



Résistances Du Pont 2041 sur Al₂O₃ et diélectrique

Propriétés (valeur et coefficient en température) des résistances Du Pont 2041 (pâte 10 kΩ) sur alumine recouverte par différents diélectriques.

Eigenschaften (Wert und Temperaturkoeffizient) von Du Pont 2041 - Widerständen (10 kΩ-Paste) auf Al₂O₃ bedeckt mit verschiedenen Dielektriken.

Thomas Maeder, 11.7.2000

Projet: TEPLAZID, référence pour METAL.

Mots-clefs: résistances, diélectriques, interactions chimiques, alumine, zircone, métal.

1. Introduction	2
2. Expériences.....	2
3. Résultats	3
4. Conclusions	12

Résumé

Les propriétés (résistance carrée et coefficient en température) de la pâte résistive 10 kΩ Du Pont 2041 ont été étudiées sur 6 diélectriques: ESL 4924, ESL 4702, ESL 4916, Heraeus IP 065, Heraeus GPA 98-029 et Du Pont QM 42, déposés sur des substrats standard en alumine.

Les diélectriques Du Pont QM 42, ESL 4702 et Heraeus GPA 98-029 donnent de bonnes propriétés pour les résistances Du Pont 2041. Les décalages par rapport à l'alumine du coefficient en température en l'absence d'effets de terminaison sont: ESL 4702 (-27 ppm/K), Heraeus IP065 (-22 ppm/K), Heraeus GPA 98-029 (-10 ppm/K), Du Pont QM 42 (+7 ppm/K) et ESL 4924 (+19 ppm/K). ESL 4916 est inutilisable sur alumine.

Kurzfassung

Die Eigenschaften (Quadratwiderstand und Temperaturkoeffizient) der Du Pont 2041 10 kΩ – Widerstandpaste wurden auf 6 Dielektriken studiert: ESL 4924, ESL 4702, ESL 4916, Heraeus IP 065, Heraeus GPA 98-029 und Du Pont QM 42, auf herkömmliche Al₂O₃-Substraten aufgetragen.

Die Dielektrika Du Pont QM 42, ESL 4702 und Heraeus GPA 98-029 führen zu gute Eigenschaften der Du Pont 2041 – Widerstände. Die Verschiebungen der Temperaturkoeffiziente gegenüber Al₂O₃ sind: ESL 4702 (-27 ppm/K), Heraeus IP065 (-22 ppm/K), Heraeus GPA 98-029 (-10 ppm/K), Du Pont QM42 (+7 ppm/K) und ESL 4924 (+19 ppm/K). ESL 4916 ist auf Al₂O₃ unbrauchbar.

1. Introduction

La déposition de résistances sur diélectrique est nécessaire sur substrats métalliques, et probablement aussi sur zircone, car les premiers essais tendent à montrer que le coefficient en température des résistances Du Pont (DP) 2041 est décalé chimiquement vers le haut par la zircone. Sur alumine, la possibilité d'ajouter des résistances sur diélectrique permettrait une flexibilité supplémentaire dans la conception et une augmentation de la densité, surtout des poutres.

Cette étude vise à évaluer l'effet "chimique" de 6 diélectriques sur les propriétés électriques (valeur et dépendance en température) des résistances DP 2041 (pâte 10 kΩ) : ESL 4924, ESL 4916 et Heraeus (Her) GPA 98-029 (diélectriques pour l'acier), Her IP 065 (verre de protection 850°C, « *hermetisches Glas* »), ESL 4702 (diélectrique de protection) et DP QM 42 (diélectrique multicouches pour Al₂O₃), déposés sur des substrats standard en alumine. Comme on peut considérer que la dilatation thermique du substrat reste constante, on observe ici uniquement l'effet de l'interaction chimique entre le diélectrique et les résistances sur les propriétés.

2. Expériences

Substrats

Les substrats sont en alumine "standard" 96% (Kyocera A-476, Haldemann & Porret), d'épaisseur 0.50 mm. Une partie des tests a aussi été répétée avec des substrats de 0.25 mm d'épaisseur, plus courants dans le cas des poutres.

Circuit et pâtes

Le circuit "test patterns" est utilisé ici. Il a comme caractéristiques principales:

- Largeur de résistances 0.6 et 1.5 mm.
- Longueur de résistances 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.5 et 5.0 mm.
- 2 niveaux de conducteurs (terminaisons des résistances), usuellement AgPd et Au.
- 4 zones équivalentes par substrat = 4 (8 = 4 * 2 pour la longueur 0.8 mm) résistances nominale-ment identiques par substrat.

Les terminaisons ESL usuelles sont utilisées dans cette étude : ESL 9635B (Ag: Pd 3:1) et ESL 8837 (or fin). Les résistances (sérigraphie: trame 325 *mesh* / émulsion 40 μm) utilisent la pâte DP 2041 (10 kΩ).

Pour chaque diélectrique / épaisseur de substrat, 2-3 substrats ont usuellement été fabriqués, ce qui donne dans la plupart des cas 8 à 12 résistances nominale-ment identiques. Le tableau 2-I ci-dessous recense les numéros de substrat correspondants. Aucune couche de protection n'a été utilisée dans cette étude.

Diélectrique ou de séquence diélectriques	Substrat Al ₂ O ₃ d'épaisseur 0.50 mm (standard)	Substrat Al ₂ O ₃ d'épaisseur 025 mm (fin)
directement sur Al ₂ O ₃ (référence)	99-023, 99-024, 99-025, 99-026	99-120, 99-121, 99-122
2 x ESL 4924	99-060, 99-061, 99-062	99-063, 99-064
2 x ESL 4916	99-135, 99-136, 99-137	
2 x Her GPA 98-029	99-169, 99-170, 99-171, 99-172	
2 x Her IP065	99-138, 99-139	99-158, 99-159
ESL 4924 – ESL 4702	99-127, 99-138, 99-129	99-123, 99-124
2 x DP QM42	99-133, 99-134	

Tableau 2-I. Diélectriques utilisés et codes des *Test Patterns* correspondants.

Cuisson

Les substrats ont été cuits posés directement sur la bande du four Sierratherm de l'IPM (résistances vers le haut). Le profil long « 60MN_PR » a été utilisé pour la cuisson de chaque couche de diélectrique, et le profil standard « 30MN_PR » pour celle des terminaisons (AgPd, puis Au) et des résistances. Les réglages correspondants du four sont donnés au tableau 2–II ci-dessous.

Profil	Température nominale [°C]	Vitesse de bande [cm/min]	Zone 1 [°C]	Zone 2 [°C]	Zone 3 [°C]	Zone 4 [°C]	Zone 5 [°C]	Zone 6 [°C]
30MN_PR	850	8.67	540	765	866	867	876	890
60MN_PR	850	5.91	525	730	863	873	884	855

Tableau 2–II. Réglages du four Sierratherm pour le profil standard « 30MN_PR » et long « 60MN_PR ».

Mesures

Les résistances ont été mesurées dans l'armoire climatique Vötsch, à -25°C , $+25^{\circ}\text{C}$ et $+100^{\circ}\text{C}$, afin de déterminer valeurs et coefficients en température. La valeur nominale de la résistance carrée R_c est donnée à $+25^{\circ}\text{C}$, et correspond à la moyenne des résistances équivalentes.

$$R_c = \frac{b}{l} \cdot R$$

R_c	résistance carrée
R	résistance à $+25^{\circ}\text{C}$
b	largeur de la résistance
l	longueur de la résistance (entre terminaisons)

A partir des mesures supplémentaires à -25°C et $+100^{\circ}\text{C}$, on tire les coefficients en température à „froid“ et à „chaud“ $CTCR$ et $HTCR$:

$$CTCR = \frac{R_{-25^{\circ}\text{C}} - R_{+25^{\circ}\text{C}}}{-R_{+25^{\circ}\text{C}} \cdot 50 \text{ K}}$$

$$HTCR = \frac{R_{+100^{\circ}\text{C}} - R_{+25^{\circ}\text{C}}}{R_{+25^{\circ}\text{C}} \cdot 75 \text{ K}}$$

$CTCR$	coefficient en température à froid, entre $+25^{\circ}\text{C}$ et -25°C
$HTCR$	coefficient en température à chaud, entre $+25^{\circ}\text{C}$ et $+100^{\circ}\text{C}$
$R_{-25^{\circ}\text{C}, +25^{\circ}\text{C}, +100^{\circ}\text{C}}$	valeur de la résistance, à resp. -25°C , $+25^{\circ}\text{C}$, et $+100^{\circ}\text{C}$

3. Résultats

3.1 Effet de l'interaction diélectrique - résistance

Afin de s'affranchir dans la mesure du possible des terminaisons, les valeurs et coefficients en température sont donnés pour les résistances les plus longues, au tableau 3–I et aux figures 3–1 et 3–2 (tous les diélectriques sauf ESL 4916), et 3–3 et 3–4 (ESL 4916).

On constate d'ores et déjà que ESL 4916 se comporte très différemment de tous les autres diélectriques : il confère aux résistances de coefficients en température très négatifs (de l'ordre de -1000 ppm/K) et variables. Une inspection au binoculaire permet de constater que le diélectrique est fissuré ; en effet, ce diélectrique adapté aux aciers inox austénitiques a un coefficient de dilatation thermique très élevé, de l'ordre de 10 ppm/K. On ne peut donc le tester chimiquement sur l'alumine. Les autres diélectriques, même ceux conçus pour une utilisation sur acier, ne montrent pas ce problème, et on peut donc les comparer ici.

Résistance carrée en fonction du diélectrique

Sur alumine d'épaisseur 0.50 mm, la résistance carrée est à peu près la même pour tous les diélectriques (fig. 3–1) et diffère peu de celle observée directement sur alumine. Seul ESL 4702 (dans la combinaison ESL 4924 – ESL 4702) semble pousser les valeurs vers le haut. Ce diélectrique semble encore un peu poreux à la température de cuisson usuelle (850°C), et il se peut qu'il « pompe » une partie de la résistance, ce qui reste à confirmer.

Des différences plus importantes sont observées sur l'alumine mince (0.25 mm). Elles sont probablement en majeure partie imputables à la sérigraphie, plus difficile sur ces substrats minces ; on l'observe particulièrement bien sur la différence d'épaisseur entre résistances de largeur 0.6 mm et celles de largeur 1.5 mm, ce qui se traduit par une valeur nettement plus élevée pour ces dernières.

Coefficients en température *CTCR* et *HTCR*

Une comparaison des diélectriques est donnée au tableau 3–I et à la fig. 3–II. Her GPA 98–029 et DP QM42 sont les plus proches des caractéristiques de l'alumine pour les résistances les plus longues. Avec DP QM42, la dispersion semble nettement plus grande (peut-être un problème de mesure à froid). Her IP 065 et ESL 4702 décalent les valeurs vers le bas, et ESL 4924 les décale vers le haut. Un léger décalage est aussi observé avec Her GPA 98-029 (vers le bas) et DP QM42 (vers le haut). Si on calcule un décalage moyen (*HTCR* et *CTCR*, largeur 0.6 et 1.5 mm) pour chaque diélectrique, on obtient la séquence : ESL 4924 – ESL 4702 (-27 ppm/K), Her IP065 (-22 ppm/K), Her GPA 98–029 (-10 ppm/K), DP QM42 (+7 ppm/K) et ESL 4924 (+19 ppm/K).

Les mêmes décalages chimiques des coefficients en température sont grosso modo observés sur acier¹, où ils sont superposés avec le décalage thermomécanique dû à l'effet de jauge et à la différence de dilatation thermique entre l'acier et l'alumine.

Sur la base de ces résultats, on peut dire qu'il est possible de déposer des résistances sur diélectrique sur alumine avec DP QM42, dans la mesure où on peut lever l'incertitude au sujet de la dispersion des coefficients en température. Ce diélectrique a en outre l'avantage de résister à l'effet de pile entre argent et or sur niveaux différents. Her IP065 semble donner de bonnes propriétés, mais n'est pas bien compatible avec les conducteurs. Her GPA 98-029 semble meilleur électriquement que DP QM42, mais il pourrait être légèrement en traction sur l'alumine (c'est un diélectrique conçu pour l'acier), situation qu'il faut éviter.

Afin d'avoir une alternative à DP QM42 sur l'alumine, il faudra essayer quelques diélectriques multicouches d'autres fournisseurs (ESL, Heraeus).

Diélectrique / combinaison	<i>CTCR</i>	<i>CTCR</i>	<i>HTCR</i>	<i>HTCR</i>
	Au longueur 5 mm largeur 0.6 mm [ppm/K]	Au longueur 5 mm largeur 1.5 mm [ppm/K]	Au longueur 5 mm largeur 0.6 mm [ppm/K]	Au longueur 5 mm largeur 1.5 mm [ppm/K]
ESL 4924 – ESL 4702	-29 ± 8	-29 ± 7	+21 ± 6	+21 ± 4
Her IP065 (2x)	-21 ± 3	-28 ± 2	+30 ± 1	+27 ± 1
Her GPA 98-029 (2x)	-8 ± 6	-11 ± 6	+37 ± 1	+35 ± 1
alumine (référence)	-4 ± 3	-2 ± 3	+48 ± 1	+49 ± 1
DP QM42	+10 ± 16	+14 ± 17	+50 ± 3	+46 ± 1
ESL 4924 (2x)	+22 ± 5	+20 ± 7	+64 ± 6	+63 ± 5

Tableau 3–1. Coefficients en température (moyenne ± écart-type) pour les résistances DP 2041 les plus longues (5 mm) et terminées avec ESL 8837 (Au), en fonction du diélectrique et de la largeur.

¹ voir rapport « DP 2041 Widerstände auf 1.4016 (X6Cr17) Edelstahl mit verschiedenen Dielektriken », 3.4.2000.

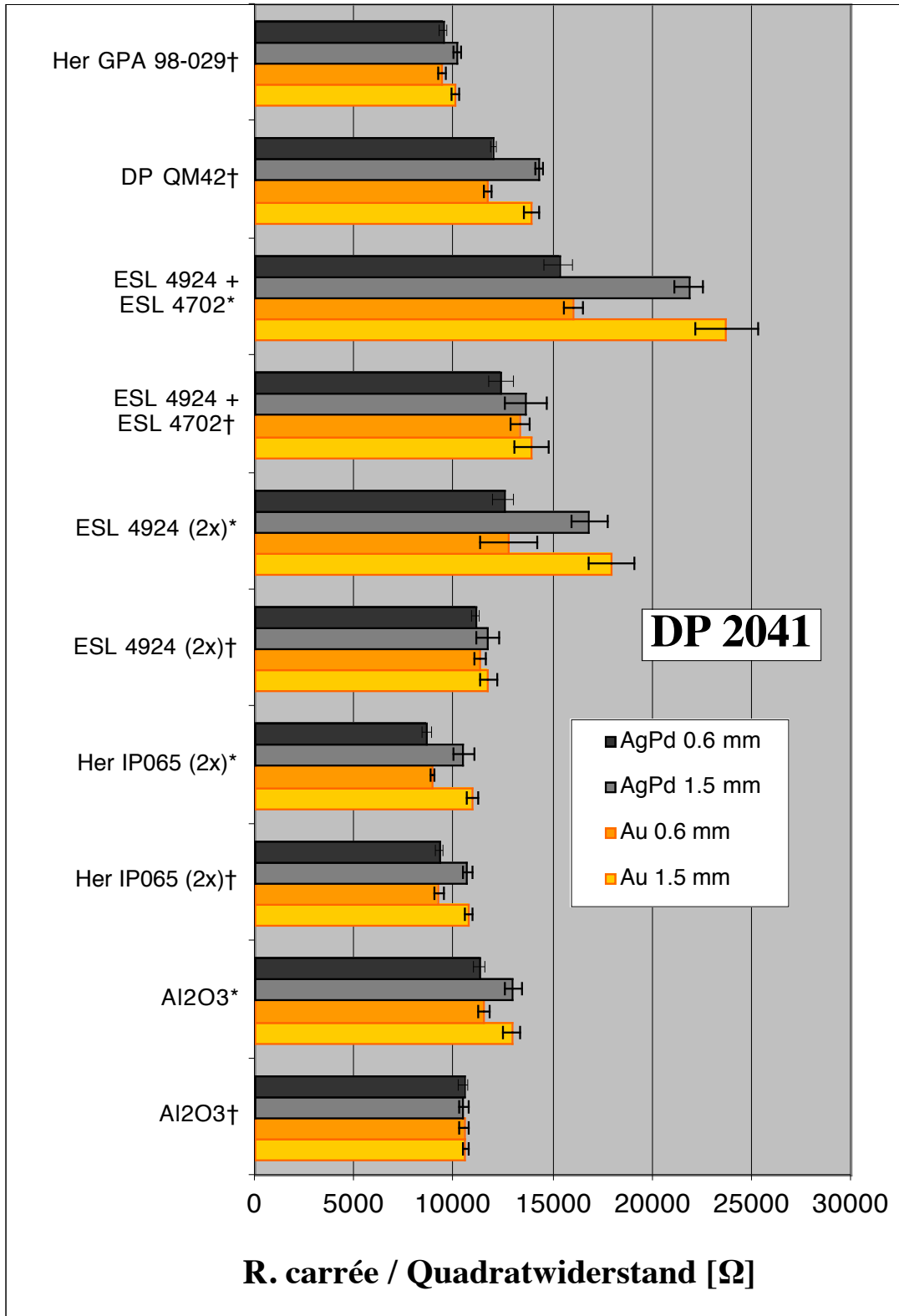


Figure 3-1. Résistances carrées des résistances les plus longues (5 mm), en fonction du diélectrique utilisé sur Al₂O₃, des terminaisons et de la largeur de résistance (0.6 ou 1.5 mm). Barres d'erreur = écarts-type. Epaisseur du substrat: 0.50 mm (†) ou 0.25 mm (*). Al₂O₃: directement sur Al₂O₃ (référence).

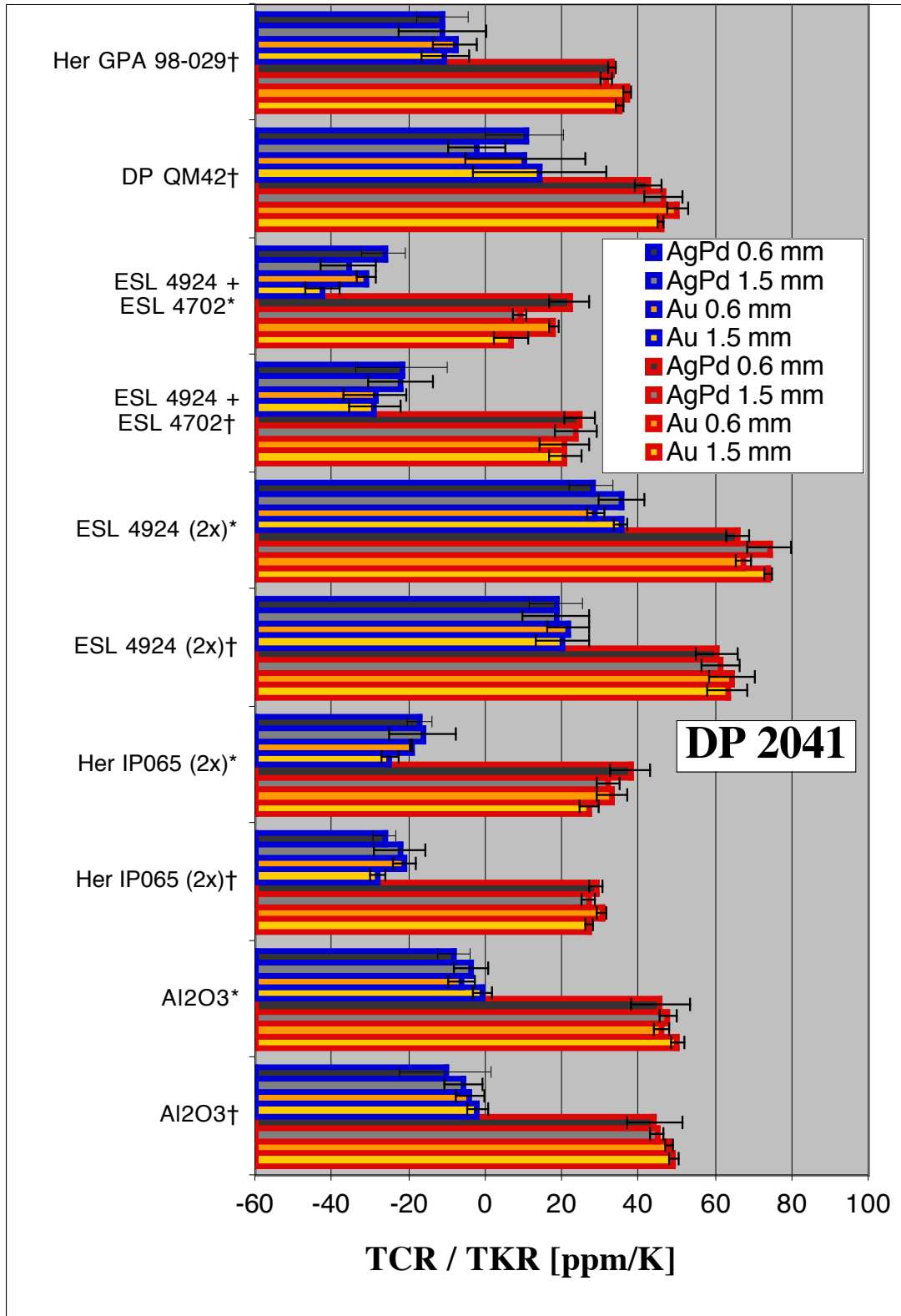


Figure 3-2. Coefficients en température des résistances les plus longues (5 mm), en fonction du diélectrique utilisé sur Al₂O₃, des terminaisons et de la largeur de résistance (0.6 ou 1.5 mm). Bordure bleue: à froid (CTCR); rouge: à chaud (HTCR). Barres d'erreur = écarts-type. Epaisseur du substrat: 0.50 mm (†) ou 0.25 mm (*). Al₂O₃: directement sur Al₂O₃ (référence).

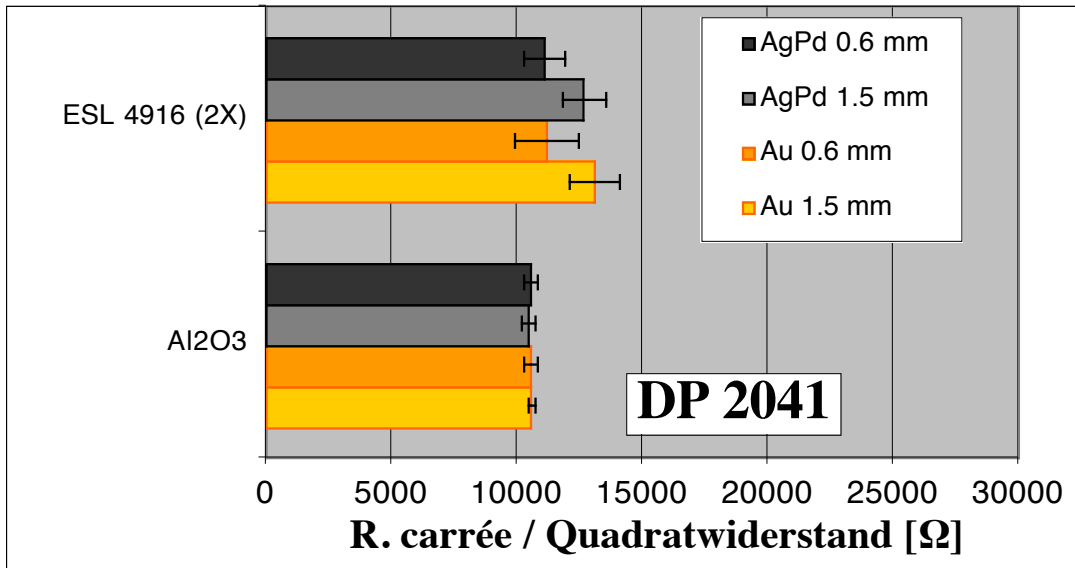


Figure 3–3. Résistances carrées des résistances les plus longues (5 mm), sur ESL 4916 et directement sur Al₂O₃, en fonction des terminaisons et de la largeur de résistance (0.6 ou 1.5 mm).
Barres d'erreur = écarts-type. Epaisseur du substrat: 0.50 mm.

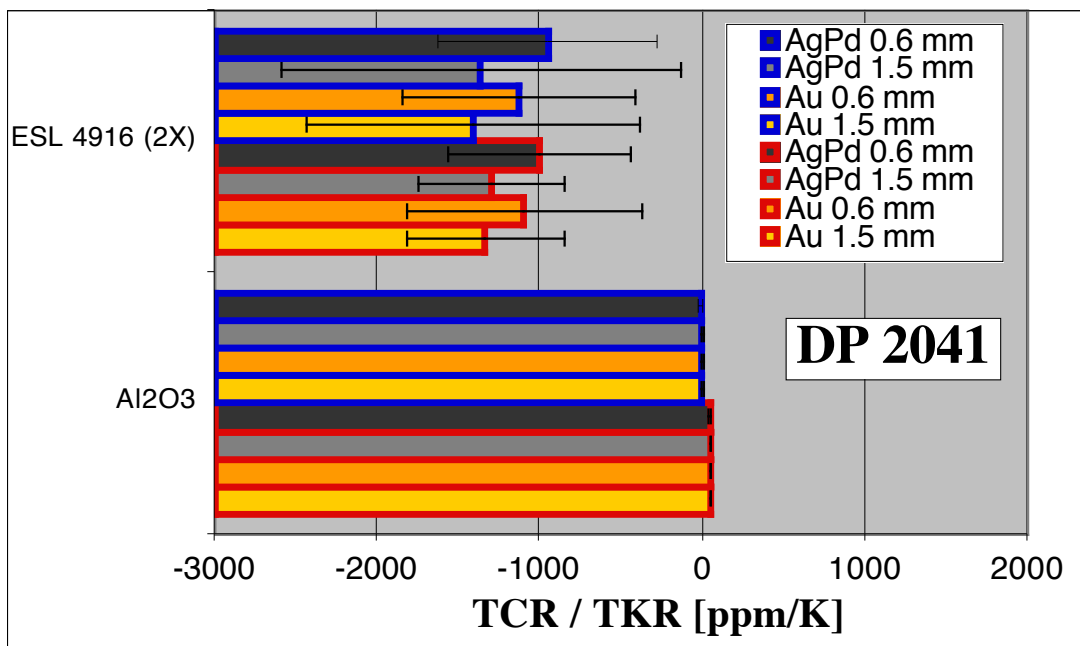


Figure 3–4. Coefficients en température des résistances les plus longues (5 mm), sur ESL 4916 et directement sur Al₂O₃. Bordure bleue: à froid (CTCR); rouge: à chaud (HTCR).
Barres d'erreur = écarts-type. Epaisseur du substrat: 0.50 mm.

3.2. Effet de terminaison (AgPd et Au)

Les valeurs de résistance carrée et les coefficients en température sont donnés en fonction de la longueur de résistance aux figures 3–5 à 3–11. Dans un but de clarté, seules les valeurs pour les résistances de 0.6 mm de largeur déposées sur les substrats de 0.50 mm d'épaisseur sont données ; les autres courbes ont sensiblement la même allure. ESL 4916 n'est pas discuté ici, car ce diélectrique est inutilisable sur l'alumine (voir 3.1).

Avec les terminaisons Au, on obtient essentiellement les mêmes faibles effets de terminaison pour tous les diélectriques ; il s'agit donc d'un effet de sérigraphie. Les courbes de coefficient en température sont très monotones, et simplement décalées sur l'ordonnée des graphiques.

En revanche, l'effet de terminaison sur les coefficients en température diffère sur Ag:Pd 3:1, ce qui indique que la diffusion (vraisemblablement de Ag) est influencée par le diélectrique :

- Sur ESL 4924, DP QM42 et Her GPA 98–029, le coefficient en température de DP 2041 diminue assez fortement pour les faibles longueurs (<1 mm).
- Sur l'alumine directement, le coefficient en température baisse aussi en allant de 5 à 0.6 mm, mais remonte ensuite. La dépendance en fonction de la longueur est plus faible que pour les 3 diélectriques mentionnés ci-dessus.
- Sur Her IP065, on observe un effet inverse : le coefficient en température est très stable entre 1 et 5 mm, mais augmente pour les faibles longueurs.
- ESL 4702 donne les valeurs les plus constantes du coefficient en température en fonction de la longueur.

Dans tous les cas, cet effet est suffisamment faible pour permettre l'utilisation de ces 5 diélectriques, et la sélection d'un diélectrique approprié se fera donc selon d'autres critères (adhérence, contraintes, dispersion, etc.).

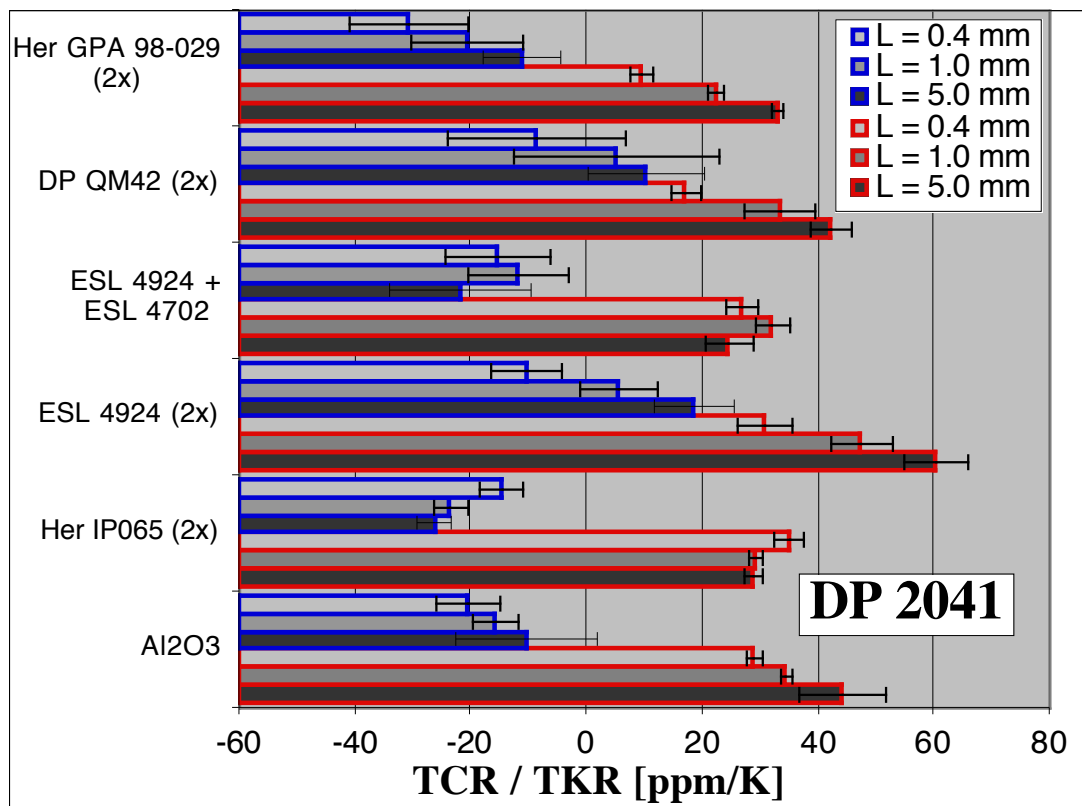


Figure 3–5. Coefficients en température des résistances pour 3 longueurs, en fonction du diélectrique utilisé sur Al₂O₃. Largeur: 0.6 mm ; terminaisons: ESL 9635B (Ag:Pd 3:1) ; épaisseur du substrat : 0.50 mm. Bordure bleue: à froid (CTCR); rouge: à chaud (HTCR). Barres d'erreur = écarts-type. Al₂O₃: directement sur Al₂O₃ (référence).

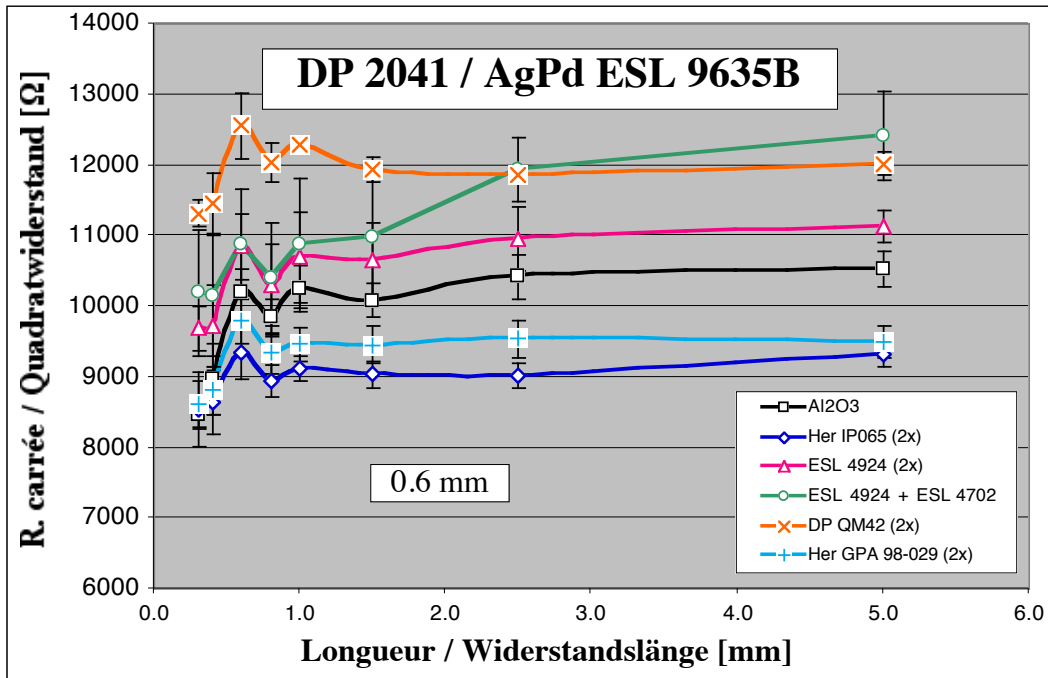


Figure 3–6. Résistance carrée en fonction du diélectrique utilisé sur Al₂O₃ et de la longueur. Largeur: 0.6 mm ; terminaisons: ESL 9635B (Ag:Pd 3:1) ; épaisseur du substrat : 0.50 mm. Barres d'erreur = écarts-type. Al₂O₃: directement sur Al₂O₃ (référence).

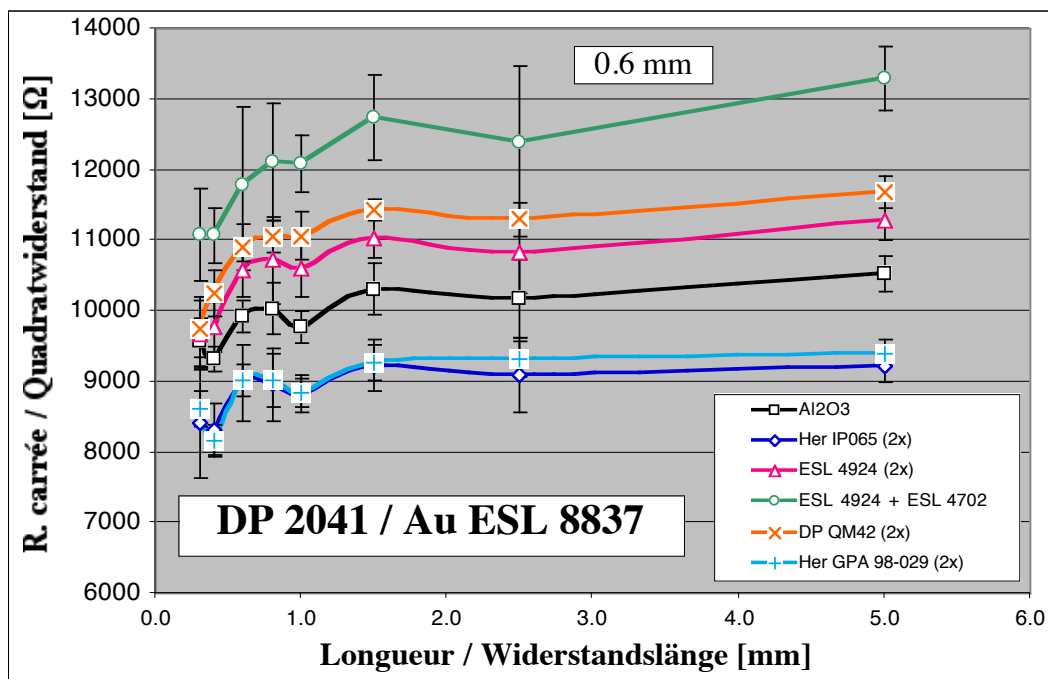


Figure 3–7. Résistance carrée en fonction du diélectrique utilisé sur Al₂O₃ et de la longueur. Largeur: 0.6 mm ; terminaisons: ESL 8837 (Au fin) ; épaisseur du substrat : 0.50 mm. Barres d'erreur = écarts-type. Al₂O₃: directement sur Al₂O₃ (référence).

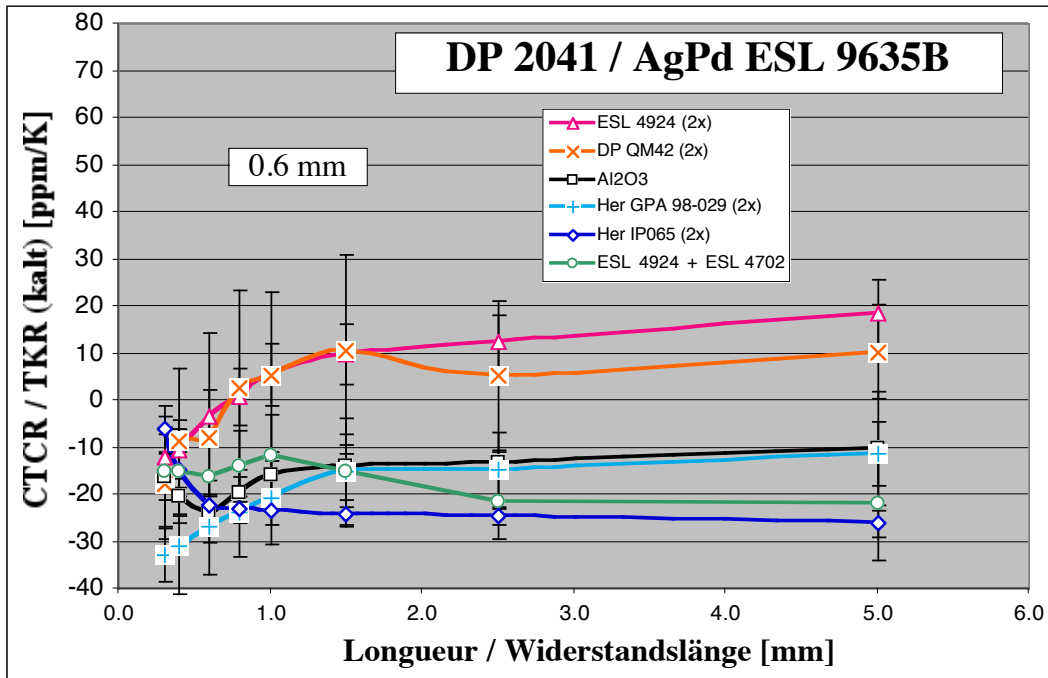


Figure 3–8. Coefficient en température à froid (*CTCR*) en fonction du diélectrique utilisé sur Al₂O₃ et de la longueur. Largeur: 0.6 mm ; terminaisons: ESL 9635B (Ag:Pd 3:1) ; épaisseur du substrat : 0.50 mm. Barres d'erreur = écarts-type. Al₂O₃: directement sur Al₂O₃ (référence).

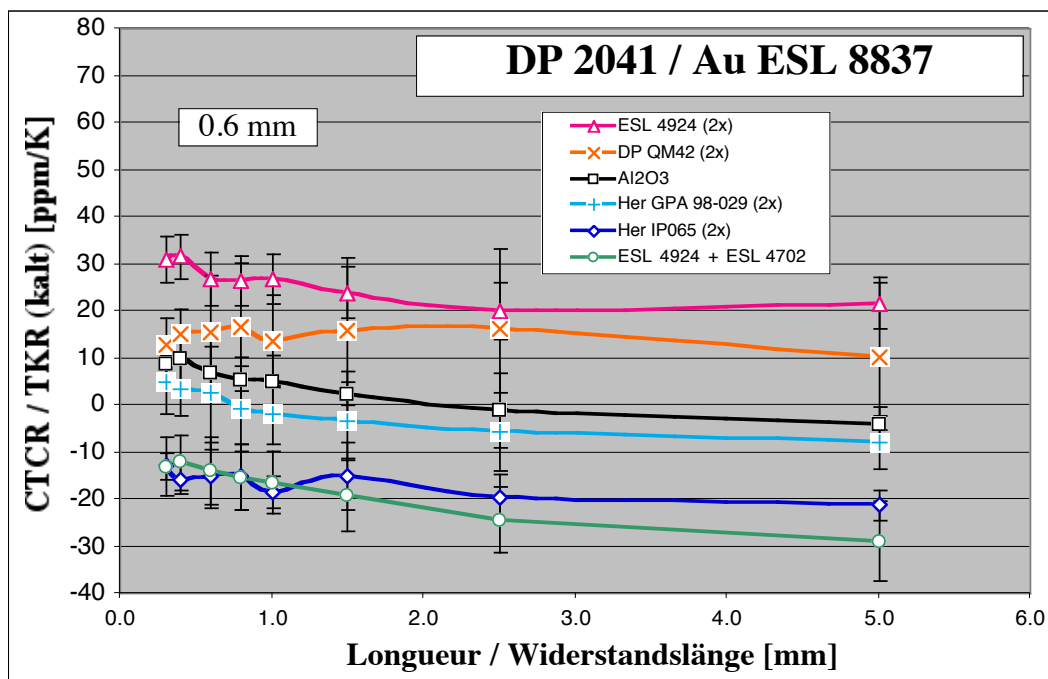


Figure 3–9. Coefficient en température à froid (*CTCR*) en fonction du diélectrique utilisé sur Al₂O₃ et de la longueur. Largeur: 0.6 mm ; terminaisons: ESL 8837 (Au fin) ; épaisseur du substrat : 0.50 mm. Barres d'erreur = écarts-type. Al₂O₃: directement sur Al₂O₃ (référence).

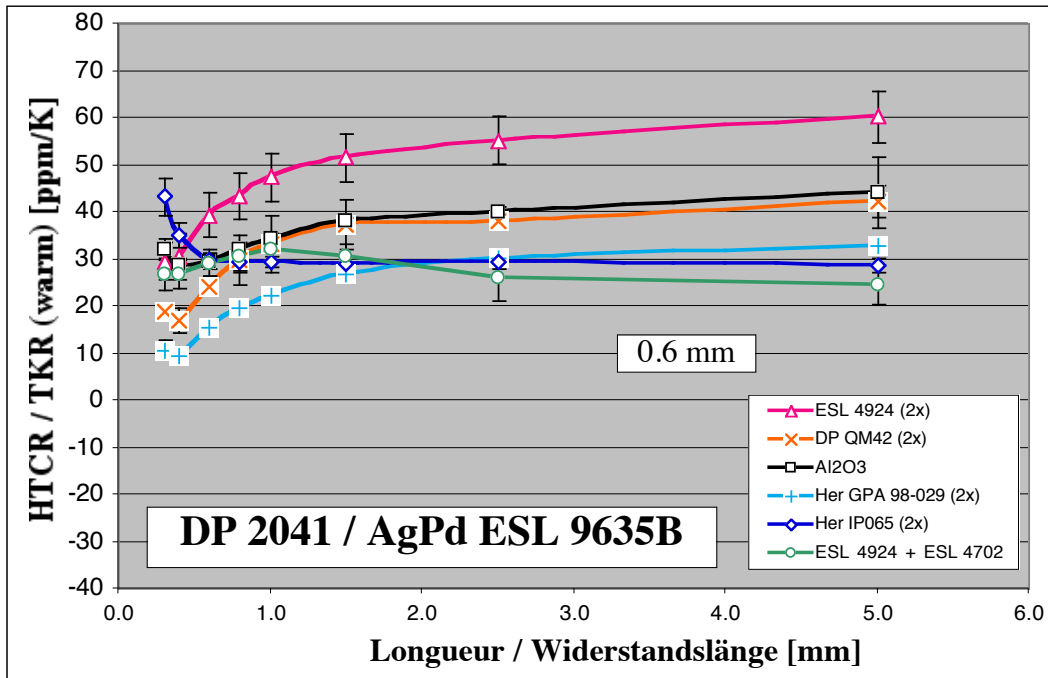


Figure 3–10. Coefficient en température à chaud (*HTCR*) en fonction du diélectrique utilisé sur Al₂O₃ et de la longueur. Largeur: 0.6 mm ; terminaisons: ESL 9635B (Ag:Pd 3:1) ; épaisseur du substrat : 0.50 mm. Barres d'erreur = écarts-type. Al₂O₃: directement sur Al₂O₃ (référence).

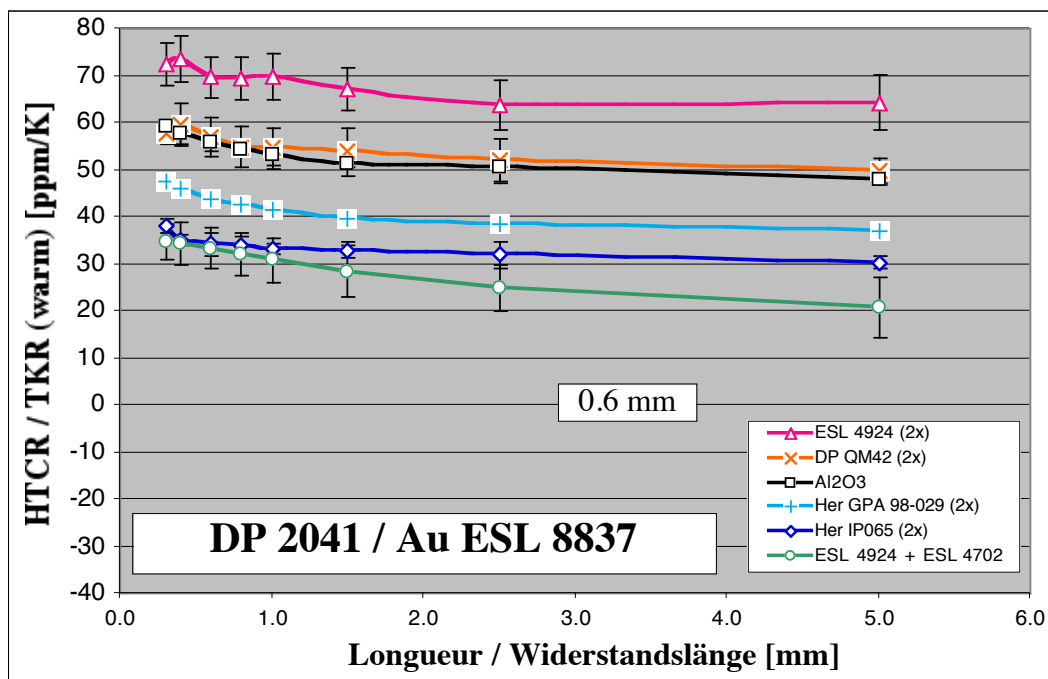


Figure 3–11. Coefficient en température à chaud (*HTCR*) en fonction du diélectrique utilisé sur Al₂O₃ et de la longueur. Largeur: 0.6 mm ; terminaisons: ESL 8837 (Au fin) ; épaisseur du substrat : 0.50 mm. Barres d'erreur = écarts-type. Al₂O₃: directement sur Al₂O₃ (référence).

4. Conclusions

L'objet de cette étude était la déposition de la pâte résistive 10 kΩ DP 2041 sur plusieurs diélectriques déposés sur alumine, ce qui donne aussi une première base pour la sélection d'un diélectrique approprié pour la déposition sur zircone et métal. Comme la dilatation thermique du substrat (alumine) reste sensiblement identique, les variations des propriétés des résistances sont purement dues à l'interaction chimique résistance – diélectrique, sans contribution thermomécanique.

Hormis ESL 4916, dont le coefficient de dilatation thermique trop élevé provoque la fissuration spontanée au refroidissement après cuisson sur alumine, tous les diélectriques ont pu être étudiés. Tous les diélectriques présentent en outre une bonne adhérence avec le substrat. En l'absence d'effets de terminaison (résistances de 5 mm terminées or), les décalages suivants des coefficients de température (par rapport aux résistances directement sur alumine) ont été observés : ESL 4702 (-27 ppm/K), Her IP065 (-22 ppm/K), Her GPA 98-029 (-10 ppm/K), DP QM42 (+7 ppm/K) et ESL 4924 (+19 ppm/K). Ces décalages chimiques sont assez similaires à ceux observés sur l'acier inox ferritique 1.4016.

Sur cette base, on sélectionnerait Her GPA 98-029 ou DP QM42 en tant que diélectrique sur alumine, avec une préférence pour DP QM42: en effet, Her GPA 98-029 est conçu pour l'acier et semble avoir un coefficient de dilatation thermique très légèrement supérieur à celui de l'alumine, ce qui est défavorable.

Pour le choix d'un diélectrique sur l'acier ou la zircone, on cherche des diélectriques ayant un coefficient de dilatation thermique plus élevé afin de minimiser les contraintes, et un décalage des coefficients en température plutôt vers le bas afin de compenser partiellement le décalage thermomécanique du coefficient en température dû au coefficient de dilatation thermique plus élevé du substrat. Dans ce cas, Her GPA 98-029 et éventuellement ESL 4702 devraient donner de bonnes propriétés. Her IP065 donne des propriétés favorables des résistances, mais a le défaut de pénétrer dans les conducteurs. Sur acier, l'adhérence n'est pas un critère de sélection très important, car on dépose au minimum deux couches, et on peut choisir une première couche favorable à ce point de vue. Sur zircone, en revanche, on peut être amené à ne déposer qu'une couche, uniquement dans le but d'améliorer la compatibilité chimique du substrat avec les résistances ; l'adhérence est dans ce cas importante.