

RAPPORTO FINALE SUI RISULTATI DEL PROGETTO COMUNE DI RICERCA
FINAL REPORT ON RESULTS OF JOINT RESEARCH PROJECT

1. Accordo /Agreement CNR / HAS anni/ years 2016/2018	
2. Titolo del progetto Eterostrutture fra grafene e strati ultra-sottili di semiconduttori ad ampia banda proibita 2. Title of the project GHOST: <u>G</u> raphene <u>H</u> eterostructures with ultra-thin films <u>O</u> f wide bandgap <u>S</u> emiconduc <u>T</u> ors	
Parole chiave (<i>massimo 3</i>) Eterostrutture, grafene, semiconduttori ad ampia banda proibita Key words (<i>max. 3</i>) Heterostructures, graphene, wide bandgap semiconductors	
(solo per parte italiana) Area scientifica / Scientific area Scienze fisiche e tecnologie della materia / Physical Sciences and Technology of Matter	
3. Responsabili del progetto Project leaders	
Responsabile italiano Filippo Giannazzo	Project leader CNR Filippo Giannazzo
Istituto di appartenenza CNR-IMM	Affiliation CNR-IMM
Indirizzo Strada VIII, 5, 95121 Catana, Italy	Address Strada VIII, 5, 95121 Catania, Italy
Responsabile ungherese Bela Pecz	Project leader HAS Bela Pecz
Istituto di appartenenza Institute for Technical Physics and Materials Sci., Centre for Energy Research, Hungarian Academy of Sciences (HAS-MFA)	Affiliation Institute for Technical Physics and Materials Sci., Centre for Energy Research, Hungarian Academy of Sciences (HAS-MFA)
Indirizzo 29-33 Konkoly-Thege, Budapest; Hungary	Address 29-33 Konkoly-Thege, Budapest; Hungary

4. Obiettivi del progetto

O1: Fabbricazione e caratterizzazione strutturale, chimica ed elettrica di eterostrutture di grafene con strati ultrasottili di semiconduttori ad ampia banda proibita (fra cui AlN, GaN, ZnO).

O2: Formazione di giovani ricercatori, sia all'interno dei rispettivi gruppi di ricerca di appartenenza, che nel corso delle visite ai laboratori partner

O3: Svolgimento di attività di disseminazione congiunte:

- Pubblicazioni scientifiche;
- Partecipazione a congressi internazionali;
- Organizzazione di un simposio/workshop;
- Organizzazione di seminari dedicati per le industrie.

O4: Rafforzamento della cooperazione fra CNR-IMM e HAS-MFA, con lo scopo di partecipare a progetti con altri partners europei.

4. Aims of the project

O1: Fabrication and high resolution structural, chemical and electrical characterization of Graphene heterostructures with ultra-thin films of wide bandgap semiconductors (including AlN, GaN, ZnO,..).

O2: Training of young-researchers

O3: Joint dissemination activities:

- Scientific publications in peer reviewed journals (with IF);
- Participation in international conferences
- Organization of a symposium/workshop.
- Organization of dedicated seminars with industries

O4: Strengthening the cooperation between CNR-IMM and MFA, with the aim of submitting H2020 proposals together with other EU partners.

5. Risultati ottenuti per obiettivo (1 pagina)

O1: Le eterostrutture del graphene (Gr) con strati ultra-sottili di semiconduttori III-N sono stati preparati mediante la tecnica MOCVD presso l'università di Linköping (LiU), Svezia, nell'ambito del progetto europeo GRIFONE, a cui partecipano anche IMM e MFA. In particolare, IMM e HAS hanno affrontato la sfida della caratterizzazione strutturale/chimica ed elettrica delle eterostrutture su scala nanometrica o su scala atomica, mediante l'impiego delle tecniche di caratterizzazione avanzate disponibili nei rispettivi laboratori (AFM e TEM ad alta risoluzione). Protocolli dedicati di preparazione dei campioni e procedure di misura sono stati sviluppati in stretta collaborazione fra i due gruppi di ricerca per analizzare questi campioni estremamente critici.

Nel 2018, MFA ha acquisito un nuovo TEM a risoluzione atomica, e gli esperimenti svolti nell'ambito del progetto bilaterale GHOST sono serviti per la validazione di questa nuova strumentazione.

Uno dei principali risultati scientifici di queste attività è stata la dimostrazione che strati ultra-sottili stabili di semiconduttori III-N si possono ottenere mediante l'intercalazione all'interfaccia fra Gr epitassiale e SiC(0001) delle specie atomiche del III gruppo (In, Ga, Al) e di N, prodotti della decomposizione dei rispettivi precursori MOCVD.

Oltre alla suddetta procedura di intercalazione, nel corso del progetto GHOST sono stati valutati anche approcci alternative per la fabbricazione delle etero-giunzioni Gr/III-N. In particolare, è stata messa a punto presso IMM una procedura di trasferimento ottimizzata del Gr (cresciuto per CVD su rame) alla superficie di eterostrutture Al(Ga)N/GaN. Inoltre, sono state studiate alcune fasi di processo fondamentali per la fabbricazione di dispositivi basati su eterostrutture Gr/III-N, fra cui:

- La crescita di strati sottili di AlN su GaN mediante atomic layer deposition (ALD) assistita da plasma a bassa temperatura;
- La deposizione di strati sottili di isolanti ad alta costante dielettrica su Gr mediante un processo ALD termico con un seed-layer depositato "in-situ";
- La fabbricazione di contatti Schottky su GaN bulk.

O2: Durante il progetto GHOST, 4 giovani ricercatori hanno ricevuto un training sulle tecniche di caratterizzazione avanzate dei materiali 2D e le loro eterostrutture:

- dal lato CNR-IMM: G. Greco (PhD conseguito nel 2013); G. Fisichella (PhD conseguito nel 2014); E. Schilirò (PhD conseguito nel 2017);
- dal lato HAS-MFA: I. Cora (PhD conseguito nel 2013).

O3: Il progetto GHOST ha già dato luogo ad alcune pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali con IF (fra cui un articolo tematico su invito), ed ulteriori pubblicazioni sono in fase di preparazione. Inoltre, vari contributi (fra cui 5 relazioni su invito) inerenti alle attività del progetto sono stati presentati nell'ambito di congressi internazionali.

Infine, due dei membri del progetto GHOST, G. Greco (CNR-IMM) e B. Pecz (HAS-MFA) sono co-organizzatori del Simposio R *"New frontiers in wide-bandgap semiconductors and heterostructures for electronics, optoelectronics and sensing"* durante l'EMRS Fall 2018 di Varsavia.

O4: Il progetto bilaterale GHOST ha consentito un rafforzamento delle relazioni fra i due istituti partecipanti (IMM ed MFA), e la loro partecipazione ad iniziative congiunte con altri gruppi di ricerca appartenenti ad università/centri di ricerca di alto livello in Europa, fra cui l'Università di Linköping (Svezia), il CNRS-CRHEA (Francia), UNIPRESS (Polonia).

Nel corso del progetto, è stata instaurata anche una collaborazione fra MFA e il laboratorio TEM presso il CNR-IMM di Catania, che ospita uno STEM a risoluzione atomica di nuova generazione. Questa collaborazione continuerà nel progetto GHOST II, anche grazie ad un'iniziativa europea per la microscopia elettronica (ESTEEM 3) recentemente finanziata.

5. Achieved results (one page)

O1: Graphene (Gr) heterostructures with ultra-thin films of group III-Nitride semiconductors (III-N) were prepared by the MOCVD technique at Linköping University (LiU), in the framework of the European project GRIFONE involving also IMM and MFA as partners. IMM and HAS addressed the challenging tasks of the nano- and atomic scale structural/chemical and electrical characterization of these heterostructures, employing the advanced characterization techniques (electrical AFM and high resolution TEM) available in their laboratories. Ad-hoc sample preparation protocols and measurements procedures were developed in close collaboration between the two groups to analyse these critical samples.

During the project, MFA acquired a new atomic resolution TEM, and experiments performed within the GHOST bilateral project served for the validation of this new instrumentation.

One of the main achievements of these activities has been the demonstration that stable ultra-thin films of III-N can be obtained by intercalation of the group III (e.g., In, Ga, Al) and N species, produced by MOCVD precursors decompositions, at the interface between epitaxial Gr and SiC(0001).

Besides the above discussed intercalation procedure, alternative approaches have been explored during the GHOST project for the fabrication of Gr/III-N heterojunctions. In particular, an optimized transfer procedure of CVD grown Gr on Cu to the surface of Al(Ga)N/GaN heterostructures has been developed at IMM. Furthermore, some key process steps for the fabrication of devices based on Gr/III-N heterostructures have been also investigated. These included:

- the growth of thin AlN films on GaN by low temperature plasma-assisted atomic layer deposition (ALD);
- the deposition of thin film of high-k dielectrics onto Gr by thermal ALD with an “in-situ” seeding layer process;
- the fabrication and characterization of Ni Schottky contacts onto bulk GaN.

O2: During the GHOST project, 4 young researchers received a training on advanced characterization of 2D materials and heterostructures:

- from CNR-IMM side: G. Greco (PhD awarded in 2013); G. Fisichella (PhD awarded in 2014); E. Schilirò (PhD awarded in 2017);
- from HAS-MFA side: I. Cora (PhD awarded in 2013).

O3: The GHOST project resulted in a number of publications in peer-reviewed journals (among which an invited feature article) and other publications are in preparation. Several contributions have been presented in international conferences (among which 5 invited talks) on the project's results.

Two of the project's partners, G. Greco (CNR-IMM) and B. Pecz (HAS-MFA) are organizers of the Symp R “*New frontiers in wide-bandgap semiconductors and heterostructures for electronics, optoelectronics and sensing*” at EMRS Fall 2018 in Warsaw.

O4: The GHOST bilateral project resulted in the strengthening of the relations between the two partner institutions (IMM and MFA), as well as in their participation in joint activities with other leading research groups from other countries, such as Linköping University (Sweden), CNRS-CRHEA (France), UNIPRESS (Poland).

A collaboration between MFA and the TEM group at IMM in Catania, hosting a new generation aberration corrected STEM, was also established during the project. This will be continued within the GHOST II project, also supported by a recently funded European initiative for Electron Microscopy, ESTEEM 3.

6. Prodotti del progetto / Results obtained	
	n./no.
1. Pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali/ Scientific publications on international reviews with IF	2
2. Pubblicazioni in atti congressi internazionali/ Publications in international congress proceedings	12
3. Pubblicazioni in atti congressi nazionali / Publications in national congress proceedings	1
4. Pubblicazione libri nazionali / Publication of national books	
5. Pubblicazione libri internazionali / Publication of international books	1
6 Altre pubblicazioni / Other publications	
7 Brevetti / Patents	
8 Prototipi / Prototypes	
9 Strumentazione / Equipment and /or Devices	
10 Programmi software / Software	
11 Banche dati / Data bases	
12 Protocolli / Protocols	1
13 Nuovi Materiali / New Materials	1
14 Nuovi processi / New processes	1
15 Cataloghi, inventari, repertori / Catalogues, Inventories	
16 Atlanti, Carte, Mappe / Atlases, Charts, Maps	
17 Progetti di ricerca / Research projects	2
18 Trasferimento innovazioni / Knowledge transfer	
19 Laboratori congiunti / Joint laboratories	
20 Alta formazione / Training	4
21 Altro / Other	1

7. Informazioni dettagliate sui risultati indicati sub 6

1. Pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali con IF:

1. G. Greco, F. Giannazzo, P. Fiorenza, S. Di Franco, A. Alberti, F. Iucolano, I. Cora, B. Pecz, F. Roccaforte, Phys. Status Solidi A 215, 1700613 (2018).
2. F. Giannazzo, G. Fisichella, G. Greco, A. La Magna, F. Roccaforte, B. Pecz, R. Yakimova, R. Dagher, A. Michon, Y. Cordier, Phys. Status Solidi A 214, 1600460 (2017).

2. Presentazioni in congressi internazionali:

Presentazioni su invito:

1. R. Yakimova, A. Kovacs, A. Kakanakova, F. Giannazzo, B. Pecz, “*Interfacing Graphene with III-Nitrides for Power Device Applications*”, ECS-AIMES 2018 Meeting, Cancun, Mexico, September 30 - October 4, 2018.
2. F. Giannazzo, G. Greco, E. Schilirò, R. Lo Nigro, I. Deretzis, A. La Magna, G. Nicotra, F. Roccaforte, F. Iucolano, S. Ravesi, M. Leszczyński, A. Michon, Y. Cordier, B. Pecz, A. Kakanakova, R. Yakimova, “*Towards high frequency devices based on graphene integration with Nitride semiconductors*”, Sixth International Symposium on Graphene Devices (ISGD-6), Saint-Petersbourg, Russia, July 17-21, 2018.
3. A. Kakanakova, D. G. Sangiovanni, G. K. Gueorguiev, P.O.Å. Persson, R. Yakimova, I. Cora, B. Pécz, F. Giannazzo, “*Emerging 2D materials of group III nitrides and MOCVD*”, XL ENFMC Brazilian Physical Society Meeting, Armação dos Búzios, RJ, Brazil, August 27-31, 2017.
4. F. Giannazzo, “*Graphene heterostructures with wide bandgap semiconductors*”, Graphene and related Materials: properties and applications (GM-2016), Paestum, Italy, May 23-27, 2016.
5. F. Giannazzo, “*Advanced nanocharacterization of wide bandgap semiconductors and interfaces with two dimensional materials*”, EMRS Spring Meeting, Symposium L: Wide bandgap materials for electronic devices, Lille, France, May 2-6, 2016.

Presentazioni orali:

- 6 B. Pécz, I. Cora, A. Kakanakova, R. Yakimova, P. Persson, P. Fiorenza, G. Nicotra, F. Giannazzo, “*Growth and atomic resolution characterization of 2D nitride layers on graphene/SiC*”, EMRS-Fall Meeting 2018, Symp. R, Warsaw, Poland, September 17-20, 2018.
- 7 A. Kakanakova, D. G. Sangiovanni, G. K. Gueorguiev, P.O.Å. Persson, R. Yakimova, I. Cora, B. Pécz, F. Giannazzo, “*2D intercalated structures of group III nitrides and MOCVD*”, EMRS-Fall Meeting 2018, Symp. R, Warsaw, Poland, September 17-20, 2018
- 8 I. Cora, A. Kakanakova, B. Pécz, R. Yakimova, F. Giannazzo, “*TEM study of heterostructures of AlN on epitaxial graphene*”, 13th Multinational Congress on Microscopy, Rovinj, Croatia, September 24-29, 2017.

Presentazioni poster:

- 9 E. Schilirò, F. Giannazzo, R. Lo Nigro, G. Greco, F. Roccaforte, P. Prystawko, P. Kruszewski, M. Leszczyński, A. Michon, Y. Cordier, I. Cora, B. Pecz, H. Gargouri, “*Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition of AlN layers on GaN: structural and electrical properties*”, EMRS-Fall Meeting 2018, Symp. R, Warsaw, Poland, September 17-20, 2018.
- 10 P. Fiorenza, E. Schilirò, G. Greco, F. Roccaforte, F. Giannazzo, I. Cora, L. Toth, B. Pecz, “*The project Ghost: Graphene heterostructures with ultra-thin films of wide bandgap semiconductors*”, EMRS-Fall Meeting 2018, Symp. R, Warsaw, Poland, September 17-20, 2018.
- 11 F. Roccaforte, F. Giannazzo, P. Fiorenza, S. Di Franco, A. Alberti, M. Spera, M. Cannas, F. Iucolano, I. Cora, B. Pecz, G. Greco, “*Macroscopic and microscopic characterization of inhomogeneous Ni Schottky contacts to bulk GaN*”, EMRS-Fall Meeting 2018, Symp. R, Warsaw, Poland, September 17-20, 2018.
- 12 E. Schilirò, F. Giannazzo, R. Lo Nigro, G. Greco, F. Roccaforte, P. Prystawko, P. Kruszewski, M. Leszczyński, A. Michon, Y. Cordier, I. Cora, B. Pecz, H. Gargouri, “*Structural and electrical properties of epitaxial AlN films on GaN grown by low temperature plasma-assisted atomic layer deposition*”, Sixth European Conference on Crystal Growth (ECCG6), Varna, Bulgaria, September 16–20, 2018.

3. Presentazioni a congress nazionali:

Presentazioni su invito:

1. F. Giannazzo, “*Electronic transport in graphene heterojunctions with wide bandgap semiconductors*”, 102° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica (SIF), Padova, Italia, 26-30 Settembre, 2016.

5. Pubblicazioni di libri internazionali:

1. F. Giannazzo, G. Fisichella, G. Greco, P. Fiorenza, F. Roccaforte, “*Conductive Atomic Force Microscopy of Two-Dimensional Electron Systems: From AlGaN/GaN Heterostructures to Graphene and MoS₂*” Chapter 7 of “*Conductive Atomic Force Microscopy: Applications in Nanomaterials*”, pp. 163–186, Editor: M. Lanza, WILEY-VCH Verlag, Weinheim 2017, ISBN: 978-3-527-34091-0.

12. Protocolli

E’ stato messo a punto uno specifico protocollo per la preparazione di campioni TEM in sezione di eterostrutture grafene/Nitruri/SiC usando la tecnica del Focused Ion Beam (FIB).

13. Nuovi materiali

Eterostrutture di grafene con strati sottili o ultrasottili di semiconduttori III-N ottenute mediante due approcci complementari:

- (i) Intercalazione all’interfaccia fra Gr epitassiale e SiC(0001) di specie atomiche del III gruppo (In, Ga, Al) e di N, prodotti dalla decomposizione dei precursori MOCVD.
- (ii) Trasferimento di singoli strati atomici di Gr (cresciuto mediante CVD su rame) sulla superficie di eterostrutture Al(Ga)N/GaN.

14. Nuovi processi:

Nel corso del progetto GHOST sono stati sviluppati i seguenti processi fondamentali per la fabbricazione di dispositivi basati su eterostrutture Gr/III-N:

- (i) La crescita a bassa temperatura (300 °C) di strati sottili di AlN su GaN mediante la tecnica dell’atomic layer deposition (ALD) assistito da plasma;
- (ii) La deposizione di strati sottili di isolanti ad alta costante dielettrica (Al₂O₃, HfO₂) su Gr mediante un processo ALD termico con un seed layer “in-situ”;
- (iii) La fabbricazione e la caratterizzazione strutturale ed elettrica su scala macroscopica e nanometrica di contatti Schottky a base di Ni su substrati di GaN bulk.

17. Progetti di ricerca:

1. Come evoluzione di alcune tematiche di ricerca del progetto GHOST, il CNR-IMM ha sottomesso un progetto di ricerca nazionale (Bando PRIN 2017), coordinatore Dr. Filippo Giannazzo.
2. Nel corso del progetto GHOST, il gruppo di ricerca del HAS-MFA coordinato dal Dr. Bela Pecz ha ricevuto un finanziamento nazionale per l’acquisizione di un nuovo microscopio TEM ad alta risoluzione. Gli esperimenti effettuati sui campioni del progetto sono serviti per la validazione di questa nuova strumentazione.

20. Formazione avanzata

4 giovani ricercatori hanno ricevuto una formazione avanzata nel corso del progetto:

G. Fisichella, G. Greco, E Schilirò (CNR-IMM)

I. Cora (HAS)

21. Organizzazione di Congressi Internazionali/Simposi:

Simposio R “*New frontiers in wide-bandgap semiconductors and heterostructures for electronics, optoelectronics and sensing*” durante l’EMRS-Fall Meeting 2018.

Symposium Organizers:

G. Greco (CNR-IMM, Catania, Italy); B. Pecz (HAS, Budapest, Hungary); A. Kakanakova (Linköping University, Sweden); P. Kruszewski (UNIPRESS, Poland).

7. Detailed information on results indicated under point 6

1. Scientific publications on international reviews with IF:

1. G. Greco, F. Giannazzo, P. Fiorenza, S. Di Franco, A. Alberti, F. Iucolano, I. Cora, B. Pecz, F. Roccaforte, Phys. Status Solidi A 215, 1700613 (2018).
2. F. Giannazzo, G. Fisichella, G. Greco, A. La Magna, F. Roccaforte, B. Pecz, R. Yakimova, R. Dagher, A. Michon, Y. Cordier, Phys. Status Solidi A 214, 1600460 (2017).

2. Presentations in international congresses:

Invited talks:

- 3 R. Yakimova, A. Kovacs, A. Kakanakova, F. Giannazzo, B. Pecz, “*Interfacing Graphene with III-Nitrides for Power Device Applications*”, ECS-AIMES 2018 Meeting, Cancun, Mexico, September 30 - October 4, 2018.
- 4 F. Giannazzo, G. Greco, E. Schilirò, R. Lo Nigro, I. Deretzis, A. La Magna, G. Nicotra, F. Roccaforte, F. Iucolano, S. Ravesi, M. Leszczyński, A. Michon, Y. Cordier, B. Pecz, A. Kakanakova, R. Yakimova, “*Towards high frequency devices based on graphene integration with Nitride semiconductors*”, Sixth International Symposium on Graphene Devices (ISGD-6), Saint-Petersbourg, Russia, July 17-21, 2018.
- 5 A. Kakanakova, D. G. Sangiovanni, G. K. Gueorguiev, P.O.Å. Persson, R. Yakimova, I. Cora, B. Pécz, F. Giannazzo, “*Emerging 2D materials of group III nitrides and MOCVD*”, XL ENFMC Brazilian Physical Society Meeting, Armação dos Búzios, RJ, Brazil, August 27-31, 2017.
- 6 F. Giannazzo, “*Graphene heterostructures with wide bandgap semiconductors*”, Graphene and related Materials: properties and applications (GM-2016), Paestum, Italy, May 23-27, 2016.
- 7 F. Giannazzo, “*Advanced nanocharacterization of wide bandgap semiconductors and interfaces with two dimensional materials*”, EMRS Spring Meeting, Symposium L: Wide bandgap materials for electronic devices, Lille, France, May 2-6, 2016.

Oral presentations:

- 8 B. Pécz, I. Cora, A. Kakanakova, R. Yakimova, P. Persson, P. Fiorenza, G. Nicotra, F. Giannazzo, “*Growth and atomic resolution characterization of 2D nitride layers on graphene/SiC*”, EMRS-Fall Meeting 2018, Symp. R, Warsaw, Poland, September 17-20, 2018.
- 9 A. Kakanakova, D. G. Sangiovanni, G. K. Gueorguiev, P.O.Å. Persson, R. Yakimova, I. Cora, B. Pécz, F. Giannazzo, “*2D intercalated structures of group III nitrides and MOCVD*”, EMRS-Fall Meeting 2018, Symp. R, Warsaw, Poland, September 17-20, 2018
- 10 I. Cora, A. Kakanakova, B. Pécz, R. Yakimova, F. Giannazzo, “*TEM study of heterostructures of AlN on epitaxial graphene*”, 13th Multinational Congress on Microscopy, Rovinj, Croatia, September 24-29, 2017.

Poster presentations:

- 11 E. Schilirò, F. Giannazzo, R. Lo Nigro, G. Greco, F. Roccaforte, P. Prystawko, P. Kruszewski, M. Leszczyński, A. Michon, Y. Cordier, I. Cora, B. Pecz, H. Gargouri, “*Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition of AlN layers on GaN: structural and electrical properties*”, EMRS-Fall Meeting 2018, Symp. R, Warsaw, Poland, September 17-20, 2018.
- 12 P. Fiorenza, E. Schilirò, G. Greco, F. Roccaforte, F. Giannazzo, I. Cora, L. Toth, B. Pecz, “*The project Ghost: Graphene heterostructures with ultra-thin films of wide bandgap semiconductors*”, EMRS-Fall Meeting 2018, Symp. R, Warsaw, Poland, September 17-20, 2018.
- 13 F. Roccaforte, F. Giannazzo, P. Fiorenza, S. Di Franco, A. Alberti, M. Spera, M. Cannas, F. Iucolano, I. Cora, B. Pecz, G. Greco, “*Macroscopic and microscopic characterization of inhomogeneous Ni Schottky contacts to bulk GaN*”, EMRS-Fall Meeting 2018, Symp. R, Warsaw, Poland, September 17-20, 2018.
- 14 E. Schilirò, F. Giannazzo, R. Lo Nigro, G. Greco, F. Roccaforte, P. Prystawko, P. Kruszewski, M. Leszczyński, A. Michon, Y. Cordier, I. Cora, B. Pecz, H. Gargouri, “*Structural and electrical properties of epitaxial AlN films on GaN grown by low temperature plasma-assisted atomic layer deposition*”, Sixth European Conference on Crystal Growth (ECCG6), Varna, Bulgaria, September 16–20, 2018.

3. Presentations in national congresses:

Invited talks:

2. F. Giannazzo, “*Electronic transport in graphene heterojunctions with wide bandgap semiconductors*”, 102° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica (SIF), Padova, Italia, 26-30 Settembre, 2016.

5. Publication of international books:

2. F. Giannazzo, G. Fisichella, G. Greco, P. Fiorenza, F. Roccaforte, “*Conductive Atomic Force Microscopy of Two-Dimensional Electron Systems: From AlGaIn/GaN Heterostructures to Graphene and MoS₂*” Chapter 7 of “*Conductive Atomic Force Microscopy: Applications in Nanomaterials*”, pp. 163–186, Editor: M. Lanza, WILEY-VCH Verlag, Weinheim 2017, ISBN: 978-3-527-34091-0.

12. Protocols

Specific preparation protocol for cross-sectional TEM samples of graphene/Nitrides/SiC heterostructures using the focused ion beam (FIB) technique.

13. New materials

Graphene heterostructures with thin or ultrathin films of group III-Nitride semiconductors obtained by two complementary approaches:

- (iii) Intercalation of the group III (e.g., In, Ga, Al) and N species, produced by MOCVD precursors decompositions, at the interface between epitaxial Gr and SiC(0001).
- (iv) Transfer of Gr monolayer (grown by CVD on Cu) to the surface of Al(Ga)N/GaN heterostructures.

14. New processes:

Some key process steps for the fabrication of devices based on Gr/III-N heterostructures have been investigated during the GHOST. These included:

- (iv) Growth of thin AlN films on GaN by low temperature plasma-assisted atomic layer deposition (ALD);
- (v) Deposition of thin film of high-k dielectrics onto Gr by thermal ALD with an “in-situ” seeding layer process;
- (vi) Fabrication and macro/nanoscale structural and electrical characterization of Ni Schottky contacts onto bulk GaN.

17. Research Projects:

1. A national research project (PRIN call 2017) has been submitted by CNR-IMM (coordinator Dr. Filippo Giannazzo), as a development of some activities run in the GHOST project.
2. During GHOST, the HAS-MFA group led by Dr. Bela Pecz was awarded with a national grant for the acquisition of a new high resolution TEM. Experiments performed within the GHOST bilateral project served for the validation of this new instrumentation.

20. Training

Four young researchers have been involved in the training program:

G. Fisichella, G. Greco, E Schilirò (CNR-IMM)

I. Cora (HAS)

21. Organization of International Conferences/Symposia:

Symposium R “*New frontiers in wide-bandgap semiconductors and heterostructures for electronics, optoelectronics and sensing*” at EMRS-Fall Meeting 2018.

Symposium Organizers:

G. Greco (CNR-IMM, Catania, Italy); B. Pecz (HAS, Budapest, Hungary); A. Kakanakova (Linköping University, Sweden); P. Kruszewski (UNIPRESS, Poland).

8. Formazione di giovani ricercatori

Training of young researchers

During the project, a high level training has been provided to the young researchers involved in the project on the following topics:

1. Physics and technology of wide-bandgap semiconductors, 2D materials and their heterostructures.
2. Advanced characterization techniques (transmission electron microscopy, atomic force microscopy, conductive atomic force microscopy) applied to the structural/chemical/electrical characterization of ultra-thin films and heterostructures.

Training was provided both within the host institutions and during the short-term visits to the partner laboratories. In particular, the following young researchers have been involved in the training program:

G. Fisichella, G. Greco, E. Schilirò (CNR-IMM)

I. Cora (HAS)

9. Motivazione degli sviluppi della collaborazione negli anni successivi

(eventuali estensione ad altri paesi, collaborazioni multilaterali, contratti nazionali o internazionali)

Il progetto bilaterale GHOST 2016-2018 ha tratto beneficio dalla partecipazione del CNR-IMM e del HAS-MFA al progetto europeo GRIFONE (1 Febbraio 2016 – 31 Gennaio 2019), coordinato dall'università di Linköping (Svezia). Nello stesso periodo, il CNR-IMM ha coordinato un altro progetto europeo (GraNitE) della stessa call, con partners STMicroelectronics (Italia), CNRS-CRHEA (Francia), UNIPRESS (Polonia).

Ciò ha permesso all'IMM e al MFA di far parte di un network europeo di gruppi di ricerca accademici ed industriali nel campo delle eterostrutture dei materiali 2D con i semiconduttori ad ampia banda proibita.

I risultati scientifici estremamente promettenti di queste iniziative di ricerca e la prospettiva di nuove applicazioni ha stimolato la sottomissione di nuovi progetti di ricerca da parte di IMM ed MFA, sia individualmente (a libello nazionale) che in maniera congiunta (a livello europeo) nel contesto della suddetta rete di gruppi di ricerca.

Il CNR-IMM ha già sottomesso un progetto di ricerca nazionale (Bando PRIN 2017) avente per oggetto "2DIntegrate: 2D materials integration with Nitride semiconductors for advanced Electronics" (coordinatore Dr. Filippo Giannazzo). Le proposte sono attualmente in fase di valutazione e i risultati sono attesi per la fine dell'anno. Se finanziato, questo progetto PRIN potrà trarre beneficio dalla prosecuzione della collaborazione fra IMM e MFA.

Il CNR-IMM è partner, con il suo laboratorio STEM, di una iniziativa europea recentemente finanziata (ESTEEM 3), avente fra i suoi obiettivi quello di supportare l'accesso ad infrastrutture di microscopia elettronica avanzate. L'ulteriore sviluppo della collaborazione fra il CNR-IMM e HAS-MFA potrà trarre beneficio anche da questa iniziativa.

Infine, è stata pianificata la preparazione a proposte progettuali per i prossimi bandi dei progetti europei, in collaborazione con altri laboratori partners.

Tutte queste ragioni giustificano la prosecuzione della collaborazione fra CNR ed IMM col progetto GHOST II (2019-2021).

9. Reasons for cooperative project developments in the following years, if any
(extension to other countries, multilateral collaboration, national or international contracts)

The GHOST Bilateral project 2016-2018 took benefit from the involvement of both CNR-IMM and HAS-MFA as partners in the European Project GRIFONE (February 1, 2016 - January 31, 2019) coordinated by Linköping University (Sweden). In the same period, CNR-IMM coordinated another European Project (GraNitE) from the same call, with partners STMicroelectronics (Italy), CNRS-CRHEA (France), UNIPRESS (Poland).

This allowed CNR-IMM and HAS-MFA to be active part of a European network of leading academic and industrial research institution in the field of 2D materials heterostructures with wide bandgap semiconductors.

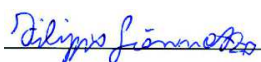
The promising scientific results of these research initiatives and the perspectives for novel applications stimulated the submission of new research proposals by IMM and MFA, both individually (at national level) as well as jointly (at European level) in the framework of the established research network.

A national research project (PRIN call 2017) entitled “2D materials integration with Nitride semiconductors for advanced Electronics (2DIntegrate)” has been submitted by CNR-IMM (coordinator Dr. Filippo Giannazzo). Proposals are currently under evaluation and outcomes are expected by the end of this year. If funded, this project will get benefit from the continuation of the collaboration between CNR-IMM and HAS-MFA.

CNR-IMM is partner of a recently funded European initiative supporting the access to advanced electron microscopy infrastructures (ESTEEM 3). A further development of the collaboration between CNR-IMM and HAS-MFA will benefit also of this initiative.

Preparation of project proposals for forthcoming EU calls in collaboration with the other partner laboratories has been planned.

For all these reasons we believe that the funding of GHOST II project for the 2019-2021 years can be timely and necessary.



(Firma del responsabile italiano del progetto)
Dr. Filippo Giannazzo



(Signature of the project leader)
Dr. Bela Pecz

(Firma del direttore)

Date: September 10, 2018



Firmato da
Fortunato
Guglielmo