

ÅFORSK RAPPORT

Masspektrometer för Sensorutveckling

Mike Andersson,
IFM, Tillämpad Sensorvetenskap
Linköpings Universitet
SE-581 83 Linköping

Innehåll

Sammanfattning	3
Summary	4
1. Bakgrund	5
2. Experimentellt genomförande	8
3. Resultat och diskussion	11
4. Slutsatser	13
5. Referenser	14

Sammanfattning:

I aktuell rapport redovisas vilken effekt beviljat anslag, för införskaffande av en masspektrometer-utrustning för direkt analys av hur sammansättningen hos en väldefinierad gasmatris förändrats efter interaktion med olika gassensorytor, haft på två olika forskningsprojekt.

Den masspektrometer som via beviljat anslag införskaffats har anslutits till ett system för analys av egenskaperna hos olika gassensorer då de exponeras för olika gaser/ gasmatriser, så att man kan studera hur gassammansättningen förändras då denna får passera över olika sensorytor och därmed få indikationer/ information om vilka reaktioner som under olika betingelser sker på ytan av de olika sensorerna/ materialen. Genom att studera sådana reaktioner då ett urval av olika sensormaterial exponerats för SO₂ och jämföra med förändringarna i sensorsignaler och resultaten från teoretiska modelleringar har det varit möjligt att erhålla sådan information om material/reaktioner under olika förhållanden och arbetssätt för sensorn att en sensormodul för övervakning av SO₂-utsläpp från värme- och kraftverk kunnat utvecklas ända fram till lovande fältmätningar i en pilotanläggning.

Vidare har det varit möjligt att med hjälp av masspektrometermätningar göra korrelationer mellan responsen för fält-effekt-baserade gassensorer och identiteten och mängden av ämnen, t.ex. ammoniak, som avges från olika partiklar då dessa hettas upp, vilket är till stor hjälp i utvecklandet av sensorer för att mäta innehållet av olika föreningar i luftburna mikroskopiska partiklar och bestämma deras grad av toxicitet.

Summary

In this report the effects of the grant approval, for the purchase of a new mass spectrometer equipment allowing direct analysis of the changes in composition of a well-defined gas matrix occurring upon interaction with different gas sensor surfaces, on two different research projects are reported.

The mass spectrometer has been installed and connected to a system dedicated to the analysis of changes in different gas sensor properties when exposed to different kinds of gases/ gas matrices in order to allow studies on what changes to the gas composition occur upon interaction with various sensor materials/ surfaces and thereby the retrieval of information about possible reactions that might happen on the sensor surfaces during different ambient conditions. Through the studies of such reactions for a selection of sensor materials during SO₂ exposure and comparison of the results to the results from sensor response measurements and theoretical modeling it has been possible to gain such knowledge about materials/ processes during different conditions and sensor operation modes that a sensor module for SO₂ monitoring has been developed that far that field measurements in a pilot plant have been possible to conduct.

Furthermore, with the help of extensive mass spectrometer measurements it has been possible to work out correlations between the response of field-effect based gas sensors and the identity and level of some different substances, such as ammonia, released from different particles upon heating. This has proved a great help in the project around development of sensors for the assessment of contents of small airborne particles and determine their toxicity.

1. Bakgrund

Under c:a 15 års tid har, med stöd från bl.a. VINNOVA och svensk industri (t.ex. VOLVO, Vattenfall och NIBE AB) genom kompetenscentrumet S-SENCE (Swedish Sensor Centre) och senare FunMat (Funktionella nanostrukturerade Material), forskning och utveckling kring gassensorer för olika tillämpningar bedrivits vid Linköpings Universitet. Huvuddelen av sensorutvecklingen har skett med fält-effekt-komponenter i kiselkarbid (eller kisel) som plattform [1,2]], men även andra sortekniker har studerats, t.ex. metalloxid-baserade halvledarmaterial för vilka resistansen ändras vid adsorption av vissa gaser direkt till deras yta.

Genom att införa ett gaskänsligt material som styrkontakt i en fält-effekt-transistor kan ett eller flera ämnen i en gasblandning eller i omgivande atmosfär detekteras/ mätas eftersom strömmen genom transistorn ändras då styrkontakten kommer i kontakt med detta/ dessa ämnen [1,2]. Det som bestämmer vilken eller vilka gaser som sensorn är känslig gentemot samt storleken på responsen är interaktionen mellan det gaskänsliga materialet och ämnet/ ämnena ifråga. Forskning kring vad som händer på ytan hos olika material när de kommer i kontakt med ett ämne som är intressant att detektera i en viss tillämpning är därför en stor del av sensorutvecklingen. Genom att införskaffa information om och förstå vad som händer på ytan när den exponeras för ett visst ämne och relatera det till sensorsignalen underlättas designen av sensormaterial och materialkombinationer för specifika tillämpningar.

Kiselkarbid är ett material som både tål relativt höga temperaturer (upp till 800°C) och korrosiva miljöer då materialet inte gärna reagerar med andra ämnen. Fält-effekt-transistorer är dessutom enkla att massproducera med känd teknik och kräver ingen avancerad driv- eller signalutläsningselektronik. Sensorer baserade på denna plattform har därför visat sig lovande för bl.a. högtemperaturlämpningar inom energi-, miljö- och transportsektorn, t.ex. förbränningsreglering i pannor för högre verkningsgrad och lägre emissioner [3], On Board Diagnostics (OBD) för avgassystemen i fordon [4], samt reglering av ammoniakinsprutning för reduktion av hälsovådliga kväveoxider både från fordon och pannor [5]. Små transistorbaserade sensorer eller sensorsystem är också generellt intressant för miljöövervakning bl.a. beroende på den mycket låga statiska effektförbrukningen vilket kan möjliggöra t.ex. autonom solcellsdriven operation. Fält-effekt-sensorer i kisel har sedan ett flertal år funnits på marknaden (via AppliedSensor GmbH och Inficon) och kiselkarbidbaserade sensorer har under de senaste två åren kommersialiserats genom SenSiC AB. Resistiva metall-oxid-sensorer finns också kommersiellt tillgängliga för tillämpningar som rökdetektorer i brandvarnare, gaslarm, övervakning av kvaliteten på inomhusluft för att styra ventilationen etc.

Fält-effekt-sensorerna som är under kommersialisering utgör exempelvis grunden för ett sensorsystem för reglering av förbränningen i mindre bibränsleeldade uppvärmningssystem (Ved, flis, pellets). För en bra styrning av förbränningen är det önskvärt att kunna mäta halten av syre och kolmonoxid i rökgaserna efter förbränningen. Om för lite luft tillsätts i förbränningen kommer inte allt bibränsle att helt förbrännas och framförallt kommer det att finnas kvar kolmonoxid (CO) som inte förbränts till koldioxid (CO₂) i rökgaserna. Dessutom kommer syrehalten såklart att vara låg. Om för mycket luft tillsätts kommer den extra luften att kyla ner förbränningen och det kommer inte att vara tillräckligt varmt för att förbränna CO till CO₂. CO halten kommer då att vara hög samtidigt som syrehalten också är hög. Tyvärr är inte samma syrehalt i rökgaserna optimal för alla olika bränslen och bränslekvaliteter eller olika tidpunkter i förbränningen, så information om CO-koncentrationen i relation till syrehalten är nödvändig för optimal reglering.

Både CO och syre kan adsorbera till ytan på en katalytisk styrkontakt (exempelvis bestående av Platina, Palladium eller Iridium) hos fält-effekt-transistorn och ändra det elektriska fältet från styrkontakten och därmed strömmen genom transistorn. Under vissa förhållanden adsorberar CO bättre och under andra har syre lättare för att adsorbera. Dessutom kan också CO och syre reagera med varandra och bilda CO₂. Via mätningar på reaktionen mellan CO och syre på sensorytan, relaterat till sensorresponsen, har en teori för hur sensorsignalen beror på halten av de båda ämnena i rökgasen, sensors arbets temperatur och ytans struktur kunnat utarbetas [6]. För en CO/syre-kvot högre än ett visst värde i rökgaserna kommer sensorsignalen att vara låg och för lägre värden är sensorsignalen hög. Ju högre arbets temperatur och ju större porositet hos ytan desto större värde på CO/syre-kvoten krävs för att sensorsignalen ska bli låg. Därigenom har ett sensorsystem som med ganska god noggrannhet kan bestämma CO-halten i relation till syrenivån i rökgaserna kunnat konstrueras genom att designa sensorerna avseende material, ytstruktur och deras arbets temperatur. Liknande mätningar i närvaro av andra ämnen har också visat att det är möjligt att med andra materialval för styrkontakten (exempelvis kombinationen av ledande oxider som iridiumoxid med isolerande material av viss struktur, t.ex. magnesiumoxid) designa en sensor som enbart är känslig för rökgasernas eller avgasernas syrehalt [7], en design som sedermera också patenterats.

Med utvecklingen av nya bibränslen från förnybara källor ökar mångfalden av bränslen med varierande art och kvalitet samt olika energi- och kemiskt innehåll och olika förbränningskaraktistik. Exempel utgörs av biogas, metanol, etanol, DME, syntetisk diesel, olika fastbränslen etc. För en överskådlig framtid kommer traditionella bränslen som olja, kol och naturgas dock att existera parallellt med de nya, särskilt via utvecklingen av ny teknik såsom CO₂-avskiljning och lagring i berggrunden. Till detta tillkommer också sopförbränning. För olika regioner och eventuellt olika årstider är också bränslealternativen olika beroende på råvarutillgång, pris etc.

För att nå bättre flexibilitet och underlätta användandet av olika bränslen utan att behöva göra förändringar i "hårdvaran" eller dedikera en viss typ av anläggning för ett visst slags bränsle är ett möjligt alternativ att övervaka och automatiskt styra både förbränningen och eventuell efterbehandling efter förbränningskaraktistiken och rökgasinnehållet från olika bränslen med olika kvalitet. För vissa bränslen eller kombinationer av bränslen skulle det eventuellt också kunna vara möjligt att bestämma vissa för förbränningen kritiska parametrar före inmatning för automatisk anpassning av processen i förväg. Bl.a. av dessa anledningar fanns/finns det ett intresse bland våra industripartners, bl.a. Alstom Sweden AB, Tekniska Verken i Linköping och Vattenfall AB) att ta fram sensorer som ska underlätta användandet av olika bränslen, som också kan vara av varierande kvalitet. För utvecklingen av nya sensorer är det, vilket poängterats tidigare, nödvändigt att studera och förstå interaktionen mellan sensormaterial och för ändamålet/ tillämpningen intressanta gasformiga ämnen.

Förutom tidigare nämnda parametrar såsom rökgaskoncentrationer av syre, kolmonoxid och ammoniak, har det under en tid varit (och fortfarande är) intressant att utveckla sensorer för att mäta rökgaskoncentrationen av svavelhaltiga föreningar, såsom svaveldioxid (SO_2), svaveltrioxid (SO_3) och divätesulfid (H_2S) vilkas förekomst och koncentration varierar stort med bränslekvalitet, för bättre möjligheter till kostnadseffektiv rening av rökgaserna och reducera emissionerna av försurande och hälsovådliga ämnen till atmosfären. Något som också uppmärksammats mer och mer under senare år, i takt med att deras negativa hälsopåverkan kartlagts allt mer, är emissionerna av luftburna partiklar från olika förbränningsprocesser. Med hänsyn till möjligheten att små partiklar kan nå långt ner i luftvägarna, ta sig genom lungväggen och ut i blodet och till och med ta sig in i kroppen direkt genom huden, kan exponering för mikroskopiska partiklar, beroende på deras egenskaper, leda till olika ogynnsamma hälsotillstånd som andnings-svårigheter, illamående och t.o.m. cancer. Storlek, form och kemisk sammansättning är några av de parametrar som inverkar på partiklarnas toxicitet och miljöpåverkan. Det är därför av intresse att utveckla sensorer för att kunna mäta och karakterisera emitterade partiklar med avseende på deras egenskaper, t.ex. kemisk sammansättning. Exempel på tillämpningar inkluderar miljöövervakning, kvalitetskontroll av inomhusluft, avgasrening, och bestämning av vilken partikeltyp gentemot exponering skett för korrekt medicinsk behandling.

I ett nyligen påbörjat projekt är också ett mål att utveckla grafenbaserade sensorer med väldigt låg effektförbrukning för exempelvis miljöövervakning. Grafen uppvisar bl.a. en extremt hög känslighet mot kväveoxider, också vid rumstemperatur. Den naturliga bakgrundshalten av kvävedioxid i atmosfären ligger inte så långt under vad som konstaterats ge märkbara effekter på människors hälsa vid långtidsexponering. I vissa områden, ofta i och omkring större städer, särskilt under vissa väderförhållanden och situationer, t.ex. rusningstrafik, kan atmosfärshalten av kvävedioxid då överskrida denna gräns. Även för diagnosticering av vissa sjukdomstillstånd kan det vara intressant med detektion av extremt små halter av kväveoxider i t.ex. utandningsluft.

Väldigt lite är dock fortfarande känt om interaktionerna mellan grafen och ämnen som t.ex. kvävedioxid.

För att kunna utveckla sensorer inom dessa viktiga tillämpningsområden krävs dock förutom t.ex. modellering även experimentell undersökning av adsorption av olika ämnen till och reaktioner mellan dessa på sensorytan för att nå en förståelse av de viktiga egenskaperna hos materialen som bestämmer sensorkarakteristiken. Detta för att i förlängningen komma fram till hur man ska kunna utveckla sensorer med de egenskaper man vill ha i de olika tillämpningarna. Därvidlag utgör mätning av reaktionsprodukter från exponeringen av sensorerna till olika gaser medelst masspektrometri en metod som kan ge värdefull information om sensoregenskaperna och en verifiering av resultaten från modelleringen. Då det varit ett måste att utrustningen permanent skulle kunna vara uppkopplad mot våra gasanalyssystem och nästan alltid vara i kontinuerlig drift har tillgången till ett sådant instrument, finansierat genom ÅFORSK, inom forskargruppen varit helt centralt för möjligheten att genomföra dessa projekt.

Experimentellt genomförande

Som del i projektet att utveckla sensorer för svavelhaltiga gasformiga ämnen, i huvudsak SO_2 och SO_3 , har modellsensorer tillverkats, från vilka det är möjligt att simultant läsa ut och studera sensorsignalen samt medelst mätningar av gassammansättningen nedströms modellsensorn med en masspektrometer följa eventuella produkter från reaktioner på sensorytan. Modellsensorerna har i detta fall utgjorts av kondensatorer baserade på SiC, se Fig. 1, för vilka sensormekanismen är identisk med de i andra tillämpningar använda transistorer, men för vilka sensorytan är mycket större (större yta över vilken interaktionen med omgivande atmosfär och reaktioner mellan olika ämnen på ytan kan ske) för att tillförsäkra en tillräcklig koncentration av reaktionsprodukterna nedströms om sensorpositionen för att möjliggöra masspektrometermätningarna.

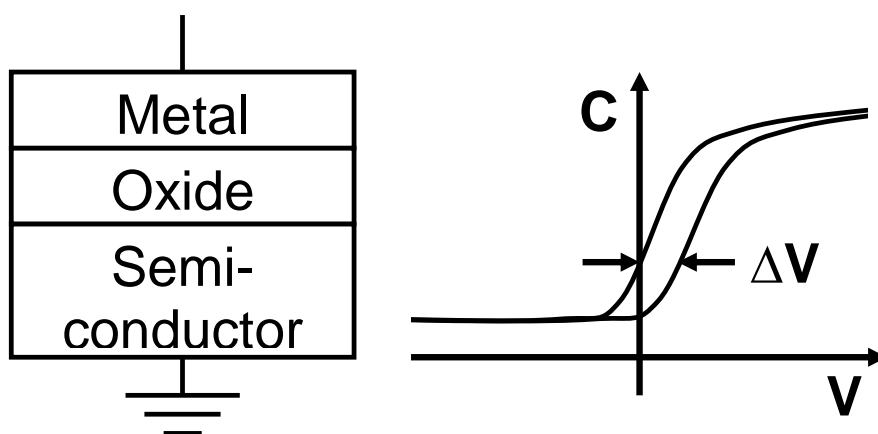


Fig. 1

Förutom utläsning av sensorsignalen och bestämning av gassammansättningen nedströms sensorpositionen har i studierna även IR spektroskopi för identifikation av ämnen adsorberade till ytan på de undersökta sensormaterialen och teoretisk modellering av möjliga processer/reaktioner på ytan genomförts. Genom att korrelera uppmätta data med varandra och med simuleringarna kan så en teori för gas-sensor-interaktionen och dess elektriska påverkan på sensorkomponenten ställas upp och en bättre förståelse för hur den tillämpnings-specifika komponenten ska designas, bl.a. med avseende på materialval och struktur.

I denna studie har kondensatorbaserade modellsensorer med fyra olika material, platina (Pt), iridium (Ir), guld (Au), och koppar (Cu), med vilka omgivande gasatmosfär fått interagera under olika förhållanden, processats och karakteriserats avseende nyss nämnda interaktioner. Modellsensorerna med de fyra olika känslskikten har i labmiljö exponerats för relativt korta pulser av SO₂ inom koncentrationsspännet 20-150 ppm, se Fig. 2, för arbetstemperaturer hos modellsensorerna i området 200 - 400°C. Dessutom har sensorkomponenterna också exponerats för andra gasformiga ämnen som skulle kunna förekomma i gasmatrisen i de olika tillämpningarna för att studera påverkan på sensorsignalen gentemot SO₂ från dessa. Genom att studera ett urval av material kan trendanalyser göras för prediktion av materialegenskaper som kan förbättra sensorernas prestanda för detektion av svavelhaltiga föreningar.

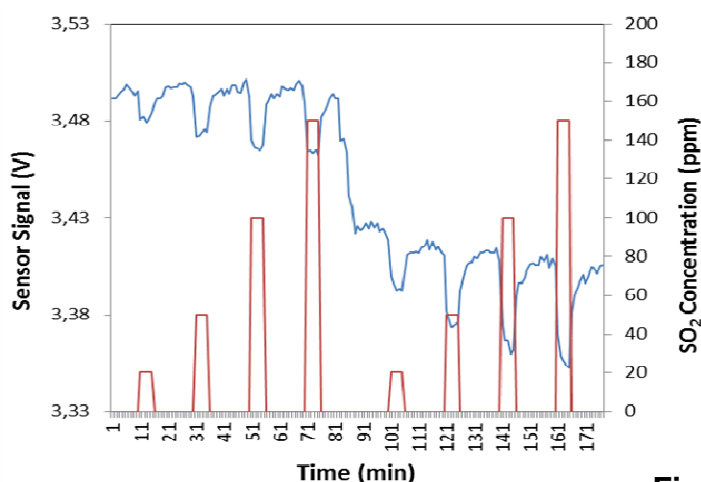


Fig. 2

När det gäller utvecklingen av sensorer för detektion och karakterisering av partiklar har inom projektet metoder för att uppskatta partiklars innehåll med hjälp av fält-effekt-baserade gassensorer undersökts. I studien har flygaska och partiklar från exempelvis ett stålverk, men också partiklar som genererats från fordon, samlats in. Partiklarna har med andra metoder analyserats med avseende på innehåll och framför allt vad som finns adsorberat till deras yta. Bl.a. har partiklar med olika ammoniak- och svaveldioxid-halt analyserats. Även väldefinierade partiklar av två olika ämnen, grafit och TiO₂, har impregnerats med olika mängd ammoniak (dock med jämförbara värden för

de två olika partikelslagen) för att kunna studera påverkan av själva partiklarnas identitet på möjligheten att detektera och kvantifiera vad som finns adsorberat till deras yta.

Dessa partiklar har sedan placerats på ett membran som går att värma till hög temperatur inuti en liten gastät kammare, som via ett par ventiler är ansluten till ett flöde av en inert gas (Kväve eller Argon), där ventilerna initialt är ställda i ett bypass-läge så att flödet inte passerar genom kammaren, se Fig. 3. Membranet har sedan värmts upp till en viss kontrollerad temperatur, varvid föreningar som funnits adsorberade till partiklarna, eller ämnen som själva partikeln består av, ev frigörs till gasfasen (beroende av temperatur). Därefter har ventilerna öppnats, så att de föreningar som desorberat/ förångat från partiklarna förts av den inerta bärgasen till en andra kammare i vilken gassensorerna varit monterade. En del av gasflödet med de desorberade/ förångade föreningar som önskats studeras har därvidlag också fått passera masspektrometern ifråga.

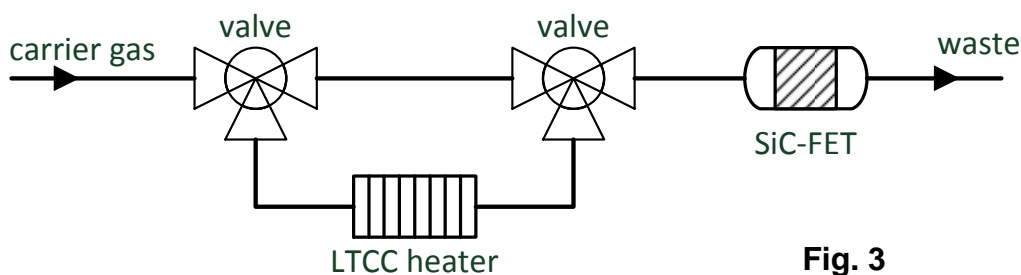


Fig. 3

De olika partiklarna har så värmts till olika temperatur för att studera om det genom att använda olika temperatur (t.ex. i form av temperaturrampning) är möjligt att kunna separera exponeringen av sensorerna för de olika föreningarna i tid och därmed erhålla en mindre komplex gasmatris att analysera med sensorerna. De olika temperaturer som initialt använts för detta ändamål har varit 200, 400, 600 och 800°C. Sensorernas signal under exponeringen har tagits upp som funktion av tid och därefter jämförts med signalerna för vissa valda föreningar, såsom NH_3 , SO_2 , NO , NO_2 , CO_2 och H_2O , från masspektrometern för att få en uppfattning om vad som är möjligt när det gäller att utifrån sensorsignalerna och "temperaturrampningen" kunna uppskatta partiklars innehåll, åtminstone den mer flyktiga delen därav.

För utvecklingsprojektet runt grafenbaserade sensorer för miljö/luftkvalité-övervakning var idén att studera hur känsligheten mot olika hälsovådliga ämnen, exempelvis NO_x , eller markörer för dålig luftkvalité skulle kunna förbättras genom att studera hur olika funktionaliseringar av grafenet (exempelvis doping med små mängder av katalytiska metaller eller inkorporation av funktionella grupper på grafensensorytan) skulle kunna underlätta/ förändra vissa reaktioner på sensorytan. En del i denna studie skulle utgöras av mätningar på reaktionsprodukterna i gasflödet nedströms de olika grafenbaserade sensorerna. Det kom dock att visa sig att det inte gick att få till grafenbaserade sensorer med tillräckligt stor yta för att få tillräcklig

mängd reaktionsprodukter att analysera med masspektrometri under dynamiska förlopp, varvid direkta jämförelser med sensorsignalerna inte visade sig möjliga.

Resultat och diskussion

I studierna av reaktioner på sensorytan under exponering av de olika sensorerna och sensormaterialen för exempelvis SO_2 har upptagna masspektrometerdata kunnat korreleras till både resultat från sensorsignalerna och den teoretiska modelleringen. I Fig. 4 visas ett exempel från SO_3 produktion och modellering av reaktionsmekanismen på en sensor med Pt som gaskänsligt skikt under SO_2 exponering i frånvaro och närvaro av syre. Från dessa mätningar och modelleringar har det varit möjligt att konstatera att den mest prominenta reaktionsvägen, under normala rökgasbetingelser, på de undersökta materialen är adsorption av SO_2 på metallytorna följt av oxidation till SO_3 som sedan kan diffundera till och adsorbera på underliggande isolatoryta (SiO_2) och där desorption från de olika ytorna (för att nå en dynamisk operation av sensorerna) är postulerat att ske vid lite olika temperatur. Detta sker i olika grad på olika metallytor och skulle kunna förklara de olika stora beroenden av syrekoncentrationen i omgivande luft som observerats för sensorer med olika metallytor.

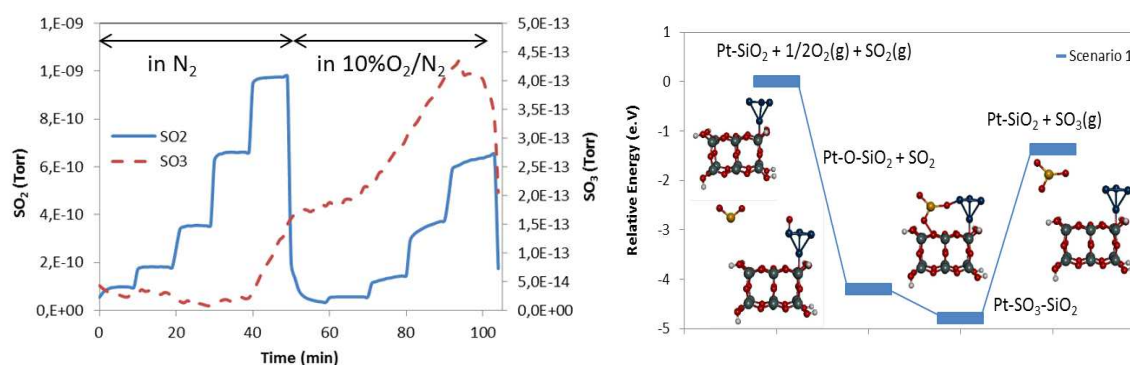


Fig. 4

Via modellering och masspektrometermätningarna har det också kunnat visas att det är osannolikt att få direkt adsorption av SO_2 till det underliggande isolatorskiktet, en process som krävs för detektion av SO_2 , utan närvaro av metallskikt. Adsorption och desorption av SO_2/SO_3 är också högst temperaturberoende och studierna av interaktionen mellan dessa föreningar och sensorytan har visat att en dynamisk sensorfunktion kan erhållas genom att låta sensorkomponenten arbeta växelvis på en lägre och en högre temperatur för att tillåta adsorption och oxidation på metallytan med tillräckligt hög känslighet vid lägre temperaturer med påföljande desorption av SO_3 från metall- och isolatorytan för att undvika mättnadsfenomen i sensorsignalen.

Genom dessa undersökningar har det varit möjligt att ta fram ett operationssätt baserat på temperaturcyklning för en Pt-baserad fält-effekt-

sensor för att erhålla så god uppskattning av SO₂-halten i rökgaser att det varit möjligt att gå vidare med fältförsök avseende SO₂-övervakning i en pilotanläggning för rening av svavelhaltiga rökgaser. I Fig. 5 ges exempel på resultat från sensormätningar i pilotanläggningen. Vidare har dessa undersökningar resulterat i både ett konferensbidrag och en publikation inskickad för publikation i en vetenskaplig sensortidskrift.

Med den ovan redovisade uppställningen för att studera utvecklingen av gassensorer för att uppskatta delar av den kemiska sammansättningen hos olika partiklar har det varit möjligt att korrelera sensorsignalen från olika uppvärmningstemperaturer (för partiklarna) med den sammansättning av gaser som frigjorts från partiklarna. Detta genom att jämföra data från masspektrometern med sensorsignalerna vid olika temperaturer. Vidare har det kunnat konstateras att det även går att få en grov uppskattning av t.ex. halten av till partiklarna adsorberad ammoniak.

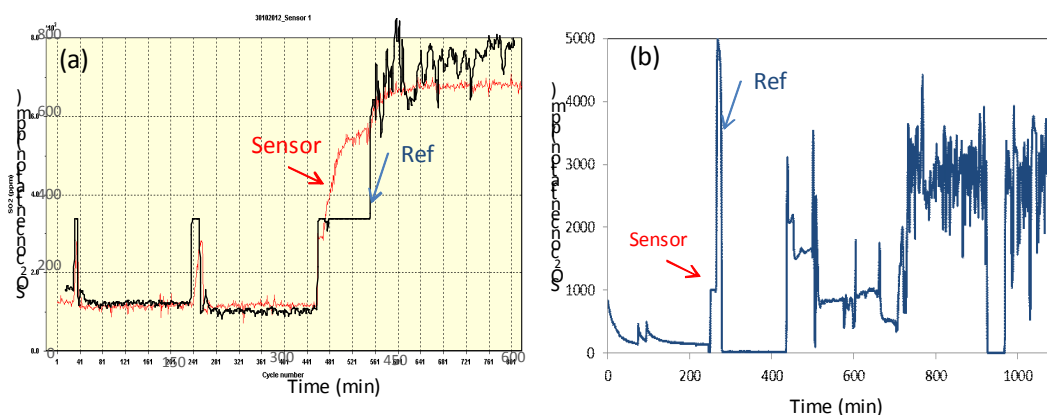


Fig. 5

I jämförelsen mellan TiO₂- och grafitpartiklarna som impregnerats med ammoniak kunde med hjälp av masspektrometermätningarna bl.a. konstateras att mindre mängd ammoniak adsorberar till grafitpartiklarna än titandioxidpartiklarna och att detta faktum också kan korreleras mot en mindre total signal från sensorerna (den integrerade signalen) när temperaturen hos partiklarna höjs från rumstemperatur till en temperatur strax ovanför 400 °C, då all ammoniak desorberat. Givetvis kommer sensorsignalen därvidlag också att vara högst beroende av mängden partiklar (och mängden av olika partiklar) som samlats in och värms upp, varför denna metod för att kvantifiera partikelinnehåll måste kompletteras med någon metod för att direkt mäta partikelmängd. Detta projekt är pågående och de hittills uppnådda resultaten kommer att presenteras vid en materialkonferens (E-MRS) i Lille, Frankrike, under tidiga sommaren.

Slutsatser

Genom att införskaffandet av en masspektrometer-utrustning, avpassad för direkt analys av den resulterande gassammansättningen efter att en väldefinierad gasblandning fått passera ytan av en eller flera gassensorer, möjliggjorts via ett anslag från ÅFORSK har det varit möjligt att göra stora framsteg i några sensorutvecklingsprojekt. Från den ökade kunskap/ förståelse för reaktioner/ processer på olika sensorytor som erhållits genom jämförande analyser mellan modellering, sensorresponsmätningar och reaktionsprodukter har t.ex. en sensormodul för övervakning av SO₂-utsläpp, som skulle kunna vara användbar för att optimera SO₂-reningen från kraft- och värmeverk, kunnat utvecklas ända fram till riktiga fältmätningar i en pilotanläggning. Vidare har de mätningar som möjliggjorts med utrustningen också bidragit till ökad kunskap av mer grundforskningskaraktär; exempelvis trender i reaktioner mellan olika gasformiga ämnen på ytorna av olika material. Anslaget har därför väsentligen bidragit till att komma snabbare framåt i såväl de redovisade projekten som i andra, närliggande projekt.

Referenser

- [1] Lloyd Spetz, A., and Savage S., “Advances in FET chemical gas sensors”, in Choycke, W.J., Matsunami, H. and Pensl, G. (eds.), [Recent Major Advances in SiC], Springer Verlag, Berlin, 879-906 (2003)
- [2] Lundström, I., Sundgren, H., Winqvist, F., Eriksson, M., Krantz-Rülcker, C., and Lloyd Spetz, A., “Twenty-five years of field effect gas sensor research in Linköping,” *Sens. Actuators B*, 121, 247-262 (2007)
- [3] Unéus L., Artursson T., Mattsson M., Ljung P., Wigren R., Mårtensson P., Holmberg M., Lundström I., and Lloyd Spetz A., *IEEE Sens. J.*, 5 (1), 75 (2005)
- [4] Schalwig J., Ahlers S., Kreisl P., Bosch-v. Braunmühl C., and Müller G., *Sens. Actuators B*, 101, 63-71 (2004)
- [5] Wingbrant, H., Svenningstorp, H., Salomonsson, P., Kubinski, D., Visser, J.H., Löfdahl, M., and Lloyd Spetz, A., “Using a MISiC-FET sensor for detecting NH₃ in SCR systems,” *IEEE Sens. J.*, 5 (5), 1099-1105 (2005)
- [6] Andersson M., Pearce R., Buchholt K., Wingbrant H., Eriksson M., and Lloyd Spetz A., “on the CO response mechanism of SiC based field effect gas sensors”, *IEEE Sens. J.*, submitted
- [7] Andersson M., and Lloyd Spetz A., “Tailoring of field effect gas sensors for sensing of non-hydrogen containing substances from mechanistic studies on model systems”, in: Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Sensors, Christchurch, New Zealand, Oct. 2009