

# CURRICULUM VITAE - ALESSIO GIBERTI

---

## DATI ANAGRAFICI

Nato a Ferrara il 07/07/1976

Residente in [REDACTED]

Telefono: cell: [REDACTED]

Ufficio: 0532 974270

Fax: 0532 974210

E-mail: giberti@fe.infn.it

## CURRICULUM STUDIORUM

- Laurea in Fisica conseguita il 31/03/2000 presso la Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali, Dipartimento di Fisica dell'Università di Ferrara con la votazione di 110/110 e lode.
- Dottorato di Ricerca in Fisica conseguito con giudizio ottimo il 18/02/2004 presso la Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali, Dipartimento di Fisica dell'Università di Ferrara.

## FORMAZIONE

- Nel periodo 1999-2000 ho svolto la tesi di Laurea nel campo della fisica teorica. La tesi, dal titolo "Equazioni del moto di un atomo in un campo gravitazionale esterno", mirava a studiare il moto di un atomo in un campo gravitazionale estremamente forte, attraverso la scrittura dell'equazione di Dirac generalmente covariante in uno spazio-tempo curvo. Tenendo conto del momento angolare totale dell'atomo, è possibile dedurre effetti

particolari, come ad esempio una precessione del momento angolare di natura puramente relativistica.

- Da novembre 2000 a novembre 2003, durante il periodo di Dottorato di Ricerca in Fisica sperimentale presso il “Laboratorio Sensori e Semiconduttori” del Dipartimento di Fisica dell’Università di Ferrara, mi sono occupato di proprietà di trasporto elettrico in semiconduttori policristallini, finalizzate ad applicazioni tecnologiche mirate al monitoraggio ambientale di gas inquinanti, sia indoor che outdoor, anche per utilizzi industriali. La tesi di Dottorato, intitolata “Caratterizzazioni chimico-fisiche di sensori da ossidi semiconduttori per misure indoor di gas tossici, con particolare riguardo agli idrocarburi ciclo-olefinici”, ha avuto come obiettivo principale lo studio dell’applicabilità dei sensori chimici ottenuti con la tecnologia del film spesso ad una problematica di tipo industriale. La borsa di dottorato è stata finanziata da BASELL Italia.
- Nel 2001 ho seguito un corso di cristallografia presso Basell, tenuto dal Prof. Carmelo Giacobuzzo dell’Università di Bari.
- Nel 2002 ho partecipato ad una scuola estiva di fisica dei laser presso l’Università di Ferrara.
- Nel 2004 ho partecipato ad una scuola di sensoristica organizzata dall’AISEM (Associazione Italiana Sensori e Microsistemi).
- Successivamente alla conclusione del Dottorato di Ricerca, da febbraio a settembre 2004, ho svolto una collaborazione coordinata e continuativa di ricerca Post Doc con il Dipartimento di Fisica dell’Università di Ferrara, presso il “Laboratorio Sensori e Semiconduttori”. Ambito della ricerca: approfondimento delle proprietà di interferenza dell’umidità atmosferica nella rilevazione di gas di interesse ambientale attraverso nanostrutture di ossidi semiconduttori chemoresistivi. In questo periodo ho proseguito il lavoro iniziato durante la tesi di Dottorato, mettendo a punto un algoritmo per la compensazione dell’interferente umidità sul segnale di un sensore chemoresistivo.

- Da settembre 2004 fino ad oggi, sono stato titolare di tre Assegni di Ricerca nel settore disciplinare FIS/01, per un periodo totale di 5 anni, tenendo conto dei rinnovi. Inoltre ho svolto anche alcune collaborazioni coordinate e continuative con il Dipartimento di Fisica dell'Università di Ferrara e il Consorzio Ferrara Ricerche. Durante questo periodo ho svolto ricerche nel campo della fisica dei semiconduttori nanofasici, mirate ad applicazioni tecnologiche per il monitoraggio ambientale di gas inquinanti, presso il Laboratorio Sensori e Semiconduttori del Dipartimento di Fisica dell'Università di Ferrara.
- Sono stato ricercatore per il Laboratorio MIST E-R, afferente alla Rete Alta Tecnologia dell'Emilia-Romagna, sin dalla sua nascita. Il Progetto è stato attivo da Giugno 2005 a Dicembre 2007, finanziato dal Programma Regionale per la Ricerca Industriale, l'Innovazione e il Trasferimento Tecnologico (PRRIITT), Misura 3.4 - Azione A – Bando D.G.R. 333/04, il cui acronimo significa “Laboratorio di Micro e Submicro Tecnologie Abilitanti dell'Emilia-Romagna”. Lo scopo del Laboratorio (in forma giuridica di Associazione Temporanea di Scopo, trasformata nel corso del 2009 in Società Consortile), coordinato dal CNR di Bologna, è quello di attivare un punto di riferimento regionale in grado di mettere a disposizione delle imprese tecnologie per la realizzazione di microsistemi elettromeccanici (MEMS), ottici (MOS), elettroottici (MEOS), ecc., in cui le competenze dei diversi partner sono riunite al servizio del Trasferimento Tecnologico. In questo Progetto ho lavorato nell'ambito del sottoprogetto B, dal titolo “Sviluppo di tecnologie abilitanti per la realizzazione di micro e sub micro sistemi ibridi”, grazie al finanziamento di Assegni di Ricerca sulla tematica “Modelli di trasporto elettrico in semiconduttori di ossidi metallici nanostrutturati”.
- Nel corso del 2008 ho fatto parte del Progetto europeo CEHIS (Connectivity between Environment and Health Information Systems). Il Progetto, coordinato dall'Institute for environment and sustainability (Ispra), mirava a elaborare strategie per migliorare i database dei sistemi informativi riguardanti salute e ambiente in Europa, con particolare riguardo alla connettività fra di essi.

- In Dicembre 2008 sono stato, in qualità di ricercatore italiano, al Laboratorio de Catalizadores y Superficies del Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología di Mar del Plata, in Argentina, all'interno di un accordo di cooperazione scientifica tra il CNR e il CONICET (Argentina), nell'ambito del Progetto comune Carotta/Aldao, per approfondire vari aspetti della ricerca sugli ossidi semiconduttori nanostrutturati. Il gruppo diretto dal Prof. C.M. Aldao collabora con il Laboratorio Sensori e Semiconduttori dell'Università di Ferrara dal 2007.
- Sono stato ricercatore per il Laboratorio PRO MI N E-R, afferente alla Rete Alta Tecnologia dell'Emilia-Romagna, finanziato dal Programma Regionale per la Ricerca Industriale, l'Innovazione e il Trasferimento Tecnologico (PRRIITT), Misura 4 - Azione A – Bando D.G.R. 1853/07. Il Progetto, attivo da Novembre 2008 ad Aprile 2010, il cui acronimo significa “Progetto per le Micro e Nano Tecnologie in Emilia Romagna”, rappresenta la naturale continuazione del Progetto MIST E-R. In questo Progetto ho lavorato nell'ambito del sottoprogetto B, dal titolo “Produzione di nuove micro-nanostrutture per applicazioni avanzate”, grazie al finanziamento di Assegni di Ricerca sulla tematica “Modelli di trasporto elettrico in semiconduttori di ossidi metallici nanostrutturati”.
- Al momento attuale ho un contratto a Progetto con la società MIST E-R, il cui tema è sulle proprietà elettriche delle nanostrutture di ossidi metallici per applicazioni sensoristiche.

### **ATTIVITÀ DIDATTICA**

- Negli anni accademici 2005/2006, 2006/2007 e 2007/2008 sono stato professore a contratto per l'insegnamento di “Teoria ed esercitazioni di tribologia”, corso integrativo al corso di Fisica Generale I (FIS 01), presso l'Università degli Studi di Ferrara, Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica.

- Negli anni accademici 2006/2007 e 2007/2008 ho svolto alcune supplenze per il corso “Statistica e Probabilità”, nel Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Meccanica.
- Negli anni accademici 2007/2008 e 2008/2009 sono stato professore a contratto con completa responsabilità del corso per l’insegnamento di “Fisica Generale II – Elettromagnetismo ed Ottica” (FIS 01) nel Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica.
- Negli anni accademici 2008/2009, 2009/2010 e 2010/2011 ho svolto il corso “Statistica inferenziale e bayesiana in applicazioni ingegneristiche”, integrativo al corso “Statistica e probabilità”, nel Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Meccanica.

Sono stato inoltre correlatore in alcune tesi di Laurea, sia triennale che specialistica, in Ingegneria Meccanica.

### **ATTIVITÀ DIVULGATIVA**

- Dal 2002 ad oggi ho partecipato diversi congressi nazionali e internazionali con contributi orali e poster.
- Nel 2002 ho fatto parte del comitato organizzativo dell’iniziativa di divulgazione scientifica intitolata “Porte Aperte al Dipartimento di Fisica”, iniziativa sponsorizzata dal Dipartimento di Fisica e INFN.
- Nel 2008, nell'ambito del Laboratorio MIST E-R, della Rete Alta Tecnologia dell'Emilia-Romagna, ho partecipato alla fiera R2B-Research To Business, presentando un poster sul monitoraggio ambientale di gas inquinanti tramite sensori a stato solido.

## **RICONOSCIMENTI**

Nel 2003, in occasione della conferenza nazionale AISEM 2003, Trento, 12-14 Febbraio, ho vinto il premio “Best Poster Award”, grazie al poster intitolato “Compensation of humidity effects for on-field environmental monitoring”.

## **LINGUE STRANIERE**

- *Inglese*- Conoscenza dell’inglese sia scritto che parlato.

## **RUOLI EDITORIALI**

- Dal 2006 sono referee della rivista internazionale “Sensors and Actuators B-Chemical” (rank 1 tra le riviste Instruments and Instrumentations).
- Dal 2008 sono referee della rivista internazionale “Sensors”.
- Dal 2009 sono referee della rivista internazionale “Journal of Physics D: Applied Physics”.

## **ATTIVITÀ DI RICERCA**

La struttura presso la quale ho svolto ricerca è il “Laboratorio Sensori e Semiconduttori” del Dipartimento di Fisica dell’Università di Ferrara, fondato dal Prof. Giuliano Martinelli (1938-2010). Il Laboratorio è impegnato principalmente in tre tipi di attività, quali: sensori chemoresistivi a film spesso, energia fotovoltaica, e channeling di particelle attraverso cristalli di silicio incurvati. Io ho lavorato nel settore dei sensori chemoresistivi, svolgendo attività di ricerca principalmente rivolta alla fisica dei semiconduttori, con particolare riguardo alle proprietà elettriche delle nanostrutture di ossidi metallici per applicazioni tecnologiche

avanzate, finalizzate alla rilevazione di specie chimiche in fase gassosa. Per quanto concerne il settore sensori, il Laboratorio si occupa della prototipazione, realizzazione (dalla produzione del materiale a partire dai precursori fino al dispositivo finale) e studio di sensori chimici ad ossidi metallici semiconduttori. Questi dispositivi sono costituiti da un substrato di allumina sul quale viene depositato con tecnologia serigrafica un film dalle proprietà chemoresistive, costituito da una nanostruttura di ossidi semiconduttori. Il substrato è provvisto di contatti interdigitati per la lettura della resistenza del film sensibile e un riscaldatore in platino per il funzionamento in temperatura. Il fenomeno della chemoresistività, principio di funzionamento di questi dispositivi, si manifesta attraverso una relazione diretta tra la composizione chimica della fase gassosa e la resistenza elettrica del film sensibile. Esso ha origine dalla presenza di stati superficiali all'interfaccia solido-gas, che vengono occupati da elettroni provenienti da stati donori di bulk ionizzati, attraverso l'adsorbimento di ossigeno dalla fase gassosa, con un conseguente ricoprimento ionico della superficie. Ciò crea una zona di carica spaziale di segno opposto che si estende nel bulk, con conseguente formazione di un campo elettrico e di una barriera di potenziale elettrostatico alla superficie dei nanograni che costituiscono il film sensibile. Il modello di conduzione elettrica deve essere quindi un modello di tipo barrier crossing, che tiene conto sia della corrente termoionica che di tunneling quanto-meccanico attraverso la barriera. In definitiva, le proprietà chemoresistive della nanostruttura sono dovute al fatto che l'occupazione degli stati superficiali, che dipende fortemente dalla composizione chimica della fase gassosa, controlla la barriera intergranulare, e di conseguenza la resistenza elettrica del film sensibile.

I filoni di ricerca di cui mi sono occupato si possono essenzialmente dividere in:

1. *Meccanismi di trasporto elettrico in semiconduttori nanofasici;*
2. *Prototipazione di sensori a film spesso per monitoraggio ambientale e loro applicazioni.*

Questi due aspetti della ricerca sono legati in maniera indissolubile, in quanto una profonda comprensione della fisica che governa i fenomeni in gioco è un requisito fondamentale per l'applicazione tecnologica.

## 1. Meccanismi di trasporto elettrico in semiconduttori nanofasici

Lo studio sperimentale delle proprietà elettriche e l'elaborazione teorica di un modello di conduzione affidabile sono due aspetti che, congiunti, permettono di chiarire il comportamento chemoresistivo dei materiali sensibili utilizzati nella sensoristica. Il modello deve tenere conto della corrente termoionica e di tunneling (quest'ultima non semplice da calcolare), che hanno diversa dipendenza dalla temperatura, dall'altezza e dalla forma della barriera di potenziale intergranulare, che a sua volta ha una dipendenza non banale dalla temperatura e dalla composizione chimica dell'atmosfera, del fenomeno della diffusione di ossigeno atomico nel bulk, che influisce sulla concentrazione di difetti, della densità di stati superficiali, che è connessa al fenomeno del Fermi Level Pinning, e di altri fattori. Per cui, la complessità dei meccanismi coinvolti rende necessario portare a termine diversi tipi di indagine, da condurre attraverso varie tecniche. L'obiettivo ultimo è chiarire le proprietà elettriche al fine dell'applicazione ambientale, rivolta al gas sensing.

Il biossido di titanio è un materiale semiconduttore noto nel campo dei sensori di gas per le sue proprietà chemioresistive. Una ricerca portata a termine durante il periodo di dottorato è stata un'indagine sulle proprietà ottiche della polvere di biossido di titanio tramite fotoluminescenza nel range di lunghezze d'onda 360-890 nm. La tecnica è in grado di fornire informazioni fondamentali sugli stati energetici all'interno dell'energy gap del materiale. Utilizzando un laser Ar-Kr, è stato possibile evidenziare, dalla forma della curva di fotoluminescenza e dallo Stokes shift, l'esistenza di un campo fononico locale in presenza di difetti di tipo stechiometrico (vacanze d'ossigeno), attraverso un'interpretazione basata su un modello a singola coordinata configurazionale (SCC). Il modello interpretativo ha permesso di attribuire l'origine della fotoluminescenza, per entrambe le fasi rutilo ed anatasio, alla ionizzazione delle vacanze di ossigeno. La ricerca si sviluppò all'interno di un più ampio progetto del Laboratorio Sensori e Semiconduttori per indagare sulle proprietà del biossido di titanio. Per questa indagine è stata attivata una collaborazione con il Dipartimento di Scienza dei Materiali di Milano, presso il quale mi sono recato per una serie di misure, ed è sfociata in un articolo su rivista [1].

Mi sono occupato di indagini eseguite con la tecnica di spettroscopia di impedenza, impiegata per acquisire informazioni sulla risposta dielettrica dei materiali costituenti i film

spessi utilizzati come materiale per gas sensing. È stata approfondita la risposta dielettrica universale partendo dal modello di Debye, misurando la permittività apparente dei materiali e ricavando indirettamente la permittività effettiva dai dati sperimentali attraverso un fit contenente elementi a fase costante, utilizzando modelli che si avvalgono di distribuzioni di condensatori e resistori, i quali approssimano la struttura resistivo-capacitiva dei film analizzati. Tale analisi, oltre a fornire una grandezza fondamentale, altrimenti incognita, è inoltre importante per la corretta determinazione della dimensione della zona di svuotamento, il cui ruolo è cruciale nella fisica dei semiconduttori nanostrutturati. Inoltre, misure sperimentali eseguite con questa tecnica sono state impiegate per evidenziare l'importanza dell'in-out-diffusion, processo di diffusione nel bulk di atomi di ossigeno dalla fase gassosa, fenomeno che influisce sulla forma della barriera di potenziale e quindi sulla corrente di tunneling. Infatti, nel biossido di stagno si è sottolineato il ruolo fondamentale di questo processo di diffusione nel fenomeno dell'isteresi elettrica [13]. Nel biossido di titanio è stato possibile fornire un limite superiore per la permittività relativa nel caso di grani completamente svuotati [15]. Il modello di conduzione elettrica impiegato per analizzare le risposte capacitive è basato su entrambi i possibili fenomeni di conduzione: attraversamento della barriera intergranulare per effetto termoionico e per tunneling. Le ricerche su questo argomento vengono anche condotte in collaborazione con l'Institute of Material Science and Technology (INTEMA) dell'Università di Mar del Plata, Argentina.

Negli ultimi anni l'effetto della radiazione luminosa sulla conduttanza dei sensori a film spesso ha suscitato un interesse sempre maggiore nella comunità scientifica, per via del fatto che materiali già noti per le loro buone caratteristiche di sensing mostrano anche un comportamento fotocatalitico, infatti sperimentalmente si è visto come in alcuni casi è possibile raggiungere ottimi livelli di sensibilità e velocità di risposta tramite illuminazione ultravioletta (UV) su un film mantenuto a temperatura ambiente. Ho eseguito misure di caratterizzazione elettrica sui principali materiali utilizzati dal Laboratorio Sensori e Semiconduttori per la sensoristica, in particolare triossido di tungsteno, ossido di zinco e biossido di stagno, con particolare riguardo al sensing di ozono e dei principali inquinanti atmosferici. Sono state eseguite indagini sull'intensità della risposta, sui tempi di risposta al gas e di ritorno in aria, Arrhenius plots e misure di barriera con il metodo dei salti stimolati di temperatura, il tutto con e senza illuminazione UV. I risultati evidenziano come l'illuminazione del film possa essere una buona alternativa al funzionamento in temperatura.

Il fatto che materiali a minore gap mostrino un maggiore incremento di conducibilità con l'illuminazione dimostra la presenza dell'iniezione elettronica in banda di conduzione. Ciononostante, indagini eseguite in aria e azoto hanno mostrato anche l'esistenza di un processo di desorbimento di ossigeno assistito da radiazione. In particolare l'effetto che i fotoni possono avere sulla barriera di superficie rispetto alle transizioni elettroniche banda a banda è estremamente importante per capire a fondo la fisica di questi materiali. Parte delle ricerche riguardanti l'effetto dell'illuminazione UV sui film di ossidi semiconduttori sono state condotte in collaborazione con il dipartimento di Chimica e Fisica di Brescia e l'Università di Swansea, UK [5].

Diversi parametri ambientali influenzano la conducibilità dei film spessi, ed uno dei più importanti è la temperatura ambiente. La letteratura specialistica ha da sempre trattato il problema della fisica e chimica della superficie del film sensibile come un sistema all'equilibrio, in cui si assume implicitamente l'ipotesi di una temperatura omogenea in tutto il sistema. Il punto fondamentale è che, per ragioni pratiche e di consumo energetico, non è possibile portare tutta la camera di test alla stessa temperatura del film (normalmente fra i 200 °C e i 600 °C), d'altra parte a temperatura ambiente le cinetiche di reazione sono eccessivamente lente e il sensore non lavora nella maniera ideale, perciò esiste un gradiente di temperatura ineliminabile nella zona d'aria nelle immediate vicinanze del film sensibile. Questa importante osservazione è fondamentale per la comprensione della termodinamica del sistema, infatti questa situazione di non-equilibrio implica l'esistenza di un moto convettivo dell'aria sovrastante il film, perciò, pur mantenendo costante la temperatura del film (attraverso un feedback nell'elettronica di controllo), una variazione di temperatura ambiente porta ad una variazione di conduttanza, dovuta al fatto che il diverso gradiente di temperatura induce un differente moto convettivo delle particelle d'aria, che influisce a sua volta sulle cinetiche di reazione. Il modo più semplice di tenere conto di questa situazione di non-equilibrio è osservare che, nonostante le reazioni che determinano la formazione della barriera avvengano a temperatura mantenuta costante, la "sorgente" dei reagenti si trova a temperatura ambiente. Per cui, l'equilibrio di reazione è determinato non dalla pressione parziale del reagente, che rimane costante al variare della temperatura ambiente, ma dal numero di urti per unità di tempo delle molecole con la superficie, parametro che dipende dalla temperatura ambiente (in un sistema all'equilibrio termodinamico non è necessario fare questa distinzione). In particolare, una serie di indagini su un sensore mantenuto a temperatura di

lavoro costante, nelle quali si è variata la temperatura ambiente attraverso una camera termostatica, ha rivelato un comportamento, nel range 0-50 °C, parzialmente spiegabile con questo modello [11]. Il modello è tuttora in fase di approfondimento.

In conseguenza dell'importanza che la temperatura ambiente gioca nel comportamento del sensore, è stato ritenuto utile capire a fondo come funziona lo scambio termico nel sistema sperimentale, per questo motivo ho sviluppato un modello matematico di scambio termico basato sui termini di convezione, conduzione e irraggiamento scambiati fra le parti fondamentali dell'apparato. Il modello si traduce in tre equazioni da risolvere numericamente per ottenere le temperature del film e dell'aria nei suoi dintorni in funzione della temperatura ambiente e della tensione elettrica fornita al riscaldatore. Il modello, in particolare, permette la previsione della temperatura dell'aria a contatto con il film in funzione della temperatura ambiente, che è proprio quella che ragionevolmente deve intervenire nella determinazione della conduttanza del film. Il modello è stato poi testato con i dati sperimentali; sono state confrontate le temperature predette in funzione della tensione al riscaldatore e confrontate con quelle misurate attraverso termocoppie e sensori NTC installati ad hoc sul sistema per condurre questa verifica, il cui risultato è stato decisamente positivo: il modello prevede le temperature del sistema in maniera soddisfacente (l'emissività del film è stata dedotta attraverso un pirometro). Un grosso pregio del modello è quello di poter correlare, negli studi di risposta al gas a diverse temperature ambiente, le variazioni osservate nella risposta con le variazioni di temperatura dell'aria vicino al film, senza dover installare scomodi sistemi per il rilevamento di queste temperature. Inoltre ha permesso di capire l'influenza dei vari termini nel bilancio termico globale, quantificando ad esempio l'influenza dell'intensità del flusso nella camera di test [9].

L'enorme importanza rivestita dalla dimensione dei grani è stata investigata dal punto di vista del potenziale elettrostatico nel grano attraverso l'equazione di Poisson in coordinate sferiche. Quando infatti il raggio del grano scende a dimensioni comparabili con la lunghezza di estinzione del potenziale, la descrizione in coordinate piane non è più accurata. In questo modo è stato possibile evidenziare forti differenze fra il biossido di stagno e il biossido di titanio. Utilizzando valori sperimentali noti di barriera, permittività elettrica e doping level, è risultato che, nel range in cui il raggio del grano è compreso fra 50 e 150 nm, il biossido di stagno abbia una densità di stati superficiali quasi costante, mentre per il biossido di titanio al di sotto dei 60 nm si abbia una forte decrescita. Tramite questa importante osservazione è

possibile affermare che nel range indicato il biossido di stagno non possa essere considerato nanostrutturato, contrariamente al biossido di titanio, in quanto l'alta densità di stati superficiali porta al fenomeno del pinning del livello di Fermi, che vincola l'altezza della barriera intergranulare al livello di neutralità degli stati superficiali (teoria di J. Bardeen). Questa indagine è stata condotta all'interno di una ricerca a più ampio spettro sull'applicabilità sei sensori a film spesso nelle problematiche ambientali [8].

È stato preso in considerazione anche il problema del profilo temporale della risposta del film spesso ad un gradino di concentrazione di un gas target, in quanto si sono osservati profili di tipo diverso dalla classica forma a "pinna di squalo". Le condizioni sperimentali, come ad esempio il volume della camera di test, hanno un'influenza significativa su questo aspetto, ciononostante profili inaspettati si sono osservati su diversi sistemi di misura, spingendomi ad indagare sulle possibili cause. Le osservazioni hanno portato all'ipotesi di comportamenti di tipo competitivo fra reazioni chimiche superficiali con costanti cinetiche diverse. Per dare credito a questa ipotesi sono state considerate reazioni comprendenti ossigeno atmosferico (che interviene sempre nelle reazioni di superficie) e acqua, ed è stata trovata la dipendenza dal tempo della concentrazione superficiale (a partire da condizioni iniziali definite) attraverso la risoluzione dell'equazione di Kirkwood-Crawford. È risultato che sotto particolari condizioni la competizione fra le due reazioni porta effettivamente a profili del tipo osservato. Il risultato è significativo, nonostante una dimostrazione inconfutabile di questa teoria necessiterebbe dei valori delle costanti cinetiche delle reazioni, che ad oggi non sono noti. I risultati ottenuti sono comunque stati pubblicati nei proceedings della conferenza MRS 2006 [lista proceedings, voce 9].

La tecnica di spettroscopia a riflettanza diffusa è stata utilizzata per studiare le transizioni elettroniche in un ossido misto  $\text{MoO}_3\text{-WO}_3$ , confrontando campioni che hanno subito trattamenti termici a differente temperatura. La diminuzione di densità di donori con l'aumentare della temperatura del trattamento termico evidenziata dalle misure spettroscopiche, si è trovata in accordo con le misure elettriche sul film spesso realizzato con lo stesso materiale. La dipendenza della densità di difetti dal trattamento termico sfocia in una dipendenza inversa nella barriera di superficie, che è stata misurata sperimentalmente per entrambi i campioni con il metodo dei salti stimolati di temperatura (Clifford e Tuma). Questa ricerca è stata svolta in collaborazione con il Dipartimento di Chimica IFM dell'Università di Torino [7].

Il modello di conduzione viene continuamente approfondito, in particolare ora si vuole chiarire il ruolo del Fermi Level Pinning nei grani completamente svuotati, nei quali la lunghezza di estinzione del potenziale è maggiore del raggio del grano. Questo tipo di indagine è molto significativo, in quanto può spiegare comportamenti come le derive a lungo termine e le instabilità dopo brusche variazioni, come i fenomeni di drift della conduttanza in condizioni di stazionarietà della composizione chimica della fase gassosa [17]. In caso di alta densità di stati superficiali in questo tipo di nanostrutture, variazioni di conduttanza in condizioni di atmosfera costante possono essere dovute solamente all'in-diffusion di ossigeno nel bulk, che cambia la forma della barriera, e in particolare l'ampiezza della zona di svuotamento. La costante di diffusione reperibile in letteratura per questo tipo di processo, è in accordo con i tempi caratteristici osservati nelle derive dei sensori. In questa situazione, la corrente termoionica non può subire variazioni, dato che l'altezza di barriera è fissata dal Fermi Level Pinning, per cui la corrente di tunneling è l'unico meccanismo in gioco. Ora si sta lavorando per calcolare il contributo della corrente di tunneling nei grani completamente svuotati.

## **2. Prototipazione di sensori a film spesso per monitoraggio ambientale e loro applicazioni**

L'applicazione dei sensori chemioresistivi al monitoraggio ambientale presenta notevoli vantaggi in termini di costi, manutenzione e ingombro rispetto ai sistemi convenzionali, basati su spettrofotometri e gascromatografia, ragion per cui questo campo di ricerca riveste un notevole interesse tecnologico. Inoltre, essendo il settore particolarmente complesso per via del fatto che l'interazione fra il materiale sensibile ed il gas avviene tramite la superficie dei grani costituenti il film spesso, ed è noto come la fisica e chimica di superficie siano discipline con un forte grado di complessità, ricopre anche un forte interesse scientifico. Il mio contributo si è focalizzato sul tentativo di capire l'influenza dei diversi parametri ambientali sui meccanismi di conduzione elettrica in un film spesso di ossidi semiconduttori.

Il periodo trascorso presso il Laboratorio Sensori e Semiconduttori mi ha permesso di acquisire esperienza nella tecnologia del film spesso e nella caratterizzazione elettrica e ottica di ossidi semiconduttori policristallini, tramite misure di conducibilità elettrica su film spessi.

I film spessi di ossidi semiconduttori, utilizzati per sensoristica ambientale dal Laboratorio Sensori e Semiconduttori, vengono ottenuti per via serigrafica, e sono costituiti da particelle di dimensioni nanometriche. Questo aspetto è di importanza cruciale per il meccanismo di funzionamento come sensore. La dimensione delle particelle del film dipende da quella della polvere di ossido semiconduttore che costituisce la fase funzionale della pasta serigrafica da depositare e che, dopo un opportuno trattamento termico, diventa lo strato sensibile del dispositivo. Attraverso particolari procedimenti chimici in fase di sintesi e trattamenti termici post-produzione della polvere è dunque possibile controllare questo importante parametro. I risultati raggiunti nell'ambito dei materiali per sensing hanno riguardato in particolar modo semiconduttori ad ampio gap quali biossido di stagno, biossido di titanio, triossido di tungsteno, ossido di zinco ed altri, la cui conducibilità è dovuta a difetti di tipo stechiometrico. Sono stati tenuti in considerazione anche gli effetti di opportune additivazioni di altri materiali come oro, palladio e niobio, che possono agire come catalizzatori verso ben determinati inquinanti atmosferici.

La caratterizzazione elettrica dei sensori è un aspetto del quale mi sono occupato a lungo. Tali caratterizzazioni vengono eseguite a varie temperature e con diversi gas target, al fine di trovare il materiale e la temperatura di lavoro più adatti alla rilevazione di un ben determinato gas. Esse vengono sempre eseguite tenendo conto dei risultati delle caratterizzazioni morfologiche e strutturali XRD, SEM, TEM, BET, in maniera tale da correlare le proprietà di sensing agli aspetti morfologico-strutturali del film sensibile.

Il triossido di tungsteno è un materiale che si è rivelato molto utile nella rilevazione degli ossidi di azoto, nocivi per l'uomo e presenti in atmosfera, per cui è stato tenuto in grande considerazione come materiale di sensing. Polveri nanostrutturate di  $WO_3$  sono state prodotte dal Laboratorio Sensori in forma pura e additivata Ta, Zr, Mn tramite diversi procedimenti di sintesi in soluzione acquosa e alcolica, e stampate su substrato come film spesso per sensori. Sono poi state condotte analisi morfologiche e strutturali tramite diffrazione di raggi X, SEM e TEM, attraverso le quali è stato possibile determinarne la microstruttura. Sui film ottenuti sono state eseguite diverse misure in aria sintetica con varie concentrazioni di biossido di azoto ( $NO_2$ ), che hanno dimostrato come il materiale prodotto tramite additivazione sia più resistivo e abbia una minor capacità di risentire della coalescenza dei grani durante la fase di annealing, fase fondamentale nella preparazione della polvere. Dal punto di vista del funzionamento come sensore, il film additivato Ta si è rivelato un ottimo materiale per la

rilevazione del biossido di azoto in concentrazioni al di sotto di 1 ppm (parti per milione), anche dal punto di vista della selettività, dato che si è dimostrato pressoché insensibile ad atmosfere riducenti, in particolare è esente dall'interferenza con il monossido di carbonio [2,4].

Una potenziale applicazione di grande importanza è l'utilizzo industriale di questo tipo di sensori. Su questa tematica ho svolto una ricerca su due idrocarburi ciclo-olefinici (classificabili come cicloalcheni), in particolare 1,5 cicloottadiene e 4-vinil-1-cicloesene, sostanze tipiche di un processo di industria chimica, i cui vapori possono essere estremamente nocivi all'uomo anche in concentrazioni relativamente basse (parti per milione). Importante è stato effettuare la scelta di un particolare set di sensori per il rilevamento di questi vapori, modulando opportunamente le temperature di lavoro e le condizioni operative. In tal modo, dalle misure di laboratorio effettuate in camera pulita secondo i requisiti di sicurezza della normativa vigente, si sono potute evidenziare le differenti sensibilità ai due tipi di vapore. In particolare le risposte differiscono per la forma funzionale della legge di calibrazione, in forma di legge di potenza. Tali forme funzionali si possono spiegare sulla base di un modello a giunzione di semiconduttori non degeneri sotto l'ipotesi di una densità elevata di ossigeno chemisorbito, assieme alla legge di azione di massa applicata alle reazioni chimiche proposte fra la superficie e la fase gassosa [Tesi di Dottorato].

Particolare attenzione è stata data al problema dell'umidità atmosferica come interferente nelle misure di conducibilità di film spessi. È stata innanzitutto dimostrata l'erroneità dell'ipotesi implicita che si trova in letteratura sulla sensibilità dei film di ossidi semiconduttori all'umidità relativa: sfruttando l'equazione di Clapeyron, applicata ad una serie di misure in cui ai sensori sono state applicate diverse concentrazioni di vapore acqueo per tempi molto lunghi, è stato dimostrato che la dipendenza della risposta del sensore all'umidità è determinata dall'umidità assoluta, come pressione parziale del vapor d'acqua o come concentrazione in grammi d'acqua per unità di massa d'aria [lista proceedings, voce 2].

L'interferenza della molecola d'acqua nelle reazioni chimiche alla superficie dei grani si può manifestare in diversi modi, dipendendo innanzitutto dal materiale e dalla temperatura di lavoro. Per il biossido di stagno sono state prese in considerazione diverse reazioni attraverso le quali la molecola si può legare alla superficie, sia attraverso fisisorbimento (legame relativamente debole che si origina dalle attrazioni intermolecolari di tipo Van der Waals) che chemisorbimento, quindi con uno scambio di carica netto con la superficie adsorbente,

andando ad influire direttamente sulla barriera di potenziale intergranulare che modula la conduttanza del film. Le reazioni prese in considerazione conducono ad un comportamento compatibile con quello osservato sperimentalmente e spiegano le distorsioni della risposta ad alcuni gas in ambiente umido rispetto ad un ambiente anidro. L'interazione della molecola d'acqua con alcuni gas d'interesse ambientale ed agroalimentare è stata studiata quantitativamente con una serie di esperimenti ai quali è seguito lo sviluppo di un algoritmo di compensazione del segnale basato sulla legge di risposta in funzione della concentrazione (che deriva dalla legge di azione di massa applicata alla particolare reazione in esame, ed è compatibile con le osservazioni sperimentali). L'idea, sviluppata nella mia tesi di dottorato ed in seguito approfondita, consiste nell'eseguire una superficie di calibrazione per il sensore, in altre parole avere una mappatura della risposta del sensore in funzione delle due variabili concentrazione del gas target e concentrazione di acqua. La superficie è poi stata fittata con una funzione di due variabili ottenuta da uno sviluppo teorico che parte dalla legge di risposta al singolo gas, ottenendo una forma funzionale fittabile con i dati sperimentali che, invertita, fornisce la concentrazione di gas a qualsiasi livello di umidità. La funzione trovata presenta anche un notevole significato fisico, infatti dallo sviluppo teorico segue la comparsa di un termine misto interpretabile come l'intensità dell'interazione fra il gas target e l'acqua per il materiale in esame. L'algoritmo di compensazione basato su questa funzione si è dimostrato funzionale e potenzialmente adatto per essere applicato a qualunque coppia di gas. La ricerca è stata inizialmente condotta con l'etilene, un gas di grande importanza nelle applicazioni agro-alimentari, in quanto è un fitormone che controlla il livello di maturazione dei vegetali nelle camere di stoccaggio [3].

In una più ampia ottica, la compensazione di un importante interferente come l'umidità rende possibile il monitoraggio ambientale con sensori a film spesso in situazioni reali, dove l'umidità atmosferica non è mai costante e ha un effetto non trascurabile sulla conduttanza di molti ossidi semiconduttori nanofasici. Un esempio concreto è il monitoraggio di monossido di carbonio e di ossidi di azoto da inquinamento automobilistico nei pressi di un incrocio stradale; in situazioni come queste l'eliminazione dell'interferente umidità è una necessità assoluta. Per questi motivi, la compensazione dell'umidità sul segnale dei sensori a film spesso è stata applicata anche in campo, rispetto a gas di interesse ambientale come il monossido di carbonio, con risultati estremamente soddisfacenti [6].

La rilevazione di alcani leggeri come metano, propano, *i*-butano ecc., è di interesse in diversi campi, come lo studio delle combustioni, produzione di idrogeno, realizzazione di camere per la rilevazione di particelle in fisica nucleare, ecc.. Per cui un sistema compatto in grado di rilevare perdite di questi gas potrebbe avere importanti utilizzi industriali. È stato quindi condotto uno studio in cui soluzioni solide di stagno e titanio in diverse proporzioni, prodotte dal Laboratorio Sensori e Semiconduttori, sono state testate come materiale di sensing nella rilevazione di questi idrocarburi. Sono state scelte le soluzioni solide da utilizzare ed eseguite misure di caratterizzazione elettrica in condizioni di aria secca e umidificata, a diverse temperature di lavoro, ed è stata data un'interpretazione dei risultati ottenuti in termini di reazioni fra il substrato e la fase gassosa. Il risultato è la dimostrazione dell'applicabilità di sensori basati su questo tipo di materiali a problematiche legate alle perdite di alcani leggeri [10]. Naturale prosecuzione di questa ricerca è stato lo studio dell'interferenza di acqua ed etanolo. In test preliminari si è dimostrato come un filtro ai carboni attivi sia già sufficiente per ostacolare considerevolmente l'effetto dell'etanolo, soluzione comunque non definitiva a causa del deterioramento del filtro con il tempo. Si è dimostrato come una soluzione applicabile sia invece il rilevamento della concentrazione di etanolo attraverso un altro sensore basato su biossido di stagno, che a temperature non superiori ai 400°C è insensibile agli alcani. La conoscenza della concentrazione dell'interferente etanolo può essere utilizzata per compensarne l'effetto in maniera del tutto analoga all'umidità atmosferica [14].

L'ossido di Zinco (ZnO) è un semiconduttore ad ampio gap (3.37 eV) di grande utilità in una varietà di applicazioni, come ad esempio celle solari ibride, fotocatalisi, applicazioni piezoelettriche ecc. Inoltre, trattasi di un materiale dalle proprietà di gas sensing ben note, che può essere utilizzato per la rilevazione di gas come idrogeno, biossido di azoto, vapori di ammoniaca e acido solfidrico. Una indagine su questo materiale è stata condotta in collaborazione con l'istituto IMEM del CNR di Parma, che ha fornito polveri di ossido di zinco ottenute tramite una combinazione di processi di trasporto di vapore e metodi di ossidazione controllata. Polveri di ZnO nanostrutturate sono state sintetizzate dal Laboratorio Sensori e Semiconduttori attraverso un procedimento di tipo sol-gel e stampate su substrato per la realizzazione di sensori. L'ossido di Zinco ottenuto dall'IMEM di Parma e quello ottenuto dal Laboratorio Sensori di Ferrara sono stati sottoposti ad analisi SEM e TEM, dimostrando una enorme differenza morfologica causata dai due diversi processi di sintesi.

Ciononostante, i due materiali si sono comportati in maniera analoga rispetto ai gas utilizzati ( $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $CO$  e  $H_2S$ ) dimostrandosi buoni materiali per la rilevazione di gas ossidanti, ozono in particolar modo. Il confronto ha permesso quindi di stabilire differenze e analogie nel sensing di gas ossidanti da parte di ossido di zinco prodotto attraverso procedimenti di sintesi estremamente differenti [12].

La fotocatalisi nell'ossido di Zinco è stata studiata in laboratorio su campioni sintetizzati appositamente, allo scopo di applicare le proprietà di fotoattivazione alla rilevazione dell'ozono. E' stato quindi predisposto un apparato sperimentale comprendente un LED che emette alla lunghezza d'onda di 400 nm, corrispondente a fotoni con energia pari a 3.1 eV. Sono state indagate le proprietà elettriche in presenza e assenza di luce e confrontate con quelle degli stessi sensori, ma attivati tramite funzionamento in temperatura. Si sono evidenziate interessanti caratteristiche, come elevate intensità e velocità di risposta in condizioni di illuminazione, che vengono migliorate in presenza di umidità atmosferica. Le performances sono state confrontate con quelle di un sensore basato su una soluzione solida di ossido di tungsteno e di stagno (denominata WS, in proporzioni W:Sn = 90:10). Nonostante entrambi i materiali, durante il funzionamento in temperatura, siano sensibili all'ozono, a temperatura ambiente e in condizioni di illuminazione solo il sensore basato su ZnO ha mostrato una risposta al gas. Il meccanismo di aumento della conduttanza sotto illuminazione è stato attribuito alla creazione di coppie elettrone-buca assistito da radiazione, con aumento della concentrazione di elettroni in banda di conduzione. Se questo processo avviene nella regione di svuotamento, o la coppia viene trasferita in superficie, può promuovere il desorbimento di ossigeno grazie alla ricombinazione della buca creata con un elettrone appartenente alla carica di superficie. Il motivo per cui il WS illuminato non mostra sensibilità all'ozono, al contrario dello ZnO, è stato attribuito al fatto che il meccanismo di sensing dell'ozono può avvenire solo se la radiazione UV rimuove gli ossigeni adsorbiti in superficie, per cui si deduce come nello ZnO il meccanismo di trasferimento delle coppie in superficie è molto più veloce [18].

Nei sensori microlavorati (nei quali il film è depositato su una membrana in silicio microlavorato), che per una maggiore semplicità di processo produttivo non possiedono un layer di passivazione fra riscaldatore e contatti per la lettura del film, l'heater lavora in maniera impulsata (onda quadra) in modo tale che durante la fase off del duty cycle venga letta la resistenza del film senza interferenze elettriche. Questo implica che la frequenza di

lavoro deve essere impostata in maniera tale che la temperatura non sia soggetta ad instabilità inaccettabili. A questo proposito ho studiato e risolto l'equazione del calore applicata a questo particolare sistema; prima la soluzione stazionaria (indipendente dal tempo) per trovare il profilo di temperatura nella zona non riscaldata, al fine di trovare un'area efficace per lo scambio convettivo, poi la soluzione dipendente dal tempo per trovare il tempo caratteristico di decadimento della temperatura nella fase di spegnimento dell'heater. Questo studio ha permesso di impostare la frequenza di lavoro ideale, riscontrabile nelle misure eseguite, che non risentono di instabilità termiche del substrato [16].

## PUBBLICAZIONI SU RIVISTE

- [1] F. Montoncello, M. C. Carotta, B. Cavicchi, M. Ferroni, A. Giberti, V. Guidi, C. Malagù, G. Martinelli and F. Meinardi, “Near-infrared photoluminescence in titania: an evidence for phonon-replica effect”, *Journal of Applied Physics* 94 (2003) 1501-1505.
- [2] V. Guidi, M. Blo, M.A. Butturi, M.C. Carotta, S. Galliera, A. Giberti, C. Malagù, G. Martinelli, M. Piga, M. Sacerdoti, B. Vendemiati, “Aqueous and alcoholic syntheses of tungsten trioxide powders for NO<sub>2</sub> detection”, *Sensors and Actuators B* 100 (2004) 277-282.
- [3] A. Giberti, M.C. Carotta, V. Guidi, C. Malagù, G. Martinelli, M. Piga, B. Vendemiati, “Monitoring of ethylene for agro-alimentary applications and compensation of humidity effects”, *Sensors and Actuators B* 103/1-2 (2004) 272-276.
- [4] M. Blo, M.C. Carotta, S. Galliera, S. Gherardi, A. Giberti, V. Guidi, C. Malagù, G. Martinelli, M. Sacerdoti, B. Vendemiati, A. Zanni, “Synthesis of pure and loaded powders of WO<sub>3</sub> for NO<sub>2</sub> detection through thick film technology”, *Sensors and Actuators B* 103/1-2 (2004) 213-218.
- [5] C. Malagù, M.C. Carotta, E. Comini, G. Faglia, A. Giberti, V. Guidi, T. G. G. Maffei, G. Martinelli, G. Sberveglieri, S. P. Wilks, “Photo-Induced Unpinning of Fermi Level in WO<sub>3</sub>”, *Sensors* 5 (2005) 594-603.
- [6] Carotta, M.C., Ferrari, E., Giberti, A., Malagù C., Nagliati, M., Gherardi, S., Vendemiati, B., Martinelli, G., “Semiconductor gas sensors for environmental monitoring”, *Advances in Science and Technology* 45 (Stafa-Zuerich, Switzerland) (2006) 1818-1827.
- [7] C. Malagù, M.C. Carotta, S. Morandi, S. Gherardi, G. Ghiotti, A. Giberti, G. Martinelli, “Surface barrier modulation and diffuse reflectance spectroscopy of MoO<sub>3</sub>-WO<sub>3</sub> thick films”, *Sensors and Actuators B* 118 (2006) 94-97.

- [8] M.C. Carotta, M. Benetti, E. Ferrari, A. Giberti, C. Malagù, M. Nagliati, B. Vendemiati, G. Martinelli, “Basic interpretation of thick film gas sensors for atmospheric application”, *Sensors and Actuators B* 126 (2007) 672-677.
- [9] A. Giberti, M. Benetti, M.C. Carotta, V. Guidi, C. Malagù, G. Martinelli, “Heat exchange and temperature calculation in thick-film semiconductor gas sensor systems”, *Sensors and Actuators B* 130 (2008) 277-280.
- [10] A. Cervi, M.C. Carotta, A. Giberti, V. Guidi, C. Malagù, G. Martinelli, D. Puzzovio, “Metal-oxide solid solutions for light alkane sensing”, *Sensors and Actuators B* 133 (2008) 516-520.
- [11] A. Giberti, M.C. Carotta, V. Guidi, C. Malagù, G. Martinelli, L. Milano, “Influence of ambient temperature on electronic conduction in thick-film gas sensors”, *Sensors and Actuators B* 137 (2009) 111-114.
- [12] M.C. Carotta, A. Cervi, V. di Natale, S. Ghepardi, A. Giberti, V. Guidi, D. Puzzovio, B. Vendemmiaati, G. Martinelli, M. Sacerdoti, D. Calestani, A. Zappettini, M. Zha, L. Canotti, “ZnO gas sensors: A comparison between nanoparticles and nanotetrapods-based thick films”, *Sensors and Actuators B* 137 (2009) 164-169.
- [13] C. Malagù, M.C. Carotta, A. Giberti, V. Guidi, G. Martinelli, M.A. Ponce, M.S. Castro, C.M. Aldao, “Two mechanisms of conduction in polycrystalline SnO<sub>2</sub>”, *Sensors and Actuators B* 136 (2009) 230-234.
- [14] M.C. Carotta, A. Cervi, A. Giberti, V. Guidi, C. Malagù, G. Martinelli, D. Puzzovio, “Ethanol interference in light alkane sensing by metal-oxide solid solutions”, *Sensors and Actuators B* 136 (2009) 405-409.

- [15] A. Giberti, M.C. Carotta, C. Malagù, C.M. Aldao, M.S. Castro, M.A. Ponce, R. Parra, “Permittivity measurements in nanostructured TiO<sub>2</sub> gas sensors”, *Physica Status Solidi A* 208 (2011), 118-122 / DOI: 10.1002/pssa.201026443
- [16] A. Giberti, V. Guidi, D. Vincenzi, “A study of heat distribution and dissipation in a micromachined chemoresistive gas sensor”, *Sensors and Actuators B* 153 (2011) 409-414. DOI:10.1016/j.snb.2010.11.007
- [17] C.M. Aldao, A. Giberti, C. Malagù, D.A. Mirabella, M.A. Ponce, “Role of intra-grain oxygen diffusion in polycrystalline tin oxide conductivity”, *Journal of Applied Physics* 109 (2011), 063723. DOI: 10.1063/1.3561375
- [18] M.C. Carotta, A.Cervi, A. Fioravanti, S. Gherardi, A. Giberti, B. Vendemiati, D. Vincenzi, M. Sacerdoti, “A novel ozone detection at room temperature through UV-LED-assisted ZnO thick film sensors”, *Thin Solid Films* (2011, in press). DOI: 10.1016/j.tsf.2011.04.173

## PARTECIPAZIONI A CONGRESSI

- 1) INFMeeting 2002, June 24-28 2002, Bari, Italy.
- 2) AISEM VIII (Associazione Italiana Sensori e Microsistemi), February 12-14 2003, Trento, Italy.
- 3) EUROSENSORS XVII, September 21-24 2003, Guimarães, Portugal.
- 4) EUROSENSORS XVIII, September 13-15 2004, Rome, Italy.
- 5) IV International Workshop on Semiconductor Gas Sensors (SGS), September 19-23 2004, Ustron, Poland.
- 6) MRS (Materials Research Society) 2004 FALL MEETING, Nov. 29 – Dec. 3 2004, Boston, USA.
- 7) AISEM X (Associazione Italiana Sensori e Microsistemi), February 15-17 2005, Firenze, Italy.
- 8) MRS (Materials Research Society) 2006 Spring Meeting, April 17-21 2006, San Francisco, USA.
- 9) 11th International Ceramics Congress, June 4-9 2006, Acireale, Italy.
- 10) IMCS (International Meeting on Chemical Sensors) XI, July 16-19 2006, Brescia, Italy.
- 11) AISEM XII (Associazione Italiana Sensori e Microsistemi), February 12-14 2007, Napoli, Italy.
- 12) AISEM XIII (Associazione Italiana Sensori e Microsistemi), February 19-21 2008, Roma, Italy.

- 13) IMCS (International Meeting on Chemical Sensors) XII, July 13-16 2008, Columbus, USA.
- 14) 216<sup>th</sup> ECS (Electrochemical Society) Meeting, October 4-9 2009, Vienna, Austria.
- 15) AISEM XV (Associazione Italiana Sensori e Microsistemi), February 8-10 2010, Messina, Italy.
- 16) CHANNELING 2010 (4<sup>th</sup> International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena), October 3-8 2010, Ferrara, Italy.
- 17) AISEM XVI (Associazione Italiana Sensori e Microsistemi), February 7-9 2011, Roma, Italy.

#### **CONTRIBUTI A CONFERENZE NAZIONALI ED INTERNAZIONALI**

1. F. Montoncello, M.C. Carotta, B. Cavicchi, M. Ferroni, A. Giberti, V. Guidi, C. Malagù, G. Martinelli, "Near infrared photoluminescence in titania: an evidence for phonon-replica effect", INFMeeting 2002, June 24-28 2002, Bari, Italy, Book of Abstracts, II-149.
2. A. Giberti, M.C. Carotta, V. Guidi, C. Malagu, G. Martinelli, M. Piga, "Humidity compensation for on-field environmental monitoring.", Sensors and Microsystems, Proceedings of the 8<sup>th</sup> Italian Conference, February 12-14 2003, Trento, Italy (2004), 222-226.
3. C. Malagù, M.C. Carotta, S. Gherardi, A. Giberti, V. Guidi, G. Martinelli, "Model for the density of surface states and the Schottky barrier height in SnO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> thick film gas sensors", Sensors and Microsystems, Proceedings of the 8<sup>th</sup> Italian Conference, February 12-14 2003, Trento, Italy (2004), 238-243.

4. A. Giberti, M.C. Carotta, V. Guidi, C. Malagù, M. Piga and G. Martinelli, “Monitoring of ethylene for agro-alimentary applications and compensation of humidity effects”, EUROSENSORS XVII September 21-24 2003, Guimarães, Portugal, Book of Abstracts, 514-515.
5. C.Malagù, M.C. Carotta, A. Giberti, V. Guidi, L. Milano, M. Piga, and G. Martinelli, “Dependence of response of SnO<sub>2</sub> based thick film gas sensors on flow rate”, EUROSENSORS XVIII, September 13-15 2004, Rome, Italy, Digest of Technical Papers, 630.
6. M.C. Carotta, A. Giberti, V. Guidi, C. Malagù and G. Martinelli, “Advanced chemoresistive semiconductors in gas sensing”, IV International Workshop on Semiconductor Gas Sensors SGS, September 19-23 2004, Ustron, Poland, Book of Abstracts, 25.
7. M.C. Carotta, A. Giberti, V. Guidi, C. Malagù, B. Vendemiati, and G. Martinelli, “Gas sensors based on semiconductor oxides: basic aspects onto materials and working principles”, invited, MRS 2004 FALL MEETING, 29 Nov-3 Dic. 2004, Boston, USA, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 828, A4.6.1-12.
8. A.Giberti, M.C. Carotta, V. Guidi, C.Malagù, L. Milano, M. Piga, and G. Martinelli, “Dependence of response of SnO<sub>2</sub> based thick film gas sensors on humidity”, Sensors and Microsystems, Proceedings of the 10<sup>th</sup> Italian Conference, February 15-17 2005, Firenze, Italy, 248-252.
9. C. Malagù, M. Benetti, M.C. Carotta, A. Giberti, V. Guidi, , L. Milano and G. Martinelli, “Investigation of the humidity effects on SnO<sub>2</sub>-based sensors in CO detection”, MRS 2006 Spring Meeting, April 17-21 2006, San Francisco, USA, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 915, 0915-R07-05.
10. A. Giberti, M. Benetti, M.C. Carotta, V. Guidi, C. Malagù, G. Martinelli, “Heat exchange and temperature calculation in thick-film semiconductor gas sensors systems”,

- 11<sup>th</sup> International Meeting on Chemical Sensors, July 16-19 2006, Brescia, Italy, Book of Abstracts, 139.
11. C. Malagù, M. Benetti, A. Cervi, M.C. Carotta, A. Giberti, V. Guidi, B. Vendemiati and G. Martinelli “Permittivity evaluation of  $Ti_xSn_{1-x}O_2$  solid solutions for gas sensing”, AISEM, 12<sup>th</sup> Italian Conference on Sensors and Microsystems, February 12-14 2007, Napoli, Italy, Book of Abstracts, 156-157.
  12. A. Cervi, M.C. Carotta, A. Giberti, V. Guidi, C. Malagù, G. Martinelli, D. Puzzovio, “Metal-oxide solid solutions for light alkane sensing”, Sensors and Microsystems, Proceedings of the 13<sup>th</sup> Italian Conference, February 19-21 2008, Roma, Italy, 143-150.
  13. A. Giberti, M.C. Carotta, C. Malagù, G. Martinelli, “Influence of room temperature on a thick-film gas sensor”, Sensors and Microsystems, Sensors and Microsystems, Proceedings of the 13<sup>th</sup> Italian Conference, February 19-21 2008, Roma, Italy, 177-184.
  14. M.C. Carotta, A. Cervi, V. di Natale, S. Gherardi, A. Giberti, V. Guidi, D. Puzzovio, B. Vendemmiati, G. Martinelli, M. Sacerdoti, D. Calestani, A. Zappettini, M. Zha, L. Canotti, “ZnO gas sensors: A comparison between nanoparticles and nanotetrapods-based thick films”, 12<sup>th</sup> International Meeting on Chemical Sensors, July 13-16 2008, Columbus, USA, Book of Abstracts, 32.
  15. A. Giberti, M.C. Carotta, V. Guidi, C. Malagù, G. Martinelli, L. Milano, “Influence of room temperature on electronic conduction in thick-film gas sensors”, 12<sup>th</sup> International Meeting on Chemical Sensors, July 13-16 2008, Columbus, USA, Book of Abstracts, 97.
  16. M.C. Carotta, A. Cervi, A. Giberti, V. Guidi, C. Malagù, G. Martinelli, D. Puzzovio, “Light alkane sensing by metal oxide solid solutions”, 12<sup>th</sup> International Meeting on Chemical Sensors, July 13-16 2008, Columbus, USA, Book of Abstracts, 102.
  17. M.C. Carotta, A. Fioravanti, S. Gherardi, A. Giberti, B. Vendemiati, G. Martinelli, “Photo-assisted nano-crystalline thick film gas sensors for ozone detection”, 216<sup>th</sup>

- Electrochemical Society Meeting, October 4-9 2009, Vienna, Austria, 12<sup>th</sup> International Meeting on Chemical Sensors, July 13-16 2008, Columbus, USA, Book of Abstracts, Abs. 0181.
18. C. Malagù, A. Giberti, V. Guidi, M.C. Carotta, G. Martinelli, “Conductance variation under UV: a surface barrier modification”, AISEM, 15<sup>th</sup> Italian Conference on Sensors and Microsystems, February 8-10 2010, Messina, Italy, Book of Abstracts, 129-130.
  19. A. Giberti, V. Guidi, M. Munerato, A. Poluzzi, “A numerical investigation on the temperature profile of a channeling crystal”, Channeling 2010 (4<sup>th</sup> International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena), October 3-8 2010, Ferrara, Italy, Book of Abstracts, 114.
  20. A. Giberti, C. Malagù, M.A. Ponce, “Relative permittivity of nanostructured TiO<sub>2</sub> gas sensors”, AISEM XVI, February 7-9 2011, Rome, Italy, Book of Abstracts, Abs. 040.
  21. C. Malagù, A. Giberti, “Conductivity of nanostructured tin oxide modulated by intergrain oxygen diffusion”, AISEM XVI, February 7-9 2011, Rome, Italy, Book of Abstracts, Abs. 045.