

Ricerca di Sistema elettrico



Materiali 2D per celle solari innovative (LA1.24)

F. Buatier de Mongeot, M.C. Giordano, M. Barelli, G. Zambito, G. Ferrando



Università
di Genova

MATERIALI 2D PER CELLE SOLARI INNOVATIVEV(LA 1.24)

F. Buatier de Mongeot, M.C. Giordano, M.Barelli, G.Zambito, G.Ferrando

Dipartimento di Fisica, Università di Genova

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica – ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: 1.1 "Fotovoltaico ad alta efficienza"

Linea di attività: LA 1.24

Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Dipartimento di Fisica, Università di Genova

Mese inizio previsto: 01/07/2023

Mese inizio effettivo: 01/07/2023

Mese fine previsto: 31/12/2024

Mese fine effettivo: 31/12/2024

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di Collaborazione: "Materiali 2D per celle solari innovative"

Responsabile scientifico ENEA: Eugenia Bobeico

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Francesco Buatier de Mongeot

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	5
3	Prodotti attesi	6
4	Prodotti sviluppati	6
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	8
6	Sintesi delle attività svolte	9
7	Dettaglio delle attività svolte.....	10
7.1	Secondo livello	10
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	15
9	Pubblicazioni scientifiche.....	16
10	Eventi di disseminazione	17

Indice delle figure

Figura 1 – Deposizione fisica IBS di strati 2D-TMD MoS2 e WS2 su larga area	11
Figura 2 – Deposizione fisica IBS di eterostrutture van der Waals verticali WS2/MoS2	12
Figura 3 – Amplificazione della raccolta di luce in matrici periodiche di eterostrutture WS2/MoS2 nanostrutturate	13
Figura 4 – Caratterizzazione elettrica e Kelvin Probe di film TMD amorfi aMoSx e caratterizzazione elettro-ottica di celle ibride TMD/SHJ.....	14
Figura 5 – Utilizzo di strati protettivi in Grafene per proteggere substrato cristallino durante deposizione IBS a bassa energia.....	15

1 Risultati attesi

Verrà sviluppato un protocollo ottimizzato per la crescita su larga area di film semiconduttori 2D-TMD a base di MoS₂ e WS₂ ultrasottili (regime few layer 2-20 nm) ricorrendo a RF magnetron sputtering e ad Ion Beam Sputtering deposition da un target di TMD stechiometrico. Si realizzeranno campioni 2D-TMD estesi sulla scala dei cm². Le proprietà elettroniche e di trasporto del 2D-TMD verranno ottimizzate tramite ricristallizzazione termica e tramite irraggiamento con plasmi ed elettroni, anche allo scopo di indurre la ricristallizzazione a temperature inferiori a 200°C per preservare la funzionalità degli strati passivanti di a-Si:H delle celle ad eterogiunzione di Si.

Si svilupperà un protocollo di nanostrutturazione su larga area dei film 2D-TMD basato su litografia interferenziale (e su auto-organizzazione indotta da irraggiamento ionico) (i) per indurre bandgap e strain engineering nelle regioni a curvatura locale elevata; (ii) per ridurre le perdite per riflessione alle interfacce dei film 2D-TMD ad alto indice e favorire l'accoppiamento di luce in regime di flat optics. Si effettueranno misure di riflettività speculare e diffusa nel regime UV-vis-NIR delle interfacce 2D-TMD nanostrutturate in confronto a quella di film 2D-TMD lisci.

Su wafer di c-Si passivati con film di a-Si:H forniti da ENEA, saranno depositati film 2D-TMD con l'obiettivo di dimostrare la fattibilità di dispositivi SHJ su area > 1 cm². Si dimostrerà infine la fattibilità della fabbricazione di eterogiunzioni di van der Waals di tipo II, full TMD MoS₂/WS₂, su aree del cm².

2 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti sono stati in linea con i risultati attesi. Si è dimostrato un nuovo approccio alla deposizione fisica di film assorbitori e trasportatori di carica innovativi basati su materiali semiconduttori 2-dimensionali appartenenti alla classe dei Transition Metal Dichalcogenides (2D-TMD). Il procedimento sviluppato per MoS₂ è stato poi esteso con successo anche al WS₂. Si sono ottimizzati processi basati su ion Beam Sputtering (IBS) deposition e su RF magnetron sputtering, utilizzando target di MoS₂ stechiometrici. La fattibilità di tali processi è stata dimostrata su un prototipo dimostratore di laboratorio (aree attive alla scala dei cm²).

I film 2D-TMD sono supportati in modo conforme su substrati lisci e nanostrutturati (wafer di Si cristallino e SiO₂ e su substrati polimerici) estesi su scale dei cm². Il processo di deposizione messo a punto è scalabile a livello di wafer utilizzando strumentazione di tipo industriale. Gli strati TMD, dopo la deposizione IBS o RF a temperature ambiente si presentano in fase amorfa o nanocristallina. Per migliorare la loro stechiometria e proprietà cristalline, si è ottimizzato un processo di ricristallizzazione termica in atmosfera controllata (Argon) arricchito con vapori di zolfo, prodotti in una seconda zona scaldata differenzialmente. Gli esperimenti hanno dimostrato con successo che in questo modo è possibile ottenere la ricristallizzazione dei film TMD nella fase semiconduttrice 2H.

Gli esperimenti inizialmente realizzati con MoS₂, sono stati estesi ad un TMD complementare, il WS₂, che presenta forti somiglianze in termini di struttura cristallina e proprietà optoelettroniche. Si è quindi dimostrata la possibilità di accoppiare i due strati TMD a formare eterostrutture di van der Waals con allineamento delle bande di tipo II evidenziato dalla fotocorrente e dal fotovoltaaggio misurati sotto condizioni di illuminazione.

Abbiamo quindi affrontato il problema della amplificazione della cattura di luce che è risultato particolarmente critico a causa del limitato spessore degli strati sottili TMD. Si è sviluppato un processo di nanostrutturazione mediante litografia interferenziale degli strati sottili 2D-TMD a formare un reticolo periodico, che consente di manipolare e reindirizzare il flusso luminoso in condizioni di evanescenza, amplificando la raccolta di luce in regime di flat-optics.

Abbiamo quindi adattato il protocollo di deposizione dei 2D-TMD per la fabbricazione di strutture a multistrato del tipo TMD/a-Si:H/c-Si per l'impiego come assorbitori e trasportatori di carica innovativi. Gli esperimenti condotti hanno evidenziato che il processo di deposizione del TMD mediante sputtering IBS riduce in modo sostanziale l'efficienza quantica delle celle SHJ, a causa del danno da impiantazione nel substrato cristallino.

Nell'ultima fase del progetto è stato pertanto avviata la sperimentazione di strati buffer 2D a base di grafene e di film conduttivi trasparenti a bassissima rugosità (Au o ITO) per proteggere il substrato cristallino durante la deposizione dei materiali 2D. Abbiamo inoltre studiato la possibilità di modificare le proprietà elettroniche del TMD mediante band-gap e strain engineering indotto dalla nanostrutturazione del materiale 2D-TMD.

3 Prodotti attesi

Report tecnico-scientifico dal titolo: "Materiali 2D per celle solari innovative"

4 Prodotti sviluppati

Il presente Report dal titolo: "Materiali 2D per celle solari innovative" - RdS_PTR22-24_PR1.1_LA1.24_415

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non sono state riscontrate criticità o scostamenti tecnici/economici rispetto al preventivo

6 Sintesi delle attività svolte

Si è studiata la crescita di strati a largo gap per celle solari SHJ, impiegando semiconduttori 2D-TMD (MoS_2 , WS_2) come assorbitori/trasportatori innovativi. Sono stati sviluppati processi scalabili di deposizione (ion beam e RF magnetron sputtering) su substrati lisci e nanostrutturati, dimostrandone la fattibilità su prototipi di laboratorio alla scala del cm^2 . Per migliorare la cristallinità degli strati amorfi/nanocristallini è stato ottimizzato un processo di ricristallizzazione termica in atmosfera controllata con vapori di zolfo. È stata dimostrata l'integrazione MoS_2/WS_2 in eterostrutture con allineamento di banda tipo II. Per potenziare la cattura della luce nei film sottili è stata usata litografia interferenziale per generare reticoli periodici. Infine, si è studiata l'integrazione in strutture TMD/a-Si:H/c-Si, l'uso di buffer 2D (grafene o film conduttivi) e il band-gap/strain engineering via nanostrutturazione.

7 Dettaglio delle attività svolte

Nella linea di attività LA 1.24 si è studiata la crescita di film sottili per l'impiego come assorbitori e trasportatori di carica innovativi in celle solari ad eterogiunzione di silicio, basati su materiali semiconduttori 2-dimensionali appartenenti alla classe dei Transition Metal Dichalcogenides (2D-TMD). Per la realizzazione di dispositivi FV innovativi di possibile interesse industriale è cruciale la messa a punto di tecniche di deposizione di 2D-TMD potenzialmente scalabili all'intero wafer. Infatti gli esperimenti allo stato dell'arte sui dispositivi ed eterostrutture a base di semiconduttori 2D-TMD sono basati sull'utilizzo di flake esfoliati meccanicamente con dimensioni attive limitate alla scala della decina di micrometri. e sono caratterizzati da una bassissima resa.

7.1 Deposizione Fisica di film 2D-TMD

È stato sviluppato un nuovo approccio alla deposizione fisica di film 2D-TMD stechiometrici di MoS_2 e WS_2 , supportati in modo conforme su substrati lisci e nanostrutturati. Si sono ottimizzati processi basati su ion beam sputtering deposition (IBS) e su RF magnetron sputtering, utilizzando target di WS_2 e MoS_2 stechiometrico. La fattibilità di tali processi è stata dimostrata su un prototipo dimostratore di laboratorio (aree attive alla scala dei cm^2) depositando i film di TMD su vari substrati, quali wafer di Si cristallino, silicio amorfo, grafene e SiO_2 , sia lisci che nanostrutturati [Figura 1a-1b-1c]. Si evidenzia che il processo di deposizione messo a punto, è scalabile a livello di wafer utilizzando strumentazione di tipo industriale.

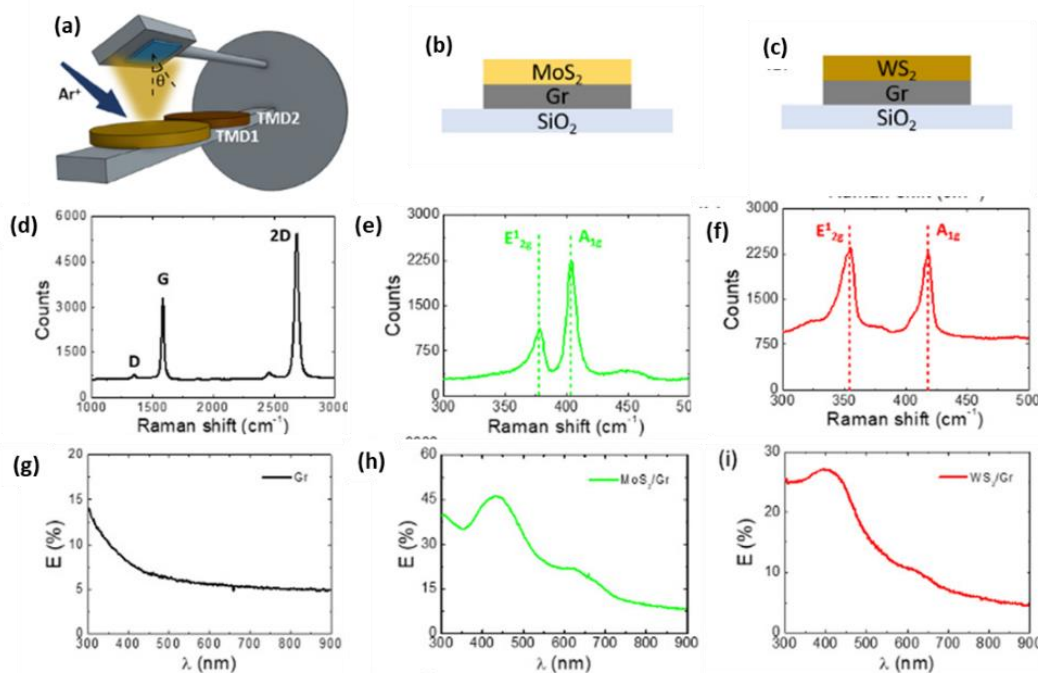


Figura 1 – (a-b-c) Deposizione dei film TMD (MoS_2 e WS_2) su substrati di silice con elettrodo di grafene. (d-e-f) Caratterizzazione micro-Raman del grafene, del MoS_2 , e del WS_2 . (g-h-i) Spettroscopia ottica in estinzione rispettivamente del grafene, del MoS_2 e del WS_2 .

È stata esplorata la possibilità di migliorare le proprietà cristalline degli strati TMD che dopo la deposizione IBS o RF a temperature ambiente si presentano in fase amorfa. A questo scopo si è ottimizzato un processo di ricristallizzazione termica in atmosfera controllata (Argon) arricchito con vapori di zolfo prodotti da una seconda regione scaldata differenzialmente. Gli esperimenti hanno dimostrato con successo che in questo modo è possibile ottenere la

ricristallizzazione dei film TMD nella fase semiconduttrice 2H [pubblicazione 1 e 2]. La caratterizzazione dei materiali, ottenuta tramite spettroscopia micro-Raman (Figura 1d-1e-1f), e tramite spettroscopia ottica in estinzione (Figura 1g-1h-1i) evidenzia che la crescita dei film TMD in fase semiconduttrice avviene con successo sia sui substrati di silice, sia sui film di grafene.

Gli esperimenti inizialmente realizzati con MoS_2 , sono stati estesi ad un TMD complementare, WS_2 , che presenta forti somiglianze in termini di struttura cristallina e proprietà optoelettroniche.

7.2 Eterostrutture di van der Waals verticali 2D-TMD

Si è quindi dimostrata la possibilità di accoppiare verticalmente i due strati TMD a formare eterostrutture di van der Waals WS_2/MoS_2 con allineamento delle bande di tipo II evidenziato dalla fotocorrente e dal fotovoltaggio misurati sotto condizioni di illuminazione [pubblicazione 1]. Misure di fotodissociazione di molecole sonda (Blu di Metilene) evidenziano che l'eterostruttura di tipo II consente un aumento dell'efficienza di fotodissociazione rispetto ai singoli strati TMD. L'eterostruttura è realizzata in configurazione superstrato su un wafer di silice con un elettrodo finestra in grafene con area attiva cm^2 e con back-contact di Au (Figura 2a). Gli spettri Raman (Figura 2b) evidenziano la coesistenza dei due strati TMD sovrapposti. Gli spettri di estinzione nel regime di few layer (Figura 2c) evidenziano che l'estinzione a 650 nm, in corrispondenza degli eccitoni A e B, è limitata al 30% rendendo necessarie strategie di raccolta della luce innovative.

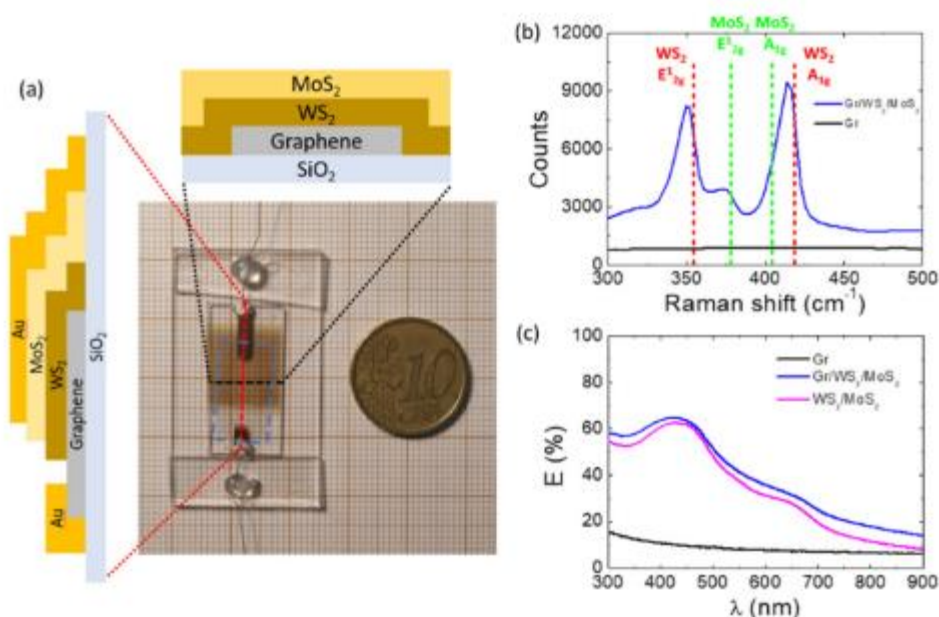


Figura 2 - (a) Fotografia di un'eterogiunzione van der Waals su larga area composta da uno stack di grafene (rettangolo blu tratteggiato), WS_2 e MoS_2 . Lo schema in alto rappresenta una sezione trasversale dello stack lungo la direzione orizzontale (traccia nera), mentre lo schema laterale rappresenta una sezione trasversale lungo la direzione verticale (traccia rossa). (b) Spettri Raman acquisiti nella regione dell'eterogiunzione (traccia blu) e sul solo grafene (traccia nera). (c) Spettri di estinzione ottica acquisiti sul solo grafene (traccia nera), su $\text{WS}_2\text{-MoS}_2$ sopra il grafene (traccia blu) e su $\text{WS}_2\text{-MoS}_2$ al di fuori del grafene (traccia magenta).

7.3 Amplificazione della raccolta di luce in film 2D-TMD nanostrutturati

Nella LA 1.24 abbiamo quindi affrontato il problema della amplificazione della cattura di luce negli strati sottili TMD a causa del loro limitato spessore sfruttando soluzioni derivate dalla flat-optics. Per realizzare soluzioni derivate dalla flat-optics si è sviluppato un processo di nanostrutturazione del template di SiO_2 mediante litografia interferenziale, per formare un reticolo periodico (Figura 3a). La successiva deposizione fisica ad angoli radenti (IBS) degli strati sottili 2D-TMD ha permesso di formare una matrice periodica di nanostrisce TMD confinate sulle faccette periodiche del template con un approccio maskless e parallelo (Figura 3b-3c-3d). Una scelta appropriata della periodicità del reticolo e dell'angolo di incidenza della luce consente di manipolare e reindirizzare il flusso luminoso in corrispondenza delle condizioni di evanescenza (Figura 3e). Per queste condizioni (Figura 3f) si osserva che la raccolta di luce (assorbimento integrato misurato in sfera integratrice) risulta fortemente amplificata rispetto al corrispondente campione di riferimento flat (guadagno del 450% alla lunghezza d'onda di 530nm e guadagno medio del 250% integrato sull'intervallo 400-800nm) non-nanostrutturato [pubblicazione 2].

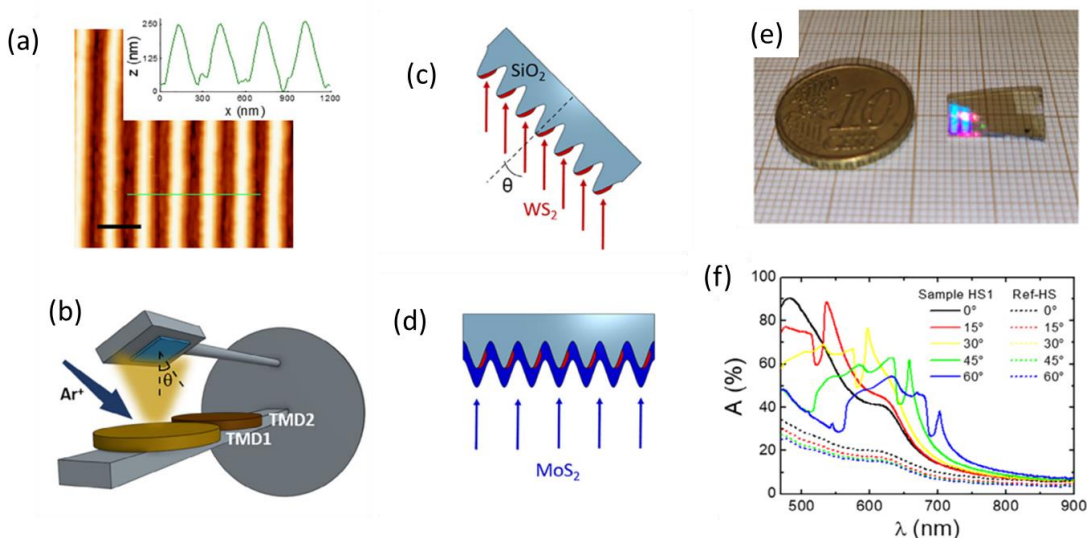


Figura 3 - (a) Immagine AFM di un template in SiO_2 nanostrutturato utilizzato per la crescita di eterostrutture TMD a large area (barra nera 400 nm); il profilo di linea è estratto in corrispondenza alla linea verde. (b) Sketch dall'apparato IBS deposition con multipli target TMD (MoS_2 e WS_2) e portacampioni rotante. (c-d) Schema della deposizione sequenziale di WS_2 ad angoli radenti e di MoS_2 ad incidenza normale, per formare una matrice di eterostrutture. (e) Foto macroscopica del campione nanostrutturato, che evidenzia la presenza di anomalie fotoniche in condizioni di evanescenza (f) Spettri di assorbimento integrato (sfera integratrice) dei campioni di eterostrutture, e dei campioni flat di riferimento.

7.4 Test dei TMD come strati trasportatori

Abbiamo quindi adattato il protocollo di deposizione dei 2D-TMD per la fabbricazione di strutture a multistrato ibride, in cui il film TMD amorfo (aMoS_x), depositato a bassa temperatura, è supportato su celle in silicio SHJ del tipo a-Si:H/c-Si. Tramite nanolitografia thermal scanning probe, abbiamo caratterizzato le proprietà di trasporto dei film TMD amorfi (aMoS_x) interfacciati con nanoelettrodi di Au (Figura 4a). In vista dell'utilizzo del film TMD come strato trasportatore si evidenzia positivamente che il film aMoS_x as-deposited risulta avere resistività $\rho = 1.4 \times 10^{-1} \text{ Ohm cm}$, più bassa per quasi 2 ordini di grandezza rispetto alla fase semiconduttrice 2H. La funzione lavoro del film TMD è stata determinata tramite Kelvin Probe Force microscopy

$\phi_{\text{aMoS}_x} = 5,05 \text{ eV}$, per confronto con elettrodi di riferimento in Au caratterizzati da $\phi_{\text{Au}} = 5,2 \text{ eV}$ (Figura 4b-c).

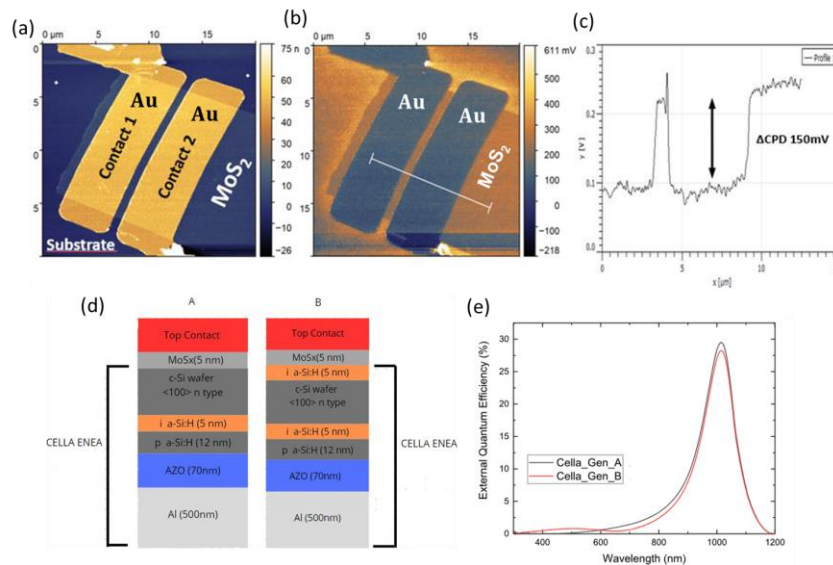


Figura 4 - (a) Immagine AFM di un campione TMD (film amorfo aMoS_x spesso 5nm) nanostrutturato a forma di barra con 2 elettrodi di Au. (b) corrispondente immagine Kelvin Probe Force Microscopy (KPFM) evidenzia il contrasto tra le regioni di Au, aMoS_x e del substrato SiO₂. (c) Il profilo di riga KPFM evidenzia la differenza di funzione lavoro di 150 meV tra Au e TMD. (d) Celle SHJ di test con lo strato TMD (MoS_x) depositato direttamente sul c-Si e su uno strato in silicio amorfo. (e) misure di efficienza quantica esterna delle due celle evidenziano il danno da impiantazione nell'elettrodo frontale.

È stato inoltre valutato l'effetto della deposizione diretta tramite sputtering IBS del film TMD (aMoS_x) direttamente sulle celle SHJ realizzate in silicio cristallino, con/senza uno strato passivante in a-Si:H (Figura 4d). Gli esperimenti svolti in collaborazione con ENEA hanno evidenziato che la deposizione diretta del film TMD tramite IBS riduce in modo sostanziale l'efficienza quantica delle celle SHJ nella regione spettrale del blu, a causa del danno da impiantazione indotto nella regione frontale del substrato cristallino (Figura 4e).

Nell'ultima fase del progetto è stata avviata la sperimentazione di strati buffer 2D a base di grafene e di film conduttivi trasparenti a bassissima rugosità (ITO o Au) per verificare la protezione del substrato cristallino durante la deposizione IBS dei materiali 2D-TMD [pubblicazione 3]. I risultati evidenziano che uno strato di grafene (bilayer) macroscopico può essere utilizzato con successo per proteggere gli elettrodi trasparenti a base di ITO che non sopravvivono nelle condizioni di ricristallizzazione dei TMD in presenza di zolfo (Figura 5a). La porzione del substrato di ITO protetta dal grafene (rettangolo centrale) rimane trasparente e conduttiva, mentre la porzione di ITO non protetta dal grafene diventa isolante e si converte nella fase In₂S₃. È stato infine verificato che è possibile utilizzare un bilayer di grafene come strato barriera per ridurre il danno da impiantazione indotto dalla deposizione IBS di film supportati sul grafene. È stata misurata la resistenza di strato del grafene prima e dopo la deposizione IBS di un film isolante (SiO₂) al variare dell'energia del fascio ionico IBS (Figura 5b).

Si osserva che riducendo l'energia del fascio IBS a valori intorno ai 250eV si preserva la cristallinità del grafene che mantiene la sua resistenza di strato al valore iniziale.

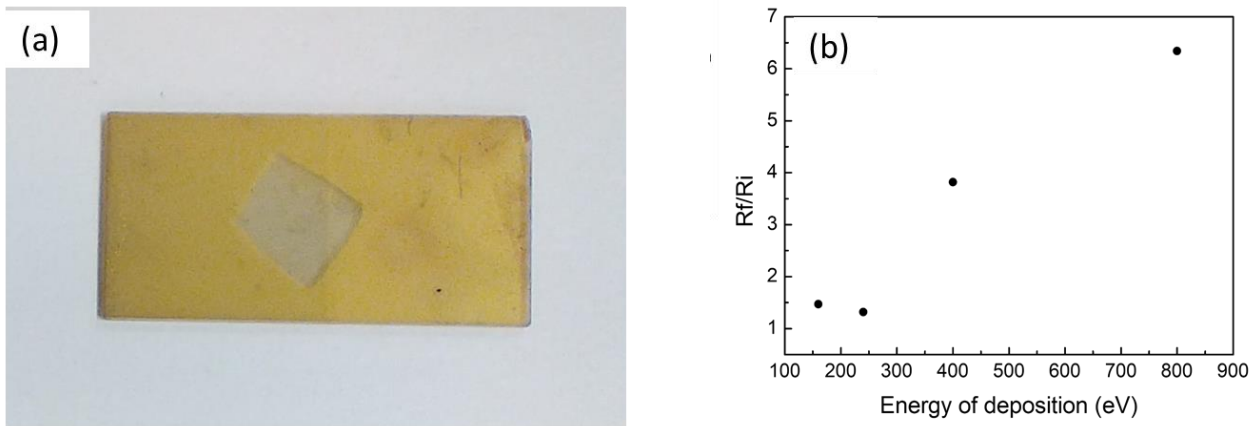


Figura 5 - (a) Eterostruttura ibrida 2D-3D ITO/Gr/MoS₂ stratificata verticalmente depositando lo strato TMD mediante IBS a basse energie. L'ITO ed il TMD coprono tutto il substrato, il grafene posto tra ITO e MoS₂ protegge la sola porzione centrale che rimane trasparente dopo trattamento termico in forno tubolare con zolfo. (b) Resistenza di strato del grafene dopo la deposizione IBS di un film isolante (SiO₂) al variare dell'energia del fascio ionico impiegato durante la deposizione. La resistenza è normalizzata al valore iniziale del grafene, prima della deposizione del film.

Nell'ultima fase del progetto è stata anche studiata la possibilità di modificare le proprietà elettroniche dei film TMD mediante strain engineering indotto dalla nanostrutturazione del materiale 2D-TMD quando questo viene supportato in modo conforma da un template nanostrutturato [pubblicazione 4].

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

9 Pubblicazioni scientifiche

- [1] M. Gardella, G. Zambito, G. Ferrando, F. Bisio, M.C. Giordano, and F. Buatier de Mongeot, Large area van der Waals MoS₂-WS₂ heterostructures for visible-light energy conversion. **RSC Appl. Interfaces**, 2024,**1**, 1001-1011. <https://doi.org/10.1039/D3LF00220A>
- [2] M. Gardella, G. Zambito, G. Ferrando, L. F. Barusso, R. Chennuboina, L. Repetto, M. Barelli, M. C. Giordano, F. Buatier de Mongeot, Maskless Synthesis of van der Waals Heterostructure Arrays Engineered for Light Harvesting on Large Area Templates. **Small**, **2025**, **2400943**. <https://doi.org/10.1002/sml.202400943>
- [3] Ferrando, G., Mennucci, C., Barelli, M., Giordano, M.C. and Buatier de Mongeot, F. (2025), Flexible and Transparent Ultrathin Gold Electrodes via Ion Beam Smoothing. **Small Sci.**, **2025**, **5**: **2400272**. <https://doi.org/10.1002/smsc.202400272>
- [4] Zambito, G., Ferrando, G., Barelli, M., Ceccardi, M., Cagliaris, F., Marre, D., Bisio, F., Buatier de Mongeot, F., Giordano, M.C., Strained 2D TMD lateral heterojunctions via grayscale thermal-Scanning Probe Lithography, under submission **Advanced Functional Materials** **2025**

10 Eventi di disseminazione

1) Invited talk: Francesco Buatier de Mongeot "Large area periodically modulated plasmonic and 2D Transition Metal Dichalcogenide layers featuring flat-optics light harvesting" INTERNATIONAL CONFERENCE ON SEMICONDUCTOR TECHNOLOGIES –MATERIALS TO CHIPS (ICST-2024) Amity Institute , Noida, India 18-20 September 2024

2) Contributed talk: Matteo Barelli "Large area periodically modulated 2D Transition Metal Dichalcogenide layers featuring flat-optics and strain engineering" - CMD31, Braga (Portugal), 2-6 September 2024

3) Invited talk: Matteo Barelli, Francesco Buatier de Mongeot "Large area periodically modulated plasmonic and 2D Transition Metal Dichalcogenide layers featuring flat-optics light harvesting" - 27th International Conference on the Application of Accelerators in Research & Industry (CAARI), 21-26 July 21 2024, Fort Worth, Texas, USA

4) Contributed talk: Matteo Barelli "Self organized wrinkled nanorippled templates for large area flat optics metasurfaces in SERS, color routing and photocatalysis" - Plasmonica 2024 Workshop, Messina (Italy), 10-12 July 2024

5) Invited talk: Francesco Buatier de Mongeot "Large-area and deterministic nanopatterning of 2D semiconducting layers for flatoptic photon harvesting and nanoelectronics" - Photonics in Flatland: Empowering Nanophotonics with 2D Semiconductors, Lorentz Center Leiden NL 3-7 June 2024

6) Invited talk: Francesco Buatier de Mongeot "Nanopatterning 2D semiconducting layers for large-scale photon harvesting and nanoelectronics" - International School of Solid State Physics, 88th course: Epioptics-17 & Xenos-5, Erice (IT), July 6-12, 2024

7) Invited talk: Matteo Barelli, Maria Caterina Giordano "Large-area van der Waals heterostructures for photon harvesting." - AES 2024, The 10th International Conference on Antennas and Electromagnetic Systems, Rome, Italy, 25 - 28 June, 2024

8) Contributed Talk: Giulio Ferrando "Large-area type-II MoS₂-WS₂ heterostructures for visible-light photoconversion" - MRS fall meeting, Strasburg, France May 27-31, 2024

9) Contributed talk: Giorgio Zambito "Large Area van der Waals MoS₂-WS₂ heterostructures for visible-light photocatalysis and energy conversion" - MRS Spring Meeting, April 22-26, 2024 Seattle, USA

10) Contributed talk: Giorgio Zambito "Growth of Arbitrary 2D TMDs Nanopatterns via Thermal Scanning Probe Lithography" - MRS Spring Meeting, April 22-26, 2024 Seattle, USA

11) Contributed Talk: Giulio Ferrando "Flat-optics photon harvesting in large-scale 2D semiconductor layers for photoconversion applications" - MRS Fall meeting, online, December 5-7, 2023 Boston USA

12) Contributed talk: Francesco Buatier de Mongeot "Functional Nanopatterning of 2D-TMDs via large scale and thermal scanning probe lithography" - XII Workshop on Applications of Scanning Probe Microscopy - STM/AFM 2023, Zakopane, Poland 29 November - 3 December 2023