

Η Εξέλιξη της Τεχνολογίας Μικροκυμάτων για Εξυπηρέτηση Αναγκών στις Τηλεπικοινωνίες

1) Εισαγωγή.

Η αξιοποίηση της τεχνολογίας του ηλεκτρισμού, ξεκίνησε, περίπου, πριν από 150 χρόνια, σε ευρεία κλίμακα, με την εφεύρεση του τηλεγράφου στην Αμερική από τον Morse. Η επίδραση στην οικονομική και κοινωνική ζωή της εφεύρεσης αυτής, ήταν άμεση και σημαντική. Η διατύπωση με άριστο τρόπο της θεωρίας του ηλεκτρομαγνητισμού από το Σκωτσέζο φυσικό J.C. Maxwell το 1873 και στη συνέχεια, η πειραματική επιβεβαίωση αυτής, από τον κορυφαίο φυσικό H. Hertz στη Γερμανία, τη δεκαετία 1885-1895, άνοιξε το δρόμο αξιοποίησης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, για την ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών. Η ανακάλυψη του τηλεφώνου την ίδια περίοδο από τον Graham Bell στην Αμερική, υπήρξε μία από τις πλέον μεγάλες ανακαλύψεις στην ιστορία των τηλεπικοινωνιών.

Ο G. Marconi, ήταν αυτός που κατά την περίοδο 1900, επέτυχε να εφαρμόσει τα αποτελέσματα των εργασιών των J.C. Maxwell και H. Hertz, για την ανάπτυξη της τεχνολογίας των υψηλών συχνοτήτων, για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς.

Είναι χρήσιμο να αναφερθεί εξ αρχής ότι, από την εποχή της γέννησής της, η τεχνολογία ασυρματικών επικοινωνιών, βασίστηκε στη χρήση «χαλαρά διαμορφωμένων» ημιτονικών ηλεκτρομαγνητικών ταλαντώσεων. Το κύριο χαρακτηριστικό των σημάτων αυτών, είναι η «φέρουσα συχνότητα», δηλαδή, το «χρώμα» της ακτινοβολούμενης ενέργειας. Το χαρακτηριστικό αυτό - η συχνότητα της ακτινοβολίας - διατηρεί ακόμα και σήμερα τη σημασία του παρ'όλο που με την εισαγωγή των ψηφιακών σημάτων, η έννοια της «φέρουσας συχνότητας», έχει αμβλυνθεί. Είναι ανάγκη να αναφερθεί στο σημείο αυτό ότι, τα σήματα που προαναφέρθηκαν, χαρακτηρίζονται, σύμφωνα με τη μαθηματική θεωρία Fourier, κατά την οποία ένα σήμα στον άξονα του χρόνου παρίσταται στον φασματικό άξονα, δηλαδή, κάθε σήμα ισοδύναμα

παρίσταται από μία φασματική κατανομή συνάρτησης. Προς τιμήν του H. Hertz, η μονάδα μέτρησης του αριθμού ταλαντώσεων f ανά δευτερόλεπτο, καθιερώθηκε ως Hertz ή σε σύντμηση Hz.

Ένα εξ ίσου χαρακτηριστικό μέγεθος, είναι η χωρική περίοδος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, που ονομάζεται μήκος κύματος λ και υπολογίζεται από τη σχέση $\lambda = \frac{c}{f}$

όπου το μέγεθος $c=3 \times 10^8$ m/s είναι η ταχύτητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο κενό.

Στην πρώτη εικοσαετία του 20ού αιώνα, η τεχνολογία των υψηλών συχνοτήτων, αναπτύχθηκε σε βαθμό, που την περίοδο 1920-30, η ραδιοφωνία εισέρχεται διεθνώς, στην καθημερινή ζωή. Η περίοδος αυτή, υπήρξε η δεκαετία προετοιμασίας πολλών τεχνολογικών καινοτομιών όπως:

- Βελτίωση της τεχνολογίας ηλεκτρονικών λυχνιών κενού.

- Ανάπτυξη διατάξεων πομπών και δεκτών, που παρείχαν αξιόπιστη λειτουργία.

- Κατανόηση των φαινομένων διάδοσης στην ατμόσφαιρα - ιονόσφαιρα και στο γήινο περιβάλλον.

- Ανάπτυξη διατάξεων ακτινοβολίας (κεραίων), κυματοδότησης (γραμμικών μεταφοράς), παραγωγής ολοένα και πλέον υψηλών συχνοτήτων (φθάνοντας στο όριο 5×10^8 Hz το 1930).

- Έναρξη ερευνητικών προσπαθειών, για την ανάπτυξη των συστημάτων ραδιοεντοπισμού, με έμφαση την ανίχνευση εξ αποστάσεως των αεροσκαφών.

- Πρωτότυπες συσκευές τηλεόρασης.

2) Η Γέννηση των Μικροκυμάτων.

Η δεκαετία 1930-40, αποτελεί το προοίμιο της ανάπτυξης της τεχνολογίας των υπερυψηλών και εξαιρετικά υψηλών συχνοτήτων και συγκεκριμένα, μέχρι τη συχνότητα ταλάντωσης 10^{10} Hz. Ενώ έχει καθιερωθεί η ονομασία των μακρών ($10^4 - 10^5$ Hz), μεσαίων

($10^5 - 10^6$ Hz) και βραχέων ($10^6 - 3 \times 10^7$ Hz) κυμάτων, με την έναρξη της χρήσης υψηλότερων συχνοτήτων, αρχίζει στη διεθνή βιβλιογραφία, η εμφάνιση του όρου «Μικροκύματα».

Σε μεγάλο βαθμό, η τεχνολογία των μικροκυμάτων αναπτύχθηκε κατά την περίοδο του Β' παγκοσμίου πολέμου. Ο άξονας ανάπτυξης, υπήρξε το μικροκυματικό ραντάρ. Επειδή η εξέταση της ιστορίας των επιστημών προσφέρει σημαντικά διδάγματα, είναι χρήσιμο να αναφερθούν ορισμένα στοιχεία για την περίοδο αυτή.

Με την έναρξη του Β' παγκοσμίου πολέμου, αμφότερες οι πλευρές, διέθεταν σημαντική τεχνολογία, για την ανάπτυξη επίγειων ραντάρ, που ήταν σε θέση να ανιχνεύουν αεροσκάφη. Κύριο χαρακτηριστικό αυτών των ραντάρ ή ραδιοεντοπιστών, ήταν ότι χρησιμοποιούσαν την τεχνολογία λυχνιών κενού, λειτουργούσαν στη ζώνη συχνοτήτων 50 - 200 MHz ($1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$) και έχοντας μεγάλο βάρος και όγκο, είχαν τη μορφή επίγειων εγκαταστάσεων ή μπορούσαν να εγκατασταθούν, μόνο σε μεγάλο μέγεθος πλοία. Είναι ενδιαφέρον, στο σημείο αυτό, να τονιστεί ότι υπήρξε μία πρωτοπόρος προσπάθεια, την περίοδο αυτή, από τον Καθηγητή του E. M. Πολυτεχνείου, Σαντορίνη. Στην πραγματικότητα, τα ραντάρ που είχαν αναπτυχθεί μέχρι την έναρξη του πολέμου, ήταν πειραματικές διατάξεις, που λειτουργούσαν στην περιοχή συχνοτήτων, τις οποίες ονομάζουμε, σήμερα, υπερβραχέα κύματα (VHF).

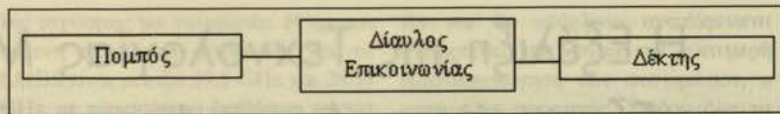
Εξαιρετικά σημαντική ώθηση στην ανάπτυξη της τεχνολογίας μικροκυμάτων, έδωσε η ανακάλυψη από μία μικρή ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου Birmingham, μιά πρωτοποριακής γεννήτριας, που ονομάστηκε MAGNETRON. Η γεννήτρια αυτή, λειτουργώντας με έναν εντελώς διαφορετικό τρόπο από τις συμβατικές λυχνίες, μπορούσε να παράγει εξαιρετικά μικρής διάρκειας ισχυρότατους παλμούς, σε πολύ υψηλές συχνότητες, έχοντας δε ένα πολύ μικρό μέγε-

του
Νικόλαου
Ουζούνου
Καθηγητή
Τμ. Ηλεκτρ.
Μηχ/κών και
Μηχ/κών
Υπολογιστών ΕΜΠ

θος - όσο περίπου ένα ποτήρι - έδινε τη δυνατότητα κατασκευής ραντάρ, πολύ μικρών διαστάσεων και μικρού βάρους, ώστε να μπορεί να τοποθετείται σε αεροσκάφος. Η εφεύρεση αυτή, όπως αναφέρει και στα απομνημονεύματά του, για την περίοδο του πολέμου, κατά την οποία ήταν Πρωθυπουργός της Μ. Βρετανίας, έπαιξε πολύ σημαντικό ρόλο στη νίκη των Συμμαχικών Δυνάμεων κατά του Άξονα, επειδή ούδέποτε ο Άξονας ανακάλυψε, πώς ήταν δυνατή η κατασκευή ενός τόσο μικρού ραντάρ σε τόσο υψηλές συχνότητες, όπως 10^{10} Hz = 10 GHz.

Ένα σημαντικό μέρος της τεχνολογίας μικροκυμάτων που χρησιμοποιείται σήμερα, αναπτύχθηκε κατά την περίοδο 1941-44, στο Massachusetts Institute of Technology και παράλληλα στη Σοβιετική Ένωση, στα Ινστιτούτα Ραδιοφυσικής του Khar'kov και το Ενεργειακό Ινστιτούτο της Μόσχας. Η αξιοποίηση των μικροκυμάτων για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές, ξεκίνησε την περίοδο αμέσως μετά το τέλος του πολέμου. Στη συνέχεια, αναλύεται η εξέλιξη αυτή, με έμφαση στις πρόσφατες εξελίξεις και τις αναμενόμενες νέες τεχνολογικές εφαρμογές. Στο σημείο αυτό, αναφέρονται κύριες ιστορικές περιόδους εξέλιξης των μικροκυματικών τηλεπικοινωνιών:

- Η χρήση Αναλογικών Μικροκυματικών Ραδιοζεύξεων (1950-80).
- Η ανάπτυξη Δορυφορικών Επικοινωνιών (1965 -).
- Η ανάπτυξη Ψηφιακών Ραδιοζεύξεων (1980 -).
- Η ευρεία εξάπλωση των Κινητών Επικοινωνιών (1990-).
- Η ανάπτυξη των Οπτικών Επικοινωνιών (1980-), παράλληλα με τις μικροκυματικές επικοινωνίες, ως συγγενής κλάδος αυτών.



Σχ. 1. Αλυσίδα Πομπού - Διαύλου - Δέκτη.

3) Τα Δομικά Στοιχεία των Μικροκυματικών Συστημάτων Επικοινωνιών.

Όπως όλα τα Συστήματα Τηλεπικοινωνιακών και τα Μικροκυματικά Συστήματα συγκροτούνται από τρεις κύριες οντότητες, όπως φαίνεται στο Σχ.1.

Ο πομπός εκπέμπει μικροκυματική ενέργεια, η οποία διερχόμενη μέσω του διαύλου, σ' ένα μικρό ποσοστό, λαμβάνεται από το δέκτη. Η εκπομπή και λήψη της ενέργειας, συνοδεύεται από μεταφορά πληροφορίας.

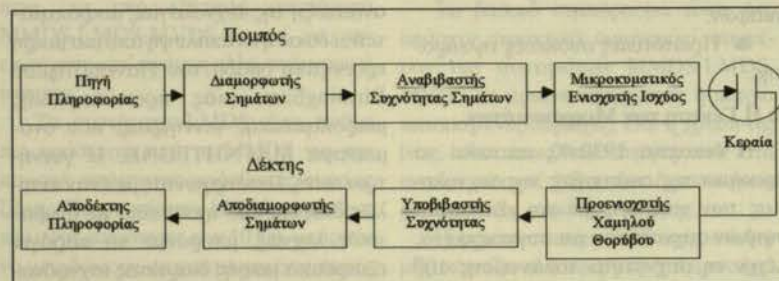
Η αρχή αυτή, ότι δηλαδή για τη μεταφορά πληροφορίας απαιτείται η μεταφορά ενέργειας, αποτελεί βασική αρχή στην επιστήμη του τηλεπικοινωνιακού μηχανισμού.

Η περαιτέρω ανάλυση της απλοποιημένης δομής του Σχ.1, μας οδηγεί σε πιο λεπτομερές, γενικευμένο λειτουργικό διάγραμμα της επικοινωνιακής αλυσίδας, που φαίνεται στο Σχ.2 και λαμβάνει υπόψη τις ιδιαιτερότητες των μικροκυματικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Στην πλευρά του πομπού, έχουμε μία αλυσίδα που ξεκινάει από την πηγή πληροφορίας και διαμορφώνει, το προς εκπομπή σήμα. Οι διατάξεις αυτές, συνήθως, λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές συχνότητες, μέχρι και δεκάδες MHz, οι οποίες στη συνέχεια, αναβιβάζονται σε μικροκυματικές συχνότητες που μπορεί να είναι στη ζώνη 1-20 GHz ή ακόμα και πιο υψηλές, όπως 38, 54, 94 GHz, όπου έχουμε σχετικά ευνοϊκές

συνθήκες διάδοσης στον αέρα. Το εκπεμπόμενο σήμα, θα πρέπει να διαθέτει αρκετή ισχύ, ώστε το σήμα που θα φθάνει στο δέκτη, να είναι «ακανοποιητικό», όπως θα αναφέρουμε στη συνέχεια. Η μικροκυματική ενέργεια που οδεύει στην αλυσίδα αυτή από την πηγή προς την έξοδο του ενισχυτή ισχύος, μετασχηματίζεται με τη βοήθεια μιας κεραίας, σε ακτινοβολούμενη ενέργεια. Τις περισσότερες φορές, στα μικροκυματικά συστήματα χρησιμοποιούνται κεραίες, που παράγουν κατευθυντικές δέσμες ακτινοβολίας. Με τον τρόπο αυτό, βελτιώνεται το ποσοστό της ενέργειας, που φθάνει στην κεραία του δέκτη.

Η διάδοση της μικροκυματικής ακτινοβολίας στον αέρα ή ακόμα στο κενό, συνεπάγεται εξασθένηση της μεταφερόμενης ισχύος, ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης του πομπού από το δέκτη. Αποτέλεσμα αυτής της εξασθένησης, είναι ότι, συνήθως ενώ η εκπεμπόμενη ισχύς μπορεί να είναι μερικά Watts ή ακόμα δεκάδες Watts, η λαμβανόμενη ισχύς, μπορεί να είναι ένα δισεκατομμυριοστό ή τρισεκατομμυριοστό της μονάδας ισχύος Watt. Η λήψη του σήματος που φθάνει στην κεραία του δέκτη, αποτελεί την αντίστροφη διαδικασία μετασχηματισμού του χωρικού κύματος ακτινοβολίας σε μικροκυματική ενέργεια, που οδεύει σε μία αλυσίδα κυκλωμάτων. Ένα από τα κυριότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει ο τηλεπικοινωνιακός μηχανικός, οφείλεται στο γεγονός ότι, το σήμα λήψης στην κεραία του δέκτη, είναι πολύ ισχνό σε ισχύ. Επειδή δε, μαζί με το σήμα έχουμε την παρουσία της τυχαίας κίνησης των ηλεκτρονίων σε μορφή θερμικού θορύβου, ο δέκτης συνολικά, θα πρέπει να υπερνικά την παρουσία του θορύβου. Η επίτευξη του στόχου αυτού, αποτελεί το πλέον κρίσιμο ζήτημα στη λειτουργία της αλυσίδας πομπού και δέκτη. Εκτός βέβαια από τον θερμικό θόρυβο, που οφείλεται σε ενδογενείς αιτίες, μπορεί να παρατηρηθεί και η παρουσία κάποιου ανταγω-



Σχ. 2. Πομποδέκτης.

νιστικού εξωτερικού σήματος. Για την αποφυγή τέτοιων προβλημάτων, έχουν συνταχθεί διεθνείς κανονισμοί υπό την αιγίδα της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών, που αποτελεί όργανο του ΟΗΕ. Η όλη φιλοσοφία σχεδίασης του δέκτη, αποσκοπεί πρώτα από όλα, στη βελτίωση της ισχύος, που αφορά το σήμα πληροφορίας, σε σύγκριση με τον ανεπιθύμητο θόρυβο. Επομένως, ο ρόλος του προενισχυτή χαμηλού θορύβου (Σχ.2), είναι ουσιαστικός. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται σήμερα εξελιγμένες μέθοδοι επεξεργασίας σημάτων, που συνήθως υλοποιούνται σε χαμηλές συχνότητες. Ο αποδέκτης πληροφοριών, μπορεί να είναι ένας υπολογιστής, που επεξεργάζεται ή αποθηκεύει την πληροφορία ή ακόμα ένας παρατηρητής που ακούει ή βλέπει την πληροφορία

Ένα εξίσου σημαντικό πρόβλημα που έχει να αντιμετωπίσει ο Τηλεπικοινωνιακός Μηχανικός, είναι η περίπτωση ύπαρξης φαινομένων παραμόρφωσης, κατά τη διάδοση των σημάτων, που μεταδίδονται μέσω του διαύλου. Η παραμόρφωση ενός σήματος στο διάλυο επικοινωνίας, μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους, όπως στη μετάδοση μέσω πολλαπλών παράλληλων οδών διάδοσης, στην «άνιση μεταχείριση» του φασματικού περιεχομένου των σημάτων που μεταδίδονται κ.λπ. Ως «άνιση μεταχείριση» εννοούμε, τόσο τη διαφορετική εξασθένιση όσο και τη διαφορετική καθυστέρηση των φασματικών συνιστωσών που συγκροτούν το μεταδιδόμενο σήμα. Η παραμόρφωση των σημάτων, αποτελεί μερικές φορές, ανυπερέβλητο πρόβλημα που συνήθως, είναι πιο δύσκολο να λυθεί, από το πρόβλημα της ισχύος ισχύος λήψης. Πολλές φορές, για να περιγράψουμε το φαινόμενο της παραμόρφωσης των σημάτων, χρησιμοποιούμε τον όρο «διασπορά». Η κύρια επίπτωση της διασποράς σε έναν διάλυο, όσον αφορά την ποιότητα μετάδοσης, είναι ότι περιορίζει την ποσότητα της πληροφορίας που μπορούμε να μεταφέρουμε, η οποία μετράται σε μονάδες δυαδικών ψηφίων ανά δευτερόλεπτο (bits/s).

Επομένως, σύμφωνα με τα παραπάνω, ο διάλυος επικοινωνίας μπορεί να επηρεάζει την ποιότητα μετάδοσης της πληροφορίας, για δύο βασικούς

λόγους, που είναι:

α) η εξασθένιση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

β) η παραμόρφωση των σημάτων που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των πληροφοριών.

Ο Τηλεπικοινωνιακός Μηχανικός σήμερα, καλείται να χρησιμοποιήσει όλα τα διαθέσιμα στη σχεδίαση των υπομονάδων των πομπών και δεκτών, τεχνολογικά μέσα, λαμβάνοντας υπόψη, τις ιδιότητες του διαύλου μετάδοσης, ώστε να επιτύχει την καλύτερη μετάδοση σημάτων.

Οι διάλυοι μετάδοσης σημάτων, που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι:

α) Ασυρματική μετάδοση στην ατμόσφαιρα στο γήινο περιβάλλον.

β) Δορυφορικές ζεύξεις.

γ) Μετάδοση οπτικών - ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε γυάλινες ίνες.

δ) Μετάδοση χαμηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε καλώδια κατασκευασμένα από αγωγούς. Η τεχνολογία αυτή παρ' όλη την παλαιότητα της, δεν έχει χάσει τη σημασία της, στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

Είναι ενδιαφέρον να τονιστεί ότι, οι περιπτώσεις (α) και (β) της ασυρματικής μετάδοσης, συνοδεύονται από πολύ υψηλή εξασθένιση και συνήθως, ισχνά φαινόμενα διασποράς, εκτός από ορισμένες περιπτώσεις, που οφείλονται κυρίως, σε φαινόμενα πολλαπλής διάδοσης. Τα συμβατικά καλώδια που κατασκευάζονται, συνήθως, από χάλκινα σύρματα, με γεωμετρίες, όπως δύο περιπλεγμένα σύρματα και ομοαξονικά καλώδια, παρουσιάζουν ισχυρά φαινόμενα διασποράς. Για την αντιστάθμιση αυτών των φαινομένων διασποράς, σήμερα, χρησιμοποιούνται εξελιγμένες τεχνικές εξισορρόπησης του διαύλου μετάδοσης για τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις, όπου είναι ασύμφορη η τοποθέτηση οπτικών ινών. Η πιεστική ανάγκη, στη δεκαετία 1965-75, για την εύρεση ενός μέσου μετάδοσης, που να έχει αφ' ενός μεν μικρή εξασθένιση εφ' ετέρου δε πολύ μικρή διασπορά, ώστε να μεταφέρουμε μεγάλες ποσότητες πληροφορίας σε μεγάλες αποστάσεις, οδήγησε στην ανάπτυξη των οπτικών ινών. Πρέπει να αναφερθεί ότι, η ιδέα μεταφοράς ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με βέλτιστα χαρακτηριστικά, είχε ανακαλυφθεί από τους P. Debye

και Δ. Χόνδρο το 1909¹⁾, στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του δευτέρου. Η αρχή κυματοδήγησης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, σε μία διηλεκτρική ράβδο, όπως αυτή αναλύθηκε στη διδακτορική διατριβή του Δ. Χόνδρου, αποτέλεσε τη βάση της τεχνολογικής ανάπτυξης των οπτικών ινών, με αφετηρία την επίτευξη υψηλής καθαρότητας σε γυάλινες ίνες.

Στις δύο ενότητες που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι σύγχρονες τάσεις εξέλιξης στους τομείς τεχνολογικών μέσων και εφαρμογών στα συστήματα τηλεπικοινωνιών, από τη σκοπιά του μικροκυματικού μηχανικού.

4) Εξελίξεις στην Τεχνολογία Μικροκυμάτων.

Έχοντας αναφέρει τα κύρια υποσυστήματα που αποτελούν τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά μέσα, στην ενότητα αυτή, θα επικεντρωθούμε στις σύγχρονες τάσεις, που αφορούν στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών υποδομής για βελτίωση ή ακόμα ανάπτυξη νέων μεθόδων, μεταφοράς μικροκυματικών - οπτικών σημάτων. Επικεντρώνουμε κυρίως, στα τμήματα των πομπών και δεκτών, που αφορούν τις μικροκυματικές συχνότητες.

Ανάπτυξη Ολοκληρωμένων Κυκλωματικών Διατάξεων.

Η θεαματική ανάπτυξη της τεχνολογίας Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων, πολύ μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης (VLSI), με βάση το πυρίτιο (Si), έχει οδηγήσει σε μία αειφόρο ανάπτυξη κυκλωματικών διατάξεων για τις χαμηλές συχνότητες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (μέχρι 100 MHz). Παράλληλα, για τις μικροκυματικές συχνότητες, υπήρξε σοβαρή προσπάθεια ανάπτυξης μεθόδων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, κυρίως, με βάση την τεχνολογία του Αρσενιοχάλκου Γαλλίου (GaAs), με όχι, όμως, τόσο θεαματικά αποτελέσματα, σε σύγκριση με τις χαμηλές συχνότητες. Σήμερα, ο βαθμός ολοκλήρωσης που μπορούμε να επιτύχουμε, για τα Μονολιθικά Μικροκυματικά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα (Monolithic Microwave Integrated Circuits - MMIC), είναι ακόμα περιορισμένος, ενώ γίνονται σοβαρές προσπάθειες επέκτασης της τεχνολογίας Si, όλο και σε πιο υψηλές συχνότητες,

αλλά και ανάπτυξης νέων τεχνολογιών (SiGe) και τύπου κυκλωματικών διατάξεων (τρανζίστορ HEMT, HBT, κλπ.).

Οι πολύ σημαντικές επιτυχίες που έχει να παρουσιάσει η τεχνολογία των MMIC - GaAs, αναφέρονται στους τομείς:

- Προενισχυτών Χαμηλού θορύβου.
- Ενισχυτών Ισχύος.
- Κεραίων με Φασικό Έλεγχο.
- Ολοκληρωμένων Πομποδεκτών.

Η τεχνολογία MMIC, παρ' όλο που συνεπάγεται πολύ υψηλό κόστος αρχικής ανάπτυξης, είναι ιδιαίτερα ελκυστική από πλευράς χαμηλού κόστους, όταν έχουμε μαζική παραγωγή, όπως στην περίπτωση ηλεκτρονικών καταναλώσεων (consumer electronics).

Παραδείγματα μεγάλης διείσδυσης των κυκλωματικών διατάξεων, αποτελούν: οι κινητές επικοινωνίες, τα δορυφορικά τερματικά, τα τερματικά οπτικών πομποδεκτών, καθώς επίσης, εξειδικευμένα κυκλώματα επεξεργασίας πληροφοριών, που απαιτούν πολύ μεγάλες ταχύτητες επεξεργασίας. Είναι

βέβαια ανάγκη να τονιστεί, το γεγονός ότι, η συνεχώς αυξανόμενη ταχύτητα ρολογιού των επεξεργαστών στους προσωπικούς υπολογιστές, οδηγεί στην επιβράδυνση της μικροκυματικής τεχνολογίας, σ' έναν ευρύτερο τομέα, που αφορά την αρχιτεκτονική και το υλικό των υπολογιστών.

Παραδείγματα Μονολιθικών Μικροκυματικών Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων (MMIC), που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, στο Εργαστήριο Μικροκυμάτων και Οπτικών Ινών (EMOI) του ΕΜΠ, δίνονται στο Σχ.3. Τα κυκλώματα αυτά, που έχουν σχεδιασθεί και μετρηθεί στο ΕΜΟΙ-ΕΜΠ, στα πλαίσια διδακτορικών διατριβών και διπλωματικών εργασιών, κατασκευάστηκαν σε Εργαστήρια κατασκευής MMIC, που συμμετέχουν στο πρόγραμμα EUROPRATICE. Το πρόγραμμα αυτό, αποσκοπεί στην υποστήριξη της πρόοδου των Ευρωπαϊκών Ερευνητικών Εργαστηρίων σε Εργαστήρια Κατασκευής Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων Si και GaAs.

Ανάπτυξη Υβριδικών Κυκλωματικών Διατάξεων.

Για εφαρμογές που απαιτούν την κατασκευή περιορισμένου αριθμού κυκλωματικών διατάξεων, είναι ασύμφορη η σχεδίαση και κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων MMIC. Στις περιπτώσεις αυτές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συμβατική τεχνολογία υβριδικών κυκλωμάτων, που συνίσταται στη χρήση τυπωμένων κυκλωμάτων και τη συγκόλληση επ' αυτών, ενεργών ή παθητικών στοιχείων, τα οποία συνήθως είναι MMIC. Σήμερα η τεχνολογία αυτή, επιτρέπει την κατασκευή υποστημάτων, μέχρι τη συχνότητα των 40 GHz, περίπου. Η τεχνολογία αυτή βασίζεται σε μεγάλο βαθμό, στη χρήση τυπωμένων κυκλωμάτων, αναλόγων με αυτά των χαμηλών συχνοτήτων στην επιφάνεια ενός υποστρώματος γειωμένου διηλεκτρικού. Η κύρια διαφορά των τυπωμένων κυκλωμάτων από τα αντίστοιχα συμβατικά των χαμηλών συχνοτήτων είναι ότι, στα πρώτα, οι διαστάσεις των κυκλωματικών στοιχείων είναι συγκρίσιμες με το μήκος κύματος. Ισοδύναμα, μπορούμε να πούμε ότι, οι καθυστερήσεις που συμβαίνουν στη λειτουργία του κυκλώματος, από

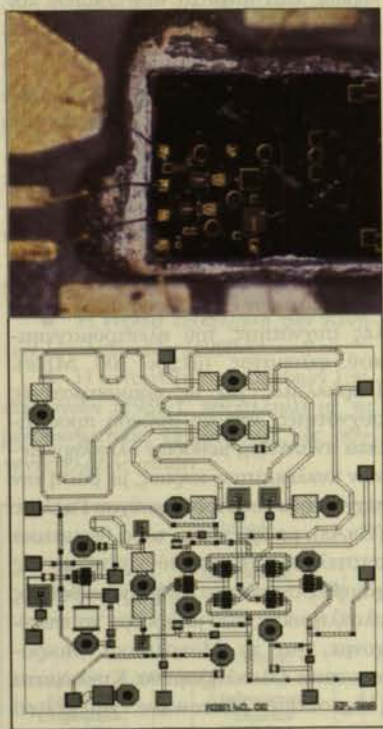
ένα σημείο σε ένα άλλο, είναι συγκρίσιμες με την περίοδο ταλάντωσης των σημάτων. Οι δύο τελευταίες παρατηρήσεις, σημαίνουν ότι στα μικροκυματικά κυκλώματα, έχουμε μηχανισμούς λειτουργίας, που βασίζονται στα φαινόμενα κυματικής μετάδοσης, σε αντίθεση με τις διατάξεις χαμηλών συχνοτήτων, όπου η κυματική φύση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, συνήθως, δεν εμφανίζεται, παρ' όλο βέβαια, που πάντοτε υπάρχει.

Παραδείγματα κυκλωματικών διατάξεων υβριδικής τεχνολογίας που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια στο ΕΜΟΙ-ΕΜΠ, παρουσιάζονται στο Σχ.4.

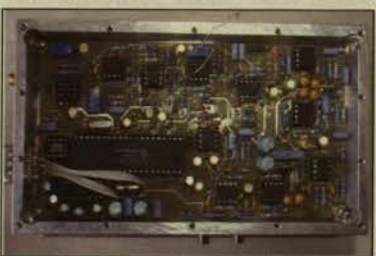
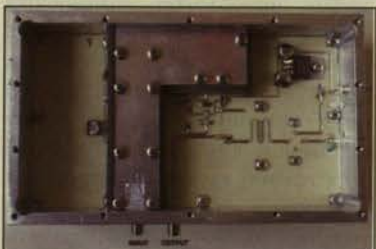
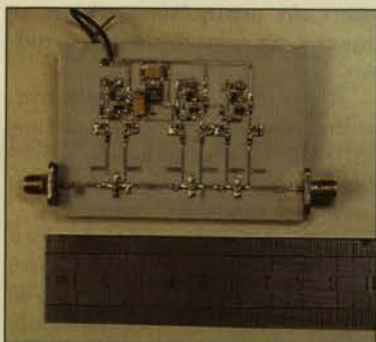
Έξυπνες Μικροκυματικές Κεραίες.

Οι κεραίες, παραδοσιακά, είναι οι μονάδες των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, που μετασχηματίζουν σε κύματα χώρου, την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που είναι «παγδευμένη» σε κυκλωματικές διατάξεις. Ακόμα, οι κεραίες χρησιμοποιούνται και για την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή τη «συλλογή» των κυμάτων χώρου και την τροφοδοσία τους σε κυκλωματικές διατάξεις δεκτών. Ο αμείωτος αυτός μετασχηματισμός, πρέπει να γίνεται με τον πλέον αποδοτικό τρόπο. Δεύτερη σημαντική ιδιότητα, που πρέπει να διαθέτουν οι κεραίες, είναι η ακτινοβολούμενη ενέργεια να έχει ελεγχόμενη κατευθυντικότητα. Ο τύπος της κεραίας που επεκράτησε σ' όλη τη διάρκεια της ιστορίας των μικροκυμάτων μέχρι σήμερα, είναι τα παραβολικά κάτοπτρα, τα οποία με βάση τη θεωρία κωνικών τομών του Απολλώνιου (2ος αιώνας μ.Χ.), εστιάζουν τις παράλληλες ακτίνες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, σε ένα εστιακό σημείο. Οι κεραίες αυτές, επιτυγχάνουν σημαντική συγκέντρωση της εκπαισμένης ενέργειας, σε μία ορισμένη κατεύθυνση.

Μία εναλλακτική τεχνολογία κεραίων, βασίζεται στη σύνθεση της ακτινοβολίας, από πολλές στοιχειώδεις πηγές, με ελεγχόμενη φάση και πλάτος. Η τεχνολογία αυτή, γνωστή από τη δεκαετία του 1960 ως «Κεραίες Φασικής Σύνθεσης», έχει χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα, σε περιορισμένη κλίμακα, σε πολιτικές τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές. Πρόσφατα, με την ευρεία εξάπλωση των κινητών και δορυφορικών τηλε-



Σχ.3. Μονολιθικά Ολοκληρωμένα κυκλώματα που έχουν αναπτυχθεί από το ΕΜΟΙ/ΕΠΙΣΕΥ-ΕΜΠ



Σχ.4. Υβριδικά Μικροκυματικά κυκλώματα που έχουν αναπτυχθεί από το ΕΜΟΙ/ΕΠΙΣΕΥ-ΕΜΠ

πικοινωνιών και λόγω της οικονομίας κλίμακας, παρουσιάζεται ενδιαφέρον στην ανάπτυξη φασικά ελεγχόμενων κεραίων, για σταθμούς βάσης ή ακόμα, τεμαχικά δορυφορικών επικοινωνιών. Η ανάπτυξη τέτοιων κεραίων, δίνει την ευκαιρία ηλεκτρονικής μετακίνησης των δεσμών ακτινοβολίας και επομένως, πολλές δυνατότητες για αξιοποίηση αυτών, σε τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές, για λήψη ή εκπομπή διαφορετικών σημάτων.

5) Εφαρμογές Μικροκυματικών Συστημάτων.

Παρουσιάζει ενδιαφέρον να εξετάσει κανείς, τις σύγχρονες εφαρμογές τηλεπικοινωνιών, που εξυπηρετούνται από την τεχνολογία μικροκυμάτων. Στην ενότητα αυτή, αναφέρουμε ορισμένες περιοχές, στις οποίες οι τεχνολογίες μικροκυμάτων, βρίσκουν εφαρμογή.

Ασυρματικά Δίκτυα.

Η απελευθέρωση του τομέα τηλεπικοινωνιών και η ανάπτυξη της τεχνολογίας πολυμέσων (multimedia), έχει αυξήσει την απαίτηση μεταφοράς υψηλής ποσότητας πληροφοριών, από κάθε συνδρομητή. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται πρόσφατα, στη χρήση ασυρματικών ζευξιών, με χρήση μικροκυματικών συχνοτήτων, όπως 2,5, 5,8 και 24 GHz.

Η αναγκαιότητα μετάδοσης, παράλληλα και ταυτόχρονα, σημάτων, που αφορούν πολλούς συνδρομητές, επιτυγχάνεται με διάφορες μεθόδους πολυπλεξίας. Η τεχνική πολυπλεξίας, με χρήση κωδίκων που προκαλούν διασπορά των μεταδιδόμενων σημάτων, είναι η πλέον δημοφιλής μέθοδος, που παρουσιάζει πλεονεκτήματα, όσον αφορά την εύκολη επέκταση, σε χωρητικότητα και αριθμό χρηστών, σε σύγκριση με τις περισσότερο συμβατικές μεθόδους, οι οποίες βασίζονται σε τεχνικές πολυπλεξίας, στον άξονα της συχνότητας και του χρόνου. Η αναμενόμενη μαζική εξάπλωση υπηρεσιών σταθερών τηλεπικοινωνιών, αναμένεται να αυξήσει, στο άμεσο μέλλον, το ενδιαφέρον για μικροκυματικά κυκλώματα όπως πομποδέκτες.

Κινητές Επικοινωνίες.

Η ευρεία εξάπλωση των κινητών επικοινωνιών δεύτερης γενιάς (GSM), που χρησιμοποιούν χαμηλές μικροκυματικές συχνότητες (900 και 1900 MHz), έχει συντελεστεί χάρη στην επίτευξη υψηλού βαθμού ολοκλήρωσης για τα κυκλώματα, τόσο χαμηλών όσο και μικροκυματικών συχνοτήτων.

Τα συστήματα κινητών επικοινωνιών τρίτης γενιάς (UMTS), πρόκειται να χρησιμοποιούν τη ζώνη συχνοτήτων 2.0 GHz, τόσο για τις επίγειες όσο και τις δορυφορικές τους συνιστώσες.

Παρουσιάζει ενδιαφέρον να αναφερθεί ότι, η θέση σε λειτουργία ενός πολύ εξελιγμένου τεχνολογικού συστήματος κινητών επικοινωνιών, παγκόσμιος κάλυψη με χρήση μεγάλου αριθμού δορυφορικών κινητών επικοινωνιών, με την ονομασία IRIDIUM, δεν γνώρισε εμπορική επιτυχία, λόγω υψηλού κόστους και ανταγωνισμού από επίγεια συστήματα κινητών επικοινωνιών, όπως το GSM. Εξετάζοντας τις εξελίξεις σε διάφορα προγράμματα

έρευνας και ανάπτυξης, φαίνεται ότι, η πρώτη αυτή αρνητική εμπειρία στη χρήση ενός, πραγματικά, εξελιγμένου δορυφορικού συστήματος, δεν πρόκειται να σταματήσει την προσπάθεια αξιοποίησης των δορυφορικών επικοινωνιών, για παροχή νέων υπηρεσιών επικοινωνιών.

Η προβλεπόμενη κατεύθυνση ανάπτυξης, είναι η εμφάνιση δορυφορικών τεμαχικών συσκευών επικοινωνίας, που θα παρέχουν μετάδοση πληροφοριών ευρείας ζώνης (εικόνα, φωνή και δεδομένα), στη μορφή ενός γρήγορου τεμαχικού πολυμέσου, το οποίο θα συνδέεται στο διαδίκτυο. Οι μελλοντικές ζώνες συχνοτήτων, που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, είναι αυτές των 24 και 38 GHz, ενώ προβλέπεται και η χρήση, αργότερα, της ζώνης συχνοτήτων 110 GHz. Η ανάπτυξη τέτοιων τεμαχικών, απαιτεί τη σχεδίαση νέων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων MMIC, νέου τύπου κεραίων υψηλών συχνοτήτων και εφαρμογή αποδοτικών μεθόδων διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης σημάτων.

Επίγεια Ασυρματικά Δίκτυα.

Η ανάγκη μετάδοσης σημάτων ευρείας ζώνης, κάτω από συνθήκες πολλών παροχών υπηρεσιών τηλεφωνίας και πρόσβασης σε δίκτυα υπολογιστών, έχει καταστήσει αναγκαία τη μετάδοση σημάτων ευρείας ζώνης, μέσω επίγειων ασυρματικών δικτύων. Για το λόγο αυτό, επιβάλλεται η ανάπτυξη και παραγωγή, σε ευρεία κλίμακα, πομποδεκτών, που λειτουργούν σε μικροκυματικές (π.χ. 5,8, 24 GHz) ή ακόμα και σε χιλιοστομετρικές (94 GHz) συχνότητες και μπορούν να μεταδίδουν ψηφιακές ροές πληροφοριών υψηλών ταχυτήτων, π.χ. 2-34 Mbit/s. Η μαζική ζήτηση για τους πομποδέκτες αυτούς, αποτελεί σημαντικό παράγοντα, πράγμα που θα απαιτήσει την ανάπτυξη νέου τύπου ολοκληρωμένων κυκλωμάτων MMIC και κεραίων, που να προσαρμόζονται στο οικιακό περιβάλλον.

Οπτικά Συστήματα Τηλεπικοινωνιών.

Σήμερα, παρ' όλο που οι οπτικές επικοινωνίες αποτελούν αυτόνομο τεχνολογικό κλάδο στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, έχουν άμεση σύνδεση με τη μικροκυματική τεχνολογία. Τα τελευ-

ταία χρόνια, έχει αυξηθεί σημαντικά η σύζευξη των δύο αυτών τεχνολογικών περιοχών. Σε κάθε περίπτωση, επειδή όλο σχεδόν το περιβάλλον των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων στην περιφέρειά του, αποτελείται από ηλεκτρικές διατάξεις, η μετατροπή, από μικροκυματικά σε οπτικά σήματα, προϋποθέτει τη χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, λειτουργούν σε ταχύτητες δεκάδων Gbit/s. Τα κυκλώματα αυτά, βσιίζονται

σε τεχνολογία MMIC.

6) Συμπεράσματα.

Η τεχνολογία Μικροκυματικών Συστημάτων, σήμερα, αποτελεί κύριο άξονα στην ανάπτυξη του ευρύτερου τομέα τηλεπικοινωνιών.

Η αναγκαioτητα μετάδοσης, όλο και μεγαλύτερης ροής ψηφίων ανά μονάδα χρόνου, η συνεχής αύξηση της ταχύτητας επεξεργασίας των υπολογιστών και η σύζευξη οπτικών και μικρο-

κυματικών συστημάτων, αυξάνει τη σημασία της τεχνολογίας μικροκυμάτων.

Η ικανότητα σχεδίασης και ανάπτυξης μονολιθικών ολοκληρωμένων μικροκυματικών κυκλωμάτων, αποτελεί κύριο άξονα των σύγχρονων εξελίξεων, στον τεχνολογικό αυτό τομέα.

Βιβλιογραφία.

1. D. Hondros and P. Debye, Ann. Phys., τόμος 32, σελ. 465 (1910.)