

## Πλήρως κεραμικές διατάξεις ηλεκτρόλυσης στερεού οξειδίου: η επίδραση του GDC

**Α. Κωνσταντινίδου<sup>1,2</sup>, Ν. Μπιμπήρη<sup>1,2</sup>, Κ.Μ. Παπαζήση<sup>1</sup>, Δ. Τσιπλακίδης<sup>1,2</sup> και Σ. Μπαλωμένου<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών & Ενεργειακών Πόρων (ΙΔΕΠ), ΕΚΕΤΑ, Θεσσαλονίκη

<sup>2</sup>Τμήμα Χημείας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

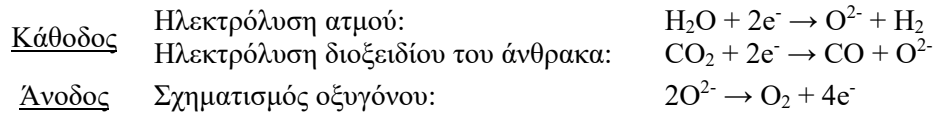
Στην παρούσα εργασία διερευνάται η επίδραση του οξειδίου του δημητρίου ενισχυμένο με οξείδιο του γαδολινίου (GDC) στην απόδοση και τη σταθερότητα ηλεκτροδίων δομής περοβσκίτη σε διατάξεις ηλεκτρόλυσης στερεού οξειδίου (SOEC). Με στόχο την ενίσχυση της ιοντικής αγωγιμότητας και τη διεύρυνση της διαθέσιμης τριεπιφάνειας (TPB) ηλεκτροδίου-ηλεκτρολύτη-αερίου, όπου πραγματοποιούνται οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις, αναπτύχθηκαν ηλεκτρόδια αποτελούμενα από μίγμα του ηλεκτροκαταλύτη καθόδου, χρωμίτη λανθανίου-στροντίου υποκατεστημένο με Fe La<sub>0.75</sub>Sr<sub>0.25</sub>Cr<sub>0.9</sub>Fe<sub>0.1</sub>O<sub>3-δ</sub> (LSCF0.1), με GDC. Οι μικτοί ηλεκτροκαταλύτες χαρακτηρίστηκαν φυσικοχημικά και ηλεκτροχημικά ως καθοδικά ηλεκτρόδια (καυσίμου) σε μοναδιαίες διατάξεις SOEC. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε κελιά τύπου δισκίου (button cells) σε θερμοκρασία λειτουργίας  $\geq 800^\circ\text{C}$  και συνθήκες ηλεκτρόλυσης ατμού, καθώς και συνδυασμένης ηλεκτρόλυσης H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub>. Ο μικτός ηλεκτροκαταλύτης LSCF0.1-GDC (50% wt.) εναποτέθηκε είτε απευθείας στον στερεό ηλεκτρολύτη 8YSZ είτε με ενδιάμεσο στρώμα GDC, ενώ αναπτύχθηκαν και κελιά όπου εναποτέθηκε επιπλέον στρώμα LSCF0.1 ως συλλέκτης ρεύματος. Η μελέτη έδειξε ότι ο χρωμίτης LSCF0.1 διαθέτει ικανοποιητική ιοντική και ηλεκτρονική αγωγιμότητα και εμφανίζει υψηλή απόδοση, η οποία φαίνεται να ενισχύεται μερικώς με την ανάμειξή του με GDC.

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρόνια χρήση των ορυκτών καυσίμων έχει οδηγήσει σε σημαντική μείωση των αποθεμάτων τους, ενώ παράλληλα επιφέρει καταστρεπτικές συνέπειες στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία εξαιτίας των αερίων που εκπέμπονται. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός του ενεργειακού συστήματος στη βάση τεχνολογιών που αξιοποιούν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με υψηλές αποδόσεις και ευελιξία σε δυναμική λειτουργία. Ταυτόχρονα, εξίσου σημαντική είναι και η αξιοποίηση του CO<sub>2</sub> που εκλύεται από πλήθος βιομηχανικών εγκαταστάσεων από καθαρές διεργασίες που μπορούν να το ανακυκλώσουν σε ενεργειακούς φορείς ή πρώτη ύλη για τη χημική βιομηχανία. Συγκεκριμένα, μέσω της συνδυασμένης ηλεκτρόλυσης (co-electrolysis) H<sub>2</sub>O και CO<sub>2</sub> παράγεται αέριο σύνθεσης (μίγμα CO και H<sub>2</sub>), το οποίο μπορεί να αποτελεί τροφοδοσία για πλήθος διεργασιών παραγωγής χρήσιμων χημικών προϊόντων, π.χ. διεργασία Fischer-Tropsch για παραγωγή υγρών υδρογονανθράκων.

Η συνδυασμένη ηλεκτρόλυση λαμβάνει χώρα σε διατάξεις στερεού οξειδίου (Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC), ενώ είναι δυνατό η ίδια διάταξη να λειτουργεί και για την αντίστροφη διεργασία, δηλαδή ως κυψέλη καυσίμου (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τυπικές θερμοκρασίες λειτουργίας των κυψελών SOECs είναι άνω των 750°C με σκοπό να εξασφαλίζεται η ιοντική αγωγιμότητα των κεραμικών ηλεκτρολυτών στους οποίους βασίζεται η τεχνολογία, με κυριότερο υλικό το οξείδιο του ζirkονίου σταθεροποιημένο με ύττρια (Yttria Stabilized Zirconia, YSZ). Προκειμένου να γίνει ανταγωνιστική η τεχνολογία των SOECs πρέπει να αντιμετωπιστούν προβλήματα υποβάθμισης και κόστους λειτουργίας των διατάξεων. Λύση στο υψηλό κόστος λειτουργίας προσφέρει, μεταξύ άλλων, η εφαρμογή ηπιότερων θερμοκρασιών και η χρήση εναλλακτικών στερεών ηλεκτρολυτών με ικανοποιητική ιοντική αγωγιμότητα σε ενδιάμεσο θερμοκρασιακό εύρος, όπως το οξείδιο του δημητρίου ενισχυμένο με γαδολίνια (Gadolinia Doped Ceria, GDC). Το υλικό αυτό εφαρμόζεται ήδη στις διατάξεις SOECs στα κεραμομεταλλικά ηλεκτρόδια καυσίμου Ni-GDC και ως προστατευτικό στρώμα μεταξύ του ηλεκτρολύτη YSZ και ηλεκτροδίων δομής περοβσκίτη (π.χ. LSCF) προς αποφυγή σχηματισμού μη αγωγικών φάσεων, όπως La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>. Οι περοβσκίτες αποτελούν τυπικά ηλεκτρόδια οξυγόνου, ωστόσο τα τελευταία χρόνια τείνουν να αντικαταστήσουν τα SoA κεραμομεταλλικά ηλεκτρόδια καυσίμου, Ni-YSZ και Ni-GDC, κυρίως λόγω της μικτής αγωγιμότητας που διαθέτουν, της ανθεκτικότητάς τους σε οξειδοαναγωγικούς κύκλους και της περιορισμένης εναπόθεσης άνθρακα που λαμβάνει χώρα όταν η τροφοδοσία περιέχει ανθρακούχες ενώσεις, ζητήματα που αποτελούν τα κύρια προβλήματα των ηλεκτροδίων με ελεύθερο μεταλλικό Ni.

Σε ένα κελί SOEC οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις ανταλλαγής φορτίου λαμβάνουν χώρα στο όριο των τριών φάσεων (three-phase-boundary, TPB), ηλεκτρόδιο-στερεός ηλεκτρολύτης-αέρια φάση, όπου έρχονται σε άμεση επαφή τα ροφημένα μόρια των αέριων αντιδρώντων, τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα οξυγόνου. Πιο αναλυτικά, οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις ηλεκτρόλυσης στην κάθοδο και η αντίδραση αναγωγής του οξυγόνου στην άνοδο είναι:



Εκτός από τις παραπάνω αντιδράσεις, λαμβάνει χώρα και η καταλυτική, αντίστροφη αντίδραση μετατόπισης του CO με ατμό (Reverse Water Gas Shift, RWGS), μέσω της οποίας παράγεται κυρίως το μονοξείδιο του άνθρακα, CO [1].



Στην παρούσα εργασία αναπτύσσονται ηλεκτρόδια καυσίμου χρησιμοποιώντας ως ηλεκτροκαταλύτη τον περοβσκίτη  $\text{La}_{0.75}\text{Sr}_{0.25}\text{Cr}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$  (LSCF0.1) [2] και διερευνάται η επίδραση της παρουσίας GDC στο ηλεκτροκαταλυτικό στρώμα στην απόδοση και τη σταθερότητά του σε διατάξεις ηλεκτρόλυσης τύπου στερεού οξειδίου, SOEC. Συγκεκριμένα, αναπτύσσονται μοναδιαία κελιά τύπου δισκίου χρησιμοποιώντας είτε LSCF0.1 είτε μίγμα LSCF0.1-GDC ως ηλεκτρόδιο καυσίμου και τυπικό LSM-YSZ/LSM ως ηλεκτρόδιο οξυγόνου. Η μελέτη έδειξε ότι ο χρωμίτης LSCF0.1 διαθέτει ικανοποιητική αγωγιμότητα και απόδοση τόσο κατά την ηλεκτρόλυση ατμού, όσο και τη συνδυασμένη ηλεκτρόλυση  $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ , η οποία φαίνεται να ενισχύεται μερικώς με την ανάμειξή του με GDC στο ηλεκτροκαταλυτικό στρώμα.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Ο ηλεκτροχημικός χαρακτηρισμός των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε σε μοναδιαίες διατάξεις τύπου στερεού οξειδίου (button cells) με ηλεκτρολύτη 8YSZ (8% mol ύττρια, CoorsTek), διαμέτρου  $20 \pm 0.5$  mm και πάχους  $1.5 \pm 0.5$  mm. Ο ηλεκτροκαταλύτης  $\text{La}_{0.75}\text{Sr}_{0.25}\text{Cr}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$  (LSCF0.1) έχει παρασκευαστεί με τη μέθοδο sol-gel τροποποιημένη με κιτρικό οξύ [3], ενώ χρησιμοποιήθηκε εμπορικό υλικό  $\text{Gd}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_{1.95}$  (GDC, Cerrotech). Τα δύο υλικά αναμείχθηκαν σε αναλογία 1:1 κατά βάρος σε μύλο με μπάλες ζirkονίας. Ως ηλεκτρόδιο οξυγόνου χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις μίγμα LSM-YSZ (50/50% κ.β., Fuel Cell Materials) και ως στρώμα συλλογής ρεύματος LSM (Fuel Cell Materials). Η εναπόθεση του LSCF0.1-GDC έγινε είτε απευθείας στην επιφάνεια του στερεού ηλεκτρολύτη είτε έχοντας πρώτα εναποθέσει ένα ενδιάμεσο στρώμα (barrier layer) GDC μεταξύ ηλεκτροδίου-ηλεκτρολύτη, ενώ παρασκευάστηκαν και κελιά όπου εναποτέθηκε πάνω από το καθοδικό ηλεκτρόδιο ένα επιπλέον στρώμα LSCF0.1 ως στρώμα συλλογής ρεύματος. Εκτός από το LSCF0.1, σε όλα τα κελιά εναποτέθηκε επιπλέον λεπτό στρώμα λευκοχρύσου Pt (Fuel Cell Materials) για τη συλλογή ρεύματος. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν πέντε διαφορετικοί συνδυασμοί για το ηλεκτρόδιο καθόδου:

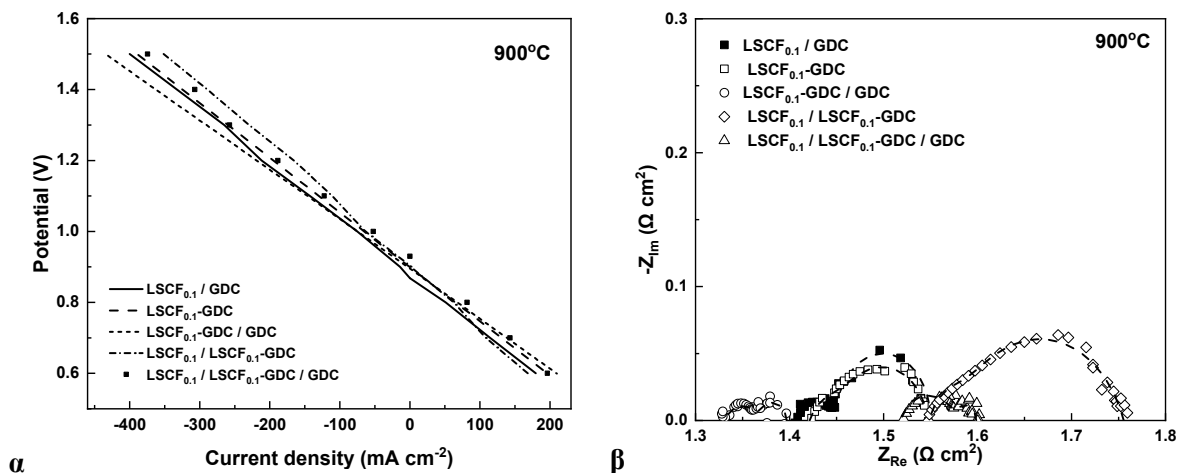
1. LSCF0.1/GDC, όπου το LSCF0.1 έχει εναποτεθεί πάνω σε ενδιάμεσο στρώμα GDC,
2. LSCF0.1-GDC, όπου ο μικτός ηλεκτροκαταλύτης LSCF0.1-GDC (50:50) έχει εναποτεθεί απευθείας στον ηλεκτρολύτη,
3. LSCF0.1-GDC/GDC, όπου ο μικτός ηλεκτροκαταλύτης LSCF0.1-GDC (50:50) έχει εναποτεθεί στην επιφάνεια ενδιάμεσου στρώματος GDC,
4. LSCF0.1/LSCF0.1-GDC, όπως η περίπτωση 2 με επιπλέον ηλεκτροκαταλυτικό στρώμα LSCF0.1 για τη συλλογή ρεύματος,
5. LSCF0.1/LSCF0.1-GDC/GDC, όπως η περίπτωση 3 με επιπλέον ηλεκτροκαταλυτικό στρώμα LSCF0.1 για τη συλλογή ρεύματος.

Για την εναπόθεση όλων των ηλεκτροδίων/στρωμάτων χρησιμοποιήθηκε η τεχνική screen printing. Ακολούθησε πυροσυσσώματωση των δειγμάτων: α) για το GDC (barrier layer) στους  $1350^\circ\text{C}$  για 1h, β) για το LSCF0.1-GDC ή LSCF0.1 στους  $1200^\circ\text{C}$  για 3h, γ) για τα LSM-YSZ/LSM στους  $1150^\circ\text{C}$  για 2h και δ) για το στρώμα Pt στους  $1000^\circ\text{C}$  για 1h. Η ενεργή γεωμετρική επιφάνεια των κελιών είναι ίση με  $\sim 0.79\text{cm}^2$ . Ο ηλεκτροχημικός χαρακτηρισμός πραγματοποιήθηκε σε αντιδραστήρα ProboStat™ (NorECs) που αποτελείται από δύο θαλάμους που μπορούν να τροφοδοτηθούν με διαφορετικές συστάσεις αερίων. Τέλος, για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε γαλβανοστάτης/ποτενσιοστάτης (Autolab PGSTATON302N, Metrohm) με ενσωματωμένο αναλυτή φάσματος συχνοτήτων (FRA32M).

Το εύρος δυναμικού για την αντιστρεπτή λειτουργία ηλεκτρόλυσης  $\text{H}_2\text{O}$ /κελί καυσίμου είναι από 0.6V ως 1.5V, ενώ για τη συνδυασμένη ηλεκτρόλυση από το δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος (O.C.) ως 1.5V.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

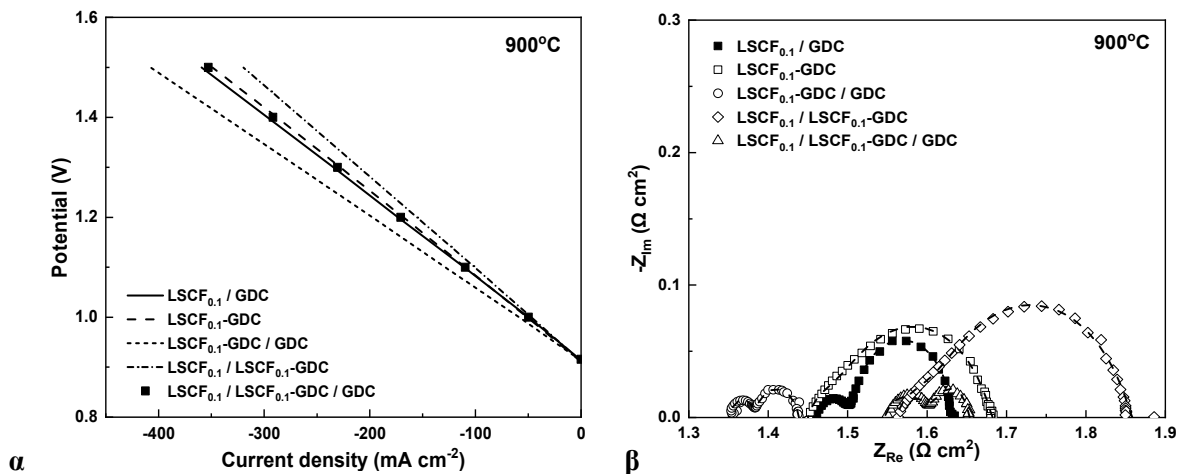
Για κάθε διάταξη, μετά την τοποθέτηση στον αντιδραστήρα και τη στεγανοποίηση αυτής ακολουθείται σταδιακή θέρμανση έως τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας με τροφοδοσία 5%  $\text{H}_2$  σε He στο ηλεκτρόδιο καυσίμου. Αρχικά καταγράφονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες πυκνότητας ρεύματος-δυναμικού (iV) κατά την τροφοδοσία 83%  $\text{H}_2\text{O}$  σε  $\text{H}_2$  στο ηλεκτρόδιο καυσίμου και 100%  $\text{O}_2$  στο ηλεκτρόδιο οξυγόνου. Στο **Σχήμα 1α** φαίνονται οι καμπύλες πυκνότητας ρεύματος-δυναμικού (iV) που αφορούν την ηλεκτρόλυση ατμού (O.C. έως 1.5V) και λειτουργία κυψέλης καυσίμου (O.C. έως 0.6V) που ελήφθησαν στους 900°C για τα κελιά που αναπτύχθηκαν. Οι διατάξεις εμφανίζουν υψηλές αποδόσεις δεδομένου ότι έχουν χρησιμοποιηθεί ηλεκτρολύτες μεγάλου πάχους που συνεισφέρουν μεγάλη ωμική αντίσταση. Όπως φαίνεται, η ανάμιξη του LSCF0.1 με GDC έχει θετική επίδραση στην απόδοση, ενώ αντίθετα η επιπλέον προσθήκη στρώματος LSCF0.1 για συλλογή ρεύματος επιφέρει μείωση της παραγόμενης πυκνότητας ρεύματος και επομένως της απόδοσης. Πιο συγκεκριμένα, η ανάμιξη του GDC με το LSCF0.1 βελτιώνει την απόδοση, καθώς η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος που επιτυγχάνεται είναι 430 mA/cm<sup>2</sup> έναντι των 400mA/cm<sup>2</sup> του καθαρού υποκατεστημένου χρωμίτη. Τη μικρότερη απόδοση εμφανίζει η διάταξη LSCF0.1/LSCF0.1-GDC, η οποία φτάνει τα 350 mA/cm<sup>2</sup>, ενώ η συνολική ειδική αντίσταση (ASR) που υπολογίζεται από την κλίση της καμπύλης iV είναι συγκρίσιμη για τις λειτουργίες ηλεκτρόλυσης και κελιού καυσίμου, με τιμές 1.39 και 1.42 Ω·cm<sup>2</sup> αντίστοιχα, γεγονός που υποδεικνύει ότι το ηλεκτρόδιο ενδείκνυται για αντιστρεπτή λειτουργία όσον αφορά τις αντιδράσεις μεταφοράς φορτίου [4]. Στο **Σχήμα 1β** παρουσιάζονται οι καμπύλες Nyquist που ελήφθησαν στις ίδιες συνθήκες και για πυκνότητα ρεύματος -100 mA/cm<sup>2</sup>. Παρατηρείται ότι τόσο η ωμική αντίσταση ( $R_s = 1.33 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ ) όσο και η αντίσταση πόλωσης ( $R_p = 0.066 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ ) είναι μικρότερες στην περίπτωση του ηλεκτροδίου LSCF0.1-GDC/GDC. Αντίθετα, το ηλεκτρόδιο LSCF0.1/LSCF0.1-GDC παρουσιάζει τις υψηλότερες αντιστάσεις, 1.55 και 0.206 Ω·cm<sup>2</sup> για την  $R_s$  και  $R_p$  αντίστοιχα, σε συμφωνία με τις καμπύλες απόδοσης.



**Σχήμα 1.** Καμπύλες **α.** iV και **β.** Nyquist για τις μοναδιαίες διατάξεις που αναπτύχθηκαν τροφοδοτώντας 83%  $\text{H}_2\text{O}$  σε  $\text{H}_2$  στο ηλεκτρόδιο καυσίμου και 100%  $\text{O}_2$  στο ηλεκτρόδιο του οξυγόνου στους 900°C.

Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και σε συνθήκες συνδυασμένης ηλεκτρόλυσης  $\text{H}_2\text{O}$  και  $\text{CO}_2$ , όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2**. Η τροφοδοσία στο ηλεκτρόδιο καυσίμου είναι 31%  $\text{H}_2\text{O}$ -21%  $\text{CO}_2$ -24%  $\text{H}_2$  σε He, ενώ το ηλεκτρόδιο οξυγόνου τροφοδοτείται με 100%  $\text{O}_2$  στους 900°C. Στο **Σχήμα 2α** παρουσιάζονται οι καμπύλες iV που ελήφθησαν στους 900°C για τις πέντε διαφορετικές διατάξεις. Παρατηρείται ότι και σε αυτή την περίπτωση ο μικτός ηλεκτροκαταλύτης LSCF0.1-GDC/GDC υπερτερεί σημαντικά έναντι των υπόλοιπων διατάξεων όσον αφορά την πυκνότητα ρεύματος. Ενδεικτικά, σε δυναμικό 1.5V επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη πυκνότητα ρεύματος μεταξύ των διατάξεων που μελετήθηκαν, ίση προς 407 mA/cm<sup>2</sup>, ενώ η μικρότερη πυκνότητα ρεύματος, ίση προς 320 mA/cm<sup>2</sup>, εμφανίζεται για τη διάταξη LSCF0.1/LSCF0.1-GDC, όπως και στην περίπτωση της ηλεκτρόλυσης  $\text{H}_2\text{O}$ . Η αντίσταση ASR για το κελί LSCF0.1-GDC/GDC ανέρχεται στα 1.47 Ω·cm<sup>2</sup>, 5.45% μεγαλύτερη

από την αντίστοιχη αντίσταση κατά την ηλεκτρόλυση ατμού στην ίδια θερμοκρασία λειτουργίας και για το ίδιο κελί. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην πιο αργή κινητική της αντίδρασης ηλεκτρόλυσης του  $\text{CO}_2$  και συνεπώς υπάρχει μεγαλύτερη απαίτηση ισχύος προκειμένου να επιτευχθούν εξίσου υψηλές πυκνότητες ρεύματος όπως στην ηλεκτρόλυση  $\text{H}_2\text{O}$  [1]. Παράλληλα, η προσθήκη του LSCF0.1 για τη συλλογή ρεύματος, όπως και στην περίπτωση ηλεκτρόλυσης ατμού, οδηγεί σε μείωση της απόδοσης. Από το **Σχήμα 2β**, όπου φαίνονται οι καμπύλες Nyquist για πυκνότητα ρεύματος  $-100 \text{ mA/cm}^2$ , παρατηρείται ότι τόσο οι ωμικές αντιστάσεις όσο και οι αντιστάσεις πόλωσης είναι γενικά υψηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές για την περίπτωση της ηλεκτρόλυσης ατμού, χωρίς όμως να αλλάζει ουσιαστικά η τάση μεταξύ των διαφόρων συνδυασμών που μελετήθηκαν.



**Σχήμα 2.** Καμπύλες **α.**  $iV$  και **β.** Nyquist για τις μοναδιαίες διατάξεις που αναπτύχθηκαν τροφοδοτώντας 31%  $\text{H}_2\text{O}$ , 21%  $\text{CO}_2$ , 24%  $\text{H}_2$  σε He στο ηλεκτρόδιο καυσίμου και 100%  $\text{O}_2$  στο ηλεκτρόδιο του οξυγόνου στους 900°C

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι μικτοί ηλεκτροκαταλύτες με βάση τον υποκατεστημένο χρωμίτη λανθανίου-στρόντιου  $\text{La}_{0.75}\text{Sr}_{0.25}\text{Cr}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$  με προσθήκη οξειδίου  $\text{Gd}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_{1.95}$  παρουσίασαν ενισχυμένη απόδοση στην ηλεκτρόλυση  $\text{H}_2\text{O}$ , καθώς και στη συνδυασμένη ηλεκτρόλυση  $\text{H}_2\text{O}$  και  $\text{CO}_2$  συγκριτικά με τον καθαρό περοβσκίτη  $\text{La}_{0.75}\text{Sr}_{0.25}\text{Cr}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ . Η προσθήκη ενδιάμεσου στρώματος GDC μεταξύ του μικτού ηλεκτροδίου καυσίμου LSCF0.1-GDC (50:50) και του στερεού ηλεκτρολύτη φαίνεται να βελτιώνει την απόδοση του κελιού και να επιτυγχάνονται υψηλότερες πυκνότητες ρεύματος, καθώς αυξάνεται η διαθέσιμη για αντίδραση τριεπιφάνεια. Αντίθετα, η χρήση επιπλέον στρώματος LSCF0.1 για τη συλλογή ρεύματος οδήγησε σε μείωση της απόδοσης. Στις δύο διεργασίες ηλεκτρόλυσης που μελετήθηκαν, βέλτιστη απόδοση παρουσίασε η διάταξη με μικτό ηλεκτρόδιο καυσίμου LSCF0.1-GDC με ενδιάμεσο στρώμα GDC, ωστόσο η ανάμειξη του GDC επέφερε σημαντικότερη βελτίωση για τη διεργασία της συνδυασμένης ηλεκτρόλυσης  $\text{H}_2\text{O}$  και  $\text{CO}_2$ .

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μέρος της μελέτης πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Ερευνητικού Έργου NewSOC-Next generation solid oxide fuel cell and electrolysis technology και χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και την τεχνολογική πλατφόρμα Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (G.A. 874577). Μέρος της εργασίας υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δράσης ΕΡΕΥΝΩ-ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ-ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ, συγχρηματοδοτήθηκε από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης (ΕΠΠΑ) της Ευρωπαϊκής Ένωσης και εθνικούς πόρους του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνΕΚ) (κωδικός έργου: Τ2ΕΔΚ-00955).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] C.M. Stoots, J.E. O'Brien, J.S. Herring, J.J. Hartvigsen, J. Fuel Cell Sci. Technol. 6 (2009) 1.
- [2] M. Huang, H. Jiang, X. Liu, Y. Xiao, J. Kong, T. Zhou, Int. J. Hyd. Ener. (2022).
- [3] K.M. Papazisi, M.E. Farmaki, D. Tsiplakides, S. Balomenou, Mater. Today: Proc. 5 (2018) 14.
- [4] R. Xing, Y. Wang, Y. Zhu, S. Liu, C. Jin, J. Power Sources 274 (2015).