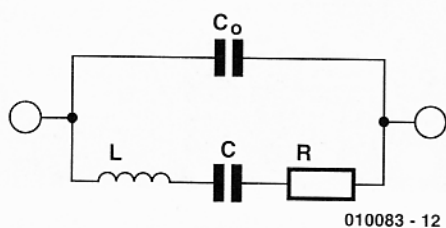


# Κρύσταλλοι και ταλαντωτές

Όταν μετράει η σταθερότητα.....

Owen Bishop

**Μία επισκόπηση των ουσιαστικών αυτών στοιχείων με αναφορά στο πώς λειτουργούν και πώς χρησιμοποιούνται. Για κάθε ταλαντωτή δίνονται πρακτικές τιμές εξαρτημάτων.**



Σχήμα 1. Το ηλεκτρονικό ισοδύναμο ενός κρυστάλλου χαλαζία.

λίθιο-νιόβιο, λίθιο-ταντάλιο, και φωσφορικό-αλουμίνιο, τα οποία χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές. Πέρα από αυτά υπάρχουν κεραμικά υλικά όπως τα PZT, που αποτελούνται από στέρεα διαλύματα μολύβδου, ζirkονίου και τιτάνιου. Μία άλλη ομάδα πιεζο-ηλεκτρικών υλικών περιλαμβάνει πολυμερή όπως πολυβινυλοχλωρίδιο και διφθοριοπολυαιθυλένιο. Στα υλικά αυτά οι πιεζο-ηλεκτρικές ιδιότητες εξαρτώνται από την επεξεργασία την οποία έχουν υποστεί. Ένα λεπτό πλαστικό φύλλο θερμαίνεται και εκτίθεται σε ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο και στην συνέχεια ψύχεται σε θερμοκρασία δωματίου. Η διαδικασία αυτή προκαλεί πόλωση του υλικού, το οποίο στην συνέχεια παρουσιάζει πιεζο-ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.

## Ηλεκτρονικό ισοδύναμο

Από ηλεκτρονική άποψη η συμπεριφορά του κρυστάλλου μπορεί να εξομοιωθεί από ένα κύκλωμα RLC (Σχήμα 1). Το πηνίο αντιστοιχεί στο πλακίδιο του κρυστάλλου, ο πυκνωτής C εκπροσωπεί την ακαμψία του ενώ η αντίσταση R εκπροσωπεί τις ενεργειακές απώλειες όταν ο κρύσταλλος κάμπτεται ή βρίσκεται σε κάμψη. Ο δεύτερος πυκνωτής  $C_o$ , αντιστοιχεί στην χωρητικότητα των ακροδεκτών που τοποθετούνται στην κάθε πλευρά του πλακιδίου. Τυπικά, το L έχει πολύ μεγάλη τιμή ενώ αντίθετα το C είναι πολύ μικρό. Για παράδειγμα σε ένα κρύσταλλο κομμένο για να ταλαντώνεται στα 200 KHz, το L είναι 27 H, το C είναι μόλις 0,024 pF, η R είναι 2 KΩ και το  $C_o$  είναι 9 pF. Τιμές σαν και αυτές χρησιμοποιούνται όταν γίνεται εξομοίωση της λειτουργίας του κρυστάλλου σε κά-

ποιο πρόγραμμα εξομοίωσης στον υπολογιστή. Ο λόγος L προς C είναι πολύ μεγαλύτερος απ' ό,τι θα μπορούσαμε να επιτύχουμε με την χρήση πραγματικών εξαρτημάτων και δίνει στον κρύσταλλο πολύ υψηλό συντελεστή Q (συντελεστής ποιότητας). Ένας κρύσταλλος μπορεί να έχει Q μέχρι 100.000. Συγκρίνετε την τιμή αυτή με το Q ενός τυπικού κυκλώματος LC το οποίο φτάνει μόλις σε μερικές εκατοντάδες.

Οι κρύσταλλοι έχουν την δυνατότητα να οδηγηθούν σε σειριακό συντονισμό ή σε παράλληλο συντονισμό. Στην συχνότητα σειριακού συντονισμού, ο κρύσταλλος συμπεριφέρεται σαν πυκνωτής και πηνίο σε σειρά. Η εμπέδηση στα άκρα του κρυστάλλου είναι η ελάχιστη (ίση μόνο με R). Στην συχνότητα παράλληλου συντονισμού η οποία και είναι ελαφρώς υψηλότερη, ο κρύσταλλος συμπεριφέρεται σαν επαγωγή και χωρητικότητα σε παραλληλία. Σε αυτή την περίπτωση η εμπέδηση του φτάνει στην μέγιστη τιμή. Οι κρύσταλλοι συνήθως τεμαχίζονται έτσι ώστε να συμπεριφέρονται καλύτερα με τον ένα ή τον άλλο τρόπο. Είναι επίσης δυνατό να κοπούν για να λειτουργήσουν σε θεμελιώδη ή αρμονική (υπερτονική) συχνότητα. Οι υπερτονικές συχνότητες, είναι περιττές αρμονικές της θεμελιώδους συχνότητας. Για παράδειγμα ένας κρύσταλλος κομμένος για να ταλαντώνεται στα 100 KHz μπορεί επίσης να εκτελέσει ταλάντωση στα 300 KHz, 500 KHz, 700 KHz, ή και σε ακόμη υψηλότερες αρμονικές.

Ένας από τους περιορισμούς των κρυστάλλων έγκειται στο ότι ο κρύσταλλος που κόβεται για να έχει πού υψηλή θεμελιώδη συχνότητα ενδέχεται να προκύψει πολύ λεπτός, και για αυτό το λόγο να είναι ευάλωτος σε μηχαν-

Η σταθερότητα του καλύτερου ταλαντωτή RC είναι περίπου 0,1 %, ενώ οι ταλαντωτές LC φθάνουν σε σταθερότητα το 0,01 %. Στην περίπτωση όπου απαιτείται μεγαλύτερη σταθερότητα, η μόνη επιλογή είναι ο κρυσταλλικός ταλαντωτής. Ορισμένα κρυσταλλικά υλικά, κύριο παράδειγμα των οποίων είναι ο χαλαζίας, έχουν την ιδιότητα να παράγουν ηλεκτρικό πεδίο όταν υφίστανται μηχανική πίεση και αντίστροφα, υφίστανται μηχανική παραμόρφωση όταν υποβάλλονται σε ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό είναι το γνωστό πιεζο-ηλεκτρικό φαινόμενο. Κατά συνέπεια, είναι δυνατόν να τεμαχίσουμε ένα κρύσταλλο έτσι ώστε όταν υποβάλλεται σε εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο να δονείται φυσικά σε μία δεδομένη συχνότητα. Εκτός λοιπόν από τον ηλεκτρομαγνητικό συντονισμό ενός δικτυώματος LC, έχουμε και τον ηλεκτρο-μηχανικό συντονισμό του πιεζο-ηλεκτρικού κρυστάλλου. Η διαφορά έγκειται στο ότι οι κρύσταλλοι μπορούν σχετικά εύκολα να υποστούν επεξεργασία με μεγάλη ακρίβεια σε φυσικές συχνότητες, που φθάνει τα 10 ppm (μέρη στο εκατομμύριο, parts per million) (0,001%). Παρότι ο χαλαζίας είναι το συχνότερα χρησιμοποιούμενο υλικό, υπάρχουν και άλλα στοιχεία όπως είναι το

νική φθώρα. Το ανώτερο όριο θεμελιώδους συχνότητας για κρυστάλλους είναι περίπου 70 MHz. Οι κρύσταλλοι που προορίζονται για να λειτουργήσουν στην περιοχή των εκατοντάδων MHz, κόβονται με σχετικά χαμηλή θεμελιώδη συχνότητα και χρησιμοποιούνται οι αρμονικές τους. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέγιστη συχνότητα 500 MHz περίπου.

Σε ορισμένες εφαρμογές ταλαντωτών, σημαντικό ρόλο παίζει η θερμική σταθερότητα. Ο θερμικός συντελεστής εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο έχει κοπεί ο κρύσταλλος. Για παράδειγμα, η συνήθης κοπή τύπου AT δίνει κρύσταλλο με συντελεστή  $\pm 0,002\%$ . Για θερμοκρασίες από  $-55^\circ\text{C}$  έως  $+105^\circ\text{C}$  η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ένα μικρό επί τοις εκατό ποσοστό των περισσότερων πυκνωτών. Για μεγαλύτερη σταθερότητα ο κρύσταλλος μπορεί να εγκλειστεί σε «φούρνο». Στην συγκεκριμένη τεχνική, ο κρύσταλλος κόβεται έτσι ώστε να παρουσιάζει ελάχιστο θερμικό συντελεστή σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία μεγαλύτερη από την θερμοκρασία περιβάλλοντος και στην συνέχεια ο «φούρνος» διατηρείται στην θερμοκρασία αυτή. Τα μειονεκτήματα που υπάρχουν είναι η καταναλισκόμενη στον φούρνο ισχύς, ο μεγάλος όγκος του φούρνου και ο χρόνος που απαιτείται για την θέρμανση του. Έναντι όλων αυτών παρατίθεται η βελτιωμένη θερμική σταθερότητα, η οποία φθάνει στην περιοχή των  $\pm 5$  μερών ανά δέκα εκατομμύρια ( $\pm 0,00005\%$ ).

Με την ολοένα αυξανόμενη χρήση καναλιών επικοινωνίας υψηλών συχνοτήτων, και τις μεγάλες ταχύτητες χρονοισμού στις ψηφιακές συσκευές, η χρήση κρυστάλλων έχει υποχωρήσει αφήνοντας το πεδίο στους καλούμενους «resonators» ή συντονιζόμενων στοιχείων. Πρόκειται για μικρούς δίσκους κεραμικών PZT ή παρόμοιων πιεζο-ηλεκτρικών υλικών τα οποία είναι ικανά να λειτουργήσουν σε συχνότητες στην περιοχή των GHz.

## Κρυσταλλικοί ταλαντωτές

Οι κρύσταλλοι χρησιμοποιούνται για να αντικαταστήσουν -ολικά ή μερικά- το συντονιζόμενο κύκλωμα σε όλους τους ταλαντωτές που κανονικά βασίζονται σε κάποιο κύκλωμα LC. Για παράδειγμα, η έκδοση του ταλαντωτή Colpitts που ελέγχεται από κρύσταλλο, χρησιμοποιεί ένα κρύσταλλο και ένα πυκνωτή στην θέση του πηνίου L1. Με την τοποθέτηση κρυστάλλου στην θέση του πηνίου, η συχνότητα σταθεροποιείται με μεγάλη ακρίβεια. Σε ένα τέτοιο κύκλωμα, ο κρύσταλλος λειτουργεί σε παράλληλο συντονισμό, παρουσιάζοντας μέγιστη εμπέδηση στην συντονιζόμενη συχνότητα και κατά συνέπεια παράγοντας σήμα

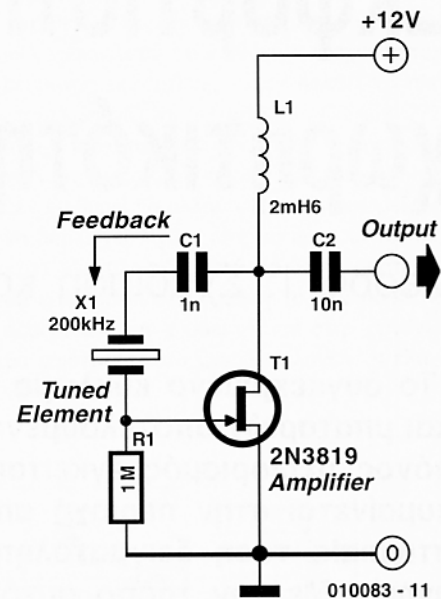
εξόδου με μέγιστο πλάτος.

Ο ταλαντωτής Pierce (Σχήμα 2) αποτελεί χαρακτηριστική περίπτωση χρήσης σειριακού συντονισμού. Η ανατροφοδότηση δρομολογείται μέσω του κρυστάλλου και παρουσιάζει τα μέγιστα όταν ο κρύσταλλος συντονίζεται σε σειριακό συντονισμό, με ελάχιστη εμπέδηση. Να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος ταλαντωτής δεν έχει ανάγκη από συντονιζόμενο κύκλωμα, και ο καθορισμός της συχνότητας ταλάντωσης βασίζεται στον κρύσταλλο.

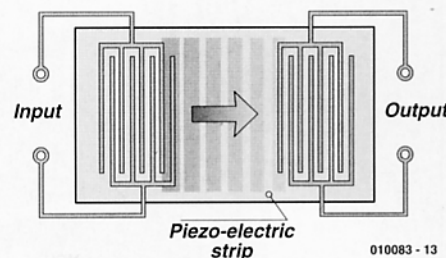
Οι κρυσταλλικοί ταλαντωτές δεν είναι μόνο οι πλέον ακριβείς, αλλά και από τους πιο γρήγορους ταλαντωτές σε ευρεία χρήση. Τα σύγχρονα ψηφιακά κυκλώματα απαιτούν γρήγορους χρονοιστές για την οδήγηση τους, χρονοιστές με συχνότητες που μετρώνται σε δεκάδες ή εκατοντάδες MHz. Το κύκλωμα που χρησιμοποιεί κρύσταλλο για να παρέχει ανατροφοδότηση από την έξοδο μίας πύλης αντιστροφείας CMOS είναι τόσο γνωστό που δεν χρειάζεται να το επαναλάβουμε.

Μερικοί από τους πιο γρήγορους ταλαντωτές κάνουν χρήση συσκευών επιφανειακών ακουστικών κυμάτων (SAW, Surface Acoustic Wave). Πρόκειται για μικρές λωρίδες πιεζοηλεκτρικού υλικού συνοδευόμενες από διατάξεις ηλεκτροδίων, οι οποίες είναι προσκολλημένες και στα δύο άκρα του υλικού (Σχήμα 3). Στο ένα άκρο (το άκρο εισόδου), ένα ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί παραμόρφωση της επιφάνειας της λωρίδας η οποία παραμόρφωση με την σειρά της δημιουργεί ένα κύμα πάνω στην επιφάνεια της λωρίδας. Πρόκειται για ένα ακουστικό κύμα το οποίο ταξιδεύει επάνω στην λωρίδα με ταχύτητα όμοια με αυτή που ο ήχος ταξιδεύει πάνω στο υλικό (περίπου 3000 m/s). Μερικά κλάσματα του δευτερολέπτου αργότερα, μόλις το κύμα φθάσει στο άλλο άκρο της λωρίδας (έξοδο), το ηλεκτρικό πεδίο που σχετίζεται με το κύμα προκαλεί φαινόμενα ανάλογα με αυτά στην είσοδο. Τα SAW χρησιμοποιούνται ως ζωνοδιαθατά φίλτρα, δεδομένου ότι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων σε κάθε άκρο, καθορίζει την συχνότητα η οποία θα ενισχυθεί περισσότερο, θα οδηγηθεί στο υλικό και θα ανακτηθεί στο άλλο άκρο. Ο χρόνος που απαιτείται για να διαπεράσει το μέτωπο κύματος την λωρίδα αποτελεί την χαρακτηριστική χρονο απόκρισης του φίλτρου. Ως εξάρτημα ταλαντωτή, η γραμμή καθυστέρησης SAW χρησιμοποιείται σε ένα δικτύωμα RC με τον ίδιο τρόπο που χρησιμοποιείται ένα φίλτρο ολίσθησης φάσης. Ο χρόνος που απαιτείται για να εισάγει ολίσθηση φάσης  $180^\circ$  είναι πάρα πολύ μικρός οπότε η συχνότητα τέτοιων ταλαντωτών είναι υπερβολικά υψηλή. Τυπικές τιμές τους φθάνουν στην περιοχή των 2 GHz, ενώ ταλαντωτές οι οποίοι χρησιμοποιούν διηλεκτρικά στοιχεία συ-

ντονισμού στον θρόγχο ανάδρασης, ξεπερνούν ακόμη και αυτές τις περιοχές. Σε αυτό το σημείο θέβαια έχουμε μπει για τα καλά σε μικροκυματικές περιοχές, οι οποίες παρουσιάζουν εξειδικευμένα χαρακτηριστικά, οπότε η συζήτηση τελειώνει εδώ. 010083-1



Σχήμα 2. Ταλαντωτής Pierce.



Σχήμα 3. Στοιχείο επιφανειακού κύματος ήχου (SAW).