tensões de porta, V_G, para amostras feitas com bulk de MoS₂. (b) Gráfico de I_{SD} x V_G para V_{SD} = 10 mV; o traço em vermelho representa a inclinação da curva, ou seja, a transcondutância. (c) Imagem de

transistores de efeitos de campo de bulk de MoS ₂ . Os números representam os diferentes transistores; 1 indica um dispositivo com seis pads e 2 um dispositivo com 2 pads.....	pág.: 75
5.13: Curvas de (a) $\sigma \times V_G$ e (b) $n \times V_G$ para o bulk de MoS ₂	pág.: 77
5.14 Medida de AFM de um transistor (a) de três camadas de MoS ₂ e (b) de duas camadas de MoS ₂ . Em destaque pode-se notar o floco de MoS ₂ e os contatos de Au.....	pág.: 78
5.15: Os gráficos apresentados são (a) $I_{SD} \times V_{SD}$ para diferentes tensões de porta; (b) $I_{SD} \times V_G$; (c) $\sigma \times V_G$ e (d) $n \times V_G$ para uma amostra com três camadas de MoS ₂ . Em (b) é mostrado em vermelho o ajuste feito para o cálculo da mobilidade. Já (e) contém os gráficos $I_{SD} \times V_{SD}$ para diferentes tensões de porta e (f) $I_{SD} \times V_G$ para uma amostra com duas camadas de MoS ₂	pág.: 79
5.16: Gráfico da mobilidade em função da temperatura para o bulk de MoS ₂ . Os pontos indicam o resultado experimental para diferentes amostras e o traço cheio o resultado teórico,(retirada de 10).....	pág.: 83
5.17: Gráfico teórico da mobilidade em função da densidade de portadores para diferentes temperaturas para a monocamada de MoS ₂ , (retirada de 71).....	pág.: 84
5.18: (a) Curva de $I_{SD} \times V_{SD}$ mostrando a alteração na intensidade da corrente sob a influência de luz branca em uma amostra de duas camadas. E em (b) o comportamento da corrente quando acende e logo em seguida apaga a luz em um bulk. (c) AFM da amostra de duas camadas cuja medida é mostrada em (a).....	pág.: 85

Lista de Tabelas

2.1: Valores contendo as constantes de rede $|a| = |b|$ e c , parâmetros de estrutura interna tais como as distâncias entre $d_{\text{Mo-S}}$, $d_{\text{S-S}}$ e o ângulo θ formado entre as ligações S-Mo-S.....pág.: 10

5.1: Função trabalho dos metais e do Dissulfeto de Molibdênio envolvidos na junção metal-semicondutor.....pág.: 73

5.2: A tabela contém informações sintetizadas dos resultados obtidos, durante esse trabalho, para amostras feitas com poucas camadas de MoS_2pág.: 82

Resumo

Neste trabalho investigamos a fabricação de dispositivos eletrônicos baseados em poucas camadas de Dissulfeto de Molibdênio (MoS_2). Para isso, iniciou-se um estudo que englobou desde a preparação e deposição do material sobre o substrato de silício (coberto com uma camada de óxido de silício), sua identificação e caracterização, até a fabricação de transistores por efeito de campo. A identificação do número de camadas de MoS_2 foi realizada utilizando principalmente quatro técnicas distintas, sendo elas: Microscopia óptica, Microscopia de Força Atômica (AFM), Espectroscopia Raman e Fotoluminescência. A partir da identificação do número de camadas e caracterização das amostras, foram fabricados transistores de efeito de campo utilizando o MoS_2 como canal de condução. O processo de fabricação dos dispositivos foi realizado utilizando processos de litografia por feixe de elétrons e litografia óptica. Na busca por contatos ôhmicos, um estudo sistemático utilizando diferentes metais foi realizado (Cr/Au, Ti/Au e Au). Dentre estes, apenas o contato feito com ouro puro mostrou-se com característica ôhmica. A partir disto, dispositivos do tipo transistores foram fabricados onde verificou-se o efeito de campo (através da tensão de *back gate*) modulando a condução sobre o MoS_2 . Através das medidas de transcondutância, pudemos determinar propriedades importantes do MoS_2 como sua dopagem tipo-n, mobilidade e densidade de portadores.

Abstract

In this work we investigate the fabrication of electronic devices based on a few layers of Molybdenum Disulfide (MoS₂). To achieve this goal we have performed a study that involved the preparation and deposition of the crystal on the silicon substrate (covered with a layer of silicon oxide), its identification and characterization, and the final production of field effect transistors. The identification of the number of layers of MoS₂ was performed mainly using four different techniques, namely: optical microscopy, atomic force microscopy (AFM), Raman and photoluminescence spectroscopy. After the identification of the number of layers and the characterization of the samples, field effect transistors were built using few-layers of MoS₂ as the active channel. The device fabrication was performed using processes of electron beam lithography and optical lithography. In the search for ohmic contacts, a systematic study was carried out using different metals (Cr / Au, Ti / Au and Au). Among these, only the contact made with pure gold was shown to display ohmic characteristics. Thus, the latter was chosen for the fabrication of transistors devices where the field effect (through the application of the back gate voltage) modulates the conduction of the MoS₂ channel. By performing the transconductance measurements, we were able to determine important properties of MoS₂ such as its n-type doping, mobility and carrier density.